



Genauere Messungen dank Massebestimmung unter Konstantdruck

METAS nahm kürzlich einen 10 kg-Massekomparator für Messungen unter konstantem Luftdruck in Betrieb. Damit ist METAS weltweit das erste Metrologieinstitut, das im ganzen Bereich von 10 g bis 10 kg Massebestimmung unter Konstantdruck durchführen kann. Die Genauigkeit wird dadurch um den Faktor 10 verbessert.

PETER FUCHS

Masse- und Gewichtsbestimmungen gibt es, seit Handel betrieben wird. Scheinbar ist es ein altes und sehr einfaches Messverfahren. Erst bei genauerer Betrachtung erkennt man, dass Masse nur indirekt und nicht ohne weiteres gemessen werden kann. Sie unterliegt verschiedensten Einflussfaktoren; Massebestimmung der höchsten Genauigkeit hängt buchstäblich auch vom Wetter ab!

Luftauftrieb berücksichtigen

Nach dem Prinzip des Archimedes erfährt jeder Körper in Luft – gleich wie in Flüssigkeiten – einen Auftrieb, welcher der Gewichtskraft entgegen wirkt. Dieser Auftrieb entspricht der Gewichtskraft der durch den Körper verdrängten Luft. Änderungen des Luftdrucks, z. B. durch eine herannahende Hoch- oder Tiefdrucklage, beeinflussen das Resultat der Massebestimmung erheblich. Die Luftdichte spielt die zentrale Rolle im Messunsicherheitsbudget.

Das Kilogramm ist bis heute die letzte Basiseinheit, die auf einem materialisierten Artefakt beruht. Das Mass aller Dinge ist der Internationale Kilogramm-Prototyp. Er stammt aus dem Jahr 1879, besteht aus 90 % Platin und 10 % Iridium und wird im Bureau Inter-



1: Drei in Druckkammern installierte Massekomparatoren für die Massebestimmung von 10 g bis 1 kg. Der Turm mit den Messgeräten dient zur genauen Bestimmung der Luftdichte in den Druckkammern.

national des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres bei Paris aufbewahrt. Die Weitergabe der Masse-Einheit erfolgt durch direkten Vergleich dieses Prototyps mit den Primär- und Arbeitsnormalen des BIPM und mit den Kilogramm-Prototypen der nationalen Metrologieinstitute wie METAS.

Die Normale sind in der Regel aus einer identischen Platin-Iridium-Legierung gefertigt. Ein grosser Vorteil dieser Legierung ist ihre hohe Dichte. Dadurch sind die Volumen und die Volumenunterschiede der Normale sehr klein, wodurch sich Ungenauigkeiten und Luftdichteschwankungen weniger stark auswirken.

Grosser Einfluss des Luftdrucks

Der entscheidende Schritt geschieht bei der Weitergabe von den nationalen Kilogramm-Prototypen zu den Arbeitsnormalen aus Stahl. Das Volumen des Urkilogramms aus Platin-Iridium ist mit ca. 46 cm³ lediglich ein Drittel so gross wie das Volumen eines 1 kg-Gewichts aus Stahl mit 125 cm³. Selbst bei konstantem Druck verursacht der Fehler der genauesten Luftdruckmessung eine Messunsicherheit von ca. 14 µg; das ist rund hundertmal mehr als beim Vergleich von zwei 1 kg-Gewichtsstücken aus Stahl. Ändert sich während der Messung zusätzlich der Luftdruck, werden die Messunsicherheiten zu

gross und die Messung muss unter besseren Bedingungen wiederholt werden.

Ausserhalb der nationalen Messbasis arbeitet man fast ausschliesslich mit Stahlgewichten. Wegen der geringeren Dichte und den grossen Dichteschwankungen von Stahllegierungen spielt auch hier der Luftdruck eine entscheidende Rolle.

Je nach Wetterlage schwankt der Luftdruck in Bern-Wabern zwischen 930 hPa und 970 hPa. Bei der Massebestimmung von Stahlgewichten würde eine Luftdruckänderung von 40 hPa während der Messung die Masse eines 1 kg-Gewichtsstückes scheinbar um bis zu 50 µg ändern. Eine solche Änderung muss teilweise rechnerisch korrigiert werden. Vor allem bei – im Vergleich zur Messdauer – schnellen Änderungen lassen sich wegen der sehr unterschiedlichen Integrationsdauer zwischen Druck- und Massebestimmung Korrekturen nur teilweise und sehr umständlich durchführen. Im Gegensatz dazu können die Druckunterschiede in einer Druckkammer während der gesamten Messdauer auf unter 0.02 hPa reduziert werden; dadurch reduziert sich auch die luftdruckbedingte Messunsicherheit auf ein paar Zehntel µg!

Luftdichte Druckkammern

Um den störenden Einfluss der Luftdichteschwankungen zu eliminieren, sind bei METAS mehrere Massekomparatoren in luftdichten Druckkammern installiert worden. Wetterbedingte Messunsicherheiten können so auf ein Minimum von einigen Zehnteln µg reduziert werden. Mit einer Membranpumpe wird der Luftdruck zudem auf einen festen absoluten Wert gebracht und konstant gehalten. Dadurch können Messungen von verschiedenen Komparatoren, wie man sie für Ableitungen braucht (siehe Kasten), besser miteinander verglichen werden.

In Zusammenhang mit der Watt-Waage von METAS hat die Metrotec Engineering AG, Nänikon, 1997 den ersten kommerziellen Komparator, der unter Konstantdruck arbeitet, entwickelt. Dieses Instrument ist bis heute

der High-end-Massekomparator und eines der Aushängeschilder von Mettler-Toledo. Er ist nicht nur im Masselabor von METAS, sondern auch in zwölf weiteren nationalen Metrologieinstituten zu finden.

Neben diesem 1-kg-Basiskomparator rüsteten die METAS-Metrologen in eigener Regie drei weitere Komparatoren um: Für den 100-g-Komparator liess sich eine bestehende Vakuumkammer reaktivieren und modifizieren.

Dank guten Kontakten nach Russland gelang es den METAS-Mitarbeitern zudem, in St. Petersburg eine speziell beschichtete Titan-Kammer zu beschaffen. Bei vergleichbarem Preis ist diese Kammer viermal leichter als eine Stahlkammer, und auch bezüglich Oberfläche und magnetischen Eigenschaften weist sie wesentliche Vorteile auf. Der 10 kg-Komparator von METAS wurde in diesem Druckbehälter installiert.

METAS weltweit führend

Damit ist METAS das erste nationale Metrologieinstitut auf der ganzen Welt, das die Masse über den gesamten Bereich von 10 g bis 10 kg bei konstantem und sogar bei gleichem absolutem Luftdruck bestimmen kann. Dadurch wird nicht nur die Genauigkeit der Einzelmessung um den Faktor 10 verbessert, sondern auch die Genauigkeit bei der Wei-



2: Der Druckbehälter des 10 kg-Komparators besteht aus Titan-Stahl und stammt aus St. Petersburg.

tergabe der Masse-Einheit an Gewichtsstücke von Bruchteilen oder Vielfachen eines Kilogramms: Die Genauigkeit der ganzen Ableitung vom nationalen Kilogramm-Prototyp wird auf diese Weise erheblich verbessert. Dies ist besonders auch für die Rückverfolgbarkeit des 100-g-Gewichtsstückes der Watt-Waage und somit für eine mögliche Neudefinition der Masse-Einheit Kilogramm von zentraler Bedeutung [1].

Referenz

[1] A. Eichenberger, B. Jeckelmann, P. Richard, Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods, *Metrologia*, 40, pp. 356-365, 2003.

Ableitungen

Zum Aufbau einer Masse-Skala muss die Masse-Einheit von einem Kilogramm auch auf Bruchteile und Vielfache eines Kilogramms weitergegeben werden.

Eine solche Weitergabe wird als Ableitung bezeichnet. Dazu verwendet man normalerweise Gewichtssätze, die aus möglichst ganzzahligen Bruchteilen oder Vielfachen bestehen. In der Regel besteht jede Dekade eines Gewichtssatzes aus vier Gewichtsstücken mit einer 1-2-2-5-Teilung. Auf der Stufe kg besteht der Satz aus Gewichtsstücken mit den Nennwerten 100 g, 200 g, 200 g* und 500 g. Um Gewichtsstücke mit dem gleichen Nennwert unterscheiden zu können, ist es sinnvoll, eines der beiden speziell zu kennzeichnen, z. B. mit einem *. Nach unten und oben besteht die gleiche Teilung, jedoch mit einem zehnfach grösseren oder kleineren Nennwert; das heisst 10 g, 20 g, 20 g* und 50 g sowie 1 kg, 2 kg, 2 kg* und 5 kg. Aus einem solchen Gewichtssatz lassen sich durch Kombination der Einzelgewichte sämtliche möglichen Gewichte erzeugen.

Der Aufbau einer Masse-Skala mit solchen Gewichtssätzen hat einen weiteren Vorteil: Um die Genauigkeit bei der Bestimmung der Massen dieser Gewichtssätze zu verbessern, werden auf der höchsten Präzisionsstufe nicht nur einzelne Vergleiche zwischen zwei gleichen

Massen durchgeführt, sondern ein ganzer Massesatz wird in sich selbst verglichen; das heisst über eine oder mehrere Dekaden vergleicht man alle möglichen Gewichtskombinationen:

$$1 \text{ kg} = 100 \text{ g} + 200 \text{ g} + 200 \text{ g}^* + 500 \text{ g}$$

$$500 \text{ g} = 100 \text{ g} + 200 \text{ g} + 200 \text{ g}^*$$

$$200 \text{ g} = 100 \text{ g} + 50 \text{ g} + 20 \text{ g} + 20 \text{ g}^* + 10 \text{ g}$$

$$200 \text{ g}^* = 100 \text{ g} + 50 \text{ g} + 20 \text{ g} + 20 \text{ g}^* + 10 \text{ g}$$

$$100 \text{ g} = 50 \text{ g} + 20 \text{ g} + 20 \text{ g}^* + 10 \text{ g}$$

$$50 \text{ g} = \dots$$

Die Messungen können beliebig in Richtung grösserer oder kleinerer Nennwerte ergänzt werden. Alle Messungen zusammen ergeben ein Gleichungssystem für den Gewichtssatz. Da die einzelnen Gewichte bei verschiedenen Vergleichen mehrfach benutzt werden, führt die rechnerische Auflösung dieses Gleichungssystems zu der bestmöglichen Massebestimmung der einzelnen Gewichtsstücke. Natürlich ist die Genauigkeit der Ableitung wieder von der Konstanz der Umgebungsbedingungen abhängig. Der Luftauftrieb spielt auch hier die entscheidende Rolle. Einerseits werden durch konstante Bedingungen die Standartabweichungen der Einzelmessungen redu-

ziert. Andererseits erstreckt sich eine solche Ableitung über einen längeren Zeitraum und man benützt verschiedene Komparatoren.

Kann man alle Vergleiche unter konstantem und identischem Absolutdruck durchführen, erhöht sich die Genauigkeit um Faktoren. Zudem wird der Einfluss von Dichteunterschieden zwischen den einzelnen Gewichtsstücken weitgehend eliminiert. Die Dichte von Stahl weist nämlich eine erhebliche Bandbreite auf; für OIML-Gewichte der höchsten Genauigkeitsklasse dürfen diese Dichteunterschiede fast $\pm 1\%$ betragen. Bleibt der Luftdruck nicht konstant, verursachen diese Dichteunterschiede zwischen einzelnen Gewichtsstücken erhebliche Messabweichungen.



3: Vergleich eines 20 g Gewichtsstückes (rechts) mit einem Stapel von Gewichtsstücken, zusammengesetzt aus 10 g + 5 g + 2 g + 2 g + 1 g (links).