

Anleitung zum Praktikum

Version 2021-03-31

PMS 12	–	Lichtwellenleiter	(K3050)
PMS 13	–	Oberflächentemperaturmessung	(K2021)
PMS 14	–	Strahlungsthermometer	(K3050)
PMS 15	–	Statisch thermische Messabweichung industrieller Thermometer	(K3050)
PMS 16	–	Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern	(K2021)
PMS 17	–	Temperaturfeldberechnung	(UniRZ)

PMS 18	–	Fixpunktkalibrierung im Raumtemperaturbereich	(K3050)
---------------	---	--	----------------

PMS 19	–	Sensordynamik	(K2023)
PMS 20	–	Digitale Filter	(K2023)
PMS 21	–	3D-Koordinatenmesstechnik	(WB0270)
PMS 22	–	Analysenmesstechnik	(K2021)

Praktikumsanleitung

1. Aufgabenstellung

Das Praktikum beinhaltet die Kalibrierung von zwei Pt100 Widerstandsthermometern im Raumtemperaturbereich in Anlehnung an die ITS-90 am Eis- sowie Gallium-Fixpunkt (Abbildung 1). Anschließend wird der Eigenerwärmungskoeffizient dieser Thermometer in einem Luftströmungskanal (Abbildung 2) bestimmt und die Abhängigkeit der Messabweichung durch Eigenerwärmung vom konstruktiven Aufbau und den Wärmeübergangsbedingungen ermittelt.



Abbildung 1: Gesamtübersicht Praktikum Teil I (Kalibrierung)

1. Kalibrieren Sie die zwei zur Verfügung stehenden Widerstandsthermometer (Anhang 1) zunächst in einem Eis-Wasser-Gemisch und anschließend in einer Gallium-Fixpunktzelle. Die optisch identischen Widerstandsthermometer unterscheiden sich nur durch die verwendeten Sensoren. Die Kalibrierung ist nach einem vorgegebenen Messablaufplan durchzuführen, der sich an der DKD-Richtlinie 5-1 „Kalibrierung von Widerstandsthermometern“ orientiert. Leiten Sie aus den Messergebnissen den verwendeten Sensortyp (drahtgewickelter oder Flachmesswiderstand) ab und begründen Sie Ihre Aussage.
2. Die Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit sind anzugeben und ein Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung am Gallium-Fixpunkt ist aufzustellen.
3. Bestimmen Sie bei einem Messstrom $I = 40 \text{ mA}$ für die beiden Widerstandsthermometer die Abhängigkeit des Eigenerwärmungskoeffizienten von den Mediumsbedingungen. Dazu ist die Strömungsgeschwindigkeit im Luftkanal zu variieren (Anlage 2). Stellen Sie die durch die Eigenerwärmung entstehende Messabweichung in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit dar.



Abbildung 2: Luftkanal Praktikum Teil 2 (Eigenerwärmung)

2. Versuchsvorbereitung

2.1 Benötigte Stoffkomplexe

- Grundlagen der Temperaturmesstechnik: Einheiten, ITS-90, thermodynamische Temperaturskala, Wärmeaustausch, Wärmeübergang, Wärmeübergangskoeffizient
- Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern: Aufbau, Eigenschaften, Messprinzip, Kennlinien, Anschlussarten und Einflüsse von Zuleitungswiderständen, Zwei-, Drei-, und Vierleiterschaltungen, Brückenschaltung
- Kalibrierung von Widerstandsthermometern: Mögliche Verfahren, Anwendung von Fixpunkten, Kalibrierung von Fixpunkten nach DKD-R 5-1 „Kalibrierung von Widerstandsthermometern“, DKD-R 5-6 „Bestimmung von Thermometerkennlinien“
- Eigenerwärmung: Ursachen und Einflussfaktoren, Eigenerwärmungskoeffizient
- Messunsicherheitsberechnung nach GUM, Mittelwert, Standardabweichung, Standardunsicherheit

2.2 Vorbereitungsaufgaben

Aufgabe 1)

Bestimmen Sie die Temperatur eines Pt100 Widerstandsthermometers mit dem Nennwiderstand $R_0 = 100 \Omega$ und einem gemessenen Wert von $R(T) = 108,753 \Omega$. Nutzen Sie dazu folgende Formel mit den Standardkoeffizienten:

$$R(T) = R_0(1 + A * T + B * T^2)$$

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Aufgabe 2)

a) Mit Hilfe von Interpolationsverfahren können die Temperaturen nach der ITS-90 bestimmt werden. Bestimmen Sie die Abweichungsfunktion eines Pt100 nach der ITS-90. Dazu sind folgende Werte gegeben:

- $R(T_{\text{WTP}}) = 100,0083 \Omega$
- $R(T_{90, \text{Gallium}}) = 111,6314 \Omega$
- $W_r(T_{90}) = 1,11813889$

Literaturhinweis: Frank Bernhard, *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*

Hilfestellung:

$$W(T_{90, Ga}) = \frac{R(T_{90, Ga})}{R(T_{WTP})}$$

$$\Delta W(T_{90}) = W(T_{90, Ga}) - W_r(T_{90}) = a \cdot [W(T_{90, Ga}) - 1]$$

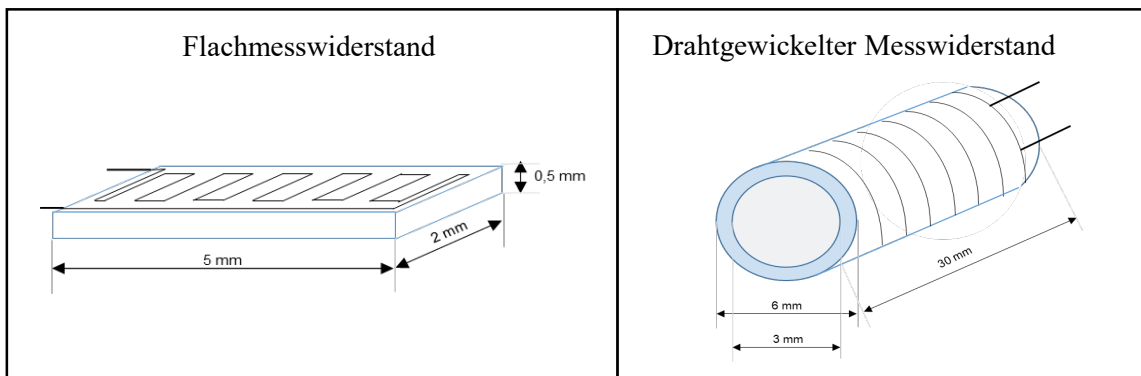
$$a = \frac{\Delta W(T_{90})}{[W(T_{90, Ga}) - 1]}$$

Aufgabe 3)

Wodurch wird die Messabweichung durch Eigenerwärmung verursacht, nennen Sie Einflussfaktoren.

Bestimmen Sie überschlägig die Übertemperatur (T_i) der beiden abgebildeten Sensoren bei Raumtemperatur mit Hilfe der in Tabelle 1 gegebenen Hinweise. Geben Sie das Ergebnis auf sechs Nachkommastellen an.

Vereinfachte Annahme: Kein Wärmeaustausch mit Umgebung



Leistung (Wärmestrom \dot{Q}): $P = U \cdot I, \quad P = R \cdot I^2$

Nennwiderstand: $R_0 = 100 \Omega$

Messstrom: $I = 1 \text{ mA}$

Raumtemperatur: $T_a = 23 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabelle 1: Angaben zur Bestimmung des Eigenerwärmungsfehlers

<u>Bezeichnung</u>	<u>Flachmesswiderstand</u>	<u>Drahtgewickelter Widerstand</u>
Wärmeleitung	$\dot{Q} = \frac{\lambda}{b} \cdot A \cdot (T_i - T_a)$	$\dot{Q} = \lambda \cdot 2\pi \cdot L \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot (T_i - T_a)$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_M = 10 \frac{W}{m \cdot K}$	$\lambda_M = 10 \frac{W}{m \cdot K}$
Länge	$L = 5 \text{ mm}$	$L = 30 \text{ mm}$
Breite/Außendurchmesser	$b = 2 \text{ mm}$	$r_a = 3 \text{ mm}$
Höhe/Innendurchmesser	$h = 0,5 \text{ mm}$	$r_i = 1,5 \text{ mm}$

3. Hinweise zur Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsaufbau

Für den ersten Teil des Praktikums sollen zwei Thermometer kalibriert werden. Hierzu muss der Anschluss mit der Messbox genutzt werden. Unabhängig von der Farbe des Messsteckers sind die roten Kabel immer auch an den roten Buchsen anzuschließen. Die Messbox wird an die Konstantstromquelle sowie an das Multimeter (hier ein Fühler an die Frontbuchsen, der andere hinten) angeschlossen. Mit der Taste „Front/Rear“ wird zwischen den Fühleranschlüssen umgeschaltet.

Im zweiten Teil wird die Messbox nicht benötigt. Hier sind die beiden kürzeren Widerstandsthermometer nacheinander an das Multimeter und die Konstantstromquelle anzuschließen.

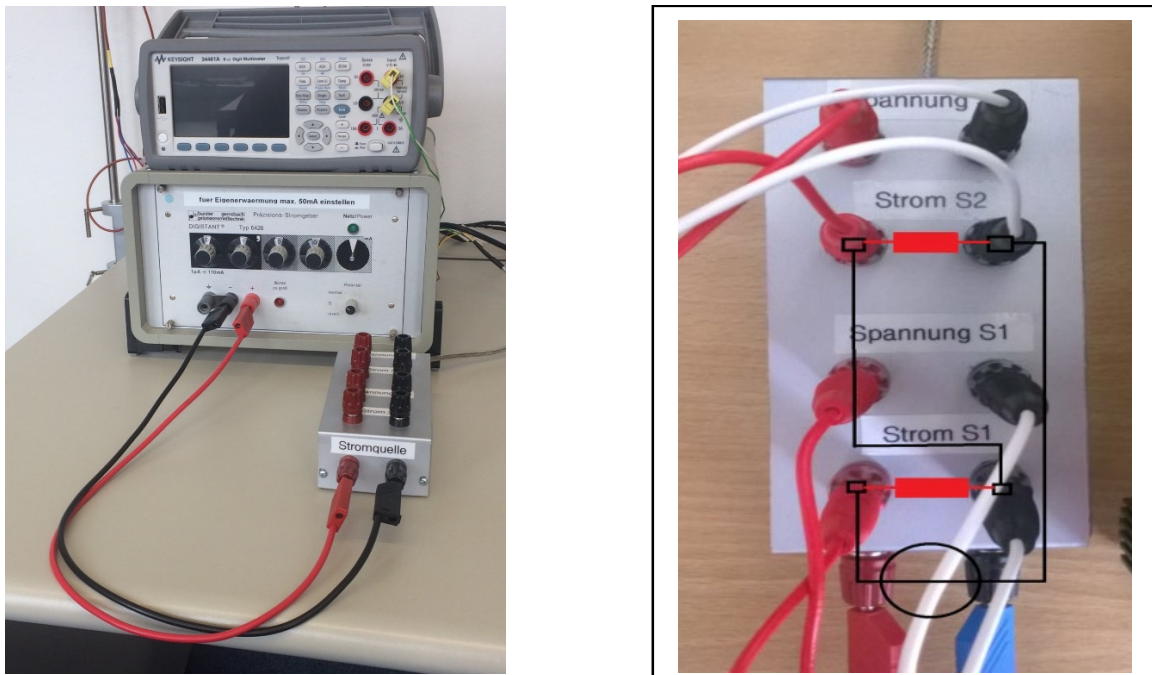


Abbildung 3: Anschluss Messbox

Am Versuchsplatz steht Folgendes zur Verfügung:

- Vier Widerstandsthermometer Pt100 Klasse A nach DIN EN 60751 (siehe Anhang 1)
- Präzisions-Stromgeber, Digistant Typ 6426
- Keysight Digit Multimeter 34461A (siehe Anhang 3)
- Eis-Wasser-Gemisch (als Ersatz für Wassertripelpunkt aufgrund einfacherer Handhabung)
- Gallium-Fixpunktzelle Modell 17401(siehe Anhang 4)
- Anschlussbox für zwei Widerstandsthermometer in 4-Leiter-Schaltung
- Excelvorlage Musterprotokoll zum Eintragen der Messwerte

3.2 Versuchsdurchführung

Teil 1: Kalibrierung

a) Schließen Sie die beiden langen Widerstandsthermometer an die Messbox an (Abbildung 3). Bestimmen Sie zunächst die Raumtemperatur mit jedem der beiden Thermometer. Stecken Sie das Thermometer mit der roten Markierung anschließend mittig in das Thermogefäß mit dem Eis-Wasser-Gemisch, sodass es sich ca. 2 cm entfernt vom Gefäßboden befindet. Bringen Sie danach das andere Thermometer (blaue Markierung) bis zum Boden in die Gallium-Fixpunktzelle. Durch Umschalten am Multimeter zwischen dem hinteren und vorderen Anschluss können die Messwerte beider Thermometer parallel aufgenommen werden.

Führen Sie die Messungen nach dem Messablaufplan (Tabelle 2) durch und wechseln Sie die Thermometer zur jeweils anderen Kalibriereinrichtung nach Abschluss der ersten Messreihe. **Ein direkter Wechsel vom Eis-Wasser-Gemisch in die Gallium-Fixpunktzelle ist unbedingt zu vermeiden.** Die Thermometer müssen zwingend zunächst ca. 10 Minuten bei Raumtemperatur temperiert werden.

b) Tragen Sie die Messwerte in die Excelvorlage ein. Der Mittelwert, die Standardabweichung und die Temperatur müssen selbstständig ermittelt werden (graue Felder). Bestimmen Sie die Faktoren, die in die Messunsicherheit der Kalibrierung eingehen und stellen Sie ein Messunsicherheitsbudget auf. Eine Hilfestellung zum Aufstellen des Messunsicherheitsbudgets ist im Anhang dieser Anleitung gegeben.

c) Führen Sie eine Extrapolation der Messwerte auf $I = 0$ mA Messstrom für das Eis-Wasser-Gemisch und die Gallium-Zelle durch.

d) Überlegen Sie anhand der ermittelten Ergebnisse, welches Thermometer den Flachmesswiderstand und welches den drahtgewickelten Messwiderstand besitzt und begründen Sie Ihre Entscheidung. Im Freitextfeld der Excelvorlage können Sie Anmerkungen und Auswertungen zu Ihrem Praktikum eintragen. Nach Abschluss der Kalibrierung sind die gemessenen Werte bei Raumtemperatur durch die in der zweiten Vorbereitungsaufgabe aufgestellte Abweichungsfunktion mit den Werten der Standardkennlinie zu vergleichen.

Tabelle 2: Messablaufplan Teil 1 - Kalibrierung

Messung Nr.	Thermometer	Medium	Messstrom [mA]	Messzeit [min]
1	Rot	Raumtemperatur	1	1
	Rot	Eis	1	8
	Rot	Eis	5	5
2	Blau	Raumtemperatur	1	1
	Blau	Gallium	1	10
	Blau	Gallium	5	5
3	Blau	Raumtemperatur	1	1
	Blau	Eis	1	8
	Blau	Eis	5	5
4	Rot	Raumtemperatur	1	1
	Rot	Gallium	1	10
	Rot	Gallium	5	5

Teil 2: Eigenerwärmung

a) Schließen Sie nun die beiden kürzeren Thermometer direkt an das Multimeter und die Konstantstromquelle an.

b) Messen Sie die Raumtemperatur bei einem Messstrom von $I = 1 \text{ mA}$ mit den beiden kürzeren Widerstandsthermometern. Stecken Sie diese dazu nacheinander durch das Loch der Schrauben-Vorrichtung bis kurz vor dessen blaue/rote Markierung in den Strömungskanal, wie in Abbildung 2 dargestellt. Fixieren Sie das Sensorkabel so, dass keine Abknickungen entstehen. Führen Sie nun die Messungen nach Messanleitung bei einem Messstrom von $I = 40 \text{ mA}$ durch. Variieren Sie dabei die Strömungsgeschwindigkeiten. Die Werte für die Einstellungen des Stelltransformators entnehmen Sie Anhang 2.

c) Tragen Sie Ihre Messwerte in die Excelvorlage ein und geben Sie an, welche Einflussfaktoren die Messabweichung durch Eigenerwärmung beeinflussen und wie diese Abweichung verringert werden kann.

Tabelle 3: Messablaufplan Teil 2 - Eigenerwärmung

Messung Nr.	Thermometer	Luftgeschwindigkeit [m/s]	Messstrom [mA]	Messzeit [min]
1	Blau	0	1	2
	Blau	0	40	8
	Blau	1	40	2
	Blau	2,5	40	2
	Blau	4	40	2
2	Rot	0	1	2
	Rot	0	40	5
	Rot	1	40	4
	Rot	2,5	40	4
	Rot	4	40	4

4. Aufgaben zur Versuchsdurchführung und Auswertung

Werten Sie Ihre Ergebnisse mit Hilfe der automatisch generierten Grafiken aus und reichen Sie Ihre Rechnungen zum Messunsicherheitsbudget bei Ihrem Betreuer ein. Dabei ist eine Auflistung der möglichen Einflussfaktoren auf die Abweichung durch Eigenerwärmung und den Erläuterungen zu den Maßnahmen zur Verringerung dieser Abweichung anzugeben.

5. Literatur

Bernhard, Frank. 2014. *Handbuch der Technischen Temperaturmesstechnik*. Ilmenau : Springer Vieweg, 2014. Bd. 2. Auflage. ISBN: 978-3-642-24505-3.

Deutsche Akkreditierungsstelle. 2010. *Kalibrierung von Widerstandsthermometern*. Berlin : 2010.

Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. 2008. *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008. DIN EN 60751.

Isotech North America. 2005. Gallium Apparatus. [Buchverf.] Isotech North America. *Gallium Handbook* . Colchester : s.n., 2005.

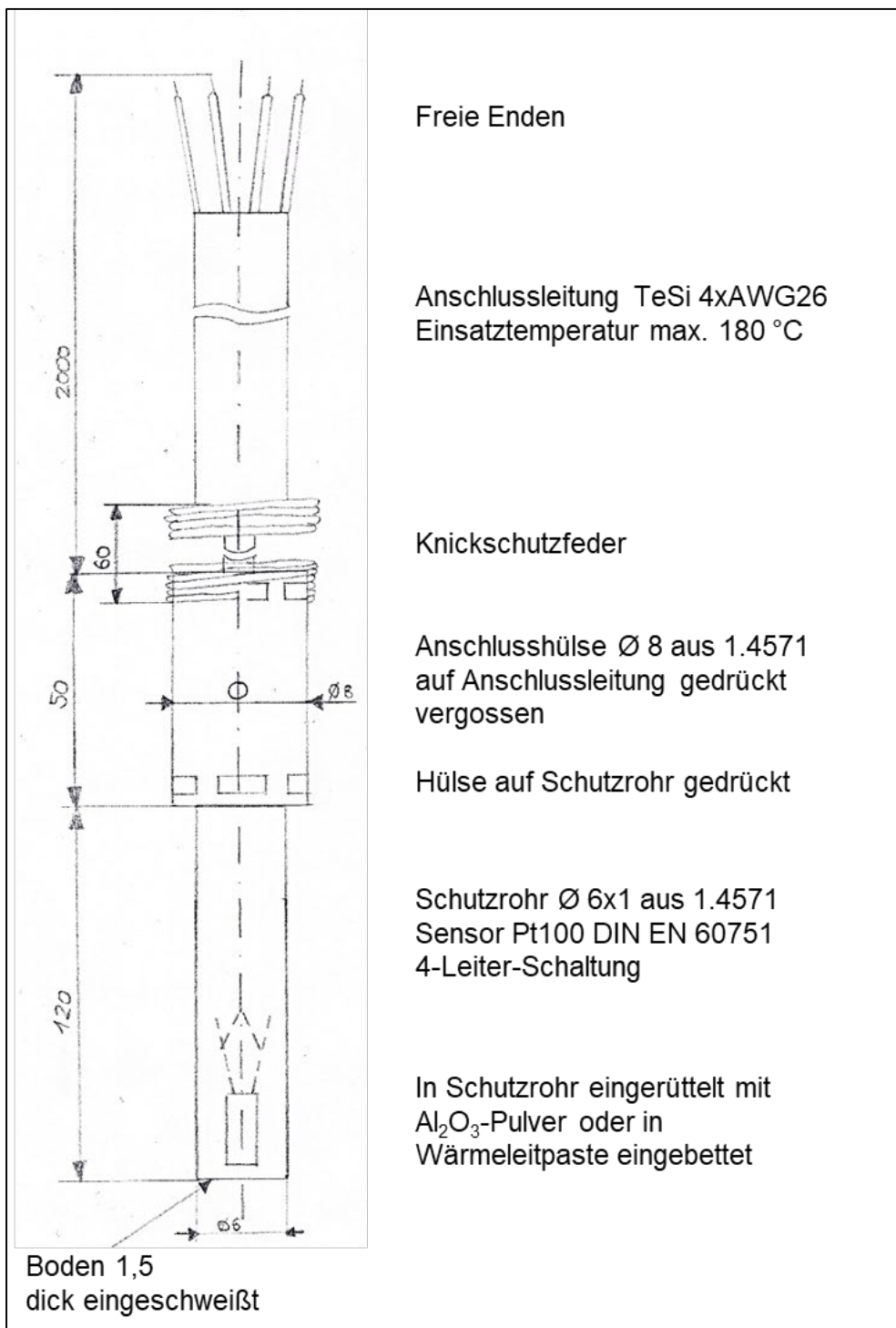
Keysight Technologies. 2018. Digital Multimeters Data Sheet. [Buchverf.] Keysight Technologies. USA : s.n., 2018.

von Böckh, Peter und Wetzel, Thomas. 2009. *Wärmeübertragung*. Muttentz : Springer, 2009. Bd. Dritte Auflage. ISBN 978-3-642-03042-0.

Anlagen

- Anhang 1: Aufbau Temperaturfühler
- Anhang 2: Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von der Trafospannung
- Anhang 3: Genauigkeitsspezifikationen des Multimeters 34461A
- Anhang 4: Datenblatt der Gallium-Fixpunktzelle
- Anhang 5: Angaben zum Messunsicherheitsbudget

Anhang 1: Aufbau Temperaturfühler



Flachmesswiderstand:

Sensor Klasse F0,15

Abmessung 0,5x2x5 mm

Mit Al₂O₃ Pulver eingerüttelt

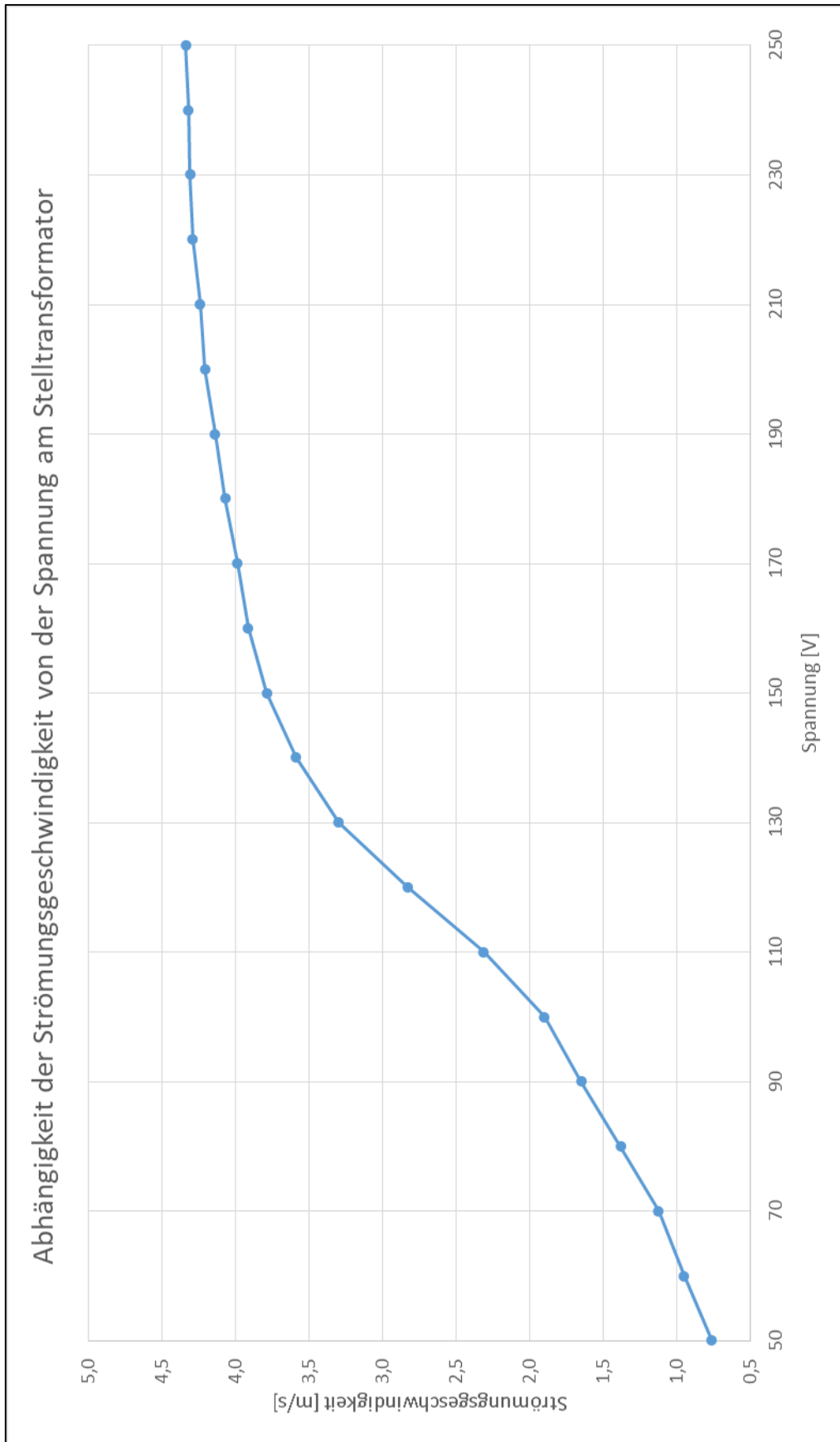
Rundgewickelter Widerstand:

Sensor Klasse W0,3

Abmessung Ø3X30 mm

In Wärmeleitpaste eingebettet

Anhang 2: Strömungsgeschwindigkeiten zur Trafospannung



Anhang 3: Genauigkeitsspezifikationen des Multimeters 34461A [KEY18]

10 | Keysight | Digital Multimeters 34460A, 34461A, 34465A (6½ digit), 34470A (7½ digit) - Data Sheet

Specifications 34461A

34461A accuracy specifications: \pm (% of reading + % of range) ¹.
 These specification are compliant to ISO/IEC 17025 for K = 2.



Range ² /frequency	24 hours ³ T _{CAL} ± 1 °C	90 days T _{CAL} ± 5 °C	1 year T _{CAL} ± 5 °C	2 years T _{CAL} ± 5 °C	Temperature coefficient/°C ⁴
DC voltage					
100 mV	0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0065 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
1 V	0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0055 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
10 V	0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0050 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
100 V	0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0060 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
1000 V	0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0060 + 0.0010	0.0005 + 0.0001
True RMS AC voltage ^{2,5,6}					
100 mV, 1 V, 10 V, 100 V, and 750 V ranges					
3 Hz to 5 Hz	1.00 - 0.02	1.00 + 0.03	1.00 - 0.03	1.00 + 0.03	0.100 + 0.003
5 Hz to 10 Hz	0.35 - 0.02	0.35 + 0.03	0.35 - 0.03	0.35 + 0.03	0.035 + 0.003
10 Hz to 20 kHz	0.04 - 0.02	0.05 + 0.03	0.06 - 0.03	0.07 + 0.03	0.005 + 0.003
20 kHz to 50 kHz	0.10 - 0.04	0.11 - 0.05	0.12 + 0.05	0.13 + 0.05	0.011 + 0.005
50 kHz to 100 kHz	0.55 - 0.08	0.60 + 0.08	0.60 - 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
100 kHz to 300 kHz	4.00 - 0.50	4.00 + 0.50	4.00 - 0.50	4.00 + 0.50	0.200 + 0.020
Resistance ⁷					
	Test current				
100 Ω	1 mA	0.0030 + 0.0030	0.008 + 0.004	0.010 - 0.004	0.0012 - 0.0004
1 kΩ	1 mA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 - 0.001	0.0012 - 0.0001
10 kΩ	100 μA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 - 0.001	0.0012 - 0.0001
100 kΩ	10 μA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 - 0.001	0.0012 - 0.0001
1 MΩ	5 μA	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 - 0.001	0.0010 - 0.0002
10 MΩ	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 - 0.001	0.0060 + 0.0004
100 MΩ	500 nA 10 MΩ	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 - 0.010	0.1500 - 0.0002
DC current					
	Burden voltage				
100 μA	< 0.011 V	0.010 + 0.020	0.040 + 0.025	0.050 + 0.025	0.060 + 0.025
1 mA	< 0.11 V	0.007 + 0.006	0.030 + 0.006	0.050 + 0.006	0.060 + 0.006
10 mA	< 0.05 V	0.007 + 0.020	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.060 + 0.020
100 mA	< 0.5 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.060 + 0.005
1 A	< 0.7 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.120 + 0.010
3 A	< 2.0 V	0.180 + 0.020	0.200 + 0.020	0.200 + 0.020	0.230 + 0.020
10 A ⁸	< 0.5 V	0.050 + 0.010	0.120 + 0.010	0.120 + 0.010	0.150 + 0.010
Capacitance ¹⁵					
1.0000 nF		0.50 - 0.50	0.50 + 0.50	0.50 - 0.50	0.05 - 0.05
10.000 nF		0.40 - 0.10	0.40 + 0.10	0.40 - 0.10	0.05 - 0.01
100.00 nF		0.40 - 0.10	0.40 + 0.10	0.40 - 0.10	0.05 - 0.01
1.0000 μF		0.40 + 0.10	0.40 + 0.10	0.40 - 0.10	0.05 - 0.01
10.000 μF		0.40 - 0.10	0.40 - 0.10	0.40 - 0.10	0.05 - 0.01
100.00 μF		0.40 - 0.10	0.40 + 0.10	0.40 + 0.10	0.05 - 0.01

Anhang 4: Datenblatt der Gallium-Fixpunktzelle [ISO05]

GALLIUM HANDBOOK
ISSUE 7 05/01

PRODUCT SPECIFICATIONS

**MODEL 17401 GALLIUM CELL AND MODEL 17402B
GALLIUM TEMPERATURE STANDARD**

Temperature (as defined by ITS-90) of the solid-liquid equilibrium of gallium at 1 standard atmosphere pressure is $29.7646^{\circ}\text{C} \pm 0.0002^{\circ}\text{C}$. It is expected that the uncertainty will be reduced by continuing investigation.

GALLIUM PURITY

7N+ (99.99999+%) (semiconductor grade)

CERTIFICATION

Each cell is accompanied by a certificate of traceability to the ITS-90. The certificate will state the mean and standard deviation of a number of measurements of the equilibrium temperature of the cell. Since this temperature is a constant of nature, recertification is normally never required. However some approval schemes require intercomparisons on a 4 yearly basis.

PLATEAU DURATION

Under the specified ambient conditions, not less than 12 hours (15 hours is typical).

CYCLE TIME

With the cell starting at 20°C , the time taken to reach the melt plateau in Model 17402B should not exceed 45 minutes and is typically 32 minutes. A panel lamp indicates when this condition has been reached. Time to recycle, including time to refreeze the cell, is typically 3 to 4 hours.

THERMOMETER WELL DIMENSION

The thermometer well will accommodate any thermometer with diameter less than 11.65mm (0.460"), requiring less than 230mm (9.0") of active stem immersion, and with total stem length not less than 370mm (14.5"). Such thermometers include Hewlett Packard Models 18111A and 18112A Quartz Crystal Thermometers and laboratory standard platinum resistance thermometers such as ITL Models 909 & 962.

POWER REQUIREMENTS

50 W maximum for 115VAC, 50-60 Hz or 230VAC, 50-60 Hz supplies.

AMBIENT TEMPERATURE LIMITS

Storage, -20 to $+55^{\circ}\text{C}$; operating, 15 to 28°C .

AMBIENT HUMIDITY UPPER LIMIT

70% RH.

Anhang 5: Angaben zum Messunsicherheitsbudget

Hilfestellung Messunsicherheitsbudget

Es ist für die Kalibrierung des Flachmesswiderstands an der Gallium-Fixpunktzelle ein Messunsicherheitsbudget aufzustellen. Die notwendigen Werte entnehmen Sie aus den Mittelwerten Ihrer Messdaten und aus den Datenblättern im Anhang.

In die Messunsicherheit der Kalibrierung fließen folgende Beiträge mit ein [angelehnt an BER14, S. 538-548, 689]:

- T_M Berechnete Temperatur aus dem gemessenen Widerstand des Sensors
- δT_{Wid} Unsicherheitsanteil der Widerstandsmessung, der sich aus den Unsicherheiten des Multimeters und der Konstantstromquelle berechnet
- δT_{Eig} Korrektur aufgrund der Eigenerwärmung des Thermometers
- δT_{WA} Korrektur aufgrund der Wärmeableitung des Thermometers
- δT_{Gal} Korrektur aufgrund von Unsicherheiten der Gallium-Fixpunktzelle

Weitere Angaben:

- δT_{Eig} Durch Aufstellen einer Geradengleichung der an den unterschiedlichen Messströmen gemessenen Werte ergibt sich eine Temperaturdifferenz, die die Unsicherheit des Mittelwerts darstellt.
- δT_{WA} Der Beitrag der Wärmeableitung ist mit $u(\delta T_{WA}) = 0,015$ K bereits gegeben.
- δT_{Gal} Angabe im Datenblatt
- δT_{Wid} Der Messunsicherheitsanteil ist mit der allgemeinen Modellgleichung nach GUM umzurechnen

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\left(\frac{\delta Y}{\delta X_1} \right)_{X_1, \dots, x} * u(X_1) \right)^2 + \dots + \left(\left(\frac{\delta Y}{\delta X_n} \right)_{X_1, \dots, x} * u(X_n) \right)^2}$$

Dabei sind folgende Daten gegeben:

- δT_{KSQ} Beitrag der Konstantstromquelle $u(\delta T_{KSQ}) = 0,1 \mu A$ bei $I = 1$ mA bzw. $u(\delta T_{KSQ}) = 0,5 \mu A$ bei $I = 5$ mA (vereinfachend ansetzen mit $k = 1$)
- δT_{MM} Beitrag des Multimeters nach Datenblatt, Angaben für ein Jahr verwenden
- c_r Empfindlichkeit des Pt100 am Ga-Erstarrungspunkt mit $\approx 2,583$ K/ Ω