

Die Temperatur an die Kette gelegt

Das wenig verbreitete Kettenthermometer hat eine unübliche Anzeige: niedrige Temperaturen sind oben auf einer Skala abzulesen, hohe Temperaturen unten. Das erklärt sich aus der Konstruktion. Es lässt sich mit passablem Aufwand selbst bauen.

Die im thüringischen Ort Mellenbach-Glasbach ansässige Firma Möller-Sommer-Therm [1] hat etwa um 1990 das Kettenthermometer entwickelt und mit zwei Schriften beim Deutschen Patentamt angemeldet [2, 3]. Das Thermometer wurde auch bis etwa 2004 produziert, war allerdings nie sehr verbreitet. Es ist heute relativ unbekannt und kaum noch erhältlich [4]. Es ist eher ein dekoratives Element als ein genaues Messinstrument. Die Messskala ist gerade umgekehrt wie sonst üblich: die großen Temperaturwerte befinden sich unten, die kleinen oben. Daher verleitet eine solche Skala leicht zu Fehlablesungen, da wir gewohnt sind, dass Werte auf senkrecht angeordneten Skalen nach oben hin zunehmen.

Das Thermometer wurde und wird darüber hinaus meist unter die Galileo-Thermometer eingruppiert, insbesondere im angelsächsischen Sprachraum. Diese Einordnung ist jedoch definitiv nicht zutreffend, denn darunter werden üblicherweise Instrumente verstanden, bei denen mehrere Kugeln in einem zylindrischen Gefäß schwimmen und bei denen nur eine stufenweise Anzeige der Temperatur möglich ist (Physik in unserer Zeit **1994**, 25(1), 44) [5], sozusagen das erste Digitalthermometer überhaupt. Das Kettenthermometer besitzt hingegen eine analoge Skala mit prinzipiell beliebig feiner Ableseung. Wie das originale Galileo-Thermometer braucht auch dieses Instrument leicht eine Stunde, bis es sich bei einer plötzlichen Temperaturveränderung einem neuen Gleichgewicht genähert hat und eine sinnvolle Ableseung möglich ist.

Im Prinzip ähnlich funktioniert ein Aräometer, auch Senkwaage oder Densimeter genannt. Es dient zur Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten. Auch hier nehmen die am Instrument abzulesenden Werte von unten nach oben ab. Darin kommt der bei beiden Messgeräten ausgenutzte Zusammenhang zwischen Dichte und Temperatur zum Ausdruck.

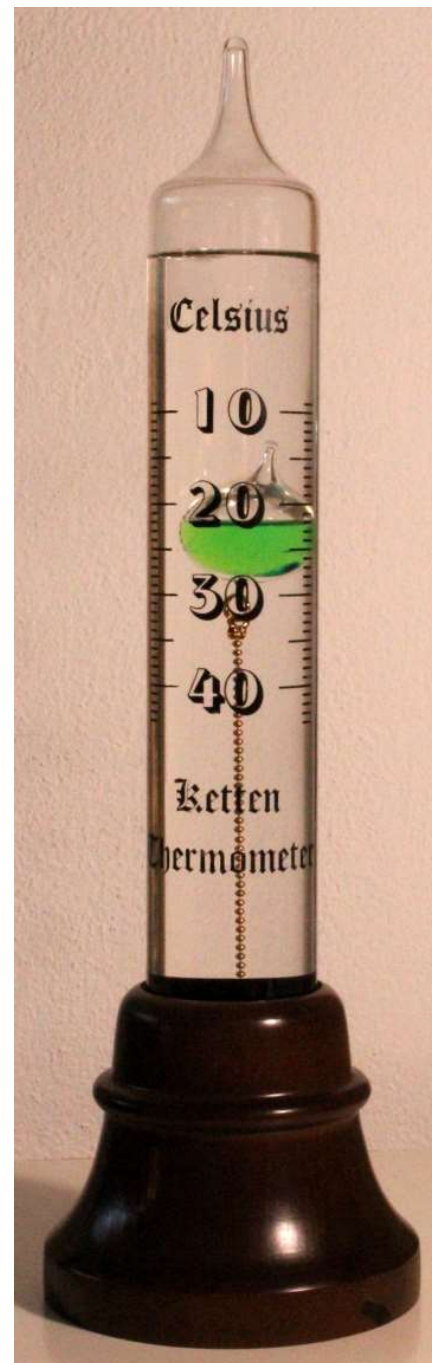


Abb.1: Ein Kettenthermometer enthält **einen** schwimmenden Messkörper (grün gefüllt) mit einer hängend befestigten Kette.

Konstruktion

An der Unterseite des in der Flüssigkeit unter der Oberfläche schwimmenden Messkörpers (Kugel in Abbildung 1) ist eine dünne, flexible und hinreichend lange Kette befestigt, deren Dichte größer ist als die der Flüssigkeit. Das Ende der Kette liegt auf dem Behälterboden lose auf. Mit steigender Temperatur nimmt die Dichte der Flüssigkeit ab, der Messkörper sinkt und legt so viele Kettenglieder auf dem Boden ab, bis Auftriebs- und Gewichtskraft wieder im Gleichgewicht sind.

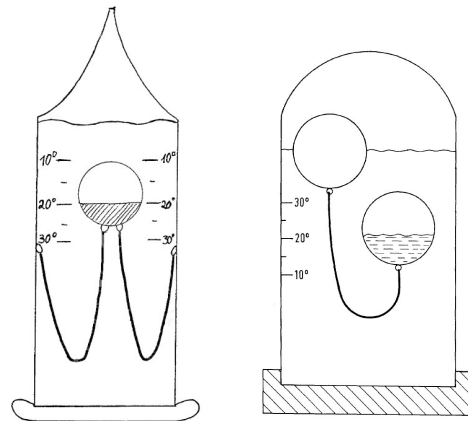


Abb.2: Zwei weitere Galileo-Kettenthermometer (entnommen aus [1], linkes Bild und [2], rechtes Bild).

Wie beim normalen Galileo-Thermometer werden Flüssigkeiten mit hohem kubischen Ausdehnungskoeffizienten verwendet, deren Zusammensetzung die Produzenten geheim halten. Aus den Anmeldungen beim Deutschen Patentamt stammen die beiden Zeichnungen weiterer Variationen von Kettenthermometern (Abbildung 2). Die linke Version [3] verfügt über zwei an dem Messkörper und an gegenüberliegenden Seiten der Zylinderinnenwand angebrachte Ketten. Dadurch wird der Messkörper in der Mitte des Gefäßes zentriert. Die rechte Version [4] ermöglicht ein freies Bewegen der beiden Schwimmkörper im Gefäß. Der eine Körper schwimmt an der Oberfläche, der andere – der Messkörper – schwebt je nach Temperatur in unterschiedlicher Höhe und nimmt dabei unterschiedlich lange Teile der Kette mit. Beide Versionen vermeiden, dass sich eine bis zum Boden reichende und da aufgehäuften Kette verhaken kann. Wir verwenden dennoch aus Gründen der Praktikabilität für den Nachbau die ursprüngliche Ausführung mit nur einer bis zum Boden reichenden Kette.

Ein prinzipiell ähnlicher Effekt ist bei heliumgefüllten Spielzeugballons mit anhängender, ausreichend langer Schnur zu beobachten. Der Ballon steigt solange, bis das Gewicht der immer länger werdenden Schnur den Auftrieb gerade kompensiert. Da das Helium ständig aus dem Ballon heraus diffundiert, sinkt allerdings der Ballon kontinuierlich. Zur Temperaturmessung ist so ein Ballon daher nicht geeignet.

Physik des Kettenthermometers

Eine rechnerische Überlegung kann Hinweise über geeignete Materialien für eine Konstruktion eines Kettenthermometers geben. Seien V_K das Volumen und m_K die Masse des schwebenden Messkörpers, ρ_F die Dichte der Flüssigkeit und h die Länge der Kette vom Aufhängepunkt am Messkörper bis zum tiefsten Punkt der hängenden Kette. Die Masse der verdrängten Flüssigkeit $V_K \rho_F$ muss im jeweiligen Gleichgewichtszustand gerade der Masse des Messkörpers m_K und der Masse der hängenden Kette bis zum tiefsten Punkt entsprechen. Sei d_{Kette} die Masse der Kette pro Länge, so ergibt sich

$$V_K \cdot \rho_F(T) = m_K + d_{Kette} \cdot h \quad (1)$$

Daraus folgt

$$h = (V_K \cdot \rho_F(T) - m_K) / d_{Kette} \quad (2)$$

Für zwei verschiedene Temperaturen T_1 und T_2 ergibt sich eine Höhendifferenz Δh des Messkörpers

$$\Delta h = V_K \cdot (\rho_F(T_2) - \rho_F(T_1)) / d_{Kette} \quad (3)$$

Man sieht, dass Δh umso größer wird, je größer das Volumen V_K des Messkörpers und der Dichteunterschied bei den unterschiedlichen Temperaturen T_1 und T_2 und je kleiner die Relation Masse zu Länge d_{Kette} sind. Δh hängt nicht von der Masse des Messkörpers ab, die Schwebehöhe h hingegen schon.

Beispiel: Als Flüssigkeit wird Wasser gewählt. Der Messkörper habe ein Volumen von $V_K = 30 \text{ cm}^3$; eine Kette möge etwa $d_{Kette} \approx 0,1 \text{ g/cm}$ aufweisen. Mit Gleichung (3) ergibt sich für das Absinken der Kugel bei einer Temperaturänderung von 20°C auf 30°C (mit Wasser $\rho_W(20^\circ\text{C}) = 0,9982 \text{ g/cm}^3$; $\rho_W(30^\circ\text{C}) = 0,99564 \text{ g/cm}^3$)

$$\Delta h = 30 \text{ cm}^3 \cdot (0,99564 \text{ g/cm}^3 - 0,9982 \text{ g/cm}^3) / 0,1 \text{ g/cm} = -0,77 \text{ cm}$$

Das ist sehr wenig. Wasser eignet sich also nicht besonders gut. Hinzu kommt, dass Wasser eine deutlich nichtlineare Änderung der Dichte mit der Temperatur aufweist, weswegen die Ableseskala nichtlinear ausfallen würde [6].

Vorbereitende Messungen zum Bau eines Kettenthermometers

Wir haben die Dichte diverser Flüssigkeiten mit einem Aräometer gemessen sowie Daten aus dem Internet verwendet (Abbildung 3). Ganz oben ist die nichtlineare und schwache Abhängigkeit von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur zu sehen, darunter die entsprechenden Abhängigkeiten von Brennspritus, reinem Ethanol, einer originalen Flüssigkeit aus einem zerstörten Galileo-Thermometer und Tecusol-75 (ein Kaltfettlösemittel).

Innerhalb des dargestellten Temperaturbereichs von 0°C bis 40°C weisen diese Flüssigkeiten eine sehr gute line-

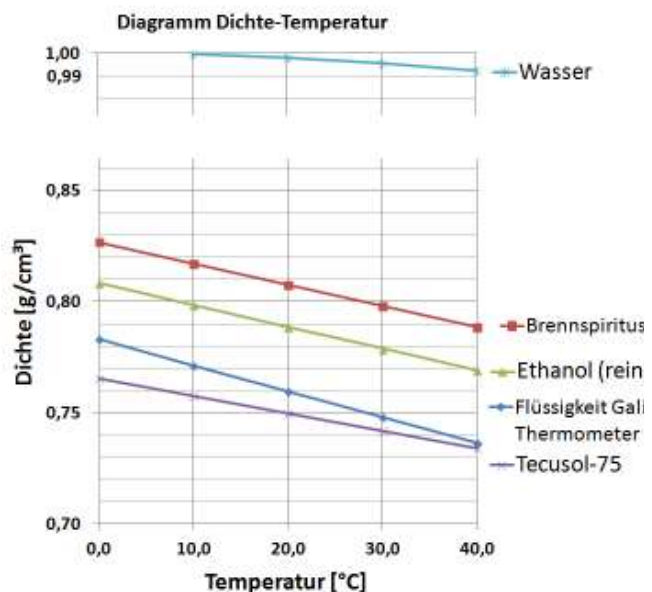


Abb.3: Dichte-Temperatur Diagramm für diverse Flüssigkeiten.

are Abhängigkeit auf. Je größer die Steigung der Geraden, umso besser ist die Flüssigkeit geeignet. Brennspritus ist leicht erhältlich. Er weist eine geringfügig geringere Steigung als reiner Alkohol auf. Das kann an den Zusatzstoffen liegen, mit denen der Alkohol des Brennspritus vergällt ist. Außerdem ist Alkohol hygroskopisch und enthält in der Realität immer etwas Wasser. Die Originalflüssigkeit aus einem Galileo-Thermometer ist besser als Brennspritus – leider nicht direkt käuflich. Das Kaltfettlösemittel Tecusol-75 war ein Geheimitipp eines Galileo-Thermometer-Produzenten. Es erweist allerdings sich als weniger geeignet als Brennspritus. Weitere denkbare Flüssigkeiten (Methanol, Petroleum, Tetrachlorkohlenstoff) haben wir nicht untersucht. Im Folgenden verwenden wir Brennspritus.

Die Steigungen der Geraden für die in Abbildung 3 dargestellten Flüssigkeiten lauten:

$$\gamma_S = 9,58 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3\text{K} ; \gamma_E = 9,78 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3\text{K} ; \gamma_G = 11,67 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3\text{K} ; \gamma_T = 7,80 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3\text{K}$$

Experimentelle Realisierung

Für die folgenden Experimente ist eine Waage hilfreich, die noch 0,1 g wiegt, sowie ein Messzylinder, der Volumina auf 1 cm³, besser sogar 0,5 cm³ zu bestimmen ermöglicht. Ebenso ist ein elektronisches Thermometer mit langer Messspitze nützlich.

Uns standen verschiedene Gefäße (Messkörper) zur Verfügung. Aus einem zerbrochenen Original-Galileo-Thermometer stammt ein kugelförmiger Messkörper aus Plastik ($V_K \approx 9,5 \text{ cm}^3$; $m_{\text{leer}} \approx 6,9 \text{ g}$; Abbildung 4), ein Kunststoffgefäß (Einmalshampoo; $V_K \approx 30 \text{ cm}^3$; $m_{\text{leer}} \approx 14 \text{ g}$) und ein Aufbewahrungsdöschen für Ohropax ($V_K \approx 15 \text{ cm}^3$; $m_{\text{leer}} \approx 3,7 \text{ g}$). Dazu eine Silberkette mit einer Länge von $l = 50,0 \text{ cm}$ und der Masse von $m = 1,70 \text{ g}$. Der Kreativität beim Finden geeigneter Gefäße und Ketten sind hier kaum Grenzen gesetzt.



Abb.4: Eine Kugel aus einem ausgelaufenen Galilei-Thermometer (links); ein Kunststofffläschchen (Shampoo) mit magnetischer Halterung (Mitte); ein Ohropax-Döschen (rechts).

Für die Masse pro Länge bei der Kette ergibt sich: $d_{\text{Kette}} = 1,70/50,0 \text{ g/cm} = 0,0340 \text{ g/cm}$.

Möchte man mit dem kugelförmigen Messkörper einen Temperaturbereich von 10 °C bis 30 °C ($\Delta T = 20 \text{ K}$) erfassen ergibt sich für Brennspritus mit Gleichung (3):

$$\Delta h (20 \text{ K}) = V_K \cdot \gamma_S \cdot \Delta T / d_{\text{Kette}} = 9,5 \text{ cm}^3 \cdot 9,58 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3\text{K} \cdot 20 \text{ K} / 0,034 \text{ g/cm} = 5,4 \text{ cm}$$

Ein zylindrisches Messgefäß sollte also mindestens eine Höhe von 20 cm, besser sogar 30 cm bis 40 cm haben. Bei einem geeigneten Messzylinder lassen sich bequem Messwerte ablesen; 10 ml auf der Skala entsprechen gerade 1 cm.

Die Kette wird an dem Messkörper angebracht. Im Beispiel des kugelförmigen Gefäßes ließ sich dessen Masse mit einem Zusatzgewicht von 0,315 g (Unterlegscheibe aus Messing) optimieren. Damit schwebte der Messkörper im Spiritus bei einer Temperatur von 20 °C etwa in

einer Höhe von 19 cm über dem Boden, und zwar unabhängig davon, wie viel Flüssigkeit sich noch über ihm befand.

Mit Hilfe von Gleichung (2) lässt sich berechnen, wie sich eine kleine Zusatzmasse $\Delta m_K = 0,1 \text{ g}$ am Messkörper auf die Schwebhöhe h auswirkt:

$$\Delta h = \Delta m_K / d_{\text{Kette}} = 0,1 \text{ g} / 0,034 \text{ g/cm} \approx 3 \text{ cm}.$$

Daran ist ersichtlich, wie empfindlich die Schwebhöhe h auf kleinste Veränderungen reagiert.

Das Kunststoffgefäß mit einem Schraubdeckel ($V_K = 30 \text{ cm}^3$, $m_{\text{leer}} \approx 14 \text{ g}$; Abbildung 4 Mitte) wird mit gefärbtem Wasser ($\approx 10 \text{ ml}$) zunächst soweit gefüllt, bis es gerade noch an der Oberfläche des mit Brennspritus von etwa 20°C gefüllten Gefäßes schwimmt. Es hat dann eine Masse von etwa 24 g ($30 \text{ cm}^3 \cdot 0,8 \text{ g/cm}^3$). Die Färbung des Wassers erlaubt eine bequeme Ablesung des Flüssigkeitsspiegels auch bei schief schwebendem Gefäß. Ein kleiner Magnet mit Haken haftet am Schraubdeckel und hält die nach unten hängende Silberkette.



Abb.5: Kalibrierung des Systems mit zusätzlichem Gefäß. Temperatur $\sim 32^\circ\text{C}$.

Mit ganz fein dosiertem Zugeben (oder auch Entnehmen) von Wasser in das kleine Gefäß oder durch Hinzusetzen oder Wegnehmen kleiner Gewichte lässt sich die Masse mit etwas Geduld sehr genau einstellen. Das macht man solange, bis das Gefäß etwa in der Mitte des zylindrischen Gefäßes schwebt. In gleicher Weise geht man bei weiteren Messkörpern vor.

Das Thermometer wird kalibriert, indem man bei verschiedenen Temperaturen die Position des Messkörpers markiert. Das lässt sich mit einem größeren, den eigentlichen Messzylinder partiell umfassenden, weiteren Gefäß realisieren (Abbildung 5). Man kann da sowohl warmes wie kaltes Wasser (evtl. mit Eiswürfeln) einbringen. Auch der beliebte Spaß, Galileo-Thermometer mit den bloßen Händen zu erwärmen, ist anwendbar jedoch ziemlich langwierig. Der Gebrauch eines Föns erfordert ebenfalls Geduld, da man für eine sinnvolle Messung jeweils das Temperaturgleichgewicht abwarten muss.

Die tatsächliche Kalibrierung ergibt ein $\Delta h_{\text{gemessen}} (10,9 \text{ K}) = 2,4 \text{ cm}$ (Abbildung 6). Das stimmt nicht gut überein mit der Berechnung ($\Delta h_{\text{berechnet}} (10,9 \text{ K}) = 2,9 \text{ cm}$) aufgrund der Steigung der Temperatur-Dichte-Geraden aus Abbildung 3. Gründe dafür gibt es einige: Unsicherheiten bei der Messung des Volumens des Messkörpers, Nichtberücksichtigung des Volumens der Kette, nicht lange genug auf Temperaturengleichgewicht gewartet, Reibung des Messkörpers an der Zylinderinnenfläche, Undichtigkeit des Messkörpers, Verdunstung von Spiritus, usw. Die Diskussion möglicher Ursachen und deren Auswirkung sind physikalisch sehr interessant und lehrreich.

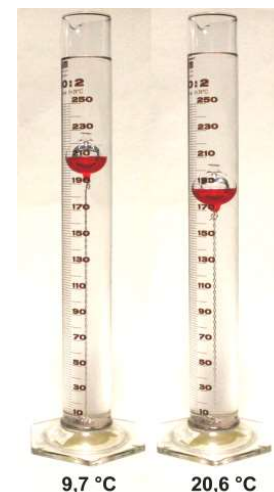


Abb.6: Endgültige Kalibrierung des Kettenthermometers (links $9,7^\circ\text{C} = 210 \text{ ml}$; rechts $20,6^\circ\text{C} = 186 \text{ ml}$; $\Delta h = 2,4 \text{ cm}$).

Entscheidend für die Kalibrierung ist aber die endgültige Messung!

Und die Hersteller von Kettenthermometern – und auch Galileo-Thermometern – verfahren letztlich bei der Herstellung ihrer Geräte in gleicher Weise. Man braucht jetzt nur noch eine Skala mit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) am Messgefäß anzubringen (Abbildung 7).

Das Kettenthermometer aus Abbildung 1 weist übrigens eine Höhendifferenz von Δh (20 K) = 7,8 cm auf und misst daher etwas empfindlicher als unsere Vorrichtung. Mit den anderen Messkörpern aus Abbildung 4 kommt man jedoch auf noch bessere Werte, da sie ein größeres Volumen aufweisen.

An dieser Stelle möchte ich (C.U.) meiner Frau ausdrücklich für die freundliche Überlassung diverser Fläschchen, einer Silberkette, einer zylindrischen Glasvase und weiterer Utensilien aus unserer Küche danken. Die Sachen sind unbeschädigt und weiter nutzbar!



Abb. 7: Eigenkonstruktion des Kettenthermometers mit kalibrierter Celsius-Skala.

Literatur und links

- [1] Die Firma heißt heute moeller-therm, www.moeller-therm.de
- [2] Gebrauchsmuster DE000029511467U1 vom 2.11.1995: Galileisches Thermometer (mit zwei Ketten).
- [3] Offenlegungsschrift DE000010050144A1 vom 18.4.2002: Galileisches Thermometer mit einem einzigen Festkörper zur Anzeige der Temperatur (mit einer Kette und zwei Schwimmkörpern).
- [4] www.rivercityclocks.com, Stichwort „Galileo“.
- [5] C. Ucke, H. J. Schlichting, Spiel, Physik und Spaß, Verlag Wiley-VCH, Weinheim 2011, 87.
- [6] H. J. Schlichting, C. Ucke, Physikalische Spielereien, Verlag Wiley-VCH, Weinheim 2016, 104.

Zusammenfassung

Kettenthermometer sind eine wenig bekannte und kaum noch erhältliche Thermometervariante. Sie ähneln auf den ersten Blick den bekannten Galileo-Thermometern, verfügen jedoch nur über eine schwebende Kugel mit anhängender Kette. Die Physik dahinter ist einfach und deswegen kann man sie mit vertretbarem Aufwand und experimentellem Geschick weitgehend mit Alltagsmaterialien selbst bauen.

Anschriften der Autoren

Dr. Christian Ucke, Rofanstraße 14B, 81825 München, christian.ucke@web.de

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster, Schlichting@uni-muenster.de