

# Hochpräzise Temperaturmessung und potentielle Überwachung von Strömungsparametern mit Hilfe eines multisensorischen Messsystems

## High Precision temperature measurement and potential supervising of flow parameters with the help of multi-sensory measuring system

M.Sc. Lutz Lippmann, TU Ilmenau, Erfurt, Deutschland, [lutz.lippmann@tu-ilmenau.de](mailto:lutz.lippmann@tu-ilmenau.de)

Dr.Ing. Klaus Irrgang, Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH, Geraberg

### Kurzfassung

Eine hochgenaue Temperaturmessung zur intelligenten Prozessüberwachung und/oder der Gewährleistung der Anlagensicherheit gewinnt in etlichen technischen Bereichen, wie der chemischen, der Lebensmittelindustrie oder in Anlagen zur Energiewandlung eine immer größere Bedeutung.

Mit Hilfe eines funktionsintegrierenden Messinstruments in Form eines multifunktionalen technischen Thermometers kann die Prozesssicherheit verbessert und gleichzeitig die Anzahl der Messstellen im Prozess verringert werden.

Durch die intelligente Vernetzung mehrerer, in einem Thermometer angeordneter, Temperatursensoren wird eine höchst präzise Temperaturmessung realisiert, welche nahezu unabhängig von äußeren Einflüssen ist. Mit Hilfe von zwei (oder mehr) axial versetzt in einem Schutzrohr angeordneten Sensoren ist es möglich, Rückschlüsse auf die Wärmeableitung innerhalb des Thermometers zu ziehen. Mit diesem Wissen kann die einbaubedingte, „statisch thermische Messabweichung durch Wärmeableitung“ nachträglich rechnerisch korrigiert werden.

Weiterhin ist es potentiell möglich, anhand des thermometer-inerten Temperaturverlaufs weiterer Prozessparameter, wie z.B. den Wärmeübergänge und/oder die Überprüfung der Plausibilität der jeweiligen Messergebnisse zu realisieren.

### Abstract

High precision temperature measurement for intelligent process control and/or the warranty of plant safety is gaining more and more importance in several technical fields like chemical and food industry or in power plants.

With the help of a functionally integrated measuring instrument in the form of a multifunctional technical thermometer the process reliability can be improved while in parallel the number of measuring points can be reduced.

By the interconnection of several sensors, that are well positioned in one thermometer a precise temperature measurement is realized that is almost completely independent from external circumstances. By means of two or more axially staggered sensors in one thermowell it is possible to draw conclusions about the heat dissipation inside this tube.

Knowing that, one can correct the “thermal static measurement error caused by heat dissipation” in a mathematical way. Furthermore, with the knowledge about the thermowell-inert temperature profile, it is possible to estimate additional parameters like e.g. properties of heat transfer and/or the plausibility of each measurand.

## 1 Motivation und Zielstellung

### 1.1 Motivation

Eine hochgenaue Temperaturmessung gewinnt in diversen technischen Bereichen immer mehr an Bedeutung. Die Einsatzbereiche reichen von der Bestimmung der Prozesstemperatur in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie bis hin zu Sicherheitsanwendungen in Kraftwerksanlagen. Dabei sind eine intelligente Prozessüberwachung zur effizienten Regelung in der

Verfahrenstechnik sowie die Detektion von kritischen Temperaturen für die Anlagensicherheit relevant.

In der Verfahrenstechnik dient die Regelung der Prozesstemperatur vordergründig dem einwandfreien Ablauf des jeweiligen technischen Verfahrens. Aufgrund der auftretenden Messabweichungen werden in der Industrie Sicherheitskorridore eingeführt, um die thermischen Anforderungen des Prozesses zweifelsfrei erfüllen zu können. Dies bedingt, dass aus Sicherheitsgründen ein Puffer zwischen Soll- und Ist-Temperatur implementiert wird, welcher zu einem unnötig hohen Energieverbrauch führt.

## 1.2 Zielstellung(en)

Ziel dieser Entwicklung ist eine verbesserte Überwachung von Prozessen der Verfahrens-, Lebensmittel- und Energiewandlungstechnik. Dabei werden die Prozesssicherheit und Energieeffizienz erhöht und gleichzeitig die Kosten und der Aufwand bzgl. der Installation weiterer Messstellen gesenkt.

Mit Hilfe eines funktionsintegrierenden Messinstruments in Form eines multifunktionalen Temperaturfühlers erfolgen eine präzise und zuverlässige Korrektur des thermischen Einbaufehlers von Berührungsthermometern sowie die Reduzierung der dynamischen Temperaturmessabweichung. Zusätzlich wird die simultane Überwachung einzelner Prozessparameter ermöglicht, sofern Informationen zu begleitenden Bedingungen vorliegen.

Die Selbstüberwachung einzelner Sensoren untereinander kann unter Zuhilfenahme verschiedener Messprinzipien (RTD / TE / NTC usw.) realisiert werden.

### 1.2.1 Korrektur der statisch-thermischen Messabweichung durch Wärmeableitung

Durch die intelligente Vernetzung mehrerer Temperatursensoren wird eine höchst präzise Temperaturmessung realisiert, welche nahezu unabhängig von äußeren Einflüssen ist. Dies ist in Anwendungsbereichen von Bedeutung, wo eine unzureichende messtechnische Installation der Thermometer toleriert werden muss. Unter anderem kann dieser Zustand in gasförmigen Medien und/oder bei einer Eintauchtiefe des Thermometers, welche weniger als dem zehnfachen des Durchmessers entspricht, eintreten.

Mit Hilfe von mindestens 2 axial versetzt in einem Schutzrohr angeordneten Sensoren ist es möglich, Rückschlüsse auf die Wärmeableitung innerhalb des Temperaturfühlers zu ziehen. Mit diesem Wissen kann die einbaubedingte Messabweichung durch Wärmeleitung nachträglich rechnerisch korrigiert werden. Dies ist konkreten Anwendungsfällen linear möglich (vgl.3.3).

### 1.2.2 Korrektur der dynamisch-thermischen Messabweichung

Bei Änderung der Mediumtemperatur kommt es zu einer verzögerten Antwort des entsprechenden Berührungsthermometers. Dieses verzögerte Ansprechverhalten kann mit Hilfe mehrerer Sensoren ebenfalls korrigiert werden. Da nicht jeder Sensor innerhalb des Temperaturfühlers bei einem Temperaturwechsel das gleiche Verzögerungsverhalten zeigt, ist aus diesen Unterschieden eine Vorhersage der letztendlichen Temperaturanzeige möglich, obwohl diese noch nicht eingetreten ist.

### 1.2.3 Eigenüberwachung des Thermometers

Da sich bei der Installation von mehreren Sensoren Redundanzen bezüglich des Messprinzips ergeben, werden sowohl Thermoelemente als auch Messwiderstände in verschiedenen Kombinationen angewendet. Mit einem solchen Aufbau könnte, durch die Reflexion gegen weitere, im selben Thermometer installierte Sensoren, eine inline Fehlerüberwachung durchgeführt werden.

## 2 Vorgehensweise

### 2.1 Versuchsbedingungen & Applikationen

Es gab ein ZIM-Kooperationsprojekt zwischen tmg und der TU Ilmenau mit dem Thema "Multifunktionaler intelligenter Temperaturfühler zur hoch genauen Temperaturmessung und weitergehenden Charakterisierung verschiedener Arbeitsmedien".

Im Zuge der Kombination von Versuchsparametern für dieses Projekt fanden sowohl die konkreten Applikationsmöglichkeiten im industriellen Bereich als auch die Realisierbarkeit im experimentellen Stadium Berücksichtigung. Ergebnis ist ein Versuchsszenario mit gasförmiger Rohrströmung sowie Untersuchungen in umgewälzten Flüssigkeitsbädern. Aufgrund des wesentlich geringeren Wärmeübergangs von Gasen im Vergleich zu flüssigen Medien, ist eine Korrektur der thermischen Messabweichung in gasförmigen Medien wesentlich relevanter.

In Flüssigkeitsbädern dagegen kann experimentell wesentlich präziser temperiert werden und i.d.R. ist die Anströmung des Probanden durch Umwälzung realisiert.

Die Versuchsparameter ergeben sich demnach wie folgt:

- Temperaturbereich 25 °C - 200 °C
- Strömungsgeschwindigkeit 1 m/s - 30 m/s

| Applikations-Feld      | Medium          | T-Bereich<br>[°C] | Strömung            |                                      |
|------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------|
|                        |                 |                   | $v_{Rstr}$<br>[m/s] | $\alpha$<br>[W / m <sup>2</sup> · K] |
| Petrochemie            | Diverse Gase    | 25 °C – 200 °C    | 2-10                | 100 – 5000                           |
| Klimakammer            | Luft            | 25 °C – 200 °C    | 0 – 5               | < 100                                |
| Kraftwerke             | Erdgas / Biogas | 10 °C – 1000 °C   | 40-150              | 500 – 800                            |
| Lebensmittel-Industrie | Milch etc.      | 25 °C – 80 °C     | 2-10                | 4000 - 8000                          |

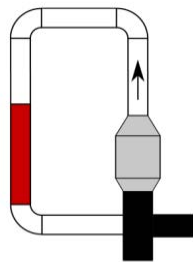
**Tabelle 1** Potentielle Anwendungsszenarien

## 2.2 Teststände & Testumgebung

Um die in Tabelle 1 angegebenen Anwendungsszenarien abzubilden, wurden bei den Kooperationspartnern verschiedene Versuchsstände konzipiert und realisiert.

### 2.2.1 TU Ilmenau

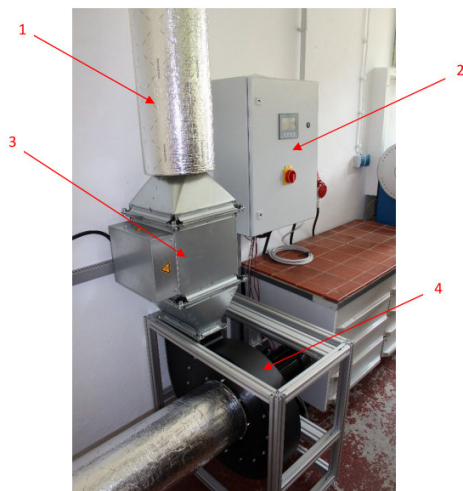
Im Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau wurde ein Prüfstand als Windkanal nach Göttinger Bauart konzipiert und aufgebaut. Dies bedeutet, dass, wie in Bild 1 zu erkennen ist, der Windkanal ein in sich geschlossenes System darstellt, was aufgrund der zu erzielenden Temperaturen von bis zu 200°C energetisch und regelungstechnisch zwingend erforderlich ist.



**Bild 1** Schematische Darstellung des Versuchsstands mit:

- Radial-Lüfter (schwarz)
- Heizregister (grau)
- Prüfstrecke (rot).
- Die Strömungsrichtung des Luftstroms ist eingezeichnet.

Die Rohrstrecke des Prüfstandes verfügt über einen Durchmesser von  $\varnothing = 150\text{mm}$ , was den Dimensionen der zu verwendenden Probanden Rechnung trägt. Das Verhältnis von Eintauchtiefe zu Durchmesser sollte mindestens 10 betragen, damit der Einbaufehler unter idealen Bedingungen  $\leq 0,01\%$  des Messwertes beträgt. Die verwendeten Probanden mit einem Durchmesser von  $\varnothing 6\text{mm}$  -  $\varnothing 12\text{mm}$  erfüllen folglich, bei vollständiger Integration in die Messstrecke, dieses Kriterium.



**Bild 2** Foto des Prüfstands mit:

- Isolierung der Rohrstrecke
- Regelungseinheit
- Heizregister
- Radiallüfter

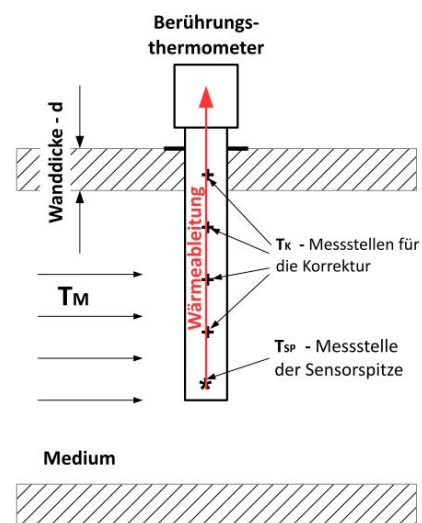
### 2.2.2 Flüssigkeitsbäder bei der Firm tmg

Die Messreihen wurden in thermisch geregelten Umwälzbädern (Firma Julabo) durchgeführt.

Dabei wurden Eintauchtiefe und Badtemperatur variiert.

## 2.3 Versuchsobjekte / Probanden

Es werden bis zu vier Temperatursensoren (RTD & TE), axial versetzt, in einem Eintauch-Thermometer angeordnet (Bild 3). Mit dieser Anordnung der Sensoren kann der Temperaturverlauf in axialer Richtung im Inneren des Thermometers bestimmt werden. Anhand dessen kann auf die Wärmeableitung von der Messspitze durch das Thermometer hindurch an die Umgebung geschlossen werden.



**Bild 3** Schematische Darstellung eines 4 axial versetzt angeordneten Sensoren

In Bild 3 ist das grundlegende Schema eines solchen Temperaturfühlers mit bis zu vier integrierten Temperatursensoren dargestellt.

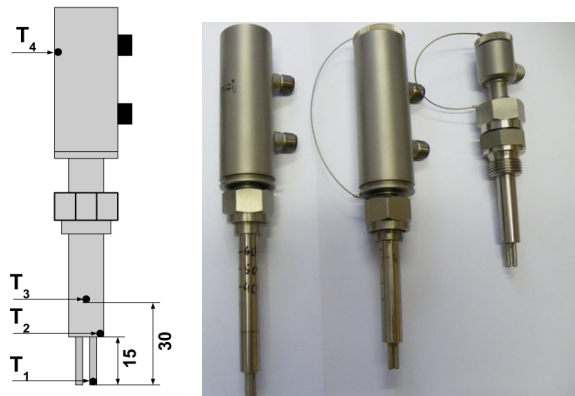
Es werden folgende Parameter der Grundbauform eines zylindrischen Berührungsthermometers variiert:

- Der Durchmesser des Thermometers
- Die Art der integrierten Sensoren (TE / RTD)

Das Basis-Muster, eine mit nur zwei Sensoren bestückte Variante des in Bild 3 dargestellten Thermometers, stellt den Ausgangspunkt der Untersuchungen dar. In dieser Ausführung kommt ein Platinmesswiderstand (Pt100, Kl. AA) sowie ein Thermoelement (Typ T Kl.1) zum Einsatz.

### 2.3.1 „MUSEFF-Thermometer“

Im Original-Aufbau dieses bereits im industriellen Einsatz befindlichen Thermometers ist lediglich ein Temperatursensor ( $T_1$ ) in der konstruktiv abgesetzten Messspitze installiert. Aufgrund der kurzen Einbaulänge von nur 15mm kommt es, trotz dieser konstruktiven Anpassung, zu einer deutlichen statisch-thermischen Messabweichung durch Wärmeableitung. Aus diesem Grund erfolgte, mit dem Ziel der Verbesserung der messtechnischen Performance, die Integration zusätzlicher Temperatursensoren in diesem Thermometeraufbau (siehe Bild4).



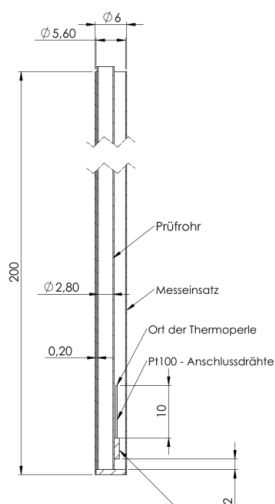
**Bild 4** MUSEFF - Thermometeraufbau

$T_2$  &  $T_3$  dienen der Charakterisierung des Wärmestroms und sind äquidistant zum Pt100-Flachmesswiderstand in der Thermometerspitze angeordnet.

$T_4$  ist ein zusätzlicher Pt100-Messwiderstand, welcher nicht in den Innenaufbau des Thermometers integriert, sondern am Thermometerkopf installiert ist. Dieser dient somit der Charakterisierung der Umgebungstemperatur im direkten Umfeld des Thermometers.

Untersucht wurden drei Prüflinge nahezu gleicher Bauart, welche sich lediglich in der Prozesseinbaulänge ( $P_1$ : 75mm,  $P_2$ : 100mm,  $P_3$ : 125mm) unterschieden.

### 2.3.2 PH54



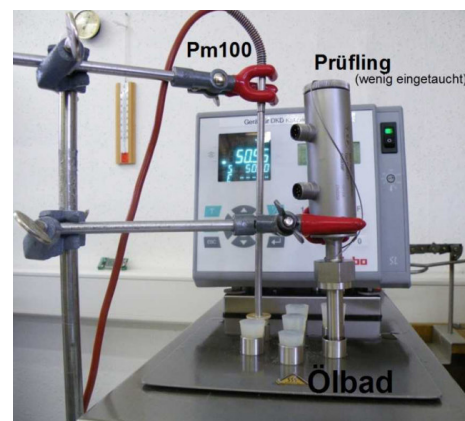
**Bild 5** Zeichnung: PH54-Innenaufbau

Der PH54 ist ein Berührungsthermometer mit Schutzrohr, in dessen Messeinsatz (PX54) zwei Temperatursensoren unterschiedlicher Messprinzipien (Pt100 + TE TypT) integriert sind. Bild5 zeigt den Innenaufbau des Messeinsatzes PX54. Die beiden Sensoren sind im Messeinsatz axial um 10mm versetzt angeordnet. Das in den Messeinsatz inkludierte Prozessprüfrohr dient, neben einer damit möglichen In-Situ-Kalibrierung, auch als Montagehilfe für den zweiten Sensor ( $T_{SKorr}$ ).

## 2.4 Versuchsdurchführung

### 2.4.1 Messreihen in Flüssigkeitsbädern bei tmg

Die zu untersuchenden Probanden wurden einzeln in verschiedenen Eintauchtiefen in ein Ölbad installiert. Der Temperaturwert des verwendeten Referenznormals (PM100) galt als Mediumstemperatur, auf welchen die übrigen ermittelten Werte bezogen wurden. Die Messwertbestimmung der einzelnen Sensoren erfolgte stets in Vierleiterschaltung mit Hilfe eines DMM mit Messkartenumschalter. So konnten mehrere Temperatursensoren in sehr kurzer Zeitabfolge bei gleichzeitig hoher Signalgüte aufgezeichnet werden.



**Bild 6** Versuchsaufbau mit unterschiedlicher Eintauchtiefe der Versuchsobjekte (MUSEFF)

### 2.4.2 Messreihen im Luftkanal der TU Ilmenau

Während der durchgeführten Untersuchungen wurde lediglich der statische Zustand der Temperaturmessung betrachtet. Das heißt, dass bei jeder betrachteten Parameterkombination aus den Veränderlichen: Strömung und Temperatur, die Messwertaufzeichnung erst nach einer bestimmten Einstellzeit stattfand, wenn sich das gesamte System in einem thermisch ausgeglichenen Zustand befand.

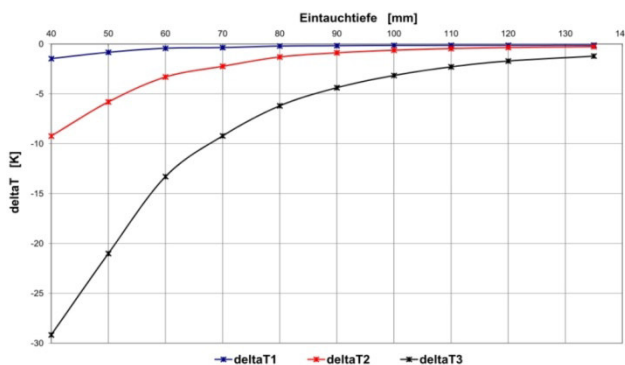
Die Temperaturmessung erfolgte mit einem Digitalmultimeter mit einer Multiplexer-Messkarte mit integrierter Vergleichsstelle. So wurden Thermoelemente und Widerstandsthermometer parallel zueinander aber unabhängig voneinander aufgenommen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Im Ölbad

##### 3.1.1 „MUSEFF“

Im Zuge der Messreihen wurde die statisch-thermische Messabweichung durch Wärmeableitung ermittelt. Durch einen entsprechenden Versuchsaufbau (vgl. Bild 6) konnte dessen Abhängigkeit von der Eintauchtiefe bestimmt werden.



**Bild 7** Temperaturdifferenzen innerhalb des Versuchsthermometers (vgl. Prüfling-3 in Bild4) in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe

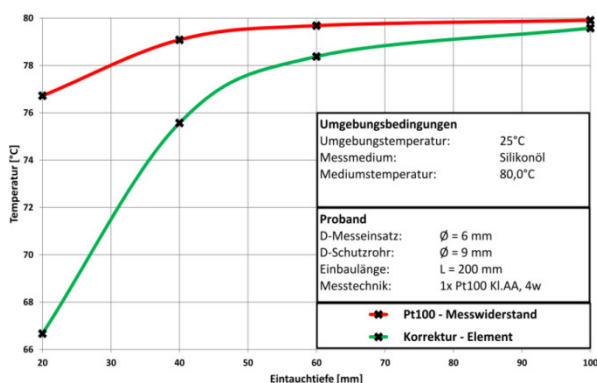
Wie Bild 7 sehr gut verdeutlicht, nähert sich die Messabweichung mit zunehmender Eintauchtiefe und damit besserer Integration des Fühlers in das Messmedium, asymptotisch dem Betrag Null an. Der Verlauf der Messabweichung in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe ist offensichtlich nichtlinear. Die Beschreibung der Kurve kann mit Hilfe zweier verschiedener Methoden erfolgen.

In den Ausführungen von Fritz Lieneweg [2] ist eine Näherung mittels der e-Funktion in Form der Gleichung:

$$\Delta T_{\text{Mess}} = T_S - T_M = (T_U - T_M) \cdot C \cdot e^{-z}$$

Nach Frank Bernhard [1] existiert die Variante mit Hilfe eines Kopplungsfaktors:  $B = (T_S - T_M) / (T_U - T_M)$

##### 3.1.2 PH54



**Bild 8** Ergebnisse in Bezug auf die Abhängigkeit des Korrekturfaktors mit einem PH54.

Beide Temperaturmesswerte nähern sich mit größer werdender Eintauchtiefe erwartungsgemäß dem Temperaturwert des Ölbad (80°C) an, wobei der qualitative Kurvenverlauf beider Kurven sehr ähnlich ist.

#### 3.2 Am Luftkanal der TU Ilmenau

Aufgrund der gegebenen Prozessanschlüsse am Luftkanal wurden Untersuchungen nur mit dem PH54 durchgeführt. Die Messergebnisse in Tab2 sind in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit notiert, da diese sich direkt auf den Wärmeübergang und somit die statisch thermische Messabweichung des Thermometers auswirkt.

**Tabelle 2** Beispielhafte Messergebnisse am Luftkanal

| Strömung<br>[m/s] | Pt100<br>[°C] | Korrektur-TE<br>[°C] | Berechnungen             |              |
|-------------------|---------------|----------------------|--------------------------|--------------|
|                   |               |                      | $\Delta T_{\text{mess}}$ | $\Delta T_x$ |
| 2,5               | 77,9          | 76,1                 | -2,1                     | 1,8          |
| 5                 | 78,4          | 76,7                 | -1,6                     | 1,7          |
| 10                | 78,8          | 77,2                 | -1,2                     | 1,7          |
| 20                | 79,1          | 77,5                 | -0,9                     | 1,6          |

Schutzrohr: Ø12mm, ET = 60mm,  $T_{\text{Strömung}} = 80^\circ\text{C}$

Das Messergebnis stellen die beiden Temperaturmesswerte (Pt100 in der Messspitze + Korrektur-Thermoelement) sowie die unmittelbar daraus abzuleitenden Differenzen dar.

Die gefundenen Ergebnisse unterscheiden sich quantitativ von den Untersuchungen im Ölbad. Das Grundprinzip der in 3.1.1 dargestellten Korrelationen ist weiter vorhanden.

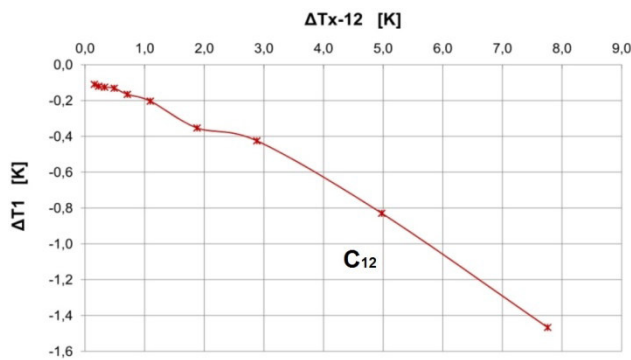
#### 3.3 Korrekturmöglichkeiten

##### 3.3.1 Grundidee

Aufgrund der Staffelung der einzelnen Sensoren innerhalb der Prüflinge ist es möglich, ein Bild des Temperaturfeldes innerhalb des jeweiligen Prüflings zu erhalten und somit Rückschlüsse auf die Wärmeableitung innerhalb des Temperaturfühlers zu ziehen.

Die Reduzierung des komplexen Problems auf eine Lösung mittels nur zweier Temperaturmessstellen bedingt eine Linearisierung der Korrekturgleichung. Damit ist bereits eine Korrektur der statisch-thermischen Messabweichung durch Wärmeableitung (Einbaufehler) unter bestimmten Vorgaben, mit Hilfe eines zusätzlichen Faktors möglich. Wie zu erwarten ist, nimmt die Messabweichung einzelnen Sensoren ( $T_1$  bis  $T_4$ ) mit wachsendem Abstand von der Fühlerspitze zu (vgl. Bild7). Bezieht man nun den primären Temperaturmessfehler ( $\Delta T_1$ ) auf dessen Differenz zu einem anderen im Prüfling befindlichen Sensor ( $\Delta T_x$ ), so wird deutlich, dass  $\Delta T_1$  und  $\Delta T_x$  bei jeweils der gleichen Eintauchtiefe gegeneinander aufgetragen annähernd eine Gerade bilden (siehe Bild 9).

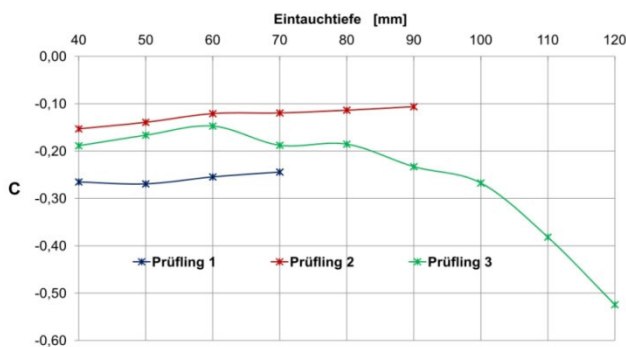




**Bild 9:** Ermittlung von C12 am Beispiel des MUSEFF-P1

Das Verhältnis von  $T_1$  und  $T_2$  (ergibt sich zu  $C_{12}$ ) kann als Anstieg einer gemittelten Trendlinie durch diese in Bild 8 abgebildete Kurve beschrieben werden. Derselbe Effekt ist zu beobachten, wenn andere Temperaturdifferenzen innerhalb des Thermometers zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Der gemittelte Anstieg dieser Kurven dient folglich als Korrekturfaktor.

In Bild 10 ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Eintauchtiefen, bei denen die Probanden untersucht wurden, keinen signifikanten Einfluss auf den Korrekturfaktor haben. Weiterhin ist darin abzulesen, dass der Verlauf des Korrekturfaktors von P3 sich bei sehr großer Eintauchtiefe (ab 90mm) merklich verändert. Aufgrund der sehr guten thermischen Anbindung an das Medium werden die Temperaturmessabweichung und gleichzeitig auch die Temperaturdifferenz zwischen den einzelnen Sensoren innerhalb des Prüflings sehr gering. Dieser Umstand führt dazu, dass  $C$  nur noch mit einer großen Unsicherheit berechnet werden kann, da selbst kleinste Abweichungen einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis des Korrekturfaktors haben. Das Ergebnis des Korrekturfaktors wird, aufgrund der geringen Quantität der thermischen Messabweichung unscharf.



**Bild 10** Korrekturfaktor der drei MUSEFF-Prüflinge in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe

### 3.3.2 Anwendung des Korrekturfaktors

Der Korrekturfaktor ( $C$ ) wird mittels der Formel:

$$C = \Delta T_{\text{Mess}} / \Delta T_X \text{ berechnet.}$$

**Tabelle 3** Test der Korrekturmöglichkeit am Beispiel des PH54-Probanden (vgl. 3.2)

| ET  | Pt100 | TE-Korrekt | Berechnungen             |              |       |                  |
|-----|-------|------------|--------------------------|--------------|-------|------------------|
|     |       |            | $\Delta T_{\text{mess}}$ | $\Delta T_X$ | $C$   | $T_{\text{neu}}$ |
| 20  | 76,7  | 66,7       | -3,3                     | 10,0         | -0,33 | 79,5             |
| 40  | 79,1  | 75,6       | -0,9                     | 3,5          | -0,26 | 80,1             |
| 60  | 79,7  | 78,4       | -0,3                     | 1,3          | -0,24 | 80,0             |
| 100 | 79,9  | 79,6       | -0,1                     | 0,3          | -0,28 | 80,0             |

Die aus den Messungen und dem **Mittelwert des Korrekturfaktors** ( $C = -0,3$ ) berechnete Temperatur ( $T_{\text{neu}}$ ) ist das finale (verbesserte) Ergebnis, welches ohne Kenntnis der tatsächlichen Strömungstemperatur errechnet würde.

$$T_{\text{neu}} = T_S + C \cdot \Delta T_X$$

## 4 Fazit und Ausblick

Die Abhandlungen haben gezeigt, dass die physikalisch bedingte statisch-thermische Messabweichung durch Wärmeableitung mittels einer Korrektur anhand von Temperaturdifferenzen innerhalb des Temperaturfühlers deutlich reduziert werden kann.

Anders als bei den bisher bekannten Methoden zur Korrektur des statisch-thermischen Messfehlers ist man bei diesem Verfahren nicht auf die Bestimmung der Umgebungstemperatur angewiesen. Stattdessen wird durch mehrere Sensoren innerhalb des Temperaturmessfühlers auf die Wärmeableitung innerhalb des Thermometers geschlossen.

### 4.1 Bestimmung der Fluideigenschaften

Über die rechnerische Korrektur hinaus könnten, anhand der Temperaturverteilung entlang des Temperaturfühlers, auch die Eigenschaften (Strömungsverhältnisse, Wärmeübergänge etc.) des Mediums oder periphere Bedingungen charakterisiert werden. Sind diese Parameter analog zum Verhältnis der einzelnen Messwerte zueinander bekannt, so ist mit einer solchen Anwendung die Betrachtung des Prozesses über die bloße Temperaturmessung hinaus möglich. So könnten z.B. der zwischenzeitliche Abriss einer Strömung oder evtl. Defekte des Thermometers (z.B. Fouling-Effekte) anhand von Mustererkennungen (KI) nahegelegt werden.

## 5 Literatur

- [1] Fritz Lieneweg, editor. Handbuch der technischen Temperaturmessung. Vieweg, Braunschweig, 1976
- [2] F. Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, Springer-Verlag 2014