

BMBF-Verbundprojekt im Rahmen der Ausschreibung  
„Autonom vernetzte Systeme (AVS)“  
**Schlussbericht**  
„Multifunk - Multifunktionale Sensornetzwerke  
zur Überwachung von Prozessdaten“

Zuwendungsempfänger:	<u>Temperaturmeßtechnik Geraberg GmbH</u>
Förderkennzeichen:	<u>16 SV 3886</u>
Titel des Vorhabens:	Multifunktionale Sensornetzwerke zur Überwachung von Prozessdaten (Multifunk)
Teilvorhaben:	<u>Multifunktionale selbstkorrigierende Temperatursensoren</u>
Projektleiter:	<u>Dr.-Ing. habil. Klaus Irrgang</u>
Telefon:	<u>03677 - 79490</u>
Email:	<u>tmq@temperatur.com</u>
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2009 bis 31.12.2012

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	4
2	Voraussetzung, unter der das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und zu Ende des Vorhabens ...	5
4.1	Beginn des Vorhabens .....	5
4.2	Abschluss des Vorhabens .....	6
5	Zusammenarbeit mit Partnern .....	7
6	Erzielte Ergebnisse .....	8
6.1	Fühlerkonstruktionen .....	8
6.2	Fühlerkorrekturen.....	11
6.2.1	Korrektur des Einbaufehlers.....	11
6.2.2	Foulingfehler .....	15
6.2.3	Sensor-(Widerstands-)Drift.....	16
6.3	Servicefunktionen.....	18
7	Darstellung des bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen.....	23
8	Veröffentlichungen .....	23
9	Zusammenfassung.....	24

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Fühlerentwicklung .....	6
Abbildung 2: Beispiel eines MUSEFF-Fühlers - prozessprüfbarer Fühler mit integriertem Auswerte- und Korrektursystem .....	7
Abbildung 3: Konstruktionszeichnung MUSEFF-Fühler .....	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Sensor-Anordnung .....	10
Abbildung 5: Beispiel eines MUSEFF-Fühlers .....	10
Abbildung 6: Einbausituation allgemein .....	11
Abbildung 7: Wärmeströme im eingebauten Zustand .....	12
Abbildung 8: Verschiedene Einbausituationen im Medium .....	13
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Sensoren zur Bestimmung des Korrekturfaktors .....	15
Abbildung 10: Prinzipdarstellung zum Fouling-Fehler .....	16
Abbildung 11: Driftverhalten von Pt100-Messwiderständen .....	17
Abbildung 12: Möglichkeiten der Driftkorrektur .....	18
Abbildung 13: Prüffühler mit mehreren Messstellen .....	19
Abbildung 14: Prinzipskizze Prüffühler mit drei unabhängigen Messpunkten .....	20
Abbildung 15: Prinzipskizze Prüffühlerspitze mit drei verketteten Messpunkten .....	21
Abbildung 16: Multisensorische Fehlererfassung .....	22
Abbildung 17: Temperaturverlauf mit integriertem Prüffühler .....	23

## 1. Aufgabenstellung

Ziel des Projekts MULTIFUNK ist die Entwicklung eines robusten, selbstorganisierenden Sensornetzwerkes (SNW) für die Integration in Prozessanlagen, wie z.B. Reifenpressen und Durchlauf-Lötanlagen, zur Ermittlung der applikationsspezifischen, optimalen Prozesseinstellungen und der Anpassung der erforderlichen Betriebsparameter zur Laufzeit der Anlagen.

Das Sensornetzwerk soll sowohl fest in der Anlage installierte Sensoren als auch flexibel adaptierbare bzw. integrierbare Sensorsysteme umfassen (etwa für Wartungs- und Kalibrierungsaufgaben). Durch die Ausstattung der mobilen Sensorknoten mit Thermoelementen zur Energieversorgung und Funkmodulen zur drahtlosen Kommunikation sowie deren miniaturisierten Systembauweise soll bedarfsorientiert eine einfache und schnelle Installation an prozessrelevanten Messpunkten inner- und außerhalb der Anlage oder direkt am prozessierenden Bauteil ermöglicht werden. Zur Minderung der Kommunikationslast sollen alle Sensoren im Rahmen der eigenen Rechenkapazität die Information schon im Netzwerk bedarfsgesteuert verknüpfen.

Die Firma tmq ist ein erfahrener Hersteller von Temperaturmesstechnik mit einer Vielzahl von innovativen Lösungen. Gemeinsam mit den entsprechenden Partnern sollen im Rahmen des Projektes MULTIFUNK neuartige Fühler entwickelt werden. Die Fühler zeichnen sich durch einen hohen Sicherheits- und Servicestandard aus. Diese werden durch die Implementierung einiger tmq-Innovationen erreicht, die im Folgenden auch patentrechtlich geschützt wurden.

Der angestrebte hohe Sicherheits- und Servicestandard muss unter der avisierten Applikation (hier Reifenindustrie) bewertet werden. Es zeigt sich bei 40% der thermalen Messapplikationen, dass eine wesentliche Sicherheitskomponente die Genauigkeit bzw. Messunsicherheit ist.

Unter Beachtung einer Messfehler-Budget-Betrachtung wurden themeneingangs die Schwerpunktaufgaben fixiert:

- a) Untersuchung/Korrektur des Fouling-Fehlers
- b) Untersuchung/Korrektur des Einbaufehlers
- c) Untersuchung/Korrektur des Driftfehlers des Pt-Sensors

## 2. Voraussetzung, unter der das Vorhaben durchgeführt wurde

Bei tmq ist ingenieurtechnisch Potential durchschnittlich in Höhe von 10 Personen vorhanden, die z.Zt. in die Thematik eingebunden wurden. Aufgrund der vielseitigen Fertigung (ca. 40.000 verschiedene Fühlervarianten im Programm) sind mit qualifizierten Montage- und Werkzeugmacherpotential auch technische Sonderlösungen im Hause machbar.

Die Durchführung der messtechnischen Untersuchungen ist im tmq-eigenen DKD-Labor möglich.

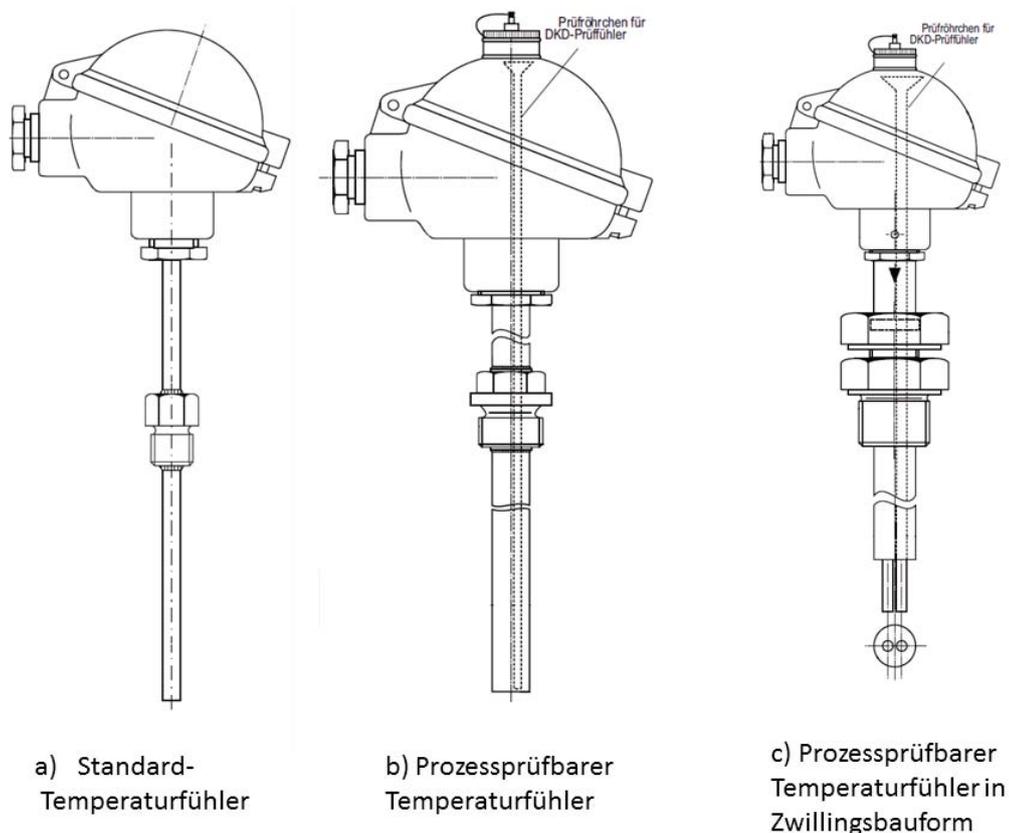
### **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Ablauf und Ergebnisse des Projekts entsprachen im Wesentlichen der ursprünglichen Planung.

### **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und zu Ende des Vorhabens**

#### ***4.1 Beginn des Vorhabens***

Grundlage für den Aufbau der MUSEFF-Fühler sind analoge Standard-Temperaturfühler, die als Widerstandsthermometer oder Thermoelemente die Prozesstemperatur messen. Ein besonderes Beispiel in dieser Hinsicht sind die Temperaturfühler für Reifenpressen. Im Bereich  $+160\dots+190^{\circ}\text{C}$  sollten sie sehr genau messen, da nur eine präzise Temperaturführung im Prozess die erforderliche Reifenqualität und damit die gewünschte Laufzeit des Reifens realisiert. Zur sicheren Prozessführung gehört weiter eine gute Thermometerdynamik ( $t_{90}$ -Zeit), die zudem der Energieoptimierung dient. Links in Abbildung 1 ist ein einfaches Standard-Einschraub-Widerstandsthermometer dargestellt.



**Abbildung 1:** Darstellung der Fühlerentwicklung

Eine bedeutende Weiterentwicklung dieser Fühler ist der Aufbau als prozessprüfbare Temperaturfühler. Bei diesen ist es durch die Konstruktion des Innenaufbaus möglich, einen Prüffühler einzuführen und den Temperaturfühler darüber im Prozess zu kalibrieren. Ein prozessprüfbares Widerstandsthermometer ist der Mitte von Abbildung 1 dargestellt.

Ein weiterer wichtiger Entwicklungsschritt auf dem Weg zum MUSEFF-Fühler ist die Ausführung der prozessprüfbaren Temperaturfühler als sogenannte Zwillinge. Bei dieser Konstruktion werden die Messspitze und die Prüfröhrspitze aus dem Schutzrohr herausgeführt. Wie rechts in Abbildung 1 zu sehen ist, hat der Fühler somit zwei dünne, kurze Fühlerspitzen. In der eigentlichen Messspitze können, beim Aufbau als Widerstandsthermometer, sowohl ein Pt100-Messwiderstand als auch eine Doppelkonstruktion mit zwei Pt100-Messwiderständen zum Einsatz kommen.

## 4.2 Abschluss des Vorhabens

Es liegt das „MUSEFF-Thermometer“ vor (Abbildung 2), das äußerlich und innerlich eine neuartige Fühlerkomponente darstellt. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass

- fünf unterschiedlich positionierte Sensoren zum Einsatz kommen,
- Einbaukorrekturen mit den Sensorsignalen automatisch erfolgen,
- unabhängige Prüfungen im Prozess durch eine „Leerrohranordnung“ möglich sind,
- das Schutzrohr medienseitig in eine Dreifach-Messspitze übergeht.

Eine Patentanmeldung liegt vor. Die Technologie aufgrund der Miniaturisierung bzw. Kompaktheit wurde verfeinert.



**Abbildung 2:** Beispiel eines MUSEFF-Fühlers - prozessprüfbarer Fühler mit integriertem Auswerte- und Korrektursystem

## 5. Zusammenarbeit mit Partnern

Folgende Partner waren an diesem Projekt beteiligt:

efm systems GmbH, Goodyear Dunlop Tires Germany GmbH, TVP - Techn. Vertrieb in der Prozeßautomation, tmq Temperaturmeßtechnik Geraberg GmbH, Fraunhofer IPA Stuttgart, TU München, Höfer+Bechtel GmbH, SEHO Systems GmbH, angaris GmbH

Es gab im Projekt 6 laufende Teilprojekte, die sehr unterschiedlich starke Verknüpfungspunkte untereinander hatten. Es fand halbjährlich ein internes Statusseminar statt, bei dem alle Partner über die laufenden Aktivitäten informiert wurden und die Schwerpunkte der übergreifenden Arbeiten für das nächste halbe Jahr festgelegt wurden. Daneben erfolgte in den einzelnen Teilprojekten eine Kooperation der Partner auf Arbeitsebene mit entsprechenden zusätzlichen Meetings.

Eine besonders kooperative Zusammenarbeit, u.a. gekennzeichnet durch intensive Arbeitstreffen, bestand zwischen den Unternehmen TVP, efm und tmq, die sich voraussichtlich auch bei der Vermarktung fortsetzen wird.

## 6. Erzielte Ergebnisse

### 6.1 Fühlerkonstruktionen

Temperaturfühler im Sinne der vorliegenden Zielstellung wurden mit dem Arbeitstitel „MUSEFF“ versehen. (MUSEFF = multifunktionaler sensorischer fehlerkorrigierender Temperatur-Fühler)

Die Fühlerkonstruktion (siehe Abbildung 3) ist in vielerlei Hinsicht bemerkenswert. Im vorderen, das Medium berührenden Teil befinden sich drei kurze Messeinsatzrohre, die um jeweils  $120^\circ$  versetzt angeordnet sind. Sie sind mittels eines nicht toxischen Edstahlflotes in ein Fühlerschutzrohr mit  $\varnothing 12\text{mm}$  eingelötet. Eine Messeinsatzspitze dient der Prozessprüfbarkeit, d.h. es ist sozusagen ein Leerrohr, in das in bestimmten zeitlichen Abständen ein Prüffühler eingebaut werden kann.

In den beiden anderen Sensorröhrchen befinden sich jeweils zwei Pt100-Messwiderstände in ausgesuchter Toleranz und mit entsprechender Alterung. Die jeweiligen Doppelsensorpärchen speisen zunächst einen analogen bzw. digitalen Auswertekreis. Hierdurch ist eine hohe Redundanz gegeben. Gleichzeitig ist ein fünfter Sensor am unteren Ende des  $12\text{mm}$ -Fühlerrohres positioniert. Er wird in erster Linie zur Korrektur des Einbaufehlers verwendet, kann jedoch auch zu sicherheitsrelevanten Quervergleichen verwendet werden (Plausibilitätsüberprüfung). Eine prinzipielle Darstellung der Sensoranordnung ist in Abbildung 4 gegeben.

Der Fühlerkopf enthält zwei Abgänge mit jeweils einem M12-Steckverbinder sowie einen schraubbaren Kopfdeckel mit Fangleine, unter der das trichterförmig geweitete Prüfröhrchen sitzt.

Der gesamte Fühler ist durch seine Kompaktheit sehr robust. Die kleinen Sensorröhrchen haben einen Durchmesser von  $2,5\text{mm}$  und sind schnell ansprechend. Trotz des geringen Bauvolumens in den Messröhrchen sind die jeweiligen Doppel-Pt 100 in 2x3 Leiterschaltung angeschlossen.

In Abbildung 5 ist ein kompletter Fühler beispielhaft dargestellt.

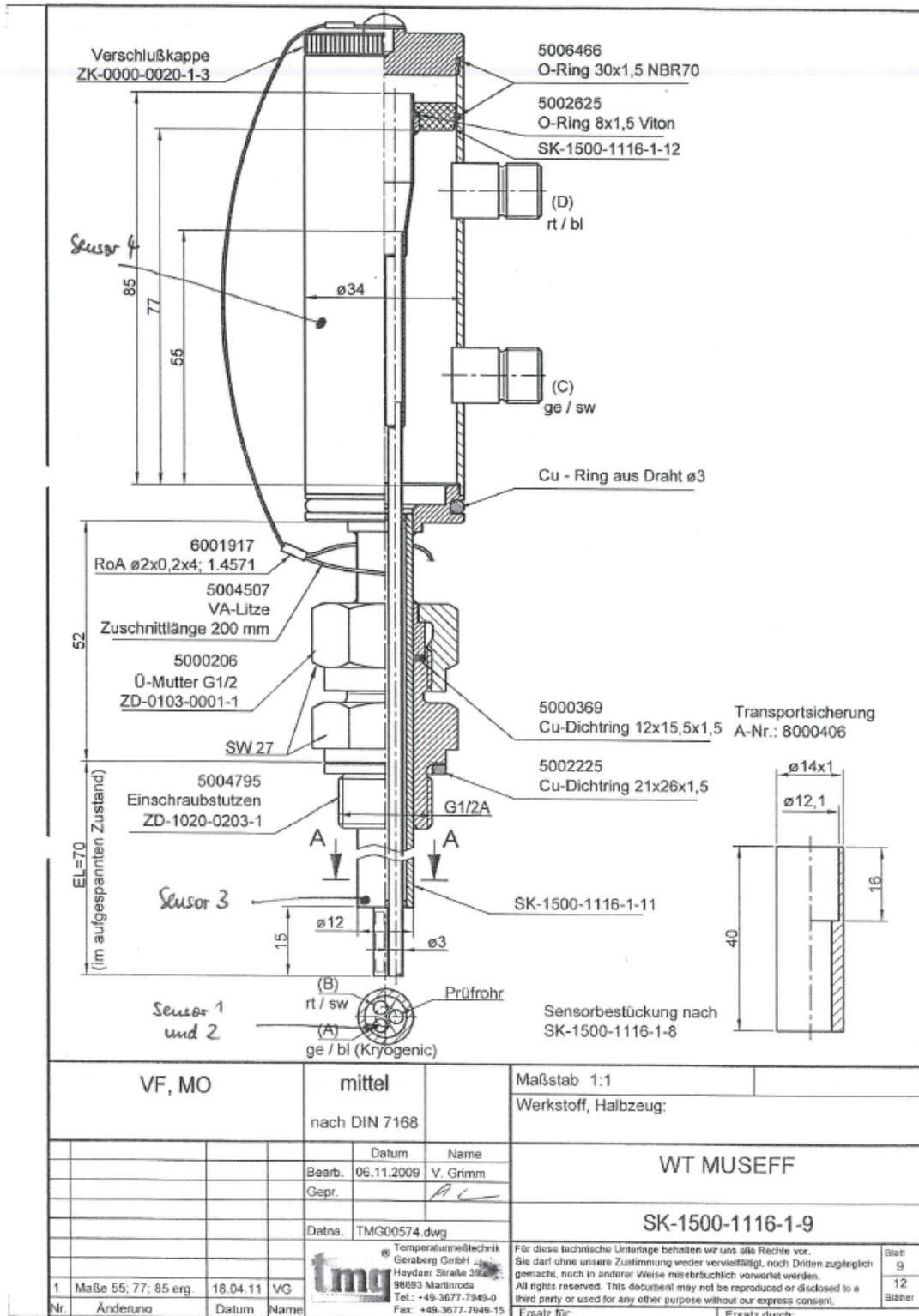


Abbildung 3: Konstruktionszeichnung MUSEFF-Fühler

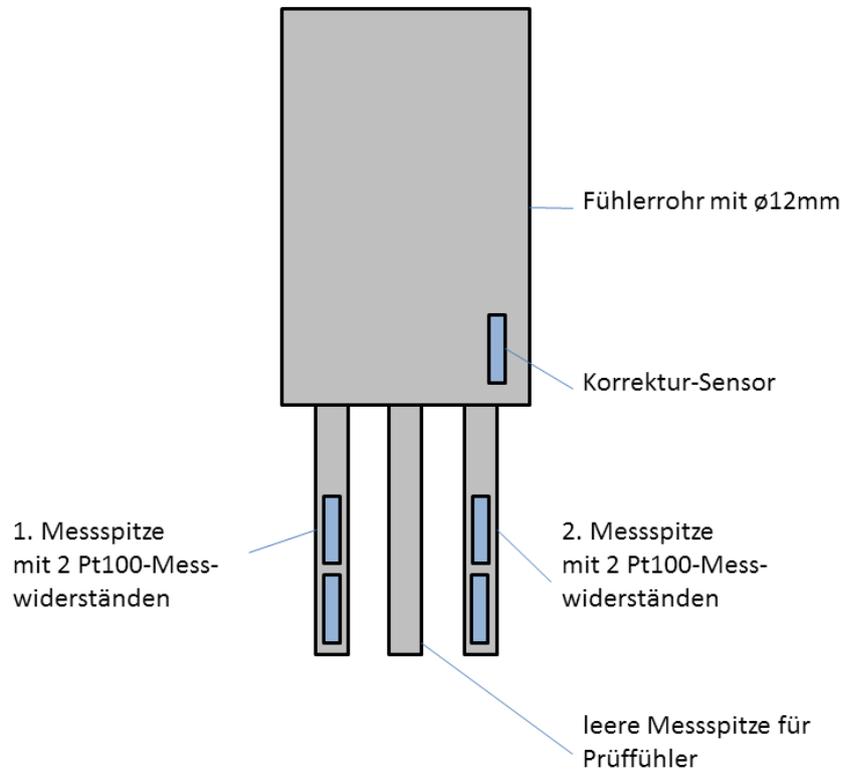


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Sensor-Anordnung



Abbildung 5: Beispiel eines MUSEFF-Fühlers

## 6.2 Fühlerkorrekturen

### 6.2.1 Korrektur des Einbaufehlers

Sobald Temperaturfühler in einen Prozess eingesetzt werden, werden sie von diesem beeinflusst bzw. beeinflussen sie diesen (siehe Abbildung 6). Der Einbaufehler, ein statisch thermischer Messfehler, gilt in der Temperaturmesstechnik als eine der größten Fehlerkomponenten. Durch Temperaturdifferenzen zwischen dem Medium und der Umgebung entstehen Wärmestöme, die über die Fühlerarmatur Wärme dem Prozess entziehen oder zuführen (siehe Abbildung 7). Er wird um so größer, je kürzer die Einbaulänge im Verhältnis zum Durchmesser des Fühlerrohrs ist.

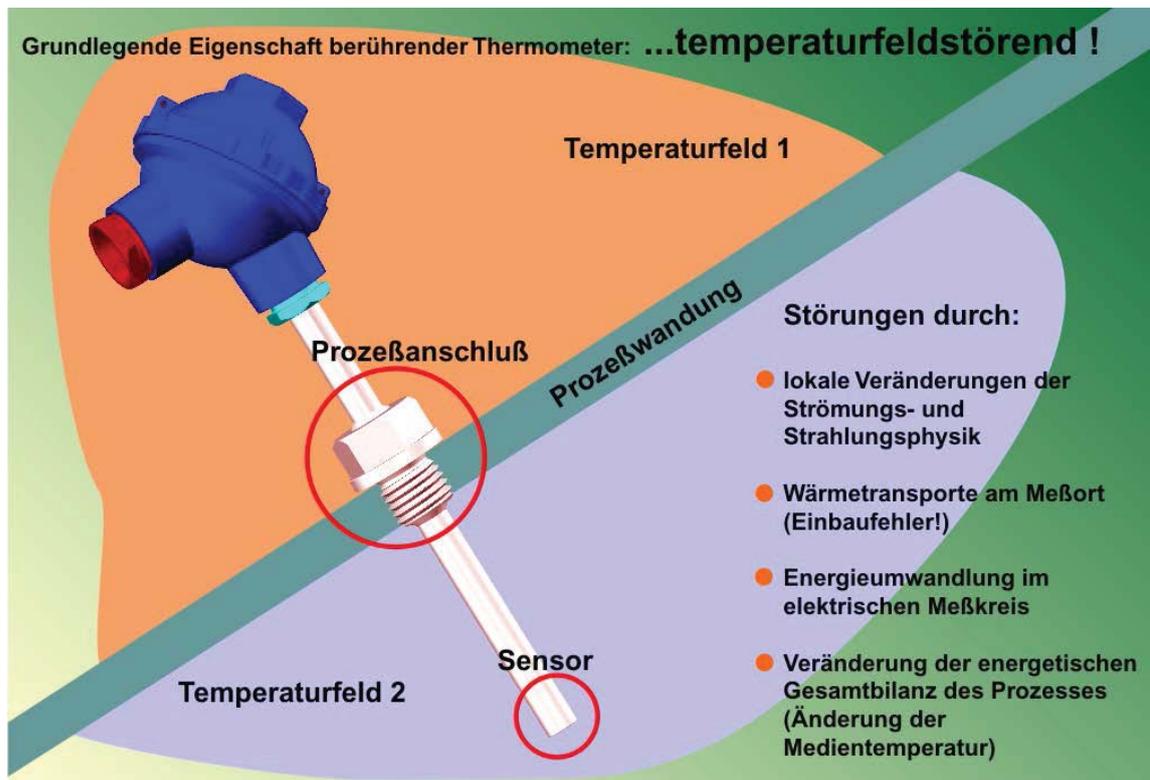
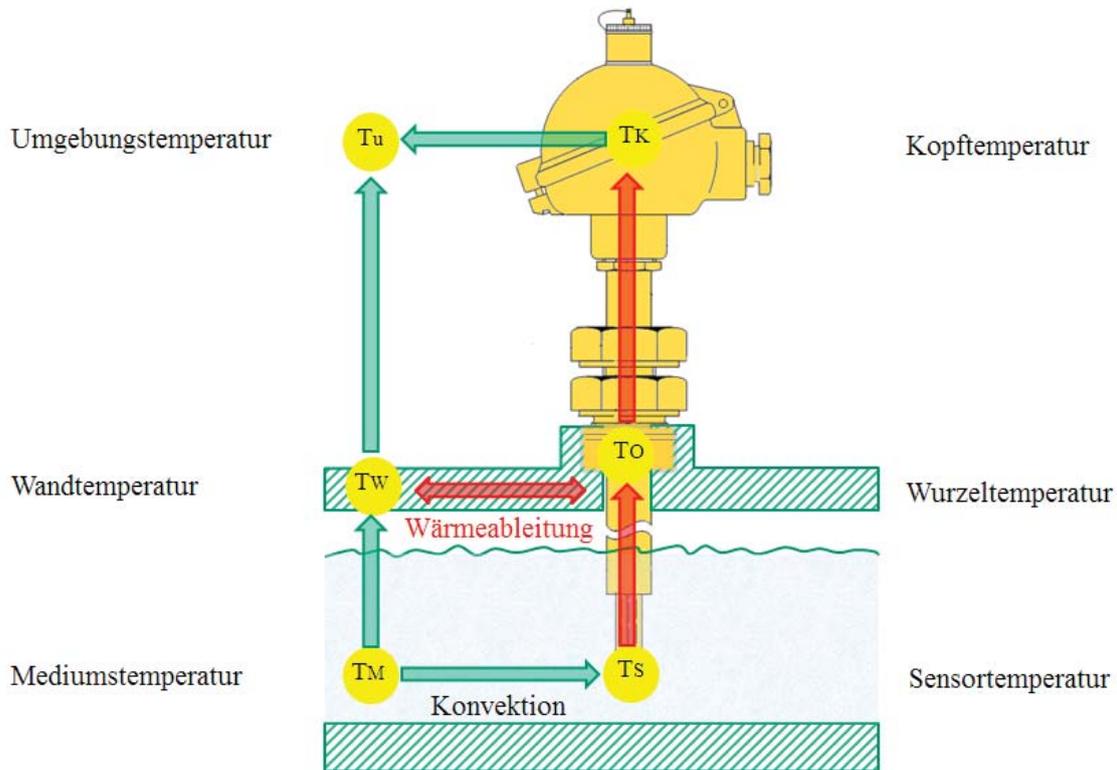


Abbildung 6: Einbausituation allgemein

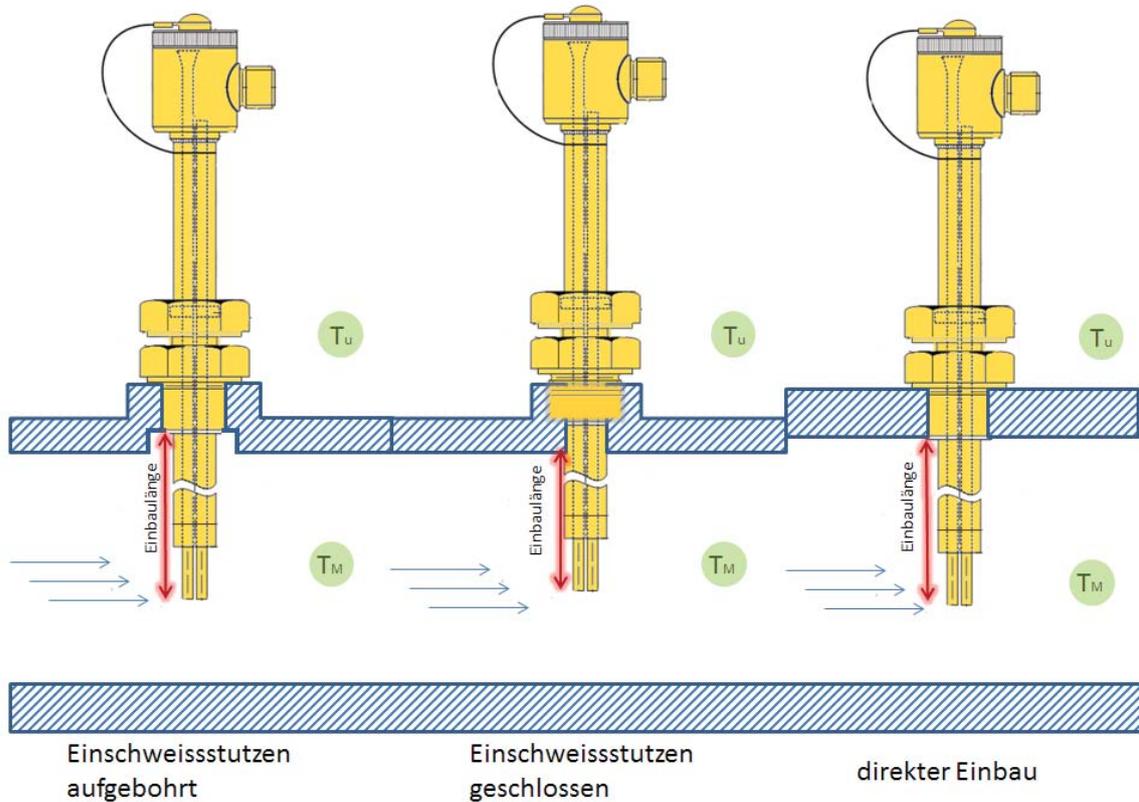


**Abbildung 7:** Wärmeströme im eingebauten Zustand

Bei den im Rahmen dieses Projekts aufgebauten MUSEFF-Fühlern können die Fühlerspitzen aufgrund hoher Strömungsgeschwindigkeiten des zu messenden Mediums (z.B. bei der Reifenherstellung bis zu 18m/s) nicht besonders lang gestaltet werden (aktuelle Länge der Messspitzen: 15mm). Hierzu wurden Berechnungen zur statisch-thermischen Belastbarkeit mit dem Berechnungsprogramm „Solid Well“ durchgeführt. Das Fühlerrohr mit  $\varnothing 12\text{mm}$  ragt somit zusätzlich in den Prozess. Dies führt zu den beschriebenen Einbaufehlern.

Zunächst wurde der Einbaufehler anhand verschiedener Einbausituationen (siehe Abbildung 8) prinzipiell bewertet. Anschließend wurden verschiedene Messungen durchgeführt, die einem späteren Einbau in der Reifentechnik nahekommen. Das Messprogramm umfasste Änderungen der Umgebungstemperatur, Änderungen der Einbaulänge sowie verschiedene Einbausituationen (simuliert durch Wasserstandtiefermostat), aber auch die Betrachtung zu Korrekturen

- a) über einen in der Elektronik vorhandenen Temperatursensor und
- b) über den fünften Temperatursensor am Boden des 12mm-Rohres.



**Abbildung 8:** Verschiedene Einbausituationen im Medium

Nachfolgend wird beispielhaft die Bestimmung von Korrekturfaktoren beschrieben. Im ersten Schritt wurden die Messwerte aller Sensoren bei verschiedenen Umgebungstemperaturen bestimmt. Anschließend wurden Korrekturfaktoren mittels verschiedener Zusatzsensoren ermittelt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Messergebnisse zusammengefasst:

Eintauchtiefe: ET = 5mm Einbaulänge: EL=100mm Medientemperatur: T <sub>M</sub> =180 °C	
Umgebungstemperatur T <sub>U</sub> =31 °C	Umgebungstemperatur T <sub>U</sub> =50 °C
T <sub>1</sub> = 176,7 °C / 177,0 °C	T <sub>1</sub> = 176,7 °C / 177,0 °C
T <sub>2</sub> = 172,3 °C / 171,9 °C	T <sub>2</sub> = 171,9 °C / 174,7 °C
T <sub>3</sub> = 177,4 °C / 177,6 °C	T <sub>3</sub> = 177,6 °C / 178,4 °C
T <sub>4</sub> = 42,8 °C / 41,9 °C	T <sub>4</sub> = 58,3 °C / 58,2 °C

T<sub>1</sub> – Temperatur 1. Pt100 in erster Fühlerspitze

T<sub>2</sub> – Temperatur 2. Pt100 in erster Fühlerspitze

T<sub>3</sub> – Temperatur Zusatzsensor (Pt100) am Boden des ø12mm-Fühlerrohrs

T<sub>4</sub> – Temperatur Zusatzsensor (Pt100) an der Elektronik im Anschlusskopf

Berechnung der Korrekturfaktoren K

a) über den am Boden des  $\varnothing 12\text{mm}$ -Fühlerrohrs eingebrachten Messwiderstand ( $T_3$ ):

Für  $T_U = 31^\circ\text{C}$ :

$$\text{Fehlerdifferenz: } |177,2^\circ\text{C} - 180,0^\circ\text{C}| = 2,8\text{K} \Rightarrow K = 0,354$$

$$\text{Einflussdifferenz: } |172,1^\circ\text{C} - 180,0^\circ\text{C}| = 7,9\text{K} \Rightarrow K = 0,552$$
$$177,2 = 5,1\text{K}$$

Für  $T_U = 50^\circ\text{C}$ :

$$\text{Fehlerdifferenz: } |177,6^\circ\text{C} - 180,0^\circ\text{C}| = 2,4\text{K} \Rightarrow K = 0,358$$

$$\text{Einflussdifferenz: } |173,3^\circ\text{C} - 180,0^\circ\text{C}| = 6,7\text{K} \Rightarrow K = 0,558$$
$$177,6 = 4,3\text{K}$$

b) über den an der Elektronik im Anschlusskopf eingebrachten Messwiderstand ( $T_4$ ):

Für  $T_U = 31^\circ\text{C}$ :

$$\text{Fehlerdifferenz: } |177,2^\circ\text{C} - 180,0^\circ\text{C}| = 2,8\text{K}$$

$$\text{Einflussdifferenz: } |42,35^\circ\text{C} - 177,2^\circ\text{C}| = 134,8\text{K}$$

$$K = 0,020$$

$$\Delta = 2,8$$

Für  $T_U = 50^\circ\text{C}$ :

$$\text{Fehlerdifferenz: } |177,2^\circ\text{C} - 180,0^\circ\text{C}| = 2,8\text{K}$$

$$\text{Einflussdifferenz: } |58,2^\circ\text{C} - 177,2^\circ\text{C}| = 119,0\text{K}$$

$$K = 0,023$$

$$\Delta = 2,8$$

Abbildung 9 zeigt schematisch die Lage der Sensoren.

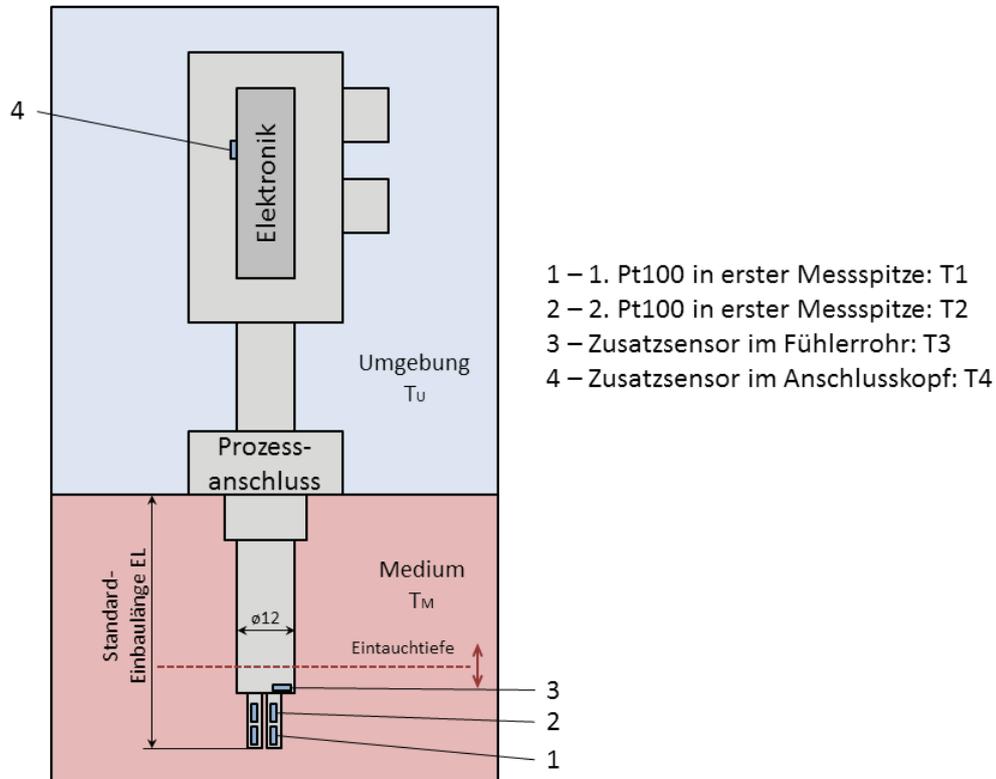


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Sensoren zur Bestimmung des Korrekturfaktors

### 6.2.2 Foulingfehler

Als Fouling bezeichnet man Ablagerungen am Fühlerrohr, die durch das zu messende Medium und die vorliegenden Temperaturen entstehen. Diese Schichten haben negativen Einfluss auf den Wärmeübergang und den Einbaufehler. Dies ist prinzipiell in Abbildung 10 dargestellt.

In den Fouling-Fehler  $\Delta T$  geht die Fühlerrohrgeometrie (Umfang  $U$ , Querschnittsfläche  $A$ ), die Einbaulänge ( $EL$ ), der Wärmeübergangskoeffizient ( $\alpha$ ) sowie die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  nach folgender Gleichung ein:

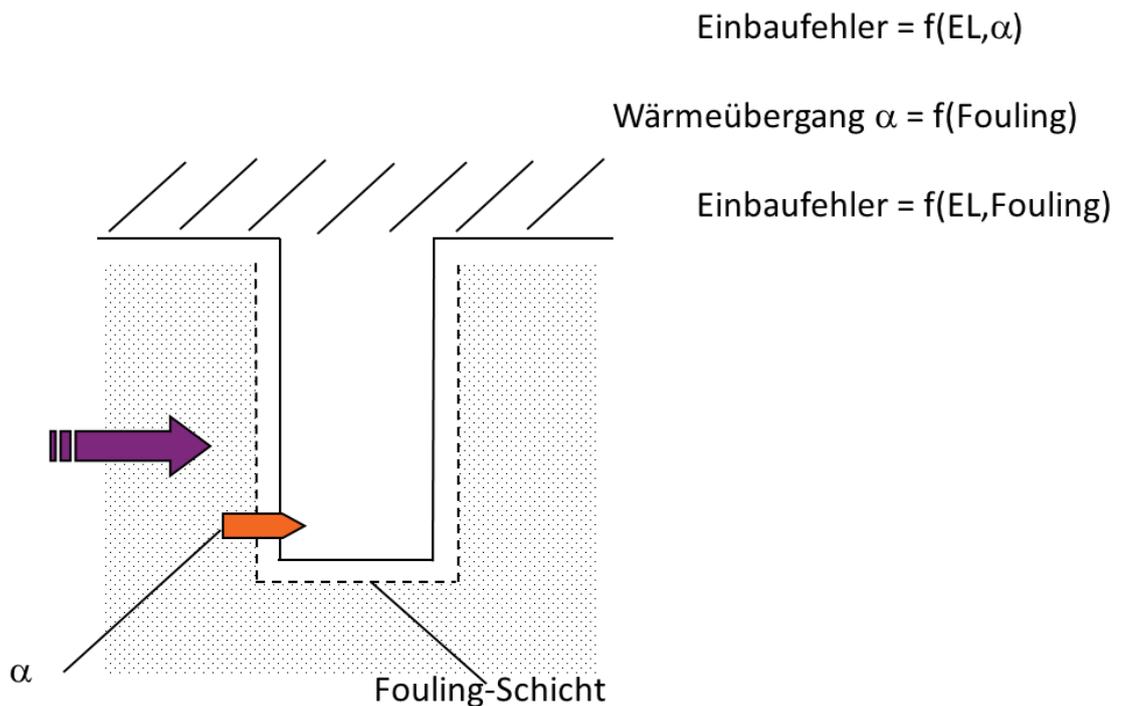
$$\Delta T = T_s - T_U \cdot \left( \frac{1}{\cosh m} \right) \quad m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot A} \cdot EL}$$

$\Delta T$  – Fouling – Fehler

$T_s$  – Sensortemperatur

$T_U$  – Umgebungstemperatur

Das heißt,  $\Delta T = T_S - T_U \cdot f(\text{Material, Abmessungen, Wärmeübergang})$ .

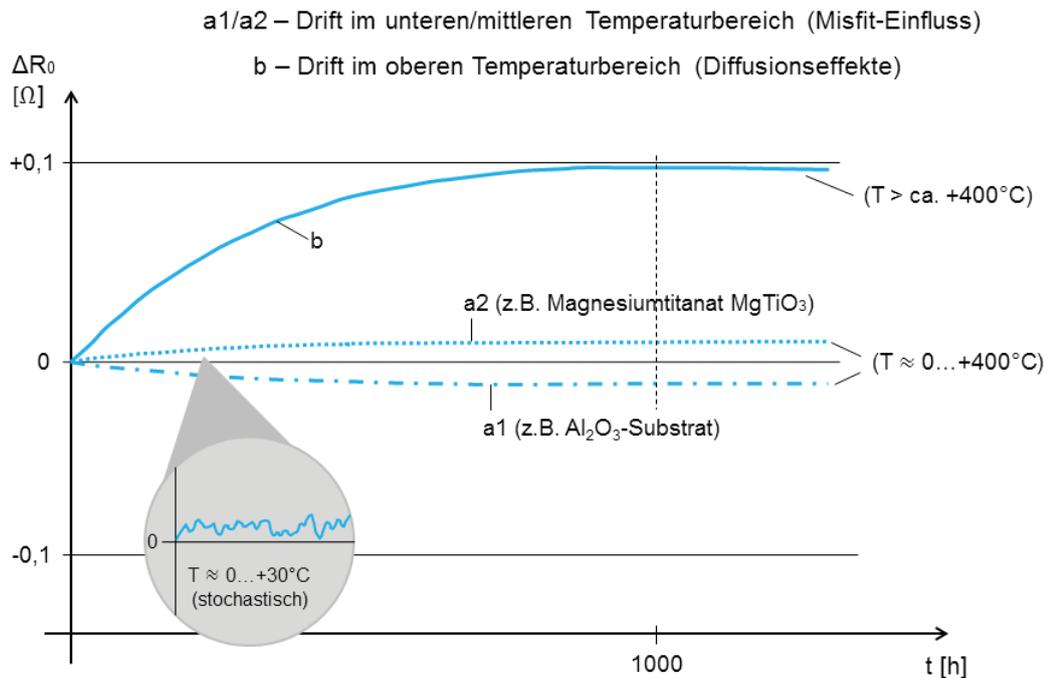


**Abbildung 10:** Prinzipdarstellung zum Fouling-Fehler

Im Rahmen dieses Projekts wurden von der Firma TVP Fühler mit Fouling-Schicht bereitgestellt. Untersuchung bei festen  $\Delta T$  mit und ohne (d.h. nachträglich entfernter) Fouling-Schicht im Ölbad erbrachten:  $\Delta T < 0.03\text{K}$ . Aufgrund dieses sehr geringen Wertes stand der Einfluss durch Fouling nicht weiter im Fokus der Untersuchungen.

### 6.2.3 Sensor-(Widerstands-)Drift

Platin-Messwiderstände zeigen bestimmte, vom jeweiligen Längenausdehnungskoeffizient des Substrates abhängige Driftverläufe. Bei den in diesem Projekt vorgenommenen Messungen kamen Pt100-Messwiderständen mit MgTi- und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrat zum Einsatz. In Abbildung 11 ist das Driftverhalten in Abhängigkeit vom verwendeten Substrat über einen längeren Zeitraum prinzipiell dargestellt. Es zeigt die Verläufe für den unteren / mittleren Temperaturbereich sowie für den oberen Temperaturbereich ( $> +400^\circ\text{C}$ ).



**Abbildung 11:** Driftverhalten von Pt100-Messwiderständen

Um den negativen Einfluss auf Messergebnisse, der durch das Driftverhalten entsteht, zu minimieren, stehen verschiedene Möglichkeiten der Korrektur zur Verfügung. Diese sind in Abbildung 12 gegenübergestellt. Werden zur Korrektur ein Pt100- und ein NTC-Messwiderstand verwendet, bestimmt die hohe NTC-Unsicherheit die Qualität der Korrektur. Bei der Verwendung von zwei gleichen Pt100-Messwiderständen werden Änderungen mit gleichem Vorzeichen nicht erkannt. Dies gelingt nur mit zwei Pt100-Messwiderständen, die mit verschiedenem Substrat aufgebaut sind.

Abbildung 12

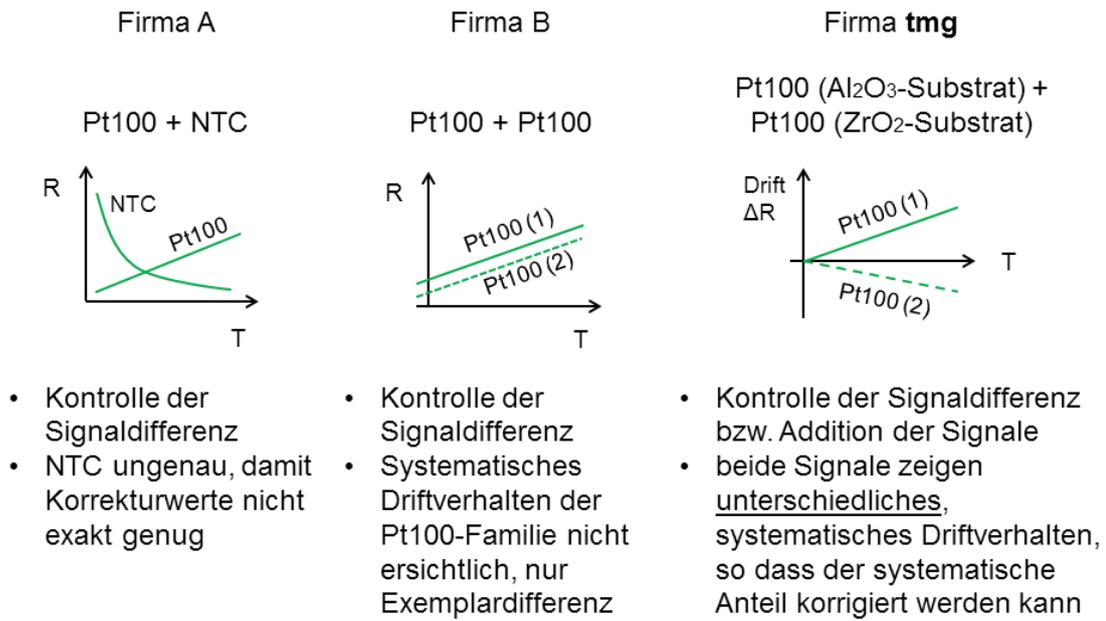


Abbildung 12: Möglichkeiten der Driftkorrektur

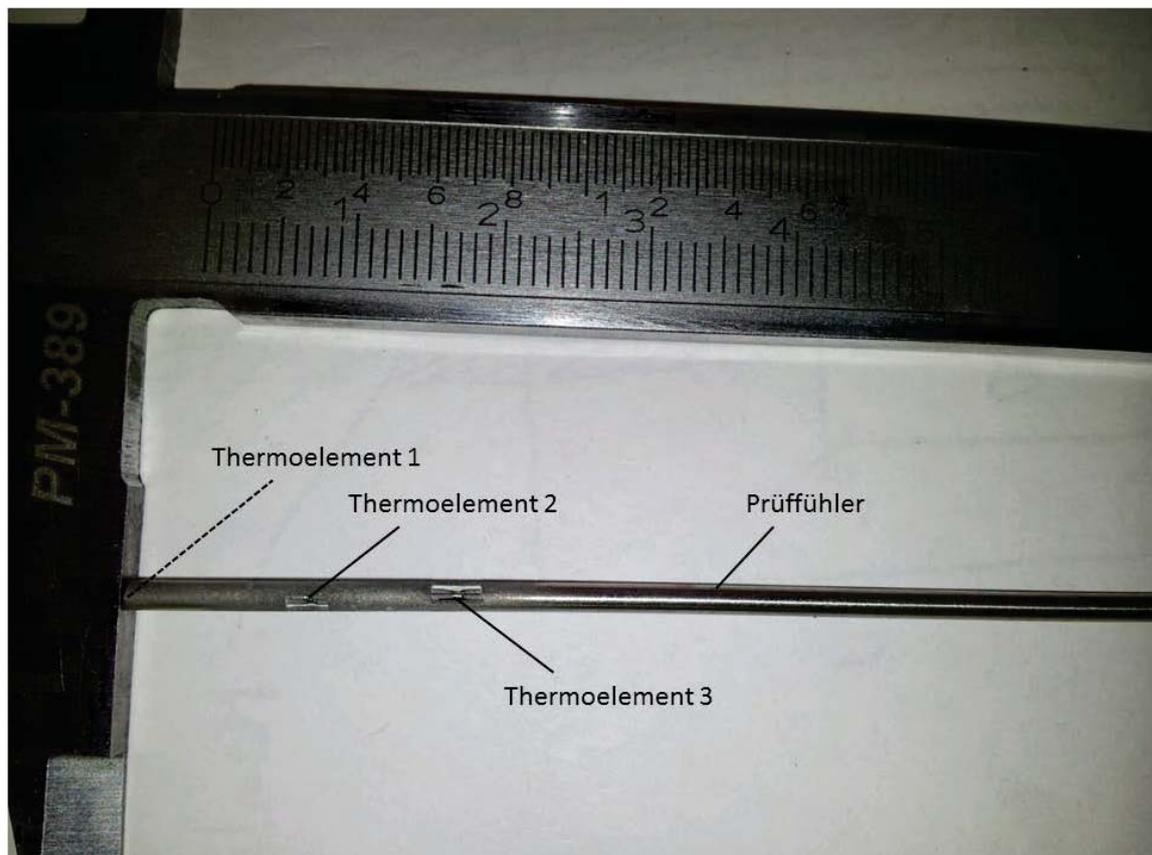
Auf dieser Grundlage wurde eine tmq-Korrekturvariante erarbeitet. Es wurden verschiedene Sensorvarianten bei verschiedenen Temperaturlasten getestet. Eine Korrektur ist bei Bereitstellung entsprechender Pt100-Messwiderstände möglich. Zurzeit erhält man nur über die Firma IST Pt100, deren Substrat von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abweicht. Die Firma Heraeus wird eventuell später in diese Fertigung einsteigen.

Generell sind die Fehler, die durch Sensordrift entstehen, deutlich kleiner, als Messfehler, die durch Wärmeableitung verursacht werden. Für die Minimierung der Driftkomponente ist es vorerst ausreichend, Pt100-Messwiderstände der Genauigkeitsklasse AA (1/3B) zu verwenden, die bei beispielsweise +180 °C (Arbeitstemperatur in der Reifenindustrie) selektiert und gealtert werden. Für die deutlich größeren Einbaufehler ist eine Korrektur unbedingt erforderlich.

### 6.3 Servicefunktionen

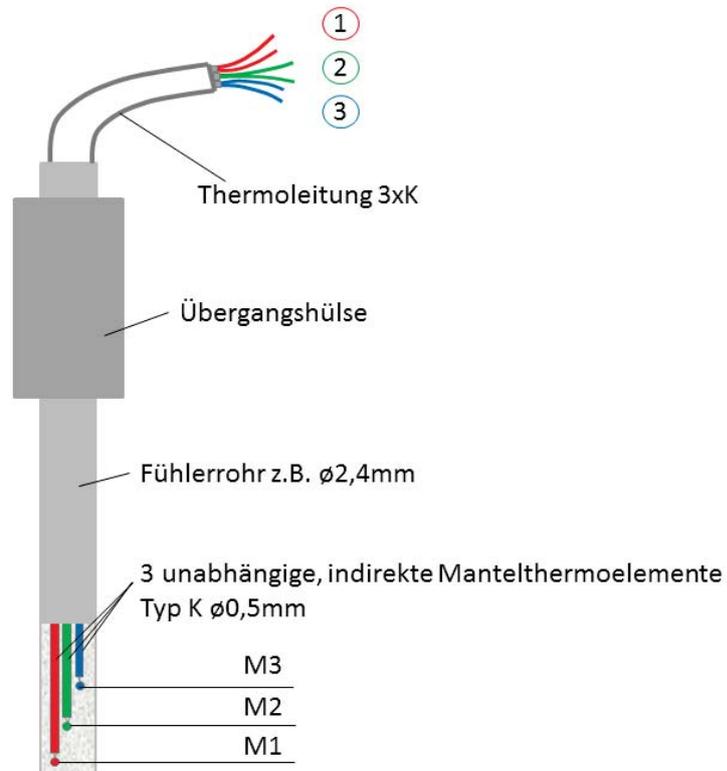
Eine weitere Entwicklung im Rahmen dieses Projekts betrifft die Prüffühler. Es wurden Thermoelemente entwickelt, die über die Fühlerlänge verteilt mehrere Messstellen enthalten. Diese Thermoelemente dienen dazu, die mit Hilfe des Korrek-

tursensors im Temperaturfühler durchgeführte Korrektur des Einbaufehlers (z.B. amtlich) überprüfen zu können. Abbildung 13 zeigt die Spitze eines solchen Prüffühlers, bei dem zwei der drei Thermoperlen freigelegt wurden.



**Abbildung 13:** Prüffühler mit mehreren Messstellen

Ein einfacher Aufbau eines solchen Mehrfach-Thermoelements ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt. Dieser Prüffühler besteht aus drei verschiedenen langen, voneinander unabhängigen Thermoelementen. Als Messergebnis erhält man drei von der Position der Messperle abhängige Temperaturen, die zur Bestimmung des Korrekturwertes genutzt werden können.



**Abbildung 14:** Prinzipskizze Prüffühler mit drei unabhängigen Messpunkten

Eine Weiterentwicklung dieses Aufbaus ist die Verkettung der Thermoelemente. Dies ist in Abbildung 15 als Skizze dargestellt. Hierbei erhält man ein Differenzsignal aus den drei Messpunkten. Dieses kann wieder zur Bestimmung des Einbaufehlers dienen. Eine kurze mathematische Darlegung ist in Abbildung 16 gegeben.

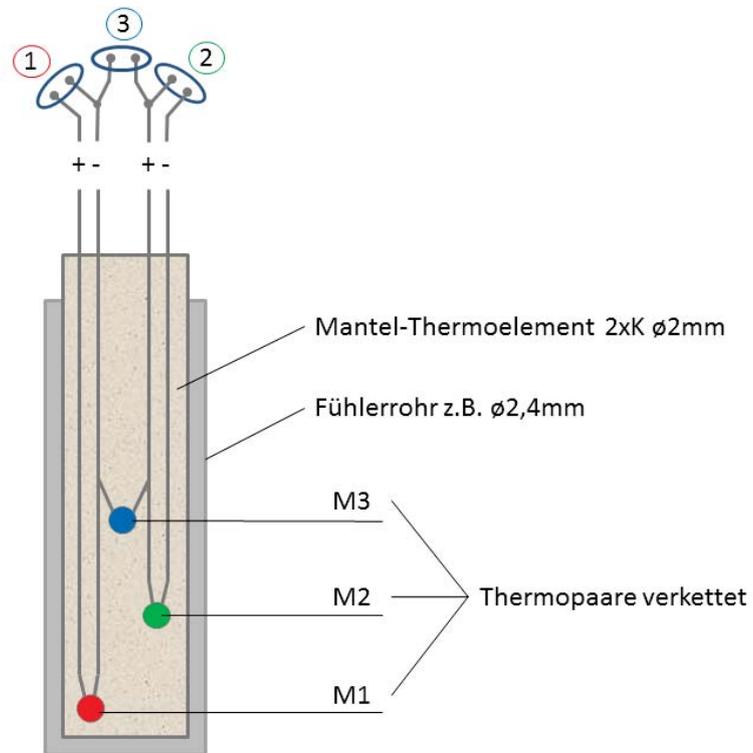
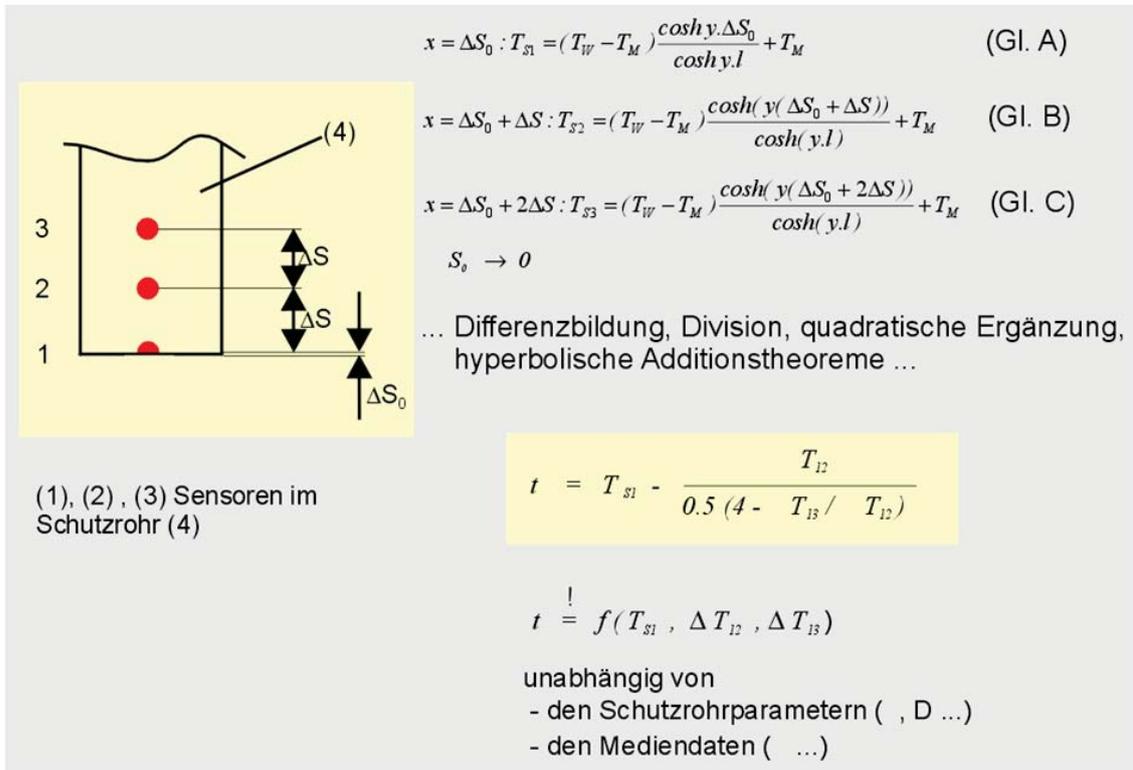


Abbildung 15: Prinzipskizze Prüffühlerspitze mit drei verketteten Messpunkten



**Abbildung 16:** Multisensorische Fehlererfassung

Die beschriebenen Prüffühler werden über dieses Projekt hinaus noch weiterentwickelt.

Beim Einsatz von Prüffühlern muss beachtet werden, dass sich die Masse der Gesamtanordnung erhöht. Dies führt kurzzeitig zu Wärmeableitung. Der im Prozess messende Temperaturfühler zeigt über einen bestimmten Zeitraum etwas zu niedrige Messergebnisse an. Nach einer von der Fühlerkonstruktion abhängigen Einschwingphase messen beide Fühler die Mediumstemperatur. Diese Anpassungszeit muss bei Messungen mit Prüffühlern unbedingt abgewartet werden, da ansonsten mit Messfehlern gerechnet werden muss. Dieser Effekt konnte messtechnisch nachgewiesen werden. Abbildung 17 zeigt Temperaturverläufe bei eingesetztem Prüffühler am Beispiel eines dünnen Kabelfühlers.

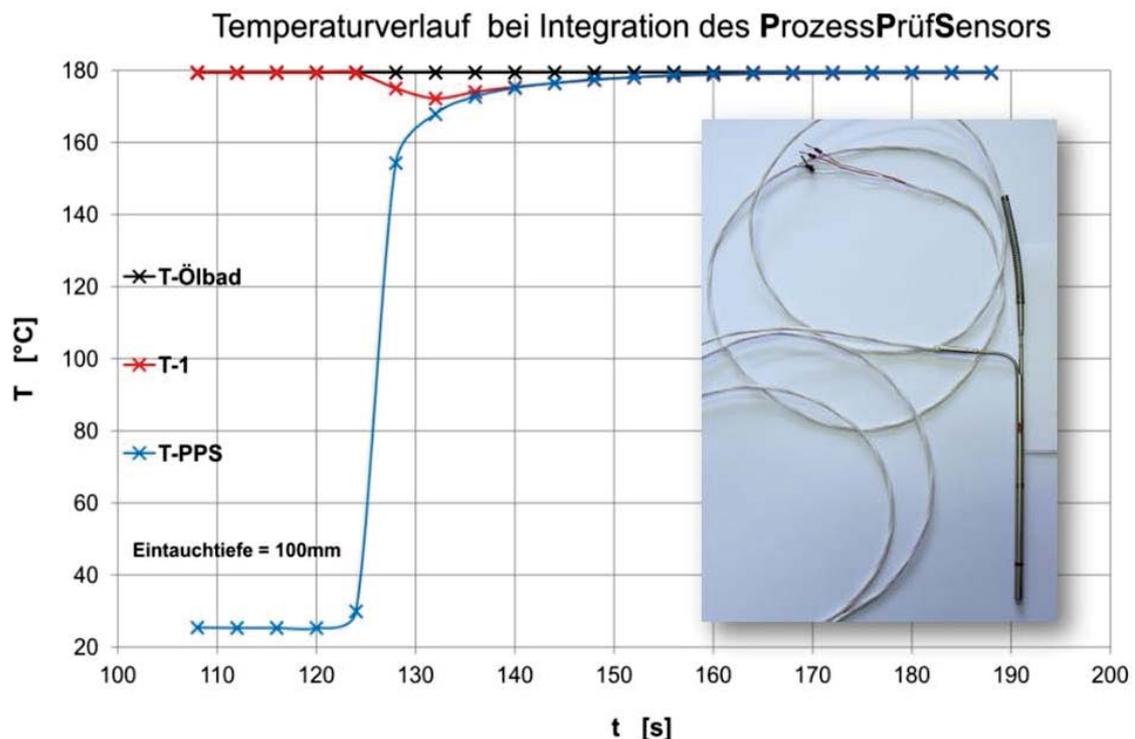


Abbildung 17: Temperaturverlauf mit integriertem Prüffühler

## 7. Darstellung des bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen

Entgegenstehende bzw. relevante Veröffentlichungen oder Schutzrechte bzw. Produktinformationen mit Einfluss auf diese Entwicklung sind nicht bekannt geworden.

## 8. Veröffentlichungen

Präsentation auf Messen, Kongressen und anderen Veranstaltungen:

- Statusmeeting AVS 2010, Berlin: Präsentation der Projektergebnisse mit einem Vortrag
- Statusmeeting AVS 2011, Berlin: Präsentation der Projektergebnisse mit einem Vortrag
- Messe Sensor und Test 2011, Nürnberg: Präsentation der Projektergebnisse durch die Firmen tmq und T.V.P. im Rahmen eines Messestandes
- Statusmeeting AVS 2012, Berlin: Präsentation der Projektergebnisse mit einem Vortrag und einem Demonstrator

Des Weiteren wurde und wird das Projekt auf der eigens dafür eingerichteten Internetpräsenz [www.multifunk.de](http://www.multifunk.de) dargestellt.

## 9. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurden prozessprüfbare Temperaturfühler mit Korrektur- und Auswertesystemen ausgerüstet. Dazu wurde zuerst die Fühlerspitze modifiziert. Mit der neuartigen Zwillings- bzw. Drillingsbauform können durch die dünnen Rohrdurchmesser hohe Ansprechgeschwindigkeiten erzielt werden. Da die Fühlerspitzen recht kurz sind und in einem deutlich größeren Fühlerrohr sitzen, halten die Fühler mechanischen Beanspruchungen gut stand. Die sich beim Einsatz dieser Fühler ergebenden Einbaufehler können mittels Korrektursensoren, die im Fühler an verschiedenen Positionen angebracht werden können, erfasst und über die Auswerteelektronik korrigiert werden. Um Messfehler durch Sensordrift zu minimieren, werden speziell gealterte und selektierte Sensoren eingesetzt. Da der Einfluss der Drift im Vergleich zu Einbaufehlern gering ist, ist eine weitere Korrektur der Drift nicht vorgesehen. Auch der Fehleranteil, der durch Fouling entsteht, erwies sich als sehr gering, so dass eine weitere Betrachtung nicht nötig war.

Zusätzlich bieten die Fühler die Möglichkeit, dass sie im laufenden Prozess geprüft werden können. Neben normalen Kalibrierungen können mit speziellen Prüffühlern auch Einbaufehler aufgezeigt und korrigiert werden, bzw. die fortlaufend erfolgende Korrektur geprüft werden.

---

Ort und Datum

---

Rechtsverbindliche Unterschrift

---

Stempel