Michael Pufke* und Thomas Fröhlich

Einflussfaktoren auf die Messung mit Rohranlegethermometern

Influences on the measurement with pipe clamp thermometers

DOI 10.1515/teme-2019-0033

Zusammenfassung: Rohranlegethermometer stellen eine spezielle Bauform der an Oberflächen messenden Berührungsthermometer dar. Ziel der Messung ist i. A. die Bestimmung der Mediumtemperatur im Inneren eines durchströmten Rohres. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass bei der Messung mit Rohranlegethermometern stets eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Medium, Rohr, Thermometer mit Kontaktwiderstand und Umgebung, erforderlich ist.

Schlüsselwörter: Rohranlegethermometer, Anlegefühler, Anklemmfühler, indirekte Temperaturmessung.

Abstract: The aim of pipe clamp thermometers is generally to determine the temperature of the medium inside a pipe. This work shows that an accurate knowledge of the properties of the overall system, consisting of medium, pipe, thermometer with contact resistance and environment, is required for measuring pipe clamp thermometers.

Keywords: pipe clamp thermometer, clamp on, indirect temperature measurement.

1 Motivation

Rohranlegethermometer stellen eine spezielle Bauform der an Oberflächen messenden Berührungsthermometer dar. Ihre Befestigung an ein Rohrstück erfolgt dabei i. d. R. durch lösbare Montage. Ziel der Messung mittels Rohranlegethermometern ist i. A. die Bestimmung der Mediumtemperatur im Inneren eines durchströmten Rohres. Rohranlegethermometer kommen dabei häufig bei kleinen Rohrquerschnitten und Temperaturen bis ca. 150 °C zur Anwendung. Der maximal typische Einsatzbereich

erstreckt sich jedoch bis zu ca. 300 mm Rohrdurchmesser sowie ca. 400 °C. Vorteilhaft wirkt sich die äußere Montage eines Rohranlegethermometers auf das Fluid aus, da keine nennenswerte Rückwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit bzw. auf deren Profil erfolgt und kein Eingriff in die Rohrleitung, durch z. B. eine Einschraubstelle nötig ist.

Bisherig sind nur wenige Veröffentlichungen zur Charakterisierung und Vergleich von Rohranlegethermometern bekannt. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl an Unklarheiten für den Anwender, insbesondere mit welchen Messabweichungen zwischen Sensortemperatur des Rohranlegethermometers und der Mediumtemperatur unter verschiedenen Einsatz- und Umgebungsbedingungen zu rechnen sind. Zudem ist aus der Literatur kein geeigneter Prüfstand zur reproduzierbaren Messung von Rohranlegethermometern bei deren typischer oberer Einsatztemperatur von 150 °C bekannt.

2 Prüfstand

2.1 Auswahl eines geeigneten Prüfstandes

Es gibt unterschiedlichste Ansätze zur Konzeption eines Prüfstandes, welcher die Fehlereinflüsse (wie bspw. Fehler durch Sensorkennlinie, Elektronik, Wärmeableitung, thermischen Kontaktwiderstand etc.) von Rohranlegethermometern möglichst umfassend berücksichtigt.

Grundsätzlich empfehlenswert ist dabei die Vergleichsmessung mit einem kalibrierten Referenzthermometer. Relativ einfach ist dies durch ein Einbringen des Rohranlegethermometers in einen temperierten Badthermostaten zu realisieren. Von Nachteil ist dabei jedoch, dass thermische Messabweichungen auf Grund der Kopplung zwischen Rohr und Rohranlegethermometer bzw. Umgebung nahezu vollständig eliminiert werden.

Auch die Adaption des Rohranlegethermometers an ein Prüfstreckenrohr, welches von einem Fluid durchströmt wird, besitzt Nachteile. Die Strömungsgeschwindigkeit, das Strömungsprofil sowie die thermischen Eigenschaften des

*Korrespondenzautor: Michael Pufke, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau, E-Mail: michael.pufke@tu-ilmenau.de

Thomas Fröhlich, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau, E-Mail: thomas.froehlich@tu-ilmenau.de

verwendeten Fluids und der Wärmeübergang vom Fluid zum Rohr beeinflussen den Temperaturgradienten von der Rohrachse hin zur Rohrwand erheblich.

Durch die Verwendung von Satttdampf als Medium in verschiedenen Prüfstreckenrohren mit äußerer Anbringung von Rohranlegethermometern werden vorgenannte Nachteile weitgehend kompensiert, da der Temperaturgradient im Rohrinneen bei dieser Variante auf ein Minimum reduziert und der Wärmeübergang auf die Rohrwand maximiert wird. Dies ermöglicht somit eine geeignete Anordnung zum reproduzierbaren Vergleich von Rohranlegethermometern.

2.2 Aufbau des Satttdampf-Prüfstandes

Basierend auf letztgenannter Variante wurde ein Prüfstand aufgebaut, welcher den Vergleich von Rohranlegethermometern im Mediumtemperaturbereich von ca. 100 °C bis 150 °C ermöglicht. Abb. 1 zeigt schematisch den grundlegenden Gesamtaufbau.

Abb. 1: Schema des Satttdampf-Prüfstandes.

Durch mehrere Satttdampf-abgänge wurden Messmöglichkeiten an verschiedenen Rohrdurchmessern (DN ½" bis DN 2") und Oberflächenrauigkeit geschaffen. Durch einen verfahrenbaren Lüfter kann zudem eine erzwungene Konvektion im Umfeld der Prüfstrecke erzeugt werden. Als Referenzthermometer für die Mediumtemperatur kommen, auf der Rohrachse liegende, dünne Pt100-Widerstandsthermometer mit einem sehr geringen Wärmeableitfehler zum Einsatz, welche sich sowohl im Zulauf als auch unmittelbar vor den einzelnen Prüfstreckenrohren befinden. Abb. 2 zeigt den praktisch realisierten Aufbau mit den wesentlichen Komponenten sowie 8 Prüfstrecken-abgängen.

Abb. 2: Realisierter Aufbau des Satttdampf-Prüfstandes.

2.3 Verifizierung

Um die Eignung der als Referenz für die Rohranlegethermometer dienenden Prüfstreckentemperatur nachweisen zu können wurde die Mediumssolltemperatur in etwa 10 K-Schritten zwischen 100 °C und 150 °C variiert. Zusätzlich wurden 3 bauartgleiche Rohranlegethermometer an ein DN ½" Prüfstreckenrohr mit metallblanker Oberfläche angeklemt. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, weisen die Zulauf- und Prüfstreckentemperatur sowohl einen nahezu identischen Verlauf als auch eine etwa gleiche Absoluttemperatur auf.

Abb. 3: Temperaturverlauf von Zulaufthermometer (T_{Zul}), Prüfstreckenthermometer ($T_{Prüf 1}$) und dreier identischer Rohranlegethermometer (T_{Ax}), metallblanker DN ½" Prüfstrecke 1.

Die Standardabweichung $s(T_{Prüf 1})$ für die Prüfstreckentemperatur liegt hierbei unter 0,050 K, so dass die Temperaturregelung als vergleichsweise stabil angesehen werden kann. Für wiederholte Messungen sowie mehrere geöffnete Prüfstrecken ergeben sich hierbei ähnliche Ergebnisse.

Von besonderem Interesse ist die Messunsicherheit der als Referenz fungierenden Satttdampf-temperatur. Durch Betrachtung der Einflussgrößen innerhalb der Messkette, wie u. a. die Einsatz- und Umgebungsbedingungen, die Messelektronik sowie die Kalibrierung der Referenzther-

meter kann eine erweiterte Gesamtmessunsicherheit U von max. 0,130 K ($k=2$) für die gemessene und korrigierte Mediumtemperatur $T_{\text{Prüf}}$ bestimmt werden.

3 Einflussfaktoren auf die Messung

3.1 Überblick

Insgesamt wurden 4 kommerziell erhältliche Rohranlegethermometer unterschiedlicher Hersteller und Bautypen (s. Abb. 4) nähergehend hinsichtlich verschiedener Einflussfaktoren auf ihre Temperaturmessung untersucht.

Abb. 4: Untersuchte Rohranlegethermometer, v. l. n. r.: Labom GA2610, Sonsonic TMPT100A, Wika TR57-M und E+H ZGT4.

Die Befestigungssysteme sind dabei auf einen Rohrdurchmesser von DN ½" angepasst. Soweit möglich, wurde die Sensorkennlinie der Rohranlegethermometer vor Beginn der nachfolgenden Messungen mit Hilfe einer Vergleichskalibrierung korrigiert.

Im Folgenden werden die, den einzelnen Bautypen (A, B, C und D) zugeordneten, Messabweichungen ($\Delta T_x = T_x - T_{\text{Prüf}}$) anonymisiert verglichen. Für die Thermometer B, C und D sehen die Hersteller die Verwendung von Wärmeleitpaste zur Ankopplung des Sensors an das Rohr vor. Hierzu wurde die gleiche Wärmeleitpaste (Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_K = 10 \text{ W/(mK)}$)) verwendet. Messungen mit A erfolgten, soweit nicht anders angegeben, ohne Wärmeleitpaste, da der Hersteller diese nicht vorsieht.

3.2 Reproduzierbarkeit durch Montage

Ein großer Vorteil von Rohranlegethermometern ist i. A. die leichte Montage bzw. Demontage an ein Rohr. Um den Einfluss durch die (De-) Montage auf das Messergebnis des Rohranlegethermometers besser ergründen zu können wurden 3 bauartgleiche Rohranlegethermometer A1-3 ausgewählt. Die wiederholte (De-) Monta-

ge erfolgte entsprechend der Herstellervorgaben an zwei DN ½" Prüfstrecken mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten (metallblank: $Ra \approx 0,3 \mu\text{m}$, glasperlengestrahlt: $Ra \approx 1,5 \mu\text{m}$) bei einer Mediumtemperatur $T_{\text{Prüf}}$ von ca. 150 °C. Wie aus Abb. 5 hervorgeht, zeigen sich zunächst deutliche Unterschiede zwischen den Messabweichungen ΔT_{Ax} ($= T_{Ax} - T_{\text{Prüf}}$) von A1 und A2-3. Hierbei weisen die Beträge der Messabweichungen $|\Delta T_{A2-3}|$ stets größere Werte als bei $|\Delta T_{A1}|$ auf. Durch weitergehende Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass trotz bauartgleicher Ausführung Thermometer A1 eine geringfügig andere Geometrie des Temperaturfühlers aufwies. Dies könnte somit eine Ursache für die deutlichen Unterschiede in den Messabweichungen sein.

Abb. 5: Reproduzierbarkeit durch (De-) Montage mit Messabweichung ΔT_{Ax} , Thermometer A1-3, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150 \text{ °C}$, kalt: Zwischenabkühlung mit $T_{\text{Prüf}} \approx T_{\text{Umg}}$, Gerade: Mittelwert.

Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit ist ein schlechterer Wärmetransport zwischen dem Sensor des Rohranlegethermometers und dem Rohr zu erwarten. Die Messungen zeigen jedoch, dass sich bei Montage am glasperlengestrahnten Rohr geringere Beträge der Messabweichungen $|\Delta T_{A1-3}|$ als am metallblanken Rohr ergeben.

Weiterhin konnte durch Messungen am glasperlengestrahnten Rohr festgestellt werden, dass bei (De-) Montage der Rohranlegethermometer im kalten Zustand (Rohrtemperatur entspricht ca. der Umgebungstemperatur) mit größeren Beträgen der Messabweichungen $|\Delta T_{A1-3}|$ zu rechnen ist. Mögliche Ursachen hierfür sind im Befestigungssystem des Rohranlegethermometers mit unterschiedlichen mechanischen Spannungen der Schraubverbindungen, Anpressfedern sowie verwendeten Materialien sowie deren Temperaturabhängigkeiten zu finden.

Bei Betrachtung der Mittelwerte der einzelnen Messabweichungen ΔT_x aller Rohranlegethermometer an unterschiedlichen Rohroberflächen (s. Tab. 1) fällt auf, dass am gebeizten Rohr ($Ra \approx 1,3 \mu\text{m}$, vergleichbar mit glasperlengestrahlttem Rohr) die Thermometer B1, C1, D1 und D2 deutlich geringere Beträge der Messabweichungen $|\Delta T_x|$ als A1-3 aufweisen.

Tab. 1: Mittelwerte der einzelnen Messabweichungen ΔT_x durch (De-) Montage aller Rohranlegethermometer gemäß Herstellervorgabe an unterschiedlichen Rohroberflächen, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$.

Rohroberfläche	MW(ΔT_x) in K für Rohranlegethermometer						
	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2
metallblank	-5,2	-9,7	-9,2				
glasperlen- gestrahlt	-4,0	-7,4	-8,8				
gebeizt				-2,9	-2,1	-3,3	-2,6

Durch Ermittlung der Standardabweichung s_x der einzelnen Messabweichungen (s. Tab. 2) ergibt sich für A1 am glasperlengestrahlt Rohr die kleinste Streuung ($s_{A1} = 0,1\text{ K}$), jedoch für A3 am metallblanken Rohr die größte Streuung ($s_{A3} = 1,1\text{ K}$).

Tab. 2: Standardabweichung s_x aller einzelnen Messabweichungen ΔT_x mit min. 10 (De-) Montagen durch den gleichen Anwender, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$.

Rohroberfläche	s_x in K für Rohranlegethermometer						
	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2
metallblank	0,2	0,5	1,1				
glasperlen- gestrahlt	0,1	0,5	0,5				
gebeizt				0,2	0,2	0,5	0,3

Schlussfolgernd zeigt sich, dass die Reproduzierbarkeit durch die (De-) Montage der Rohranlegethermometer unter vergleichsweise idealen Laborbedingungen starken Streuungen der Messabweichungen unterworfen ist. Für den realen Anwendungsfall sind zudem größere Streuungen durch bspw. Oberflächenbeschädigungen des Rohres, Anwenderfehler sowie der Rohrtemperatur bei der Montage zu erwarten.

3.3 Kontaktwiderstand

Der thermische Kontaktwiderstand zwischen Temperaturfühler und der Rohroberfläche ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, hierzu zählen neben den Oberflächenrauigkeiten der beiden Kontaktflächen, Passgenauigkeit etc. insbesondere auch die sich in den Zwischenräumen der Kontaktierung ausprägenden Luftspalte. Mittels der Rohranlegethermometer A1-3 wurde der Einfluss auf die Messabweichungen durch eine Wärmeleitpaste ($\lambda_K = 10\text{ W}/(\text{m K})$) sowie eine Wärmeleitfolie (Dicke: $70\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda_{Kx} = 15\text{ W}/(\text{m K})$) im Vergleich zur Anwendung ohne Kontaktierungsmaterial (gemäß Herstellervorgabe) untersucht. In Tab. 3 sind die entsprechenden Messab-

weichungen bei einer Mediumtemperatur von ca. 150°C dargestellt.

Tab. 3: Messabweichungen für die Thermometer A1-3 am metallblanken Prüfstreckenrohr ohne sowie mit Wärmeleitpaste/-folie, $T_{\text{Prüf}}$ konst. $\approx 150^\circ\text{C}$.

Wärmeleitpaste/-folie	ΔT_x in K für Rohranlegethermometer		
	A1	A2	A3
ohne	-5,2	-4,7	-4,8
Folie	-3,0	-2,8	-3,2
Paste	-2,5	-3,1	-2,5

Es zeigt sich, dass der Einfluss des thermischen Kontaktwiderstands eine signifikante Beeinflussung der erzielbaren Messabweichungen darstellt. Die Ergebnisse legen dar, dass z. T. eine Halbierung der Messabweichung mittels Wärmeleitpaste bzw. -folie möglich ist. Somit ist die Anwendung von Wärmeleitpaste bzw. -folie bei den hier untersuchten Rohranlegethermometern unabdingbar, selbst wenn dies vom Hersteller nicht gefordert ist.

3.4 Erzwungene Konvektion

In der Praxis kommt es häufig zu einer Konvektion im Umfeld eines Rohres mit angekoppeltem Rohranlegethermometer. Hierbei kann zwischen freier (durch z. B. die Raumbedingungen wie umgebende Rohre) und erzwungener (durch bspw. Lüfter in der Umgebung) Konvektion unterschieden werden. Um den Einfluss besser ergründen zu können wurde ein Lüfter so platziert, dass die Prüfstrecke (mit den angekoppelten Rohranlegethermometern) möglichst homogen querumströmt wurde. Abb. 6 stellt die Messabweichungen in Abhängigkeit von der im Vorfeld ermittelten Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Lüfter}}$ sowie unterschiedlichen Solltemperaturen des Mediums dar.

Abb. 6: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am gebeizten Prüfstreckenrohr in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit.

Für alle Thermometer zeigt sich mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit eine Erhöhung des Betrags der Messabweichung $|\Delta T_x|$. Bei gleichbleibender Strömungsgeschwindigkeit folgt zudem mit steigender Solltemperatur auch eine dem Betrag nach größere Messabweichung. Die mit der Strömungsgeschwindigkeit zunehmende Messabweichung ist einerseits zurückzuführen auf den größer werdenden Wärmestrom zwischen Rohranlegethermometer und Umgebung. Andererseits kann sich auch der Wärmeübergang zwischen der an das Rohranlegethermometer angrenzenden Rohrstücke gegenüber der Umgebung erhöhen. Dadurch bedingt kommt es zu einem zusätzlichen Wärmeabtransport von der Messstelle des Temperaturfühlers entlang der Rohrwand. Eine hohe Empfindlichkeit $\Delta(\Delta T_x)/\Delta v_{\text{Lüfter}}$ ergibt sich insbesondere bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten.

Zusammenfassend folgt, dass es bereits bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten in der Umgebung eines Rohranlegethermometers zu einem signifikanten Einfluss auf die Messabweichung kommen kann. Dieser Einfluss ist im praktischen Einsatz nicht zu unterschätzen und zudem schwierig im Vorfeld vorhersehbar.

3.5 Isolierung

Nachfolgend soll der Einfluss einer thermischen Isolierung auf die Messabweichungen der Rohranlegethermometer näher untersucht werden. Hierzu erfolgten Messungen mit einem hochtemperaturstabilen EPDM-Dämmstoff mit einer Stärke von 19 mm (Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{Iso}} \leq 0,038 \text{ W/(m K)}$) sowie einer Aluminiumkaschierung zur Befestigung. In Abb. 7 sind die Beträge der Messabweichungen für die Rohranlegethermometer in Abhängigkeit vom Betrag der Temperaturdifferenz zwischen Umgebung (T_{Umg}) und Medium ($T_{\text{Prüf}}$) dargestellt.

Abb. 7: Thermische Kopplung der Rohranlegethermometer am gebeizten Prüfstreckenrohr ohne sowie mit teilweiser (nur angrenzende Rohrstücke) und vollständiger Isolierung.

Hierbei wurden die folgenden 3 Fälle betrachtet: ohne Isolierung von Rohr und Rohranlegethermometer, Isolierung nur der an die Rohranlegethermometer angrenzenden Rohrstücke und vollständige Isolierung um Rohranlegethermometer sowie angrenzende Rohrstücke.

Für B1 ergeben sich für alle 3 Fälle ähnliche Messabweichungen. Dies ist ein Indiz dafür, dass der von der Rohrwand weiterführende Wärmestrom hin zur Umgebung vorzugsweise durch den gut wärmeleitenden Temperaturfühler erfolgt. Bei allen anderen Rohranlegethermometern kann eine deutliche Verringerung der Messabweichung bei vollständiger Isolierung erzielt werden.

Mittels Messungen mit vollständiger Isolierung sowie zusätzlicher erzwungener Konvektion durch den Lüfter des Prüfstandes ergibt sich im Vergleich zu Abb. 6 eine deutlich geringe Anfälligkeit der Messabweichungen auf eine äußere Konvektion (s. Abb. 8).

Abb. 8: Messabweichung ΔT_x von der Prüfstreckentemperatur am gebeizten Prüfstreckenrohr mit vollständiger Isolierung in Abhängigkeit von der Solltemperatur des Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit.

4 Zusammenfassung

Mittels den durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnten wesentliche Einflussgrößen bei der Messung mit Rohranlegethermometern gefunden werden. Dazu zählen insbesondere die Reproduzierbarkeit durch die Montage, der thermische Kontaktwiderstand zwischen Rohr und Thermometer sowie eine erzwungene Konvektion in der Umgebung. Mittels Isolierung von Rohr und Thermometer konnte z. T. eine Reduzierung von Einflussgrößen auf die Messung erreicht werden. Insgesamt zeigt sich, dass bei der Messung von Rohranlegethermometern eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Medium, Rohr, Thermometer mit Kontaktwiderstand und Umgebung, erforderlich ist.