Messung der Lufttemperatur

Die Messung der Temperatur ist eines der größten Herausforderungen in der meteorologischen Praxis. Dabei müssen Quellen die die Temperatur beeinflussen so gut es geht verhindert werden, möchte man eine hohe Genauigkeit erreichen. Diskussionen um das höchste Temperaurmaximum im Sommer hat es in der Vergangenheit zu genüge gegeben. Dabei ist allzu oft der Standort eines Messsensors angezweifelt worden. Sensoren mussten überprüft werden, um den Beweis der Genauigkeit zu erbringen. Schon allein deshalb muss ein Standort gut gewählt und die technischen Gegebenheiten verbessert werden. Und genau da fängt das Problem an: Während man Jahrzehnte die Temperatur in der englische Wetterhütte gemessen hat, wird heutzutage mit modernster Technik und weitestgehend automatisch die Temperatur gemessen. Die World Meteorology Organisation (WMO) schreibt entsprechende Voraussetzungen für einen Standort zu Temperaturmessung vor:

WMO-Vorgaben:

- Die Lufttemperatur wird in 2 m Höhe über Grund gemessen. Die Messung erfolgt in einer strahlungs- und witterungsgeschützten Hütte.
- Die Hütte soll auf natürlichem Untergrund, möglichst auf einer Rasenfläche stehen und der Luftströmung ungehindert ausgesetzt sein. Am besten eignet sich hierfür ein freier Platz oder ein locker mit Sträuchern bewachsenes Gelände (ausgedehnter Garten) in möglichst ebenem Gelände.
- Der Luftraum, in dem gemessen wird, darf nicht durch Mauern, Bretterzäune, Hecken, dicht stehendes Strauchwerk oder dicht wachsende höhere Pflanzenkulturen abgeschlossen sein.
- Der Messpunkt liegt außerhalb jeglicher Schattenwürfe bei einem Sonnenstand von > 7 Grad. Schattenwürfe durch natürliches Relief werden nicht berücksichtigt. In der Folgezeit ist darauf zu achten, dass Bäume und Büsche unter dem angegebenen Winkel bleiben. Das gilt auch für benachbarte Grundstücke und für Bauten, die neu errichtet werden sollen.
- Mauern (auch Hauswände) müssen wegen der Reflexion und/oder der Abgabe von Wärmestrahlung mindestens 10 m entfernt sein. (exakt: unter einem Winkel von 8 Grad sein) Lässt sich dies nicht realisieren, kann die Mauer ggf. durch Buschwerk verdeckt werden.
- Wärmequellen (z. B. Gewächshäuser), Feuchtequellen (z. B. Springbrunnen) und Erschütterungsquellen (z. B. Straßen mit Schwerlastverkehr) sollen möglichst weit entfernt sein. (Quelle DWD)

Diese Bedingungen einzuhalten sind für den normalen Gebrauch schwer umzusetzen, wenn es sich nicht um eine offizielle Wetterstation handelt.

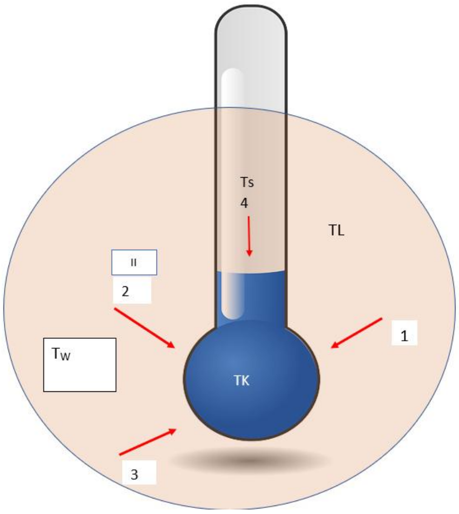
Strahlungsschutz heute (Eigenbrodt) englische Wetterhütte (Stevenson Hütte)

Wie es oben bereits beschrieben wurde, wird die Temperatur in 2 Meter Höhe über Grund gemessen in einer vor der Sonnenstrahlung geschützten kreissymetrischen Lamellenhütte. Der Deutsche Wetterdienst hat seit der Einführung der automatischen Messung an seinen Stationen die Schutzhütte der Fa. Eigenbrodt in Betrieb. Die klassische englische Wetterhütte, wie sie viele Jahrzehnte in Wetterparks zu sehen war, gehört inzwischen zum Antiquarium und ist so gut wie nicht mehr im Einsatz. Hauptamtliche Wetterbeobachter haben zu den damaligen Zeiten stündlich die Temperatur und Feuchte in dem mit Lamellen versehenen weißlackierten Holz-Wetterkasten (Englische Hütte) abgelesen. Die Daten wurden anschließend in das Protokollbuch eingetragen. Warum die englische Wetterhütte nicht mehr den Standards entsprach, leuchtet spätestens ein, wenn wir den Wärmeübergang von der umgebenen Luft zur derer in der Wetterhütte betrachten. Die Temperatur in der englischen Hütte kann gegenüber der Temperatur der Außenluft, besonders bei windschwachen Lagen, durch passive Ventilation in den Mittagsstunden bis +4 K und in den Morgen- bzw. Abendstunden um 2,0 K zu niedrig ausfallen.

Wärmeübergang am Thermometer

Für die Messung der Temperatur wurden in der Stevenson Hütte ausschließlich Quecksilber oder mit einer alkoholischen Lösung gefüllte Thermometer verwendet. Nicht nur das Nachhinken durch die Trägheit der Flüssigkeiten im Glasrohr stellte sich als Problem heraus, auch die Ungenauigkeit bei windschwachen und sehr strahlungsintensiven Tagen, wie es über die Sommermonate der Fall ist, führte zu erheblichen Abweichungen von der eigentlich zu erwartenden Lufttemperatur. Dabei achtete man bei der Bauweise der Hütte genauestens auf eine gute Durchlüftung, in dem man die Lamellen an den Seitenwänden im 45° Winkel anbrachte (siehe Bild oben). Durch eine weiße Außenlackierung erreicht man mit der Albedo (Strahlungsreflexion) bis zu 95% . Dennoch kann eine gewisse Wärmeübertragung von außen in die Hütte nicht ganz verhindert werden. Zum einen ist zwar eine gute Durchlüftung erwünscht, um eine schnelle Übertragung auf die Thermometer zu erreichen, anderseits kann durch die Wände auch zu viel an Wärme übertragen werden bzw. in den Nachtstunden zu viel abgeführt werden. Ein Thermometer zeigt immer zunächst seine eigene Temperatur an, bevor sich nach einer gewissen Zeit ein Gleichgewicht der umgebenen Luft und dem Messfühler einstellt.

Energieflüsse an der Thermometerkugel



Damit können wir nun die für das Thermometer gültige Wärmegleichung schreiben:

$$\frac{mc}{F}\frac{dT_K}{dt} = \underbrace{\alpha_L\,(T_L - T_K)}_{1} + \underbrace{\epsilon_K K}_{2} + \underbrace{\alpha_s(T_W - T_K)}_{3} + \underbrace{\beta\,(T_S - T_K)}_{4}$$

Die einzelnen Terme in der Gleichung sind hier, wie in der grafischen Darstellung nachfolgend nochmals beziffert:

F *Oberfläche der Kugel*
mc *deren Masse und spezifische Wärmekapazität*
TK *Temperatur der Kugel*
TL *Temperatur der Luft*
TS *Temperatur des Schaftes*
TW *Farbige Schattierung um das Thermometer kennzeichnet die umgebene Infrarotstrahlung bzw. der Wände*
t *Zeit*
αL *Wärmeübergangszahl*
α_s *Strahlungsübergangszahl*
β *Wärmedurchgangszahl*
K *einfallende kurzwellige Strahlung*
εK *kurzwelliges Absorptionsvermögen*

Des Weiteren die einzelnen Terme:

1 *Der turbulente Wärmestrom aus der Luft zum Thermometer*
2 *Die kurzwellige Strahlungsbilanz der Oberfläche (die kurzwellige absorbierte Strahlung)*
3 *Die langwellige Strahlungsbilanz der Oberfläche (als Temperaturdifferenz zwischen dem Thermometer und der umgebenen Luft; - beide stehen in langwelligem Strahlungsaustausch)*
4 *Wärmeleitung aus dem Schaft zur Kugel*

$$T_K - T_L = \frac{\epsilon_K K + \alpha_s(T_W - T_K) + \beta\,(T_S - T_K)}{\alpha_L}$$

Strahlungsfehler

Gehen wir von einem Thermometer aus, welches ungeschützt der Sonne ausgesetzt ist und diese auf das Thermometer scheint. Die weiteren Einflüsse können bei direkter Sonneneinstrahlung vernachlässigt werden. Allein dieser Einfluss ergibt mit *K= einfallende kurwellige Strahlung 300 W/m² εK= kurzwelliges Absorptionsvermögen 50% und eine αL =Wärmeübergangszahl von 30 W/m², u = Anströmgeschwindigkeit ms, d = Durchmesser der Thermometerkugel oder Sensor cm.*

Die Wärmeübergangszahl αL erreichen wir mit der Zahlenwertgleichung

$$a_L = 30\sqrt{\frac{u}{d}}\,\frac{W}{m^2\,K}$$

$$a_L = 30\sqrt{\frac{0.1\ ms}{1\ cm}\,\frac{W}{m^2\,K}} = 15.7\,\frac{W}{m^2}$$

$$T_K - T_L = \frac{\epsilon_K K}{\alpha_L} \qquad T_K - T_L = \frac{0{,}5\ \cdot 300\,\frac{W}{m^2}}{15.7\,\frac{W}{m^2}} = +9.5°K$$

Allein unter der Sonneneinstrahlung würde das Thermometer eine um 9,5 °C höhere Temperatur anzeigen. Die Einheit K hinter dem Zahlenwert bedeutet Kelvin [K], da in der Meteorologie Temperaturdifferenzen in Kelvin angegeben werden. Hier ist Kelvin und Grad gleichzusetzen. Bei einer Ventilation des Thermometers von 2 ms^{-1} und einer Wärmeübergangszahl von 71 W/m² würde die Abweichung bei einer Sonnenbestrahlung des Thermometers nur noch 2 K betragen. Die Temperatur J eines der Strahlung ausgesetzten Messfühlers weicht also umso mehr von der Lufttemperatur ab, je größer die Strahlungsbilanz Q und je kleiner die Wärmeübergangszahl aL ist.

Windgeschwindigkeit v in m s^{-1}	Wärmeübergangskoeff. α_L in W m^{-2} K^{-1}
0.1	15.7
0.2	22.1
0.5	35.0
1.0	49.5
2.0	70.9
5.0	110.7
10.0	156.5

Wärmeübergangskoeffizienten berechnet für eine senkrechte Ausströmung eines Zylinders mit 5 mm Durchmesser. Es müssen also bauliche Veränderungen vorgenommen werden, um das Messergebnis möglichst auf 0,1°C genau zu erfassen. Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Strahlungsschutzhütten auf dem Markt, neben der offiziellen die der DWD im Einsatz hat. Diese können über den Austausch der natürlichen Luftströmung ventiliert werden, aber auch aktiv mit einem Aspirator, der den Luftstrom künstlich Tag und Nacht aufrechterhält. Die Ventilationsgeschwindigkeit liegt dabei im Allgemeinen zwischen einem und zwei Meter pro Sekunde.

Strahlungsschutzhütte aus eloxiertem Aluminium mit weißer Lackierung.

Englische Wetterhütte Instrumentendarstellung (rechts: Psychrometer nach August, links: Thermohygrograph)

Der durch Strahlung bewirkte Fehler bei der Temperaturmessung ist umso größer, je höher der Betrag des Energiegewinns oder Verlust durch die Strahlungsprozesse und je kleiner die Wärmeübergangszahl α_L ist. Bei der inzwischen ausgediente englische Temperaturhütte bestand ein Wärmeübergang durch die Holzlamellen hindurch, da das Holz sich auch bei hoher Einstrahlung selbst erwärmt hat. Das Verhalten kann durchaus mit dem eines schwarzen Körpers mit einem Emissionsgrad $\varepsilon > 1$ betrachtet werden. Durch die Überhitzung der Hüttenwände überträgt sich dann die Wärme schließlich auf das Thermometer. Die gemessene Temperatur ist dann wieder höher als die wahre Umgebungstemperatur.

Die Gleichung für das Strahlungsgleichgewicht ist demnach:

$$Q = \varepsilon (G - \sigma T^4 - \sigma T^4 = 4 \cdot \sigma T^3 (\vartheta_H - \vartheta) = a_Q \cdot (\vartheta_H - \vartheta)$$

ε Emissionsgrad 0,9

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m² ·K⁴)… Stefan-Boltzmann-Konstante

T_H = absolute Umgebungstemperatur 20°C [293 K]

T= absolute Oberflächentemperatur am Temperatursensor 15°C [288 K]

Q = Wärmeübergang (W/m²)

Berechnung der Strahlungsflüsse:

1. Von der Umgebungsluft auf den Sensor

$$\mathrm{E_{Luft}} = \epsilon_{\mathrm{Luft}} \cdot \sigma \cdot \mathrm{T}^4 = 0{,}9 \cdot 5{,}67 \times 10^{-8} \cdot (293{,}15)^4 \approx 0{,}9 \cdot 418 = 376{,}2 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}^2$$

2. Vom Strahlungsschutz abgestrahlt:

$$\mathrm{E_{Sensor}} = \epsilon_{\mathrm{Luft}} \cdot \sigma \cdot \mathrm{T}^4 = 0{,}9 \cdot 5{,}67 \times 10^{-8} \cdot (288{,}15)^4 \approx 0{,}9 \cdot 379{,}6 = 360{,}6 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}^2$$

Die Nettostrahlungsbilanz ist somit:

$$\mathrm{Q_{Netto}} = \mathrm{E_{Luft}} - \mathrm{E_{Sensor}} = 376{,}2 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} - 360{,}6 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} = 15{,}6 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$$

Der Temperatursensor erhält 15,6 W/m² an langwelliger Strahlung aus der Umgebung

Strahlungsübergangszahl:

ϑ_L [°C]	-10	0	10	30
$a_Q \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right] \mathrm{K}$	4,2	4,7	5,2	6,4

Die Strahlungsübergangszahl nimmt mit der Temperatur leicht zu. Durch langwellige Strahlung wird ein Teil der Überhitzung der Hüttenwände auf das Thermometer übertragen. Ein Beispiel: Temperatur an der strahlungszugewandten Seite der Hüttenwand ϑ_L 30°C, Temperatur Hüttenthermometer ϑ_H 28°C , Wärmeübergangszahl für Strahlung aL 0,25 W/m², Strahlungsübergangszahl aQ 6,4 W/m²

$$\vartheta = \vartheta_L + \frac{\mathrm{aQ}}{(\mathrm{aL} + \mathrm{aQ})} \cdot (\vartheta_H - \vartheta_L)$$

$$\vartheta = 30°\mathrm{C} + \frac{6{,}4 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}}{\left(0{,}25 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2} + 6{,}4 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}\right)} \cdot (2\ \mathrm{K}) = 31{,}9°\mathrm{C}$$

Nach Angleichung zeigt das Hüttenthermometer durch die Wärmeübertagung von den Hüttenwänden eine um 1,9 °C höhere Temperatur. Wir setzen nun einen Lüfter in die Strahlungsschutzhütte und rechnen mit den gleichen Werten. Der Luftstrom soll mit 2 m/s das Thermometer künstlich ventilieren.

$$a_L = 30 \sqrt{\frac{2\ \text{ms}}{1\ \text{cm}}}\ \frac{W}{m^2\ K} = 42{,}4 \frac{W}{m^2}$$

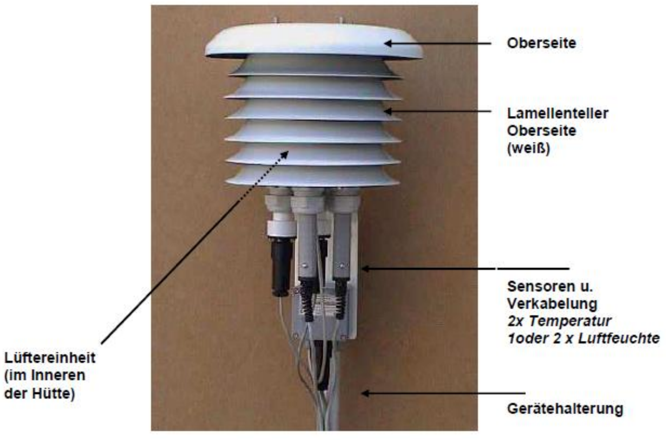
$$\vartheta = 30°C + \frac{6{,}4 \frac{W}{m^2K}}{\left(42{,}4 \frac{W}{m^2} + 6{,}4 \frac{W}{m^2K}\right)} \cdot (2\ K) = 30{,}2°C$$

Bei einer aktiven Belüftung in der englischen Hütte unter einem künstlich erzeugten Luftstrom, würde sich der Strahlungsfehler deutlich reduzieren und am Ende 30,2 °C anzeigen, also eine Abweichung von 0,2 K.

Direkte kurzwellige und langwellige Strahlungseinflüsse haben besonders über die Sommermonate bei sonnigen Verhältnissen die Messung der Temperatur massiv beeinflusst, so dass man heutzutage zu anderen Verfahren für die Temperaturmessung greifen muss. Quecksilber ist für die Temperaturmessung heute kaum noch im Einsatz, weil die Anpassung an die Umgebungstemperatur eine zu lange Zeit in Anspruch nimmt. Auch mit Alkohol gefüllte Glasthermometer haben eine zu hohe Ungenauigkeit. Wie schon erwähnt haben die „Englischen Hütten“ für die Temperaturmessung ausgedient, da die Strahlungsfehler noch zu hoch waren. Zum Einsatz kommen heute Metallwiderstandsthermometer aus Platin (PT100), die als dünne Drähte (0,01 – 0,1 mm Durchmesser) auf einen Glaskörper luftdicht eingeschmolzen sind.

Feuchtemessung

Es kommen zwei unterschiedliche Feuchtesensoren zum Einsatz.
Der Sensor HMP45D *(AMDA)* besteht aus einem porösen Material, das in der Lage ist, aus der Luft Wasserdampf zu kondensieren. Der Wassergehalt des Materials ist anschließend ein Maß für die Luftfeuchte und wird kapazitiv gemessen.
Der Feuchtesensor EE33 *(Modes)* besteht aus einer beheizten Feuchtesonde und einer zusätzlichen Temperatursonde. Über die analogen Ausgänge werden die Feuchte und die Temperatur ausgegeben.



Strahlungsschutzhütte mit Sensoren (automatische Messtechnik DWD)

Alle Sensoren sind in der weißlakierten Strahlungsschutzhütte (Foto oben) mit aktiver Belüftung untergebracht. Der Lüfter befindet sich im Inneren der Hütte und rotiert als Aspirator mit einem Luftstrom von 2 m/s. Zurück zur Temperaturmessung: Platindrähte haben sich wegen ihrer stabilen Temperatur-Widerstands-Abhängigkeit zur Messung durchgesetzt. Im Gegensatz zu den Glasthermometern mit einem Durchmesser von einem 1 Zentimeter kann die Temperatur mit einem Platindraht bis auf 0,01°C in der Strahlungsschutzhütte bestimmt werden. Der Platindraht hat einen Durchmesser von 20 µm = 2 x 10^{-4} cm.

$$a_L = 30\sqrt{\frac{2\,\frac{m}{s}}{20 \times 10^{-4}\ \text{cm}}}\ \frac{W}{m^2\,K} = \sim 1000\,\frac{W}{m^2}$$

$$\vartheta = 30°C + \frac{6{,}4\,\frac{W}{m^2K}}{\left(1000\,\frac{W}{m^2} + 6{,}4\,\frac{W}{m^2K}\right)} = 30{,}01°C$$

Das Beispiel zeigt sehr gut, wie man die Reduzierung der Störglieder, wie Sonneneinstrahlung und die richtige Auswahl des Thermometers, beseitigen und dadurch die Temperatur auf 0,01°C messen kann.

Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Sensoren, Messfühler und Handmessgeräte, mit der die Umgebungstemperatur bestimmt werden kann. Beabsichtigt man die Temperatur mit einem Handmessgerät bestimmen, bedarf es eine geraume Zeit, bis das Thermometer die Umgebungstemperatur angenommen hat. Dabei müssen auch die umgebenen Störeinflüsse, wie Wärmestrahlung des eigenen Körpers mitberücksichtigt werden. Man kann nun die Trägheitszeit eines Thermometers bestimmen, wie lange ein Messfühler braucht, um die Umgebungstemperatur anzunehmen:

Ausgleichszeit wird über die Wärmehaushaltsgleichung bestimmt:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_s}{dt} = hc \cdot A \cdot (T_U - T_S)$$

m: Masse des Sensors
C: Spezifische Wärmekapazität
h_c: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient (abhängig von Wind/Strömung)
A: wirksame Oberfläche
T_s: Temperatur am Sensor
T_U: Umgebungstemperatur

Ein Thermometer folgt bei konvektiver Erwärmung/Abkühlung näherungsweise der Newtonschen Gleichung:

$$\frac{dT}{dt} = -k \cdot \left(T - T_{Umgebung}\right)$$

- T: Temperatur des Körpers (Thermometer)
- T_{Umgebung}: Temperatur der Umgebung (z.B. Luft)
- k: Wärmeübergangskoeffizient (abhängig von Material, Oberfläche, Luftbewegung etc.)

Die Temperaturänderung ist proportional zur Differenz zwischen der aktuellen Temperatur des Körpers und der Umgebungstemperatur. Je größer der Unterschied, desto schneller erfolgt die Anpassung.

Folgend werden nun hier ein paar Beispiele für die Angleichungszeit mit verschiedenen Thermometern aufgezählt:

Glas Quecksilberthermometer 10 cm Glasstab, Masse Quecksilber und Glas m 0,015 kg, Wärmekapazität c 800 J/(kg·K)

$$\mathrm{m} \cdot \mathrm{c} \approx 0{,}015 \cdot 800 = 12\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$$

Oberfläche im Luftstrom $\mathrm{A} \approx 0{,}0015\ \mathrm{m}^2$

Konvektion bei ruhiger Luft $\mathrm{h_c} \approx 8\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}}$

Daraus folgt: $\mathrm{h_c} \cdot \mathrm{A} = 8 \cdot 0{,}0015 = 0{,}012\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$

$$\mathrm{T} = \frac{12}{0{,}012} = 1000\ \mathrm{s} \approx 17\ \mathrm{min.}$$

Bringen wir einen zwangsbelüfteten Sensor (aspirierter Sensor) mit Strahlungsschutzhütte in die umgebene Luft dann verringert sich die Zeit um ein Vielfaches.

Ausgangswerte:

m : Masse des Sensors = 0,0003 kg
c : Wärmekapazität (Draht/ Sensorelement auf Chip) = 500 J/kg · K)
A : Oberfläche des Sensors = 0,0001 m²
h_c: Erzwungene Konvektion (Aspirator 3 m/s) = 40 Wm² / K

$$\mathrm{h_c} \cdot \mathrm{A} = 40 \cdot 0{,}0001 = 0{,}004\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

$$\tau = \frac{0{,}15}{0{,}004} = 37{,}5\ \mathrm{s}$$

Wenn es sich um einen pt 1000 Temperaturfühler handelt, wie er oft an professionellen Wetterstationen eingesetzt wird, sind die Angleichungszeiten zum Teil noch kürzer, je nach Windgeschwindigkeit und entsprechendem Wärmeübergang.
Beispiele sind in der Tabelle aufgeführt. Die Angleichungszeit soll bei einem Sprung von 5 K berechnet werden.

Windgeschwindigkeit m/s	Wärmeübergang [(W/m² · K)]	Beschreibung	Reaktionszeit [s]
0,1	5	Kaum Konvektion	333
0,5	10	Leichte Luftbewegung	167
1,0	15	Schwacher Wind	111
2,0	25	Mäßiger Wind	67
5,0	40	Starker Wind	42
10,0	60	Stürmischer Wind	28

Als Beispiel sei hier noch ein Bimetall Thermometer angeführt, welches in Thermohygrographen eingesetzt wurde. Die Trägheit dieses Thermoelements ist sehr hoch, wodurch es heutzutage kaum noch Verwendung findet. Als Grundlage für die Berechnung sei hier ein Temperatursprung von 5 K (von 20°C auf 25°C) angenommen.

m : Masse des Sensors = 0,02 kg
c : Wärmekapazität = 500 J/kg · K)
A : Oberfläche des Sensors = 0,001 m²
h_c: Wärmeübergang bei leichter Luftbewegung = 10 Wm² / K

Berechnung der Zeitkonstante:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{h_c \cdot A} = \frac{0{,}002\ kg \ \cdot 500\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}}{10 \ \cdot 0{,}001\ \mathrm{m}^2} = \frac{10\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}}{0{,}001\ \mathrm{m}^2} = 1000\ s$$

$$\mathrm{T\ (t)} = 25 - 5 \ \cdot \mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{t}}{1000}}$$

Zeit [s]	Temperatur [°C]
0	20
300	21,6
600	22,6
1000	23,2
1500	24,0
2000	24,6
2300 (t 90%)	24,5

Nach etwa 1000 s = 16,7 min. hat das Bimetall-Thermometer etwa 90% des Zielwertes angenommen auf 23,2°C. Erst nach 50 min. sind mit einer Abweichung von 0,25 K 24,5 °C erreicht. Dies zeigt, dass für schnelle Temperaturänderungen ein Bimetall-Thermometer völlig ungeeignet ist.

Äußere Einflüsse der Umgebung auf den Sensor (Footprint) mit entsprechenden Fehlern bei der Temperaturmessung

Nachfolgend soll ein Beispiel aufzeigen, welcher Temperaturfehler sich einstellt, wenn das Thermometer an einer Außenfassade angebracht ist.

Ausgangssituation Winter:

Zimmertemperatur T innen = 23°C, Außenluft T außen 3°C, ΔT = 20 K.

Die Gleichung für den Wärmedurchgang von innen nach außen lautet:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_{innen} - T_{außen})$$

Typische U-Werte für Gebäude

Wandtyp	U-Wert [W/m² · K]
Altbau ungedämmt	1.2
Normaler Neubau	0.3
Sehr gut gedämmt	0.15

Der U-Wert gibt den Wärmestrom durch ein Bauteil abhängig vom Temperaturgefälle zwischen warmer und kalter Seite in der Einheit W/(m² ·K) an. Die Einheit beschreibt die hindurchströmende Energie pro Quadratmeter in Kelvin.

Hieraus errechnen sich dann die verschiedenen Wandtemperaturen aus dem Wärmeübergangskoeffizienten [hc] mit einem U-Wert von 0,3 [W/m² · K]

$$T_{Wand\ außen} = T_{außen} + \frac{Q}{hc}$$

1. *Windstille [hc 5 W/m²/K]*

$$T_{Wand} = 3 + \frac{6}{5} = 3 + 1.2 = 4.2°C$$

2. *Leichter Wind [hc 10 Wm²/K]*

$$T_{Wand} = 3 + \frac{6}{10} = 3 + 0{,}6 = 3{,}6°C$$

3. *Windig [hc 20 Wm²/K]*

$$T_{Wand} = 3 + \frac{6}{20} = 3 + 0.3 = 3{,}3°C$$

Für das Thermometer ergibt sich somit folgende Abweichung von der Lufttemperatur mit den Werten:

Außentemperatur 3°C, Wandtemperatur 4,2°C, Windstille [hc 5 W/m²/K], Konvektion für ruhige Luft 3 W/m² K, Fläche 0,005 m²

$$\Delta T = T_s - T_L = \frac{H_{Wand}}{h_{Luft} \cdot A_{Luft} + H_{Wand}} \cdot (T_{Wand} - T_{Luft})$$

Konvektiver Übergangswert:

$$h_{Luft} \cdot A_{Luft} = 3°C \cdot 0{,}005\ m^2 = 0.015\,\frac{W}{K}$$

Wärmewiderstand:

$$H = 0{,}015\,\frac{W}{K} + 001\,\frac{W}{K} = 0{,}025\,\frac{W}{K}$$

Temperaturfehler:

$$\Delta T = \frac{0{,}01\,\frac{W}{K}}{0{,}025\,\frac{W}{K}} \cdot (4{,}2°C - 3°C = 0{,}4 \cdot 1{,}2 = 0{,}5\ °C$$

Dieses Ergebnis erscheint im ersten Moment marginal zu sein. Aber bei höheren Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innentemperatur ergeben sich höhere Abweichungen. Im Sommer kann ein Wandthermometer gegenüber der Lufttemperatur bei geringer Luftbewegung zu niedrigen Werten führen, da die Wand Kühle abstrahlt auf den Sensor.

Einfluss auf den Temperatursensor im Sommer bei kühler Wand, Nordseite im Schatten

Lufttemperatur 25°C, Wandtemperatur 15°C ΔT 10 K, Footprint Gewichte mäßiger Wind, kein Strahlungsschutz $f_{Luft} = 0{,}6 \quad f_{Wand=}0{,}4$

$$T_{Sensor} = 0{,}6 \cdot 25°C + 0{,}4 \cdot 15°C = 21°C$$

Gegenüber der Lufttemperatur zeigt ein Thermometer an der kühlen Wand einen deutlich geringeren Wert an. Die Ursache dafür ist recht einfach: Die kühle Wand entzieht dem Thermometer Wärme. Der Wärmeübergang auf das Thermometer (Konvektion) reicht nicht aus, um das Thermometer an der Wand auf die wahre Lufttemperatur zu bringen. Noch extremer ist die Abweichung bei geringer Luftbewegung.

$$T_{Sensor} = 0{,}4 \cdot 25°C + 0{,}6 \cdot 15 = 19°C$$

Eine um – 6 K geringere Temperatur wird an einem Wandthermometer gemessen.

Deshalb sollten Temperatursensoren, gerade im Amateurbereich, möglichst weit von der Hauswand entfernt angebracht werden, um den Footprint möglichst klein zu halten. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Entfernungen zur Wand und die sich daraus ergebenen Abweichungen.

Abstand [m]	ΔT K
0,0	-5
0,2	-1,84
0,5	-0,41
1	-0,06

Auch die Umgebung zum Sensor wirkt sich auf die Messung der Temperatur aus. Hier beeinflusst der Footprint die zur windzugsandten Seite (Luv) auf das Thermometer die Messung. Das auch ein in einer strahlungsgeschützten Hütte angebrachter Sensor nicht immer die reale Lufttemperatur misst, haben wir ausführlich anhand von Beispielen erläutert. Deshalb ist der Standort ein wichtiger Faktor, um all die Störglieder möglichst zu reduzieren. Vereinfacht ausgedrückt misst ein Temperatursensor die vom Footprint-Effekt gewichtete mittlere Umgebungstemperatur, abhängig von Windrichtung und Geschwindigkeit. Dazu die folgende Berechnung:

$$T_{Sensor} = \sum_i W_i \cdot T_i$$

T_i = Effektive Temperatur” eines Bereichs i in der Umgebung (z. B. Boden, Wand, Wiese, Dach)
W_i = Gewichtung des Footprint-Bereiches $\sum_i W_i$ = 1

Folgende Werte werden angenommen:
T = Lufttemperatur 25°C
W = Windrichtung von West nach Ost (Footprint ist nach Osten hin verschoben)
V = 4 -5 m/s
S = Sensor in 2 m Höhe angebracht

Verschiedene Flächentemperaturen im Abstand zum Sensor

Untergrund [A]	*Temperatur °C*	*Abstand zum Sensor m*	*Footprint*
Wiese	27	20	0,6
Asphalt	40	40	0,3
Wand	45	50	0,1

Nach o.a. Gleichung ergibt sich folgende Summe:

$$W_A + W_B + W_c = 0,6 + 0,3 + 0,1 = 1,0$$

Berechnung der Footprint-Temperatur:

$$T_{Sensor} = wa \cdot T_{Wiese} + wb \cdot T_{Asphalt} + wc \cdot T_{Wand}$$

$$T_{Sensor} = 0,6 \cdot 27 + 0,3 \cdot 40 + 0,1 \cdot 45$$

$$T_{Sensor} = 16,2°C + 12°C + 4,5°C = 32,7°C$$

Die durch den Footprint-Effekt gemessene Temperatur von 32,7 °C entspricht einer Abweichung von + 7,7°C. Obwohl die Störfaktoren in einer guten Entfernung zum Sensor vorhanden sind, reicht es aus, um die Temperatur am Sensor deutlich zu erhöhen. Spätestens hier wird klar, wie wichtig eine aktive Belüftung mittels eines Aspirators wird. Dadurch kann der Footprint-Effekt weitestgehend reduziert werden.

Ob eine Strömung laminar oder turbulent am Temperatursensor vorhanden ist, kann anhand der Reynoldszahl ermittelt werden.

$$Re = \frac{p\,u\,L}{v}$$

v= Strömungsgeschwindigkeit
L= charakteristische Länge (z. B. Rohrdurchmesser)
ρ= Dichte des Fluids
μ= dynamische Viskosität
ν= kinematische Viskosität

Beispiel:
Sensorhöhe 2 m über dem Boden
Windgeschwind [u] 1,5 m/s
Durchmesser des Strahlungsschutzes 0,1 [m]
Kinematische Viskosität der Luft bei 20°C v = 1,5 X 10^{-5} m²/s
Dichte p 1kg
Für turbulente Verhältnisse:

$$\mathrm{Re} = \frac{1\ \mathrm{kg}\ \cdot 1{,}5\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0{,}1\mathrm{m}}{1{,}5\ \times 10^{-5}\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}} = 10000$$

Bei nahezu windstillen Verhältnissen:

$$\mathrm{Re} = \frac{1\ \mathrm{kg}\ \cdot 0{,}1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0{,}1\mathrm{m}}{1{,}5\ \times 10^{-5}\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}} = 667$$

Die Reynolds-Zahl sollte demnach oberhalb der kritischen Zahl gehalten werden. Dabei ist die kritische Reynolds-Zahl jener Bereich, in dem eine Strömung von laminar zu turbulent umschlägt.

Betrachten wir das Beispiel für einen Strahlenschutz, wie auf dem Foto, mit einer charakteristischen Länge [L= 0,02 m] als effektiven Durchmesser der Lamellen bei einer Lufttemperatur von 20°C
Sensor Durchmesser D = 5 mm = 0,005 m
Windgeschwindigkeit: u = 2 m/s
Temperatur Sensoroberfläche: T_s*= 25°C*
Dichte p = 1,2 Kg/m³
Viskosität der Luft bei 20°C μ = 1,8 x 10^{-5} *Pa · s*
Wärmeleitfähigkeit λ = 0,026 W (m K)
Prandtl-Zahl Pr = 0,71

Berechnung der Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{\mathrm{p \cdot u \cdot L}}{\mu} = \frac{1{,}2\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 2 \cdot 0{,}005\mathrm{m}}{1{,}8 \times 10^{-5}} = 667$$

Laminarer Bereich (Re < 1000)
Turbulenter Bereich (Re $> 2300 \ - 2800$)

Um noch besser die Korrelationen am Sensor beurteilen zu können, kann die Nusselt-Zahl hilfreich sein. Diese gibt Auskunft darüber, wie stark die Wärmeübertragung durch Konvektion im Vergleich zur reinen Wärmeleitung ist.

Berechnung der Nusselt-Zahl für eine Querströmung um den Sensor:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}4 + 0{,}5 \ \cdot \mathrm{Re}^{0{,}5} \cdot \mathrm{Pr}^{1/3}$$

$$\mathrm{Nu} = 0{,}4 + 05 \ \cdot (667)^{0{,}5} \cdot (0{,}71)^{\frac{1}{3}} \approx 0{,}4 + 0{,}5 \cdot 25{,}8 \ \cdot 0{,}9 = 11{,}9$$

Die Konvektion transportiert 11,9-mal mehr Wärme vom Sensor weg (oder zu ihm hin) als reine Wärmeleitung .

$$Re \ \leq 4000 \ \ Nu = 0{,}683 \cdot Re^{0{,}466} \cdot \ Pr^{1/3}$$

Wärmeübergangskoeffizient

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu} \ \cdot \lambda}{\mathrm{L}} = \frac{11{,}9 \ \cdot 0{,}026}{0{,}005} = 61{,}9 \ \mathrm{W/m^2}$$

Der Wärmeverlust am Sensor durch Konvektion ist somit:

$$\mathrm{Q} = \ \alpha \ \cdot \mathrm{A} \ \cdot (\mathrm{T_S} - \ \mathrm{T_U})$$

$$\mathrm{A} = \ \pi \cdot 0{,}005 \ \cdot 0{,}02 = 3{,}14 \ \times 10^{-4} \ \mathrm{m^2}$$

$$Q = 61{,}9 \cdot 3{,}14 \times 10^{-4} \ \cdot 5 = 0{,}097 \ \mathrm{W/m^2}$$

Der Temperatursensor verliert 0,1 W/m² durch Konvektion

Beispiele für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten

Wind v [m/s]	Re	Nu	h [W/(m²·K)]	
0,1	130	6	8	Laminarer Bereich
0,2	270	8	11	
0,5	670	13	16	
1	1300	18	23	
2	2700	24	31	Turbulenter Bereich
5	67001	40	52	
10	13000	61	79	

Die Auflistung zeigt deutlich ab welcher Windgeschwindigkeit bzw. einer aktiven Belüftung des Temperatursensors eine brauchbare Messung erfolgen kann.

Quellenangaben:

Angewandte Meteorologie (Foken, Mauder)
Elemente des Klimas
Meteorologie (Klose)
Die Atmosphäre der Erde (Kraus)