

TEMPERATUR - KALIBRIERUNG

unter Verwendung von umgewälzten Flüssigkeitsbädern

1.) Einleitung

Die praktische Thermometrie wurde abgeleitet aus den Darstellungen der Gas-Gesetzmäßigkeiten (Boyle, Charles, Avogadro) in Verbindung mit der praktischen Entwicklung von Geräten, die die Gleichgewichtszustände wie den Tripel-, Erstarrungs- und Schmelzpunkt verschiedener sehr reiner Substanzen realisieren können.

Eine Kalibrierung ist dann möglich, wenn ein Wärmeaustausch zwischen dem Apparat, welcher z.B. die Tripelpunktzelle beinhaltet und dem darin befindlichen Temperaturfühler stattgefunden hat. Die Gesetze nach denen dieser Austausch stattfindet, sind die Hauptgesetze der Thermodynamik. (Joule, Kelvin, R. Mayer) Dieser Bereich der Wissenschaft ist so schwierig zu verstehen, daß erst nachdem die ersten 3 Hauptgesetze belegt waren, die eigentliche Grundlage bewiesen wurde. Diese mußte das "0." Hauptgesetz genannt werden. Es besagt: "Wenn zwei Systeme sich im Gleichgewicht befinden und jedes hat die gleiche Temperatur wie ein drittes, dann haben alle auch die gleiche Temperatur wie ein drittes." (1)

Man lese das 0. Gesetz eine kurze Zeit lang und denke darüber nach; es ist der Schlüssel für die Möglichkeiten der Vergleichskalibrierung. In der Praxis übersetzt heißt es, daß wenn ein kalibriertes Normal-Thermometer auf der gleichen Temperatur ist wie ein Kalibrierbad, und ein industrieller Temperaturfühler auch auf der gleichen Temperatur ist wie das Bad, das kalibrierte Normalthermometer und der industrielle Fühler auf der gleichen Temperatur sein werden wie alle anderen.

Eine andere hochinteressante Definition, die es zu behalten gilt, besagt: "Ein Thermometer erfaßt seine eigene Temperatur."

Dies scheint dem 0. Hauptsatz zu widersprechen.

Die Verbindung ist der erste Satz im Gesetz:

"Wenn zwei Systeme sich im **thermischen Gleichgewicht.....**"

Dies gilt es etwas später noch genauer zu betrachten.

2.) Temperatur-Kalibrierung mit umgewälzten Flüssigkeitsbädern

Die Kalibrierung von Thermometern wird in sehr unterschiedlichen Genauigkeits-Klassen durchgeführt. Für die höchste Genauigkeitsanforderung wurden Erstarrungspunkt-Zellen entwickelt, die zusammen mit Normal-Platinwiderstandsthermometern (NPWTH) die praktische Realisierung der Temperatur von den Gasgesetzen her definieren. Das ist die Grundlage der praktischen Temperaturskala. Die Geräte und Normal-WTHs wurden einzig für die Möglichkeit entwickelt, präzise Temperaturergebnisse zu erlangen.

Hat man einen bestimmten Grad dieser komplizierten Materie erreicht, vergißt man manchmal die Probleme, mit welchen sich die Betriebsingenieure täglich befassen müssen.



Sie haben sicherzustellen, daß ihre verwendeten Temperaturfühler, Anzeiger und Regler korrekt arbeiten.

Es ist sicher, daß der sehr große Bereich der Temperatur-Kalibrierung bei der Prüfmittelüberwachung bislang vernachlässigt wurde, weil in vielen Fällen die Temperaturfühler und die Kalibriereinrichtungen nicht die grundsätzlichen Anforderungen für eine präzise Temperatur-Kalibrierung erfüllten.

Auch wir haben diesen Bereich vernachlässigt, bis er nun heute die Hauptanwendung unserer täglichen Kalibrierarbeit darstellt.

Dieser Aufsatz versucht nun, die Unterlassung wieder gutzumachen. Beim Schreiben war sich der Autor bewußt, daß vieles von dem, was als Inhalt berücksichtigt wird, verallgemeinert werden muß, oder er hat sich angemaßt, einiges zu vereinfachen. Ohne dem kann keine Hilfe für diesen vernachlässigten Teil der Kalibrierwelt angeboten werden.

In den 80er Jahren wurden mehr und mehr Flüssigkeitsbäder für die industrielle Kalibrierarbeit eingesetzt. An diese und an die möglichen Anwender richtet sich dieser Aufsatz.

Kalibrierunfähige Konstruktionen

Anders als NPWTHs, die einzig für Kalibrieraufgaben entwickelt wurden, wurden 99% der industriellen Temperaturfühler entwickelt, ohne einen weiteren Gedanken an ihre Eignung für eine spätere Kalibrierung zu verwenden.

Zum Beispiel äußerte kürzlich ein Ingenieur den Wunsch, eine Umgebungstemperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ zu erfassen. Diese Messunsicherheit ist nur durch Kalibrierung zu erreichen. Er schlug einen Temperaturfühler von 40mm Länge vor. Als er gefragt wurde, wie er sich die Kalibrierung vorstelle, gab er zu, diesen Aspekt der Messung nicht berücksichtigt zu haben.

Die meisten industriellen Temperaturfühler wurden für den Einsatz in einer Schutzhülse, für die Oberflächenmontage oder auch nur zur Montage in einer Kesselwand entwickelt.

In einer perfekten Welt würden diese Fühler lang genug sein, um ohne Fehler, die durch Wärme- oder Kälteableitung verursacht werden, kalibriert werden zu können. (2)

Thermoelemente und Thermistoren erfüllen meistens diese Anforderungen. Aber Platin-Widerstandsthermometer (PTWTHs) haben einen Sensor mit 25mm Länge und benötigen so eine Eintauchtiefe von 150-200mm. In der Praxis können die Fühler noch kürzer sein als 40mm oder an der Oberfläche befestigt, ohne Eintauchtiefe. Diese Art der Temperaturerfassung erfüllt nicht die Anforderungen des "0. Hauptgesetzes", wonach alle in einem thermischen Gleichgewicht sind.

Bei solchen Längen hört ein Temperaturfühler auf, ein Thermometer in der normalen Bedeutung des Wortes zu sein. (Manchmal kann man von einem Temperaturahner sprechen.) Dies ist vermutlich bei den meisten industriellen Temperaturfühlern der Fall.

Der kurze Temperaturfühler erfaßt eine Temperatur irgendwo zwischen der Prozeßtemperatur, die gemessen werden soll, und der Umgebungstemperatur.

Unsere Betriebsingenieure stecken bei solchen Fällen in einem wahren Dilemma. Soll er den Fühler in der traditionellen Art kalibrieren, indem er ihn ganz in ein Medium eintaucht, um damit letztendlich die Mediumstemperatur zu erfassen?



Soll er, noch kontroverser, den Fühler in derselben Länge eintauchen in der er auch praktisch benutzt wird? Oder soll er an Ort und Stelle kalibrieren?

Die letzte Lösung ist die einzigst richtige, wenn man einen Weg finden kann, die wahre Prozesstemperatur ein- oder zweimal im Jahr mit einem kalibrierten, möglicherweise gut eingetauchten Fühler festzustellen, um diese dann mit der Anzeige des normalen Meßkreises zu vergleichen.

Gewöhnlich ist das nicht möglich.

Den Fühler herausnehmen und in einen Kalibrator mit der gleichen Eintauchtiefe zu geben, in der er sonst benutzt wird, ist die nächstbeste Lösung.

3.) Einige Überlegungen über Kalibratoren

Ein wichtiger Faktor, der die Kalibriergenauigkeit berührt, ist der Kontakt zwischen dem Fühler und dem Kalibrator.

Die Charakteristik des Wärmeüberganges im Kalibrator sollte ähnlich der sein, die beim Fühler in seiner normalen Mess-Situation vorhanden ist.

Zum Beispiel sind die meisten auswechselbaren Temperaturfühler in einer Schutzhülse oder in eine Blockbohrung eingebaut, was einen Luftspalt zwischen dem Fühler und der Innenwand der Hülse bzw. Bohrung bedeutet. Das Kalibrieren eines solchen Fühlers in einem Metallblockkalibrator ist daher ideal, weil es den Fühler in seiner Schutzhülle simuliert. Umgekehrt, ein normalerweise direkt in eine Flüssigkeit eingebauter Temperaturfühler wird im Luftspalt des Metallblock-Bades keine befriedigenden Kalibrierergebnisse bringen. Er sollte im umgewälzten Flüssigkeitsbad kalibriert werden.

Zusammenfassung bis hierher:

Ideal wäre ein Temperaturfühler, der so lang ist, daß nach Eintauchen in ein Kalibrierbad Fehler, verursacht durch Wärmeableitung, vernachlässigt werden können. Anhang 1 erklärt wie die Länge berechnet werden kann. (2)

Sollte der industrielle Temperaturfühler nicht diesen Kriterien entsprechen, und er nicht an Ort und Stelle kalibriert werden können, so sollte er in einem System kalibriert werden, das der tatsächlichen Mess-Situation so ähnlich ist als möglich.

4.) Verschiedene Kalibriermethoden

Die zwei wichtigsten Methoden der Kalibrierung mit umgewälzten Flüssigkeitsbädern ist einmal das Bad selbst als Standard, oder das Bad mit einem externen Kalibriernormal zu benutzen.

4.1.) Verwendung des Bades als Kalibriernormal

Bäder wie der AQUARIUS oder das NEPTUN werden mit einem Regler geliefert, mit dem im angegebenen Temperaturbereich jede Temperatur gefahren werden kann. Sie können mit einem Kalibrierzertifikat ausgerüstet werden, welches die Differenz (gewöhnlich an 5



Punkten) zwischen der Ist-Temperaturanzeige am Regler und der tatsächlichen Blocktemperatur, ermittelt durch ein Normalwiderstandsthermometer (NPWTH.), angibt.

Nach Bestücken des Bades mit den zu kalibrierenden industriellen Temperaturfühlern wird die Ist-Temperatur durch Berücksichtigung des Korrektur-Faktors mit der Regleranzeige berechnet.

Das Bad muß jährlich zur Re-Kalibrierung zurückgegeben werden.

4.2.) Verwendung eines externen Kalibrier-Normals

Dies ist eine etwas sichere Methode der Kalibrierung.

Das Bad wird hier benutzt, um konstante Temperaturverhältnisse (präzise Temperaturquelle) in der Nähe der gewünschten Kalibriertemperatur zu erzeugen.

Ein kalibriertes Thermometer stellt die aktuelle Temperatur des Bades fest, um anschließend die zu kalibrierenden Temperaturfühler mit dem kalibrierten Normal zu vergleichen.

Der Hauptvorteil dieser Methode ist, daß das kalibrierte Normalthermometer auch dazu benutzt werden kann, den Regler des Flüssigkeits-Bades zu kalibrieren. Damit kann das Bad auch benutzt werden, wenn das Thermometer zur jährlichen Rekalibrierung außer Haus ist. Es ist also eine Selbstkalibrierung der Kalibriereinrichtung möglich.

5.) 2 Fehler heben sich auf

Der Betriebsingenieur hat eine weitere Möglichkeit, wenn er mit einem einzelnen Spezialfühler konfrontiert wird. Er kann ihn eintauchen und das Kalibriernormal in etwa der gleichen Eintauchtiefe positionieren. Fürs erste Ergebnis kann man davon ausgehen, daß bei beiden Thermometern dann gleiche Wärmeableitfehler auftreten und sich damit die Fehler aufheben.

Die Vergleichskalibrierung mit einem externen Normalthermometer bietet zahlreiche Vorteile.

6.) Können Temperaturfühler durch die Flüssigkeiten in umgewälzten Flüssigkeitsbädern zerstört werden?

Die Antwort ist: Ja natürlich, aber es ist abhängig von der Flüssigkeit und vom Schutzrohrmaterial des Fühlers.

Silikonöle sind weniger aggressiv als Methanol oder Wasser.

Grundsätzlich sollten die Schutzrohre vor und nach der Kalibrierung in chlorierten Lösungsmitteln gereinigt werden.



Werden Salze bei hohen Temperaturen benutzt, so ist darauf zu achten, daß viele Materialien einschließlich Quarzglas angegriffen werden. Daher müssen hier rostfreie Edelstahlhülsen verwendet werden, um die Fühlerschutzrohre vom Medium zu schützen.

7.) Zusammenfassung

In dieser kurzen Abhandlung wurde eine Hilfestellung für den Betriebsingenieur versucht, die es ihm erleichtert, sich mit seinen Temperatur-Kalibrierproblemen näher zu identifizieren und es ihm ermöglicht, einfacher zu klären, welchen Typ von Kalibrator er benötigt.

Natürlich gibt es viele Wege einen Kalibrator einzusetzen, den man sich angeschafft hat. Die mitgelieferten Bedienungsanleitungen geben weitere wertvolle Ratschläge.

8.) Anhang: Thermometer - Eintauchtiefen

Definition: "Ein Thermometer ist ausreichend in ein System eingetaucht, wenn keine Wärme mehr zwischen dem Sensor und seiner Umgebung durch Anschlußleitungen oder Schutzrohre fließt, die vom Sensor zur Umgebungstemperatur führen.

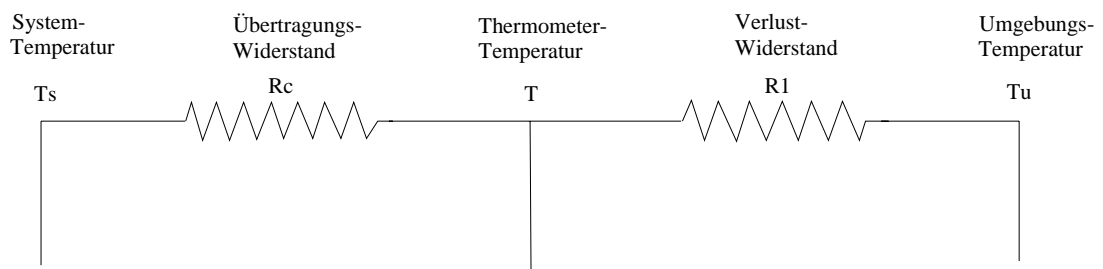
Wärmeleitung durch das Thermometer von oder zu der Umgebung wird abgeführt oder ersetzt durch ein Zusammenspiel von Wärmeleitung, Wärmefluß und -strahlung.

Ein einfaches Beispiel:

Der Wärmefluß $\Delta T = q \cdot R$ (Gleichung 9.1)

(Temperaturdifferenz = Wärmefluß · thermischer Widerstand)

kann mit dem Ohmschen-Gesetz verglichen werden und als Spannungs-/Widerstandskette dargestellt werden.



- * Je größer die Eintauchtiefe, um so größer ist der Verlust-Widerstand. Daher sollte das Thermometer soweit wie möglich eingetaucht werden.
- * Je größer die Eintauchtiefe, um so kleiner wird der Übertragungswiderstand sein.
- * Der Übertragungswiderstand ist auch abhängig von der thermischen Leitfähigkeit des Systems und wenn ein Fließverhalten da ist, wie groß ist die Fließgeschwindigkeit.

Eine einfache Formel: $T_e = (T_a - T_s) \cdot K_o \cdot e^{(-L/L_o)}$

wobei: **T_e** = Temperaturfehler
T_a = Umgebungstemperatur
T_s = Mediumstemperatur
K_o = Konstante, immer kleiner als 1
L = Eintauchlänge
L_o = Konstante, genannt die charakteristische Länge des Thermometers

Der maßgebliche Einfluß von **T_e** ist **L**. Macht man **L** lang genug, kann **T_e** bis zu einer unwesentlichen Größe reduziert werden.

Einige empirisch ermittelte Werte für einen max. Fehler von 1mK

Wir haben herausgefunden, daß bei einem Temperaturfühler mit Durchmesser 6-8mm und einem Messwiderstand von 50mm, 100mm Eintauchtiefe in einer Flüssigkeit von 0°C bei z.B. einem $\Delta T = 25^\circ C$ genügt.

Wir geben 30mm Eintauchtiefe hinzu bei einem $\Delta T = 250^\circ C$.

Wir geben 30mm Eintauchtiefe hinzu, wenn das Thermometer in einem Rohr mit einem Luftspalt anstatt in einer Flüssigkeit ist.

Wir haben herausgefunden, daß für einen Temperaturfühler mit einem Durchmesser von 4mm und einem 6mm langen Sensor 70mm Eintauchtiefe genügen, wenn das Thermometer auf 0°C in einer Flüssigkeit bei z.B. einem ΔT von 25°C ist.

Wir erhöhen die Eintauchtiefe wieder um 30mm bei $\Delta T = 250^\circ C$ und ebenfalls um 30mm, wenn der Fühler in einem Rohr mit Luftspalt ist.



Praktische Anwendung

Bei Anwendungen, bei welchen die Wärme-Übertragung des Systems gering ist, oder wo höchste Präzision in der Messung gefordert ist, kann ein simples Experiment in Verbindung mit Formel 9.2 zur Ermittlung von T_e führen.

Gerade 3 Messungen müssen dazu durchgeführt werden:

Nehmen wir an, 3 Temperaturmessungen wurden bei Eintauchtiefen von L_1 , L_2 und L_3 durchgeführt, wobei $L_1 - L_2 = L_2 - L_3 = \Delta L$ ist und die dabei ermittelten Temperaturen T_1 , T_2 und T_3 entsprechen.

Durch Formelumstellung bekommen wir dann:

$$T_s = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)^2}{2(T_2 - T_1) - (T_3 - T_1)}$$

und

$$L_0 = \frac{\Delta L}{\ln \frac{(T_2 - T_1)}{(T_s - T_2)}}$$

Beispiel:

Angenommen 3 Messungen in Eintauchtiefen von 30, 40 und 50mm ergaben Temperaturen von 115°C, 119°C und 121°C. Wo liegt die Systemtemperatur und die charakteristische Länge des Thermometers?

$$T_s = 115^\circ\text{C} + \frac{(119^\circ\text{C} - 115^\circ\text{C})^2}{2(119^\circ\text{C} - 115^\circ\text{C}) - (121^\circ\text{C} - 115^\circ\text{C})} = 123^\circ\text{C}$$



und

$$L_0 = \frac{(40\text{mm} - 30\text{mm})}{\ln \frac{(123^\circ\text{C} - 115^\circ\text{C})}{(123^\circ\text{C} - 119^\circ\text{C})}} = \frac{10^\circ\text{C}}{\ln^2} = 14\text{mm}$$

Literaturhinweise:

- (1) Physik für Ingenieure
Kap. 3.1.3 S. 143
VDI-Verlag ISBN 3-18-40-1398-7
- (2) Eintauchtiefen in thermische Systeme
Werksveröffentlichung Klasmeier GmbH
P. Klasmeier

