

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Richtlinie
DKD-R 5-1**

Kalibrierung von
Widerstandsthermometern

Ausgabe 11/2023

<https://doi.org/10.7795/550.20231130>



	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	2 / 56

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: 0531 592-8021

Internet: <https://www.ptb.de/cms/metrologische-dienstleistungen/dkd.html>

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	3 / 56

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

*Richtlinie DKD-R 5-1 Kalibrierung von Widerstandsthermometern, Ausgabe 11/2023, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.
DOI: 10.7795/550.20231130*

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Augustin, Silke; TU Ilmenau, Ilmenau
 Bünger, Lars; PTB Berlin
 Friederici, Sven; PTB Berlin
 Hager, Helmut; Techmetrics GmbH, Winnenden
 Mammen, Helge; Ilmenau
 Reinshaus, Peter; Wehr
 Rudtsch, Steffen; PTB Berlin
 Tegeler, Erich; Berlin
 Trageser, Peter; Hasselroth

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Temperatur und Feuchte* des DKD.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	4 / 56

Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert. Außerdem kann durch die Umsetzung der Richtlinien der Stand der Technik auf dem jeweiligen Gebiet in die Laborpraxis Eingang finden.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Kalibrierungen der akkreditierten Laboratorien geben dem Anwender Sicherheit für die Verlässlichkeit von Messergebnissen, erhöhen das Vertrauen der Kunden und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem nationalen und internationalen Markt und dienen als messtechnische Grundlage für die Mess- und Prüfmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Die Richtlinie DKD-R 5-1 wurde vom Fachausschuss *Temperatur und Feuchte* in Zusammenarbeit mit der PTB und den akkreditierten Kalibrierlaboratorien erstellt. Die erste Ausgabe erschien 1992 und wurde seitdem mehrmals überarbeitet. Ausgabe 11/2023 ersetzt alle bisherigen Ausgaben.

Die bisherige Ausgabe 09/2018 der DKD-R 5-1 darf noch bis zum 30. November 2026 angewendet werden.

Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen des Fachausschusses *Temperatur und Feuchte* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	5 / 56

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	7
2	Einleitung	8
3	Widerstandsthermometer	8
3.1	Metall-Widerstandsthermometer	8
3.1.1	Normal-Platinwiderstandsthermometer (SPRT).....	8
3.1.2	Industrielle Platin-Widerstandsthermometer (IPRT).....	9
3.1.3	Sonstige Widerstandsthermometer	9
3.2	Halbleiter-Widerstandsthermometer	9
4	Grundlage der Kalibrierung von Widerstandsthermometern	10
5	Transport und Eingangsuntersuchung.....	10
6	Stabilitätsuntersuchung	11
7	Temperiereinrichtung	12
8	Einflussfaktoren.....	13
8.1	Kurzzeitverhalten während des Zeitraums der Kalibrierung	13
8.2	Langzeitverhalten aufgrund thermischer Belastung (Drift)	13
8.3	Thermische Ankopplung	13
8.4	Elektrische Messverfahren	14
8.5	Anschlusstechnik.....	14
8.5.1	Zweileiter-Schaltung.....	14
8.5.2	Dreileiter-Schaltung.....	15
8.5.3	Vierleiter-Schaltung.....	15
8.6	EMV Einflüsse	15
8.7	Parasitäre Thermospannung	16
8.8	Eigenerwärmung	16
8.9	Isolationswiderstand	17
8.10	Hysterese.....	18
9	Anforderungen an Bezugsnormale und Messeinrichtungen.....	22
10	Ergebnisse.....	23
11	Literaturverzeichnis.....	24
	Anhang A – Messunsicherheitsbilanzen – Beispiele.....	25
	A.1: Kalibrierung eines Widerstandsthermometers mit einer Messbrücke	26
	Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Ölbad:.....	26
	Schritt 2: Kalibrierergebnis	32
	A.2: Kalibrierung eines IPRT in einem Blockkalibrator	36
	Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator	36
	Schritt 2: Kalibrierergebnis	40

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	6 / 56

A.3: Kalibrierung eines Digitalthermometers im Blockkalibrator	47
Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator	47
Schritt 2: Kalibrierergebnis	47
A.4: Kalibrierung eines Transmitters mit Widerstandsensor	50
Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator	50
Schritt 2: Kalibrierergebnis	50
Anhang B – Messunsicherheiten bei Messungen mit einem Widerstandsthermometer	55

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	7 / 56

1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Richtlinie wurde erstellt, um die technischen Anforderungen festzulegen, die für die Kalibrierung von Widerstandsthermometern in akkreditierten Kalibrierlaboratorien erforderlich sind. Da sich gezeigt hat, dass in vielen Fällen der Hysterese-Effekt den größten Beitrag zur Messunsicherheit liefert, wird dieser ausführlicher behandelt. Es wird auf weiterführende Literatur bzw. auf übergeordnete Dokumente verwiesen.

Diese Richtlinie umfasst insbesondere die Kalibrierung von:

- Normal-Platin-Widerstandsthermometern (SPRT, Standard Platinum Resistance Thermometer; Temperaturbereich: $-189,3442\text{ °C}$ bis $961,78\text{ °C}$) [1], [2]
- Industriellen Platin-Widerstandsthermometern gemäß DIN EN 60751 im Temperaturbereich von -200 °C bis 850 °C [3]
- Widerstandsthermometer aus anderen metallischen Leitern (bspw. Cu, Ni) [4]
- Halbleiter-Widerstandsthermometern (Thermistoren: NTC, PTC) [5], [6]

Darüber hinaus ist die Richtlinie sinngemäß anwendbar auf:

- direktanzeigende elektronische Thermometer mit Widerstandssensor
- elektronische Thermometer mit Widerstandssensor und digitaler Schnittstelle
- Datenlogger mit einem Widerstandssensor
- Widerstandsthermometer mit Messumformer und analogem Ausgangssignal

Für Fixpunktkalibrierungen von Normal-Platin-Widerstandsthermometern (SPRT), welche die Anforderungen an Interpolationsinstrumente der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90) erfüllen, gelten übergeordnete Richtlinien [1], [2]. Diese werden vom Consultative Committee for Thermometry (CCT) erarbeitet und aktualisiert. Es ist möglich, Normal-Platin-Widerstandsthermometern auch mit dem hier beschriebenen Vergleichsverfahren zu kalibrieren. Der Anwender sollte jedoch beachten, dass mit der Kalibrierung an den definierenden Fixpunkten der ITS-90 wesentlich geringere Messunsicherheiten erreicht werden können.

Die Ergebnisse einer Kalibrierung gelten nur innerhalb des Kalibrierbereichs zwischen der maximalen und minimalen Kalibriertemperatur. Es ist lediglich eine Ausnahme im Temperaturbereich von circa $77,3\text{ K}$ bis $83,8058\text{ K}$ zulässig. Wenn ein ITS-90-konformes Normalthermometer im Bereich zwischen dem Wassertripelpunkt ($273,16\text{ K}$) und dem Argon-Tripelpunkt ($83,8058\text{ K}$) kalibriert worden ist, darf die Kalibrierfunktion bis ca. $77,3\text{ K}$ (Siedepunkt von Stickstoff) extrapoliert werden. Die Messunsicherheit ist für den extrapolierten Bereich entsprechend zu erhöhen, siehe dazu [7].

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	8 / 56

2 Einleitung

Das Funktionsprinzip von Berührungsthermometern beruht darauf, dass ein Sensor durch thermischen Kontakt auf die Temperatur des Messobjektes gebracht wird und dann die Temperatur des Sensors durch Messung einer anderen Größe (Ausdehnung, elektrischer Widerstand usw.), die eine stetige und monotone Abhängigkeit von der Temperatur zeigt, bestimmt wird.

In der Praxis entsteht die größte Messabweichung bei einer Temperaturmessung häufig dadurch, dass die Sensortemperatur nicht mit der Temperatur des Messobjektes übereinstimmt. Ein Berührungsthermometer misst grundsätzlich „nur“ seine eigene Temperatur. Unter der Kalibrierung eines Berührungsthermometers versteht man die messtechnische Bestimmung des Zusammenhanges zwischen der Temperatur des Sensors und der Ausgangsgröße des Thermometers. In der praktischen Anwendung des Thermometers hat der Anwender sicherzustellen, dass die Temperatur des Sensors der zu messenden Temperatur entspricht. Messunsicherheiten aufgrund mangelnder thermischer Ankopplung beim Anwender sind nicht in der Messunsicherheit der Kalibrierung des Thermometers enthalten. Der Kalibrierschein muss jedoch alle relevanten Informationen enthalten, die ein Anwender benötigt, um mit vergleichbarem Equipment die Kalibrierung vollständig nachvollziehen und vergleichbare Messunsicherheiten erreichen zu können.

3 Widerstandsthermometer

Die Wirkungsweise von Widerstandsthermometern beruht darauf, dass der elektrische Widerstand von metallischen Leitern und Halbleitern temperaturabhängig ist ($R(t)$). Damit wird die Temperaturmessung auf die Messung eines elektrischen Widerstandes zurückgeführt ($t(R)$). In der Praxis (ohne Berücksichtigung des Tieftemperaturbereiches unterhalb von -200 °C) werden überwiegend nachfolgende Materialien als Widerstandssensoren verwendet.

3.1 Metall-Widerstandsthermometer

Metalle sind physikalisch dadurch gekennzeichnet, dass frei bewegliche Elektronen als Leiter des elektrischen Stromes vorhanden sind. Die Bewegung der Elektronen wird durch Stöße mit und Streuung an den Phononen, den Quanten der Wärmeschwingung, behindert. Da die Zahl der Phononen mit zunehmender Temperatur zunimmt, nimmt auch der spezifische Widerstand von Metallen mit der Temperatur zu.

Unter den Metallen wird heute nahezu ausschließlich Platin als Material für Widerstandsthermometer eingesetzt. Hier werden nachfolgende Typen unterschieden.

3.1.1 Normal-Platinwiderstandsthermometer (SPRT)

Die Abkürzung SPRT für die englische Bezeichnung „Standard Platinum Resistance Thermometer“ ist auch im Deutschen üblich. Die Thermometer bestehen aus hochreinem Platindraht, der in geeigneter Weise so fixiert wird, dass er im gesamten Temperaturbereich frei von mechanischen Spannungen ist. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass mit SPRTs die genauesten und reproduzierbarsten Temperaturmessungen über einen weiten Temperaturbereich möglich sind. Somit ist das SPRT als Interpolationsinstrument zwischen den Fixpunkten der ITS-90 im Temperaturbereich von $13,8033\text{ K}$ ($-259,3467\text{ °C}$) bis $1234,93\text{ K}$ ($961,78\text{ °C}$) wesentlicher Bestandteil der ITS-90. Elektrisch zeichnen sich diese Thermometer durch einen besonders großen Temperaturkoeffizienten aus, ausgedrückt in der Forderung der ITS-90 nach $R(29,7646\text{ °C}) / R(0,01\text{ °C}) > 1,118\ 07$. In der Praxis werden sie jedoch nur selten eingesetzt, da sie nur in bestimmten Bauformen hergestellt werden können und unter mechanischen Belastungen (bspw. Vibrationen und Stöße) nicht sehr stabil sind.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	9 / 56

3.1.2 Industrielle Platin-Widerstandsthermometer (IPRT)

Die Abkürzung IPRT für die englische Bezeichnung „Industrial Platinum Resistance Thermometer“ ist ebenfalls im deutschen Sprachraum üblich. Die Thermometer benutzen als Sensormaterial Platin, das in geringem Umfang andere Legierungsbestandteile in einer solchen Zusammensetzung enthält, dass die in der Norm DIN EN 60751 [3] angegebene Kennlinie eingehalten wird. Der Temperaturkoeffizient von IPRTs ist kleiner als der von SPRTs. IPRTs haben mit unterschiedlich aufgebauten Sensortypen eine sehr große Verbreitung gefunden. Als besonders stabil haben sich drahtgewickelte Sensoren erwiesen, während Dünnschicht-Sensoren weltweit am verbreitetsten sind. Üblich sind Thermometer mit einem Widerstand von 100 Ω bei 0 °C, kurz auch als Pt100-Thermometer bezeichnet. Der Einsatzbereich von IPRTs liegt üblicherweise zwischen -200 °C und 600 °C. Durch die Verwendung geeigneter Schutzrohre/-Materialien und hochreiner Isolationsstoffe, soll die Verunreinigung (Kontamination) des Platin-Sensorelements verhindert werden, welche besonders bei hohen Temperaturen auftreten kann.

Im Vergleich zu SPRTs sind IPRTs wesentlich unempfindlicher gegenüber Vibrationen oder Stößen. Dies wird durch eine mechanische Fixierung des Platin-Widerstands erreicht, führt aber zu einer Hysterese bei Temperatur-Wechselbeanspruchungen. Die Hysterese hängt sehr stark vom mechanischen Aufbau des Platin-Sensorelements, von der Konfektionierung des Thermometers und dem Temperaturbereich ab. Daher muss bei der Kalibrierung von IPRTs der Einfluss der Hysterese untersucht oder abgeschätzt werden. Wie dies zu geschehen hat, wird in Kapitel 8.10 im Detail beschrieben.

3.1.3 Sonstige Widerstandsthermometer

Für bestimmte Anwendungen werden auch Ni- oder Cu-Widerstände [4] verwendet, die allerdings nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich einsetzbar sind.

3.2 Halbleiter-Widerstandsthermometer

Halbleiter sind physikalisch dadurch gekennzeichnet, dass nur in geringem Umfang freie Elektronen (und Löcher) als Ladungsträger vorhanden sind, die dadurch entstehen, dass durch thermische Anregung einzelne Elektronen aus dem vollständig gefüllten Valenzband in das leere Leitungsband angehoben werden. Da die Zahl der Elektron-Loch-Paare mit zunehmender Temperatur zunimmt, nimmt der elektrische Widerstand entsprechend ab. Man spricht daher auch von Sensoren mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC = Negative Temperature Coefficient). Unter Ausnutzung bestimmter Parameter können auch Sensoren mit einem positiven Temperaturkoeffizienten (PTC) hergestellt werden. In der Praxis werden NTC-Sensoren aus einer komplexen Mischung von Metall-Oxiden hergestellt; auch die Bezeichnung Thermistoren ist gebräuchlich [5]. Der Temperaturkoeffizient liegt mit 3 % K^{-1} bis 5 % K^{-1} wesentlich höher als bei Metallen. Daher sind die Anforderungen an die verwendete Messelektronik geringer als bei Platin-Widerstandsthermometern. Nachteilig sind die stark nichtlineare Kennlinie und ein wesentlich kleinerer Einsatztemperaturbereich [5], [6].

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	10 / 56

4 Grundlage der Kalibrierung von Widerstandsthermometern

Zur Kalibrierung wird das Thermometer in einer geeigneten Temperiereinrichtung auf eine bekannte Temperatur gebracht und der Wert des Ausgangssignals (z. B. der elektrische Widerstand) gemessen. Je nach Art der Thermostatisierung unterscheidet man zwischen Fixpunktverfahren und Vergleichsverfahren: Beim Fixpunktverfahren wird jeweils die Temperatur eines ITS-90-Temperatur-Fixpunktes realisiert; beim Vergleichsverfahren werden in einem Thermostaten der Kalibriergegenstand und ein Normalthermometer auf möglichst gleiche Temperatur gebracht und die Anzeigen miteinander verglichen. Fixpunktzelle und/oder Normalthermometer müssen rückführbar kalibriert sein. Die bei Vergleichsverfahren eingesetzte Temperierung muss bezüglich ihrer thermischen Eigenschaften charakterisiert sein.

Zur Messung des Widerstandes des Kalibriergegenstandes und/oder des Normalthermometers müssen geeignete elektrische Messmittel eingesetzt werden (Widerstandsmessgerät, Multimeter, Widerstandsmessbrücke, Normalwiderstände), die ebenfalls rückführbar kalibriert sein müssen. In vielen Fällen werden durch die Spezifikationen der elektrischen Geräte die Anforderungen an die Umgebungsbedingungen, insbesondere die Umgebungstemperatur, festgelegt. Besonders kritisch ist hier die Temperaturabhängigkeit des Normalwiderstands, der für Messungen mit kleinen Messunsicherheiten in einem getrennten Thermostaten auf konstanter Temperatur gehalten werden muss. Beeinflussen die Umgebungsbedingungen, wie hier die Umgebungstemperatur, die Validität der Kalibrierergebnisse, so müssen diese in geeigneter Form rückgeführt überwacht und aufgezeichnet werden [8].

5 Transport und Eingangsuntersuchung

Widerstandsthermometer werden in unterschiedlichen, an den jeweiligen Anwendungszweck bzw. die Einbausituation angepassten, Bauformen hergestellt. Das Sensorelement, der innere Aufbau und das äußere Schutzrohr der Thermometer können sich stark voneinander unterscheiden. In Abhängigkeit vom Aufbau des Sensorelements können Stöße und Vibrationen zu teilweise irreversiblen Änderungen des elektrischen Widerstands führen und müssen daher vermieden werden. Auch ein Metall-Schutzrohr bietet keinen vollständigen Schutz vor Stößen oder anderen mechanischen Belastungen. Unerwünschte Widerstandsänderungen können jedoch relativ einfach, durch Widerstandsmessungen am Eispunkt oder Wassertripelpunkt festgestellt werden. Daher sind für den Transport von Widerstandsthermometern besondere Vorkehrungen zu treffen. Gute Verpackung, z. B. in geeigneten, mit Schaumstoff ausgepolsterten, Paketen ist unverzichtbar. Trotz spezieller Verpackungskennzeichnungen kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass kommerzielle Transportunternehmen die Packstücke mit der notwendigen Sorgfalt behandeln. Bei besonders hochwertigen Kalibriergegenständen, z. B. bei Bezugsnormen zur Weitergabe der Temperaturskala mit geringsten Messunsicherheiten, ist ein Transport durch fachkundiges Personal essenziell.

Die Art und der Umfang der Eingangsuntersuchung hängt neben dem geplanten Einsatz der Thermometer auch von ihrem Aufbau und der angestrebten Messunsicherheit der Kalibrierung ab. Zunächst wird das Kalibriergut auf Vollständigkeit und Unversehrtheit untersucht. Sind Transportschäden oder andere mechanische bzw. elektrische Mängel erkennbar, ist der Auftraggeber zu informieren. Dies gilt auch bei unklaren bzw. unvollständigen Angaben über den Kalibrierumfang.

Bei Thermometern mit angeschlossenen Messumformern oder Thermometern mit elektrischen Auswerteeinheiten müssen dem Kalibrierlaboratorium auch die Bedienungsanleitungen und gegebenenfalls weitere technische Dokumentationen zur Verfügung stehen.

Eine klare Kennzeichnung des Kalibriergegenstandes muss gegeben sein, um eine eindeutige Identifizierung zu gewährleisten. Darunter fallen Angaben wie Seriennummer, Typbezeichnung und Hersteller, ggf. auch welches Thermometer an welchen Kanal der Messelektronik angeschlossen wird.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	11 / 56

Sofern bauartbedingt möglich, ist vor Beginn der Kalibrierung der Isolationswiderstand bei Raumtemperatur zu bestimmen (siehe Kapitel 8.9). Hierbei ist darauf zu achten, dass durch die Prüfspannung weder der Sensor noch die nachgeschaltete Elektronik geschädigt wird.

Die Anzahl der Kalibrierpunkte, der zu kalibrierende Temperaturbereich und weitere Auftragsmerkmale sind zwischen Auftraggeber und Kalibrierlaboratorium abzustimmen. Kalibrierungen müssen an mindestens zwei Temperaturen durchgeführt werden. Für den Fall, dass eine Kennlinie bestimmt werden soll, wird auf die Richtlinie „Kennlinienbestimmung“ (DKD-R 5-6 [9]) verwiesen.

6 Stabilitätsuntersuchung

Während des Transports von Widerstandsthermometern können durch Stöße oder Vibrationen mechanische Spannungen innerhalb des Platinsensors auftreten, die zu einer Widerstandsänderung führen. Daher wird vor und nach einem Transport der Thermometerwiderstand bei einer vorgegebenen Temperatur gemessen (in der Regel am Eispunkt oder am Wassertripelpunkt).

Werden bei einer solchen Stabilitätsuntersuchung signifikante Änderungen (30 % der angestrebten Messunsicherheit) des Thermometerwiderstands festgestellt, sollte das Thermometer einer Wärmebehandlung (Stabilisierung) unterzogen werden. Hierbei kann wie folgt vorgegangen werden:

Nach der Messung des Widerstandswertes bei der Bezugstemperatur (Eis- oder Wassertripelpunkt) wird der Temperaturfühler über einen Zeitraum von ca. 8 Stunden bis 12 Stunden etwa 10 Kelvin über die maximale Kalibriertemperatur erwärmt; dabei ist jedoch unbedingt zu beachten, dass die vom Hersteller angegebene maximale Betriebstemperatur nicht überschritten werden darf. Danach wird der Widerstand des Thermometers bei der Bezugstemperatur erneut gemessen. Überschreitet die Abweichung zwischen den beiden Messungen bei der Bezugstemperatur 30 % der angestrebten Messunsicherheit, so ist die Wärmebehandlung zu wiederholen. Weicht das Ergebnis der Wiederholungsmessung erneut um mehr als 30 % von der vorangegangenen Messung ab, so ist der Kalibriergegenstand in der Regel als nicht kalibrierbar im Rahmen der angestrebten Messunsicherheit einzustufen. In bestimmten Fällen kann es sinnvoll sein, das Thermometer mehrmals einer Wärmebehandlung zu unterziehen.

Wenn sich bei einer Rekalibrierung der Widerstandswert des Thermometers bei der Bezugstemperatur seit der letzten Kalibrierung um nicht mehr als 30 % der angestrebten Messunsicherheit verändert hat, kann die Wärmebehandlung entfallen. Bei neuen Thermometern kann zur Beurteilung der Stabilität die Herstellerangabe (Ausgangswert) herangezogen werden, wenn diese durch ein NMI oder ein akkreditiertes Kalibrierlaboratorium mit hinreichend kleiner Messunsicherheit ermittelt wurde.

Der Eingangswert des Thermometerwiderstandes (üblicherweise am Eispunkt oder am Wassertripelpunkt) vor der Wärmebehandlung bzw. Kalibrierung ist im Kalibrierschein separat mit anzugeben. Bei einer maximalen Kalibriertemperatur von 150 °C und Messunsicherheiten größer als 0,10 K kann auf eine Stabilitätsuntersuchung verzichtet werden.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	12 / 56

7 Temperiereinrichtung

Widerstandsthermometer werden entweder im Vergleichsverfahren oder an definierenden Fixpunkten der gültigen Temperaturskala kalibriert. Eine Kombination aus beiden Verfahren ist zulässig. Beim Vergleichsverfahren werden die zu kalibrierenden Widerstandsthermometer in thermisch stabilen und homogenen Temperiereinrichtungen mit Bezugs- oder Gebrauchsnormalen (Thermometern) verglichen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass sich alle Thermometer innerhalb des so genannten Nutzvolumens befinden. Dies ist ein Bereich mit homogener und zeitlich konstanter Temperatur innerhalb der Temperiereinrichtung. Im Rahmen der Validierung eines Kalibriermessplatzes müssen die Temperaturstabilität und -homogenität innerhalb dieses festgelegten Nutzvolumens experimentell ermittelt werden. Die Verwendung von Herstellerspezifikationen ist nur in Ausnahmefällen zulässig (in diesem Fall sind entsprechende Zuschläge bei der Berechnung der Messunsicherheit anzusetzen). Die Lage und die geometrischen Abmessungen des Nutzvolumens sind in der Arbeitsanweisung anzugeben. Darüber hinaus sind für jede eingesetzte Kombination von Temperiereinrichtung und Fluid die Temperaturstabilität und -homogenität innerhalb des Nutzvolumens zu bestimmen (Charakterisierung) und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Dies muss für die ungünstigsten Fälle erfolgen, also z. B. bei der jeweils größten Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur und bei der größten Viskosität des Fluids (in einem Ölbad wären dies beispielsweise die höchste und niedrigste Einsatz-Temperatur). Sollte ein Gegenkühler bei bestimmten Temperaturbereichen aktiviert werden, so können sich Temperaturstabilität und/oder -homogenität vergrößern. Für diese Fälle ist ebenfalls eine Charakterisierung erforderlich. Bei Veränderungen an der Temperiereinrichtung (bspw. am internen Aufbau, Wechsel von Komponenten) ist die Charakterisierung zu wiederholen.

Weiterhin ist der Beladungseinfluss zu quantifizieren (siehe auch DKD-R 5-4 [10]) und geeignet in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Zur Ermittlung der zeitlichen Stabilität und Homogenität werden Thermometer gleicher Bauart an den Grenzen des Nutzvolumens (horizontal, vertikal) der Temperiereinrichtung positioniert. Für die Untersuchungen ist es nicht zwingend erforderlich, dass die Thermometer kalibriert sind. Es kann auch in anderer Weise sichergestellt werden, dass Temperaturdifferenzen mit hinreichender Genauigkeit gemessen werden können. Nach thermischer Stabilisierung werden die mit den Thermometern gemessenen Temperaturen über einen geeigneten Zeitraum (größer 20 min) kontinuierlich aufgezeichnet. Die maximal auftretende Temperaturdifferenz zwischen den Messorten und die Amplitude der zeitlichen Temperaturvariation sind in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Temperaturgradienten in temperaturstabilisierten Bädern oder Öfen können durch den Einbau eines metallischen Ausgleichsblocks mit Bohrlöchern zur Aufnahme der Normale und Kalibriergegenstände reduziert werden.

Bei Temperiereinrichtungen mit Luft als Arbeitsmedium ist zusätzlich der Strahlungseinfluss zu bestimmen und in der Messunsicherheit zu berücksichtigen. Dieser kann durch Messung der Temperatur mit einem Thermometer mit möglichst großem Emissionsgrad ($\varepsilon > 0,6$) und einem Thermometer mit möglichst kleinem Emissionsgrad ($\varepsilon < 0,15$) erfolgen. Eine empfohlene Anordnung ist die Verwendung eines Thermometers mit einer vergoldeten Oberfläche (niedriger Emissionsgrad) sowie eines Thermometers mit einer Teflon- oder geschwärzten Oberfläche (hoher Emissionsgrad). Die Emissionsgrade beider Thermometeroberflächen müssen hinreichend genau bekannt sein (im infraroten Wellenlängenbereich). Das Thermometer mit kleinem Emissionsgrad zeigt dabei näherungsweise die Lufttemperatur an. Die Lufttemperatur ergibt sich dabei durch Extrapolation auf den Emissionsgrad $\varepsilon = 0$. Die festgestellte Differenz beider Thermometer ist ein Maß für den Strahlungseinfluss. Bei Temperiereinrichtungen mit Luft als Arbeitsmedium kann die Unsicherheitskomponente, die auf dem Temperaturgradienten beruht, durch die Festlegung eines kleineren Nutzvolumens verringert werden. Wo sinnvoll, sollten bei Messungen in Luft sinngemäß auch die Hinweise der DKD-R 5-7 [11] beachtet werden.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	13 / 56

Die Kalibrierung eines Thermometers erfolgt nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtes sowohl der Temperiereinrichtung als auch des Thermometers selbst. Der Einfluss der verbleibenden Temperaturschwankungen kann reduziert werden, wenn Normal und Kalibriergegenstand quasi gleichzeitig gemessen werden oder wenn Mittelwerte über denselben Beobachtungszeitraum statt Momentanwerte der Anzeigen verwendet werden. Sollte dies technisch nicht möglich sein, so kann durch präzise Bestimmung des Driftverhaltens (z. B. bei Messung des Normals vor und nach der Messung des Kalibriergegenstands bei linearem Driftverhalten) ein vergleichbarer Effekt erzielt werden. Da sich die Zeitkonstanten von Normal und Kalibriergegenstand in der Regel unterscheiden, lässt sich der Einfluss der zeitlichen Stabilität der Temperatur nur zum Teil reduzieren.

8 Einflussfaktoren

Die Messunsicherheit bei der Kalibrierung eines Thermometers wird durch verschiedene Einflussfaktoren bestimmt. Hierzu zählen neben der Messunsicherheit in der Temperaturdarstellung auch Einflussfaktoren, die vom Kalibriergegenstand selbst ausgehen. Diese können zum Teil ein Vielfaches der Messunsicherheit der Temperaturdarstellung betragen. In der Messunsicherheit müssen daher zwingend die Beiträge des Kalibrierverfahrens, der verwendeten Normale und des Kalibriergegenstandes berücksichtigt werden. Für Letzteren muss ein Mindestwert berücksichtigt werden, der mit einem real existierenden Kalibriergegenstand erreicht werden kann. Im Folgenden werden die Einflussfaktoren näher erläutert.

8.1 Kurzzeitverhalten während des Zeitraums der Kalibrierung

Instabilitäten von Widerstandsthermometern können sehr unterschiedliche Ursachen haben. Wie in Kapitel 6 beschrieben, können z. B. durch Stöße während des Transports Änderungen des Widerstands auftreten. In vielen Fällen ist es durch eine geeignete Wärmebehandlung möglich, den Widerstandswert zu stabilisieren, d. h. die zeitliche Widerstandsänderung zu verringern. Hierbei wird zwischen dem Langzeitverhalten (Drift) und dem Kurzzeitverhalten unterschieden. Bei der Untersuchung des Kurzzeitverhaltens werden alle Änderungen berücksichtigt, die während des Zeitraums einer Kalibrierung (einige Stunden bis zu einigen Tagen) festgestellt werden. Mögliche Ursachen sind z. B. reversible Änderungen des Oxidationszustands des Sensorelements (Platin). Dieser Beitrag muss in der Messunsicherheitsbilanz (Kalibrierschein) berücksichtigt werden.

8.2 Langzeitverhalten aufgrund thermischer Belastung (Drift)

Neben kurzzeitigen Instabilitäten treten auch Langzeiteffekte auf, deren Größe u. a. durch die thermische Belastung während des Einsatzes bestimmt wird. Eine Bestimmung des hieraus resultierenden Messunsicherheitsbeitrags obliegt dem Anwender des Thermometers. Dazu werden üblicherweise die Ergebnisse vorheriger Kalibrierungen (Kalibrierhistorie) genutzt. In der Angabe der Messunsicherheit im Kalibrierschein ist kein Beitrag für die Langzeitstabilität des Thermometers enthalten.

8.3 Thermische Ankopplung

Werden Kalibrierungen bei ungenügender thermischer Ankopplung oder unzureichender Eintauchtiefe des Thermometers durchgeführt, können hieraus erhebliche Messfehler resultieren.

Bei der Kalibrierung mit Hilfe einer Temperiereinrichtung wird für das zu kalibrierende Thermometer die maximal mögliche Eintauchtiefe bzw. eine optimale thermische Ankopplung angestrebt. Die erforderliche Eintauchtiefe hängt von der angestrebten Messunsicherheit, dem

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	14 / 56

Aufbau und der Wärmeleitfähigkeit der Materialien des Thermometers, dem Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Thermometer und umgebendem Fluid und anderen Größen ab. Um eine erste Abschätzung über die erforderliche Eintauchtiefe zu erhalten, wird üblicherweise der Thermometerdurchmesser als Maßstab herangezogen.

Als Faustformel zur Abschätzung der erforderlichen Eintauchtiefe kann man davon ausgehen, dass die Eintauchtiefe mindestens das Zehnfache des Thermometerdurchmessers betragen muss, wenn eine relative Messabweichung kleiner als 1 % der Differenz zwischen Kalibrier- und Umgebungstemperatur erreicht werden soll [12]. Vergrößert man die Eintauchtiefe erneut um das Zehnfache des Thermometerdurchmessers, verringert sich die Messabweichung um einen Faktor 10. Hierbei muss beachtet werden, dass der Nullpunkt für die Bestimmung der Eintauchtiefe nicht auf die Unterkante des Thermometerschutzrohres, sondern auf die Oberkante des Sensorelements bezogen wird.

Bei Kalibrierungen mit Luft als Medium (z. B. in einem Temperaturschrank) sollte – sofern möglich – der komplette Kalibriergegenstand, inklusive Verbindungskabel (mindestens 1 m, sofern vorhanden) in die Kalibriereinrichtung eingebaut werden und der Kalibriertemperatur ausgesetzt sein, um Wärmeableitungen zu vermeiden.

Eventuell notwendige weitere Maßnahmen sowie die Eintauchtiefe während der Kalibrierung sind im Kalibrierschein aufzuführen. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass die Kalibrierergebnisse reproduzierbar und im Fall der Rekalibrierung auch vergleichbar sind.

Die experimentelle Überprüfung, ob während der Kalibrierung eine ausreichende Eintauchtiefe gewählt wurde, erfolgt durch die Reduzierung der maximal möglichen Eintauchtiefe um 10 %. Die dabei auftretende Änderung der Temperaturanzeige aufgrund der Wärmeableitung darf 10 % der angestrebten Messunsicherheit nicht überschreiten, ansonsten muss der entsprechende Messunsicherheitsbeitrag erhöht werden.

8.4 Elektrische Messverfahren

Bei der Messung des elektrischen Widerstandes müssen Einflüsse auf das Messergebnis berücksichtigt werden und bei der Ermittlung der Messunsicherheit mit einfließen. Die Widerstandsmessung erfolgt entweder mit einem Wechsel- oder (i.d.R. alternierenden) Gleichstrom. Einige Messgeräte erlauben oder arbeiten ausschließlich im gepulsten Betrieb.

Der gemessene Thermometerwiderstand darf weder von der Art der Widerstandsmessung (Wechsel- oder Gleichstrom (AC/DC)), noch von der Integrationszeit abhängen. Wenn AC/DC-bedingte Abweichungen festgestellt werden, kann dies ein Hinweis auf dielektrische Effekte sein. Eine mögliche Ursache ist das Eindringen von Wasser (-dampf) in das Sensorelement.

Die Art und Wahl der Messgeräte richtet sich nach der angestrebten Messunsicherheit bei der Kalibrierung.

8.5 Anschlusstechnik

Zu Verfälschungen kann auch der Widerstand der Zuleitungen führen, der vom Widerstand des Sensors zu unterscheiden ist. Bei der elektrischen Widerstandsmessung unterscheidet man drei Schaltungsarten: die Zwei-, Drei- und Vierleiter-Schaltung.

8.5.1 Zweileiter-Schaltung

Bei der Zweileiter-Schaltung erfolgt die Verbindung zwischen Sensorelement und Messgerät mit einer zweiadrigen Leitung. Wie jeder andere elektrische Leiter besitzt auch diese Leitung einen Widerstand, der mit dem Sensorelement in Reihe geschaltet ist. Damit addieren sich die beiden Widerstände; es kommt zu einem systematisch höheren Widerstandswert, welcher in den Kalibrierdaten enthalten ist. Dabei bleibt jedoch die Tatsache unberücksichtigt, dass sich der elektrische Widerstand der Zuleitung im Einsatz durch äußere Temperatureinflüsse ebenfalls ändert. Weist das zu kalibrierende Thermometer eine Zweileiter-Anschlussleitung auf, muss der Anwender je nach Temperatur der Anschlussleitung zusätzliche Messabweichungen berücksichtigen.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	15 / 56

Im Kalibrierschein wird die Länge und die Temperatur der Anschlussleitung während der Kalibrierung mit angegeben.

Beispiel:

Platin-Widerstandsthermometer Pt100 mit 2,5 m Anschlussleitung (Kupfer, Querschnitt: 0,25 mm²)
Widerstand der Anschlussleitung bei Raumtemperatur: 410 mΩ
Befindet sich die Anschlussleitung auf einer Temperatur von 70 °C, so erhöht sich der Schleifenwiderstand der Anschlussleitung auf 492 mΩ.
Dies entspricht einer um +0,2 K höheren Temperaturanzeige.

Bei der Ermittlung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Thermometers muss dies berücksichtigt werden und es kommt prinzipiell bei der Kalibrierung von Widerstandsthermometern in Zweileiter-Schaltung zu einer höheren Messunsicherheit.

8.5.2 Dreileiter-Schaltung

Um die Einflüsse der Leitungswiderstände und deren temperaturabhängige Schwankungen zu minimieren, wird in der industriellen Messtechnik die Dreileiter-Schaltung verwendet. Durch die Schaltungstechnik wird sowohl der Betrag als auch die Temperaturabhängigkeit des Leitungswiderstands kompensiert. Allerdings muss mit zusätzlichen Unsicherheiten gerechnet werden, da die Kompensation nur dann korrekt arbeitet, wenn die jeweiligen Leitungswiderstände identisch sind und deren Temperaturabhängigkeiten dasselbe Verhalten zeigen. Da die bei der Kalibrierung eingesetzten Messgeräte in Vierleiter-Schaltung arbeiten, muss der Schleifenwiderstand separat gemessen und rechnerisch kompensiert werden.

8.5.3 Vierleiter-Schaltung

Die bevorzugte Anschlussstechnik besteht in der Vierleiter-Schaltung. Durch die getrennte Zuführung von Strom- und Spannungspfad an den Sensor wird das Messergebnis weder durch den Leitungswiderstand selbst noch durch seine Temperaturabhängigkeit beeinträchtigt. Dabei muss (z. B. durch die Angaben des Herstellers) sichergestellt sein, dass die Vierleiter-Schaltung auch bis zum Sensorelement ausgeführt ist. Wird das Sensorelement im Inneren des Thermometers jedoch in Zweileiter-Schaltung beschaltet, kommt es zu einem zusätzlichen (temperaturprofilabhängigen) Leitungswiderstand. Bei vielen Messgeräten ist auch bei der Vierleiter-Schaltung der mögliche Leitungswiderstand begrenzt, dies kann auch die Leitungsinduktivität und -kapazität betreffen. In der Praxis wird dies nur bei sehr langen Zuleitungen auftreten. In diesem Fall ist auch mit stärkeren Einflüssen durch elektromagnetische Felder zu rechnen.

8.6 EMV-Einflüsse

Durch elektromagnetische Wechselfelder, wie sie bspw. durch Netzleitungen, Elektromotoren oder Heizwicklungen erzeugt werden, können Störspannungen und/oder -ströme kapazitiv und/oder induktiv in die Messleitungen einkoppeln. Bei sehr starken Feldern und einer bewegten Messleitung können sich auf vergleichbare Art auch Gleichfelder auswirken.

Aus diesem Grund sollten Messleitungen und Netzleitungen voneinander entfernt verlegt werden und keinesfalls parallel.

Eine wirksame Reduzierung dieses Einflusses lässt sich durch paarweise Verdrillung der Adern der Messleitung erreichen. Bei der Vierleiterschaltung verdrillt man jeweils die Adern des Spannungs- und des Strompfades für sich. Die Effektivität dieser Maßnahme ist auch abhängig von der Güte der Gleichtaktunterdrückung (CMR) des Messgerätes.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	16 / 56

Ebenfalls wirkungsvoll ist eine Schirmung der Messleitung. Vorzugsweise sollte der Schirm nicht Teil der Vierleiterschaltung sein, sondern ein unabhängiger Leiter, der niederohmig auf Erdpotential oder Guard liegt. Da das Schirmungsmaß endlich ist, sollten Verdrillung und Schirmung kombiniert werden, um den Effekt zu verstärken. Zu bedenken ist auch, dass eine Schirmung nur die kapazitive Einkopplung von Störungen reduziert. Für Messungen auf sehr hohem metrologischem Niveau sollten die verdrehten Spannungs- und –strompfade jeweils separat geschirmt sein.

Je nach Thermometer-Bauform ist dort die EMV-Abschirmung unzureichend. Dies kann sich z. B. besonders in Öfen durch Einkopplung der elektromagnetischen Felder der Heizwicklungen bemerkbar machen. In diesem Fall sollte versucht werden, den Einfluss durch ein geerdetes und elektrisch gut leitendes Schutzrohr zu reduzieren.

EMV-Einflüsse können auch durch geeignete Messgeräte reduziert werden. Analoge Filter (in Messgeräten) können teilweise effektiv Störungen reduzieren; es ist jedoch sicherzustellen, dass das Messergebnis dadurch nicht verfälscht wird (z. B. können sich Offset und Verstärkung durch analoge Filter verändern).

Die Integrationszeit bei Multimetern oder Gleichstrommessbrücken sollte in der Regel ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer der Netzfrequenz betragen. Nicht periodische Störungen können meist durch eine Erhöhung der Integrationszeit reduziert werden.

8.7 Parasitäre Thermospannung

Der Messkreis eines Thermometers besteht im Allgemeinen nicht nur aus einem Werkstoff. Bei einem Temperaturgradienten entlang des Messkreises kann deshalb eine Thermospannung entstehen, die dem Spannungsabfall am Widerstandssensor überlagert wird. Je nach Stromrichtung addiert bzw. subtrahiert sich diese Spannung, es kommt zu einem systematisch höheren bzw. niedrigeren gemessenen Thermometerwiderstand. Durch Umpolung der Stromrichtung bei der Kalibrierung kann aus der Differenz der beiden Anzeigewerte die Größe der Thermospannung (bei bekannter Messstromstärke) ermittelt werden.

Bei Wechselstrom und wechselndem Gleichstrom kompensiert sich dieser Effekt automatisch.

Beispiel:

Widerstandsthermometer: Pt100

Messstromstärke: 1 mA

Thermospannung: 25 µV

Resultierender Offset aus der Thermospannung: $\frac{U}{I} = R = \frac{25 \mu\text{V}}{1 \text{ mA}} = 25 \text{ m}\Omega$

Dies entspricht einer Abweichung von ungefähr 63 mK.

8.8 Eigenerwärmung

Da Widerstandsthermometer passive Bauelemente sind, muss für die Bestimmung des elektrischen Widerstands ein Messstrom durch den entsprechenden Sensor geschickt werden. Der Messstrom führt zu einer Erwärmung des Sensors (Eigenerwärmung) und damit zu einer Verfälschung des Messergebnisses. Dieser Effekt ist nicht allein von der Messstromstärke abhängig, sondern auch von den Messbedingungen (thermische Ankopplung) und dem Fühleraufbau. Bei der Kalibrierung von Widerstandsthermometern ist das Selbsterwärmungsverhalten zu untersuchen oder dessen Einfluss abzuschätzen.

Üblicherweise wird der Sensorwiderstand bei zwei Messstromstärken gemessen und auf die Messstromstärke I von 0 mA (bzw. die elektrische Leistung P auf 0 mW) extrapoliert.

Ist es beispielweise nicht möglich die Messstromstärke zu ändern, so besteht eine weitere Möglichkeit darin, die thermische Ankopplung des Thermometers an dessen Umgebung zu variieren. Eine probate Möglichkeit dieser Umsetzung besteht darin, ein Röhrchen mit großem

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	17 / 56

Durchmesser (im Vergleich zum Sensordurchmesser) in eine temperaturhomogene und zeitlich ausreichend stabile Umgebung einzubringen (z.B. Eispunkt oder Kalibrierbad). Anschließend wird mit dem deutlich kleineren Sensor eine Messung im unteren Bereich des Röhrchens durchgeführt. Der Sensor ist hierbei vollständig von Luft umgeben und darf die Wandung des Röhrchens nicht berühren. Im Anschluss wird das Röhrchen mit einem Kontaktmedium guter Wärmeleitfähigkeit (z.B. Aluminiumoxid) so weit aufgefüllt, dass der gesamte Sensor davon umgeben ist. Nach einer ausreichend langen Angleichungszeit wird dann erneut eine Messung durchgeführt. Jetzt kann aus der Differenz der beiden Messergebnisse der Einfluss der Selbsterwärmung abgeschätzt werden. Das Röhrchen ist für die Messungen stets unterhalb des Übergangs vom Temperiermedium zur Umgebung zu verschließen (z.B. mit Watte), damit sich im Inneren eine ungestörte, stationäre und homogene Temperaturverteilung ausbilden kann. Auf eine mögliche Wärmeableitung ist zu achten.

Die Ergebnisse der Eigenerwärmungsuntersuchung sind im Kalibrierschein so anzugeben, dass dem Anwender alle Informationen vorliegen, die benötigt werden, um eine entsprechende Korrektur vorzunehmen bzw. eine Unsicherheit für seine Bedingungen abschätzen zu können. Wird die Eigenerwärmung aufgrund des Messstroms nicht experimentell bestimmt, so ist dieser Beitrag bei allen Arten von Widerstandsthermometern inklusive bei deren Verwendung in Messketten in der Messunsicherheitsbilanz mit 30 mK (Rechteckverteilung) zu berücksichtigen. Unter der Annahme einer Rechteckverteilung mit einer Halbwerte a von 30 mK ergibt sich eine Standardunsicherheit von

$$u = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a^2} \approx 17 \text{ mK} \quad (1)$$

Für den Fall, dass ein bestimmter Typ von Thermometern in regelmäßigen Abständen kalibriert wird, können nach einer hinreichend großen Anzahl von Thermometerkalibrierungen (mindestens 10 Thermometer des gleichen Typs) die ermittelten Maximalwerte für deren Selbsterwärmung herangezogen werden. Die hieraus ermittelte typische Selbsterwärmung eines Thermometertyps ist in regelmäßigen Abständen zu verifizieren. Im Kalibrierschein ist dann darauf hinzuweisen, dass der Wert nicht explizit für das zu kalibrierende Thermometer bestimmt wurde.

8.9 Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand des Thermometers wird bereits bei Raumtemperatur während der Eingangsprüfung gemessen, sofern bauartbedingt möglich (siehe auch Kapitel 5). Dieser muss entsprechend DIN EN 60751 [3] zwischen jedem Messkreis und der Armatur mit einer Gleichspannung von mindestens 100 V gemessen werden und darf bei Raumtemperatur nicht unter 100 M Ω liegen. Hierbei ist darauf zu achten, dass durch die Prüfspannung weder der Sensor noch die nachgeschaltete Elektronik geschädigt wird. Während der Kalibrierung ist der Isolationswiderstand bei der höchsten Kalibriertemperatur mit einer Gleichspannung von mindestens 10 V zu messen (DIN EN 60751 [3]) und bei der Ermittlung der Messunsicherheit entsprechend zu berücksichtigen. Gegebenenfalls ist das Thermometer als nicht kalibrierfähig zurückzuweisen.

Beispiel:

Widerstandsthermometer: Pt100 nach DIN EN 60751

Temperatur: 400 °C (entsprechen 247,092 Ω)

Isolationswiderstand: 1 MΩ

Annahme einer Parallelschaltung:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_{\text{PRT}} \cdot R_{\text{ISO}}}{R_{\text{PRT}} + R_{\text{ISO}}} = \frac{247,092 \, \Omega \cdot 1 \, \text{M}\Omega}{247,092 \, \Omega + 1 \, \text{M}\Omega} = 247,031 \, \Omega$$

Dies entspricht einem Temperaturwert von 399,823 °C und somit einem rechteckverteilten Beitrag zur Messunsicherheit (Halbweite) von 0,177 K.

8.10 Hysterese

Generell ist zu beachten, dass industrielle Platin-Widerstandsthermometer einen Hystereseffekt zeigen, d. h. der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand ist abhängig von der thermischen „Vorgeschichte“ des Thermometers. Dieser Effekt tritt z. B. auf, wenn der Platinsensor eng mit einem Glas- oder Keramikträger verbunden ist und durch unterschiedliche Wärmeausdehnung mechanische Spannungen auftreten. Bei IPRTs kann hierdurch ein erheblicher Unterschied in der gemessenen Temperatur zustande kommen [13], [14], je nachdem ob das Thermometer vorher bei höheren oder tieferen Temperaturen eingesetzt worden ist. Der Hystereseffekt hängt von der Bauform des Sensorelements ab. Er ist erfahrungsgemäß bei glasgekapselten IPRTs und Dünnschicht-Sensoren besonders stark ausgeprägt und nur bei SPRTs vernachlässigbar. Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert, ist zumeist in der Mitte des Temperaturbereichs am größten (Abb. 1).

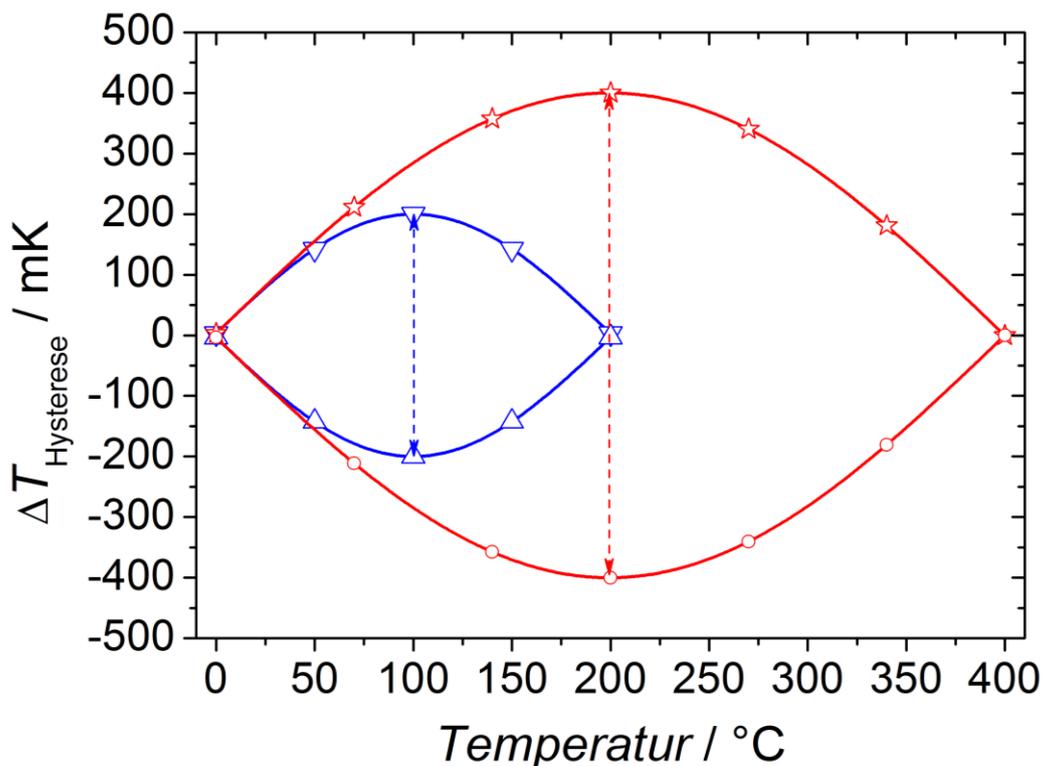


Abbildung 1: Beispiel für eine hysteresebedingte Kennlinienabweichung eines industriellen Widerstandsthermometers in unterschiedlichen Temperaturbereichen

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	19 / 56

Im Kalibrierschein für IPRTs müssen daher Angaben zum Einfluss der Hysterese und zu den Kalibrierbedingungen (Kalibrierung mit aufsteigenden/absteigenden Temperaturen) enthalten sein.

Der Einfluss der Hysterese ist gemäß DIN EN 60751 [3] experimentell zu ermitteln (Abb. 1). Hierbei wird mit stetig steigender Temperatur bei der niedrigsten Temperatur T_{Min} die Kalibrierung begonnen. Der wesentliche Messpunkt T_{H} befindet sich in der Mitte des Temperaturbereichs $T_{\text{Min}} < T_{\text{H}} < T_{\text{Max}}$. Nach Abschluss der Messung bei der höchsten Temperatur T_{Max} wird dann direkt die Temperatur T_{H} in der Mitte des Temperaturbereichs erneut eingestellt und eine weitere Messung durchgeführt.

Vereinfachtes Messschema ohne weitere Kalibrierpunkte eines direktanzeigenden Thermometers bei den gemessenen Temperaturen T_n :

- (1) niedrigste Temperatur ($T_1 = T_{\text{Min}}$)
- (2) mittlere Temperatur ($T_2 = T_{\text{H}}$)
- (3) höchste Temperatur ($T_3 = T_{\text{Max}}$)
- (4) direkt zur mittleren Temperatur ($T_4 = T_{\text{H}}$)

$$\Delta T_{\text{Hysterese}} = T_4 - T_2 \quad (2)$$

Wird die Temperaturabweichung aufgrund der Hysterese nicht bestimmt, so ist der Effekt mit einer pauschalen Angabe von 0,2 % des gesamten Messbereichs des Thermometers in Kelvin anzunehmen. Der ermittelte Wert ist entweder in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen oder im Kalibrierschein separat anzugeben.

Beispiel für Angabe im Kalibrierschein, wenn der Einfluss nicht gemessen wurde:

Die Kalibrierung wurde im Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C bei einem Programm mit aufsteigenden Temperaturstufen durchgeführt. Der Einfluss der Hysterese wurde experimentell nicht ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass dieser im o. g. Temperaturbereich bis zu 0,8 K betragen kann, falls die Messungen nicht durchgehend bei aufsteigenden Temperaturen durchgeführt werden. Dabei ist der stärkste Einfluss in der Mitte des Temperaturbereichs zu erwarten.

Bei der Kalibrierung von mehreren Thermometern des gleichen Typs kann nur dann auf eine individuelle Ermittlung der Hysterese verzichtet werden, wenn durch vorherige Untersuchungen einer hinreichend großen Anzahl von Thermometern (mindestens 10) Maximalwerte für deren Hysterese ermittelt wurden.

Die hier aufgeführte Verfahrensweise stößt an ihre Grenzen, wenn zwischen niedrigster und höchster Temperatur ein Wechsel der Temperiereinrichtung notwendig ist.

Gerade bei dünnen/schnellen Fühlern kann es durchaus sein, dass beim Wechsel von einer Einrichtung in die andere die Sensortemperatur wieder fast Raumtemperatur annimmt.

Dann ist die Bestimmung der Hysterese auf angegebene Art und Weise nicht zielführend.

Für den Fall, dass zur Kalibrierung des Widerstandsthermometers ein oder mehrere Wechsel der Temperiereinrichtungen nötig sind, um den erforderlichen Kalibrierbereich abzudecken, muss das angegebene Verfahren modifiziert werden:

- 1) Das beschriebene Verfahren zur Hysteresebestimmung wird für jede der n Temperiereinrichtungen und das zu dieser gehörige Temperaturintervall separat durchgeführt. Im Ergebnis wird für jede Temperiereinrichtung eine Hysterese

$\Delta T_{\text{Hysterese},k}$ (Temperiereinrichtung k) nach Gleichung (2) für den zugehörigen Temperaturbereich $T_{k,\text{Min}}$ bis $T_{k,\text{Max}}$ bestimmt.

- 2) Aus den n Hysteresen $\Delta T_{\text{Hysterese},k}$ für die Temperaturbereiche $T_{k,\text{Min}}$ bis $T_{k,\text{Max}}$ der einzelnen Temperiereinrichtungen wird die relative Hysterese $\Delta T_{\text{Hysterese},k}^{\text{rel}}$ nach Gleichung (3) berechnet.

$$\Delta T_{\text{Hysterese},k}^{\text{rel}} = \frac{\Delta T_{\text{Hysterese},k}}{(T_{k,\text{Max}} - T_{k,\text{Min}})} \quad \forall k = 1 \dots n \quad (3)$$

- 3) Die relative Hysterese für den gesamten Temperaturkalibrierbereich T_{Min} bis T_{Max} aller verwendeten Temperiereinrichtungen ergibt sich dann als das Maximum der einzelnen relativen Hysteresen.

$$\Delta T_{\text{Hysterese}}^{\text{rel}} = \max_{k=1 \dots n} (\Delta T_{\text{Hysterese},k}^{\text{rel}}) \quad (4)$$

- 4) Die Hysterese für den gesamten Temperaturkalibrierbereich T_{Min} bis T_{Max} kann dann abgeschätzt werden zu:

$$\Delta T_{\text{Hysterese}} = \Delta T_{\text{Hysterese}}^{\text{rel}} \cdot (T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}) \quad (5)$$

- 5) Die Summe der Teilterperaturbereiche

$$\sum_{k=1}^n \Delta T_k = \sum_{k=1}^n (T_{k,\text{Max}} - T_{k,\text{Min}}) \quad (6)$$

muss dabei mindestens 90% des Gesamtbereiches ($T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}$) betragen.

Für den Fall einer Kalibrierung eines Widerstandsthermometers im Temperaturbereich von -100 °C bis 600 °C ergibt sich damit analog zu Abbildung 1:

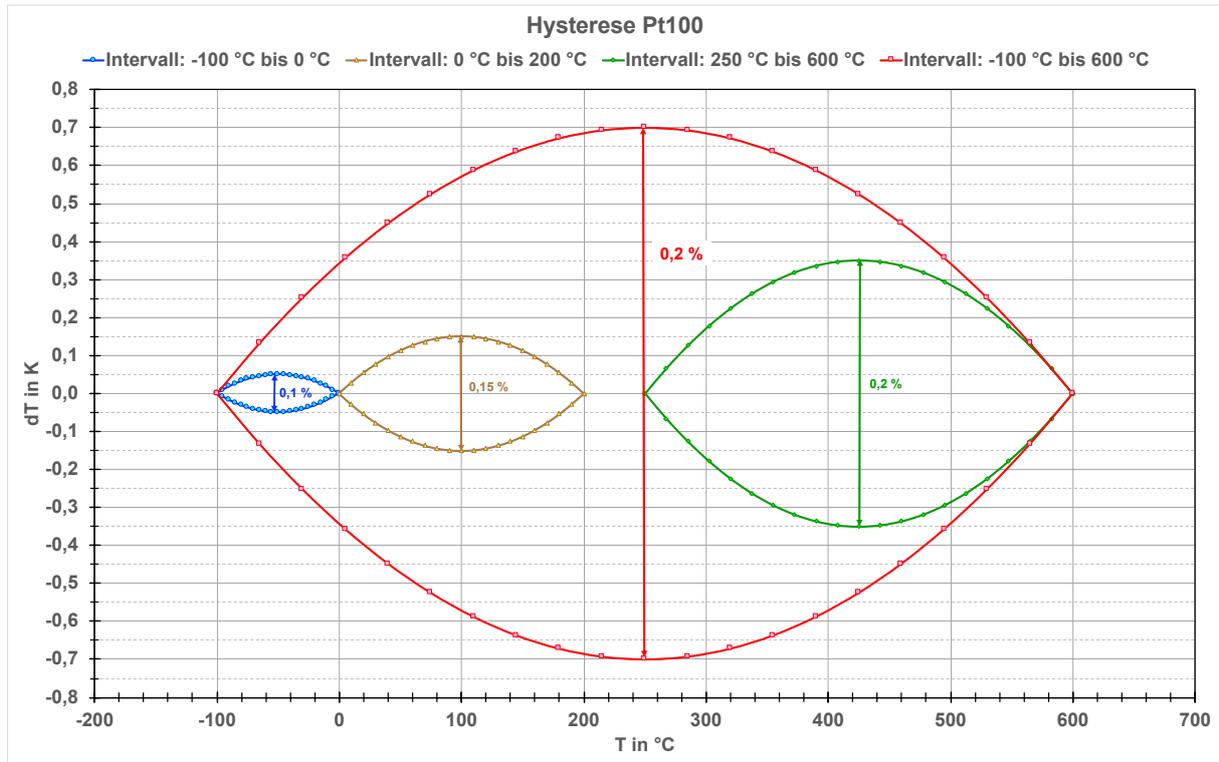


Abbildung 2: Beispiel für die Bestimmung der Hysterese eines industriellen Widerstandsthermometers bei der Kalibrierung in mehreren Temperiereinrichtungen in unterschiedlichen Temperaturbereichen

Im Beispiel erfolgte die Kalibrierung in drei verschiedenen Temperiereinrichtungen in den Teilbereichen:

- Im Kryobad im Bereich von -100 °C bis 0 °C betrug die relative Hysterese 0,1 %.
- Im Ölbad im Bereich von 0 °C bis 200 °C wurde die relative Hysterese zu 0,15 % bestimmt.
- Im Kalibrierofen wurde die Hysterese im Bereich von 250 °C bis 600 °C zu 0,2 % gemessen.
- Die relative Hysterese für den gesamten Kalibrierbereich von -100 °C bis 600 °C wurde damit zu 0,2 % abgeschätzt, so dass sich eine Hysterese für den Gesamtkalibrierbereich von 1,4 K ergibt.
- Im Temperaturbereich zwischen 200 °C und 250 °C lag kein Kalibrierpunkt daher wurde hier auch die relative Hysterese nicht bestimmt. Die Summe der Temperaturteilbereiche beträgt 650 K. Dies sind mehr als 90 % des Gesamtkalibrierintervalls von 700 K, so dass die drei untersuchten Bereiche ausreichend sind.

9 Anforderungen an Bezugsnormale und Messeinrichtungen

Aus den folgenden Gründen ist es erforderlich, dass Kalibrierlaboratorien mindestens zwei Bezugsnormale für jeden Temperaturbereich zur Verfügung haben:

- Widerstandsthermometer weisen eine Drift auf. Vibrationen oder mechanische Stöße können zu Änderungen des elektrischen Widerstands des Sensors führen. Hierbei werden in der Regel Kennlinienverschiebungen festgestellt, d. h. es gibt eine temperaturunabhängige Änderung des Thermometerwiderstands. In bestimmten Fällen kann es aber auch zu einer Änderung des Anstiegs der Kennlinie kommen. Diese wird zumeist durch eine Kontamination des Platin-Sensorelements verursacht. Änderungen des Kennlinienverlaufs können nur durch Vergleichsmessungen bei mindestens zwei Temperaturen mit einem anderen Widerstandsthermometer, oder durch eine Rekalibrierung (bzw. Zwischenprüfungen) mittels thermometrischer Fixpunkte (ITS-90 Fixpunkte, Eispunkt) erkannt und korrigiert werden.
- Um Zwischenprüfungen durchzuführen (Forderung der DIN EN ISO/IEC 17025 [8]), werden entweder ein zweites Bezugsnormal (Widerstandsthermometer) oder mindestens zwei thermometrische Fixpunkte benötigt. Das Intervall der Zwischenprüfungen ist fachlich angemessen zu wählen. Wenn Änderungen des Kennlinienverlaufs ausgeschlossen werden können (z. B. maximale Einsatztemperatur kleiner als 250 °C), ist eine Zwischenprüfung bei einer Temperatur (z. B. Eispunkt) ausreichend.
- Da die Kalibrierung eines Widerstandsthermometers zeitaufwändig ist, wird durch das zweite Bezugsnormal die Arbeitsfähigkeit des Kalibrierlaboratoriums während der Kalibrierung des anderen Normals sichergestellt. Daher ist es sinnvoll die Kalibrierungen der Bezugsnormale zeitversetzt durchzuführen.

Die o.g. Vorgabe kann entweder durch zwei Widerstandsthermometer oder ein Widerstandsthermometer mit mindestens zwei Temperatur-Fixpunkten sichergestellt werden. Die Rekalibrierfristen hängen von der angestrebten Messunsicherheit und der Stabilität der Bezugsnormale ab, es gelten folgende Richtwerte:

Messgerät/Bezugsnormal	Maximale Rekalibrierfrist	Anmerkung
Normal-Platin-Widerstandsthermometer (SPRT)	2 bis 3 Jahre	abhängig von der Historie
Industrielles Widerstandsthermometer (IPRT)	1 bis 2 Jahre	abhängig von der Historie
Fixpunktzelle	5 Jahre	
Normalwiderstand	2 bis 5 Jahre	abhängig von der Historie
Widerstandsmessgerät	2 Jahre	
AC-Messbrücke für Widerstandsverhältnisse	3 bis 5 Jahre	Linearitätsuntersuchung, abhängig von der Historie
DC-Messbrücke für Widerstandsverhältnisse	1 bis 3 Jahre	Linearitätsuntersuchung, abhängig von der Historie; bei internem Referenzwiderstand (1 Jahr)

Tabelle 1: Richtwerte für Rekalibrierfristen

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	23 / 56

Das Langzeitverhalten von allen Bezugs- und Gebrauchsnormen ist in geeigneter Weise zu dokumentieren und auszuwerten, um den Einfluss einer Drift oder sonstiger Instabilitäten ermitteln bzw. extrapolieren zu können. Gegebenenfalls müssen Rekalibrierintervalle verkürzt werden.

10 Ergebnisse

Als Ergebnis der Kalibrierung wird ein Kalibrierschein erstellt.

Der Kalibrierschein muss den Anforderungen der aktuell gültigen Normen (DIN EN ISO/IEC 17025 [8]) sowie den zusätzlichen Festlegungen der jeweiligen Akkreditierungsstelle oder regionalen Metrologie-Organisationen genügen. Besonders hinzuweisen ist im Rahmen dieser Richtlinie auf folgende Punkte:

- die Nennung von angewendeten Festlegungen oder Verfahren
- die Messwerte und die damit verbundenen Messunsicherheiten
- auf bestimmte (bspw. ganzzahlige) Werte inter- oder extrapolierte „Ergebnisse“ sind kein Bestandteil des Kalibrierscheins, können aber ergänzend im Anhang angegeben werden. Die zusätzliche Unsicherheitskomponente ist hier zu berücksichtigen.
- Aussagen zur Konformität mit einer festgelegten messtechnischen Spezifikation oder Norm sind auf Kundenwunsch zulässig.
- Wird eine Kennlinienapproximation durchgeführt, so ist neben den berechneten Koeffizienten auch die Unsicherheit dieser Kennlinie anzugeben. [9]
- Angabe zum Hystereseverhalten (siehe Kapitel 8.10) und zur Eigenerwärmung (siehe Kapitel 8.8)
- Eingestellte Messstromstärke (wenn AC: Frequenz, DC: alternierend / unipolar), Bestromung (kontinuierlich / gepulst)
- Wenn ein zu kalibrierendes Gerät justiert oder repariert wurde, müssen die Kalibrierergebnisse, falls verfügbar, vor und nach der Justierung oder Reparatur angegeben werden. Dieser Fall wird insbesondere bei direktanzeigenden Thermometern auftreten.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	24 / 56

11 Literaturverzeichnis

- [1] H. Preston-Thomas, The International Temperature Scale of 1990, Metrologia 27.1, 1990.
- [2] BIPM, Guide to the Realization of the ITS-90, publication of the Consultative Committee for Thermometry (CCT), 2018.
- [3] DIN EN 60751: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2008), DIN, 2009.
- [4] OIML, R 84: Platinum, copper, and nickel resistance thermometers, 2003.
- [5] F. Bernhard, Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2014.
- [6] BIPM, Guide on Secondary Thermometry – Thermistor Thermometry, publication of the Consultative Committee for Thermometry (CCT), 2014.
- [7] EURAMET, technical guide 1: Extrapolation of SPRT calibrations below the triple point of argon, 83.8058 K, and traceability in baths of liquid nitrogen at ~77.3 K, 2017.
- [8] DIN EN ISO/IEC 17025 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, 2018.
- [9] DKD, Richtlinie DKD-R 5-6: Bestimmung von Thermometerkennlinien, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [10] DKD, Richtlinie DKD-R 5-4: Kalibrierung von Temperatur-Blockkalibratoren, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [11] DKD, Richtlinie DKD-R 5-7: Kalibrierung von Klimaschränken, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [12] D.R. White and C.L. Jongenelen, The Immersion Characteristics of Industrial PRTs, International Journal of Thermophysics, 31, p. 1685–1695, 2010.
- [13] D. Curtis, Thermal hysteresis and stress effects in platinum resistance thermometers, Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, vol. 5, ed. by J.F. Schooley (AIP, New York), p. 803–812, 1982.
- [14] D.R. White, C.L. Jongenelen, P. Saunders, The Hysteresis Characteristics of Some Industrial PRTs, Int. J. Thermophys. 31, p. 1676-1684, 2010.
- [15] EA-4/02 M: 2022, Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (Deutsche Übersetzung), DAkkS, Übersetzung vom 31.08.2022.
- [16] J.V. Nicholas und D.R. White: Traceable Temperatures – An Introduction to Temperature Measurement and Calibration 2nd. Ed., John Wiley & Sons LTD., Chichester, reprinted 2005.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	25 / 56

Anhang A – Messunsicherheitsbilanzen – Beispiele

Die Messunsicherheit bei der Kalibrierung eines Thermometers hängt von der verwendeten Kalibriermethode, den Unsicherheitsbeiträgen der Temperiereinrichtung (Fixpunktzelle, Ofen, Bad, Blockkalibrator, ...), der Unsicherheit aus der Kalibrierung der Normale, den Eigenschaften der eingesetzten Messmittel und den Eigenschaften des zu kalibrierenden Widerstandsthermometers (ggf. einschließlich der zugehörigen Messeinrichtungen wie Transmitter bzw. Digitalmessgerät) ab. Es kann daher keine allgemeine Vorgabe für die Messunsicherheit bestimmter Typen von Thermometern geben. Die in diesem Abschnitt behandelten Fälle für die Berechnung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung sind deshalb nicht unmittelbar auf eine tatsächlich durchgeführte Kalibrierung zu übertragen; vielmehr sind in jedem Einzelfall die Beiträge zur Messunsicherheit sorgfältig individuell zu bestimmen.

Bei akkreditierten Kalibrierlaboratorien sind im Rahmen des jeweiligen Akkreditierungsverfahrens von der Akkreditierungsstelle sogenannte „kleinste angebbare Messunsicherheiten“ festgelegt worden. Diese können von den Kalibrierlaboratorien aber in der Regel nur dann erreicht werden, wenn jeweils die besten verfügbaren Messmittel eingesetzt werden und der Kalibriergegenstand sich nahezu ideal verhält. Dabei muss der zur Bestimmung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit herangezogene „nahezu ideale Kalibriergegenstand“ real existieren, so dass für seine Beiträge in der Messunsicherheitsbilanz keine Annahmen oder „Nullwerte“ sondern nachgewiesene Beiträge angesetzt werden können. Akkreditierte Kalibrierlaboratorien dürfen in Kalibrierscheinen keine Messunsicherheiten angeben, die kleiner sind als die (akkreditierte) kleinste angebbare Messunsicherheit.

Im Folgenden werden vier Beispiele für die Kalibrierung von verschiedenen Typen von Thermometern angegeben:

- Kalibrierung eines Präzisions-Widerstandsthermometers mit einer AC-Messbrücke,
- Kalibrierung eines IPRT mit einem Widerstandsmessgerät,
- Kalibrierung eines direktanzeigenden elektrischen Thermometers,
- Kalibrierung eines Thermometers mit Messumformer und analogem Ausgang.

In den nachfolgenden Beispielen wird nur die Kalibrierung einer Temperatur betrachtet. Normalerweise werden Thermometer bei mehreren Temperaturen kalibriert und aus diesen Werten eine Kennlinie berechnet, deren Unsicherheit größer ist als die Messunsicherheit bei den einzelnen Kalibriertemperaturen. Für die Bestimmung dieser Kennlinie sowie für die Bestimmung der Unsicherheit, die auf der Basis dieser Kennlinie mit dem Thermometer im Kalibrierbereich erreichbar ist, wird auf die Richtlinie DKD-R 5-6 [9] verwiesen.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	26 / 56

A.1: Kalibrierung eines Widerstandsthermometers mit einer Messbrücke

Die Kalibrierung des Präzisions-Widerstandsthermometers erfolgt durch Vergleich mit zwei SPRTs (25 Ω) im Vergleichsverfahren bei einer nominellen Temperatur von 180 °C. Die Messungen werden in einem gerührten Flüssigkeitsbad mit Öl als Fluid ohne Ausgleichsblock durchgeführt. Der Widerstand der Normalthermometer (SPRTs) wird mit einer Widerstandsmessbrücke mit direkter Temperaturanzeige bzw. direkter Widerstandsanzeige und einem 100 Ω Normalwiderstand bestimmt. Die Normalthermometer, die Messbrücke und der Normalwiderstand wurden von einem NMI bzw. einem akkreditierten Laboratorium kalibriert. Nach einer Angleichzeit von zwei Stunden wurde über einen Zeitraum von 10 Minuten der arithmetische Mittelwert aus jeweils 60 Einzelwerten gebildet. Die Messunsicherheitsbilanz ist in zwei Schritte gegliedert.

1. Bestimmung der Referenztemperatur im Ölbad.
2. Bestimmung des zugehörigen Widerstandes des Präzisionswiderstandsthermometers (Kalibriergegenstand), der zugehörigen Messabweichung zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] sowie der dazugehörenden erweiterten Messunsicherheit.

Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Ölbad:

Die Bestimmung der Referenztemperatur erfolgt aus dem Mittelwert der mit beiden Normalthermometern gemessenen Temperatur des Bades. Die Widerstände beider Normale werden mit einer Messbrücke und einem Referenzwiderstand gemessen. In der Messbrücke können die Koeffizienten der Kennlinie beider SPRT hinterlegt werden, so dass die Brücke direkt in die Temperaturen umrechnet und diese anzeigt.

Modellgleichung:

$$\begin{aligned}
T_S = & T_{m,S} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{cal},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{Int},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{Drift},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{EEw},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{Hyst},S1} \\
& + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{cal},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{Int},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{Drift},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{EEw},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta T_{\text{Hyst},S2} \\
& + \delta T_{i,S1-S2} + \delta T_{\text{Res},S} + c_T \cdot \delta R_{\text{Par},S} + \delta T_{\text{Wa}} + \delta T_{\text{axial}} + \delta T_{\text{radial}} + \delta T_{\text{Instab}} \\
& + c_T \cdot N \cdot (\delta R_{\text{Ref},\text{Cal}} + \delta R_{\text{Ref},\text{Drift}} + \delta R_{\text{Ref},\text{T}}) + c_T \cdot R_{\text{Ref}} \cdot (\delta N_{\text{Br},\text{Cal}} + \delta N_{\text{Br},\text{Drift}})
\end{aligned} \tag{7}$$

Der Empfindlichkeitskoeffizient c_T ergibt sich aus der Kennlinie der SPRT bei 180 °C zu

$$c_T = 10,4 \text{ K}/\Omega .$$

Das Brückenverhältnis N ist das Verhältnis des Widerstandes der Normalthermometer R_S bei 180 °C zum Widerstand des Referenzwiderstandes $R_{\text{Ref}} = 100 \Omega$.

Es gilt: $N = R_S/R_{\text{Ref}} = 0,421$.

Damit ergibt sich für $c_T \cdot N = 4,38 \text{ K}/\Omega$ und für $c_T \cdot R_{\text{Ref}} = 1040 \text{ K}$.

Diese Modellgleichung gilt für den Fall, dass die Beiträge (Kalibrierung, Interpolation, Drift, Eigenerwärmung und Hysterese) der beiden Normalthermometer als unkorreliert voneinander angesetzt werden können.

Dies ist zum Beispiel dann näherungsweise erfüllt, wenn beide Normalthermometer nicht zum gleichen Zeitpunkt vom gleichen Kalibrierlaboratorium unter Benutzung der gleichen Normale kalibriert wurden. Idealerweise sind die Kalibriertermine beider Normale um die halbe Kalibrierperiode gegeneinander verschoben.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	27 / 56

Die Drift, die Eigenerwärmung und die Hysterese sind insbesondere dann nicht oder sehr wenig korreliert, wenn unterschiedliche Typen der Normale oder unterschiedliche Hersteller der SPRT verwendet werden.

Möglich ist auch, die beiden Normale nicht ständig zusammen in Kalibrierungen einzusetzen, so dass diese nicht ständig den identischen Einflüssen ausgesetzt sind.¹

Gelten die Beiträge beider Normale wegen Nichterfüllung dieser Bedingungen als korreliert, sollten die jeweiligen Beiträge unter Berücksichtigung der Korrelation zu einem zugehörigen Unsicherheitsbeitrag des Mittelwertes zusammengefasst und dieser zusammengefasste Wert statt der beiden Einzelbeiträge in die Messunsicherheitsbilanz eingesetzt werden (für eine Abschätzung eines Maximalwertes für diesen zusammengefassten Unsicherheitsbeitrag siehe auch EA-4/02 M: 2022, Anhang D [15]).

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$T_{m,S}$:

Der Mittelwert der mit den zugehörigen Anzeigekorrekturen korrigierten relativen Temperaturanzeigen der beiden SPRTs wird aus allen Einzelmessungen der Normalthermometer bestimmt (jeweils 60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen der Normalthermometer bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M: 2022 [15]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 180,079 °C sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,001 K.

$\delta T_{cal,S1}, \delta T_{cal,S2}$:

Korrektur der Temperatur der Normalthermometer aufgrund ihrer Kalibrierung. Die Normalthermometer sind an Fixpunkten der ITS-90 (WTP, Sn, Zn) kalibriert. In den zugehörigen Kalibrierscheinen sind die Koeffizienten für den Bereich WTP - Zn (0,01 °C bis 419,527 °C) für die Messstromstärke von 1 mA und extrapoliert auf 0 mA sowie die zugehörige Messunsicherheit für den Bereich 0 °C bis 419 °C angegeben. Die Koeffizienten für die Messstromstärke von 1 mA wurden für jedes Thermometer in der Messbrücke hinterlegt. Die Anzeige der Temperatur jedes Normalthermometers wird von der Messbrücke mit den individuellen Koeffizienten für die Messstromstärke von 1 mA aus dem jeweiligen zugehörigen Kalibrierschein berechnet. Eine Kalibrierkorrektur ist damit bereits berücksichtigt und muss nicht weiter betrachtet werden. Die erweiterte Messunsicherheit U der Temperatur im Bereich 0 °C bis 419 °C wird dem jeweiligen Kalibrierschein entnommen ($U_{(S1)} = 4$ mK und $U_{(S2)} = 5$ mK normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordneten Standardunsicherheiten betragen damit $u_{(S1)} = 2$ mK und $u_{(S2)} = 2,5$ mK. Die Unsicherheitskomponente δT_{EEW} aufgrund der Eigenerwärmung wird an anderer Stelle beschrieben.

$\delta T_{Int,S1}, \delta T_{Int,S2}$:

Korrektur der Temperaturanzeige der Normalthermometer aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten. Dieser Beitrag ist in der im jeweiligen Kalibrierschein angegebenen

¹ Es ist daher zu empfehlen:

- mehr als zwei Normalthermometer vorzuhalten (Diversität empfohlen)
- bei jeder nächsten Kalibrierung eine andere Kombination der Normalthermometer aus dem Pool zu entnehmen
- alle Normalthermometer einzeln rekali-brieren zu lassen (ggf. auch bei verschiedenen Laboratorien)

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	28 / 56

Unsicherheit für den Bereich von 0 °C bis 419 °C bereits enthalten und muss hier nicht weiter berücksichtigt werden.

Sollte der Kalibrierschein der Normale keine Unsicherheit für den Bereich, sondern nur die Unsicherheit an den Kalibrierpunkten angeben, so ist dieser Beitrag gemäß DKD-R 5-6 [9] zu bestimmen und entsprechend anzusetzen. Es wird in diesem Falle ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung gemäß Tabelle 6.1 oder Tabelle 6.2 nach DKD-R 5-6 [9] angesetzt.

$$\delta T_{\text{Drift},S1}, \delta T_{\text{Drift},S2} :$$

Korrektur der gemittelten Temperatur der Normalthermometer aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung. Aus den letzten Kalibrierungen der Normale ergab sich eine maximale Drift der Normalthermometer von weniger als 3 mK pro Jahr. Diese Drift stellt für jedes Normal einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbweite von 3 mK dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 1,7 mK.

$$\delta T_{\text{EEw},S1}, \delta T_{\text{EEw},S2} :$$

Korrektur der gemittelten Temperatur der Normalthermometer aufgrund ihrer Eigenerwärmung. Während der Messung werden die Widerstände der Normalthermometer von der Messbrücke mit einer Messstromstärke von 1 mA gemessen. Grundsätzlich wird die (ggf. unterschiedliche) Eigenerwärmung der beiden Normalthermometer näherungsweise dadurch berücksichtigt, dass für die Umrechnung der Thermometerwiderstände in die Temperaturwerte die Koeffizienten für die Messstromstärke von 1 mA aus den zugehörigen Kalibrierscheinen verwendet werden. Es verbleibt jedoch noch eine Unsicherheit durch Eigenerwärmung, bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Ankopplungen der Thermometersensoren an das umgebende Temperaturfeld. Dieser Beitrag wird durch die im Kalibrierschein für die SPRT angegebene Eigenerwärmung abgeschätzt.

Aus den letzten Kalibrierscheinen der Normale ergab sich eine maximale Eigenerwärmung der Normalthermometer von kleiner 2 mK. Der Beitrag der Eigenerwärmung stellt für jedes Normal einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbweite von 2 mK dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 1,2 mK.

$$\delta T_{\text{Hyst},S1}, \delta T_{\text{Hyst},S2} :$$

Korrektur der Temperatur der Normalthermometer aufgrund einer möglichen Hysterese. Die Hysterese ist bei SPRT sehr klein und wird durch mehrfache Wiederholung der Fixpunkte insbesondere auch des Wassertripelpunktes bei der Kalibrierung überprüft. Ein eventuell gefundener kleiner Instabilitäts- oder Hysteresebeitrag ist in der in den Kalibrierscheinen der SPRTs angegebenen erweiterten Messunsicherheit berücksichtigt.

Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,0 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 K.

Sollte es sich bei den Normalthermometern nicht um SPRTs sondern um IPRTs handeln, muss die Hysterese separat bestimmt (siehe Kapitel 8.10) und als Halbweite einer Rechteckverteilung berücksichtigt werden.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	29 / 56

$\delta T_{i,S1-S2}$:

Korrektur der gemittelten Temperatur der Normalthermometer aufgrund der Differenz der Anzeigen der beiden Temperaturen der beiden SPRTs. Der zwischen den beiden SPRTs beobachtete Unterschied der gemessenen Temperatur darf nicht größer als $\pm 3,5$ mK ($\pm 0,7 \cdot U_{cal,S}$) sein. Liegt der Unterschied nicht innerhalb dieser Grenzen, müssen die Beobachtungen wiederholt und/oder die Gründe für die festgestellten Differenzen eingehender untersucht werden.

Beide Thermometer zeigen eine Anzeigedifferenz von 3 mK. Das Kriterium ist damit erfüllt und der Mittelwert der Anzeigen wird als Referenzwert benutzt.

Solange die Differenz der Anzeigen beider Normalthermometer deutlich kleiner als die Unsicherheit der Kalibrierung der Normalthermometer ist, muss für den Mittelwert keine zusätzliche Messunsicherheit angesetzt werden. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwerte der Verteilung von 0,0 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 K.²

$\delta T_{Res,S}$:

Korrektur aufgrund der Auflösung der von der Messbrücke angezeigten Temperaturen der Normalthermometer. Die Auflösung der Temperaturanzeige beträgt 1 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwerte der Verteilung von 0,5 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 mK.

$\delta R_{Par,S}$:

Korrektur des Widerstandes der Normalthermometer aufgrund der parasitären Thermospannungen im Messkreis der Normalthermometer. Da die Messbrücke mit alternierendem Gleichstrom arbeitet und jeder angezeigte Messwert eine Mittelung aus beiden Stromrichtungen darstellt, heben sich eventuelle Messabweichungen aufgrund parasitärer Thermospannungen im Messkreis näherungsweise auf. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Verteilung von 0,0 Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 Ω .

δT_{Wa} :

Korrektur der Temperatur der Normalthermometer aufgrund einer Wärmeableitung der Normalthermometer. Beide Normalthermometer haben einen Außendurchmesser von 7 mm. Die Eintauchtiefe im Bad beträgt 200 mm. Die Normalthermometer tauchen damit mindestens das 20-fache ihres Durchmessers zzgl. der Sensorlänge in das Bad ein. Der abgeschätzte Wärmeableitfehler ist damit kleiner als 0,1 mK (Abschätzung nach Traceable Temperatures – An Introduction to Temperature Measurement and Calibration [16]) und aufgrund der Instabilität und Inhomogenität des Bades nicht direkt messbar.

Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwerte der Verteilung von 0,1 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 mK.

² Sollte die Abweichung der Anzeigen beider Normale größer als das 0,7-fache der erweiterten Kalibrierunsicherheit der Normale sein und keine Untersuchung der Ursachen und Wiederholung der Messungen erfolgen, dann ist die Differenz der Anzeigen beider Normale als halbe Breite der Rechteckverteilung zu $\delta T_{i,S1-S2}$ anzusetzen.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	30 / 56

Sollte die Eintauchtiefe geringer als das 15-fache des Durchmessers zzgl. Sensorlänge sein, dann muss der Wärmeableitfehler durch Herausziehen der Normale um mindestens den doppelten Durchmesser bestimmt und berücksichtigt werden.

δT_{axial} :

Korrektur der lokalen Temperatur im Kalibrierbad aufgrund der axialen Inhomogenität der Temperatur im Messvolumen. Eine Untersuchung des Bades hat ergeben, dass die maximale Abweichung der Temperatur in axiale Richtung im Messvolumen ± 10 mK beträgt.

Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 10 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 5,8 mK.

δT_{radial} :

Korrektur der lokalen Temperatur im Kalibrierbad aufgrund der radialen Inhomogenität der Temperatur im Messvolumen. Eine Untersuchung des Bades hat ergeben, dass die maximale Abweichung der Temperatur in radialer Richtung im Messvolumen ± 8 mK beträgt.

Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 8 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 4,6 mK.

δT_{Instab} :

Temperaturkorrektur aufgrund der Instabilität der Temperatur im Kalibriervolumen. Die Untersuchung des Kalibriervolumens ergab eine maximale Abweichung der Temperatur vom Mittelwert über 30 Minuten von ± 6 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 6 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 3,5 mK.

$\delta R_{\text{Ref,Cal}}$:

Korrektur des Referenzwiderstandes aufgrund der Kalibrierung des Referenzwiderstandes. Die erweiterte relative Unsicherheit der Kalibrierung des 100 Ω Referenzwiderstandes ist im Kalibrierschein mit $1 \cdot 10^{-6}$ angegeben. Die erweiterte Unsicherheit des Widerstandes aufgrund der Kalibrierung beträgt damit 0,1 m Ω . Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,05 m Ω .

$\delta R_{\text{Ref,Drift}}$:

Korrektur des Referenzwiderstandes aufgrund der Drift des Referenzwiderstandes seit der letzten Kalibrierung. Das Rekalibrierintervall beträgt 1 Jahr. Gemäß Herstellerspezifikation liegt die maximale Drift innerhalb eines Jahres in den Grenzen $\pm 6 \cdot 10^{-6}$. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbweite von 0,6 m Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,35 m Ω .

$\delta R_{\text{Ref,T}}$:

Korrektur des Referenzwiderstandes aufgrund der Abhängigkeit des Referenzwiderstandes von der Temperatur. Der Referenzwiderstand ist bei 23 °C kalibriert. Dies ist auch die Solltemperatur der Umgebung bei seinem Einsatz. Der Hersteller spezifiziert eine

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	31 / 56

Temperaturabhängigkeit von $3 \cdot 10^{-6} / 5 \text{ K} = 0,6 \cdot 10^{-6} / \text{K}$. Bei einer zulässigen Änderung der Umgebungstemperatur von $\pm 3 \text{ K}$ ergibt sich eine rechteckverteilte Unsicherheit des Widerstandswertes von $\pm 1,8 \cdot 10^{-6} \triangleq 0,18 \text{ m}\Omega$. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann $0,10 \text{ m}\Omega$.

$\delta N_{\text{Br,Cal}}$:

Korrektur der Anzeige der Messbrücke aufgrund der Kalibrierung der Messbrücke. Die erweiterte relative Unsicherheit der Kalibrierung der Messbrücke ist im Kalibrierschein mit $2 \cdot 10^{-6}$ angegeben. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann $1 \cdot 10^{-6}$.

$\delta N_{\text{Br,Drift}}$:

Korrektur der Anzeige der Messbrücke aufgrund der Drift der Messbrücke seit der letzten Kalibrierung. Das Rekalibrierintervall beträgt 1 Jahr. Gemäß Herstellerspezifikation liegt die maximale Drift innerhalb eines Jahres in den Grenzen $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbweite von $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann $0,58 \cdot 10^{-6}$.

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$T_{m,S}$	Mittelwert der korrigierten Ablesungen der Normale	180,079 °C	0,0010 K	0,0010 K	Normal	1	1,0	0,00100 K
$\delta T_{cal,S1}$	Kalibrierung Normal 1	0,000 K	0,0040 K	0,0020 K	Normal	2	0,5	0,00100 K
$\delta T_{Int,S1}$	Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten Normal 1	0,000 K	0,0000 K	0,0000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,00000 K
$\delta T_{Drift,S1}$	Drift von Normal 1	0,000 K	0,0030 K	0,00173 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	8,660E-04 K
$\delta T_{EEw,S1}$	Eigenerwärmung Normal 1	0,000 K	0,0020 K	0,00115 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	5,774E-04 K
$\delta T_{Hyst,S1}$	Hysterese Normal 1	0,000 K	0,0000 K	0,00000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,00000 K
$\delta T_{cal,S2}$	Kalibrierung Normal 2	0,000 K	0,0050 K	0,00250 K	Normal	2	0,5	0,00125 K
$\delta T_{Int,S2}$	Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten Normal 2	0,000 K	0,0000 K	0,00000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,000E+00 K
$\delta T_{Drift,S2}$	Drift von Normal 2	0,000 K	0,0030 K	0,00173 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	8,660E-04 K
$\delta T_{EEw,S2}$	Eigenerwärmung Normal 2	0,000 K	0,0020 K	0,00115 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	5,774E-04 K
$\delta T_{Hyst,S2}$	Hysterese Normal 2	0,000 K	0,0000 K	0,00000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,00000 K
$\delta T_{i,S1-S2}$	Differenz zwischen den BN	0,000 K	0,0000 K	0,00000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00000 K
$\delta T_{Res,S}$	Auflösung Messbrücke	0,000 K	0,0005 K	2,89E-04 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	2,887E-04 K
$\delta R_{Par,S}$	parasitäre Thermospannungen	0,000 Ω	0,0000 Ω	0,00000 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	10,4 K/ Ω	0,000E+00 K
δT_{Wa}	Wärmeableitung	0,000 K	0,0001 K	5,77E-05 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	5,774E-05 K
δT_{axial}	axiale Inhomogenität im Bad	0,000 K	0,0100 K	0,00577 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	5,774E-03 K
δT_{radial}	radiale Inhomogenität im Bad	0,000 K	0,0080 K	0,00462 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	4,619E-03 K
δT_{Instab}	zeitliche Instabilität im Bad	0,000 K	0,0060 K	0,00346 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	3,464E-03 K
$\delta R_{Ref,Cal}$	Kalibrierung des Referenzwiderstands	0,000 Ω	0,0001 Ω	0,00005 Ω	Normal	2	4,40 K/ Ω	2,200E-04 K
$\delta R_{Ref,Drift}$	Drift des Referenzwiderstands	0,000 Ω	0,0006 Ω	3,46E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,40 K/ Ω	1,524E-03 K
$\delta R_{Ref,T}$	Temperaturabhängigkeit des Referenzwiderstands	0,000 Ω	0,00018 Ω	1,04E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,40 K/ Ω	4,573E-04 K
$\delta N_{Br,Cal}$	Kalibrierung der Messbrücke	0,000	1,00E-06	1,00E-06	Normal	1	1040 K	1,040E-03 K
$\delta N_{Br,Drift}$	Drift der Messbrücke	0,000	1,00E-06	5,77E-07	Rechteck	$\sqrt{3}$	1040 K	6,004E-04 K
T_S	Temperatur	180,07900 °C					$u =$	0,00875 K

Tabelle 2: Messunsicherheitsbilanz der Temperatur im Ölbad (gemessen mit den Normalthermometern)³

Schritt 2: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Kalibriergegenstand angezeigten Temperatur zur im Ölbad gemessenen Temperatur stellt das Kalibrierergebnis dar.

Bei der Temperatur T_X wird der Widerstand des Kalibriergegenstandes (Pt100-Präzisionsthermometer) gemessen. Für die Messung werden eine Widerstandsmessbrücke und ein Normalwiderstand gleichen Typs, wie sie auch schon bei der Messung mit den Normalthermometern verwendet wurden, eingesetzt. In diesem Fall wird jedoch die direkte Widerstandsmessung mit der Messbrücke benutzt.

³ Die Spalte „Unsicherheit oder Halbbreite“ enthält bei einer Normalverteilung die Standardmessunsicherheit oder die erweiterte Messunsicherheit und bei einer Rechteckverteilung die Halbbreite.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	33 / 56

Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$\Delta R(T_X) = R_S^{\text{EN60751}}(T_S) - R_{\text{Br}} + c_R \cdot \delta T_S + \delta R_{\text{Res}} + \delta R_{\text{Par}} + \delta R_{\text{EEW}} + \delta R_{\text{Wa}} + \delta R_{\text{Hyst}} \quad (8)$$

$$+ N \cdot (\delta R_{\text{Ref,Cal}} + \delta R_{\text{Ref,Drift}} + \delta R_{\text{Ref,T}}) + R_{\text{Ref}} \cdot (\delta N_{\text{Br,Cal}} + \delta N_{\text{Br,Drift}})$$

Der Empfindlichkeitskoeffizient c_R ergibt sich für ein Pt100 bei 180 °C zu: $c_R = 0,37 \, \Omega/\text{K}$ bzw.

$$c_T = 2,70 \, \text{K}/\Omega$$

Für die Beiträge δR_{Par} , $\delta R_{\text{Ref,Cal}}$, $\delta R_{\text{Ref,Drift}}$, $\delta R_{\text{Ref,T}}$, $\delta N_{\text{Br,Cal}}$ und $\delta N_{\text{Br,Drift}}$ gelten die gleichen Betrachtungen wie bei der Bestimmung der Temperatur im Ölbad. Sie werden daher hier nicht wiederholt. Die anderen Beiträge ergeben sich wie folgt:

$$R_S^{\text{EN60751}}(T_S) :$$

Die Temperatur des Ölbad wurde im ersten Schritt mit den beiden Normalthermometern zu 180,079 °C bestimmt. Der zugehörige Widerstand eines Pt100 nach EN 60751 [3] beträgt 168,5075 Ω .

Das Brückenverhältnis N ist das Verhältnis des Widerstands R_S^{EN60751} des Pt100 bei 180,079 °C zum Widerstand des Referenzwiderstandes $R_{\text{Ref}} = 100 \, \Omega$. Es ergibt sich daher $N = \frac{R_S^{\text{EN60751}}}{R_{\text{Ref}}} = 1,68$.

$$R_{\text{Br}}, \delta R_{\text{Br}} :$$

Die Messbrücke bestimmt intern das Verhältnis des Thermometerwiderstandes zum externen Referenzwiderstand und berechnet mit dem in der Software hinterlegten Kalibrierwert des Referenzwiderstandes den Widerstand des Thermometers und zeigt diesen an.

Der Mittelwert der Brückenablesung wird aus allen Einzelmessungen des Thermometerwiderstandes bei der Kalibriertemperatur bestimmt (jeweils 60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen der Messbrücke bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M: 2022 [15]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 168,4783 Ω sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,0006 Ω .

$$\delta T_S :$$

Korrektur aufgrund der Temperatur des Ölbad. Die Unsicherheit der Temperatur im Ölbad wurde im ersten Schritt bestimmt. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 8,8 mK.

$$\delta R_{\text{Res}} :$$

Korrektur des Thermometerwiderstandes aufgrund der Auflösung des von der Messbrücke angezeigten Widerstandes des Thermometers bei der Kalibriertemperatur. Die Auflösung der Widerstandsanzeige beträgt 1 m Ω . Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwerte

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	34 / 56

der Verteilung von 0,5 mΩ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 mΩ.

δR_{EEw} :

Korrektur der Temperatur des zu kalibrierenden Thermometers aufgrund seiner Eigenerwärmung. Während der Messung wird der Widerstand des Thermometers von der Messbrücke mit einer Messstromstärke von 1 mA gemessen. Die Brücke bietet die Möglichkeit zusätzlich den Widerstand mit einer Messstromstärke von 1,41 mA zu messen (doppelte elektrische Verlustleistung \Rightarrow näherungsweise doppelte Eigenerwärmung). Der Widerstand des Thermometers erhöht sich dabei um 0,9 mΩ. Diese Änderung wird daher als maximale, durch Eigenerwärmung des Thermometers bedingte, Widerstandsunsicherheit von 0,9 mΩ angesetzt. Sie stellt einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbweite 0,9 mΩ dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,52 mΩ.

Mit der Empfindlichkeit des Pt100 $c_T = 1/c_R = 2,70 \text{ K}/\Omega$ entspricht dies einer Standardunsicherheit durch Eigenerwärmung von 1,4 mK.

δR_{Wa} :

Korrektur aufgrund einer Wärmeableitung des Pt100. Das zu kalibrierende Thermometer hat einen Außendurchmesser von 8 mm. Die Eintauchtiefe im Bad beträgt 200 mm. Da über den inneren Aufbau nichts bekannt ist, wird der Wärmeableitfehler durch Herausziehen um den doppelten Durchmesser (16 mm) experimentell bestimmt. Der Thermometerwiderstand verringert sich nach dem Herausziehen um 0,4 mΩ. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,4 mΩ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,23 mΩ.

Mit der Empfindlichkeit des Pt100 entspricht dies einer Standardunsicherheit durch Wärmeableitung von 0,6 mK.

δR_{Hyst} :

Korrektur der Temperatur des Pt100 aufgrund der Hysterese. Die Hysterese bei IPRTs ist je nach Aufbau i.d.R. nicht vernachlässigbar (siehe Kapitel 8.10). Das Thermometer wird für den Bereich von 0 °C bis 400 °C kalibriert. Der gewünschte Kalibrierpunkt von 180 °C liegt ziemlich in der Mitte des zu kalibrierenden Bereiches. Daher wird die Hysterese des Thermometers bei diesem Punkt ermittelt, indem der Widerstand des Thermometers bei dieser Kalibriertemperatur aus einem von 0 °C ansteigenden und einem von 400 °C fallenden Temperaturverlauf gemessen wird. Es wurde ein Unterschied des Thermometerwiderstandes aus beiden Messungen (mit der Steilheit der Thermometerkennlinie auf gleiche Temperaturen korrigiert) von 7,0 mΩ bestimmt. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite von 7,0 mΩ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 4,04 mΩ. Mit der Empfindlichkeit des Pt100 entspricht dies einer Standardunsicherheit durch Hysterese von 11 mK.

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
R_{Br}	Brückenanzeige für den Widerstand des Pt100	168,4783 Ω	6,00E-04 Ω	6,00E-04 Ω	Normal	1	1,0	6,000E-04 Ω
$R_S^{EN60751}(T_S)$	Widerstand nach EN 60751 zur Referenztemperatur im Ölbad	168,5075 Ω						
δT_S		0,0000 K	8,80E-03 K	8,80E-03 K	Normal	1	0,37 Ω/K	3,256E-03 Ω
δR_{Res}	Auflösung der Brückenanzeige	0,0000 Ω	5,00E-04 Ω	2,89E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	2,887E-04 Ω
δR_{Par}	parasitäre Thermospannungen	0,0000 Ω	0,00E+00 Ω	0,00E+00 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,000E+00 Ω
δR_{Ew}	Eigenerwärmung	0,0000 Ω	9,00E-04 Ω	5,20E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	5,196E-04 Ω
δR_{Wa}	Wärmeableitung	0,0000 Ω	4,00E-04 Ω	2,31E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	2,309E-04 Ω
δR_{Hyst}	Hysterese	0,0000 Ω	7,00E-03 Ω	4,04E-03 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	4,041E-03 Ω
$\delta R_{Ref,Cal}$	Kalibrierung des Referenzwiderstands	0,0000 Ω	1,00E-04 Ω	5,00E-05 Ω	Normal	2	1,68	8,400E-05 Ω
$\delta R_{Ref,Drift}$	Drift des Referenzwiderstands	0,0000 Ω	6,00E-04 Ω	3,46E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,68	5,820E-04 Ω
$\delta R_{Ref,T}$	Temperaturabhängigkeit des Referenzwiderstands	0,0000 Ω	1,80E-04 Ω	1,04E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,68	1,746E-04 Ω
$\delta N_{Br,Cal}$	Kalibrierung der Messbrücke	0,0000	2,00E-06	1,00E-06	Normal	2	100 Ω	1,000E-04 Ω
$\delta N_{Br,Drift}$	Drift der Messbrücke	0,0000	1,00E-06	5,77E-07	Rechteck	$\sqrt{3}$	100 Ω	5,774E-05 Ω
$\Delta R(T_X)$	Abweichung des Thermometerwiderstandes von der Normkennlinie nach EN 60751	-0,0292 Ω	$U = 0,011 \Omega \quad (k=2)$				$u = 0,0053 \Omega$	

Tabelle 3: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis Thermometerwiderstand

Das Präzisionswiderstandsthermometer hat bei 180,079 °C einen Widerstand von 168,4783 Ω . Dies entspricht einer Abweichung zur Normkennlinie nach EN 60751 [3] von -0,0292 Ω bei einer Standardmessunsicherheit u von 0,0053 Ω und einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,011 Ω .⁴

Wenn die Abweichung zur Normkennlinie und die zugeordnete Unsicherheit mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten eines Pt100 bei 180 °C $c_T = 2,70 \text{ K}/\Omega$ in Temperatur umgerechnet werden, ergibt sich eine Abweichung zur Normkennlinie von -80 mK bei einer erweiterten Messunsicherheit von 30 mK.

⁴ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten: „Das Präzisionswiderstandsthermometer hat bei 180,079 °C einen Widerstand von 168,4783 Ω . Dies entspricht einer Korrektur zur Normkennlinie nach EN 60751 [3] von 0,0292 Ω bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,011 Ω .“ Die Verwendung der Anzeigekorrektur bietet für den Anwender des Thermometers den Vorteil, dass der beste Schätzwert für die gemessene Temperatur / Widerstand durch Addition der Korrektur zur angezeigten Temperatur / Widerstand des Thermometers bestimmt werden kann.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	36 / 56

A.2: Kalibrierung eines IPRT in einem Blockkalibrator

Die Kalibrierung des IPRTs erfolgt durch Vergleich mit einem Gebrauchsnorm Pt100 (z. B. kalibriert nach Beispiel in A.1) in einem Temperatur-Blockkalibrator im Vergleichsverfahren bei einer nominellen Temperatur von 350 °C. Der Widerstand des Gebrauchsnormalthermometers (Pt100) wird mit einer Widerstandsmessbrücke mit direkter Temperaturanzeige mit internem Normalwiderstand bestimmt. Der Widerstand des IPRTs wird mit einem Widerstandsmessgerät gemessen. Als Kalibrierergebnis werden der Widerstand des IPRTs bei der Kalibriertemperatur sowie die zugehörige Temperaturabweichung zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] angegeben. Das Gebrauchsnormalthermometer, die Messbrücke und das Widerstandsmessgerät wurden von einem akkreditierten Kalibrierlaboratorium rückführbar kalibriert.

Nach einer Angleichzeit von einer Stunde wurde über einen Zeitraum von 10 Minuten der arithmetische Mittelwert aus jeweils 20 Einzelwerten gebildet. Die Messunsicherheitsbilanz ist in zwei Schritte gegliedert:

1. Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator.
2. Bestimmung des zugehörigen Widerstandes des IPRT, der zugehörigen Messabweichung zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] sowie der dazugehörigen erweiterten Messunsicherheit.

Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator

Die Bestimmung der Referenztemperatur erfolgt aus dem Mittelwert der mit dem Gebrauchsnorm gemessenen Temperatur des Ausgleichsblocks des Blockkalibrators. Der Widerstand des Gebrauchsnormals (Pt100) wird mit einer Messbrücke mit internem Referenzwiderstand gemessen und von der Messbrücke mit den aufgrund der Kalibrierung des Gebrauchsnormals bestimmten Koeffizienten in Temperatur angezeigt.

Modellgleichung:

$$T_S = T_{m,S} + \delta T_{cal,S} + \delta T_{Int,S} + \delta T_{Drift,S} + \delta T_{EEw,S} + \delta T_{Hyst,S} + \delta T_{Res,S} + c_T \cdot (\delta R_{Par,S} + \delta R_{Br,Cal} + \delta R_{Br,Drift}) + \delta T_{Wa} + \delta T_{axial} + \delta T_{radial} + \delta T_{Instab} \quad (9)$$

Der Empfindlichkeitskoeffizient c_T ergibt sich aus der Kennlinie eines Pt100 nach DIN EN 60751 [3] bei 350 °C zu $c_T = 2,85 \text{ K}/\Omega$.

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$T_{m,S}$:

Der Mittelwert, der mit der zugehörigen Anzeigekorrektur korrigierten relativen Temperaturanzeige des Gebrauchsnormals (Pt100), wird aus allen 20 Einzelmessungen bestimmt. Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des Normalthermometers bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M: 2022, Anhang D [15]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 350,256 °C sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,0055 K.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	37 / 56

$\delta T_{\text{cal,S}}$:

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Kalibrierung. Das Normalthermometer ist im Bereich von 0 °C bis 400 °C an insgesamt 6 Temperaturpunkten kalibriert. Im zugehörigen Kalibrierschein sind die Widerstände des Thermometers sowie die Temperaturabweichung zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] für die Messstromstärke 1 mA sowie die zugehörige Messunsicherheit für den Bereich 0 °C bis 400 °C angegeben.

Die Koeffizienten für die Messstromstärke von 1 mA wurden aus den Kalibrierdaten nach DKD-R 5-6:2018 [9] berechnet und in der Messbrücke hinterlegt. Die Anzeige der Temperatur des Normalthermometers wird von der Messbrücke mit den individuellen Koeffizienten berechnet. Eine Kalibrierkorrektur ist damit bereits berücksichtigt und muss nicht weiter betrachtet werden. Die maximale erweiterte Messunsicherheit U der Temperatur im Bereich 0 °C bis 400 °C wird dem Kalibrierschein entnommen ($U_{(S)} = 25$ mK; normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt damit $u_{(S)} = 12,5$ mK.

$\delta T_{\text{Int,S}}$:

Korrektur der Temperaturanzeige des Normalthermometers aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten. Dieser Beitrag ist in der im Kalibrierschein des Normalthermometers angegebenen Unsicherheit nicht enthalten, da der Kalibrierschein keine Koeffizienten für eine Interpolationsfunktion für den gesamten Bereich und damit auch keine Bereichsunsicherheit angibt. Dieser Beitrag muss daher separat berücksichtigt werden.

Die Koeffizienten einer Interpolationsfunktion für den Bereich 0 °C bis 400 °C bestimmt das Laboratorium selbst aus den 6 Kalibrierpunkten des Normalthermometers nach DKD-R 5-6:2018 [9]. Es wird eine Kennlinie nach DIN EN 60751 [3] in Form einer Callendar-Van-Dusen Gleichung approximiert. Die Koeffizienten werden in der Messbrücke zur Umrechnung des gemessenen Thermometerwiderstandes in die Temperatur verwendet. Nach DKD-R 5-6:2018 Tabelle 6.1 [9] ist daher für die Kennlinienapproximation ein rechteckverteilter Unsicherheitsbeitrag von 25 mK (Halbweite) anzusetzen. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 14,4 mK.

$\delta T_{\text{Drift,S}}$:

Korrektur der gemittelten Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung. Aus den letzten Kalibrierungen des Gebrauchsnormals ergab sich eine maximale Drift von < 10 mK pro Jahr. Diese Drift stellt einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbweite von 10 mK dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 5,8 mK.

$\delta T_{\text{EEw,S}}$:

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund seiner Eigenerwärmung. Während der Messung wird der Widerstand des Normalthermometers von der Messbrücke mit einer Messstromstärke von 1 mA gemessen. Grundsätzlich wird die Eigenerwärmung des Normalthermometers näherungsweise dadurch berücksichtigt, dass für die Umrechnung des Thermometerwiderstandes in die Temperatur die Koeffizienten für den Messstromstärke von 1 mA aus dem zugehörigen Kalibrierschein verwendet werden. Es verbleibt jedoch noch eine Unsicherheit durch Eigenerwärmung bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Ankopplungen des Thermometersensors an das umgebende Temperaturfeld unter Kalibrierbedingungen bzw. im Ausgleichsblock des Blockkalibrators. Da dieser Beitrag bereits in der Kalibrierunsicherheit des Normalthermometers enthalten ist, muss er hier nicht weiter

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	38 / 56

berücksichtigt werden. Es wird ein rechteckverteilter Restbeitrag mit der Halbweite von 3 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 1,7 mK.

Sollte die Eigenerwärmung in dem Kalibrierschein des Normalthermometers nicht angegeben sein dann muss er gemäß Kapitel 8.8 als rechteckverteilt mit der Halbweite von 30 mK angesetzt werden. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

$\delta T_{\text{Hyst,S}}$:

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund einer möglichen Hysterese. Die Hysterese wurde bei der Kalibrierung für den Kalibrierbereich von 0 °C bis 400 °C zu $\pm 3,5 \text{ m}\Omega \triangleq \pm 10 \text{ mK}$ bestimmt. Sie ist in der im Kalibrierschein angegebenen Messunsicherheit enthalten und muss hier nicht erneut berücksichtigt werden.

Es wird ein daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,0 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 K.

Sollte die Hysterese bei der Kalibrierung der Normalthermometer nicht bestimmt oder nicht in der kombinierten Messunsicherheit der Kalibrierung berücksichtigt worden sein, so muss die sie separat bestimmt (siehe Kapitel 8.10) und als Halbweite einer Rechteckverteilung berücksichtigt werden.

$\delta T_{\text{Res,S}}$:

Korrektur aufgrund der Auflösung der von der Messbrücke angezeigten Temperatur der Normalthermometer. Die Auflösung der Temperaturanzeige beträgt 1 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,5 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 mK.

$\delta R_{\text{Par,S}}$:

Korrektur aufgrund der parasitären Thermospannungen im Messkreis des Normalthermometers. Da die Messbrücke mit alternierendem Gleichstrom arbeitet und jeder angezeigte Messwert eine Mittelung aus beiden Stromrichtungen darstellt, heben sich eventuelle Messabweichungen aufgrund parasitärer Thermospannungen im Messkreis näherungsweise auf. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,0 Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 Ω .

$\delta R_{\text{Br,Cal}}$:

Korrektur aufgrund der Kalibrierung der Messbrücke. Die erweiterte Unsicherheit der Kalibrierung der Messbrücke ist im Kalibrierschein mit $2 \cdot 10^{-6}$ (erweiterte Messunsicherheit; $k = 2$) angegeben. Dies ergibt mit dem Widerstand des Normalthermometers bei der Kalibriertemperatur von 229,8 Ω eine Unsicherheit des Thermometerwiderstandes aufgrund der Kalibrierung der Messbrücke von 0,5 m Ω (normalverteilt; $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,25 m Ω .

$\delta R_{\text{Br,Drift}}$:

Korrektur aufgrund der Drift der Messbrücke seit der letzten Kalibrierung. Das Rekalibrierintervall beträgt 1 Jahr. Gemäß Herstellerspezifikation liegt die maximale Drift

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	39 / 56

innerhalb eines Jahres in den Grenzen 0,4 mΩ. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbweite von ±0,4 mΩ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,23 mΩ.

δT_{Wa} :

Korrektur aufgrund einer Wärmeableitung des Normalthermometers im Ausgleichsblock des Blockkalibrators. Das Gebrauchsnormalthermometer taucht in eine passende Bohrung (Differenz zwischen Außendurchmesser des Thermometers und Bohrungsdurchmesser kleiner als 1 mm, d. h. der Spalt ist kleiner als 0,5 mm, siehe auch DKD-R 5-4 [10]) im Ausgleichsblock maximal ein. Die Eintauchtiefe im Block beträgt 120 mm. Der Thermometerdurchmesser beträgt 8 mm. Der innere Aufbau des Thermometers ist nicht bekannt. Das Normalthermometer taucht damit weniger als das 15-fache seines Durchmessers zzgl. der Sensorlänge in den Block ein. Mit der Worst-case-Annahme einer Sensorlänge von max. 40 mm beträgt die „effektive“ Eintauchtiefe das 10-fache des Thermometerdurchmessers. Der abgeschätzte Wärmeableitfehler ist damit kleiner als $5 \cdot 10^{-5} \cdot (T - T_{\text{amb}}) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 320 \text{ K} = 16 \text{ mK}$ (Abschätzung nach Traceable Temperatures – An Introduction to Temperature Measurement and Calibration [16]).

Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 16 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 9,2 mK.

Alternativ könnte der Wärmeableitfehler auch durch Herausziehen des Normals um mindestens den doppelten Durchmesser bestimmt und berücksichtigt werden.

δT_{axial} :

Korrektur aufgrund der axialen Inhomogenität der Temperatur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators. Eine Untersuchung des Blockkalibrators nach DKD-R 5-4 [10] hat ergeben, dass die maximale Abweichung der Temperatur in axialer Richtung im Ausgleichsblock ±30 mK beträgt.

Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 30 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 17,3 mK.

δT_{radial} :

Korrektur aufgrund der radialen Inhomogenität der Temperatur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators. Eine Untersuchung des Blockkalibrators nach DKD-R 5-4 [10] hat ergeben, dass die maximale Abweichung der Temperatur in radialer Richtung im Messvolumen ±8 mK beträgt.

Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 8 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 4,6 mK.

δT_{Instab} :

Korrektur aufgrund der Instabilität der Temperatur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators. Die Untersuchung des Blockkalibrators nach DKD-R 5-4 [10] ergab eine maximale Abweichung der Temperatur vom Mittelwert über 30 Minuten von ±25 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter

Beitrag mit der Halbwerte der Verteilung von 25,0 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 14,4 mK.⁵

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbwerte	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$T_{m,S}$	Mittelwert der korrigierten Ablesungen des GN	350,2560 °C	0,0055 K	5,50E-03 K	Normal	1	1,0	5,50E-03 K
$\delta T_{cal,S}$	Kalibrierung des Gebrauchsnormals	0,0000 K	0,0250 K	1,25E-02 K	Normal	2	1,0	1,25E-02 K
$\delta T_{Int,S}$	Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten des GN	0,0000 K	0,0250 K	1,44E-02 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	1,44E-02 K
$\delta T_{Drift,S}$	Drift des Gebrauchsnormals	0,0000 K	0,0100 K	5,77E-03 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	5,77E-03 K
$\delta T_{EEw,S}$	Eigenerwärmung des GN	0,0000 K	0,0030 K	1,73E-03 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	1,73E-03 K
$\delta T_{Hyst,S}$	Hysterese des GN	0,0000 K	0,0000 K	0,00E+00 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00E+00 K
$\delta T_{Res,S}$	Auflösung Messbrücke	0,0000 K	0,0005 K	2,89E-04 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	2,89E-04 K
$\delta R_{Par,S}$	parasitäre Thermospannungen	0,0000 Ω	0,0000 Ω	0,00E+00 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	2,85 K/Ω	0,00E+00 K
$\delta R_{Br,Cal}$	Kalibrierung der Messbrücke	0,0000 Ω	0,0005 Ω	2,50E-04 Ω	Normal	2	2,85 K/Ω	7,13E-04 K
$\delta R_{Br,Drift}$	Drift der Messbrücke	0,0000 Ω	0,0004 Ω	2,31E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	2,85 K/Ω	6,582E-04 K
δT_{Wa}	Wärmeableitung	0,0000 K	0,0160 K	9,24E-03 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	9,238E-03 K
δT_{axial}	axiale Inhomogenität im BLK	0,0000 K	0,0300 K	1,73E-02 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	1,73E-02 K
δT_{radial}	radiale Inhomogenität im BLK	0,0000 K	0,0080 K	4,62E-03 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	4,62E-03 K
δT_{Instab}	zeitliche Instabilität im BLK	0,0000 K	0,0250 K	1,44E-02 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	1,44E-02 K
T_S	Temperatur im Blockkalibrator	350,2560 °C					$u = 0,0324$ K	

Tabelle 4: Messunsicherheitsbilanz der Temperatur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators (gemessen mit dem Gebrauchsnormalthermometer)

Schritt 2: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Kalibriergegenstand angezeigten Temperatur zur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators gemessenen Temperatur stellt das Kalibrierergebnis dar.

Bei der Temperatur T_X wird der Widerstand des Kalibriergegenstands (Pt100-IPRT) gemessen. Für die Messung wird ein Widerstandsmessgerät verwendet. Das Widerstandsmessgerät wird im 1-kΩ-Messbereich mit einer Messstromstärke von 1 mA im „True-Ohm-Modus“ (d. h. es wird mit beiden Stromrichtungen gemessen und intern gemittelt) benutzt.

Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$\Delta R(T_X) = R_S^{EN60751}(T_S) - R_{DVM} + c_R \cdot (\delta T_S + \delta T_{EEw}) + \delta R_{Res} + \delta R_{Par} + \delta R_{Wa} + \delta R_{Hyst} + \delta R_{Cal,DVM} + \delta R_{Drift,DVM} \quad (10)$$

⁵ Alternativ zur Untersuchung der Beiträge Instabilität und axiale und radiale Inhomogenität des Blockkalibrators können auch die Angaben aus einer Kalibrierung des Blockkalibrators nach DKD-R 5-4 [10] herangezogen werden.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	41 / 56

Der Empfindlichkeitskoeffizient c_R ergibt sich für ein Pt100 bei 350 °C zu: $c_R = 0,35 \frac{\Omega}{K}$.

Die einzelnen Beiträge ergeben sich wie folgt:

$R_S^{EN60751}(T_S)$:

Die Temperatur des Ausgleichsblockes des Blockkalibrators wurde im ersten Schritt mit dem Gebrauchsnormalthermometer zu 350,256 °C bestimmt. Der zugehörige Widerstand eines Pt100 nach DIN EN 60751 [3] beträgt 229,8058 Ω .

$R_{DVM}, \delta R_{DVM}$:

Die Messbrücke misst den Widerstand des zu kalibrierenden IPRT mit einer Messstromstärke von 1 mA im „True-Ohm-Modus“ (d. h. es wird mit beiden Stromrichtungen gemessen und intern gemittelt) und zeigt diesen an.

Der Mittelwert der Ablesung wird aus allen Einzelmessungen des Thermometerwiderstandes bei der Kalibriertemperatur bestimmt (jeweils 20 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen der Messbrücke bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M: 2022 [15]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 229,9905 Ω sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,0022 Ω .

δT_S :

Korrektur der Temperatur im Blockkalibrator. Die Unsicherheit der Temperatur im Blockkalibrator wurde im ersten Schritt bestimmt. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 32,4 mK.

δT_{EW} :

Korrektur der Temperatur des zu kalibrierenden Thermometers aufgrund seiner Eigenerwärmung. Während der Messung wird der Widerstand des Thermometers von der Messbrücke mit einer Messstromstärke von 1 mA gemessen. Das Widerstandsmessgerät bietet nicht die Möglichkeit, den Thermometerwiderstand mit verschiedenen Messstromstärken zu messen. Die Änderung des Thermometerwiderstandes aufgrund der Eigenerwärmung durch den Messstrom von 1 mA wird daher gemäß Kapitel 8.8 als maximale Temperaturunsicherheit von 30,0 mK angesetzt. Sie stellt einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbwerte 30,0 mK dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

δR_{Res} :

Korrektur aufgrund der Auflösung des vom Widerstandsmessgerät angezeigten Widerstandes des Thermometers bei der Kalibriertemperatur. Die Auflösung der Widerstandsanzeige beträgt 1 m Ω . Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwerte der Verteilung von 0,5 m Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 m Ω .

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	42 / 56

δR_{Par} :

Korrektur aufgrund der parasitären Thermospannungen im Messkreis des IPRT. Da das Widerstandsmessgerät mit alternierendem Gleichstrom arbeitet und jeder angezeigte Messwert eine Mittelung aus beiden Stromrichtungen darstellt, heben sich eventuelle Messabweichungen aufgrund parasitärer Thermospannungen im Messkreis näherungsweise auf. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,0 Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 Ω .

δR_{Wa} :

Korrektur aufgrund einer Wärmeableitung des IPRTs. Das zu kalibrierende Thermometer hat einen Außendurchmesser von 6 mm. Die Eintauchtiefe im Ausgleichsblock beträgt 120 mm. Da über den inneren Aufbau nichts bekannt ist, wird der Wärmeableitfehler durch Herausziehen um den doppelten Durchmesser (12 mm) experimentell bestimmt. Der Thermometerwiderstand verringert sich nach dem Herausziehen um 3,4 m Ω . Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 3,4 m Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 1,96 m Ω .

Mit der Empfindlichkeit des Pt100 entspricht dies einer Standardunsicherheit durch Wärmeableitung von 5,6 mK.

δR_{Hyst} :

Korrektur der Temperatur des IPRTs aufgrund der Hysterese. Die Hysterese ist bei IPRTs je nach Aufbau im Allgemeinen nicht vernachlässigbar. Sie wird nach Kapitel 8.10 bestimmt bzw. abgeschätzt. Das Thermometer wird nur mit ansteigenden Temperaturen kalibriert. Die Hysterese wird daher nicht bestimmt und auch nicht in der Messunsicherheit der Kalibrierung berücksichtigt. Im Kalibrierschein wird daher gemäß Kapitel 8.10 die folgende Angabe gemacht:

Die Kalibrierung erfolgte im Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C mit einem Programm mit aufsteigenden Temperaturstufen. Der Einfluss der Hysterese wurde experimentell nicht ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass dieser im o. g. Temperaturbereich bis zu 0,8 K betragen kann, falls die Messungen bei der Anwendung des IPRT nicht durchgehend bei aufsteigenden Temperaturen erfolgen. Dabei ist der höchste Einfluss in der Mitte des Temperaturbereichs zu erwarten.

Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der vollen Breite der Verteilung von 0,0 m Ω bzw. der Halbweite von 0,0 m Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 m Ω .

$\delta R_{\text{Cal,DVM}}$:

Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Widerstandsmessgeräts. Die erweiterte Unsicherheit der Kalibrierung des Widerstandsmessgeräts ist im Kalibrierschein mit $5 \cdot 10^{-6}$ (erweiterte Messunsicherheit; $k = 2$) angegeben. Dies ergibt im 1-k Ω -Messbereich eine Unsicherheit des Thermometerwiderstandes aufgrund der Kalibrierung des Widerstandsmessgeräts von 5,0 m Ω (normalverteilt; $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 2,5 m Ω .

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	43 / 56

$\delta R_{\text{Drift,DVM}}$:

Korrektur aufgrund der Drift des Widerstandsmessgeräts seit der letzten Kalibrierung. Das Rekalibrierintervall beträgt 1 Jahr. Gemäß Herstellerspezifikation liegt die maximale Drift innerhalb eines Jahres im Betriebstemperaturbereich von (23 ± 5) °C im 1-k Ω -Messbereich in den Grenzen 0,006 % of value + 0,0002 % of range. Bei einem Thermometerwiderstand von 230 Ω ergibt das Grenzen von $\pm 15,8$ m Ω . Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbwerte von $\pm 15,8$ m Ω angesetzt. Die zugeordnete Standardmessunsicherheit beträgt dann 9,12 m Ω .

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
R_{DVM}	Anzeige des Widerstandsmessgerätes	229,9905 Ω	0,0022 Ω	2,20E-03 Ω	Normal	1	-1,0	-2,200E-03 Ω
$R_S^{EN60751}(T_S)$	Widerstand nach EN 60751 zur Referenztemperatur im Ölbad	229,8058 Ω						
δT_S	Korrektur Temperatur im Blockkalibrator	0,0000 K	0,0324 K	3,24E-02 K	Normal	1	0,35 Ω /K	1,134E-02 Ω
δT_{EEw}	Eigenerwärmung	0,000 K	0,030 K	1,73E-02 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,35 Ω /K	6,062E-03 Ω
δR_{Res}	Auflösung des Widerstandsmessgerätes	0,0000 Ω	0,0005 Ω	2,89E-04 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	2,887E-04 Ω
δR_{Par}	parasitäre Thermospannungen	0,0000 Ω	0,0000 Ω	0,00E+00 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,000E+00 Ω
δR_{Wa}	Wärmeableitung	0,0000 Ω	0,0034 Ω	1,96E-03 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	1,963E-03 Ω
δR_{Hyst}	Hysterese	0,0000 Ω	0,0000 Ω	0,00E+00 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,000E+00 Ω
$\delta R_{\text{Cal,DVM}}$	Kalibrierung des Widerstandsmessgerätes	0,0000 Ω	0,0050 Ω	2,50E-03 Ω	Normal	2	1,0	2,500E-03 Ω
$\delta R_{\text{Drift,DVM}}$	Drift des Widerstandsmessgerätes	0,0000 Ω	0,0158 Ω	9,12E-03 Ω	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	9,122E-03 Ω
$\Delta R(T_x)$	Abweichung des Thermometerwiderstandes von der Normkennlinie nach EN 60751	0,185 Ω	$U = 0,032 \Omega \quad (k=2)$			$u = 0,0162 \Omega$		

Tabelle 5: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis Thermometerwiderstand

Das industrielle Platinwiderstandsthermometer (IPRT) hat bei 350,256 °C einen Widerstand von 229,990 Ω . Dies entspricht einer Abweichung zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] von 0,185 Ω bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,032 Ω .⁶

Wenn die Abweichung zur Normkennlinie und die zugeordnete Unsicherheit mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten eines Pt100 bei 350 °C $c_T = 2,85 \text{ K}/\Omega$ in Temperatur umgerechnet

⁶ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten: „Das Platinwiderstandsthermometer (IPRT) hat bei 350,256 °C einen Widerstand von 229,990 Ω . Dies entspricht einer Korrektur zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] von -0,185 Ω bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,033 Ω .“ Die Verwendung der Anzeigekorrektur bietet für den Anwender des Thermometers den Vorteil, dass der beste Schätzwert für die gemessene Temperatur / Widerstand durch Addition der Korrektur zur angezeigten Temperatur / Widerstand des Thermometers bestimmt werden kann.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	44 / 56

werden ergibt sich eine Abweichung zur Normkennlinie von 0,60 K mit einer erweiterten Messunsicherheit U von 0,094 K.

Wenn das IPRT auf diese Weise im Bereich von 0 °C bis 400 °C bei mindestens 5 verschiedenen über den Temperaturbereich verteilten Temperaturen kalibriert wird und die größte erweiterte Messunsicherheit (bei 400 °C analog zum Beispiel bestimmt) 0,12 K beträgt, kann für das IPRT eine Kennlinie in Form einer Callendar-Van-Dusen Gleichung (analog zu DIN EN 60751 [3]) approximiert und die zugehörigen Koeffizienten R_0 , a und b nach DKD-R 5-6 [9] bestimmt werden. Die Unsicherheit für den gesamten Bereich von 0 °C bis 400 °C mit dieser Kennlinie wird dann gemäß DKD-R 5-6 Kapitel 8.1.1 [9] ermittelt.

Das Modell für Temperaturmessung mittels dieser Kennlinie für den Kalibrierbereich (ohne die Unsicherheit der Widerstandsmessung durch den Anwender und ohne zusätzliche Temperaturunsicherheiten durch Drift, Hysterese und Wärmeableitung etc.) ergibt sich zu:

$$T(R_{\text{IPRT}}) = f(R_{\text{IPRT}}, R_0, A, B) + \delta T_{\text{Cal}} + \delta T_{\text{Kennlinie, Typ}} + \delta T_{\text{Kennlinie, Res.}} \quad (11)$$

Dabei ist $f(R_{\text{IPRT}}, R_0, A, B)$ die inverse Funktion der Callendar-van-Dusen Gleichung

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100 \text{ °C}) \cdot T^3) \text{ mit } C = 0 \text{ für } T \geq 0 \text{ °C} \quad (12)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

δT_{cal} :

Korrektur der Temperatur des IPRT aufgrund der Kalibrierung. Das IPRT ist im Bereich von 0 °C bis 400 °C an insgesamt 5 Temperaturpunkten kalibriert. Im zugehörigen Kalibrierschein sind die Widerstände des Thermometers sowie die Temperaturabweichung zur Normkennlinie nach DIN EN 60751 [3] für die Messstromstärke von 1 mA sowie die zugehörige Messunsicherheiten der einzelnen Kalibrierpunkte angegeben.

Die maximale erweiterte Messunsicherheit U der Temperatur im Bereich 0 °C bis 400 °C wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 0,12$ K; normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt damit $u = 0,06$ K.

$\delta T_{\text{Kennlinie, Typ}}$:

Korrektur der Temperatur des IPRT aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten mittels einer Kennlinie nach Callendar-Van-Dusen. Dieser Beitrag ist in der im Kalibrierschein des Normalthermometers angegebenen Unsicherheit nicht enthalten, da der Kalibrierschein keine Koeffizienten für eine Interpolationsfunktion für den gesamten Bereich und damit auch keine Bereichsunsicherheit angibt. Dieser Beitrag muss daher separat berücksichtigt werden.

Die Koeffizienten einer Interpolationsfunktion für den Bereich 0 °C bis 400 °C werden aus den 5 Kalibrierpunkten des IPRT nach DKD-R 5-6 [9] bestimmt. Die Koeffizienten werden zur Umrechnung des gemessenen Thermometerwiderstandes des IPRT in die Temperatur verwendet. Dieser Beitrag berücksichtigt nur die Abweichung, welche daraus resultiert, dass der verwendete Kennlinienansatz im zugehörigen Temperaturbereich das Verhalten eines Pt-Widerstandsthermometers nur ungenügend beschreibt. Nach DKD-R 5-6 Tabelle 6.1 [9] ist

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	45 / 56

daher für die Kennlinienapproximation ein rechteckverteilter Unsicherheitsbeitrag von 25 mK (Halbweite) anzusetzen. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 14,4 mK.

$\delta T_{\text{Kennlinie, Res.}}$:

Korrektur der Temperatur des IPRT aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten mittels einer Kennlinie nach Callendar-Van-Dusen. Dieser Beitrag ist in der im Kalibrierschein des Normalthermometers angegebenen Unsicherheit nicht enthalten, da der Kalibrierschein keine Koeffizienten für eine Interpolationsfunktion für den gesamten Bereich und damit auch keine Bereichsunsicherheit angibt. Dieser Beitrag muss daher separat berücksichtigt werden.

Die Koeffizienten einer Interpolationsfunktion für den Bereich 0 °C bis 400 °C werden aus den 5 Kalibrierpunkten des IPRT nach DKD-R 5-6 [9] bestimmt. Die Koeffizienten werden zur Umrechnung des gemessenen Thermometerwiderstandes des IPRT in die Temperatur verwendet. Zusätzlich zum Beitrag $\delta T_{\text{Kennlinie, Typ}}$ muss nach DKD-R 5-6 Kap. 2.3.2 [9] ein normalverteilter Unsicherheitsbeitrag, welcher sich aus den Residuen der angepassten Kennlinie und den verwendeten Stützstellen ergibt, berücksichtigt werden. Dieser Beitrag kann mittels der Standardabweichung für Einzelwerte aus allen Residuen abgeschätzt werden. Es ergab sich eine Standardabweichung der Residuen von 22 mK. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 22 mK.

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbweite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
δT_{Cal}	Kalibrierung des IPRT	0,000 °C	0,120 K	0,0600 K	Normal	2	1,0	0,0600 K
$\delta T_{\text{Kennlinie, Typ}}$	Kennlinienapproximation (Typ)	0,000 °C	0,025 K	0,0144 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,0144 K
$\delta T_{\text{Kennlinie, Res.}}$	Kennlinienapproximation (Residuum)	0,000 °C	0,022 K	0,0220 K	Normal	1	1,0	0,0220 K
$T(R_{\text{IPRT}})$	Temperatur des IPRT		$U =$	0,13 K	$(k=2)$		$u =$	0,0655 K

Tabelle 6: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis Thermometerkennlinie

Für das IPRT ergibt sich mit der angegebenen Kennlinie im Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C eine erweiterte Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,13 K. Hierin sind die Unsicherheit der Widerstandsmessung durch den Anwender und zusätzliche Temperaturunsicherheiten durch Drift, Hysterese und Wärmeableitung etc.) nicht enthalten. Der Einfluss der Hysterese wurde experimentell nicht ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass dieser im o. g. Temperaturbereich bis zu 0,8 K betragen kann. Dabei ist der höchste Einfluss in der Mitte des Temperaturbereichs zu erwarten.

Wenn die Hysterese nicht bestimmt wird, aber in die Gesamtmessunsicherheit einfließt, dann ist für den o. g. Temperaturbereich ein zusätzlicher Beitrag von 0,4 K (Halbweite des rechteckverteilten Beitrages) zu berücksichtigen.

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
δT_{Cal}	Kalibrierung des IPRT	0,000 K	0,120 K	0,0600 K	Normal	2	1,0	0,060 K
$\delta T_{\text{Kennlinie, Typ}}$	Kennlinienapproximation (Typ)	0,000 K	0,025 K	0,0144 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,014 K
$\delta T_{\text{Kennlinie, Res.}}$	Kennlinienapproximation (Residuum)	0,000 K	0,022 K	0,0220 K	Normal	1	1,0	0,022 K
δT_{Hyst}	Hysterese	0,000 K	0,400 K	0,2309 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,231 K
$T(R_{\text{IPRT}})$	Temperatur des IPRT		$U =$	0,48 K	($k=2$)		$u =$	0,240 K

Tabelle 7: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis Thermometerkennlinie mit Berücksichtigung von abgeschätzten 0,2 % des Temperaturbereiches als maximale Hysterese.

Die erweiterte Messunsicherheit für den Temperaturbereich ergibt sich dann zu 0,48 K.⁷

⁷ Hier sieht man sehr deutlich, dass die Hysterese des Kalibriergegenstandes IPRT einen erheblichen Beitrag zur Gesamtmessunsicherheit beiträgt. Sie kann daher letztlich bei der Ermittlung der Messunsicherheit für eine konkrete Anwendung nicht vernachlässigt werden und muss, wenn sie nicht in der Unsicherheit der Kalibrierung bereits enthalten ist, vom Anwender zusätzlich berücksichtigt werden! Wenn sie nicht experimentell bestimmt wird, dann muss ein Beitrag gemäß Kapitel 8.10 angesetzt werden. Für qualitativ hochwertige Pt100 kann sie jedoch auch kleiner sein. Es empfiehlt sich daher im Interesse einer möglichst kleinen, aber real abgeschätzten Messunsicherheit für die Anwendung immer die Hysterese experimentell zu bestimmen und zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	47 / 56

A.3: Kalibrierung eines Digitalthermometers im Blockkalibrator

Die Kalibrierung eines Digitalthermometers mit angeschlossenem Pt100-Sensor erfolgt durch Vergleich mit einem Gebrauchsnorm Pt100 (z. B. kalibriert nach Beispiel in A.1) in einem Temperaturblockkalibrator im Vergleichsverfahren, bei einer nominellen Temperatur von 350 °C. Der Widerstand des Gebrauchsnormthermometers (Pt100) wird mit einer Widerstandsmessbrücke mit direkter Temperaturanzeige mit internem Normalwiderstand bestimmt. Die Temperatur des Pt100-Sensors des Digitalthermometers wird direkt am Display abgelesen. Als Kalibrierergebnis wird die Temperaturabweichung der Anzeige des Digitalthermometers zur Referenztemperatur angegeben. Das Gebrauchsnormthermometer und die Messbrücke wurden von einem akkreditierten Labor kalibriert.

Nach einer Angleichzeit von einer Stunde wurde über einen Zeitraum von 10 Minuten der arithmetische Mittelwert aus jeweils 20 Einzelwerten gebildet. Die Messunsicherheitsbilanz ist in zwei Schritte gegliedert.

1. Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator.
2. Bestimmung der zugehörigen Anzeigeabweichung des Digitalthermometers sowie der dazugehörenden erweiterten Messunsicherheit.

Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator

Die Bestimmung der Referenztemperatur mit dem Gebrauchsnormthermometer erfolgt nach dem gleichen Verfahren wie in Schritt 1 von Beispiel A.2. Es gilt daher für diesen Schritt die gleiche Messunsicherheitsbilanz.

Für die Referenztemperatur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators ergibt sich damit eine Temperatur von 350,256 °C mit einer beigeordneten Standardmessunsicherheit (normalverteilt) von $u = 32,4$ mK.

Schritt 2: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Digitalthermometer angezeigten Temperatur zur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators gemessenen Temperatur stellt das Kalibrierergebnis dar.

Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$\Delta T_X = T_X - T_S + \delta T_{\text{Res}} + \delta T_{\text{EEw}} + \delta T_{\text{Wa}} + \delta T_{\text{Hyst}} \quad (13)$$

Die einzelnen Beiträge ergeben sich wie folgt:

T_S :

Die Temperatur des Ausgleichsblockes des Blockkalibrators wurde im ersten Schritt mit dem Gebrauchsnormthermometer zu 350,256 °C bestimmt. Die zugehörige Standardmessunsicherheit u beträgt 32,4 mK.

T_X ; δT_X :

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	48 / 56

Das Digitalthermometer wird nach Erreichen des stabilen Zustandes innerhalb von 10 Minuten 20-mal im zeitlichen Abstand von 30 Sekunden abgelesen. Der Mittelwert der Ablesung wird aus allen Einzelmessungen der Thermometeranzeige bei der Kalibriertemperatur bestimmt (jeweils 20 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10), muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M: 2022 [15]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 350,49 °C sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,07 K.

δT_{Res} :

Korrektur aufgrund der Auflösung des Digitalthermometers bei der Kalibriertemperatur. Die Auflösung des Digitalthermometers beträgt 0,1 K. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,05 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0289 K.

δT_{EEw} :

Korrektur der Temperatur des Digitalthermometers aufgrund der Eigenerwärmung des Pt100-Sensors. Das Digitalthermometer bietet nicht die Möglichkeit, den Sensorwiderstand mit verschiedenen Messstromstärken zu messen. Die Änderung des Thermometerwiderstandes aufgrund der Eigenerwärmung durch den Messstrom wird daher gemäß Kapitel 8.8 als maximale Temperaturunsicherheit von 30 mK angesetzt. Sie stellt einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbweite von 30 mK dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

δR_{Wa} :

Korrektur aufgrund einer Wärmeableitung des Pt100-Sensors. Der Sensor des zu kalibrierenden Thermometers hat einen Außendurchmesser von 6 mm. Die Eintauchtiefe im Ausgleichsblock beträgt 120 mm. Da über den inneren Aufbau nichts bekannt ist, wird der Wärmeableitfehler durch Herausziehen um den doppelten Durchmesser (12 mm) experimentell bestimmt. Die Temperaturanzeige verringert sich nach dem Herausziehen um weniger als einen Auflösungsschritt. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,05 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,029 K.

δT_{Hyst} :

Korrektur der Temperatur des Digitalthermometers aufgrund der Hysterese des Pt100-Sensors. Die Hysterese des Pt100-Sensors wird nach Kapitel 8.10 bestimmt, indem die mittlere Temperatur 200 °C des Kalibrierbereiches von 0 °C bis 400 °C mit zeitlich ansteigendem Temperaturverlauf und mit fallendem Temperaturverlauf kalibriert wird. Die Differenz beider Kalibrierungen bei 200 °C betrug 0,3 K. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der vollen Breite der Verteilung von 0,3 K bzw. der Halbweite von 0,15 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,087 K.

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
T_X	Anzeige des Digitalthermometers	350,49 °C	0,07 K	0,0700 K	Normal	1	1,0	0,0700 K
T_S	Referenztemperatur im Blockkalibrator	350,256 °C	0,0324 K	0,0324 K	Normal	1	-1,0	-0,0324 K
δT_{Res}	Auflösung des Digitalthermometers	0,000 K	0,050 K	0,0289 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,0289 K
δT_{EEw}	Eigenerwärmung	0,000 K	0,030 K	0,0173 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,0173 K
δT_{Wa}	Wärmeableitung	0,000 K	0,050 K	0,0289 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,0289 K
δT_{Hyst}	Hysterese	0,000 K	0,150 K	0,0866 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,0866 K
ΔT_X	Abweichung der Anzeige des Digitalthermometers	0,23 K	$U = 0,25 K$			$(k=2)$	$u = 0,124 K$	

Tabelle 8: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis Digitalthermometer

Das Digitalthermometer hat bei 350,256 °C eine Anzeigeabweichung von 0,23 K bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,25 K.⁸

⁸ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten: „Das Digitalthermometer hat bei 350,256 °C eine Anzeigekorrektur von -0,23 K bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,25 K.“ Die Verwendung der Anzeigekorrektur bietet für den Anwender des Thermometers den Vorteil, dass der beste Schätzwert für die gemessene Temperatur durch Addition der Korrektur zur angezeigten Temperatur des Thermometers bestimmt werden kann.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	50 / 56

A.4: Kalibrierung eines Transmitters mit Widerstandsensor

Die Kalibrierung des Widerstandsthermometers mit Transmitter erfolgt durch Vergleich mit einem Gebrauchsnormalelement vom Typ Pt100 (z. B. kalibriert nach Beispiel in A.1) in einem Temperaturblockkalibrator im Vergleichsverfahren bei einer nominellen Temperatur von 350 °C. Der Widerstand des Gebrauchsnormalelementes (Pt100) wird mit einer Widerstandsmessbrücke mit direkter Temperaturanzeige mit internem Normalwiderstand bestimmt. Die Temperatur des Pt100-Sensors mit Transmitter wird durch Messung der Transmitterausgangsstromstärke mit einem Digitalmultimeter bestimmt. Als Kalibrierergebnis wird die Ausgangsstromstärke des Transmitters in Bezug zur Referenztemperatur sowie die Temperaturabweichung der mit der Skalierung des Transmitters aus der gemessenen Ausgangsstromstärke berechneten Temperatur zur Referenztemperatur angegeben. Das Gebrauchsnormalelement, die Messbrücke und das Digitalmultimeter wurden von einem akkreditierten Labor kalibriert.

Nach einer Angleichzeit von 1 Stunde wurde über einen Zeitraum von 10 Minuten der arithmetische Mittelwert aus jeweils 20 Einzelwerten gebildet. Die Messunsicherheitsbilanz ist in zwei Schritte gegliedert.

1. Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator.
2. Bestimmung der zugehörigen Ausgangsstromstärke des Transmitters und der zugehörigen Messabweichung zur Transmitterskalierung sowie der dazugehörigen erweiterten Messunsicherheit.

Schritt 1: Bestimmung der Referenztemperatur im Blockkalibrator

Die Bestimmung der Referenztemperatur mit dem Gebrauchsnormalelement erfolgt nach dem gleichen Verfahren wie in Schritt 1 von Beispiel A.2. Es gilt daher für diesen Schritt die gleiche Messunsicherheitsbilanz.

Für die Referenztemperatur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators ergibt sich damit eine Temperatur von 350,256 °C mit einer beigeordneten Standardmessunsicherheit (normalverteilt) von $u = 32,4$ mK.

Schritt 2: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Digitalthermometer angezeigten Temperatur zur im Ausgleichsblock des Blockkalibrators gemessenen Temperatur stellt das Kalibrierergebnis dar.

Das Modell für die Messung des Transmitterausgangsstromes ergibt sich zu:

$$\Delta I_X(T_X) = I_X - I_0 - c_{\text{Trans}} \cdot (T_S - T_0) + \delta I_{\text{Cal}} + \delta I_{\text{Drift}} + \delta I_{\text{Amb}} + \delta I_{\text{Load}} + \delta I_{\text{Wa}} + \delta I_{\text{Hyst}} + c_{\text{Trans}} \cdot \delta T_{\text{EEW}} \quad (14)$$

mit der Steilheit des Transmitters c_{Trans} sowie dem minimalen Ausgangsstrom I_0 und der zugehörigen minimalen Temperatur T_0 .

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	51 / 56

Für die Bestimmung der Temperatur des Thermometers aus dem Transmitterstrom ergibt sich entsprechend:

$$\begin{aligned}
\Delta T_X &= T_X(I_X) - T_S + \delta T_{EEW} + c_{Inv} \\
&\quad \cdot (\delta I_X + \delta I_{Cal} + \delta I_{Drift} + \delta I_{Amb} + \delta I_{Load} + \delta I_{Wa} + \delta I_{Hyst}) \\
&= T_0 + c_{Inv} \cdot (I_X - I_0) - T_S + \delta T_{EEW} \\
&\quad + c_{Inv} \cdot (\delta I_{Cal} + \delta I_{Drift} + \delta I_{Amb} + \delta I_{Load} + \delta I_{Wa} + \delta I_{Hyst})
\end{aligned} \tag{15}$$

Der Transmitter ist so skaliert, dass für seine Ausgangsstromstärke im Temperaturmessbereich gilt

$$I_{min} = I_0 = 4 \text{ mA bei } T_{min} = T_0 = 0 \text{ °C und } I_{max} = 20 \text{ mA bei } T_{max} = 400 \text{ °C.}$$

Damit ergeben sich für die Empfindlichkeitskoeffizienten die folgenden Werte:

$$c_{Trans} = 16 \text{ mA}/400 \text{ K} = 0,04 \text{ mA}/\text{K} \text{ und } c_{Inv} = 400 \text{ K}/16 \text{ mA} = 25 \text{ K}/\text{mA}$$

Die einzelnen Beiträge ergeben sich wie folgt:

T_S :

Die Temperatur des Ausgleichsblockes des Blockkalibrators wurde im ersten Schritt mit dem Gebrauchsnormalthermometer zu 350,256 °C bestimmt. Die zugehörige Standardmessunsicherheit beträgt $u = 32,4 \text{ mK}$.

δI_{Cal} :

Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Digitalmultimeters (DMM). Die erweiterte Unsicherheit der Kalibrierung des DMM ist im Kalibrierschein mit 1,5 μA (erweiterte Messunsicherheit; $k = 2$) angegeben. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann $u = 0,00075 \text{ mA}$.

δI_{Drift} :

Korrektur aufgrund der Drift des Digitalmultimeters seit der letzten Kalibrierung. Das Rekalibrierintervall beträgt 1 Jahr. Gemäß Herstellerspezifikation liegt die maximale Drift innerhalb eines Jahres im Betriebstemperaturbereich von $(23 \pm 5) \text{ °C}$ im 100-mA-Messbereich in den Grenzen 0,05 % of value + 0,005 % of range. Bei einer Transmitterstromstärke von 18,02 mA ergibt das Grenzen von $\pm 0,014 \text{ mA}$. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbweite von $\pm 0,014 \text{ mA}$ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0081 mA.

I_X :

Das Digitalmultimeter wird nach Erreichen des stabilen Zustandes innerhalb von 10 Minuten 20-mal im zeitlichen Abstand von 30 Sekunden abgelesen. Der Mittelwert der Ablesung wird aus allen Einzelmessungen der Transmitterstromstärke bei der Kalibriertemperatur bestimmt

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	52 / 56

(jeweils 20 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10), muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M: 2022 [15]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 18,02 mA sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,005 mA.

δI_{Amb} :

Korrektur aufgrund von Umgebungseinflüssen auf den Transmitter. Aufgrund der Angaben des Kunden beträgt die Betriebstemperatur des Transmitters im Einsatz zwischen 40 °C und 60 °C. Bei der Kalibrierung betrug die Temperatur des Transmitters 52 °C. Aufgrund der Herstellerspezifikation kann die Ausgangsstromstärke durch die zu erwartenden Einflüsse um maximal $\pm 6 \mu\text{A}$ verändert werden. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbweite von $\pm 0,006 \text{ mA}$ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0035 mA.

δI_{Load} :

Korrektur aufgrund von Rückwirkungen des Eingangswiderstandes der nachgeschalteten Auswerteelektronik (Lastabhängigkeit / Bürdenabhängigkeit). Gemäß Datenblatt beträgt der Einfluss maximal $8 \mu\text{A}$. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher als rechteckverteilt mit der Halbweite von $\pm 0,008 \text{ mA}$ angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0046 mA.

δT_{EEW} :

Korrektur der Temperatur des Pt100 mit Transmitter aufgrund der Eigenerwärmung des Pt100-Sensors. Der Transmitter bietet nicht die Möglichkeit, den Sensorwiderstand mit verschiedenen Messstromstärken zu messen. Die Änderung des Thermometerwiderstandes aufgrund der Eigenerwärmung durch den Messstrom wird daher gemäß Kapitel 8.8 als maximale Temperaturunsicherheit von 30 mK angesetzt. Sie stellt einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbweite von 30 mK dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

δI_{Wa} :

Korrektur aufgrund einer Wärmeableitung des Thermometers. Das zu kalibrierende Thermometer hat einen Außendurchmesser von 6 mm. Die Eintauchtiefe im Ausgleichsblock beträgt 120 mm. Da über den inneren Aufbau nichts bekannt ist, wird der Wärmeableitfehler durch Herausziehen um den doppelten Durchmesser (12 mm) experimentell bestimmt. Die Transmitterstromstärke verringert sich nach dem Herausziehen um 0,002 mA. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbweite der Verteilung von 0,002 mA angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0012 mA.

δI_{Hyst} :

Korrektur der Temperatur des Pt100 mit Transmitter aufgrund der Hysterese des Pt100-Sensors. Die Hysterese des Pt100-Sensors wird nach Kapitel 8.10 bestimmt, indem die mittlere Temperatur 200 °C des Kalibrierbereiches von 0 °C bis 400 °C mit zeitlich ansteigendem Temperaturverlauf und mit fallendem Temperaturverlauf kalibriert wird. Die Differenz beider Kalibrierungen bei 200 °C betrug 0,012 mA. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der

vollen Breite der Verteilung von 0,012 mA bzw. der Halbweite von 0,006 mA angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0035 mA.

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
I_X	Transmitterstrom	18,020 mA	0,0050 mA	0,0050 mA	Normal	1	1,0	0,00500 mA
$I(T_S)$	Strom bei Referenztemperatur im BLK	18,010 mA	0,0324 K	0,0324 K	Normal	1	-0,040 mA/K	-0,00130 mA
δI_{Cal}	Kalibrierung des DMM	0,000 mA	0,0015 mA	0,00075 mA	Normal	2	1,0	0,00075 mA
δI_{Drift}	Drift des DMM	0,000 mA	0,0140 mA	0,00808 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00808 mA
δI_{Amb}	Umgebungseinfluss auf den Transmitter	0,000 mA	0,0060 mA	0,00346 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00346 mA
δI_{Load}	Lastabhängigkeit des Transmitters	0,000 mA	0,0080 mA	0,00462 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00462 mA
δI_{Wa}	Wärmeableitung	0,000 mA	0,0020 mA	0,00115 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00115 mA
δI_{Hyst}	Hysterese	0,000 mA	0,0060 mA	0,00346 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00346 mA
δT_{EEW}	Eigenerwärmung	0,000 K	0,0300 K	0,01732 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,040 mA/K	0,00069 mA
ΔI_X	Abweichung des Transmitterstroms	0,010 mA	$U = 0,024 \text{ mA}$ ($k=2$)				$u = 0,0118 \text{ mA}$	

Tabelle 9: Messunsicherheitsbilanz für das Kalibrierergebnis; Ausgangsstromstärke des Transmitters nach Modellfunktion (14)

Das Thermometer mit Transmitter hat bei 350,256 °C eine Stromstärkeabweichung von 0,010 mA bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,024 mA.⁹

Mit diesen Beiträgen lässt sich auch die Messunsicherheitsbilanz für die Abweichung der aus der Transmitterstromstärke berechneten Temperatur angeben.

⁹ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten: „Das Thermometer mit Transmitter hat bei 350,256 °C eine Stromstärkekorrektur von -0,01 mA, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,024 mA.“

Die Verwendung der Anzeigekorrektur bietet für den Anwender des Thermometers den Vorteil, dass der beste Schätzwert für die gemessene Transmitterstromstärke durch Addition der Korrektur zur gemessenen Transmitterstromstärke bestimmt werden kann.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	54 / 56

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i		$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
I_X	Transmitterstrom	18,02000 mA	0,0050 mA	0,00500 mA	Normal	1	25,0 K/mA	0,1250 K
T_S	Referenztemperatur im Blockkalibrator	350,256 °C	0,0324 K	0,03240 K	Normal	1	-1,0	-0,0324 K
δT_{EEw}	Eigenerwärmung	0,000 K	0,0300 K	0,01732 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,0173 K
δI_{Cal}	Kalibrierung des DMM	0,000 mA	0,0015 mA	0,00075 mA	Normal	2	25,0 K/mA	0,0188 K
δI_{Drift}	Drift des DMM	0,000 mA	0,0140 mA	0,00808 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	25,0 K/mA	0,2021 K
δI_{Amb}	Umgebungseinfluss auf den Transmitter	0,000 mA	0,0060 mA	0,00346 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	25,0 K/mA	0,0866 K
δI_{Load}	Lastabhängigkeit des Transmitters	0,000 mA	0,0080 mA	0,00462 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	25,0 K/mA	0,1155 K
δI_{Wa}	Wärmeableitung	0,000 mA	0,0020 mA	0,00115 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	25,0 K/mA	0,0289 K
δI_{Hyst}	Hysterese	0,000 mA	0,0060 mA	0,00346 mA	Rechteck	$\sqrt{3}$	25,0 K/mA	0,0866 K
ΔT_X	Abweichung der Anzeige des Digitalthermometers	0,24 K	$U =$	0,59 K	($k=2$)		$u =$	0,296 K

Tabelle 10: Messunsicherheitsbilanz für das Kalibrierergebnis; Temperaturabweichung des Pt100 mit Transmitter nach Modellfunktion (15)

Der Pt100 mit Transmitter hat bei 350,256 °C eine Anzeigeabweichung von 0,24 K bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,59 K.¹⁰

¹⁰ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten: „Der Pt100 mit Transmitter hat bei 350,256 °C eine Anzeigekorrektur von -0,24 K bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 0,59 K.“ Die Verwendung der Anzeigekorrektur bietet für den Anwender des Thermometers den Vorteil, dass der beste Schätzwert für die gemessene Temperatur durch Addition der Korrektur zu der aus der gemessenen Transmitterstromstärke berechneten Temperatur des Thermometers bestimmt werden kann.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20231130	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	11/2023
		Revision:	0
		Seite:	55 / 56

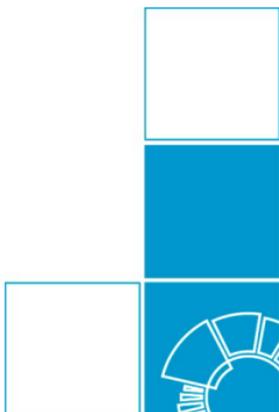
Anhang B – Messunsicherheiten bei Messungen mit einem Widerstandsthermometer

Die obigen Beispiele A.1 bis A.4 beziehen sich nur auf die Kalibrierung eines Thermometers bei einer Temperatur. In der Regel wird ein Thermometer bei mehreren Temperaturen (Temperaturpunkten) kalibriert, für die sich im Allgemeinen unterschiedliche Messunsicherheiten ergeben. Der Anwender führt mit dem Thermometer jedoch Temperaturmessungen auch zwischen den Kalibrierpunkten durch. Es ist daher hilfreich, wenn im Kalibrierschein auch Angaben für den Einsatz des Thermometers im gesamten Temperaturbereich enthalten sind. Dies geschieht häufig in Form einer Kennlinie (siehe DKD-R 5-6 und Beispiel A.2 [9]). Die Unsicherheit der Kennlinie ist naturgemäß größer als die Unsicherheit der Kalibrierung an einem Punkt.

Der Einsatz des Thermometers beim Auftraggeber kann unter anderen Bedingungen erfolgen als sie bei der Kalibrierung vorlagen. Unter Umständen können Beiträge zur Messunsicherheit dominieren, die bei der Kalibrierung vernachlässigt werden konnten. Die Messunsicherheit beim Einsatz kann daher erheblich über der Messunsicherheit bei der Kalibrierung liegen. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit beim Einsatz von Widerstandsthermometern sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Einflussgröße	Beurteilung	Maximaler Beitrag zur Messunsicherheit
Temperaturabweichung zwischen Messobjekt und Thermometer	Unterschiedliche Eintauchtiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Ankopplung, Positionen, ...	Bis über 10 % der Temperaturdifferenz zwischen Messobjekt und Umgebung
Zeitliche Instabilitäten	Aufzeichnung der Messungen, Kontrolle mit Thermometern mit anderer Zeitkonstante	Bis zur Größe der Temperaturschwankungen
Hysterese des Thermometers	Untersuchung der Abhängigkeit der Vorgeschichte auf das Messergebnis	Bis zu 0,2 % der Spanne zwischen Maximal- und Minimaltemperatur!
Widerstand der Zuleitungen	Berechnung des Leitungswiderstandes	Bis zu etlichen K
Parasitäre Thermospannungen	Umpolung	Bis zu 0,2 K bei Pt100
Drift des Thermometers, Langzeitstabilität	Kontrolle an Fixpunkten (bspw. Wassertripelpunkt, Eispunkt)	Bis zu 0,5 K
Auswerteelektronik (bei direktanzeigenden Thermometern)	Datenblatt	Bis zu 0,5 K

Tabelle 11: Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit bei Messungen mit Widerstandsthermometern



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de