

Versuch 1

TEMPERATURMESSUNG

1. Einführung

Die Temperatur ist definiert als der Wärmezustand einer Substanz, der durch die mittlere kinetische Energie der Moleküle beschrieben wird. Zur Definition der Temperaturskala leitet man aus dem Carnot'schen Kreisprozess ab, dass sich die isothermen Zustandsänderungen entsprechend der Bilanz aus der zugeführten und der abgegebenen Wärmemenge verhalten.

Die Temperaturmessung wird also auf die Bestimmung von Wärmemengen zurückgeführt und stoffunabhängig gemacht. Eine Anzahl von Fixpunkten, (Schmelz-, Erstarrungs-, Sublimations- oder Siedepunkte verschiedener Substanzen bezogen auf einen Normaldruck) legen eine thermodynamische Temperaturskala fest. Die Einheit der thermodynamischen Temperatur (T) ist das Kelvin (K), dies gilt auch für Temperaturdifferenzen. Celsius-Temperatur (ϑ) wird die besondere Differenz einer beliebigen thermodynamischen Temperatur (T) gegenüber der Temperatur $\vartheta_0 = 273,15K$ genannt. Es ist also

$$\vartheta = T - T_0 = T - 273,15K \quad (1.1)$$

2. Messverfahren

Zur Messung der Temperatur werden indirekte Messverfahren angewandt, bei denen eine andere Größe in eindeutiger und reproduzierbarer Weise von der Temperatur abhängt.

Die wichtigsten Messverfahren sind:

- Ausdehnung von Körpern: Gasthermometer,
Flüssigkeitsthermometer (Hg, Alkohol)
Deformationsthermometer (Bourdon, Bimetall)
- Thermoelektrische Verfahren (Thermoelemente)
- Widerstandselektrische Verfahren (Platindraht, Halbleiterthermometer)
- Akustische Verfahren (sonische Thermometer)
- Strahlungsverfahren (Infra-Rot Detektoren, Bolometer).

2.1 Messfehler

In diesem Versuch werden die Fehler, die speziell bei meteorologischen Messungen (Bestimmung von Luft- und Bodentemperaturen) auftreten behandelt. Natürlich treten bei jeder Temperaturmessung auch Fehler auf, die auf das Messverfahren zurückzuführen sind.

2.1.1 Trägheitsfehler

Befindet sich ein Messfühler mit der Eigentemperatur (ϑ) in Luft mit der Temperatur (ϑ_L), so fließt ein Strom fühlbarer Wärme zur Messfühleroberfläche, der proportional zum Temperaturunterschied ist:

$$L = - \alpha_L (\vartheta - \vartheta_L) \quad (1.2)$$

Hier ist definiert, dass alle zur Oberfläche fließenden Wärmeströme positiv gezählt werden und auf die Flächeneinheit bezogen werden. Das heißt, wenn $\vartheta_L > \vartheta$, dann ist $L > 0$. Der Wärmestrom L wird in W/m^2 angegeben. Der Proportionalitätsfaktor α_L ist die

Wärmeübergangszahl mit der Einheit $WK^{-1}m^{-2}$, α_L hängt von der Form des Messfühlers, der Art der Anströmung und der Windgeschwindigkeit ab.

Tab. 1: Die Wärmeübergangszahl α_L für eine ebene tangential angeströmte Fläche

v	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	m/s
α_L	7	10	14	20	35	50	70	$WK^{-1}m^{-2}$

Tritt keine andere Form des Wärmeaustausches mit der Umgebung des Messfühlers (z.B. Strahlung) auf, erhöht ein positiver Strom fühlbarer Wärme die Temperatur des Termometers. Hat ein Messfühler eine gute Wärmeleitfähigkeit und treten keine Temperaturinhomogenitäten im Inneren auf, dann ist der Wärmeverlust durch die Oberfläche der Wärmestrom B:

$$B = -\frac{c_K \cdot \rho_K \cdot V_K}{A} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (1.3)$$

Hier sind : c_K : spezifische Wärme, ρ_K : Dichte und V_K : Volumen der Messfühlersubstanz, A: Oberfläche des Messfühlers.

Die Wärmehaushaltsgleichung für den Messfühler ist dann:

$$L + B = 0 \quad (1.4)$$

$$-\alpha_L (\vartheta - \vartheta_L) - \frac{c_K \cdot \rho \cdot V}{A} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = 0 \quad (1.5)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \cdot (\vartheta - \vartheta_L) = -\frac{\Delta\vartheta}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{c_K \cdot \rho \cdot V}{\alpha_L \cdot A} \quad (1.6)$$

(1.6) ist eine Form des Newton'schen Abkühlungsgesetzes, das besagt, dass die Änderungsgeschwindigkeit der Messfühlertemperatur der jeweiligen Temperaturdifferenz zur Umgebung proportional ist. τ wird als Zeitkonstante des Messfühlers bezeichnet.

Ist die Umgebungstemperatur konstant, also $\frac{d\vartheta_L}{dt} = 0$, dann ist $\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{d\Delta\vartheta}{dt}$ und

$$\frac{d\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta} = -\frac{1}{\tau} dt \quad (1.7)$$

Die Integration der Differentialgleichung (1.6) ergibt

$$\int \frac{d\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta} = -\frac{1}{\tau} \int dt \quad (1.8)$$

$$\ln(\vartheta - \vartheta_L) = -\frac{t}{\tau} + const.$$

$$(\vartheta - \vartheta_L) = c \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Die Integrationskonstante c wird aus den Anfangsbedingungen bestimmt, bei $t = 0$ sei $\vartheta = \vartheta_0$.

$$(\vartheta_0 - \vartheta_L) = c \cdot e^0 = c \quad (1.9)$$

Die Schnelligkeit, mit der sich ein Thermometer der geänderten Umgebungstemperatur anpasst, hängt allein von seiner Zeitkonstante τ ab. Für ein schnelles Ansprechen des Thermometers und gute Auflösung rascher Temperaturschwankungen muss τ möglichst klein gewählt werden. Nachzuvollziehen ist, dass τ um so kleiner ist, je kleiner die Wärmekapazität ist, je größer die Wärmeübergangszahl ist und je kleiner das Verhältnis Volumen zu Oberfläche ist. Als Maß für die thermische Trägheit eines Thermometers wird die Zeit gewählt nach der sich die Temperaturdifferenz zwischen Thermometer und Umgebung auf das 1/e-Fache der anfänglichen Differenz vermindert hat (Einstellzeit t_e).

$$\begin{aligned} \vartheta - \vartheta_L &= (\vartheta_0 - \vartheta_L) \cdot e^{-\frac{t_e}{\tau}} = (\vartheta_0 - \vartheta_L) \cdot e^{-1} \\ \vartheta - \vartheta_L &= \frac{1}{e} (\vartheta_0 - \vartheta_L) \\ t_e &= \tau \cdot \ln\left(\frac{\vartheta_0 - \vartheta_L}{\vartheta - \vartheta_L}\right) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Um die Trägheit von Flüssigkeitsthermometern herabzusetzen, wird durch lange schmale Messfühler das Volumen-Oberflächen-Verhältnis herabgesetzt. Minimum-Thermometer, die wegen ihrer dickeren Kapillare ein großes Füllvolumen (= hohe Wärmekapazität) besitzen, haben zwei längliche zylindrische Gefäße. Thermometer zur Messung der Lufttemperatur werden ventiliert (Vergrößerung von α_L). Ausreichende Trägheit ist dagegen bei Thermometern zur Messung der Boden- und Wassertemperaturen notwendig, da diese Thermometer erst nach dem Herausnehmen in der Luft abgelesen werden können.

Sollen rasche Schwankungen der Temperatur gemessen werden, muss zu thermoelektrischen oder widerstandselektrischen Messverfahren übergegangen werden. Hierbei ist es möglich, durch Verwendung dünner Drähte als Messfühler die Wärmekapazität und das Volumen-Oberflächen-Verhältnis bei gleichzeitiger Vergrößerung der Wärmeübergangszahl soweit herunterzusetzen, dass turbulente Schwankungen der Temperatur gemessen werden können.

2.1.2 Strahlungsfehler

Um den Strahlungseinfluss auf ein Thermometer bestimmen zu können, kann die Wärmehaushaltsgleichung herangezogen werden, die in einfacher Form lautet:

$$L + B + Q = 0 \quad (1.11)$$

Q ist die Strahlungsbilanz des Messfühlers und soll dabei die Resultierende der an der Oberfläche des Messfühlers unterschiedlich einwirkenden Strahlungsströme sein. Die Strahlungsbilanz Q setzt sich aus folgenden Strahlungsströmen zusammen:

- G: Strahlung der Sonne
- H: Himmelstrahlung
- R: Reflexstrahlung benachbarter Oberflächen im kurz- und langwelligen Spektralbereich
- A: Wärmestrahlung der Atmosphäre und benachbarter Oberflächen
- E: Ausstrahlung des Messfühlers

Entsprechend den Absorptionskoeffizienten des Messfühlers im kurz- und langwelligen Bereich, ϵ_{kw} und ϵ_{lw} , wird ein Teil der Strahlung absorbiert, der Rest reflektiert.

$$Q = \epsilon_{kw} \cdot (G + H) + \epsilon_{lw} \cdot (A - \sigma \cdot T^4) \quad (1.12)$$

Im stationären Gleichgewicht am Messfühler ($b = 0$), ist die Wärmehaushaltsgleichung

$$Q + L = Q - \alpha_L \cdot (\vartheta - \vartheta_L) = 0 \quad (1.13)$$

und

$$\vartheta = \vartheta_L + \frac{Q}{\alpha_L} \quad (1.14)$$

Die Temperatur ϑ eines der Strahlung ausgesetzten Messfühlers weicht also um so mehr von ϑ_L ab, je größer die Strahlungsbilanz Q und je kleiner die Wärmeübergangszahl α_L ist. Für korrekte Messungen wird also einerseits die Strahlungsbilanz verringert (vernickelte Schutzrohre), andererseits die Ventilation des Fühlers verbessert. Beides ist gut ausgeführt bei Aspirationsthermometern sowie bei den Aspirationspsychrometern nach Aßmann (mit Hg-Thermometern) und nach Frankenberger (mit Widerstandsthermometern). Bei Messungen von Temperaturgradienten in dünnen Luftschichten ist allerdings zu beachten, dass der Ventilationsstrom erhebliche Luftmengen ansaugt und die natürlichen Verhältnisse stört. Unter Umständen ist dann beim Einsatz von Widerstandsthermometern die Kugelhütte nach Baumbach (halbkugelförmige Metallschirme) als Strahlungsschutz vorzuziehen. Hierbei wird auf eine Ventilation verzichtet.

Der gebräuchlichste Strahlungsschutz für die Routinemessungen des Wetterdienstes ist die Klimahütte (Englische Hütte, Abb.1). Es handelt sich dabei um ein weiß angestrichenes Holzgehäuse mit Jalousienwänden, einem doppelten Dach und einem Boden aus Holzplatten, der wie die Wände luftdurchlässig ist. Bei strahlungsreichen, windschwachen Wetterlagen liegt die Temperatur in der Klimahütte dennoch merklich über der Lufttemperatur.

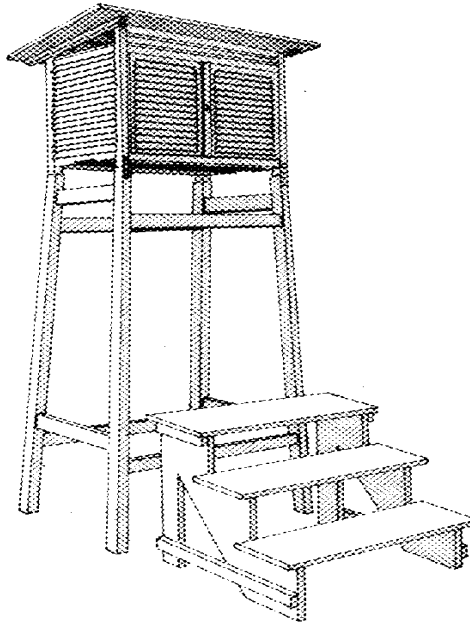


Abb.1: Die Wetterhütte (Englische Hütte)

Das Holz der Hütte und das Thermometerglas der Hg-Thermometer verhalten sich im langwelligen Bereich fast wie schwarze Körper. D.h. $\epsilon_{lw} \approx 1$, und die Strahlungsbilanz ist mit $G=0$:

$$Q = A - E = \sigma T_{Hütte}^4 - \sigma T^4 \approx 4\sigma T_L^3 \cdot (\vartheta_{Hütte} - \vartheta) \quad (1.15)$$

$$Q \approx \alpha_S \cdot (\vartheta_{Hütte} - \vartheta)$$

Hier ist $\vartheta_{Hütte}$ die mittlere Temperatur der Hütteninnenteile und α_S ist die Strahlungsübergangszahl

Tab.2: Die Strahlungsübergangszahl in Abhängigkeit von der Lufttemperatur:

ϑ_L	-10	0	10	20	30	$^{\circ}C$
α_S	4,2	4,7	5,2	5,8	6,4	$WK^{-1}m^{-2}$

Die Wärmebilanzgleichung des Hüttenthermometers lautet dann

$$\alpha_S \cdot (\vartheta_{Hütte} - \vartheta) - \alpha_L \cdot (\vartheta - \vartheta_L) = 0 \quad (1.16)$$

und die Temperatur des Thermometers ist

$$\vartheta = \vartheta_L + \frac{\alpha_S}{\alpha_L + \alpha_S} \cdot (\vartheta_{Hütte} - \vartheta_L) \quad (1.17)$$

bei schlechterer Ventilation sind α_L und α_S von der gleichen Größenordnung. Durch langwellige Strahlung wird also ein Teil der Überhitzung der Hüttenwände auf das Thermometer übertragen. Ferner wird die Luft erwärmt, wenn sie durch die Hüttenwände strömt, so dass ϑ_L höher als die Temperatur der umgebenden Luft ist. Es können Fehler bis zu 2K auftreten, der mittlere Messfehler liegt bei 1K. Nachts können bei negativer Strahlungsbilanz der Hütte kleinere Temperaturmesswerte auftreten als die Umgebungsluft aufweist.

Im instationären Fall für ein durch Strahlung mit der Umgebung wechselwirkendes Thermometer, tritt ein Wärmestrom durch die Oberfläche des Messfühlers auf. Die Wärmebilanzgleichung für den Messfühler ist dann

$$Q + L + B = 0 \tag{1.18}$$

$$Q - \left(\frac{c \cdot \rho \cdot V}{E} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \right) - \alpha_L \cdot (\vartheta - \vartheta_L) = 0$$

$$-\frac{c \cdot \rho \cdot V}{E} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} - \alpha_L \cdot \left[\vartheta - \left(\vartheta_L + \frac{Q}{\alpha_L} \right) \right] = 0$$

und die Temperaturänderung ist

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \cdot \left[\vartheta - \left(\vartheta_L + \frac{Q}{\alpha_L} \right) \right] \tag{1.19}$$

auch im instationären Fall verhält sich ein verstrahltes Thermometer so, als sei die Lufttemperatur um den Strahlungsfehler $\frac{Q}{\alpha_L}$ höher.

Eine völlige Ausschaltung von Strahlungsfehlern ist prinzipiell nicht möglich, da alle Körper in einem Strahlungsaustausch mit ihrer Umgebung stehen.

3. Thermoelektrische Temperaturmessung

3.1. Messprinzip

Werden die Enden zweier Drähte aus verschiedenen Metallen paarweise miteinander verbunden, fließt ein Strom, sofern die beiden Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen haben. Die dafür benötigte Energie wird der Wärmequelle entzogen (Seebeck-Effekt). Der Strom I, den man durch einschalten eines Galvanometers in einen der beiden Drähte messen kann, folgt der Gleichung

$$I = \frac{U_{th}}{R_L + R_{Gerät}} \tag{1.20}$$

$R_L + R_{Gerät}$ ist der Gesamtwiderstand des Kreises, d.h. die Summe aus Widerstand der Drähte R_L und Innenwiderstand des Messinstruments $R_{Gerät}$. Die Thermospannung U_{Th} hängt nur von den Temperaturen der Lötstellen ab und lässt sich für höhere und mittlere Temperaturen durch

$$U_{th} = a \cdot (T - T_0) + b \cdot (T - T_0)^2 \tag{1.21}$$

darstellen. T_0 ist eine Bezugstemperatur, z.B. 0°C . Für kleine Temperaturbereiche gilt

$$U_{th} = a \cdot (T - T_0). \quad (1.22)$$

Die Änderung der Thermospannung mit der Temperatur $\frac{dU_{th}}{dT}$ bezeichnet die Empfindlichkeit oder die Thermokraft des Thermoelementes

$$\eta = \frac{dU_{th}}{dT} = a + 2b \cdot (T - T_0). \quad (1.23)$$

Bei kleinen Temperaturintervallen ist $b \approx 0$.

Die Empfindlichkeit η hängt vor allem von der Art der beiden Metalle ab und in geringem Maße von der Lage des Temperaturintervalls $T-T_0$. Für beides seien hier einige Beispiele für das Temperaturintervall $0 \dots 100^\circ\text{C}$ angeführt:

Tab. 3: Empfindlichkeiten von Thermoelementen im Temperaturintervall $0 - 100^\circ\text{C}$:

Verbindung der Lötstellen:	Empfindlichkeit in (μVK^{-1})
Nickelchrom-Konstantan	56.1
Eisen-Konstantan	53.7
Kupfer-Konstantan	42.5
Nickelchrom-Nickel	41.0
Platinrhodium-Platin	15.6
Platin-Platinrhodium	6.5
Rhodium-Platinrhodium	0.1

Für die Verbindung von Kupfer-Konstantan gelten folgende Empfindlichkeiten in den drei angegebenen Temperaturintervallen:

Tab. 4: Empfindlichkeiten eines Kupfer-Konstanten Thermoelementes in verschiedenen T -Intervallen:

Temperaturintervall ($^\circ\text{C}$)	Empfindlichkeit in (μVK^{-1})
-100...0	43.0
0...100	42.5
100...200	49.5

Für die gebräuchlichen Thermoelemente wie Kupfer-Konstantan, Eisen-Konstantan sind also Werte von etwa $5\text{mV}/100\text{K}$ zu erwarten, d.h. bei Temperaturdifferenzen der Lötstellen von einigen Kelvin Thermospannungen von zehntel Millivolt.

3.2 Ausschlagmethode

Sei R ein zusätzlich in den Messkreis geschalteter Widerstand und U die Spannung, die am Galvanometer abgelesen wird, dann ist:

$$U = I \cdot R_{\text{Gerät}} = U_{\text{th}} \cdot \frac{R_{\text{Gerät}}}{R + R_L + R_{\text{Gerät}}} \quad (1.24)$$

Die Spannung am Messgerät ist also wegen des Spannungsabfalls an zusätzlichen Vorwiderständen und den Leitungswiderständen kleiner als die Thermospannung U_{Th} . Die gemessene Spannung kann im Versuch durch Änderung des Vorwiderstandes R leicht geändert werden, so dass bestimmten Temperaturdifferenzen bestimmte Ausschläge d.h. Skalenwerte des Galvanometers entsprechen (z.B. $1 \text{ Skt} = 5K$ oder $1 \text{ Skt} = 0.1K$). Es kann auch die Abhängigkeit der Empfindlichkeit vom Messintervall berücksichtigt werden bzw. die Nichtlinearität von Thermospannung und Temperaturdifferenz. Der Messbereich kann zwar beliebig erweitert werden aber nicht verkleinert: die Steigerung der Empfindlichkeit wird begrenzt durch die Empfindlichkeit des benutzten Galvanometers. Mit Lichtstrichgalvanometern lässt sich eine Anzeigegenauigkeit von $0.1K$ erreichen, bei Verwendung von Gleichstromverstärkern von $0.01 K$. Zur Steigerung der Empfindlichkeit können auch mehrere Thermoelemente in Reihe geschaltet werden, bei denen die einander entsprechenden Verbindungsstellen die gleiche Temperatur haben (Thermosäulen oder Thermobatterien). Hier ist die Empfindlichkeit begrenzt durch den zunehmenden Innenwiderstand der Reihe und den Wärmeübergang von den Drähten. Lange Verbindungsleitungen, deren Widerstand sich mit der Temperatur ändert, können ebenfalls die Messgenauigkeit begrenzen.

3.3 Kompensationsmethode

Bei dieser Messmethode wird der durch einen bekannten Widerstand fließende Strom so lange verändert, bis die am Widerstand abfallende Spannung gleich der zu messenden Thermospannung ist. Die Gleichheit der beiden Spannungen kann mit einem empfindlichen Galvanometer kontrolliert werden. Da in dem Kompensationskreis, der neben dem Thermoelement den Kompensationswiderstand und das Nullgalvanometer enthält, praktisch kein Strom fließt, ist der Leitungswiderstand ohne Einfluss auf das Messergebnis. Der der Thermospannung proportionale Kompensationsstrom kann an einem robusten Strommesser abgelesen werden. Ebenso kann ein Mensch den von einem konstanten Strom durchflossenen Widerstand in bekannter Weise verändern oder an einem an eine konstante Spannung angeschlossenen Widerstand einen bekannten Teil des Gesamtwiderstandes, d.h. eine bekannte Teilspannung, abgreifen. Da das Galvanometer nur die Stromlosigkeit anzeigen muss, kann man bei gleicher Messgenauigkeit einfachere Anzeigergeräte als bei der Ausschlagmethode benutzen. Der Gesamtaufwand ist bei der Kompensationsmethode wegen des Abgleichens aber größer als bei der Ausschlagmethode. Die Vorteile beider Verfahren lassen sich bis zu einem gewissen Grad vereinigen, wenn man den Widerstand bis auf 1Ω genau an einem Dekadenwiderstand einstellt (Kompensationsmethode) und den Reststrom am Nullgalvanometer abliest. Die Abgleicharbeit ist dann gering und der Einfluss der variablen Leitungswiderstände ist klein.

3.4 Vergleichslötstelle

Thermoelemente sind vor allem zur Messung von Temperaturdifferenzen geeignet. Sie werden zum Beispiel in Strahlungsmessgeräten und bei Windmessern auf thermischer Basis eingesetzt. Wird die Temperatur einer Verbindungsstelle mit einem geeigneten Messinstrument kalibriert, kann auch die Temperatur der zweiten Lötstelle absolut angegeben werden. Es ist zweckmäßig, die Temperatur der „Vergleichslötstelle“ möglichst konstant zu halten, z. B. in einem thermisch trägen Metallklotz oder in einem Eis-Wasser-Gemisch. Bei

meteorologischen Untersuchungen im Freiland kann die Vergleichslötstelle in den Boden eingebaut werden, weil dort die Temperaturschwankungen gering sind. In allen Fällen muss die Temperatur der Vergleichslötstelle mit der für die gesamte Messung geforderte Genauigkeit bestimmt werden. Dies gilt auch bei der Verwendung eines Eis-Wasser-Gemisches, in dem an verschiedenen Stellen die Temperatur durchaus etwas von 0°C abweichen kann.

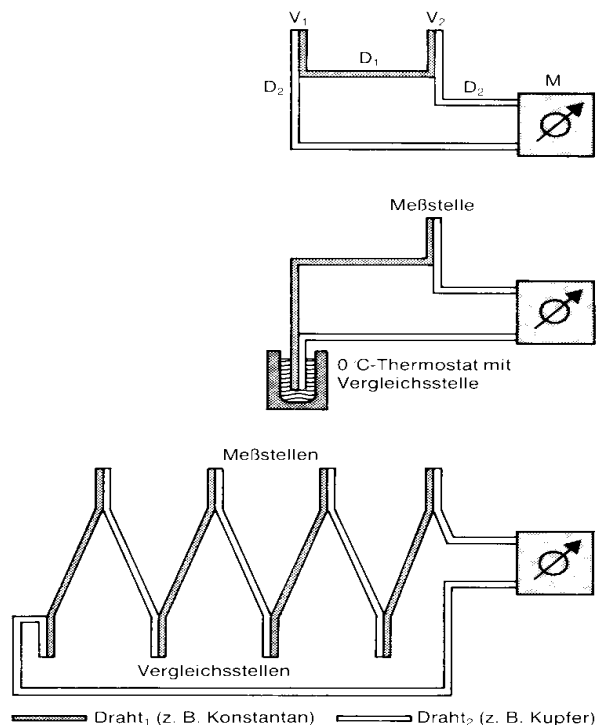


Abb.2: Thermoelektrische Temperaturmessung.
 Oben: Prinzip eines Thermoelementes
 Mitte: Thermoelement mit thermostatisierter Vergleichsstelle
 Unten: 4armige Thermobatterie

3. 5 Fehlerquellen

Ein großer Vorteil der thermoelektrischen Temperaturmessungen ist es, an ein Ablese- oder Registriergerät viele Messfühler anschließen zu können und durch einfaches Umschalten fast gleichzeitige Messungen an verschiedenen Stellen durchführen zu können. Der Messfühler (die Lötstelle) ist sehr klein, daher können so Temperaturen an Stellen gemessen werden, wo andere Verfahren ungeeignet sind, z.B. im Inneren von Blättern oder unmittelbar an Oberflächen. Da Thermoelemente wegen ihrer kleinen Masse niedrige Zeitkonstanten haben, können auch rasche Temperaturschwankungen gemessen werden.

Wie aus dem Kapitel 3.1 zu entnehmen war, hängt die Thermospannung außer von der Temperaturdifferenz auch von der Art der beiden verwendeten Metalle ab, Verunreinigungen an den Lötstellen und langsame Veränderung der Metallstruktur (Alterung) beeinflussen die Thermospannung. Jeder Messfühler muss also kalibriert werden, wobei dann auch die Abweichungen vom linearen Zusammenhang zwischen Thermospannung und Temperaturdifferenz berücksichtigt werden kann.

Schwierig zu beseitigen sind zusätzlich auftretende Thermospannungen im Messkreis. Da Galvanometer, Widerstände, Stecker und Schalter nicht aus genau demselben Material wie die Leitungen sind, treten an den Verbindungsstellen zusätzliche Thermospannungen auf. Der Messkreis muss sehr sorgfältig aufgebaut werden, das Material für die Widerstände sollte Manganin sein, da dessen Thermokraft gegen Kupfer klein ist ($\eta = 1 \mu V/K$), außerdem darf keine Strahlung auf die Klemmstellen fallen. Eine Korrektur kann dadurch angebracht werden, dass beide Lötstellen auf die gleiche Temperatur gebracht werden und die verbleibenden Thermospannungen bei den Messwerten als Nulleffekt berücksichtigt wird. Es ist aber zu beachten, dass die Störspannungen sich zeitlich ändern.

Eine weitere Fehlerquelle ist der Unterschied in den Wärmeleitzahlen der Thermoelemente und des zu messenden Körpers oder der Luft. Bei $20^\circ C$ ist die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer $330 W/Km$, die von Luft ist $25 \cdot 10^{-3} W/Km$, also etwa 15000 mal kleiner.

Der Einfluss des Strahlungsfehlers ist bei den dünnen Thermoelementen dagegen gering, da die Wärmeübergangszahl mit abnehmenden Durchmesser zunimmt. Durch Abschirmen der direkten Sonnenstrahlung kann dieser Fehler sehr stark reduziert werden. Die Sonnenstrahlung erwärmt nicht nur die Lötstelle, sondern auch die Zuleitungen und ändert den Leitungswiderstand. Eine Kupferleitung von $0,3 \text{ mm } \varnothing$ und $10m$ Länge hat bei $20^\circ C$ einen Widerstand von 2.4Ω , der je Kelvin Erwärmung um 4% zunimmt. Bei langen dünnen Leitungen und kleinem Messwiderstand sind die innerhalb eines Tages auftretenden Schwankungen der Leitungstemperatur nicht mehr zu vernachlässigen. Sie spielen aber keine Rolle bei Messungen nach der Kompensationsmethode.

4. Widerstandselektrische Temperaturmessung

4.1 Messprinzip

Ebenso wie die Ausdehnung von festen und flüssigen Körpern und wie die Thermospannung ist der elektrische Widerstand eine gut reproduzierbare Funktion der Temperatur. Er wird daher vielfach zur Temperaturmessung verwendet.

4.2 Widerstandsthermometer

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT} \tag{1.25}$$

ist bei reinen Metallen wesentlich größer als bei Legierungen, in der Formel (1.25) ist R_0 : Widerstand bei $0^\circ C$, R : Widerstand bei der Temperatur T . Der Temperaturkoeffizient hängt selbst wiederum von der Temperatur ab. Für beides werden einige Beispiele gegeben:

Tab. 5: Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes verschiedener Leiter:

Metall bei $20^\circ C$	Temperaturkoeffizient in $(10^{-3} K^{-1})$
Aluminium (Leitungs-)	3.7
Platin	3.8
Kupfer, Gold	3.9
Nickel	6.2

Chromnickel, Neusilber	0.2
Konstantan	0.03
Manganium	0.02

Tab. 6: Abhängigkeit des Widerstandes eines Platindrahtes von der Temperatur:

ϑ	-40	-20	0	20	40	60	100	°C
R	84.21	92.13	100.00	107.80	115.54	123.24	138.50	Ω

Widerstandsthermometer der beschriebenen Art werden in der Messtechnik vorzugsweise verwendet, da Platin sehr korrosionsbeständig ist und die Messwerte gut reproduzierbar sind. Platindrahtthermometer sind in vielen Formen erhältlich, so dass für die meisten meteorologischen Messungen passende Messfühler zu bekommen sind. Der Messwiderstand ist in der Regel als hauchdünner Draht auf einen Glaskörper gewickelt und in Glas luftdicht eingeschmolzen. Für diesen Typ des Platindraht-Hartglas-Thermometers gelten die obigen Werte. Es gibt Messfühler zwischen 2.5 und 9mm Durchmesser und 12 bis 120mm Wicklungslänge. Bei den käuflichen Thermometern müssen Abweichungen von den Normwerten von einigen zehntel Kelvin erwartet werden.

Für Messungen der turbulenten Temperaturschwankungen werden frei gespannte Platindrähte verwendet, die wegen der hohen Wärmeübergangszahl auch bei direkter Sonnenbestrahlung nur kleine Strahlungsfehler haben. Für Dauermessungen im Freiland ist diese Form aber wenig geeignet, da das häufige Reißen der Drähte, z.B. bei Regen, eine Neubespannung und neues Kalibrieren erforderlich macht.

Bei der Messung wird der Messfühler vom Strom durchflossen, der eine Erwärmung des Fühlers selbst zur Folge hat. Der resultierende Messfehler der Umgebungstemperatur des Thermometers hängt dabei von der Thermometerform und der Ventilation ab. Soll der Fehler unter 0.1K bleiben, so darf der Messstrom nur wenige mA betragen.

4.3 Messheißleiter (Thermistoren)

Halbleiter-Widerstandsthermometer sind sogenannte Messheißleiter. Diese Thermistoren (thermally-sensitive-resistor) oder NTC-Widerstände (negative-temperature-coefficient) sind oxidische NiO-LiO-Gemische oder oxidische Mischkristall-Halbleiter aus MgO·Cu₂O₃. Sie haben das Aussehen von Kohlewiderständen, oder sind als kleine Kugeln oder Platten ausgebildet. Thermistoren des gleichen Typs weichen voneinander viel stärker ab (bis 20 %) als Platinthermometer. Messelemente können ohne Nachkalibrierung nicht ausgetauscht werden. Die Änderung des Widerstandes pro Kelvin beträgt bei den üblichen Temperaturen um 20°C ca. 5-6 % des Ausgangswertes (bei Metallen 0,3 -0,5 %). Durch diese rund 10-fach höhere Empfindlichkeit ist es möglich, Temperaturschwankungen von wenigen 0,01K messtechnisch leicht zu erfassen.

Die Widerstands-Temperatur-Charakteristik des Thermistors zeigt den Verlauf einer e-Funktion:

$$R = R_0 \cdot \exp \left[b \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \tag{1.26}$$

R_0 ist der Widerstand bei der Bezugstemperatur T_0 (meist $293,15K$). Für den Temperaturkoeffizienten folgt daraus

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2} \quad (1.27)$$

Für den im Versuch verwendeten NTC-Widerstand mit $R_0 = 1k\Omega$ bei $T_0=293,15K$ und $b=3700K$ errechnen sich daraus nachfolgende Durchschnittswerte:

Tab. 7: Widerstand und Temperaturkoeffizienten eines Thermistors in Abhängigkeit von der Temperatur:

ϑ	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	$^{\circ}C$
R	7734	4216	2520	1562	1000	659	447	310	220	Ω
α	-58	-53	-50	-46	-43	-40	-38	-35	-33	$10^{-3}/K$

Es gibt auch Thermistoren mit größeren oder kleineren α - und R_0 - Werten zwischen 1Ω und mehreren $100 k\Omega$. Die zusammen mit den hohen Temperaturkoeffizienten erreichbaren absoluten Widerstandsänderungen (bei dem im Versuch verwendeten Thermistor bei $20^{\circ}C \approx 43\Omega/K$) sind wesentlich größer als bei Platindrahtthermometern (bei $20^{\circ}C \approx 0,4 \Omega/K$), so dass Änderungen von Leitungswiderständen und Kontaktwiderständen in Schaltern und Steckern nicht ins Gewicht fallen. Der Aufheizfehler bleibt bei einer Spannung um $1 V$ am Messfühler meist unter $0,1K$.

4.4 Messanordnungen

Zur Messung eines Widerstandes wird vielfach die Wheatstone'sche Brückenschaltung verwendet (Abb. 3), wobei in den einen Zweig der unbekannte Widerstand R_x , in den zweiten ein einstellbarer Vergleichswiderstand R_{Vgl} und in die beiden verbleibenden Zweige Festwiderstände R_a und R_b geschaltet werden. Wird nun R_{Vgl} so verändert, dass der Nullzweig der Brücke stromlos wird, so gilt:

$$R_x = R_{Vgl} \cdot \frac{R_a}{R_b} \quad (1.28)$$

Bei der üblichen Form der Brückenschaltung, in der der Temperatur-Meßwiderstand mit zwei Leitungen angeschlossen ist, geht auch der Leitungswiderstand in die Bestimmung von R_x ein. Bei Thermistoren ist dies meist ohne Belang, bei Pt-Thermistoren jedoch ist dieser Fehler nicht zu vernachlässigen. So haben $2 \times 20 m$ Kupferdraht bei $0,5mm$ Durchmesser eine Leitungswiderstand von ca. $1,3 \Omega$. Dieser kann eingeeicht werden, ändert sich aber mit der Leitungstemperatur, z.B. ergeben $20^{\circ}C$ Temperaturschwankung eine Änderung von $0,1 \Omega$, das entspricht etwa einer Änderung des Temperaturmesswerts um $0,3 K$. Messtechnisch behoben wird diese Fehlerquelle durch die Vierleiterschaltung des Messfühlers.

Die Kompensationsmethode ist der Brückenschaltung verwandt. Hier wird der Spannungsabfall am Messwiderstand mit dem an einem vom gleichen Strom durchflossenen

variablen Widerstand verglichen. Das Verfahren benötigt vier Leitungen, ist aber frei von deren Einfluss.

Bei den Thermistoren kann bei geringeren Genauigkeitsansprüchen auch der Widerstand durch gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung ermittelt werden. Ferner kann ein Thermistor als Widerstand in einem RC-Kippkreis verwendet werden. Die Kippfrequenz steigt mit zunehmender Temperatur, die also durch eine Frequenzmessung abgeleitet werden kann.

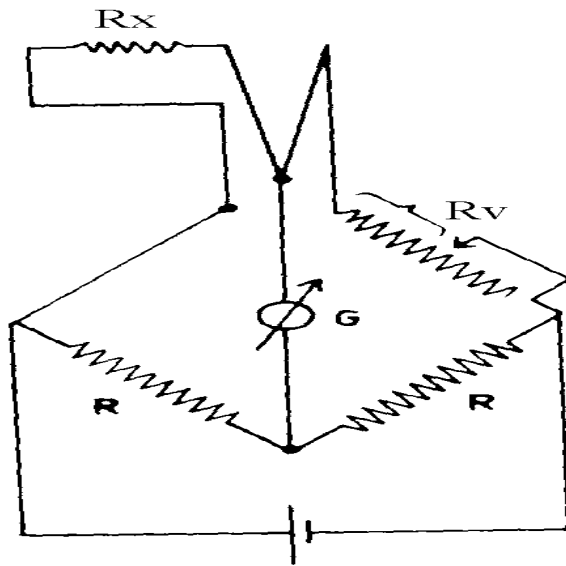


Abb. 3: Schema der Wheatstone'sche Brückenschaltung

Literatur:

F.Kohlrausch (1968): Praktische Physik. Bd.1-3. 22.Auflage. Stuttgart
 Gerthsen, Kneser, Vogel (1977): Physik. 13.Auflage. Berlin, Heidelberg, New York.
 H.Häckel (1993): Messung meteorologischer Größen. in: Meteorologie. 3.Auflage. Stuttgart. S.310 - 358
 G.Liljequist, K.Cehak (1984): Allgemeine Meteorologie. 3.Auflage. Braunschweig

Versuchsbeschreibung:

Zubehör: Thermoelement, Pt-100, Thermistor, Galvanometer, Messwiderstände, verschiedene Wärmebäder (Thermosgefäße), Magnetrührer, Quecksilberthermometer, Infrarotthermometer, Datalogger, Kalibrierquelle, Psychrometer.

Gang des Versuchs:**Eichung von Thermoelement, Thermistor und Pt-100 im Wärmebad:**

Bestimme bei verschiedenen Temperaturen (0°C - 40°C , mindestens 10 Messpunkte) die Ausgangsspannung des Thermoelements sowie die Widerstände von Thermistor und Pt-100.

a) Thermoelement: Thermoelement an das Galvanometer anschließen. Die aktive Lötstelle ins Wärmebad hängen, die Vergleichslötstelle auf 0°C halten (Eiswasser). Am Galvanometer Spannung ablesen.

b) Thermistor, Pt-100: Die Meßfühler in das Wärmebad tauchen. Die Widerstände des Pt-100 und des Thermistors messen. Wegen besserer Temperaturvermischung das Wärmebad schütteln.

Bestimmung der Zeitkonstanten von Thermoelement, Pt-100 und Thermistor:

Erwärme die verschiedenen Temperaturfühler im Sandbad auf $50 - 60^{\circ}\text{C}$, entnehme sie dann aus dem Bad und zeichne den Zeitverlauf der Thermospannung bzw. des Widerstandes mit dem Datalogger auf.

Messung von Oberflächentemperaturen

a) Überprüfen der Anzeige des Infrarot-Thermometers mit Hilfe der Kalibrierquelle. Dann Bestimmung verschiedener Oberflächentemperaturen wie z. B. von Sonnen- und Schattenseiten von Baumstämmen oder Sonnen- und Schattenflecken am Boden.

b) Aufnahme eines Temperatur-Höhen-Profiles am Messturm: Auf jeder Plattform (bis zur Obergrenze der Baumkronen) wird das IR-Thermometer horizontal einmal in und einmal gegen die Richtung der Sonne gehalten und die Oberflächen-Temperatur abgelesen. Zum Vergleich ist jeweils die Lufttemperatur mit einem Psychrometer zu messen. Am Messturm wird standardmäßig ein vertikales Temperaturprofil aufgenommen.

Auswertung und Fragen:

1. Thermoelement: Trage U (Spannung des Thermoelements) gegen $\vartheta - \vartheta_0$ auf und bestimme aus der Ausgleichsgeraden die Steigung dU/dT und daraus die Empfindlichkeit η :

$$\eta = \frac{dU_{th}}{dT} = \frac{(R_L + R_{Gerät})}{R_{Gerät}} \cdot \frac{dU}{dT} \quad (1.29)$$

2. Trage die Widerstände R_{thermo} und R_{Pt} über der Temperatur auf. Bestimme aus den Ausgleichskurven den Temperaturkoeffizienten des Pt-100 und den b -Wert des Thermistors (b aus der Auftragung: $\ln R$ gegen $(1/T - 1/T_0)$ beim Thermistor, Temperaturkoeffizienten der übrigen Thermometern aus der Auftragung R gegen ϑ)

3. Aus den mit dem Datalogger aufgezeichneten Abkühlkurven sind die Zeitkonstanten der Temperaturfühler zu berechnen.

4. Stelle die Temperatur-Höhen-Profile graphisch dar und interpretiere sie.

5. Die Strahlungsbilanz der Oberfläche eines Körpers sei 560 Wm^{-2} und die Wärmeübergangszahl α_L sei $35 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$. Um wie viel ist er wärmer als die ihn umgebende Luft ?

6. Ein Thermometer befinde sich in einem Raum, dessen Wandtemperatur 10°C ist, während die Lufttemperatur in der Umgebung des Thermometers 20°C beträgt. Welche Temperatur zeigt das Thermometer an: **a)** wenn es aus Glas und seine Oberfläche praktisch ein schwarzer Körper ist, **b)** wenn es vernickelt ist ($\epsilon_{1w} = 0,05$) und in beiden Fällen in relativ ruhiger Luft steht ($\alpha_L = 10 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-2}$)?