

Das Galilei-Thermometer Termometro Lento

Christian Ucke und Hans-Joachim Schlichting

Träge bewegen sich farbige Glaskugeln in einem schlanken Zylinder und zeigen die Temperatur an. Schon seit über 300 Jahren bewährt sich das Konstruktionsprinzip dieses ästhetisch ansprechenden Thermometers.

Hauptsächlich bei Optikern, aber auch in speziellen Geschenk-Boutiquen [1] gibt es unter dem Namen Galilei-Thermometer ein schlankes zylindrisches, flüssigkeitsgefülltes und oben verschlossenes Glasgefäß mit bunten, darin schwebenden Kugeln. Die italienische Bezeichnung *Termometro Lento* ist in Deutschland ebenfalls gebräuchlich. Sie weist schon auf das Verhalten hin: die Anzeige der Temperatur folgt nur träge bzw. langsam einer Veränderung. Auf Galilei scheint dieses Thermometer aber garnicht zurückzugehen. In einem Standardwerk über Thermometer [2] wird festgestellt, daß kein geringerer als der Großherzog der Toskana, Ferdinand II. aus der Familie der Medici etwa um 1641 in Florenz dieses Thermometer erfunden habe. Im Museo di Storia della Scienza in Florenz sind einige sehr aparte und alte und vermutlich sogar auf den erwähnten Großherzog zurückgehende Exemplare derartiger Thermometer unter dem Namen *'Termometro infingardi'* (infingardi = langsam) vorhanden [3].

Nicht nur als dekoratives Raumthermometer gibt es diese Vorrichtung. Im dem sehenswerten Glasmuseum in Wertheim [4] habe ich sogar eine wunderschöne Ausführung als tragbares, kleines Thermometer gesehen; es wurde in langwieriger Handarbeit einem (Fieber-) thermometer aus Florenz nachgebaut. Solche Stücke sind heute unbezahlbar.

Die Funktionsweise des Thermometers ist prinzipiell recht einfach. Die Flüssigkeit im Zylinder dehnt sich mit steigender Temperatur aus und verringert dabei ihre Dichte. In der Flüssigkeit schweben mehrere, ihrerseits wieder mit einer farbigen Flüssigkeit gefüllte Glaskugeln mit einer angehängten Plombe, auf der eine Temperatur vermerkt ist. Da Glas sich um den Faktor zehn und mehr weniger stark ausdehnt als die Flüssigkeit, kann man die Glaskugeln mit ihrem Volumen und ihrer



Ein Galilei-Thermometer mit farbigen Kugeln.

Masse, d.h. ihrer mittleren Dichte so einstellen, daß sie bei der angegebenen Temperatur gerade noch oben schwimmen und bei höherer Temperatur sinken.

In einem breiten Glaszylinder würden nun allerdings alle Kugeln an der Flüssigkeitsoberfläche schwimmen, deren mittlere Dichte kleiner als die der Flüssigkeit ist. Die Ablesung der Temperatur an den Plomben wäre möglich aber mühsam. Damit die Temperatur schnell und eindeutig erkennbar wird, sind die Durchmesser der Glaskugeln etwas größer als der halbe Innendurchmesser des Glaszylinders. Dadurch läßt sich erreichen, daß die unterste der oben schwimmenden Glaskugeln die Flüssigkeitstemperatur charakterisiert. Auch die bei manchen Ausführungen farblich unterschiedlich gefüllten Glaskugeln erlauben eine schnelle Differenzierung. In den schon erwähnten Museen gibt es weitere Ausführungen, bei denen für jede Kugel ein eigener Zylinder angesetzt ist.

Übrigens handelt es sich in gewisser Hinsicht um ein frühes Exemplar eines digitalen Thermometers. Ablesbar sind nur ganze Schritte und keine Zwischenwerte. Üblich sind bei diesen Thermometern Schritte (digits) von 1°C ; bei einfacheren Ausführungen auch 2°C .

Wichtig ist ferner der gasgefüllte Hohlraum oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche und zwar sowohl bei dem Glaszylinder selbst als auch in den flüssigkeitsgefüllten Glaskugeln. Da sich die Flüssigkeit schneller ausdehnt als das Glas, würde das Glasgefäß ohne diesen Hohlraum als Reserveausdehnungsraum bersten können. Prinzipiell würde das Galilei-Thermometer auch mit einem oben offenen Zylinder funktionieren. Da jedoch alle geeigneten Flüssigkeiten einen niedrigen Siedepunkt aufweisen und deswegen schnell verdunsten würden und auch nicht immer sehr angenehm riechen, ja eventuell sogar gesundheitsschädlich sind, ist der Glaszylinder verschlossen. So hält sich das Thermometer gegebenenfalls Jahrhunderte.

Eine genauere Betrachtung des Galilei-Thermometers könnte noch die Abhängigkeit der Dichte der Füllflüssigkeit vom Druck, d.h. von der Höhe der Flüssigkeitssäule einbeziehen [5]. Wegen der geringen Kompressibilität von Flüssigkeiten hat das hier keine praktische Bedeutung. Viel wichtiger sind Temperaturschichtungen. Umfaßt man den Zylinder nur oben mit den Händen, erwärmt sich die Flüssigkeit auch nur oben. Eine entsprechende Kugel sinkt dann bis zur Grenze der Temperaturschicht und hält sich dort sogar längere Zeit frei schwebend. Bei diesem Experiment ist es naturgemäß wichtig, den Zylinder nicht zu bewegen, sodaß keine Strömungen bzw. Verwirbelungen auftreten.

Mit etwas Aufwand läßt sich eine Prinzipversion eines Galilei-Thermometers selbst bauen. Wer glasbläserisches Geschick hat, kann sich Glashohlkörper formen, die etwa bei 20°C noch an der Oberfläche von Wasser schwimmen und bei Temperaturen darüber untergehen. Leichter kann man kleine, wasserdicht verschließbare Fläschchen verwenden, in die man Wasser zur Regulierung der mittleren Dichte einfüllt. Es empfiehlt sich dabei möglichst die Verwendung von destilliertem, blasenfreiem Wasser. Eine vom Ausdehnungskoeffizienten geeignetere und noch mit passablen Aufwand handhabbare und erhältliche Flüssigkeit ist Isopropylalkohol (Isopropanol). In jedem Falle ist das ganze eine zeitlich ziemlich beanspruchende Fummelei, da es auf Milligramm-Genauigkeit ankommt. Es ist aber sehr befriedigend zu beobachten, wie das oben beschriebene Experiment der Temperaturschichtung mit der Hand realisiert werden kann, wenn die ganze Flüssigkeit eine Temperatur unter 20°C aufweist. Man kann auch versuchen, das warme

Wasser in einem umgebenden, kälteren Bad kalt zu unterschichten oder Eiswürfel zu verwenden.

Ausdehnung von Flüssigkeiten

Ist $\rho_f(T_o)$ die Dichte einer Flüssigkeit bei der Temperatur T_o , kann man für viele Flüssigkeiten in einem nicht allzugroßen Temperaturbereich für die Dichte $\rho_f(T)$ linear in Abhängigkeit von der Temperatur T ansetzen:

$$\rho_f(T) = \rho_f(T_o)[1-\beta(T-T_o)] \quad \beta = \text{kubischer Ausdehnungskoeffizient}$$

Für Wasser gilt das nicht gut. Wegen des Dichtemaximums bei 4°C ist ein quadratischer Ansatz angebrachter. Für die reale Konstruktion eines Galilei-Thermometers ist aber die Art der Abhängigkeit unerheblich, solange man nicht ein Dichteminimum oder -maximum überschreitet.

Die Glaskugeln mögen das Volumen V_k und die Masse m_k besitzen. Ihre mittlere Dichte beträgt $\rho_k = m_k/V_k$. Da der kubische Ausdehnungskoeffizient von Glas erheblich kleiner als der der Flüssigkeiten ist, kann man ρ_k hinreichend genau als konstant ansetzen. Falls $\rho_k > \rho_f$ sinken die Kugeln nach unten.

Für die von einer Glaskugel verdrängte Flüssigkeitsmasse ergibt sich

$$m_f = \rho_f(T) \cdot V_k = \rho_f(T_o)[1-\beta(T-T_o)] \cdot V_k$$

Daraus folgt bei einer Temperaturänderung ΔT

$$\Delta m_f = \rho_f(T_o) \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot V_k$$

Das tatsächliche Volumen der Glaskugeln in Galilei-Thermometern beträgt $V_k \approx 10\text{cm}^3$. Nimmt man für die Füllflüssigkeit beispielhaft Ethanol, ergibt sich für ein $\Delta T = 1\text{K}$

$$\Delta m_f = 0,79\text{gcm}^{-3} \cdot 1,10 \cdot 10^{-3}\text{K}^{-1} \cdot 1\text{K} \cdot 10\text{cm}^3 = 0,00869\text{g} \approx 9\text{mg}$$

In dieser Größenordnung liegt also der Massenunterschied (bei konstantem Volumen) zweier um 1°C unterschiedlichen Glaskugeln. Die Fertigung der Glaskugeln muß aber noch viel genauer sein, damit die an der Plombe angezeigte Temperatur einigermaßen der realen Temperatur entspricht. In Wirklichkeit werden die Glaskugeln nicht so exakt mit der Masse abgestimmt, denn auch das Volumen unterliegt ja glasbläserisch herstellungsbedingt Schwankungen. Vielmehr werden sehr genau temperaturstabilisierte Bäder verwendet, um die mittlere Dichte der Glaskugeln dann experimentell zu ermitteln.

Werden Flüssigkeiten höherer Dichte und größerem kubischen Ausdehnungskoeffizienten benutzt, ergeben sich in der obigen Rechnung auch größere Massendifferenzen und damit günstigere Herstellungsbedingungen. Solche Flüssigkeiten bzw. Flüssigkeitsgemische werden von den Herstellern geheimgehalten bzw. sogar patentiert. Sie unterliegen heute erhöhten Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen. Früher hat man Weingeist (= Ethanol = Äthylalkohol) genommen, zwischendurch wohl auch unangenehmere Chlorverbindungen. Wasser wäre übrigens als Füllflüssigkeit wegen des relativ kleinen Ausdehnungskoeffizienten ziemlich ungeeignet. Auch bestünde die Gefahr des Einfrierens.

Dichte und kubischer Ausdehnungskoeffizient einiger Flüssigkeiten bei 20°C:

Name	Dichte ρ [gcm ⁻³]	kubischer Ausdehnungs- koeffizient $10^3 \cdot \beta$ [K ⁻¹]
Wasser	0,998	0,207
Ethanol (=Weingeist)	0,789	1,10
Isopropylalkohol	0,785	1,06
Tetrachlorkohlenstoff	1,594	1,23
technische Gläser	2,2 - 2,6	0,01 - 0,03

Literatur bzw. Quellen:

- [1] z.B. Apollo-Optik Kette; Physik-Boutique, Stark-Verlag, 85318 Freising
- [2] William E.K. Middleton: A History of the Thermometer, Johns Hopkins Press, Baltimore, 1966
- [3] Catalogo degli strumenti, Florenz 1954
- [4] Glasmuseum Wertheim, geöffnet vom 1.4. bis 31.10. jeden Jahres täglich 10-12 und 14-16 Uhr (außer Montag)
- [5] George D. Nickas: A thermometer based on Archimedes' principle, American Journal of Physics **57** (1989), page 845-846
 Ronald Geballe: Note on "A thermometer based on Archimedes' principle", American Journal of Physics **59** (1991), page 90

Anschriften:

Dr. Christian Ucke, Physikdepartment E20, Technische Universität München, 85748 Garching
 Prof. Dr. Hans-Joachim Schlichting, FB Physik, Universität GH, Universitätsstr. 5, 45117 Essen