

TSP341-N

Hochpräzise nicht-invasive Temperaturmessung



Measurement made easy



HERMES
AWARD
2019

—
Temperaturfühler zur
nicht-invasiven
Temperaturmessung
TSP341-N

Einführung zur Ausgabe II mit Vergleichsmessungen

Dieses Whitepaper stellt ABBs neuen Temperaturfühler TSP341-N zur nicht-invasiven Temperaturmessung vor und liefert Beispiele für Anwendungen und erreichbare Genauigkeiten.

Die vorliegende Ausgabe II des Whitepapers stellt zusätzlich die unter realistischen Bedingungen gewonnenen Ergebnisse eines direkten Vergleichs von nicht-invasiven Temperaturmessungen mit klassischen Messungen im Messmedium vor. Diese Ergebnisse unterstreichen die hervorragende Eignung des Gerätes für viele Anwendungen.

Der TSP341-N zur Oberflächenmontage ermöglicht durch Berücksichtigung der Umgebungs-verhältnisse eine hochgenaue und verlässliche Temperaturmessung ohne Eingriff in den Prozess.

Damit wird auch die Anlagensicherheit erheblich erhöht. Durch die schnelle und einfache Oberflächenmontage und durch den Entfall von Prozessöffnung und Schutzrohr können hohe Kosteneinsparungen erzielt werden.

Außerdem wird die Flexibilität innerhalb der Anlage gesteigert, da der Fühler auch jederzeit nachträglich oder für zusätzliche Messungen auch nur vorübergehend installiert werden kann.



Klassische Temperaturmessung im Messmedium

—
01 Klassischer Einbau von
Temperaturfühlern in
einer Rohrleitung

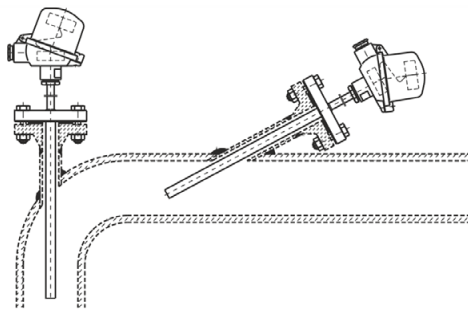
—
02 Robuste Schutzrohre
für anspruchsvolle
Anwendungen

—
Literaturhinweis
[01] "Industrielle
Temperatur-Messtechnik,
Grundlagen und Praxis".
ABB Automation Products
GmbH (2013)



Praktisch kein chemischer Prozess kann auf eine Temperaturmessung verzichten. Meistens dient diese der Gewährleistung der Anlagensicherheit, der Sicherung der Produktqualität und der Steigerung der Prozesseffizienz.

Die klassische Temperaturmessung in der Prozesstechnik erfolgt über das direkte Einbringen eines Temperaturfühlers mit Schutzrohr in ein Messmedium, welches sich im Regelfall in einem Behälter oder einer Rohrleitung befindet. Messmedien bestehen aus Stoffen in flüssigem, pastösem oder gasförmigem Zustand und oft auch aus einem Gemisch dieser Zustände. Zusätzlich können sie feste Partikel enthalten. Ein Messmedium kann chemisch aggressiv und auch abrasiv sein. Es kann sich im Stillstand befinden, oder es kann mit hoher Geschwindigkeit strömen.



01

Die beschriebene Situation bei der klassischen Temperaturmessung zeigt, dass der Kontakt zum Messmedium eine ganze Reihe von Schwierigkeiten mit sich bringen kann. Diese Schwierigkeiten müssen für einen zuverlässigen und vor allem sicheren Anlagenbetrieb bewältigt werden, was hohe Ausgaben zur Folge hat [1].

Bereits bei Planung und Konstruktion einer Anlage fallen Kosten an für zusätzliche Öffnungen in Behältern und Rohrleitungen, über die der Temperaturfühler in das Messmedium eingebracht wird. Hier sind z. B. Flansche und auch strukturelle Verstärkungen erforderlich, die teilweise schärfsten Sicherheitsanforderungen genügen müssen.

Schutzrohre müssen für die Eigenschaften des Messmediums ausgelegt werden, um den Temperaturfühler vor chemischen und mechanischen Belastungen zu schützen. Eine besondere Herausforderung stellen abrasive Stäube oder Sande dar, die sich mit hoher Geschwindigkeit durch eine Rohrleitung bewegen. Da sowohl abrasive als auch chemisch aggressive Medien zu einem kritischen Abtrag des Schutzrohrmaterials führen können, müssen diese Schutzrohre regelmäßig inspiziert und bei Bedarf ausgetauscht werden. Spezielle Schutzrohrmaterialien führen dabei zu hohen zusätzlichen Kosten.

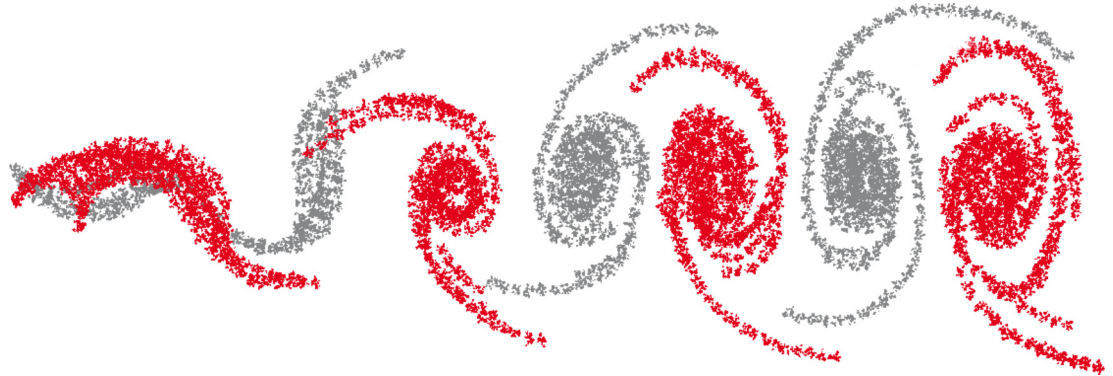
Die Inspektion und ggf. der Austausch von Schutzrohren erfordert einen zumindest teilweisen Stillstand der Anlage und meistens auch ein vollständiges Entleeren des Systems. Dieses gilt auch für den Fall, dass zusätzliche Messstellen installiert werden sollen. Weiterhin kann die Verwendung von Schutzrohren in einer Rohrleitung den Aufwand für die Reinigung erhöhen, wenn z.B. eine regelmäßige Reinigung durch sogenannten „Molche“ nicht möglich ist.



02

... Klassische Temperaturmessung im Messmedium

—
03 Wirbelbildung im
Bereich eines Schutzrohrs
im strömenden
Messmedium



03

Neben erhöhten Kosten muss unbedingt auch der Sicherheitsaspekt berücksichtigt werden: Schutzrohre können in strömenden Medien durch Wirbelbildung in Schwingungen versetzt werden und dadurch im Extremfall brechen. Dieses kann dramatische Folgen haben, nicht nur für die Anlage, sondern auch für die gesamte Umgebung.

1995 kam es im Kernkraftwerk Monju, dem einzigen Kernkraftwerk vom Prinzip des „schnellen Brüters“ in Japan, nach einem durch Wirbelbildung bedingten Bruch eines Schutzrohres zu einem schweren Unfall, bei dem große Mengen ausgetretenen Natriums nach einer chemischen Reaktion zu starker Wärmeentwicklung führten und Anlagenteile aus Stahl schmolzen.

Normen und Standards wie ASME PTC 19.3 TW 2010 und später TW-2016 zur Stabilität von Schutzrohren haben sich deshalb im Lauf der Zeit deutlich verschärft, damit erhöhen sich auch die Kosten für Wartung und Austausch.

Die beschriebenen Sicherheitsrisiken und Kostenaspekte entfallen, wenn die Prozesstemperatur nicht-invasiv und verlässlich außerhalb des Prozesses gemessen werden kann.

ABBs neuer Temperaturfühler TSP341-N zur Oberflächenmontage erlaubt es in vielen Fällen, Prozesstemperaturen mit einer für die konkrete Anwendung vollkommen ausreichenden und reproduzierbaren Genauigkeit zu ermitteln.

Temperaturfühler von ABB zur Oberflächenmontage

—
04 Nicht-invasiver
Temperaturfühler
TSP341-W im Einsatz

—
Literaturhinweis
[2] T. Merlin et al.: „Absolut
autark“, ABB Review
2015(4), S. 62 bis 67,
November 2015.



Neben Temperaturfühlern für den klassischen Einsatz mit Schutzrohren liefert ABB bereits seit langem auch Fühler zur Oberflächenmontage für die nicht-invasive Temperaturmessung. Hier handelt es sich aktuell um Mantelleitungs-Temperaturfühler der Serie SensyTemp TSC400 für den universellen Einsatz im Behälter- und Rohrleitungsbau sowie generell im Maschinen- und Anlagenbau. Spezielle Ausführungen der Fühler SensyTemp TSP100 und TSP300 für die Prozess-Messtechnik sind ebenfalls erhältlich.

ABBs erster Temperaturfühler einer neuen Generation von Fühlern zur nicht-invasiven Temperaturmessung in der Prozesstechnik ist der 2014 eingeführte SensyTemp TSP341-W („W“ für „Wireless“). Durch das drahtlose Kommunikationsprotokoll WirelessHART ist dieser Oberflächen-Temperaturfühler besonders auch für nachträgliche Erweiterungen in Industrieanlagen geeignet.

04

Optional kann der TSP341-W mit einem Energy Harvester geliefert werden, der die benötigte elektrische Energie aus der Temperaturdifferenz zwischen Prozess- und Umgebungstemperatur gewinnt und damit einen völlig autarken Betrieb erlaubt.

Seine erste Bewährungsprobe bestand der TSP341-W sehr erfolgreich in einer umfangreichen Pilotinstallation, bei der Fühler installiert wurden, ohne die Produktionsprozesse unterbrechen zu müssen. Hier wurden wertvolle Erkenntnisse gewonnen, u.a. über den Einfluss der mechanischen Konstruktion des Fühlers am Messpunkt, verschiedener Isolierungsarten und unterschiedlicher Strömungsbedingungen. Damit konnte die Messgenauigkeit in der Installation von anfänglich mehreren Kelvin auf etwa 1 K gesteigert und die Ansprechzeit um 75 % verkürzt werden, womit nahezu die Leistung eines klassischen invasiven Temperaturfühlers erreicht wird [2]. Mit dieser Performance wird der Fühler TSP341-W inzwischen weltweit erfolgreich eingesetzt.



Nicht-invasiver Temperaturfühler TSP341-N

—
05 Nicht-invasiver
Temperaturfühler
TSP341-N (Display
optional)

Nachdem bereits der nicht-invasive TSP341-W allein durch die Ausschöpfung des thermomechanischen Optimierungs-Potentials eine sehr hohe Messgenauigkeit lieferte, lag es nahe, die Genauigkeit durch modellbasierte Algorithmen – unter Berücksichtigung der Umgebungsverhältnisse während der Messung – weiter zu verbessern. Speziell die Umgebungstemperatur spielt hier eine sehr große Rolle.



05

Dieses anspruchsvolle Entwicklungsziel konnte für den hier vorgestellten neuen Temperaturfühler TSP341-N erfolgreich umgesetzt werden. Der Oberflächen-Temperaturfühler TSP341-N kombiniert die nicht-invasive Temperaturmessung mit dem etablierten HART-Kommunikationsprotokoll in Zweileitertechnik. Damit kann der Fühler vollkommen problemlos in bereits bestehende Anlagen-Strukturen eingebunden werden. Das „N“ des TSP341-N steht für die nicht-invasive Temperaturmessung. Die von ABB entwickelten Berechnungsalgorithmen zur nicht-invasiven Temperaturmessung berücksichtigen wie angestrebt die Umgebungsverhältnisse während der Messung und erhöhen damit die Genauigkeit der Oberflächenmessung noch einmal signifikant.

Der Temperaturfühler TSP341-N verfügt über zwei Temperatursensoren. Es kann neben der Oberflächentemperatur an der Messstelle auch die Umgebungstemperatur in deren Nähe gemessen werden.

Der Fühler ist mit einem Temperatur-Messumformer mit 4 bis 20 mA Stromausgang und Kommunikation über das HART 7-Protokoll ausgestattet, basierend auf dem erfolgreich am Markt etablierten TTH300 HART von ABB.

Mit den in die Firmware des Messumformers integrierten Berechnungsalgorithmen wird die Prozesstemperatur in einem Messbereich von -40°C bis 400°C (-40°F bis 752°F) in Echtzeit berechnet und ausgegeben.

Der Anschlusskopf des TSP341-N besteht aus epoxid-beschichtetem Aluminium oder CrNi-Stahl mit optionalem LCD-Anzeiger.

Geeignete Messmedien und deren Parameter für die nicht-invasive Temperaturmessung mit dem TSP341-N

Ein spezielles Entwicklungsziel für den Fühler TSP341-N war eine hohe Nutzerfreundlichkeit. Das Gerät sollte nach der einfachen Oberflächeninstallation auch einfach zu bedienen sein und sofort in Betrieb genommen werden können. Einziger für die Berechnungsalgorithmen relevanter Parameter ist deshalb die Information, ob eine Isolierung an der Messstelle vorhanden ist (bei Lieferung voreingestellt) oder nicht. Weitere Parameter wie Dicke, Material oder Wärmeleitkoeffizient von Rohrleitung oder Behälter an der Messstelle, oder auch spezifische Informationen zu Material und Geometrie der Isolierung werden für den einwandfreien und exakten Betrieb des Fühlers nicht benötigt. Dadurch wird auch der Bestellvorgang für den TSP341-N erleichtert, und das Gerät kann später flexibel an unterschiedlichen Messstellen eingesetzt werden.

Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Rohren und Behältern aus Metall für viele Anwendungs-Szenarien die Temperaturen von Außenwand, Innenwand und Prozess (Messmedium) als praktisch gleich angenommen werden können. Damit ist eine Berechnung der Temperatur-Differenz von Rohr-Außenwand und -Innenwand nicht erforderlich und entsprechende Parameter für diese Berechnung werden nicht benötigt.

Mit der im nachfolgenden Kapitel durch Messergebnisse belegten hohen nicht-invasiven Messgenauigkeit des TSP341-N durch a) thermomechanischen Optimierungen und b) spezielle Korrektur-Algorithmen kann die Oberflächentemperatur der Außenwand (von Rohrleitung bzw. Behälter) hoch-präzise ermittelt werden. Mit der Annahme, dass es keinen relevanten Unterschied zur Prozesstemperatur gibt, ist damit auch die Temperatur des Messmediums mit großer Genauigkeit bestimmt.

Allerdings ist der Ansatz einer Temperaturgleichheit von Außenwand und Prozess auch bei Metallrohren nicht ohne weiteres für alle Messmedien und Anwendungs-Szenarien zulässig.

Besonders geeignet für diesen Ansatz sind Messmedien geringer Viskosität, mit hoher Wärmeleitfähigkeit sowie Prozesse mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten oder turbulenter Strömung.

Beispiele: Wasser, wässrige Lösungen und wasserbasierte Flüssigkeiten, sowie schnell strömendes Öl oder Sattedampf.

Häufig kann aber auch für andere Stoffe und anderes Strömungsverhalten die Temperatur des Messmediums (bzw. die Prozesstemperatur) mit einer für den konkreten Anwendungsfall ausreichenden Genauigkeit ermittelt werden.

Nachfolgende Beispiele zeigen für Stoffe verschiedener Viskosität und Wärmeleitfähigkeit, welche Messgenauigkeiten bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Rohrdurchmessern bei der nicht-invasiven Temperaturmessung mit dem TSP341-N zu erwarten sind.

Für die Berechnungen mit Hilfe empirischer Formeln werden eine metallische Rohrleitung und eine Isolierung an der Messstelle vorausgesetzt.

Folgende Parameter werden berücksichtigt:

- Temperatur der Außenwand T_{surf}
- Temperatur des Messmediums T_m
- Umgebungstemperatur T_{amb}
- Strömungsgeschwindigkeit v
- Rohrdurchmesser D
- Dynamische Viskosität η und spezifische Wärmeleitfähigkeit λ , in drei Beispielen durch typische Stoffe repräsentiert

Die dreidimensionale Darstellung auf der linken Seite der Beispiele 1 bis 3 zeigt jeweils die relative Messgenauigkeit in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit v und Rohrdurchmesser D :

$$error_{medium} = \frac{|T_m - T_{surf}|}{|T_m - T_{amb}|}$$

Damit ist z.B. die Angabe $error_{medium} = 0,02$, in den nachfolgenden Beispielen als $\Delta T_{err} = 2 \text{ K}$ bezeichnet, als Messgenauigkeit von $\pm 2 \text{ K}$ pro 100 K Temperaturdifferenz zwischen Messmedium und Umgebung zu verstehen.

Auf der rechten Seite der Beispiele 1 bis 3 werden die für eine Messgenauigkeit $\Delta T_{err} \leq 2 \text{ K}$ möglichen Kombinationen von Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser dargestellt, teilweise logarithmisch skaliert.

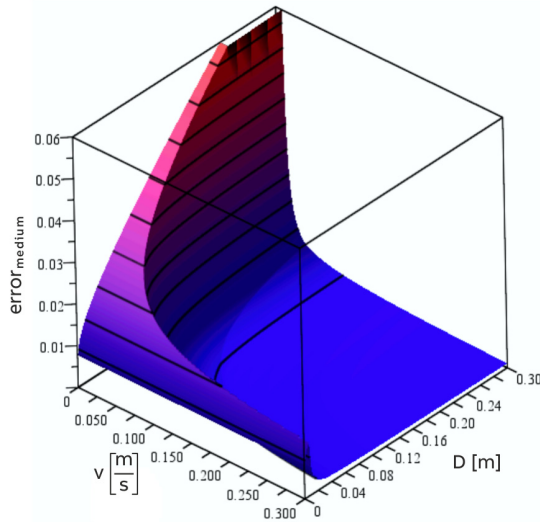
... Nicht-invasiver Temperaturfühler TSP341-N

06 Messgenauigkeit bei Flüssigkeiten mit geringer Viskosität, Beispiel Wasser

07 Mögliche Kombinationen von Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser für die Messgenauigkeit $\Delta T_{err} \leq 2 \text{ K}$

Beispiel 1 – Flüssigkeiten mit geringer Viskosität

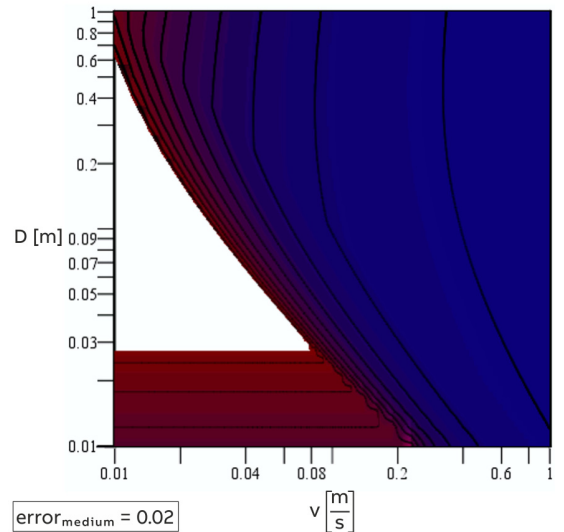
Messmedium: Wasser, dynamische Viskosität $\eta \sim 1 \text{ mPa s}$



06

Resultat:

- Unabhängig von Strömungsgeschwindigkeit v und Rohrdurchmesser D stellt sich bei Flüssigkeiten mit geringer Viskosität wie Wasser fast immer eine turbulente Strömung ein.
- Die Berechnungen ergeben für kleine Rohrdurchmesser ($D < 3 \text{ cm}$) eine hohe Genauigkeit für alle Strömungsgeschwindigkeiten.
- Bereits ab sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten ($v > 10 \text{ cm/s}$) ist die Genauigkeit unabhängig vom Rohrdurchmesser ebenfalls immer hoch.



07

Schlussfolgerung:

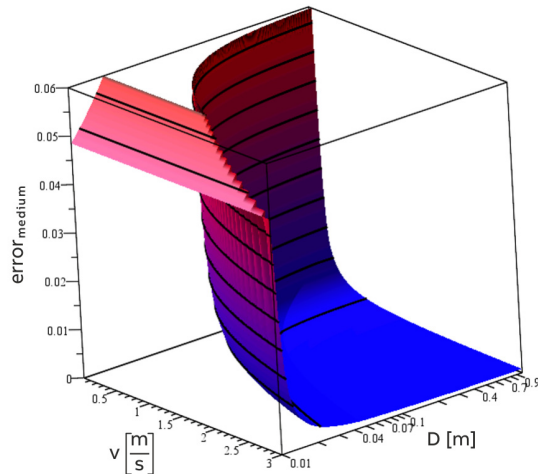
- Für den nicht-invasiv messenden TSP341-N kann für die meisten Applikationen mit Flüssigkeiten geringer Viskosität eine sehr hohe Messgenauigkeit erwartet werden.

—
08 Messgenauigkeit bei Flüssigkeiten mit geringer Wärmeleitfähigkeit und erhöhter Viskosität, Beispiel Öl

—
09 Mögliche Kombinationen von Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser für die Messgenauigkeit $\Delta T_{err} \leq 2 \text{ K}$

Beispiel 2 – Flüssigkeiten mit geringer Wärmeleitfähigkeit und erhöhter Viskosität

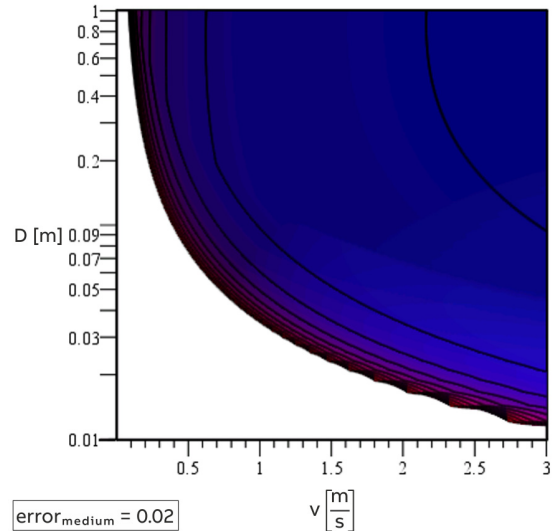
Messmedium: Öl, spezifische Wärmeleitfähigkeit $\lambda \sim 0,14 \text{ W/m K}$,
dynamische Viskosität $\eta \sim 13,4 \text{ mPa s}$



08

Resultat:

- Für eine hohe Messgenauigkeit ist ein turbulentes Strömungsverhalten der Flüssigkeit erforderlich.
- Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit v und größerem Rohrdurchmesser D kann eine hohe Messgenauigkeit erzielt werden. Beispielsweise wird bei einem Rohrdurchmesser $D = 5 \text{ cm}$ eine Strömungsgeschwindigkeit $v > 70 \text{ cm/s}$ benötigt.



09

Schlussfolgerung:

- Bei Flüssigkeiten mit geringer Wärmeleitfähigkeit und erhöhter Viskosität ist für hohe Strömungsgeschwindigkeiten und größere Rohrdurchmesser die nicht-invasive Temperaturmessung mit dem TSP341-N mit sehr hoher Messgenauigkeit möglich. In anderen Fällen ist auf Grund der physikalischen Gegebenheiten eine eventuell nicht ausreichende Genauigkeit zu erwarten. ABB wird hier im Rahmen von Pilotprojekten und speziellen Versuchsaufbauten weitere Erfahrung sammeln.

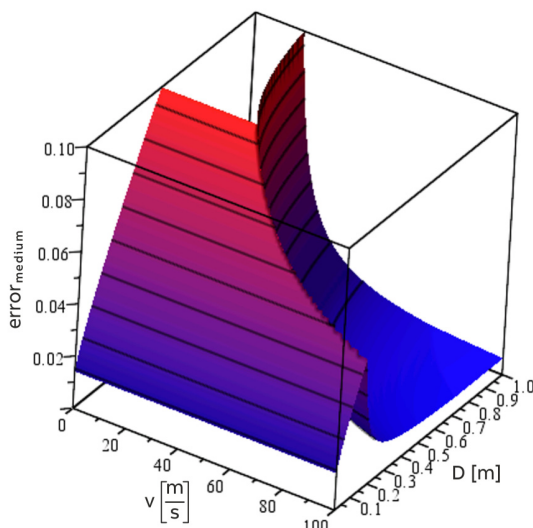
... Nicht-invasiver Temperaturfühler TSP341-N

10 Messgenauigkeit bei Flüssigkeiten mit sehr hoher Viskosität, Beispiel Honig

11 Mögliche Kombinationen von Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser für die Messgenauigkeit $\Delta T_{err} \leq 2 \text{ K}$

Beispiel 3 – Flüssigkeiten mit sehr hoher Viskosität

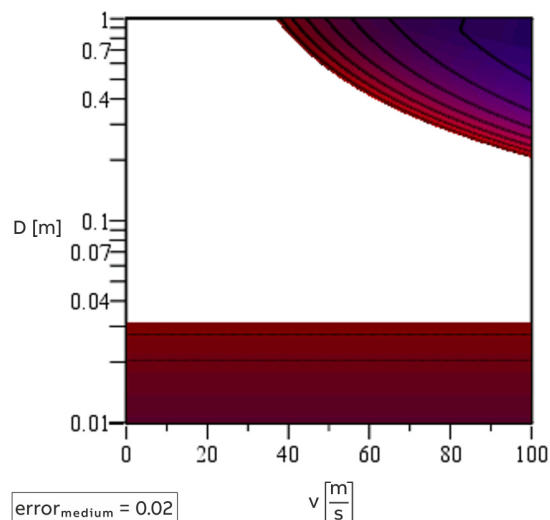
Messmedium: Honig, dynamische Viskosität $\eta \sim 10.000 \text{ mPa s}$



10

Resultat:

- Unabhängig von Strömungsgeschwindigkeit v und Rohrdurchmesser D stellt sich bei Flüssigkeiten mit sehr hoher Viskosität wie Honig fast nie eine turbulente Strömung ein.
- Die Berechnungen ergeben für kleine Rohrdurchmesser $D \leq 3 \text{ cm}$ eine hohe Genauigkeit für alle Strömungsgeschwindigkeiten.



11

Schlussfolgerung:

- Bei Flüssigkeiten mit sehr hoher Viskosität ist bei kleinen Rohrdurchmessern unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit die nicht-invasive Temperaturmessung mit dem TSP341-N mit sehr hoher Messgenauigkeit möglich. Für größere Durchmesser nimmt die Genauigkeit ab und steigt erst in unrealistischen Bereichen der Strömungsgeschwindigkeit wieder an. Auch hier wird ABB im Rahmen von Pilotprojekten und speziellen Versuchsaufbauten weitere Erfahrung sammeln.

Zusammenfassung

Die drei gezeigten Beispiele für ganz unterschiedliche Stoffgruppen belegen, dass der TSP341-N für eine Vielzahl von Anwendungen hervorragend geeignet ist.

Neben Berechnungen für diese drei Beispiele hat ABB viele weitere Untersuchungen zu erreichbaren Genauigkeiten für unterschiedlichste Stoffe und Anwendungen durchgeführt. Die Darstellung würde den Rahmen dieses Dokuments sprengen.

ABB verfügt zwischenzeitlich über Simulations-Programme, die eine sehr gute Aussage über die erreichbare Genauigkeit des TSP341-N in einer konkreten Anwendung ermöglichen.

Interessenten, die sich über die Eignung des TSP341-N für ihre eigenen Applikation im Unklaren sind, werden deshalb gebeten, ihren ABB-Partner zu diesem Thema zu kontaktieren.

Temperaturmessung mit dem TSP341-N: Genauigkeit und Ansprechzeit

—
12 Experimenteller
Messaufbau in einer
Klimakammer zur Messung
von Präzision und
Ansprechzeit des TSP341-N

Literaturhinweis

[3] J. Gebhardt et al.:
"Zuverlässige Messung der
Oberflächen-temperatur:
ein Schritt zur Etablierung
nicht-invasiver Temperatur-
messung in der Industrie",
Sensoren und
Messsysteme,
19. ITG/GMA-Fachtagung,
Tagungsband, Juni 2018

Im vorigen Kapitel wurde als Grundlage für die Betrachtung geeigneter Messmedien die Fähigkeit des TSP341-N zur hochpräzisen Messung der Außenwandtemperatur mediendurchströmter Rohrleitungen genannt. Diese Präzision soll nachfolgend durch Messergebnisse belegt werden.

Darüber hinaus wird gezeigt, dass die Ansprechzeit bei der Messung mit dem TSP341-N vergleichbar oder in vielen Fällen sogar kürzer ist als bei einer klassischen Messung mit Schutzrohr.

Die Messungen zu Präzision und Ansprechzeit wurden mit einem experimentellen Messaufbau durchgeführt, der bei sehr schnellem Ansprechverhalten allerhöchste Genauigkeit für die Referenzmessung der tatsächlichen Außenwandtemperatur garantiert [3].

Zur Bestimmung der Präzision des TSP341-N wurde bei konstant gehaltener Außenwandtemperatur über mehrere Stunden die Umgebungstemperatur variiert.



... Temperaturmessung mit dem TSP341-N: Genauigkeit und Ansprechzeit

—
13 Präzise und stabile
Messung einer konstanten
Oberflächentemperatur
bei den Sprüngen der
Umgebungstemperatur

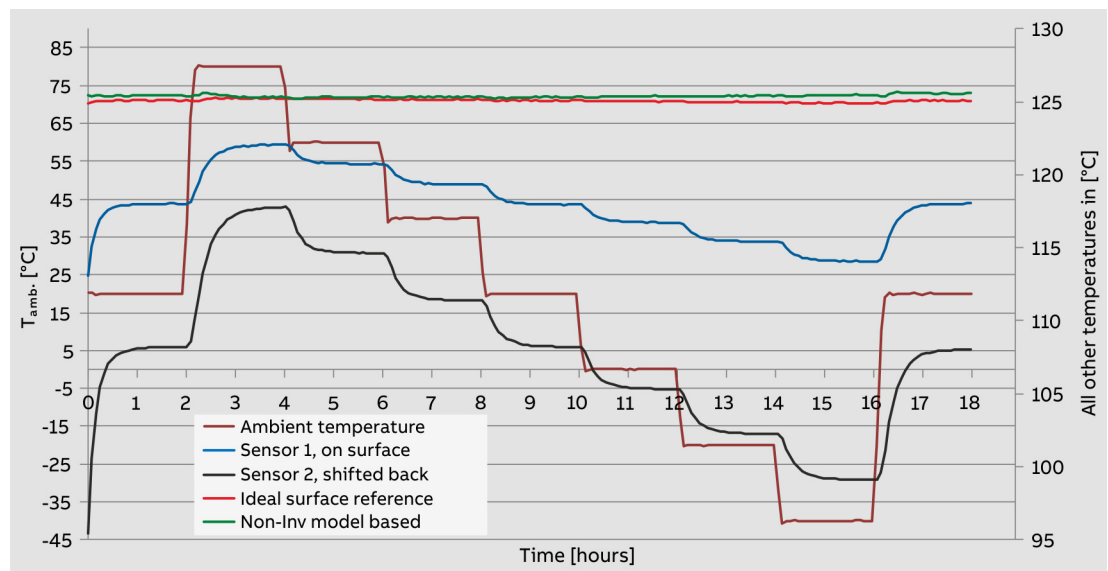
Im gezeigten Beispiel wurde bei einer Temperatur der Außenwand $T_{\text{surf}} = 125^\circ\text{C}$ die Umgebungstemperatur T_{amb} über einen Umgebungstemperaturbereich von $T_{\text{amb}} = -40$ bis 80°C in Sprüngen von 20°C sowie 60°C geändert.

Das Diagramm zeigt die durch den TSP341-N gemessene Oberflächentemperatur an der Messstelle (**Sensor 1, on surface**) und die gemessene Umgebungstemperatur in der Nähe der Messstelle (**Sensor 2, shifted back**).

Während die gemessenen Temperaturen an der Messstelle und vor allem in der Nähe der Messstelle stark von der Umgebungstemperatur beeinflusst werden, weicht die mit Hilfe der Algorithmen berechnete Außenwandtemperatur (**Non-inv model-based**) bei allen Umgebungstemperaturen um nicht mehr als $\sim 1^\circ\text{C}$ von der exakten Temperatur (**Ideal surface reference**) ab.

Auch während der Umgebungstemperatur-Sprünge von 20°C und speziell auch von 60°C ist diese Genauigkeit vorhanden:

- Die ermittelte Temperatur bleibt stabil und es stellt sich kein Schwingungsverhalten ein.



14 Reaktion des TSP341-N auf schnelle Änderungen der Oberflächentemperatur

Die beiden nachfolgenden Diagramme belegen das gute Ansprechverhalten des TSP341-N bei schnellen Temperatur-änderungen der Außenwand.

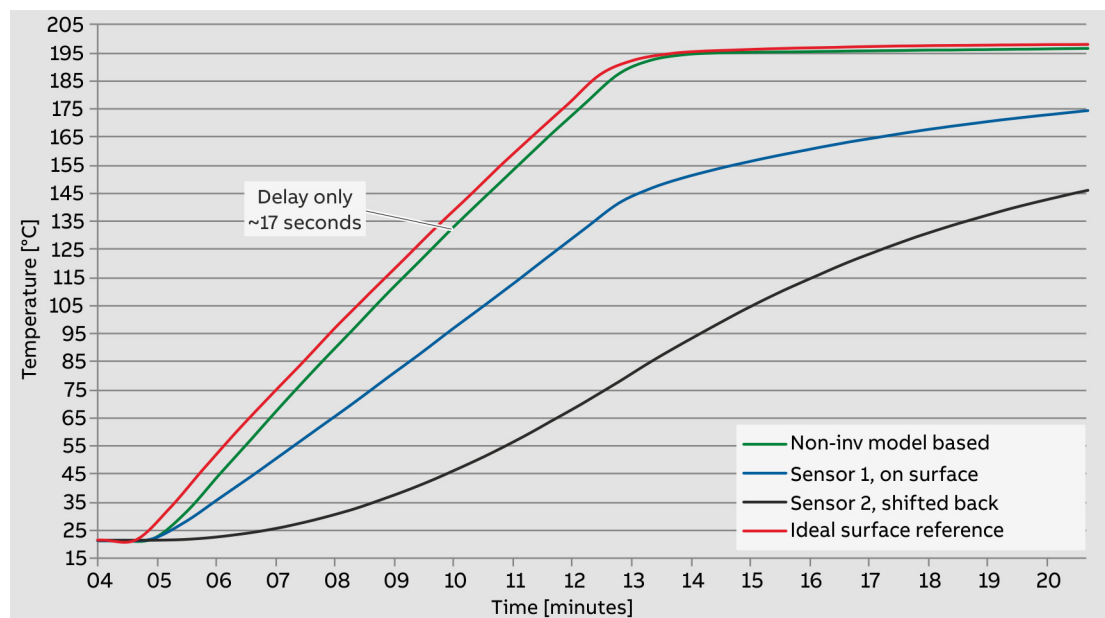
Mit den bereits erwähnten Schritten der thermomechanischen Optimierungen, speziell am Messpunkt und Verwendung spezieller Korrekturalgorithmen wird nicht nur eine sehr hohe Messgenauigkeit, sondern auch eine überraschend kurze Ansprechzeit dieses Oberflächenfühlers erreicht.

Sie ist mit den Ansprechzeiten der klassischen Temperaturmessung mit Schutzrohr vergleichbar und häufig sogar besser als diese.

Im folgenden Beispiel wird die Außenwand-Temperatur innerhalb von nur 8 Minuten nahezu linear von $T_{\text{surf}} \sim 20^\circ\text{C}$ auf $T_{\text{surf}} \sim 190^\circ\text{C}$ erhöht. Der Temperaturanstieg beträgt damit $\sim 0,3^\circ\text{C/s}$.

Obwohl die von Sensor 1 und Sensor 2 erfassten Temperaturen der schnellen Temperaturerhöhung nur mit einer Verzögerung von mehreren Minuten folgen können, erreicht die mit Hilfe der Algorithmen berechnete Außenwandtemperatur (**Non-inv model-based**) die exakte Temperatur (**Ideal surface reference**) bereits nach nur ~ 17 Sekunden. Dabei weicht die so berechnete Außenwandtemperatur auch in dieser sehr dynamischen Phase um nie mehr als $\sim 6^\circ\text{C}$ von der exakten Temperatur ab.

Bei konstanter Oberflächentemperatur vor und nach deren Erhöhung wird sofort wieder eine Genauigkeit von $\sim 1^\circ\text{C}$ erreicht, wie bereits im vorherigen Diagramm gezeigt.



... Temperaturmessung mit dem TSP341-N: Genauigkeit und Ansprechzeit

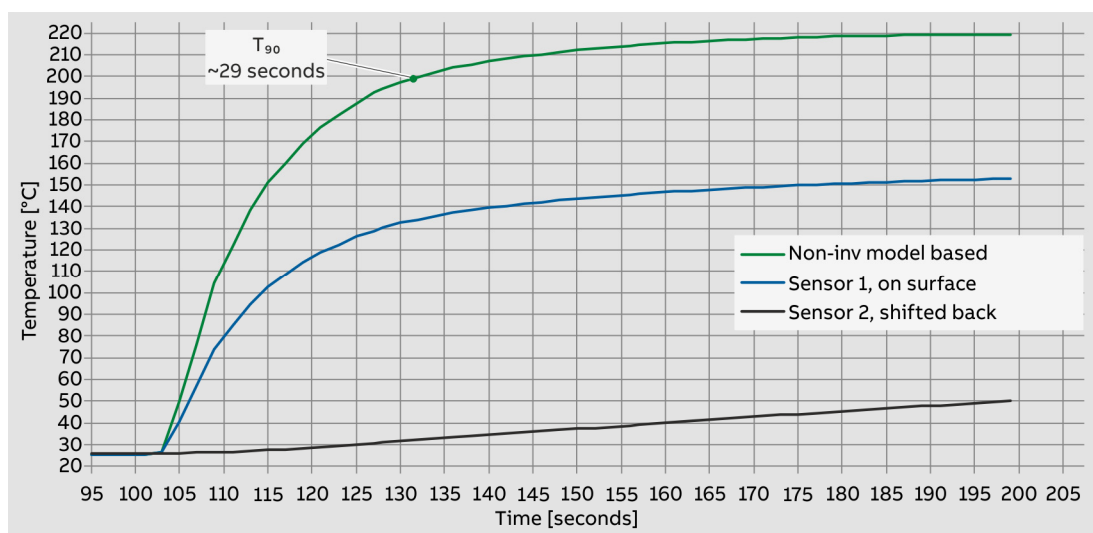
—
15 Reaktion des TSP341-N
auf einen
Temperatursprung von
25 °C auf 220 °C

Die kurze Ansprechzeit des TSP341-N kann auch seiner Reaktion auf einen Temperatursprung (Einheitssprung) entnommen werden.

Im nachfolgenden Beispiel wird der Temperatursprung von 25 °C auf 220 °C durch den plötzlichen Kontakt des Oberflächenfühlers mit einer auf diese Temperatur aufgeheizte Oberfläche erreicht.

Bereits nach 29 Sekunden wird mit Hilfe der Algorithmen eine Außenwandtemperatur (**Non-inv model-based**) von > 200 °C ermittelt, dieses sind 90 % des plötzlichen Temperatursprungs (T_{90} ~29 s).

Mit einer Ansprechzeit von $T_{90} < 30$ s besteht der Oberflächenfühler TSP341-N den Vergleich zur klassischen Temperaturmessung mit Schutzrohr sehr gut.



15

Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Messungen zeigen, dass der nicht-invasive Temperaturfühler zur Oberflächenmontage TSP341-N eine sehr genaue Temperaturmessung ermöglicht. Die hohe Messgenauigkeit bleibt auch bei schnellen und großen Änderungen der Umgebungstemperatur erhalten. Der Fühler ist aufgrund seiner Eigenschaften in der Lage, auch schnelleren Temperaturänderungen des Messmediums kurzfristig und mit guter Genauigkeit zu folgen. Die Ansprechzeit des TSP341-N liegt im guten Bereich der klassischen Temperaturmessung mit Schutzrohr. Aufgrund der erforderlichen Robustheit von Schutzrohren bei manchen Anwendungen können die Ansprechzeiten dort auch erheblich höher sein.

Direkter Vergleich: Temperaturmessung mit TSP341-N (nicht-invasiv) und klassisch (Messung mit Schutzrohr im Messmedium)

—
16 Messaufbau zum Vergleich von nicht-invasiver und klassischer Temperaturmessung

Die beiden vorherigen Kapitel haben sich mit der Eignung unterschiedlicher Messmedien für die nicht-invasive Temperaturmessung und mit der Genauigkeit der Messung äußerer Oberflächentemperaturen durch den TSP341-N befasst. Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, dass der TSP341-N bei einer Vielzahl von Anwendungen für eine hochpräzise Temperaturmessung genutzt werden kann.

Die vorliegende Ausgabe II des Whitepapers unterstreicht diese Schlussfolgerung durch konkrete Messergebnisse.

Die Messungen wurden, wie auch bereits die im vorherigen Kapitel beschriebenen Messungen, am deutschen ABB Forschungszentrum in Ladenburg durchgeführt. Für den Messaufbau wurde eine realistische industrielle Installation nachgebildet, bestehend aus einem Tank, einer Pumpe und einer Rohrleitung mit Absperrventilen an Anfang und Ende. Als Messmedium wurde Wasser verwendet, welches zu Beginn der Messung eine konstante Temperatur im Bereich der Umgebungstemperatur aufwies.

Bei geschlossenen Ventilen wurde das Wasser im Tank auf eine definierte Temperatur erwärmt und anschließend die Pumpe eingeschaltet. Erst danach wurden die beiden Ventile geöffnet, um einen möglichst schnellen Temperatursprung in der Rohrleitung aus austenitischem, nichtrostendem Stahl (Werkstoff 1.4307) mit Durchmesser DN 80 zu erzielen.

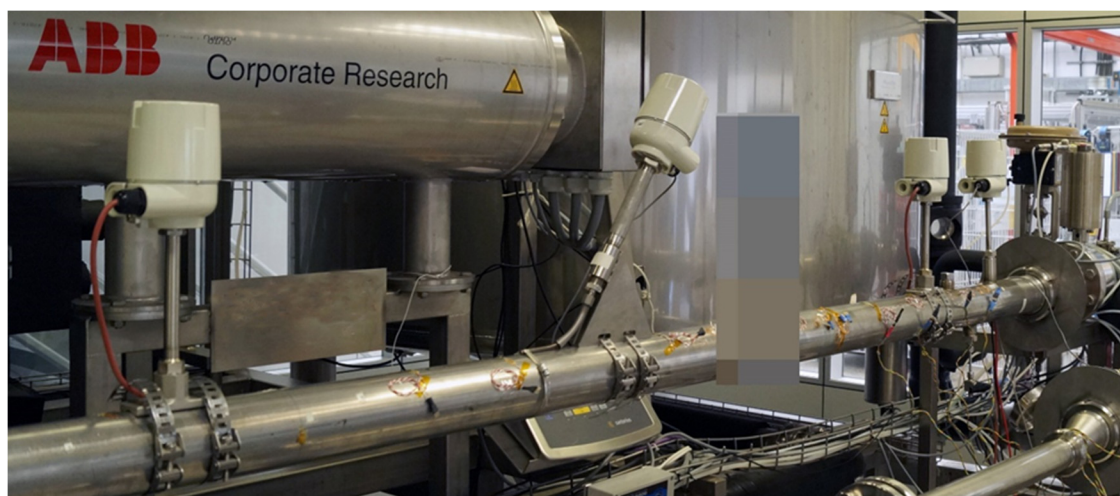
Das erwärmte Wasser floss dann mit einer Durchflussmenge von 4 Litern pro Sekunde durch die Rohrleitung.

Die so erreichte Strömungsgeschwindigkeit von $v \sim 75 \text{ cm/s}$ stellt eine turbulente Strömung im Rohr und damit einen guten Wärmeübergang vom Messmedium auf die Rohrleitung sicher. Sie liegt weit über der weiter oben ermittelten Geschwindigkeit $v > 10 \text{ cm/s}$, ab der für Wasser bei einer nicht-invasiven Messung eine hohe Messgenauigkeit erreicht wird.

Für die Vergleichsmessung wurde neben einem auf die Rohroberfläche montierten TSP341-N ein schnellansprechender SensyTemp TSP321 mit Schutzrohr zur klassischen Temperaturmessung verwendet. Zusätzlich kamen der Oberflächenfühler eines Mitbewerbers sowie ein einfacherer Oberflächenfühler von ABB ohne Berechnungsalgorithmen zum Einsatz.

Der verwendete Fühler TSP321 verfügt über folgende wesentliche Merkmale:

- Geschweißtes Schutzrohr aus nichtrostendem Stahl 1.4571 / 316Ti zum Einschrauben mit Durchmesser 12 mm, Spitze verjüngt 9 mm (Form 3G nach DIN 43772)
- Schnellansprechender Pt100 Sensor als Schichtmesswiderstand, Genauigkeit Klasse AA nach IEC 60751, Vierleiterschaltung



... Direkter Vergleich: Temperaturmessung mit TSP341-N (nicht-invasiv) und klassisch (Messung mit Schutzrohr im Messmedium)

17 Temperatursprung von 29 °C auf 77 °C. Messmedium: Wasser, Rohrleitung nicht isoliert

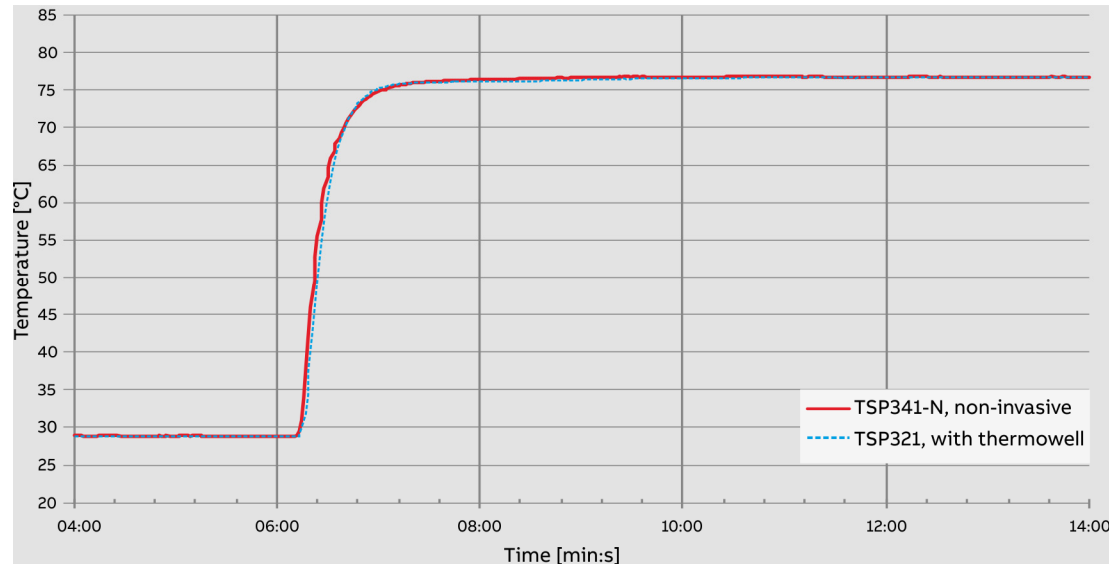
Messergebnisse
Vor und nach dem Temperatursprung sind die Unterschiede zwischen nicht-invasiver (TSP341-N) und klassischer (TSP321) Temperaturmessung derart gering, dass nachfolgend hierauf nicht mehr näher eingegangen wird. Es werden nur die Ansprechzeiten der beiden Fühler betrachtet.

Abbildung 16 auf Seite 15 zeigt den Messaufbau ohne eine Isolierung von Rohrleitung und Messstelle. Es wurden sowohl Messungen ohne Isolierung als auch mit Isolierung bis zur maximal zulässigen Höhe von 100 mm an der Messstelle (am Halsrohr des TSP341-N) durchgeführt.

Der Einfluss der Isolierung auf die nicht-invasive Messung ist positiv, aber wie erwartet gering, da eine an der Messstelle vorhandene Isolierung durch die Berechnungsalgorithmen berücksichtigt wird.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen Temperatursprünge um ~50 °C aus der Umgebungstemperatur am Messaufbau heraus.

Abbildung 17 zeigt einen Temperatursprung von 29 °C auf 77 °C. In dieser Darstellung lassen sich keinerlei Unterschiede bei Genauigkeit und Ansprechverhalten zwischen der nicht-invasiven und der klassischen Temperaturmessung erkennen.



—
18 Temperatursprung von
29 °C auf 77 °C.
Messmedium: Wasser,
Rohrleitung nicht isoliert.
Gestreckte Zeitachse
gegenüber Abbildung 17

Abbildung 18 zeigt daher die gleiche Messung wie in **Abbildung 17** auf Seite 16 in einem stark verkleinerten Zeitfenster.

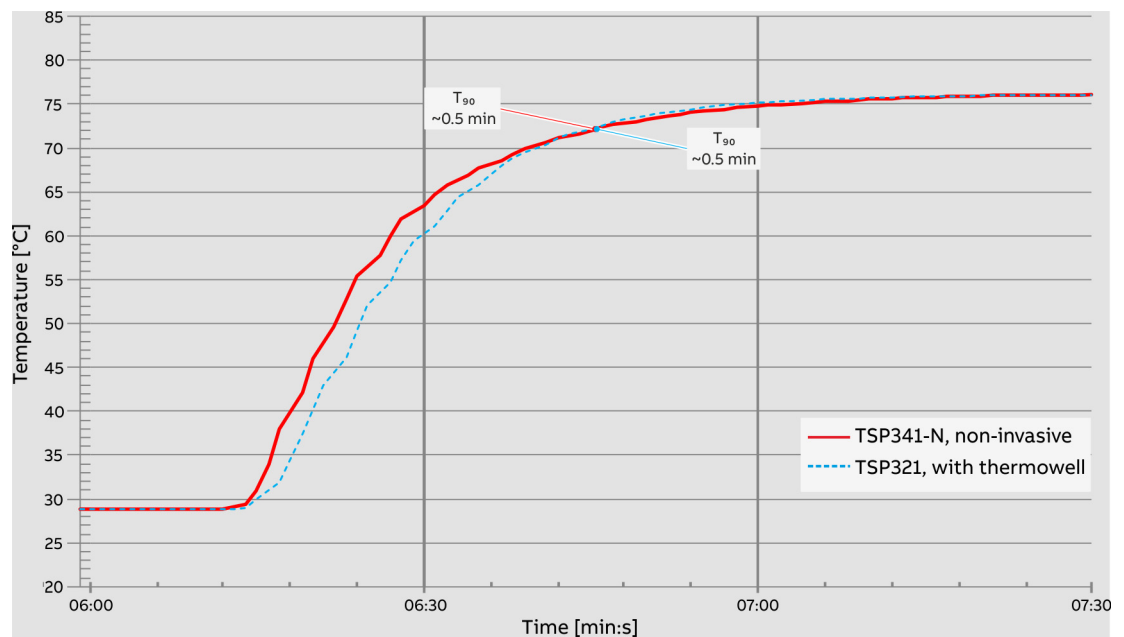
Auch mit stark vergrößerter zeitlicher Auflösung lässt diese Abbildung keine Zweifel an der Eignung einer nicht-invasiven Temperaturmessung mit einem TSP341-N aufkommen.

Die Ansprechzeiten T_{90} von TSP341-N und TSP321 sind praktisch gleich, die gemessene Ansprechzeit $T_{90} \sim 0,5$ min deckt sich mit der im vorigen Kapitel ermittelten Reaktionszeit des Fühlers auf einen plötzlichen Temperatursprung (Einheitssprung).

Während des Anstiegs der Temperatur bis zur Zeit T_{90} eilt der TSP341-N dem TSP321 um einige Sekunden voraus.

Dieses ist nicht damit zu begründen, dass der TSP341-N längs der Rohrleitung vor dem TSP321 montiert ist und deshalb früher auf den Temperaturwechsel des Messmediums reagieren kann. Dieser Zeitunterschied beträgt weniger als 0,5 Sekunden.

Vielmehr zeigt das nicht-invasive Messprinzip auch hier seine Vorteile, da die Oberflächenmessung auf dem Metallrohr schneller auf den Beginn des Temperatursprungs reagieren kann als der im Schutzrohr eingebaute Sensor.



... Direkter Vergleich: Temperaturmessung mit TSP341-N (nicht-invasiv) und klassisch (Messung mit Schutzrohr im Messmedium)

19 Temperatursprung von 22 °C auf 80 °C.
Messmedium: Wasser, Rohrleitung isoliert (~40 mm), Messstellen bis zur maximalen Höhe von 100 mm isoliert.

Es soll abschließend noch gezeigt werden, dass der Einfluss der Isolierung an der Messstelle auf die nicht-invasive Temperaturmessung mit einem TSP341-N gering ist, da ihr Vorhandensein bzw. Fehlen aufgrund entsprechender Parametrierung des Fühlers durch die Berechnungsalgorithmen berücksichtigt wird.

Für die nachfolgend gezeigte Messung wurde die Rohrleitung komplett mit einer ~40 mm dicken Wärmedämmung versehen. Der montierte TSP341-N und auch der TSP321 wurden zusätzlich bis zur maximal zulässigen Höhe von 100 mm vollständig mit Dämmmaterial umhüllt.

In **Abbildung 19** (Messung mit Isolation) ist im Wesentlichen das gleiche zeitliche Messverhalten zu erkennen wie in **Abbildung 18** (Messung ohne Isolation).

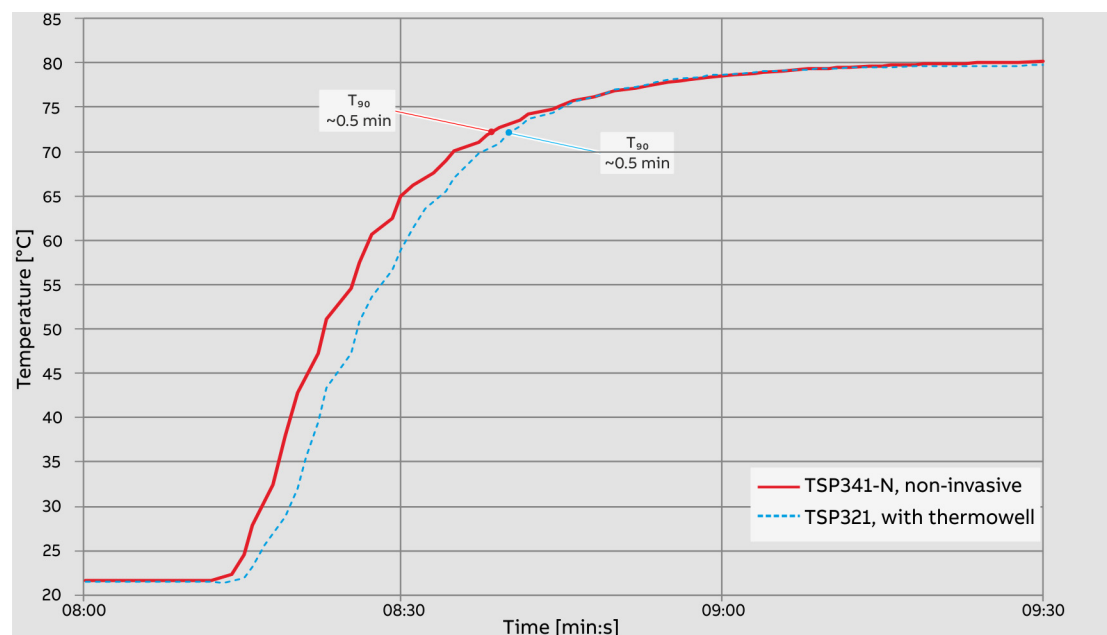
Zu Beginn der Messung reagiert der TSP341-N auch hier etwas schneller als der TSP321, die Ansprechzeiten T_{90} beider Fühler sind praktisch gleich und durch die Isolation tendenziell geringfügig kürzer.

Zusammenfassung

Auch im direkten Vergleich mit einem klassisch im Medium messenden Temperaturfühler unterstreicht der nicht-invasiv messende TSP341-N mit seinen in die Firmware des Messumformers integrierten Berechnungsalgorithmen zur nicht-invasiven Temperaturmessung seine hervorragende Performance. Signifikante Unterschiede bei der Messung einer konstanten Temperatur sind nicht zu erkennen.

In seiner Reaktionszeit liegt der TSP341-N mit dem hier zum Vergleich verwendeten Fühler mit einem schnell ansprechenden Schutzrohr ebenfalls gleichauf. Er kann dabei auf den Beginn einer schnellen Temperaturänderung sogar etwas schneller reagieren als der im Schutzrohr eingebaute Sensor des klassischen Fühlers.

Der TSP341-N ist für den Betrieb mit und ohne Isolation der Messstelle gleichermaßen gut geeignet. Bei dem hier genutzten Messaufbau, der Nachbildung einer realistischen industriellen in-house Installation, war der Einfluss einer Isolierung positiv, aber gering.



Einsatzbereiche und Applikation

Generell ist der nicht-invasive Temperaturfühler TSP341-N für alle Einsatzbereiche geeignet, in denen auch Temperaturfühler mit Schutzrohr eingesetzt werden. Dieses sind alle Bereiche der Industrie und Schwerindustrie. Beispielhaft sollen hier die Branchen Chemie, Energie, Öl und Gas, Papier und Zellstoff sowie die Petrochemie genannt werden. Speziell für die chemische Industrie ist der Fühler hervorragend geeignet durch die Berücksichtigung von NAMUR-Empfehlungen wie NE24, NE89 und NE107. Globale Zulassungen für den Explosionsschutz erlauben den Einsatz auch in explosionsgefährdeten Bereichen*.

Der TSP341-N ist für alle Applikationen besonders geeignet, bei denen ein Eingriff in den Prozess oder ein Schutzrohr im Prozess bzw. Messmedium kritisch oder auch unerwünscht ist, beispielsweise wegen der Gefahr eines möglichen Schutzrohrbruchs oder wenn ein Schutzrohr die regelmäßig erforderlichen Reinigungsarbeiten erschwert.

Durch die einfache Integration in die bestehende Infrastruktur einer Anlage (Zweileitertechnik und HART-Protokoll) eignet sich der Fühler ganz hervorragend für nachträgliche und auch für temporäre Messstellen-Erweiterungen „on-the-fly“, da die Anlage für die Montage nicht heruntergefahren und geöffnet werden muss.

Eine sehr hohe Messgenauigkeit erzielt der TSP341-N generell bei:

- Messmedien mit geringer Viskosität,
- Messmedien mit hoher Wärmeleitfähigkeit,
- Prozessen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten und
- Prozessen mit turbulenter Strömung (oft durch hohe Strömungs-geschwindigkeit begünstigt).

Beispiele:

Wasser, wässrige Lösungen und wasserbasierte Flüssigkeiten, sowie schnell strömendes Öl oder Sattdampf.

Aber auch die Temperaturen anderer Messmedien können oft mit sehr hoher Genauigkeit ermittelt werden, wie in **Beispiel 3** auf Seite 10 gezeigt wird.

- * Der Temperaturfühler TSP341-N gehört zur Produktfamilie SensyTemp TSP von ABB. Er wird in den anzuwendenden Baumusterprüfbescheinigungen zum Explosionsschutz als SensyTemp TSP341-N geführt.

Zusammenfassung

In diesem Whitepaper wird die mit ABBs neuem Temperaturfühler TSP341-N erreichbare sehr gute Messgenauigkeit beschrieben und durch Beispiele und Messergebnisse belegt. Die hohe Präzision wird nicht-invasiv, also durch reine Oberflächenmessung ohne Eingriff in den Prozess erreicht. Dank ABBs langjähriger Erfahrung in der Konstruktion von Oberflächenfühlern und dem Einsatz neu entwickelter Berechnungsalgorithmen ist es mit dem TSP341-N jetzt möglich, eine dauerhafte und reproduzierbare Konstanz der Messqualität sicherzustellen.

In einer anfänglichen Betrachtung der klassischen Temperaturmessung mit Schutzrohren im Messmedium werden die möglichen Risiken eines Schutzrohrbruchs aufgezeigt. Die Vermeidung derartiger Zwischenfälle kann applikationsabhängig hohe Kosten für Anlagenplanung und -betrieb erfordern, die bei einer Oberflächenmessung prinzipbedingt entfallen. Damit ist ein Einsatz des nicht-invasiven Temperaturfühlers TSP341-N potentiell sowohl sicherheitssteigernd als auch kostensenkend. Darüber hinaus kann der Fühler problemlos auch nachträglich und auch nur temporär installiert werden, da der Betrieb der Anlage durch die einfache Montage an der Oberfläche nicht beeinträchtigt wird und eine Einbindung in die üblicherweise vorhandene Infrastruktur leicht möglich ist.

Mit einem Blick auf ABBs ersten Temperaturfühler einer neuen Generation von Oberflächenfühlern, den 2014 erfolgreich eingeführten TSP341-W wird beschrieben, wie die mit diesem Fühler gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung des neuen TSP341-N eingeflossen sind. Der TSP341-N berücksichtigt jetzt zusätzlich die Umgebungsverhältnisse bei der Messung und erhöht damit die Genauigkeit der Oberflächenmessung noch einmal signifikant.

Für eine hohe Präzision der nicht-invasiven Temperaturmessung ist ein guter Wärmeübergang vom Messmedium zur medium-führenden Konstruktion erforderlich, meistens einem Behälter oder einer Rohrleitung. Dieser Wärmeübergang ist oft von wesentlich höherer Bedeutung als der Wärmeübergang von der Innenseite auf die Außenseite der Konstruktion. Bei metallischen Rohren kann davon ausgegangen werden, dass die Temperatur der Außenseite, auf der die Oberflächenmessung erfolgt, derjenigen der Innenseite praktisch entspricht. Deshalb ist die Kenntnis des Wärmeübergangs vom Messmedium auf die Rohrleitung von höchster Bedeutung für die insgesamt zu erzielende Messgenauigkeit.

Das Whitepaper zeigt beispielhaft für drei verschiedene Flüssigkeiten, mit welchem Übergangsverhalten bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeit und Rohrdurchmessern zu rechnen ist und welche Temperaturabweichungen dabei zu erwarten sind:

- Flüssigkeiten geringer Viskosität wie Wasser (siehe **Beispiel 1** auf Seite 8),
- Flüssigkeiten mit erhöhter Viskosität und geringer Wärmeleitfähigkeit wie Öl (siehe **Beispiel 2** auf Seite 9) sowie
- Flüssigkeiten mit sehr hoher Viskosität wie Honig (siehe **Beispiel 3** auf Seite 10).

Es zeigt sich, dass der nicht-invasive Temperaturfühler TSP341-N unter den beschriebenen Randbedingungen eine sehr hohe Messgenauigkeit für viele Messmedien ganz unterschiedlicher Viskosität und Wärmeleitfähigkeit erreichen kann.

—
20 Wasser und Abwasser

—
21 Energie und
Dampferzeugung

—
22 Chemie und
Petrochemie

—
23 Öl und Gas

—
24 Papier und Zellstoff

—
25 Bergbau

—
26 Metall

—
27 Nahrungs- und
Genussmittel

—
28 Schiffbau

Anschließend wird untersucht, wie genau die eigentliche Messung der Rohr-Oberflächentemperatur durch den TSP341-N erfolgt und wie groß der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Messgenauigkeit ist. Es zeigt sich, dass auch große und sprunghafte Änderungen der Umgebungstemperatur keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit haben, diese liegt immer im Bereich von ± 1 K. Die Untersuchung des Ansprechverhaltens des TSP341-N zeigt, dass die Ansprechzeit des Fühlers im guten Bereich der klassischen Temperaturmessung mit Schutzrohr liegt und die höheren Ansprechzeiten massiver Schutzrohre deutlich unterschreitet.

Die vorliegende Ausgabe II dieses Whitepapers vergleicht jetzt zusätzlich die unter realistischen Bedingungen gewonnenen Ergebnisse nicht-invasiver Temperaturmessungen durch einen TSP341-N mit denen klassischer Messungen mit schnellansprechendem Schutzrohr im Messmedium.

Die Ergebnisse sind praktisch identisch und unterstreichen die hervorragende Eignung des Gerätes für viele Anwendungen.

Die beschriebenen Untersuchungen

- der Temperaturabweichung bei Wärmeübergang von Messmedium auf metallische Rohrleitung und
- der Genauigkeit und Ansprechzeit der Temperaturmessung an der Rohrleitungsoberfläche, sowie
- direkte Vergleichsmessungen

zeigen, dass die nicht-invasive Temperaturmessung durch den TSP341-N die klassische Temperaturmessung in vielen Fällen ohne Genauigkeitsverlust ersetzen kann. Dieses gilt für alle industriellen Branchen und für fast alle Applikationen.

Interessenten, die sich über die Eignung des nicht-invasiven Temperaturfühlers TSP341-N für ihre konkrete Applikation informieren möchten, werden gebeten, ihren ABB-Partner zu diesem Thema zu kontaktieren.

20



21



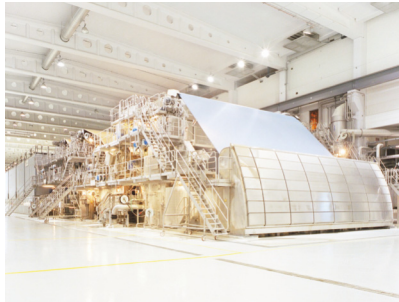
22



23



24



25



26



27



28





Notizen



Notizen

ABB Automation Products GmbH
Measurement & Analytics

Instrumentation Sales
Oberhausener Str. 33
40472 Ratingen
Deutschland
Tel: 0800 1114411
Fax: 0800 1114422
Email: vertrieb.messtechnik-produkte@de.abb.com

ABB Automation Products GmbH
Measurement & Analytics

Im Segelhof
5405 Baden-Dättwil
Schweiz
Tel: +41 58 586 8459
Fax: +41 58 586 7511
Email: instr.ch@ch.abb.com

ABB AG
Measurement & Analytics

Brown-Boveri-Str. 3
2351 Wr. Neudorf
Österreich
Tel: +43 1 60109 0
Email: instr.at@at.abb.com

abb.de/temperatur

Technische Änderungen sowie Inhaltsänderungen dieses Dokuments behalten wir uns jederzeit ohne Vorankündigung vor.
Bei Bestellungen gelten die vereinbarten detaillierten Angaben. ABB übernimmt keinerlei Verantwortung für eventuelle Fehler oder Unvollständigkeiten in diesem Dokument.

Wir behalten uns alle Rechte an diesem Dokument und den darin enthaltenen Themen und Abbildungen vor. Vervielfältigung, Bekanntgabe an Dritte oder Verwendung des Inhaltes, auch auszugsweise, ist ohne vorherige schriftliche Zustimmung durch ABB verboten.