

Hitzefrei

Höhere Genauigkeit bei der Temperaturmessung

Hochpräzise Temperaturmessgeräte zu akzeptablen Preisen sind heute kein Problem mehr. Doch wer beim Messen nicht aufpasst, macht alle Genauigkeit wieder zunichte.

Wer Temperaturen genau messen will, könnte einfach die teuersten und technisch hochwertigsten Temperaturfühler und Messinstrumente kaufen, die das Budget hergibt. Doch zu optimalen Messergebnissen führt dies nicht unbedingt. Vor der Entscheidung über Sensor- und Instrumententyp sind drei Grundaspekte zu berücksichtigen:

- Wovon soll die Temperatur gemessen werden? Etwa die Raumtemperatur auf 1 °C genau? Gar nicht so einfach, denn die Raumtemperatur ist nicht einheitlich. Sie variiert mit der Höhe im Raum.

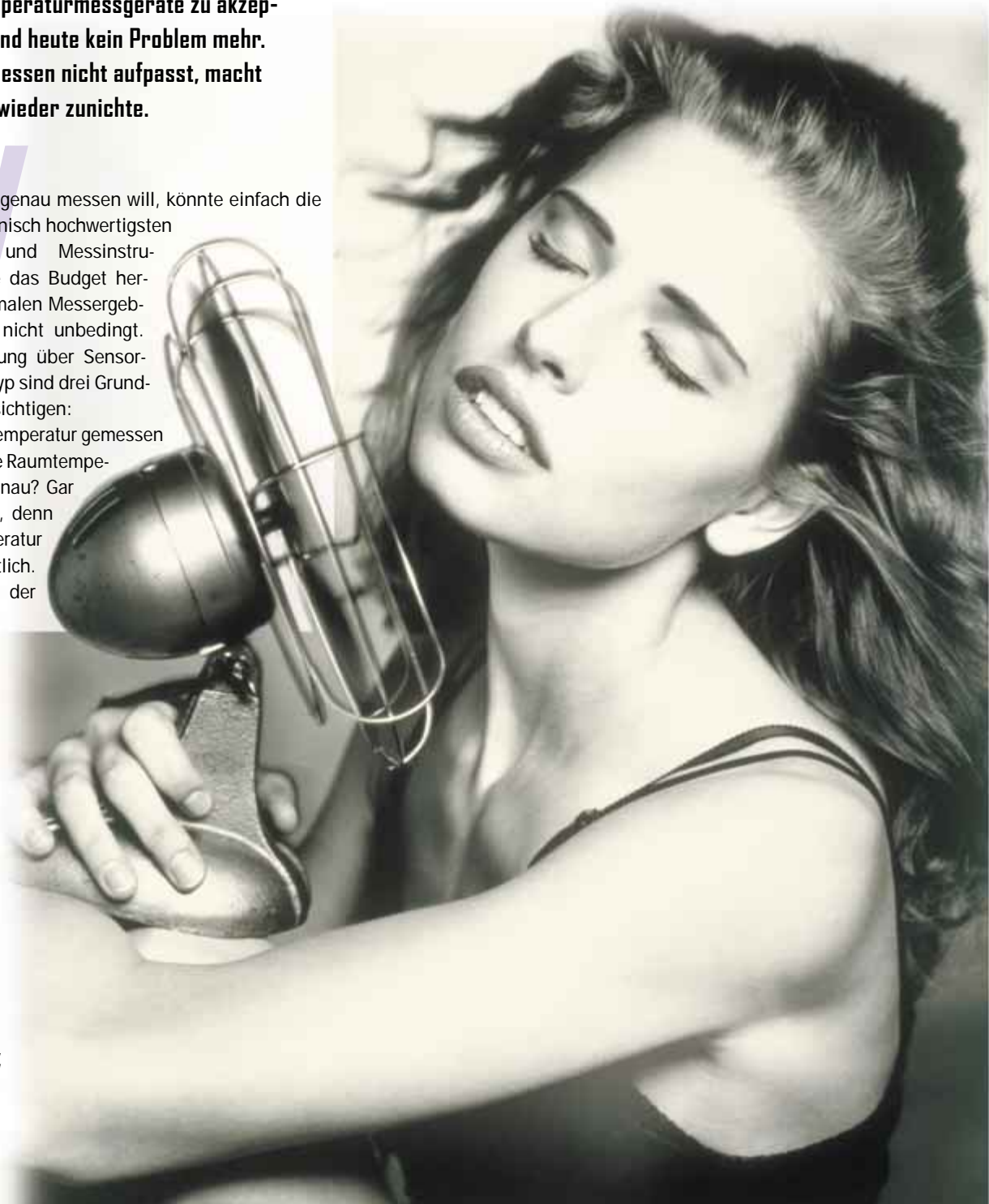


Bild Zefa,
präsentiert von Pico Technology

	Thermoelement	Widerstands-thermometer (Pt 100)	Thermistor
Messbereich	-200 °C bis 2000 °C	-250 °C bis 850 °C	-100 °C bis 300 °C
Genauigkeit	Niedrig typ. 1 °C	Sehr hoch typ. 0,03 °C	Hoch typ. 0,1 °C
Linearität*	Mittel	Hoch	Niedrig
Reaktionsgeschwindigkeit**	Hoch	Niedrig	Mittel
Kosten	Niedrig	Hoch	Niedrig bis mäßig
Wärmerauschen	Hoch	Mittel	Niedrig
Langfristige Stabilität	Niedrig	Hoch	Mittel
Kosten des Messgeräts	Mittel	Hoch	Niedrig

* Linearität spielt bei modernen digitalen Messinstrumenten keine Rolle, da im Speicher abgelegte Verweistabellen für Kompensation sorgen.
 ** Die Reaktionsgeschwindigkeit wird nur für das Messelement betrachtet, nicht für dessen Gehäuse.

Die am häufigsten eingesetzten Temperaturfühler und ihre Eigenschaften

- Es wird immer nur die Temperatur am Sensor aufgezeichnet. So misst ein Temperaturfühler an einem Warmwasserrohr nicht wirklich die Temperatur des Wassers – zwischen der Innen- und Außenseite des Rohrs besteht ein Temperaturgefälle. Die Temperatur der Umgebungsluft und der Luftstrom um den Temperaturfühler herum verstärken die Fehlmessung.
- Schließlich beeinflusst der Temperaturfühler selbst die Messung: Er kann sich und die Messstelle durch seinen eigenen Messstrom erwärmen.

Ist klar, was gemessen werden soll, so ist zu entscheiden, welcher Temperaturfühler-Typ hierzu passt. Die drei am häufigsten in Forschung und Industrie eingesetzten Sensoren sind Thermoelement, Widerstandsthermometer und Thermistor.

Thermoelemente werden zwar nicht als Präzisionsmessfühler angesehen – Fehler von 2 °C sind typisch –, aber sie haben einen großen Temperaturbereich von -200 °C bis 2000 °C und werden oft benötigt, weil andere Sensoren bei der gewünschten Temperatur nicht arbeiten würden. Sie sind außerdem relativ preiswert und vielseitig einsetzbar.

Da Thermoelemente eine – wenn auch kleine Spannung – selbst erzeugen, brauchen sie für ihren Einsatz keinen externen Erregerstrom. Allerdings reicht es nicht, einfach ein Voltmeter an das Thermoelement anzuschließen, um diese Spannung zu messen, weil dadurch zunächst zwei weitere, unkontrollierte Übergänge zweier unterschiedlicher Metalle entstehen, also zwei zusätzliche Thermoelemente. Man bedient sich deshalb einer Technik, die als »Kompensation der Vergleichsstellentemperatur« bezeichnet wird. Alle Standard-Thermoelementtabellen berücksichtigen diese zweite Vergleichsstelle, indem sie davon ausgehen, dass diese bei exakt 0 °C gehalten wird. Es ist üblich, die Vergleichsstellentemperatur mit einem Präzisionsthermistor abzugreifen, der guten thermischen Kontakt mit den Eingangsanschlüssen des Messinstruments hat. Das Messinstrument errechnet aus dieser zweiten Temperaturablesung zusammen mit der Ablesung vom Thermoelement die wahre Temperatur an der Sensorspitze des Thermoelements. Jeder Fehler bei der Messung der Vergleichsstellentemperatur würde daher voll in die Hauptmessung eingehen.

Thermoelemente bestehen aus dünnem Draht, um die Wärmeableitung zu minimieren und die Reaktionsgeschwindigkeit zu maximieren. Doch der dünne Draht bewirkt auch, dass Thermo-

elemente einen hohen elektrischen Widerstand aufweisen. Dies kann durch den endliche Eingangswiderstands des Messinstruments Fehler bewirken. Der gängige 32AWG-Draht mit 0,25 Millimetern Durchmesser hat bereits einen Widerstand von etwa 15 Ohm pro Meter. Benutzt man Thermoelemente mit dünnen Leitungen oder langen Kabeln, dann sind die Thermoelementleitungen selbst möglichst kurz zu halten und für die Verbindung zwischen Thermoelement und Messinstrument muss ein Thermoelement-Verlängerungskabel verwendet werden. Dieses ist viel dicker als die Sensorleitung und hat daher einen niedrigeren elektrischen Widerstand. Allerdings darf nur der zum Thermoelement passende Typ Verlängerung benutzt werden, sonst kommt eine zusätzliche, unerwünschte Thermoelement-Vergleichsstelle ins Spiel. Gleiches gilt für Stecker, Buchsen und Klemmleisten, die ebenfalls aus denselben zwei Metallen wie Thermoelemente und Verlängerungskabel bestehen müssen.

Da Thermoelemente nur Mikrovoltssignale liefern, können Störprobleme auftreten. Um diese zu minimieren, verlegt man die Kabel abseits von Störquellen und verdreht die beiden vom Thermoelement ausgehenden (isolierten) Leitungen, damit beide Kabel die gleichen Störungen aufnehmen. Man kann auch abgeschirmte Verlängerungskabel benutzen.

Ein letztes Problem bei Thermoelementen: Auch wenn sie durchaus große Temperaturbereiche abdecken können, können sie sich dauerhaft verändern (Fachbegriff: Dekalibration), wenn sie an den Extrempunkten des Arbeitstemperaturbereichs oder gar darüber hinaus betrieben werden.

Der nächste gängige Temperaturmessfühler ist das Widerstandsthermometer. Es ist die stabilste und genaueste, aber auch eine teure und zerbrechliche Lösung. Der zugrunde liegende physikalische Effekt: Der elektrische Widerstand eines Metalls steigt mit dessen Temperatur.

Das gängigste Widerstandsthermometer ist aus Platin mit einem praktischen Temperaturbereich von -250 bis +850 °C. Typabhängig zeigen Widerstandsthermometer eine Genauigkeit zwischen 0,03 und 0,3 °C. Der am häufigsten verwendete Platinsensor nennt sich Pt 100, weil er bei 0 °C einen Widerstand von 100 Ohm hat.

Da ein Pt-100-Sensor eigentlich ein Widerstand ist, kann sein Wert natürlich direkt mit einem Ohmmeter gemessen werden. Doch der geringe Widerstand des Sensors und seine ebenso geringe Empfindlichkeit (0,38 Ω/°C) machen wegen des Leitungswiderstands genaue Messungen schwierig. Ein Lei-

Superlink unter www.elektronikjournal.de



Service für Schnelleser

»Das teuerste Messgerät führt nicht unbedingt zum besten Messergebnis. Welche der drei gängigen Messfühlertechniken – Thermoelement, Platinwiderstand oder Thermistor – die Richtige ist, hängt nicht nur von der gewünschten Genauigkeit, sondern auch vom Messaufbau und der zu messenden Größe ab.«



Alan Tong ist Technical Director bei Pico Technology in Cambridgeshire, England

Pico Technology **317**

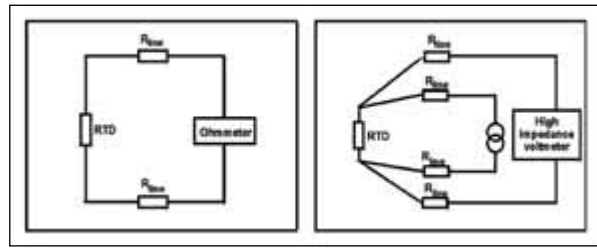
tungswiderstand von 1Ω in jeder der beiden Zuleitungen, mit der ein Pt 100 an das Messgerät angeschlossen ist, bewirkt bereits einen Fehler von über 5°C . Diesen Fehler kann man zwar bei einer Kalibrierung ausgleichen, doch ist ja auch der Leitungswiderstand temperaturabhängig und führt so nochmals zu Messfehlern. Daher wird ein Pt 100 normal mit vier Leitungen angeschlossen – zwei liefern den Messstrom, während die anderen zwei Leitungen zu einem hochohmigen Voltmeter führen. Konfigurationen mit zwei oder drei Leitungen – letztere geht oft fälschlicherweise davon aus, dass alle drei Leitungen den gleichen Widerstand haben – sollten für Messungen, die hohe Genauigkeit verlangen, nicht in Betracht gezogen werden.

Bei Widerstandsthermometern sollte der Erregerstrom so gering wie möglich sein – möglichst unter 1 Milliampere –, um die Eigenerwärmung des Sensors möglichst gering zu halten. Das reduziert jedoch die Ausgangsspannung am Sensor und damit das Signal/Rausch-Verhältnis und die Auflösung des Instruments. Moderne Instrumente kommen hiermit zurecht; das PT 104 von Pico Technology beispielsweise arbeitet mit einem Erregerstrom von nur $0,25 \text{ mA}$, liefert aber dank einer neuartigen Konstruktion und eines 24-Bit-Analog/Digital-Wandlers dennoch eine Auflösung von $0,001^\circ\text{C}$.

Physikalisch kleine Sensoren weisen Eigenerwärmungsfehler von bis zu $1^\circ\text{C}/\text{mW}$ an freier Luft auf. Ein Erregerstrom von 1 mA an 100Ω gibt also $0,1 \text{ mW}$ ab und erzeugt einen Fehler von $0,1^\circ\text{C}$. Ein physikalisch größerer Sensor hat minimale Eigenerwärmungsfehler, kann jedoch – wie in unserem Messbeispiel – Fehler durch Temperaturableitung bewirken.

Die schwachen Signale eines Pt-100-Sensor werfen ähnliche Probleme durch Störsignale auf, wie sie bereits für Thermoelemente beschrieben wurden. Die Gegenmaßnahmen sind die gleichen.

Ein letzter Stolperstein ist die Existenz zweier verschiedener Kompensationskurven. Der Standard DIN 43760, auch als »europäische Kurve« bezeichnet, nennt $0,385 \text{ Ohm pro } ^\circ\text{C}$ für einen Pt-100-Sensor. Es gibt aber auch eine »amerikanische Kurve«, die auf Platindraht höherer Reinheit beruht, der oft als Referenzstandard benutzt wird. Diese definiert den Temperaturkoeffizienten mit



Die Konfiguration mit vier Leitungen und getrennter Stromquelle (rechts) vermeidet bei Platinwiderstandsmessungen Messfehler durch die Leitungswiderstände.

$0,392 \Omega/^\circ\text{C}$. Die europäische Kurve herrscht vor – auch in Amerika – und die meisten Messinstrumente kompensieren deshalb nach diesem Standard. Hat der Platinsensor jedoch eine amerikanische Kurve und das Messinstrument kompensiert für einen europäischen Sensor, so ergibt sich ein zusätzlicher Messfehler.

Thermistoren sind die dritte gängige Messführlertechnik. In der Vergangenheit hatten sie bestenfalls fünf Prozent Genauigkeit, heute stehen sie dem Platinsensor nur noch wenig nach und sind mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ\text{C}$ zu sehr geringen Kosten verfügbar. Sie haben eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit und einen höheren Output je $^\circ\text{C}$ als Platinsensoren.

Wie die Platinsensoren nutzen auch Thermistoren den Umstand, dass sich der elektrische Widerstand eines Materials mit der Temperatur ändert. Die meisten Thermistoren arbeiten jedoch mit einem Metalloxid und haben einen negativen Temperaturkoeffizienten – der Widerstand sinkt nichtlinear mit der Temperatur.

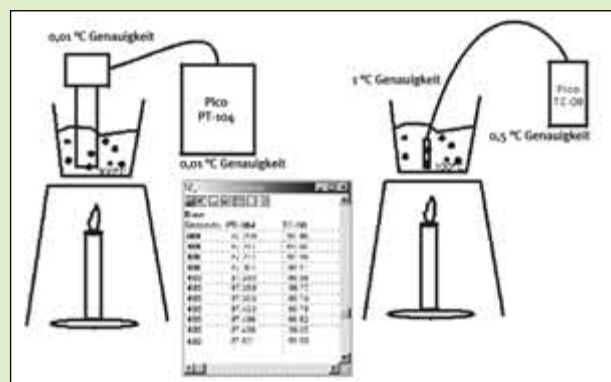
Thermistoren arbeiten in einem begrenzten Temperaturbereich von insgesamt -100 bis $+300^\circ\text{C}$ – ein konkreter Thermistor deckt jedoch nur einen Ausschnitt hiervon ab. Wegen der nichtlinearen Kurve und der beliebigen Materialmischungen ist der Sensor jeweils als Paket mit dem passenden Messgerät anzuschaffen.

Ein zu hoher Messstrom ist wie beim Platinsensor wegen der Eigenerwärmung zu vermeiden. Allerdings reichen beim Thermistor zwei Zuleitungen, weil sein Widerstand mit 1 bis $100 \text{ k}\Omega$ um Größenordnungen höher als der der Leitungen. Die hohe Empfindlichkeit macht Thermistoren ideal zum Erkennen kleiner Temperaturänderungen, besonders, wenn es nicht auf den absoluten Temperaturwert ankommt.

Wer teuer misst, misst großen Mist

Ein einfacher physikalischer Versuch – der Verlauf der Erwärmung von Wasser bis zum Siedepunkt – wurde jeweils mit einem Sensor und einem Instrument hoher beziehungsweise niedriger Genauigkeit aus dem Sortiment von Pico Technology durchgeführt. Die zugeführte Hitze und die Wassermenge waren gleich. Der eine Messaufbau benutzte einen großen, teuren, aber sehr genauen Pt-100-Temperaturfühler an einem PT-104-Messgerät. Beide Komponenten bieten eine Genauigkeit von $0,01^\circ\text{C}$.

Der Messfühler tauchte halb in das Wasser. Gleichzeitig tauchten wir ein billiges Thermoelement an einem Messgerät TC 08 in das zweite Becherglas. Dieses hat nur eine Genauigkeit von $0,5^\circ\text{C}$, der Sensor sogar von nur 1°C , doch da er kleiner ist als der Pt-100-Sensor, wird er vollständig vom Wasser bedeckt und misst daher korrekt. Der teure Pt-100-Sensor erwärmt sich dagegen durch seine Masse zu langsam und erreicht auch nicht die Endtemperatur, weil er



über die aus dem Wasser ragenden Teile zu viel Hitze verliert.

Das billigere Messgerät am billigeren Sensor bringt hier das bessere Ergebnis