

Untersuchung von Thermometern mittels eines neuartigen Prüfstands zur Bestimmung dynamischer Kennwerte

Marc Schalles¹, Joseph Beere¹ und Silke Augustin¹

¹Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland

Kontakt: marc.schalles@tu-ilmenau.de

Einleitung

Thermometer zur Überwachung, Steuerung oder Regelung der Prozesstemperatur werden in der Verfahrenstechnik in verschiedensten Medien wie strömenden Gasen, verschiedenen Ölen, Wasser bis hin zu Heißdampf und auch in verschiedenen Temperaturbereichen eingesetzt. In Abhängigkeit von den Mediumsbedingungen verändern sich die Wärmeübergangskoeffizienten beim Wärmeaustausch zwischen Medium und Thermometer. Als Folge dessen sind sowohl die statisch-thermischen Messabweichungen als auch die dynamischen Kennwerte dieser Thermometer neben ihrem Aufbau auch von den Mediumsbedingungen abhängig. Um schnell auf Änderungen der Mediumstemperatur reagieren zu können, ist es wichtig, die dynamischen Eigenschaften von Thermometern im Vorfeld des Einsatzes abzuschätzen. Das kann durch numerische Berechnungen erfolgen, die jedoch zum Teil sehr aufwändig oder auch zu ungenau sein können, wenn Mediumseigenschaften, Strömungsbedingungen oder geometrische Details der Messstelle nicht genau bekannt sind. Deshalb ist es meist genauer, die dynamischen Eigenschaften experimentell unter bekannten Bedingungen zu bestimmen.

Thermometer können sich in ihren Ausführungen sehr stark unterscheiden. Thermometer für Messungen in Gasen haben häufig freiliegende Sensoren, die mit einem Schaft fixiert sind (Abb.1, Bauform #1). Für Messungen in Flüssigkeiten oder Schüttgütern werden geschlossene Bauformen mit innenliegenden Sensoren verwendet (Abb.1, Bauformen #2, #3), die bei hohen mechanischen oder chemischen Belastungen zusätzlich in Schutzrohren eingebettet sein können.



Abb. 1: Abbildung von drei Ausführungen von Widerstandsthermometern,
oben – $d = 6\text{mm}$, durchbrochen (#1)
Mitte – $d = 6\text{mm}$ (#2)
unten – $d = 8\text{mm}$ (#3)

Wie eingangs erwähnt, hängen die dynamischen Eigenschaften von vielfältigen Faktoren ab. Je geschickter der innere Thermometeraufbau, je größer die Eintauchtiefe und je geringer die thermische Masse der gesamten Messstelle, umso schneller reagiert die Sensortemperatur auf Mediumtemperaturänderungen (s. Abb. 2). Zusätzlich dazu sind die dynamischen Eigenschaften aufgrund der Temperaturabhängigkeit der thermophysikalischen Stoffeigenschaften auch temperaturabhängig [1].



Abb. 2: Beispiele einer robusten Bauform großer thermischer Masse mit Schutzrohr und Flansch (links) und einer kompakten Bauform zur Messung in kleinen Rohnradien (rechts),
Quelle: endress.com

Stand der Technik bei der Bestimmung dynamischer Kennwerte

Die Kenntnis der dynamischen Eigenschaften von Thermometern ist immer dann relevant, wenn die Reaktionszeit des gemessenen Temperaturwerts einen Einfluss auf die Messaufgabe hat. Ein typisches Beispiel hier sind Temperaturmessstellen, die kritische Temperaturen in zeitlich schnell ändernden Prozessen überwachen und deren Messwert für Sicherheitsabschaltungen verwendet wird. Ebenso kann ein zu träges Ansprechen von Thermometern in Wärmetransportprozessen, bei denen die Temperatur des Wärmeträgermediums gemessen und daraus eine Wärmebilanz erstellt wird, zu fehlerhafter Bilanzierung und damit preislicher Abrechnung führen.

Die dynamischen Eigenschaften von Thermometern sind für Anwender schwer nachvollziehbar. So können beispielsweise Thermometer identischer äußerer Abmessungen sehr unterschiedliche dynamische Eigenschaften aufweisen. Um hier Transparenz zu schaffen, wurde in der

Norm DIN EN 60751 [2] eine verbindliche Bestimmung der dynamischen Eigenschaften im Rahmen einer Typprüfung von Widerstandsthermometern festgelegt. Die Prüfungen können entsprechend den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3522 erfolgen. In Blatt 1 der Richtlinie sind ausführlich die Grundlagen [3] und in Blatt 2 Experimentalaufbauten beschrieben [4].

Das Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau hat große Expertise in der Forschung und Entwicklung von Thermometern, Temperaturmess- und Kalibrierverfahren sowie der Modellierung thermischer Vorgänge. Deshalb wird am Institut seit langem auch zur der Bestimmung der dynamischen Eigenschaften von Thermometern, für deren experimentelle Untersuchung zwei Aufbauten zur Verfügung stehen, geforscht. Das Grundprinzip ist bei beiden Aufbauten identisch. Das zu untersuchende Thermometer wird auf eine stabile, bekannte Ausgangstemperatur T_{M1} eingestellt und zum Zeitpunkt $t = 0$ s in ein Medium anderer Temperatur T_{M2} gebracht. Die sich als Folge der schlagartigen Temperaturänderung einstellende Sprungantwort des Temperaturmesswerts $T_s(t)$ wird aufgezeichnet und ausgewertet (Abb. 3.). Als für das dynamische Verhalten des Thermometers charakteristische Werte werden die sogenannten Ansprechzeiten oder Zeitprozentkennwerte t_x bestimmt. Sie geben die Zeit, die bis zum Erreichen einer bestimmten relativen Änderung x des Thermometersignals zu seinem Endwert verstrichen ist, an.

$$t_x = t \left(\frac{T_s - T_{M2}}{T_{M1} - T_{M2}} = x \right)$$

$t_{0,5}$ beispielsweise, liegt nach 50 % der Temperaturänderung vor.

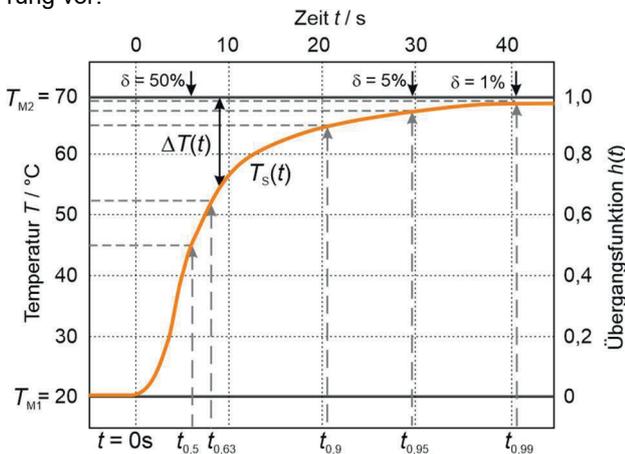


Abb. 3: Darstellung einer gemessenen Sprungantwort $h(t)$

Die erste Prüfeinrichtung ist ein Strömungskanal nach Lieneberg [5] mit dem Arbeitsmedium Luft. Er hat einen Durchmesser von 300 mm und eine Länge von ca. 4000 mm. Es können Strömungsgeschwindigkeiten von $v = 1 \dots 10$ m/s eingestellt werden (Abb.4). Das zu untersuchende Thermometer wird mittels eines abziehbaren Heizrohres auf T_{M1} gebracht, welches bei $t = 0$ s fallen gelassen wird. Dadurch wird das Thermometer dem Luftstrom ausgesetzt und sprungförmig auf Umgebungstemperatur

abgekühlt. Es sind Temperatursprünge von $T_{M1} \leq 200$ °C möglich.

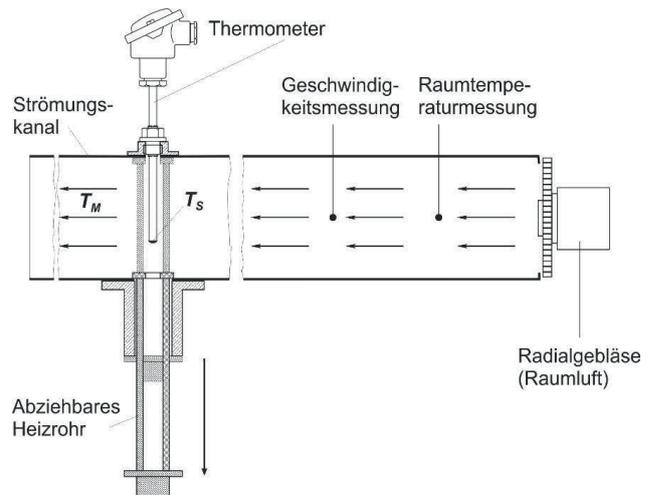


Abb. 4: Skizze des Strömungskanals zur Messung in Luft

Die zweite Prüfeinrichtung enthält ein rotierendes Becken mit dem Arbeitsmedium Wasser der Temperatur T_{M2} [6,7]. Das zu untersuchende Thermometer ist an einer Falleinrichtung montiert, mit der es schlagartig in das Wasserbecken eingetaucht werden und somit von Umgebungstemperatur $T_U = T_{M1}$ auf T_{M2} gebracht werden kann. Die Rotationsgeschwindigkeit des Beckens kann eingestellt werden, sodass das mit dem Becken mitbewegte Wasser Strömungsgeschwindigkeiten von $v = 0,02 \dots 0,4$ m/s relativ zu dem Thermometer erreicht. Es sind Temperatursprünge von Raumtemperatur zu $T_U \leq T_{M2} \leq 90$ °C möglich.

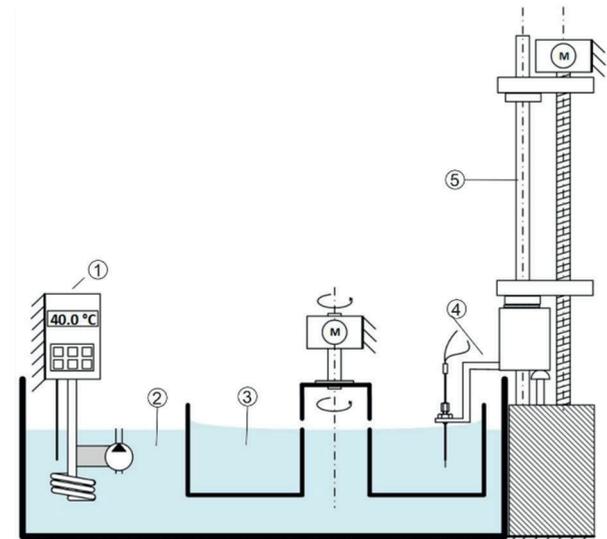


Abb. 5: Skizze der Prüfeinrichtung zur Messung in Wasser (1: Thermostat und Pumpe, 2: stationärer Wasserbehälter, 3: rotierendes Becken, 4: Halteeinrichtung mit Thermometer, 5: Falleinrichtung)

Mit beiden Prüfständen können die in [2] geforderten Prüfbedingungen von $v \geq 0,2$ m/s für Wasser und $v = 3$ m/s für

Luft sowie weitere realisiert werden. So ergeben sich beispielsweise für die in Abb. 1 gezeigten Thermometer die in Abb. 6 dargestellten Sprungantworten. Gut zu erkennen ist das sehr unterschiedliche Verhalten der Thermometerbauformen.

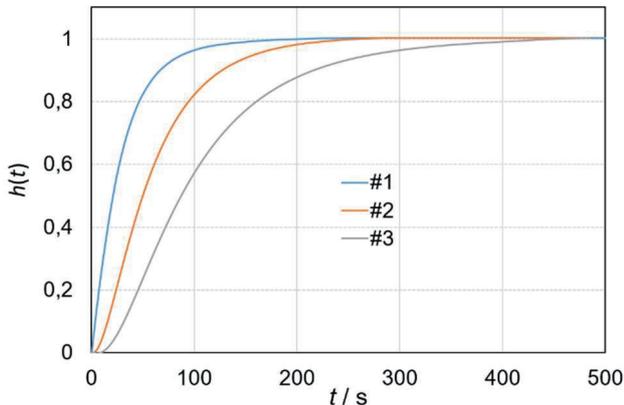


Abb. 6: Beispiele von Sprungantworten der drei Thermometer aus Abb. 1

Die Ergebnisse von Messungen des Thermometers #2 in beiden Prüfeinrichtungen zeigt beispielhaft Abb. 7. Hierin sind die ermittelten Zeitprozentkennwerte eines Thermometers über dem Wärmeübergangskoeffizienten aufgetragen. Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden den Strömungsbedingungen entsprechen nach [8] berechnet und sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

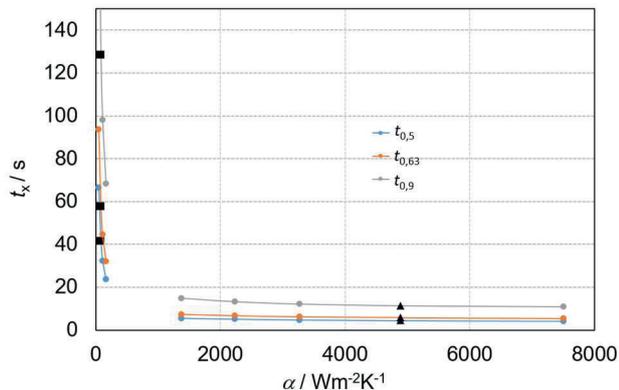


Abb. 7: Zeitprozentkennwerte des Thermometers #2 bei den in Tab. 1 aufgeführten Strömungsgeschwindigkeiten (Hervorgehoben sind Standardbedingungen nach [2]: schwarze Quadrate für $v_{\text{Luft}} = 3 \text{ m/s}$, schwarze Dreiecke für $v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2 \text{ m/s}$)

Es ist gut zu erkennen, dass die Zeitprozentkennwerte des Thermometers stark von den Strömungsbedingungen abhängen. So ändert sich beispielsweise $t_{0,5}$ um zwischen den beiden markierten Standardbedingungen um $\approx 90 \%$. Oberhalb von $\alpha = 2000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ändern sich die Zeitprozentkennwerte nur unwesentlich. Hier ist das Ansprechverhalten des Thermometers im Wesentlichen nur noch von seinem Aufbau, aber nicht mehr von den Mediumsbedingungen abhängig.

Tab. 1: Wärmeübergangskoeffizienten nach [4] bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen für ein Thermometer mit einem Außendurchmesser von 6 mm

Strömungsbedingung	Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Luft 25 °C $v = 1 \text{ m/s}$	44
Luft 25 °C $v = 3 \text{ m/s}$	81
Luft 25 °C $v = 5 \text{ m/s}$	108
Luft 25 °C $v = 10 \text{ m/s}$	161
Wasser, 50 °C, $v = 0,02 \text{ m/s}$	1374
Wasser, 50 °C, $v = 0,05 \text{ m/s}$	2229
Wasser, 50 °C, $v = 0,1 \text{ m/s}$	3268
Wasser, 50 °C, $v = 0,2 \text{ m/s}$	4888
Wasser, 50 °C, $v = 0,4 \text{ m/s}$	7496

Neuer Prüfstand zur Kennwertermittlung in Öl

In Abb. 7 ist gut zu erkennen, dass mit den existierenden Prüfständen ein Bereich von Wärmeübergangskoeffizienten nicht abgedeckt werden kann. Dieser Bereich ist aber äußerst relevant, da in ihm die Wärmeübergangskoeffizienten vieler technischer Prozesse, insbesondere mit Ölen oder hochviskosen Medien, liegen. Um hier ebenso Untersuchungen zu ermöglichen, wurde eine weitere Prüfeinrichtung mit strömendem Öl entwickelt und aufgebaut, die hier erstmals vorgestellt wird. Die Prüfeinrichtung kopiert die Einrichtung aus Abb. 5 und nutzt sogar die selbe Eintauchvorrichtung.

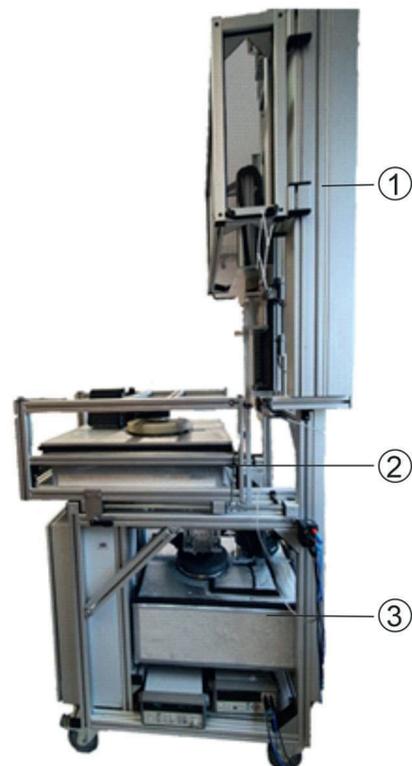


Abb. 8: Kombinierte Prüfeinrichtung zur Messung in Öl [9]

Zusätzlich zum bereits existierenden mit Wasser gefüllten Becken (2 in Abb. 7) wurde in die existierende Einrichtung ein mit Öl gefülltes Becken (3) integriert. Dieses befindet sich unterhalb des Wasserbeckens, welches nun verschiebbar gelagert ist. Dadurch ist es möglich dieselbe Halte- und Falleinrichtung (1) für Messungen in beiden Medien zu verwenden. Sie wurde dazu so modifiziert, dass die Fallhöhe in beiden Fällen identisch eingestellt werden kann. Beide Becken werden identisch angesteuert, sodass die gleichen Strömungsgeschwindigkeiten erreicht werden. Als Arbeitsmedium wurde das Silikonöl Wacker AK 10 ausgewählt. Mit diesem sind Wärmeübergangskoeffizienten erreichbar, die den gewünschten Bereich abdecken (Tab. 2).

Tab. 1: Wärmeübergangskoeffizienten nach [4] bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen für ein Thermometer mit einem Außendurchmesser von 6 mm

Strömungsbedingung	Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Wacker AK10, 50 °C $v = 0,05$ m/s	338
Wacker AK10, 50 °C $v = 0,1$ m/s	479
Wacker AK10, 50 °C $v = 0,2$ m/s	683
Wacker AK10, 50 °C $v = 0,4$ m/s	981

Dadurch ist es jetzt möglich, die dynamischen Kennwerte auch für den bisher fehlenden Wärmeübergangskoeffizientenbereich, der für viele technische Prozesse interessant ist, experimentell zu bestimmen.

Dies ist insbesondere wichtig, da in dem durch den Prüfstand mit Arbeitsmedium Öl abgedeckten Bereich von Wärmeübergangskoeffizienten eine starke Änderung des dynamischen Verhaltens stattfindet. Das ist im Verlauf der Zeitprozentkennwerte der Abb. 9 gut zu erkennen.

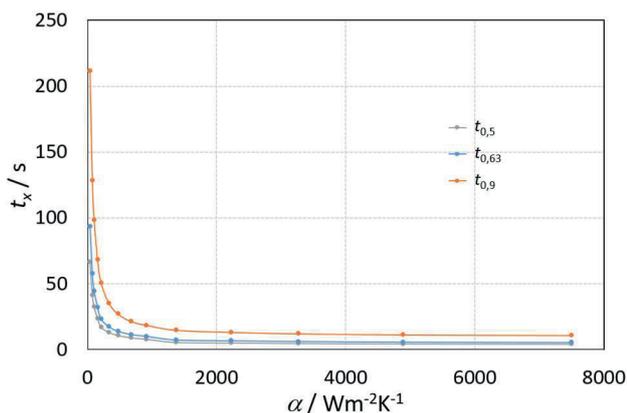


Abb. 9: Zeitprozentkennwerte des Thermometers #2 aus Abb.1 für den gesamten Bereich der Wärmeübergangskoeffizienten

Es ist offensichtlich, dass die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten bei den Standardbedingungen $v_{\text{Luft}} = 3$ m/s, und $v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2$ m/s nicht ausreicht, um das dynamische Verhalten von Thermometern vollständig zu

ermitteln oder aus den Werten auf andere Wärmeübergangsbedingungen zu schließen. Vielmehr ist es gerade für Prozesse, in denen die Wärmeübergangskoeffizienten im durch den neuen Prüfstand abgedeckten Bereich liegen, wichtig, das dynamische Verhalten speziell zu bestimmen.

Zusammenfassung

Die vorgestellte Prüfeinrichtung mit dem Arbeitsmedium Öl ergänzt die Möglichkeiten der Prüfstände zur Bestimmung der dynamischen Kennwerte von Berührungsthermometern an der TU Ilmenau. Mit allen Prüfständen ist jetzt erstmalig die kontinuierliche Bestimmung der dynamischen Kennwerte unter sehr reproduzierbaren Bedingungen in einem weiten Bereich von Wärmeübergangskoeffizienten von ca. $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ bis ca. $10.000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ je nach Thermometerbauform möglich. Die Abhängigkeit der dynamischen Kennwerte eines Thermometers oder von Thermometerschutzrohren von sehr verschiedenen Wärmeübergangsbedingungen kann damit experimentell dargestellt werden.

Den Anwendern wird erstmalig die Möglichkeit gegeben, das dynamische Verhalten von Thermometern für ihre spezielle Anwendung zu untersuchen und damit eine ihren Anforderungen an das dynamische Verhalten entsprechende geeignete Thermometerbauform auszuwählen bzw. verschiedene Thermometer miteinander zu vergleichen.

Literatur

- [1] FRÖHLICH, T.; AUGUSTIN, S.; AMENT, C.: Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors. In: *Int J Thermophys* (2015), Nr. 36(8), S. 2115–2123. doi: 10.1007/s10765-015-1869-4
- [2] DIN EN 60751 - Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren. Beuth, 2009
- [3] VDI/VDE 3522 Blatt 1 - Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern - Grundlagen und Kennwerte. Vdi-Verlag, 2014
- [4] VDI/VDE 3522 Blatt 2 - Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern – Experimentelle Bestimmung der Zeitprozentkennwerte. Vdi-Verlag, 2014
- [5] LIENEWEG, F.F. Lieneweg: Übergangsfunktion (Anzeigerverzögerung) von Thermometern – Aufnahmetechnik, Meßergebnisse, Auswertungen, *Archiv für Technisches Messen*, 1964, R46-R53
- [6] MAMMEN, H. et. al: Prüfeinrichtung zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Berührungsthermometern in Wasser, In: *Tagungsband TEMPERATUR 2017*, PTB Berlin, S. 163-168, 2017
- [7] AUGUSTIN, S.; FRÖHLICH, T.; SCHALLES, M., et. al: Bilateral comparison for determining the dynamic characteristic values of contact thermometers in fluids. In: *J. Sens. Syst.*, 2018, Nr. 7(1), S.331–337. doi: 10.5194/jsss-7-331-2018
- [8] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas, 8. Auflage*, Springer-Verlag, 1997
- [9] BEEREL, J.; HILPERT, C.: *Versuchseinrichtung zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Thermometern in Öl*, Technische Universität Ilmenau, Projektseminararbeit, 2021