Technische Universität Ilmenau
Fakultät Maschinenbau
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik

Anleitung zum Praktikum

Version 2020-08-05

PMS 12	–	Lichtwellenleiter	(K3050)
PMS 13	–	Oberflächentemperaturmessung	(K2021)
PMS 14	–	Strahlungsthermometer	(K3050)
PMS 15	**–**	**Statisch thermische Messabweichung industrieller Thermometer**	**(K3050)**
PMS 17	–	Temperaturfeldberechnung	(UniRZ)
PMS 16	–	Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern	(K2021)
PMS 18	–	Fixpunktkalibrierung im Raumtemperaturbereich	(K3050)
PMS 19	–	Sensordynamik	(K2023)
PMS 20	–	Digitale Filter	(K2023)
PMS 21	–	3D-Koordinatenmesstechnik	(WB0270)
PMS 22	–	Analysenmesstechnik	(K2021)

Versuch PMS 15
Statisch thermische Messabweichung industrieller Thermometer

1. Aufgabenstellung

In diesem Praktikumsversuch soll, mit Hilfe eines Wasser-Siedepunktgefäßes, welches das zu messende Medium und seine Temperatur simuliert, die thermische Messabweichung von industriellen Messfühlern ermittelt werden. Die Thermometer tauchen dabei in das Siedepunktgefäß ein und messen die Temperatur im Inneren.

Das Siedepunktgefäß (siehe Abb. 1) besteht aus einem äußeren und einem inneren Zylinder. Der äußere Zylinder ist doppelwandig (mit Evakuierungsstutzen) ausgeführt, oben mit einem Deckel („Thermometereinbauwand“) verschlossen und bis auf den Kondenswasserrücklaufanschluss in sich geschlossen. Der innere Zylinder ist oben offen und läuft im unteren Teil konisch in die Dampfableitung zum außenliegenden Intensivkühler aus. Durch die offene Verbindung zur Atmosphäre über den Intensivkühler wird ein Überdruck im Gefäß verhindert. Im unteren Teil des äußeren Zylinders siedet Wasser während der gesamten Messzeit. Der Wasserdampf steigt über den Ringquerschnitt auf zum eingebauten Thermometer, durchläuft den inneren Zylinder und wird im Kühler kondensiert. Aufgrund des Gegenstromes und der Kondensation des Wasserdampfes an kälteren Oberflächen entsteht eine homogene Temperaturverteilung im Innenraum. Die Messung kann erst beginnen, wenn der stationäre Zustand erreicht ist. Durch das gleichmäßige Sieden des Wassers wird dieser Zustand aufrechterhalten.

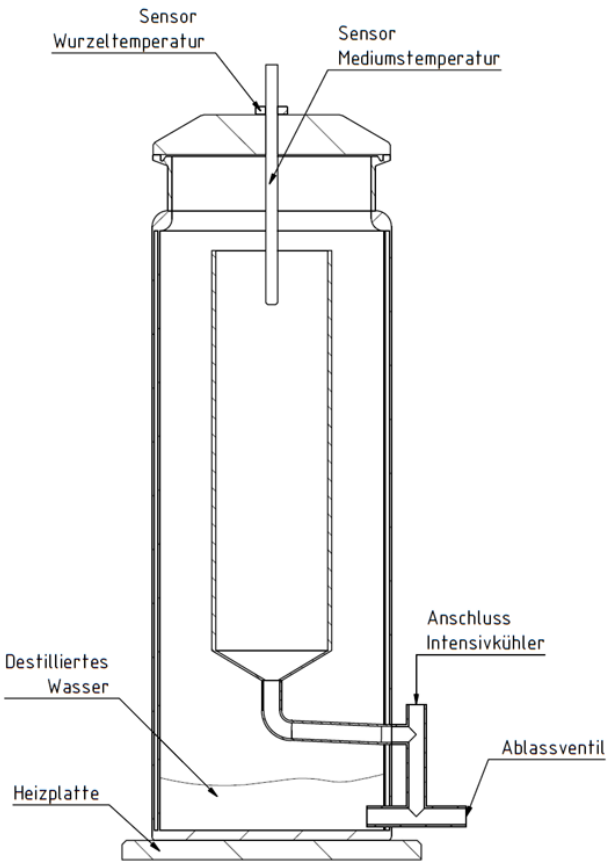


Abb. 1: Siedepunktgefäß

2. Versuchsvorbereitung

2.1 Benötigte Stoffkomplexe

- Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern:
  Messprinzip, Eigenschaften, Anschlussarten, Kennlinien, Grenzabweichungen
- Statisch thermische Messabweichung von Berührungsthermometer:
  Wärmeaustausch im Bereich des Thermometereinbaus, Wärmeableitfehler, Wärmekopplungsfaktor

2.2 Aufgaben zur Vorbereitung

2.2.1 Temperaturverlauf entlang eines Rohres

Der Temperaturverlauf $\vartheta(x)$ entlang eines zylindrischen Rohres ist in Abhängigkeit von dem Wärmeübergangskoeffizient α, der Wärmeleitfähigkeit λ und den geometrischen Daten zu bestimmen (siehe Abb. 2).

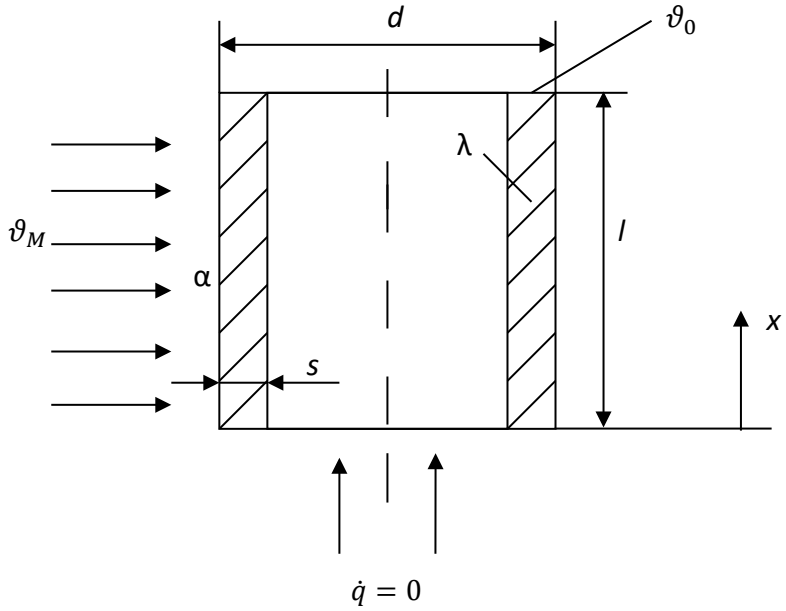


Abb. 2: Zylindrisches Rohr mit Bemaßungen

Der Temperaturverlauf entlang eines zylindrischen Rohres mit konvektivem Wärmeaustausch an der Umfangsfläche ist nicht konstant und kann mit Hilfe der folgenden Differential¬gleichung beschrieben werden:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} - m^2\vartheta = -m^2\vartheta_M$$

$$\text{mit } m^2 = \frac{\alpha * d}{\lambda * s * (d-s)}$$

Mit den Randbedingungen $\dot{q}(x = 0) = 0$ und $\vartheta(x = l) = \vartheta_0$ ergibt sich die spezielle Lösung:

$$\vartheta(x) = (\vartheta_0 - \vartheta_M) * \frac{\cosh mx}{\cosh ml} + \vartheta_M$$

Ermitteln Sie die Temperaturverläufe $\vartheta(x)$ bei den **Tauchlängen 20 mm, 30 mm und 60 mm** für die Anordnung **mit Schutzrohr** und bei der **Tauchlänge 60 mm** für die im Versuch eingesetzten **Temperaturfühler**:

- Schutzrohr ∅ 12 x 2,5 mm; 1.4571
- Fühler ∅ 6 x 0,5 mm; 1.4571
- Fühler ∅ 1 x 0,2 mm; 1.4571

Die Mediumstemperatur ϑ_M beträgt 98 °C und die Wurzeltemperatur ϑ_0 92 °C. Die Wärmeleitfähigkeit λ des Schutzrohrmaterials beträgt 15 W/m K. Der Wärmeübergangskoeffizient ergibt sich aus der Umströmung des Fühlers mit Wasserdampf und der Kondensation. Wählen Sie dabei 4 verschiedene α für Ihre Berechnungen aus (100, 500, 1.000 und 5.000 W/m² K). Stellen Sie auch die Temperaturverläufe vergleichend dar.
Welcher Wärmeübergangskoeffizient α ist im Siedepunktgefäß zu erwarten?

2.2.2 Berechnung der Siedetemperatur

Für die Berechnung der Siedetemperatur t_M wird eine korrigierte Formel der IPTS-48 verwendet:

$$t_M = 99{,}97352 + 28{,}012 * \left(\frac{p}{p_0} - 1\right) - 11{,}64 * \left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^2 + 7{,}1 * \left(\frac{p}{p_0} - 1\right)^3$$

Der Normaldruck p_0 beträgt 1013,25 hPa. Informieren Sie sich über die derzeitigen Standards zum Siedepunkt von Wasser bei Normaldruck und berechnen Sie die Siedetemperatur t_M („Mediumstemperatur“) mit Hilfe dieser Formel für 5 verschiedene Drücke zwischen 930 hPa und 970 hPa.
Stellen Sie die Empfindlichkeit der Siedetemperatur gegenüber Luftdruckänderungen in diesem Temperaturbereich dar.

2.2.3 Vorgehensweise zur Ermittlung von Messabweichung und Kopplungsfaktor

Beschreiben Sie die Vorgehensweise zur Berechnung der **Standardmessunsicherheit** aus experimentell aufgenommenen Messreihen (Mittelwert, Standardabweichung, Standardabweichung des Mittelwertes, GUM Typ A), der **kombinierten Messunsicherheit** und des **vollständigen Messergebnisses** der PC-gestützten **Temperaturmessung** mit den jeweiligen Temperaturfühlern und dem Auswertegerät (Berücksichtigung der Grenzabweichungen von Fühler und Auswertegerät, GUM Typ B) sowie bei einer **Kalibrierung** der Messkette (Temperaturfühler und Auswertegerät) und der Ermittlung des **Wärmekopplungsfaktors**.

Sie können, in Absprache mit dem Betreuer, die gesamte Versuchsvorbereitung über ein USB-Speichermedium auf den PC laden.

Tipp: Es wird empfohlen, für alle Berechnungen der Vorbereitungsaufgaben und auch für die Berechnungen während des Versuches, ein Tabellenkalkulationsprogramm zu verwenden. Neben Microsoft Excel 2010 steht auf dem Praktikums-PC die GUM Workbench 2.4 (siehe [8]) zur Nutzung bereit.

3. Versuchsaufbau

Das aus Glas gefertigtes Siedepunktgefäß ist mit einem Edelstahldeckel (inklusive Einschraubadapter für Schutzrohre und Messfühler) versehen und steht auf einer Heizplatte. In einem angeschlossenen Intensivkühler wird der Dampf aus dem Siedepunktgefäß abgekühlt und das Kondenswasser zurück in das Siedepunktgefäß geleitet. Der Intensivkühler ist an einen Durchlaufkühler angeschlossen, der das Kühlwasser bereitstellt. Abb. 3 stellt den Gesamtaufbau des Versuchs anschaulich dar.

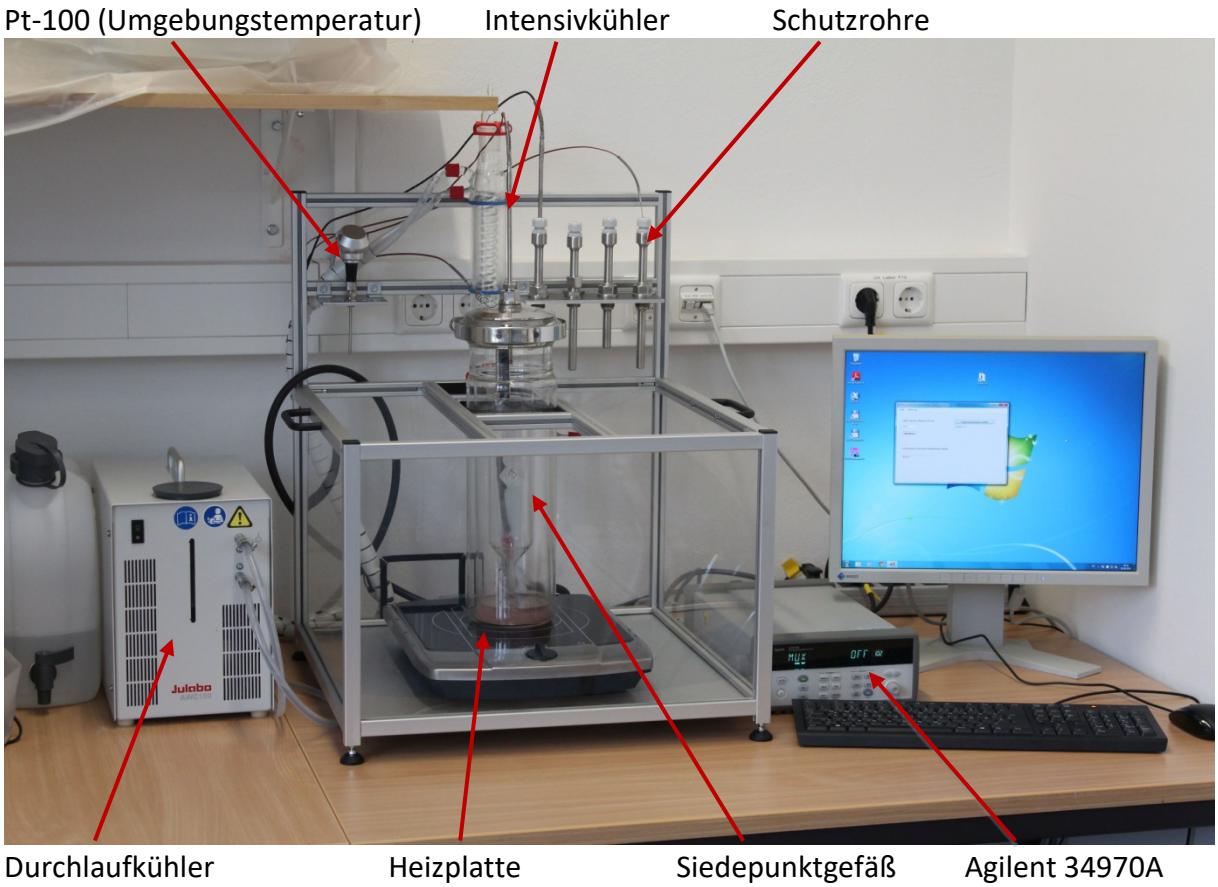


Abb. 3: Gesamtaufbau des Versuchs

Für die Messungen werden folgende Messfühler verwendet:

- Widerstandsthermometer **Pt 100 Klasse A** nach **DIN EN 60751** (siehe [3]), 4-Leiter-Schaltung, Durchmesser 6 mm, Länge 230 mm
- Mantelthermoelement (MTE) **Typ T Klasse 1** nach **DIN EN 60584** (siehe [2]), Durchmesser 6 mm, Länge 230 mm
- Abgesetztes Mantelthermoelement (aTE) **Typ T Klasse 1** nach **DIN EN 60584**, Durchmesser 0,6 mm
- Ringförmiges Thermoelement Typ T Klasse 1, Innendurchmesser 21,2 mm, Form eines Dichtringes nach DIN EN 60584 zur Messung der Wurzeltemperatur
- Variables Schutzrohr aus Edelstahl, Wanddicke 2,5 mm, Außendurchmesser 12 mm zur kombinierten Verwendung mit den beiden Messfühlern Durchmesser 6 mm
- Widerstandsthermometer Pt100 nach DIN EN 60751 zur Messung der Raumtemperatur

Die Aufnahme der Messungen erfolgt mit einem Multimeter Agilent 34970A [6] mit Messeinschub 34902A. Dieses Messgerät wird mittels eines PC-Messprogrammes angesteuert. Die Messwerte werden vom PC eingelesen und als *.csv-Datei abgespeichert.

4. Versuchsdurchführung

Sicherheitshinweise

 **Gefahr!**	Gefahr von Verbrühungen! An allen Elementen des Siedepunktgefäßes, des Intensivkühlers, der Heizplatte sowie Anbauten besteht Verbrühungsgefahr! Beim Wechsel der Verschraubungen, Thermometer bzw. Schutzrohre sind stets Hitzeschutzhandschuhe zu tragen! Diese liegen am Versuchsplatz bereit.

4.1 Vor dem Versuch

Der Versuch wird bereits 30 min vor Praktikumsbeginn mit der ersten Messkonfiguration (variables Schutzrohr auf Eintauchtiefe 20 mm mit Pt 100-Messeinsatz) durch den Betreuer in Betrieb genommen, d. h. elektrischer Durchlaufkühler (zur Kühlung des Kühlwassers für den Glas-Intensivkühler zur Wasserdampfkondensation), Heizplatte, Multimeter und PC sind eingeschaltet. Der elektrische Durchlaufkühler läuft auf Maximalleistung (Schalter auf der Geräterückseite ist entsprechend eingestellt).

Das Agilent-Messdatenerfassungssystem hat die folgende Kanalbelegung:

- Kanal 101: Pt100 Widerstands-Mantelthermometer zur Messung der Mediumstemperatur
- Kanal 102: Mantelthermoelement zur Messung der Mediumstemperatur
- Kanal 103: Ringförmiges Dichtscheiben-Thermoelement zur Bestimmung der Wurzeltemperatur
- Kanal 104: Abgesetztes Mantelthermoelement zur Messung der Mediumstemperatur
- Kanal 106: Pt100 Widerstands-Mantelthermometer zur Messung der Raumtemperatur

Die Kanäle werden durch das Messprogramm automatisch angewählt.

Wählen Sie bitte in dem auf dem PC-Desktop liegenden Ordner „**Praktikum SP 10**“ die Anwendung „**Praktikum statisch thermische Messabweichung**“ aus.
Auf der Startseite kann die theoretische Siedetemperatur, durch Eingabe des Luftdrucks in hPa, automatisch errechnet werden. Den Luftdruck können Sie im Praktikumsraum am Luftdrucksensor Comet System T7510 [7] ablesen oder über den entsprechenden Verweis auf dem PC-Desktop (Adrese: http://141.24.137.94/press.html) abrufen. Die Grenzabweichung dieser Luftdruckmessung beträgt **±1,3 hPa**. Aufgrund der Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Luftdruck ist es sinnvoll, vor dem Start jeder Messung den Luftdruck abzulesen und der Messreihe im Protokoll zuzuordnen.

In der oberen Menüleiste der Anwendung „**Praktikum statisch thermische Messabweichung**“ können die einzelnen Messprogramme

- Pt 100, 4-Leiter Messeinsatz Ø 6mm, schwarze Leitung
- Mantelthermoelement Messeinsatz Ø 6mm, braune Leitung
- Abgesetztes Thermoelement Messeinsatz Ø 1mm auf Ø 0,6mm, braune Leitung
- Pt 100, 2-Leiter Messeinsatz Ø 6mm, schwarze Leitung

für den Praktikumsversuch ausgewählt werden. Die Umschaltung von 4-Leiter- auf 2-Leiter-Betrieb erfolgt mit der Wahl des Messprogramms automatisch durch das Multimeter.
Nach Auswahl eines Messprogramms öffnet sich ein separates Fenster, in welchem die Messdauer, sowie das Messintervall eingestellt werden können. Üblicherweise können Sie die voreingestellten Werte Messdauer in Sekunden „**100**“ und Messintervall (in Sekunden) „**2**“ beibehalten. Durch Drücken des **„Start“**-Buttons wird die Messung gestartet. Der „Abbrechen“-Button bricht eine Messung unmittelbar ab. Zum Schließen kann der **„Beenden“**-Button nach Abbruch oder erfolgreicher Messung verwendet werden. Nachdem eine Messung erfolgreich beendet wurde, wird automatisch eine *.csv-Datei mit den gemessenen Werten im Ordner „**Praktikum SP 10**“ gespeichert.

Aus den Einzelmesswerten in der *.csv-Datei können Mittelwert, Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes der einzelnen Messreihen in Microsoft Excel berechnet werden.

4.2 Während des Versuchs

Die Heizplatte soll konstant bei der **Schalterstellung 8** betrieben werden, sofern der Betreuer bei der Einweisung keine andere Anweisung erteilt.

Bei zu geringem Wasserstand muss nachgefüllt werden. Bitte informieren Sie den Betreuer! Er füllt gegebenenfalls destilliertes Wasser über die Öffnung des Deckels des Siedepunktgefäßes nach. Bei einer normalen Versuchsdauer (etwa 4 Stunden) und nur kurzzeitiger Öffnung des Siedepunktgefäßes zum Thermometerwechsel sollte dies jedoch nicht der Fall sein. Der Wasserstand sollte sich etwa auf Höhe zwischen den zwei Röhrchen nach außen befinden (siehe untere Abb. 4).

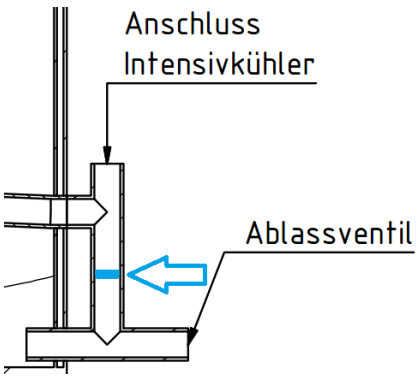


Abb. 4: Wasserfüllstandsanzeige

Der elektrische Durchlaufkühler darf die minimale Füllhöhe (unterer Strich am Füllstandsanzeigeröhrchen) nicht unterschreiten. Bitte informieren Sie den Betreuer, wenn ein Befüllen notwendig sein sollte! Achtung: Nur Leitungswasser einfüllen!

Schutzrohre, Buchse bzw. Verschraubungen werden mittels Maulschlüssel gelöst, aus- bzw. eingeschraubt und gespannt. Bitte ziehen Sie die Verschraubungen nur **mit einem geringen Drehmoment** an und halten Sie beim Anziehen der Stopfbuchsverschraubungen unten mit der entsprechend größeren Schlüsselweite gegen. Die benötigten Schlüssel SW 27, 24, 22 und 17 liegen am Versuchsplatz. Die Kunststoff-PG-Verschraubungen am offenen Ende der Schutzrohre bleiben gelöst und sollen nicht angezogen werden. Die 3 verwendeten Messfühler sollen bei Temperierung und Messung mit den freien Enden auf dem inneren Boden des Schutzrohres durch ihr Eigengewicht aufliegen.

Beim Wechsel von Schutzrohr und Buchse bzw. beim Fühlerwechsel an der Buchse besteht Verbrennungsgefahr aufgrund der heißen Teile und des aus der Öffnung austretenden Wasserdampfes. Benutzen Sie die bereitliegenden Handschuhe und arbeiten Sie umsichtig. Lassen Sie keine Metallteile auf Glasteile und Kochplatte fallen!

4.3 Aufgaben zur Versuchsdurchführung

Ermitteln Sie unter Beachtung der angegebenen Aufwärmzeiten die Sensortemperaturen ϑ_S für die verschiedenen Thermometer (Schutzrohr-Messfühler-Kombinationen und Messfühler ohne Schutzrohr) in dem Sie jeweils 100 s Messreihen im 2 s Messintervall aufnehmen.

4.3.1 Variables Schutzrohr

Führen Sie die Versuche 1 bis 9 durch und bestimmen Sie Mittelwert, Standardabweichung und Standardunsicherheit jeder Versuchsreihe:

Versuch	**Messfühler**	**Tauchlänge Messfühler im Schutzrohr**	**Schutzrohr**	**Tauchlänge Schutzrohr in mm**	**Aufwärmzeit in min**	**Messzeit in s** (Intervall: 2 s)
1	Pt100 4-Leiter	voll	variabel	20 (unterste Markierung)	bereits aufgewärmt	100
2	MTE	voll	variabel	20	6	100
3	aTE	voll	variabel	20	1	100
4	Pt100 4-Leiter	voll	variabel	30	10	100
5	MTE	voll	variabel	30	6	100
6	aTE	voll	variabel	30	1	100
7	Pt100 4-Leiter	voll	variabel	60	8	100
8	MTE	voll	variabel	60	6	100
9	aTE	voll	variabel	60	1	100

4.3.2 Ohne Schutzrohr

Führen Sie die Versuche 10 bis 21 durch und bestimmen Sie Mittelwert, Standardabweichung und Standardunsicherheit jeder Versuchsreihe:

Versuch	**Messfühler**	**Tauchlänge Messfühler in mm**	**Schutzrohr**	**Aufwärmzeit in min**	**Messzeit in s** (Intervall: 2 s)
10	MTE	20	ohne	5	100
11	MTE	30	ohne	3	100
12	MTE	60	ohne	2	100
13	MTE	120	ohne	1	100
14	Pt-100 2-Leiter	20	ohne	5	100
15	Pt-100 4-Leiter	20	ohne	0	100
16	Pt-100 2-Leiter	30	ohne	3	100
17	Pt-100 4-Leiter	30	ohne	0	100
18	Pt-100 2-Leiter	60	ohne	2	100
19	Pt-100 4-Leiter	60	ohne	0	100
20	Pt-100 2-Leiter	120	ohne	1	100
21	Pt-100 4-Leiter	120	ohne	0	100

5. Versuchsauswertung

5.1 Auswertung der Messungen mit variablem Schutzrohr

a) Stellen Sie für die Versuche 1 bis 9 die Sensortemperaturen ϑ_S der drei Messfühler in Abhängigkeit von der Tauchlänge des Schutzrohres 20 mm, 30 mm und 60 mm vergleichend dar. Vermerken Sie in der Darstellung die zugehörigen Mediumstemperaturen ϑ_M (Siedetemperaturen).

b) Ermitteln Sie die statisch thermische Messabweichung f_{stat} für die Versuche 1 bis 9:

$$f_{stat} = \vartheta_S - \vartheta_M$$

Berechnen Sie für die Versuche 1 bis 9 den Kopplungsfaktor B_U und geben Sie jeweils das vollständige Messergebnis an.

$$B_U = \frac{\vartheta_S - \vartheta_M}{\vartheta_U - \vartheta_M}$$

Stellen Sie die statisch thermische Messabweichung und den Kopplungsfaktor über der Tauchlänge 20 mm, 30 mm und 60 mm für alle Messfühler dar.

c) Bewerten Sie die Messergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagekraft. Welche Möglichkeiten gibt es, die Messunsicherheit zu verringern?

5.2 Auswertung der Messungen ohne Schutzrohr

a) Stellen Sie für die Versuche 10 bis 21 die Temperaturen des MTE und des Pt 100 (sowohl in 2-Leiter- als auch in 4-Leiter-Schaltung) in Abhängigkeit von der Tauchlänge 20 mm, 30 mm, 60 mm, 120 mm vergleichend dar. Vermerken Sie in der Darstellung die zugehörigen Mediumstemperaturen (Siedetemperaturen).

b) Bewerten Sie die Messergebnisse und die von der Tauchlänge abhängigen Temperaturunterschiede. Sind die Ergebnisse plausibel?

c) Welche Unterschiede ergeben sich im Gegensatz zur Messung mit Schutzrohr?

5.3 Bestimmung der Messabweichungen, -unsicherheiten und der Kopplungsfaktoren

Die **erweiterte Unsicherheit (k=2)** einer **Thermometerkalibrierung** auf Basis der Wassersiedetemperatur-Druck-Abhängigkeit wird mit **50 mK** angegeben [5].

a) Prüfen Sie, ob bei Ihren bisherigen Messungen ausreichend Druckkonstanz vorlag.

b) Ermitteln Sie mit den Daten für eine Tauchlänge von 60 mm (Versuche 12 und 19) die Messabweichungen e der gesamten Messkette, bestehend aus Multimeter und Messfühler MTE bzw. Pt 100 und die zugehörige Messunsicherheit.

$$e = \vartheta_{Mess} - \vartheta_{Medium}$$

c) Berechnen Sie für die Versuche 1, 2, 4, 5, 7 und 8 die Kopplungsfaktoren für die Tauchlängen 20 mm, 30 mm und 60 mm unter Beachtung der berechneten Messabweichung e und ihrer Messunsicherheit neu.

d) Vergleichen Sie die vollständigen Messergebnisse der Kopplungsfaktoren ohne und mit Kalibrierung der Messfühler.

e) Diskutieren Sie die Größe der Kopplungsfaktoren in Abhängigkeit von Messfühler und Tauchlänge. Ziehen Sie unter Nutzung der Vorbereitungsaufgabe 2.2.1 Schlussfolgerungen zu den tatsächlich an den Thermometern im Siedepunktgefäß wirkenden Wärmeübergangskoeffizienten bzw. für den Kopplungsfaktor unter ungünstigeren Wärmeaustauschbedingungen.

6. Literatur

[1] Bernhard, F. (Hrsg.): Handbuch der technischen Temperaturmessung. 2. Auflage, Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2014

[2] DIN EN 60584-1:2014-07 Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen

[3] DIN EN 60751:2009 Industrielle Platin-Widerstands-thermometer und Platin-Temperatursensoren

[4] Nau, M.: Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermo-metern. Fulda: Jumo, 2004 (Internet: www.jumo.de/de_DE/support/faq-weiterbildung/literatur/themen/temperaturmesstechnik/FAS146.html, Stand: 03.11.2016)

[5] NIST: Mercury Thermometer Alternatives: Verification Methods for Alternative Thermometers (Internet: www.nist.gov/pml/mercury_validation.cfm, Stand: 03.11.2016)

[6] Agilent Technologies Inc.: Agilent 34970A Meßdatenerfassungs-/Schaltsystem. Bedienungsanleitung, 2003

[7] Comet system s.r.o.: T7510 - Intelligent barometric pressure, humidity and temperature probe with Ethernet interface. Bedienungsanleitung
(Daten abrufbar unter: http://141.24.137.94/press.html)

[8] Metrodata GmbH: GUM Workbench Schulungsversion
(Software, kostenfrei verfügbar unter: www.metrodata.de/edu.html, Stand: 03.11.2016)