

Das Prinzip der Watt-Waage

Von Marlene Rau and Eleanor Hayes

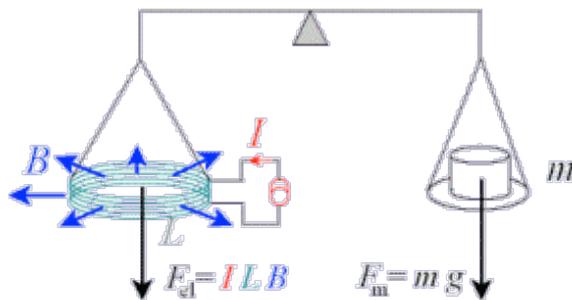
Die Watt-Waage ist ein Gerät zur sehr genauen Gewichtsbestimmung einer Testmasse. Auf der ganzen Welt liegen Wissenschaftler im Wettstreit darum, eine Watt-Waage mit noch nie da gewesener Präzision zu bauen.

Messungen mit der Watt-Waage werden in zwei Schritten durchgeführt: einer statischen Wägephase und einer dynamischen Bewegungsphase.

Während der Wägephase hängt ein Testmasse an einem der beiden ausgestreckten Arme der Waage. Am anderen Arm hängt eine Spule, die in ein horizontales Magnetfeld eingetaucht ist. Fließt ein elektrischer Strom I durch die Spule, entsteht durch die Wechselwirkung zwischen dem Strom und dem Magnetfeld eine vertikale elektromagnetische Kraft:

$$F_{el} = ILB$$

wobei L für die Länge des Drahtes der Spule und B für die magnetische Flussdichte steht.



Die statische Wägephase

Mit freundlicher Genehmigung des BIPM

As the weight of the test mass (F_m) is given as $F_m = mg$

wobei m = Masse und g = Gravitationsbeschleunigung ist.

Wenn sich die Waage im Gleichgewicht befindet, ergibt sich:

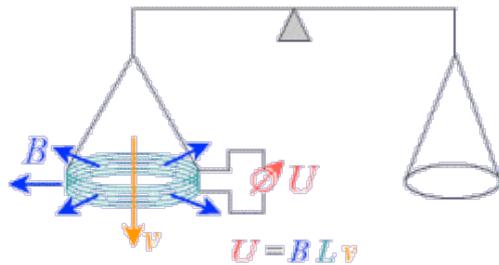
$$mg = ILB.$$

Die Gravitationsbeschleunigung g lässt sich sehr genau bestimmen, wohingegen B und L Ungenauigkeiten inhärent sind. Um diese zu umgehen, wird als Trick eine Bewegungsphase verwendet, die eine Formel ergibt, aus der sich B und L herauskürzen lassen.

Für die Bewegungsphase wird die Testmasse entfernt und die Spule wird mit einer konstanten Geschwindigkeit vertikal durch das horizontale Magnetfeld bewegt. Dies induziert in der Spule eine Spannung, die sich messen lässt.

Zusatzmaterial zu:

Hayes E, Rau M (2012) Beweisstücke abwägen: Was ist ein Kilo? *Science in School* 25: 59-64. www.scienceinschool.org/2012/issue25/metrology/german



Die dynamische Bewegungsphase

Mit freundlicher Genehmigung des BIPM

Die induzierte Spannung (U) ergibt sich aus:

$$U = BLv$$

wobei B = magnetische Flussdichte des horizontalen Magnetfelds; L = Länge des Spulendrahts und v = Geschwindigkeit, mit der die Spule durch das Magnetfeld bewegt wird.

B und L lassen sich nun herauskürzen. Bekannt ist, dass:

$$mg = ILB$$

und dass:

$$U = BLv$$

Durch Umformen dieser Gleichungen ergibt sich:

$$\underline{mg} = LB$$

$$I$$

und:

$$\underline{U} = BLv$$

$$v$$

Durch Kombinieren der beiden Gleichungen erhält man:

$$UI = mgv.$$

Anders ausgedrückt heißt dies, dass die elektrische Leistung (UI) gleich der mechanischen Leistung (mgv) ist, oder $P_{el} = P_{mech}$. Nach diesem Prinzip funktioniert die Watt-Waage.

Zur Bestimmung der Masse gilt:

$$m = \underline{UI}$$

$$gv$$

Die Geschwindigkeit v lässt sich einfach und mit hoher Genauigkeit bestimmen, wogegen für ausreichend genaue Messungen von I und U Kenntnisse in der Quantenmechanik benötigt werden. Zwei Phänomene, der sogenannte Josephson-Effekt und der Quanten-Hall-Effekt, ermöglichen es, den Widerstand und die Spannung genau zu bestimmen, wodurch sich auch die Stromstärke berechnen lässt (ohmsches Gesetz).

Zusatzmaterial zu:

Hayes E, Rau M (2012) Beweisstücke abwiegen: Was ist ein Kilo? *Science in School* **25**: 59-64. www.scienceinschool.org/2012/issue25/metrology/german

Jedes der metrologischen Institute hat seinen eigenen, manchmal sehr großen, instrumentellen Aufbau. Eine so komplexe Vorrichtung macht es natürlich schwierig, die benötigte Genauigkeit zu erzielen. Der Magnetkreis ist eines der wichtigsten Elemente der Watt-Waage, da das Magnetfeld B und die Länge der Spule L während beider, der statischen und der dynamischen Phase, unverändert bleiben müssen. Ihre genauen Werte brauchen nicht bekannt zu sein, entscheidend ist nur, dass sie sich nicht verändern. Solche Veränderungen können vor allem durch Temperatureffekte entstehen.

In einer Zusammenarbeit von Wissenschaftlern des Eidgenössischen Institut für Metrologie (METAS) und des CERNs gelang es einen ultrastabilen temperaturkompensierten Magneten zu entwickeln. Dieser wird Teil einer neuen Watt-Waage werden und soll deren Genauigkeit gegenüber dem gegenwärtigen Aufbau um ungefähr eine Größenordnung verbessern.

Zusatzmaterial zu:

Hayes E, Rau M (2012) Beweisstücke abwiegen: Was ist ein Kilo? *Science in School* **25**: 59-64. www.scienceinschool.org/2012/issue25/metrology/german