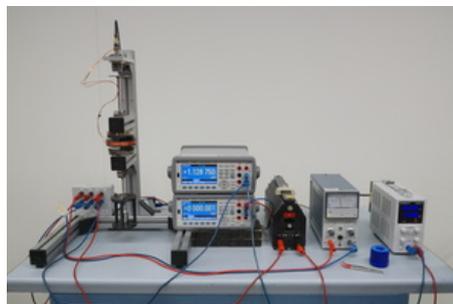


## ME-113 Die Watt-Waage

Seit dem 20.5.2019 ist das Kilogramm nicht mehr über das Ur-Kilogramm definiert, sondern durch die Festlegung des Planck'schen Wirkungsquantums auf den Wert  $h = 6.62607015 \cdot 10^{-34}$  Js. Jede Messung des Planck'schen Wirkungsquantums erlaubt damit eine Bestimmung des Kilogramms. Die „Watt-Waage“ (oder auch Kibble-Waage) ist eines der beiden Messverfahren, die von den Metrologie-Instituten verwendet werden, um das Kilogramm mit einer Unsicherheit im Bereich von  $10^{-8}$  zu bestimmen. Dabei wird die Messung der Gewichtskraft einer Masse auf die Messung einer Spannung und eines Stromes zurückgeführt, welche ihrerseits über den Josephson- und den Quanten-Hall-Effekt auf das Planck'sche Wirkungsquantum bezogen werden. Während eine solche Messung im Rahmen der Sammlung nicht zu leisten ist, wird mit dem hier beschriebenen Versuch zumindest das Prinzip der Wägung durch Messung einer Spannung und eines Stroms gezeigt und damit der Name „Watt-Waage“ anschaulich gemacht. Spannung und Strom werden hier mit Multimetern gemessen und die erreichbare Genauigkeit liegt im Bereich einiger Prozent.



In diesem Versuch wird die Masse eines 100g-Gewichts bestimmt, wobei dieses der OIML-Klasse E2 entspricht, d.h. eine Toleranz von 0.16mg aufweist.

Der hier skizzierte Aufbau besteht aus folgenden Komponenten:

- einem Wägeteller für das Gewicht, welcher über Federn beweglich aufgehängt ist;
- einem Abstandssensor, welcher die relative Position des Gewichts misst; dieser Sensor misst induktiv den Abstand zur kleinen Metallplatte;
- einer Solenoidspule (Leiterschleife) mit unbekannter Drahtlänge  $L$ ;
- und zwei mit ihren Nordpolen zueinander montierten Permanentmagneten, welche ein inhomogenes Magnetfeld der Stärke  $B$  erzeugen, in welchem sich die Spule befindet.

Die Messung besteht aus zwei Schritten: einer statischen Wägung, und einer dynamischen Messung.

### Schritt 1: Wägung

Der Abstandssensor wird mit einer Spannung versorgt (zwischen 12V und 35V) und das Ausgangsspannungssignal, welches proportional zum Abstand ist, wird mit einem Tischmultimeter gemessen. Der Wert wird zunächst über die "Null"-Taste auf 0 gestellt. Nun wird das Gewicht auf den Teller gelegt. Die Gewichtskraft führt zu einer Positionsänderung, d.h. einer Änderung der Spannung. Nun wird eine Spannung an die Spule angelegt und der Strom  $I$  soweit erhöht, bis der Abstand wieder bei 0 ist. Die Gewichtskraft,  $F_G = m \cdot g$ , wurde durch die Lorentzkraft  $F_{\text{Lorentz}} = B \cdot I \cdot L$  gerade kompensiert, so dass gilt:  $m = B \cdot I \cdot L / g$ .

### Schritt 2: Bestimmung von $B \cdot L$

Da  $B$  und  $L$  nicht bekannt sind, wird eine zweite Messung durchgeführt. Hierfür wird ausgenutzt, dass in der Spule bei Bewegung mit Geschwindigkeit  $v$  eine Induktionsspannung  $U$  erzeugt wird, wobei gilt:  $U = v \cdot B \cdot L$  oder eben:  $B \cdot L = U / v$ . Die Spule wird händisch in Schwingung versetzt.

Das Gewicht wird hierfür entfernt, denn die Position der Spule im inhomogenen Magnetfeld soll identisch sein zu der Position während der Wägungsmessung, wo ja der Spulenstrom gerade so eingestellt wird, dass die Position jener ohne Gewicht entspricht. Da in diesem Messteil aber kein Strom durch die Spule fließt, wird diese Position nur ohne Gewicht erreicht. Weg sowie Spannung werden mit dem USB-Oszilloskop (PicoScope) aufgezeichnet. Das Anstupsen sollte man ein paar Mal ausprobieren, damit einerseits der Trigger ausgelöst wird und man andererseits nicht in Sättigung gerät. Das Programm bestimmt direkt Maximum und Minimum des Abstands, die Schwingungsfrequenz, sowie die Maximalspannung. Unter der Annahme, dass es sich um eine Sinusschwingung handelt, wird die Maximal-Geschwindigkeit aus der Amplitude  $A$  und Kreisfrequenz  $\omega$  berechnet als:  $v = \omega \cdot A = 2\pi \cdot f \cdot A = 2\pi \cdot f \cdot k \cdot (U_{\max} - U_{\min})/2$ , wobei  $k$  die Charakteristik des Abstandssensors ist. Hierfür kann das unten verlinkte Excel-Sheet genutzt werden.

Es gilt dann insgesamt:  $m = I \cdot U / (v \cdot g)$ .

## Aufbau



## Resultat

Strom der Wägung: 1.1306A.

Screen-Shot der Messung von Abstand und induzierter Spannung mit dem PicoScope: png

Damit ergibt sich eine Masse von 99.40g. Siehe hierzu auch die im oben verlinkten Excel-Sheet eingefüllten Werte.

Die Unsicherheit der Messung wurde aufgrund der Genauigkeit der Messgeräte mit 3-4% abgeschätzt.