Hochgenaue Temperatur- und Temperaturdifferenzmessungen mit einfachen Mitteln

Von Gerhard Wiegleb

Einleitung

Temperaturmessungen lassen sich auf verschiedenen Wege durchführen, wobei man bei den einzelnen Methoden unterschiedliche physikalische Effekte, wie Längenausdehnungen, Volumenausdehnungen, Thermospannungen usw. ausnutzt. Den meßbaren Größen (Länge, Volumen, Spannung usw.) ordnet man dann eine bestimmte definierte Temperatur zu. Das bekannteste Temperaturmeßgerät ist das Quecksilberthermometer, das durch eine Änderung der Länge des Quecksilberfadens eine Temperaturänderung andeutet. In diesem Artikel wird nun ein Verfahren beschrieben, das die Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Leiters (Nickel) dazu benutzt, um mit einfachsten Mitteln sehr genaue Temperatur- und Temperaturdifferenzmessungen durchzuführen.

Meßprinzip

Der prinzipielle Aufbau der Meßschaltung ist in Abb. 1 dargestellt. Die Schaltung besteht aus zwei *Wheatstone*brücken, wobei der mittlere Zweig (2) von beiden Meßbrücken „benutzt" wird. Die Spannung an den Punkten 1→2 gibt die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Meßfühlern (F_1 und F_2) an, während die Spannung an den Punkten 2→3 die absolute Temperatur des Fühlers F_2 charakterisiert. Mißt man die Spannung von 3→1, so erhält man daraus die Temperatur des Fühlers F_1.

Die simultane Messung der Temperatur T_1 oder T_2 und der Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ ist bei der Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades einer Wärmekraftmaschine (*Carnot*-Prozeß) wichtig. Bekanntlich erhält man den Wirkungsgrad w aus

$$w = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{1}$$

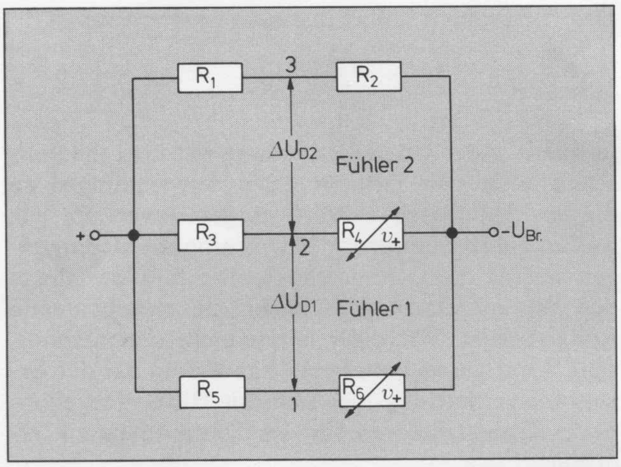


Abb. 1. Prinzipieller Aufbau der Meßschaltung, wobei R_4 und R_6 sich an der Meßstelle befinden und mit einer Fernleitung an die Brücke angeschlossen sind

Man braucht also nur die beiden Spannungen 1→2 und 2→3 zu dividieren und erhält als Ergebnis den Wirkungsgrad der Maschine.

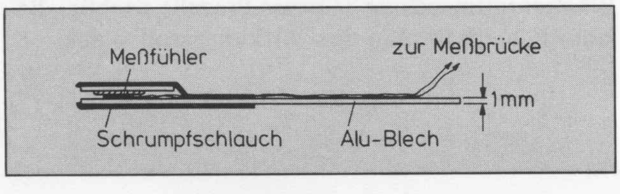
Meßfühler

Als Meßfühler werden meistens Platin- (PT 100) oder Nickel-Widerstände benutzt, die sich durch einen hohen Temperaturkoeffizienten auszeichnen. Thermistoren eignen sich aufgrund ihres außerordentlich hohen Temperaturkoeffizienten für ein solches Meßverfahren besonders gut, jedoch haben sie auch eine stark nichtlineare Kennlinie. Für große Temperaturbereiche ($\Delta T > 40$ K) muß diese Kennlinie dann durch eine aufwendige, externe Elektronik (Mikroprozessor) linearisiert werden.
In dem hier dargestellten Fall wurden Widerstands-Temperatursensoren vom Typ ETG-50C-Opt S (Fa. Vishay Micro-Measurments) benutzt. Die Meßfühler haben die äußere Form eines Dehnungsmeßstreifens, jedoch mit einem hohen Temperaturkoeffizienten. Die Widerstandswerte liegen bei $50\,\Omega \pm 0{,}15\,\Omega$ bei 75 °F (~23,88 °C) und die äußeren Abmessungen sind 9,3 × 3,2 mm.
Die Meßfühler wurden zur besseren Handhabung auf ein Alublech geklebt und zum Schutz gegen mechanische Einwirkungen mit einem Schrumpfschlauch überzogen (Abb. 2).

Abgleichverfahren

Sind die Fühler 1+2 auf der gleichen Temperatur, so sollte die Spannung $\Delta U_{D1} = 0$ sein. Die gleiche

Abb. 2. Mechanischer Aufbau eines einzelnen Meßfühlers



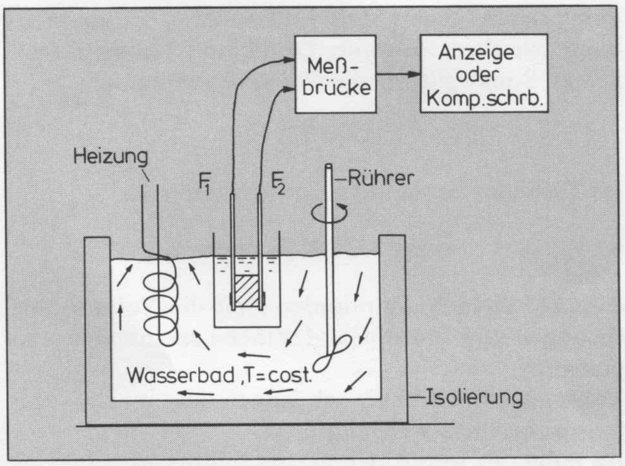


Abb. 3. Versuchsaufbau, in dem die Fühler F_1 und F_2 auf gleicher Temperatur gehalten werden.

Bedingung muß auch für ΔU_{D2} bei $T_2 = 0$ °C (273 K) erfüllt werden. Um das zu erreichen, muß eine Abgleichung der Brücke erfolgen. Zweckmäßigerweise baut man dazu ein Experiment nach Abb. 3 auf, das die Fühler 1+2 auf 273 K (Eisbad) hält.

Die Widerstände $R_1 = R_2 = 50\ \Omega$ werden vorgegeben. Passend zu dem Fühler F_1 wickelt man sich einen Widerstand $R_3 \leq R_4(0\,°\mathrm{C}) \leq 46\ \Omega$ aus Manganin- oder Konstantandraht ($\alpha \sim 0$). Dieser Widerstandsdraht wird nun nach Abb. 1 in die Brückenschaltung eingelötet. Dann mißt man die Spannung ΔU_{D2} möglichst genau mit einem Digitalvoltmeter (±0,0005 mV Ablesegenauigkeit). Ist $\Delta U_{D2} \neq 0$, so wird der Draht durch leichtes Ziehen an den Enden etwas verlängert, was zu einer Widerstandsänderung führt, die ihrerseits dafür sorgt, daß die Spannung ΔU_{D2} gegen Null geht. Ist der Widerstand R_3 auf diese Weise abgeglichen worden, so wendet man nun das gleiche Verfahren auf den Widerstand R_5 an.

Wird jetzt die Temperatur des Wasserbades langsam erhöht, so steigt die Spannung ΔU_{D2} proportional mit der Temperatur an. Die Spannung ΔU_{D1} wird sich allerdings auch von Null unterscheiden, obwohl beide Fühler die gleiche Temperatur besitzen. Dieser Fehler läßt sich durch geringe Differenzen der Temperaturkoeffizienten der beiden Fühler erklären, das heißt, es gibt niemals zwei völlig identische Meßfühler, die sowohl im Widerstandswert als auch im Temperaturkoeffizienten übereinstimmen. Um diese Differenz zu kompensieren wird zu einem der Fühler (mit dem höheren Temperaturkoeffizienten) ein temperaturunabhängiger Festwiderstand R_x in Reihe geschaltet.
Zunächst muß aber erst einmal der Temperaturkoeffizient der beiden Fühler in dem zu untersuchenden Temperaturintervall (273 K–313 K) bestimmt werden. Dazu wird nun folgende Rechnung durchgeführt.

Berechnung des Temperaturkoeffizienten

Aus der allgemeinen Brückengleichung

$$-\Delta U_D = U_{\mathrm{Br.}}\left[\frac{R_1}{R_1+R_0(1+\alpha\,\Delta T)} - \frac{R_3}{R_3+R_4}\right] \quad (2)$$

erhält man mit $R_1 = R_0$ und $R_3 = R_4$

$$\frac{-\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}} = \frac{1}{2+\alpha\,\Delta T} - \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{-\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}}(2+\alpha\,\Delta T) = 1 - \frac{\alpha\,\Delta T+2}{2}$$

$$\frac{-\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}}(2+\alpha\,\Delta T) = -\frac{\alpha\,\Delta T}{2} \Rightarrow 2\,\frac{\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}} + \frac{\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}}\,\alpha\,\Delta T = \frac{\alpha\,\Delta T}{2}$$

$$\frac{2\,\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}} = \left[\frac{\Delta T}{2} - \frac{\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}}\cdot\Delta T\right]\cdot\alpha \Rightarrow \alpha = \frac{\dfrac{2\,\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}}}{\dfrac{\Delta T}{2} - \Delta T\,\dfrac{\Delta U_D}{U_{\mathrm{Br.}}}}$$

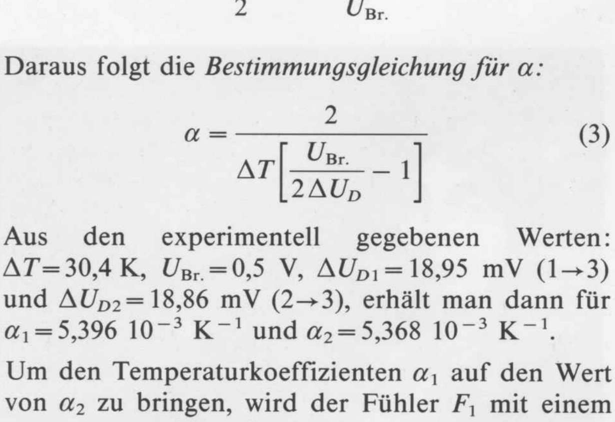
Daraus folgt die *Bestimmungsgleichung für α:*

$$\alpha = \frac{2}{\Delta T\left[\dfrac{U_{\mathrm{Br.}}}{2\,\Delta U_D} - 1\right]} \quad (3)$$

Aus den experimentell gegebenen Werten: $\Delta T = 30{,}4$ K, $U_{\mathrm{Br.}} = 0{,}5$ V, $\Delta U_{D1} = 18{,}95$ mV ($1 \rightarrow 3$) und $\Delta U_{D2} = 18{,}86$ mV ($2 \rightarrow 3$), erhält man dann für $\alpha_1 = 5{,}396\ 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$ und $\alpha_2 = 5{,}368\ 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$.

Um den Temperaturkoeffizienten α_1 auf den Wert von α_2 zu bringen, wird der Fühler F_1 mit einem temperaturunabhängigen Widerstand R_x in Reihe geschaltet.

Abb. 4. Spannung $1 \rightarrow 3$ (Fühler 1) und Spannung $2 \rightarrow 3$ (Fühler 2) in Abhängigkeit zur Temperatur. Aus der Differenz der Spannungen lassen sich die Unterschiede der Temperaturkoeffizienten bestimmen



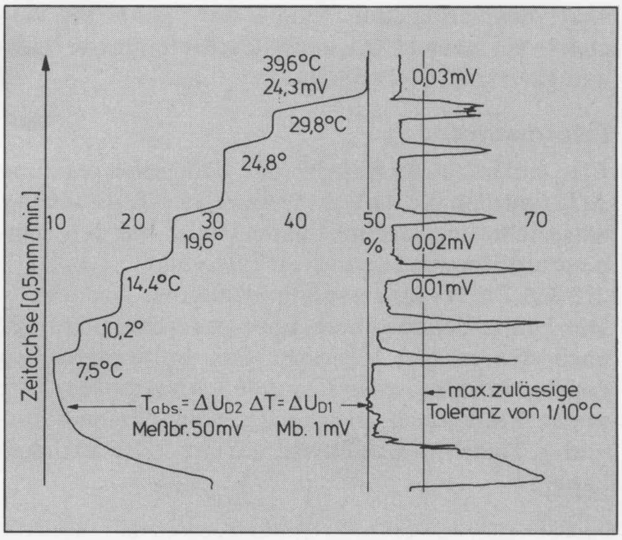


Abb. 5. Aus dieser Temperatur-Spannungs-Charakteristik lassen sich Rückschlüsse auf die Genauigkeit des beschriebenen Verfahrens ziehen

Bestimmung des Abgleichwiderstandes R_x

Für einen einzelnen Widerstand gilt bekanntlich

$$R_T = R_0(1+\alpha\cdot\Delta T) \quad (4)$$

mit $\Delta T = 0$ K ist dann $R_T = R_0$. Für α gilt dann

$$\alpha = \frac{R_T - R_0}{R_0\cdot\Delta T} \quad (5)$$

Schaltet man zu diesem Widerstand den Widerstand R_x, so erhält man folgende Beziehung:

$$R_T = R_x + R_0(1+\alpha\cdot\Delta T) \quad (6)$$

mit $\Delta T = 0$ K ist $R_x + R_0 = R'_0$.
Setzt man diesen Ausdruck in Gl. 5 ein, so bekommt man den Temperaturkoeffizienten der Reihenschaltung.

$$\alpha_2 = \frac{[R_x + R_0(1+\alpha_1\cdot\Delta T)] - (R_n + R_0)}{(R_0 + R_x)\Delta T} \quad (7)$$

Durch Auflösung dieser Gleichung erhält man die *Bestimmungsgleichung für R_x:*

$$R_x = R_0\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1\right) \quad (8)$$

Aus α_1 und α_2 läßt sich R_x sofort bestimmen.

$$R_x = 46\,\Omega(5{,}396/5{,}368 - 1) = 0{,}24\,\Omega$$

Mit diesem Kompensationswiderstand wurde nun eine Temperaturmessung vogenommen, wobei F_1 und F_2 wiederum die gleiche Temperatur hatten. In Abb. 5 ist das Ergebnis dieser Messung dargestellt. Mit einem Zweikanalschreiber wurden die Temperatur ΔU_{D2} ($\hat{=}$ der absoluten Temperatur des Wasserbades) und die Temperatur ΔU_{D1}($\hat{=}\, T_1 - T_2$) gemessen. Setzt man die gemessenen Spannungen für ΔU_{D2} in die Brückengleichung (2) ein, so erhält man exakt die vorliegende Temperatur, wobei als Vergleich ein geeichtes Quecksilberthermometer (Genauigkeit $\pm 0{,}05$ K) diente.

Fehlerbetrachtung

Als maximale Differenz der Diagonalspannung ΔU_{D1} wurden 0,03 mV gemessen. Da 1 K ca. 0,6 mV entspricht, liegt der maximale Fehler bei der Temperaturdifferenzmessung, im Intervall
$273\,\mathrm{K} \leqq T \leqq 313\,\mathrm{K}$, unterhalb 1/20 K.
Der Fehler der absoluten Temperaturmessung liegt, nach den obigen Überlegungen, in der gleichen Größenordnung, so daß man dieses Verfahren, trotz seiner Einfachheit, zur hochgenauen Temperatur- und Temperaturdifferenzmessung heranziehen kann.

Literatur

[1] *C. H. Feller,* Archiv f. techn. Messen, J222-8, 1978, Heft 3
[2] *E. Münsch,* Archiv f. techn. Messen, J222-9, 1978, Heft 6
[3] *W. T. Bolk,* Archiv f. techn. Messen, J222-6, 1978, Heft 3
[4] *E. Eggers,* Archiv f. techn. Messen, V2166, Nov. 1975
[5] *H. Becker,* Archiv f. techn. Messen, V210-F4, Nov. 1975
[6] *K. Kraus,* Archiv f. techn. Messen, J222-5, Nov. 1975
[7] *K. Kraus,* Elektrotechn. Zeitschrift-A, Bd. 92, 1971, Heft 10
[8] *Blich, Hitzmann*, PTB-Mitteilungen, 1976, Heft 6

Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Physik-Ing. *Gerhard Wiegleb,* Lortzingstr. 4a, 6457 Maintal-Wachenbuchen.