

Physikalisch- Technische Bundesanstalt




**Richtlinie
DKD-R 5-1**

**Kalibrierung von
Widerstandsthermometern**

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180828AC>



	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2/25

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: (05 31) 5 92-8021
Internet: www.dkd.eu

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3/25

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 5-1, Kalibrierung von Widerstandsthermometern, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180828AC>

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:

Mitglieder des Fachausschusses *Temperatur und Feuchte* des DKD in der Zeit von 2002 bis 2009.

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.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
Vorwort.....	5
1 Geltungsbereich.....	5
2 Einleitung.....	5
3 Widerstandsthermometer.....	6
3.1 Metall-Widerstandsthermometer.....	6
3.1.1 Normal-Platinwiderstandsthermometer (SPRT).....	6
3.1.2 Industrielle Platin-Widerstandsthermometer (IPRT).....	6
3.2 Halbleiter-Widerstandsthermometer.....	7
4 Grundlage der Kalibrierung von Widerstandsthermometern.....	7
5 Transport und Eingangsuntersuchung.....	7
6 Alterungsuntersuchung.....	8
7 Temperiereinrichtung.....	8
8 Einflussfaktoren.....	9
8.1 Thermische Belastung.....	9
8.2 Thermische Ankopplung.....	9
8.3 Elektrische Messverfahren.....	10
8.4 Anschlusstechnik.....	10
8.4.1 Zweileiter-Technik.....	10
8.4.2 Dreileiter-Technik.....	11
8.4.3 Vierleiter-Technik.....	11
8.4.4 Parasitäre Thermospannung.....	11
8.4.5 Eigenerwärmung.....	12
8.4.6 Isolationswiderstand.....	12
8.4.7 Asymmetrieabweichung.....	12
8.4.8 Hysterese.....	12
9 Rekalibrierung.....	12
10 Ergebnisse.....	14
Anhang A: Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Thermometern im Vergleichsverfahren.....	15
Anhang B: Messunsicherheit bei Messungen mit einem Widerstandsthermometer.....	25

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5/25

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.

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 dafürsprechen.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Temperatur und Feuchte* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 2003 erstellt.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 5-1 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 5-1 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 10/2003, veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
2. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 1. Neuauflage

1 Geltungsbereich

Diese Richtlinie wurde erstellt, um dem Bedürfnis nach einem Ratgeber in Form eines Rahmendokumentes zu entsprechen, das sich mit der Kalibrierung von Widerstandsthermometern befasst. Sie gilt in erster Linie für Platin-Widerstandsthermometer, die den Anforderungen der Norm DIN EN 60751 entsprechen und den Temperaturbereich von -200 °C bis 850 °C abdecken.

Sie gilt darüber hinaus aber auch für alle anderen Arten von Widerstandsthermometern; als besonders wichtig seien hier aufgeführt


- Widerstandsthermometer aus spektral reinem Platin, die die Anforderungen der ITS-90 erfüllen (Temperaturbereich -259 °C bis 962 °C)
- Nickel-Widerstandsthermometer
- Kupfer-Widerstandsthermometer
- Halbleiter-Widerstandsthermometer (Thermistoren, NTC, PTC)

Darüber hinaus ist die Richtlinie anwendbar auf

- direktanzeigende elektrische Thermometer mit Widerstandssensor
- Widerstandsthermometer mit Messumformer, wobei als Ausgangssignal des Messumformers sowohl analoge als auch digitale Einheitssignale möglich sind
- Datalogger mit einem elektrischen Widerstandsthermometer als Sensor

2 Einleitung

Nahezu alle in der Praxis eingesetzten Thermometer gehören entweder in die Gruppe der Strahlungsthermometer oder der Berührungsthermometer. Die Wirkungsweise der Berührungsthermometer beruht darauf, dass ein Sensor durch thermischen Kontakt auf die Temperatur des Messobjektes gebracht wird und dann die Temperatur des Sensors durch

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	6/25

Messung einer anderen Größe (Ausdehnung, elektrischer Widerstand usw.), die eine Abhängigkeit von der Temperatur zeigt, bestimmt wird. In der Praxis entsteht die größte Messabweichung bei einer Temperaturmessung häufig dadurch, dass die Sensortemperatur nicht identisch ist mit der Temperatur des Messobjektes. Ein Berührungsthermometer misst grundsätzlich „nur“ seine eigene Temperatur. Unter der Kalibrierung eines Berührungsthermometers versteht man in diesem Sinne die messtechnische Bestimmung des Zusammenhanges zwischen der Temperatur des Sensors und der Ausgangsgröße des Thermometers. Es ist Aufgabe des Anwenders 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.

3 Widerstandsthermometer

Die Wirkungsweise von Widerstandsthermometern beruht darauf, dass der elektrische Widerstand von metallischen Leitern und Halbleitern temperaturabhängig ist. Damit wird die Temperaturmessung auf die Messung eines elektrischen Widerstandes zurückgeführt. In der Praxis (ohne Berücksichtigung des Tieftemperaturbereiches mit $t < -200\text{ °C}$) werden vorwiegend folgende 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 sogenannten Phononen, den Quanten der Wärmeschwingung, behindert. Da die Zahl der Phononen mit zunehmender Temperatur zunimmt, nimmt der spezifische Widerstand von Metallen mit der Temperatur zu.


Unter den Metallen wird heute nahezu ausschließlich Platin als Material für Widerstandsthermometer eingesetzt. Hier werden folgende 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 spektral reinem Platindraht, der frei von mechanischen Spannungen gewickelt ist. Elektrisch zeichnen sich diese Thermometer durch einen besonders großen Temperaturkoeffizient aus, ausgedrückt in der Forderung der ITS-90 nach $R(29,7646\text{ °C}) / R(0,01\text{ °C}) \geq 1,118\ 07$. Diese Forderung ist in etwa gleichwertig mit der Forderung $R(100\text{ °C}) / R(0\text{ °C}) \geq 1,392$. Im (veralteten) Laborjargon werden solche Thermometer daher manchmal auch noch als 392-Thermometer bezeichnet. SPRTs ermöglichen prinzipiell die genauesten Temperaturmessungen, da durch ihre Kennlinie im Temperaturbereich von 13,8 K bis 962 °C die internationale Temperaturskala ITS-90 festgelegt ist. Die Kennlinie ist schon dadurch gut reproduzierbar, dass reines Metall ohne alle Legierungsbestandteile verwendet wird. In der Praxis werden sie jedoch nur selten eingesetzt, da sie nur in bestimmten Bauformen hergestellt werden können und unter mechanischen Belastungen nicht sehr stabil sind.

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 angegebene Kennlinie eingehalten wird. Der Temperaturkoeffizient von IPRTs ist kleiner als der von SPRTs; es gilt $R(100\text{ °C}) / R(0\text{ °C}) \cong 1,385$, weshalb im Laborjargon manchmal von 385-Thermometern

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	7/25

gesprochen wird. IPRTs haben mit unterschiedlich aufgebauten Sensortypen eine sehr große Verbreitung gefunden. Als besonders stabil haben sich drahtgewickelte Sensoren erwiesen, während jedoch die Dünnschicht-Sensoren weltweit am verbreitetsten sind. Am bekanntesten sind Thermometer mit einem Widerstand von 100 Ω bei 0 °C, kurz auch als Pt-100-Thermometer bezeichnet. Der Einsatzbereich von IPRTs liegt zwischen -200 °C und 600 °C.

Für bestimmte Anwendungen werden auch Ni- oder Cu-Widerstände 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-Lochpaare mit zunehmender Temperatur zunimmt, nimmt entsprechend der elektrische Widerstand ab. Man spricht daher auch von Sensoren mit negativen Temperaturkoeffizienten (NTC = Negative Temperature Coefficient). Unter Ausnutzung bestimmter Parameter können auch Sensoren mit positivem Temperaturkoeffizient (PTC) hergestellt werden. In der Praxis werden NTC-Sensoren aus einer komplexen Mischung von Metall-Oxiden hergestellt; auch die Bezeichnung Thermistoren ist gebräuchlich. Der Temperaturkoeffizient liegt mit 3% K^{-1} bis 5% K^{-1} wesentlich höher als bei Metallen und ermöglicht so einen relativ einfachen Aufbau für direktanzeigende Thermometer, auch wenn die Kennlinie sehr stark nichtlinear ist.


4 Grundlage der Kalibrierung von Widerstandsthermometern

Zur Kalibrierung wird das Thermometer in einer geeigneten Umgebung auf eine bekannte Temperatur gebracht und der Ausgangsparameter (z.B. der elektrische Widerstand) bestimmt. Je nach Art der Thermostatisierung unterscheidet man zwischen Fixpunktverfahren und Vergleichsverfahren: Beim Fixpunktverfahren wird jeweils die Temperatur des Fixpunktes realisiert, bei 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.

Zur Messung mit dem Kalibriergegenstand und/oder dem Normalthermometer müssen geeignete elektrische Messmittel eingesetzt werden (Ohmmeter, Widerstandsmessbrücke, Normalwiderstände), die auch 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 der Normalwiderstand, der häufig für Messungen mit kleinen Messunsicherheiten in einem getrennten Thermostaten auf konstanter Temperatur gehalten wird. Für die Messung der Umgebungstemperatur ist ebenfalls ein kalibriertes Thermometer notwendig.

5 Transport und Eingangsuntersuchung

Thermometer sind in den verschiedensten Ausführungen erhältlich. Stöße und Vibrationen können (je nach Ausführung unterschiedlich stark) die Struktur des Sensors und damit die elektrischen Eigenschaften beeinflussen sind daher zu vermeiden. Auch ein Metall-Schutzrohr bedeutet nicht, dass Stöße keine Auswirkungen auf den Sensor haben. Änderungen können jedoch relativ einfach durch eine Messung am Eis- oder Wassertripelpunkt festgestellt werden. Eine besonders kritische Phase ist der Transport des Thermometers. Gute Verpackung, z.B. in geeigneten, mit Schaumstoff ausgepolsterten Paketen ist unverzichtbar. Trotz geeigneter

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8/25

Kennzeichnung kann leider nicht immer davon ausgegangen werden, dass kommerzielle Transportunternehmen die Packstücke mit der notwendigen Sorgfalt behandeln. Bei besonders hochwertigen Kalibriergegenständen, z.B. Bezugsnormalen mit kleinen Messunsicherheiten, sollte daher der Transport unter ständiger Kontrolle eines Mitarbeiters erfolgen, d.h. als Handtransport.

Die Eingangsuntersuchung hängt neben dem geplanten Einsatz der Thermometer auch von ihrer Konstruktion 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 sollen auch die Bedienungsanleitungen bzw. technische Datenblätter zur Verfügung stehen.

Eine klare Kennzeichnung des Kalibriergegenstands muss gegeben sein um eine eindeutige Identifizierung zu gewährleisten. Darunter fallen Angaben wie Seriennummer, Typbezeichnung sowie Hersteller. In der Regel ist die eindeutige Identifizierung auch über die aufzubringende Kalibriermarke möglich. Vor Beginn der Kalibrierung ist der Isolationswiderstand bei Raumtemperatur zu bestimmen. Die Forderungen der DIN EN 60751 sind dabei zu erfüllen. (Prüfspannung, R_{iso}). Es ist darauf zu achten, dass durch die Prüfspannung weder der Sensor noch die nachgeschaltete Elektronik zerstört wird.

6 Alterungsuntersuchung

Mechanische Spannungen, die z.B. beim Transport entstanden sind, können durch Temperung (Alterung) bei höheren Temperaturen teilweise abgebaut werden. Im Allgemeinen erfolgt zur Überprüfung der ausreichenden Stabilität der Thermometer eine Alterungsuntersuchung an einem festen Temperaturwert (Nennwert-Temperatur, Eispunkt, Tripelpunkt des Wassers).


Bei einem Widerstandsthermometer wird in der Regel zunächst der Widerstand am Eispunkt gemessen. Anschließend wird der Temperaturfühler über einen angemessenen Zeitraum (ca. 8 h bis 12 h) auf 10 K über die maximale Kalibriertemperatur erwärmt; es ist jedoch zu beachten, dass die vom Hersteller angegebene maximale Betriebstemperatur nicht überschritten werden darf. Danach wird der Widerstand des Thermometers bei der Bezugstemperatur (Eispunkt) erneut gemessen. Überschreitet die Abweichung zwischen den beiden Messungen am Eispunkt 30 % der angestrebten Messunsicherheit, so ist der Alterungsvorgang zu wiederholen. Weicht der Bezugswert nach der Wiederholungsmessung wieder um mehr als 30 % von der vorangegangenen Messung ab, so ist der Kalibriergegenstand als nicht kalibrierbar zurückzuweisen.

Handelt es sich um eine Rekalibrierung des Thermometers und hat sich das Thermometer seit der letzten Kalibrierung um nicht mehr als 30 % der angestrebten Messunsicherheit verändert, kann die Alterungsuntersuchung entfallen.

Der Eingangswert vor der Alterung sollte im Kalibrierschein separat mit angegeben werden.

7 Temperiereinrichtung

Platin-Widerstandsthermometer und Halbleiterfühler 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 bzw. Halbleiterfühler in temperaturstabilisierten Bädern oder in geeigneten Öfen mit Bezugs-/Arbeitsthermometern verglichen. Fixpunkte und Normalthermometer müssen auf nationale Normale rückgeführt sein.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9/25

Für die bei der Kalibrierung eingesetzte Temperiereinrichtung (Thermostatbad, Ofen) muss im Rahmen der Ermittlung der Messunsicherheit die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung im Arbeitsraum quantitativ bestimmt und berücksichtigt werden.

Zur Ermittlung der zeitlichen und räumlichen Verteilung werden eingemessene Thermometer gleicher Bauart an den Grenzen des Arbeitsbereiches (horizontal, vertikal) der Temperiereinrichtung positioniert. Nach thermischer Stabilisierung werden die mit den Thermometern gemessenen Temperaturen über einen Zeitraum (größer 20 min) kontinuierlich aufgezeichnet. Die maximal auftretende Temperaturdifferenz zwischen den Thermometern wird als Messunsicherheitsanteil beim Messunsicherheitsbudget berücksichtigt (Rechteckverteilung).

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

Bei Kalibrierung an definierenden Fixpunkten der gültigen Temperaturskala hat die Präparation der Fixpunktzellen entsprechend der „Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990“ zu erfolgen.

Die Kalibrierung eines Thermometers erfolgt nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtes sowohl der Temperiereinrichtung als auch des Thermometers selbst.

Die Anzahl der Kalibriertemperaturen sind zwischen Auftraggeber und Kalibrierlabor abzustimmen. Für den Fall, dass eine Kennlinie bestimmt werden soll, wird auf die Richtlinie „Kennlinienbestimmung“ (DKD-R 5-6) verwiesen.

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 (akkreditierte Messunsicherheit des Kalibrierlabors) betragen. Im Folgenden werden die Einflussfaktoren näher erläutert.


8.1 Thermische Belastung

Neben der kurzzeitigen Alterung (Untersuchung im Rahmen der Eingangsuntersuchung, vgl. Kapitel 6) treten auch Langzeiteffekte auf, deren Größe durch die thermische Belastung während des Einsatzes bestimmt wird. Eine Bestimmung dieser Messunsicherheit obliegt dem Anwender des Thermometers und wird aus den Rekalibrierungswerten ermittelt. In der Angabe der Messunsicherheit im Kalibrierschein ist kein Beitrag für die Langzeitstabilität des Thermometers enthalten.

8.2 Thermische Ankopplung

Fehlmessungen durch ungenügende Eintauchtiefe bedingen die größten und häufigsten Messabweichungen bei Kalibrierungen von Widerstandsthermometern! Darüber hinaus ist zu bedenken, dass vom Kunden verwendete Tauchhülsen und Schutzrohre bei der Kalibrierung i. Allg. nicht mit eingesetzt werden. In solchen Fällen ist es ratsam, den Kunden auf möglicherweise zu erwartenden Messabweichungen zwischen Kalibrier- und Messbedingungen hinzuweisen.

Bei der Kalibrierung wird für die jeweilige Temperiereinrichtung und das zu kalibrierende Thermometer die maximal mögliche Eintauchtiefe bzw. eine optimale thermische Ankopplung angestrebt. Eventuell notwendige Maßnahmen sind im Kalibrierschein aufzuführen. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass die Kalibrierergebnisse reproduzierbar und im Fall der Rekali-

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	10/25

brierung auch vergleichbar sind. Diese Vorgehensweise kann abweichende Messbedingungen gegenüber dem späteren Einsatz bedingen. Zusätzlich auftretende Messabweichungen muss der Anwender ermitteln und entsprechend berücksichtigen.

Die Kontrolle der Kalibrier-Eintauchtiefe erfolgt durch Reduzierung der maximal möglichen Eintauchtiefe um 10 %. Der dabei auftretende Wärmeableitfehler darf maximal 10 % der angestrebten Messunsicherheit nicht überschreiten, ansonsten muss die Messunsicherheit erhöht werden, was in der Regel ein detailliertes neues Messunsicherheitsbudget erfordert.

8.3 Elektrische Messverfahren

Bei der Messung des elektrischen Widerstandes müssen Einflüsse auf das Messergebnis berücksichtigt werden und ggf. bei der Ermittlung der Messunsicherheit mit einfließen. Die Widerstandsmessung erfolgt entweder mit einem konstanten Wechsel- oder (wechselndem) Gleichstrom. Die Art und Wahl der Messgeräte richtet sich nach der angestrebten Messunsicherheit bei der Kalibrierung.

Bei Thermistoren kann sich ein Asymmetrieeffekt einstellen, der abhängig ist von der Stromrichtung durch das Sensorelement.

8.4 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 Vierleiterschaltung.

8.4.1 Zweileiter-Technik

Bei der Zweileiterschaltung erfolgt die Verbindung zwischen Sensorelement und Messgerät mit einer zweiadrigen Leitung. Wie jeder andere elektrische Leiter besitzt auch dieser einen Widerstand, der dem Sensorelement in Reihe geschaltet ist. Damit addieren sich die beiden Widerstände; es kommt zu einer systematisch höheren Temperaturanzeige. Diese spiegelt sich zwar im Kalibrierwert wieder, dabei bleibt aber unberücksichtigt, dass der elektrische Widerstand der Zuleitung im Einsatz durch äußere Temperatureinflüsse sich ebenfalls ändert. Weist das zu kalibrierende Thermometer eine Anschlussleitung auf, muss der Anwender je nach Temperatur der Anschlussleitung zusätzliche Messabweichungen berücksichtigen.

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

Beispiel:

Platin-Widerstandsthermometer Pt 100 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.

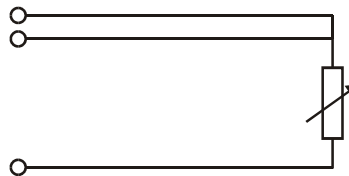
Dies entspricht einer um +0,2 K höheren Temperaturanzeige.



Bei der Ermittlung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Thermometers muss dies berücksichtigt werden und es kommt prinzipiell zu einem höheren Wert.

8.4.2 Dreileiter-Technik

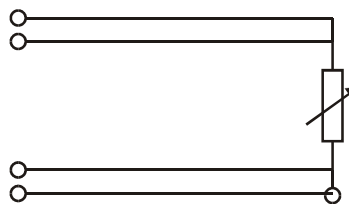
Um die Einflüsse der Leitungswiderstände und deren temperaturabhängige Schwankungen zu minimieren, wird in der industriellen Messtechnik die *Dreileiterschaltung* verwendet. Es bilden sich zwei Messkreise, von denen einer als Referenz genutzt wird. Durch die Schaltungstechnik wird der Leitungswiderstand sowohl in seinem Betrag als auch seine Temperaturabhängigkeit kompensiert.



Da aber die bei der Kalibrierung eingesetzten Messgeräte in Vierleitertechnik arbeiten, muss der Schleifenwiderstand separat gemessen und rechnerisch kompensiert werden.

8.4.3 Vierleiter-Technik

Die optimale Anschlussstechnik besteht in der Vierleiterschaltung. 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 Vierleiterschaltung auch bis zum Sensorelement ausgeführt ist. Wird das Sensorelement im Inneren des Thermometers jedoch in Zweileiter-Technik beschaltet, kommt es zu einem zusätzlichen Leitungswiderstand.



8.4.4 Parasitäre Thermospannung

Der Messkreis eines Thermometers besteht i. Allg. nicht aus einem Werkstoff. Es stehen mehrere Materialien in Kontakt miteinander. Mit einem Temperaturgradienten entlang des Messkreises kann deshalb eine Thermospannung entstehen, die dem Spannungsabfall am Widerstand überlagert wird. Je nach Stromrichtung addiert bzw. subtrahiert sich diese Spannung, es kommt zu einem systematisch höheren bzw. niedrigeren Kalibrierwert. Durch Umpolung der Stromrichtung bei der Kalibrierung kann aus der Differenz der beiden Anzeigewerte die Größe der Thermospannung (bei bekanntem Messstrom) ermittelt werden.

Bei Wechselstrom und wechselndem Gleichstrom mittelt sich dieser Effekt heraus und bleibt zunächst unberücksichtigt. Für den Auftraggeber ist es jedoch hilfreich, wenn die Größe der

Thermospannung ermittelt und für die Messbedingungen der Kalibrierung im Kalibrierschein angegeben wird.

Beispiel:

Widerstandsthermometer Pt 100

Messstrom: 1 mA

Thermospannung: 25 μ V

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

Dies entspricht einem Temperaturwert von 0,063 K.

8.4.5 Eigenerwärmung

Zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes ist eine elektrische Messung notwendig. Dazu muss ein Messstrom durch den Sensor geschickt werden. Der Messstrom führt zu einer Erwärmung des Sensors (Eigenerwärmung) und damit zu einer Verfälschung des Messergebnisses. Dieser Effekt ist nicht alleine von der Größe des Messstroms abhängig, sondern auch von den Messbedingungen selbst. Bei der Kalibrierung ist das Eigenerwärmungsverhalten zu untersuchen oder ein Messstrom zu wählen, bei dem der Effekt vernachlässigbar ist.

Sollte dies nicht möglich sein, so ist durch Kalibrierung bei verschiedenen Messströmen der Kalibrierwert auf $I = 0 \text{ A}$ zu extrapolieren.

8.4.6 Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand des Thermometers wird bereits bei Raumtemperatur während der Eingangsprüfung gemessen. Während der Kalibrierung ist der Isolationswiderstand noch bei der höchsten Kalibriertemperatur zu messen.

8.4.7 Asymmetrieabweichung

Insbesondere bei Halbleiter-Sensoren besteht die Möglichkeit, dass das Ausgangssignal von der Stromrichtung abhängt. In diesem Fall ist dies während der Kalibrierung zu ermitteln und im Kalibrierschein mit anzugeben.

8.4.8 Hysterese

Für genaue Messungen ist ferner zu beachten, dass viele Thermometer (auch Platin-Widerstandsthermometer) einen Hystereseeffekt zeigen, d.h. der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand ist abhängig von der Vorgeschichte des Thermometers. Dieser Effekt tritt z.B. auf, wenn Platin eng mit einem Keramikträger verbunden ist und durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung mechanische Spannungen auftreten. Bei IPRTs kann hierdurch ein Unterschied in der Anzeige von bis zu 0,5 K zustande kommen, je nachdem ob das Thermometer vorher bei höheren oder tieferen Temperaturen eingesetzt worden ist.

9 Rekalibrierung

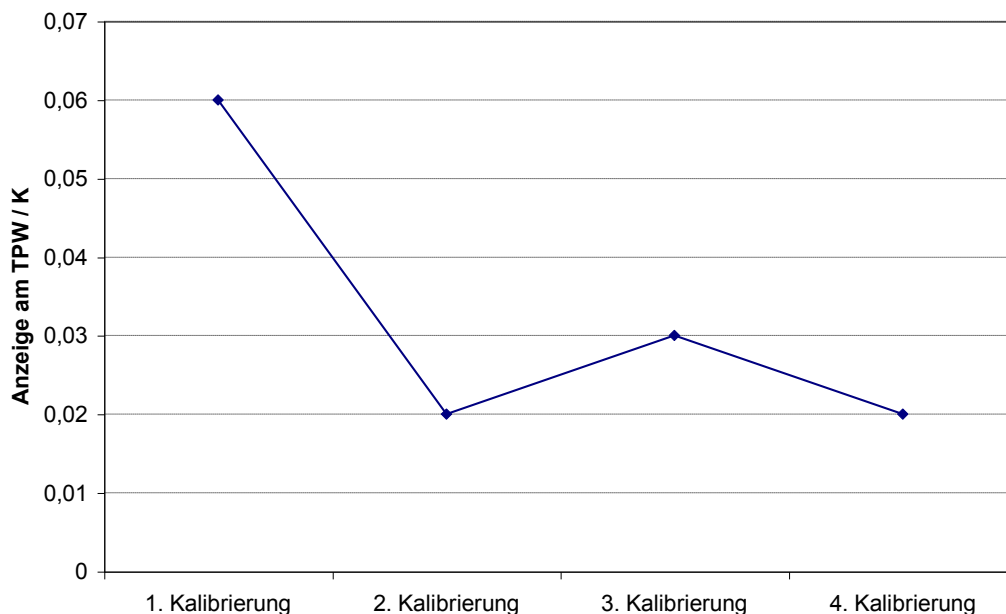
Die Angaben eines Kalibrierscheines können zeitlich nicht unbegrenzt für die Messung mit dem Thermometer herangezogen werden. Durch die verschiedenen Einflüsse auf ein Thermometer während seiner Nutzung treten Veränderungen auf; das Thermometer driftet. Die Einflussfaktoren sind:


- Thermische Belastung während der Messung
 - Temperaturhöhe
 - Einsatzdauer
 - Temperiergeschwindigkeit
- Mechanische Belastung
 - Schwingung
 - Schock
- Chemische Einflüsse
 - Diffusion von Fremdstoffen in das Widerstandsmaterial
 - Strukturveränderung am Widerstandsmaterial

Um ein Bild über die Veränderungen zu erhalten, ist es unerlässlich, das Thermometer in bestimmten Zeitabständen erneut zu recalibrieren. Die Kalibrierfristen können dabei nicht im Kalibrierschein festgelegt werden, da diese sehr stark von der geforderten Messunsicherheit und der Belastungen während des Betriebes abhängen. Aus diesem Grund ist der Anwender selbst gezwungen, aufgrund der Einsatzbelastungen die Kalibrierfristen zu definieren.

Mit den Angaben aus den aufeinander folgenden Kalibrierungen im gleichen Temperaturbereich lässt sich dann eine Historie für das Thermometer aufstellen. Die aus den zurückliegenden Kalibrierungen ermittelten Driftwerte werden zur weiteren Beurteilung herangezogen. Der Anwender kann die Rekalibrierfristen entsprechend den gestellten Anforderungen an die Messunsicherheit und Historie selbst individuell anpassen.

Beispiel: Ein Pt-100-Widerstandsthermometer wurde insgesamt viermal am Tripelpunkt des Wassers kalibriert. Nach der ersten Kalibrierung hat während des Einsatzes eine Drift stattgefunden, danach bestätigen sich bei den Rekalibrierungen die Werte, so dass die Rekalibrierfrist zum Beispiel verdoppelt werden kann.




	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	14/25

10 Ergebnisse

Als Ergebnis der Kalibrierung wird ein Kalibrierschein erstellt.

Der Kalibrierschein muss die Anforderung der Schrift DAkkS-DKD-5 „Anleitung zum Erstellen eines DKD-Kalibrierscheines“ erfüllen. Besonders hinzuweisen ist im Rahmen dieser Richtlinie auf folgende Punkte:

- (e) die Nennung von angewendeten Festlegungen oder Verfahren
Es wird empfohlen, das Kalibrierverfahren ausführlich zu beschreiben
- (h) die Messergebnisse und die damit verbundenen Messunsicherheiten oder eine Aussage zur Konformität mit einer festgelegten messtechnischen Spezifikation
Es wird empfohlen, sowohl die Messergebnisse als auch die daraus berechnete Kennlinie anzugeben, und zwar jeweils mit den zugehörigen Messunsicherheiten
- (o) wenn ein zu kalibrierendes Instrument justiert oder kalibriert 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/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	15/25

Anhang A: Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Thermometern im Vergleichsverfahren

Die Messunsicherheit bei der Kalibrierung eines Thermometers hängt von der verwendeten Kalibriermethode, der Unsicherheit aus der Kalibrierung der Normale, den Eigenschaften der eingesetzten Messmittel und den Eigenschaften der Prüfmittel 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 Laboratorien sind von der Akkreditierungsstelle sogenannte „kleinste angebbare Messunsicherheiten“ festgelegt worden. Diese können von den Kalibrierlaboratorien aber in der Regel nur dann erreicht werden, wenn die besten verfügbaren Messmittel eingesetzt werden und der Kalibriergegenstand sich nahezu ideal verhält. Akkreditierte Laboratorien dürfen in DKD-Kalibrierscheinen keine Messunsicherheiten angeben, die kleiner sind als die kleinste angebbare Messunsicherheit; häufig wird die tatsächliche Messunsicherheit jedoch größer sein.

Im Folgenden werden Beispiele für die Kalibrierung von vier verschiedenen Typen von Thermometern angegeben, und zwar für

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

Alle Beispiele behandeln eine Kalibrierung im Vergleichsverfahren in einem gerührten Flüssigkeitsbad. Dabei wird die Temperatur des Kalibriergegenstands mit Hilfe eines anderweitig kalibrierten Thermometers bestimmt. Das mathematische Modell für die Bestimmung der Temperatur des Kalibriergegenstands ist daher in allen Fällen im Prinzip dasselbe und wird aus Platzgründen hier nur einmal dargestellt. In der Praxis werden jedoch einige Beiträge (z. B. die Korrektur aufgrund der Wärmeableitung durch den Kalibriergegenstand) von dem jeweiligen Kalibriergegenstand abhängen.

In den nachfolgenden Beispielen wird nur die Kalibrierung bei einer Prüftemperatur betrachtet. Normalerweise werden Thermometer bei mehreren Prüftemperaturen kalibriert und aus diesen Werten eine Kennlinie berechnet, deren Unsicherheit größer ist als die Messunsicherheit bei den einzelnen Prüftemperaturen.

	Kalibrierung von Widerstandsthermometern https://doi.org/10.7795/550.20180828AC	DKD-R 5-1	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	16/25

A.1 Bestimmung der Temperatur des Kalibriergegenstands

In allen Beispielen dieses Kapitels erfolgt die Kalibrierung des Kalibriergegenstands im Vergleichsverfahren bei einer nominellen Temperatur von 180 °C. Die Messungen werden in einem gerührten Öl-Thermostaten ohne Ausgleichsblock durchgeführt. Als Normalthermometer dient ein SPRT (25 Ω), das im eigenen Labor gegen zwei von der PTB kalibrierte Bezugsnormale vermessen wurde. Der Widerstand des SPRT wird mit einer Widerstandsmessbrücke mit direkter Temperaturanzeige und einem 100 Ω Normalwiderstand bestimmt, die ihrerseits beide von einem DKD-Labor kalibriert wurden.

Die Temperatur, bei der der Kalibriergegenstand kalibriert wird, wird über die Messung mit den beiden Normalthermometern und zusätzliche Korrekturen bestimmt:

$$t_x = t_N + \delta t_{\text{Kal}} + \delta t_{\text{Drift}} + c_R \delta R_R + \delta t_{\text{Br}} + \delta t_{\text{WaN}} + \delta t_{\text{EWN}} + \delta t_{\text{WAP}} + \delta t_{\text{Hom}} + \delta t_{\text{Stab}}$$

mit

t_x	Temperatur des Kalibriergegenstands nach ITS-90
t_N	Mittelwert der Temperatur des SPRTs
δt_{Kal}	Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des SPRT
δt_{Drift}	Korrektur aufgrund einer möglichen Drift des SPRT seit der letzten Kalibrierung
δR_R	Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Normalwiderstandes
δt_{Br}	Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Widerstandsmessbrücke
δt_{WaN}	Korrektur aufgrund einer möglichen Wärmeableitung des SPRTs
δt_{EWN}	Korrektur der Eigenerwärmung des SPRTs
δt_{WAP}	Korrektur aufgrund einer möglichen Wärmeableitung des Kalibriergegenstands
δt_{Hom}	Korrektur aufgrund von Inhomogenitäten im Thermostaten
δt_{Stab}	Korrektur aufgrund von zeitlichen Instabilitäten im Bad.
c_R	Empfindlichkeit der Messbrücke, in dem gewählten Bereich gilt $c_R \cong 10 \text{ K}/\Omega$

Die in dieser Liste angeführten Korrekturen sind meistens nicht bekannt und vermutlich recht klein. Als bester Schätzwert wird in der Regel eine Korrektur von 0 K angenommen, die allerdings mit einer Unsicherheit versehen ist. Im Einzelnen wurden die Beiträge wie folgt bestimmt:

t_N	Mittelwert der Temperatur des Normalthermometers (SPRT): Die verwendete Messbrücke berechnet aus den eingegebenen Koeffizienten der Abweichungsfunktion, die bei der Kalibrierung bestimmt wurden, die Temperatur und berechnet den Mittelwert von 10 Einzelmessungen und die Standardabweichung des Mittelwertes. Als Ergebnis der Messung wird eine mittlere Temperatur von 180,234 °C mit einer Standardabweichung des Mittelwertes von 1,2 mK angezeigt.
δt_{Kal}	Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des SPRTs: Die Messunsicherheit des SPRTs beträgt bei 180 °C gemäß Kalibrierschein 15 mK ($k = 2$), die Standardmessunsicherheit also 7,5 mK.
δt_{Drift}	Korrektur aufgrund einer möglichen Drift des Thermometers seit der letzten Kalibrierung: aufgrund der bekannten Historie des Thermometers wird geschlossen, dass die Drift seit der letzten Kalibrierung nicht größer als $\pm 6 \text{ mK}$ sein wird. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $6 \text{ mK} / \sqrt{3} = 3,5 \text{ mK}$.

- δR_R Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Normalwiderstandes: Die relative Messunsicherheit des Normalwiderstandes ist mit $3 \cdot 10^{-6}$ ($k = 2$) im Kalibrierschein angegeben. Bei einem tatsächlichen Widerstand des SPRTs von etwa 43Ω entspricht das einer Unsicherheit von $0,13 \text{ m}\Omega$ ($k = 2$) und einer Standardmessunsicherheit von $0,07 \text{ m}\Omega$. Aufgrund der mit dem Widerstand vorliegenden Erfahrung kann die Drift des Widerstandes seit der letzten Kalibrierung vernachlässigt werden.
- δt_{Br} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit der Widerstandsmessbrücke. Für den verwendeten Messbereich wird im Kalibrierschein eine erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) von 3 mK angegeben. Die Anzeige der Brücke zeigt 6 Stellen, an der Schnittstelle zur Datenerfassung liegen jedoch 7 Stellen vor, über die zeitlich gemittelt wird. Messunsicherheiten aufgrund der begrenzten Auflösung können daher gegenüber den anderen Beiträgen zur Messunsicherheit vernachlässigt werden.
- δt_{WaN} Korrektur aufgrund einer möglichen Wärmeableitung des SPRTs: Ein Herausziehen des SPRTs um 20 mm aus dem Bad führte zu einer (aufgrund der Temperaturschwankungen des Bades nur ungenau abzuschätzenden) Temperaturänderung von 2 mK . Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $2 \text{ mK} / \sqrt{3} = 1,2 \text{ mK}$.
- δt_{EWN} Korrektur der Eigenerwärmung des SPRTs: Im Kalibrierschein ist angegeben, dass ein Messstrom von 1 mA in einer Wassertripelpunktzelle zu einer Erwärmung von $2,1 \text{ mK}$ geführt hat. Dieser Beitrag wird im Folgenden vernachlässigt, da das Thermometer bei einem Messstrom von 1 mA sowohl kalibriert als auch jetzt eingesetzt wird.
- δt_{WAP} Korrektur aufgrund einer möglichen Wärmeableitung des Kalibriergegenstands: Ein Herausziehen des Kalibriergegenstands um 20 mm aus dem Bad führte zu einer (aufgrund der Temperaturschwankungen des Bades nur ungenau abzuschätzenden) Temperaturänderung von 1 mK , gemessen mit der Widerstandsbrücke. Dieser Beitrag wird vernachlässigt. Bei einem Teil der Beispiele wäre aufgrund der geringen Auflösung der Kalibriergegenstände kein Effekt feststellbar gewesen.
- δt_{Hom} Korrektur aufgrund von Inhomogenitäten im Thermostaten: Aus vorhergehenden Untersuchungen ist bekannt, dass der Temperaturunterschied zwischen Kalibriergegenstand und den Normalthermometern infolge von Inhomogenitäten im Bad höchstens $\pm 8 \text{ mK}$ betragen kann. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $8 \text{ mK} / \sqrt{3} = 4,6 \text{ mK}$.
- δt_{Stab} Korrektur aufgrund von zeitlichen Instabilitäten im Bad: Aus vorhergehenden Untersuchungen ist bekannt, dass der Temperaturunterschied zwischen Kalibriergegenstand und den Normalthermometern infolge von zeitlichen Instabilitäten im Bad höchstens $\pm 6 \text{ mK}$ betragen kann. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $6 \text{ mK} / \sqrt{3} = 3,5 \text{ mK}$.

Gegenüber diesen Beiträgen können weitere Einflüsse, wie z.B. Kurzzeitstabilität der Messinstrumente während der Messung, vernachlässigt werden.

Die einzelnen Beiträge zur Unsicherheit der Temperatur des Kalibriergegenstands sind in Tabelle A.1 zusammengefasst.

Größe	Kurzbezeichnung	Schätzwert	Standard-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_N	Streuung der Messwerte SPRT	180,234 °C	1,2 mK	Normal	1	1,2 mK
δt_{Kal}	Kalibrierung SPRT	0 K	7,5 mK	Normal	1	7,5 mK
δt_{Drift}	Drift Normalthermometer	0 K	3,5 mK	Rechteck	1	3,5 mK
δR_R	Normalwiderstand	0 Ω	0,07 m Ω	Normal	10 K/ Ω	0,7 mK
δt_{Br}	Messbrücke	0 K	1,5 mK	Normal	1	1,5 mK
δt_{WaN}	Wärmeableitung SPRT	0 K	1,2 mK	Rechteck	1	1,2 mK
δt_{Hom}	Homogenität Thermostat	0 K	4,6 mK	Rechteck	1	4,6 mK
δt_{Stab}	Stabilität Thermostat	0 K	3,5 mK	Rechteck	1	3,5 mK
t_x	Temperatur Kalibriergegenstand	180,234 °C	10 mK			

Tabelle A.1: Unsicherheit der Temperatur des Kalibriergegenstands

A.2 Kalibrierung eines Präzisions-Widerstandsthermometers mit einer AC-Messbrücke

Bei der Temperatur t_x wird der Widerstand des Kalibriergegenstands (Pt-100-Präzisionsthermometer) gemessen. Für die Messung werden die Widerstandsmessbrücke und der Normalwiderstand eingesetzt, die auch schon bei der Messung mit dem Bezugsnormal verwendet wurden, wobei in diesem Fall die direkte Widerstandsmessung mit der Messbrücke benutzt wird. Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$R(t_x) = R_{MB} + \delta t_{RP} + \delta t_{BrP} + \delta R_{Par} + c_t \cdot \delta T$$

mit

R_{MB} Anzeige der Messbrücke

δR_R Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Normalwiderstandes

δR_{Br} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Widerstandsmessbrücke

δR_{Par} Korrektur aufgrund von parasitären Thermospannungen

δT Korrektur aufgrund der Unsicherheit der Temperatur des Kalibriergegenstands

c_t Empfindlichkeit des Thermometers, beträgt hier 0,4 Ω / K

Diese Beiträge wurden im Einzelnen wie folgt bestimmt:

R_{MB} Anzeige der Messbrücke: Die verwendete Messbrücke berechnet den Mittelwert aus 10 Einzelmessungen des Widerstandes. Als Ergebnis wird ein Widerstand von 168,432 Ω mit einer Standardabweichung des Mittelwertes von 2,2 m Ω ausgelesen.

δR_R Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Normalwiderstandes: Die relative Messunsicherheit des Normalwiderstandes ist mit $3 \cdot 10^{-6}$ ($k = 2$) im Kalibrierschein angegeben; mit dem Verhältnis aus der Brücke ergibt das bei 170 Ω eine Unsicherheit von 0,5 m Ω ($k = 2$) und einer Standardmessunsicherheit von 0,25 m Ω .

Aufgrund der mit dem Widerstand vorliegenden Erfahrung kann die Drift des Widerstandes seit der letzten Kalibrierung vernachlässigt werden.

- δR_{Br} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Widerstandsmessbrücke. Die relative Messunsicherheit der Widerstandsmessbrücke wird im Kalibrierschein mit $3 \cdot 10^{-6}$ ($k = 2$) angegeben, woraus sich eine Standardmessunsicherheit von 0,15 m Ω (bezogen auf den Normalwiderstand) ergibt. Die Anzeige der Brücke zeigt 6 Stellen, an der Schnittstelle zur Datenerfassung liegen jedoch 7 Stellen vor, über die zeitlich gemittelt wird. Messunsicherheiten aufgrund der begrenzten Auflösung können daher gegenüber den anderen Beiträgen zur Messunsicherheit vernachlässigt werden.
- δR_{Par} Korrektur aufgrund von parasitären Thermospannungen: Der Einfluss von parasitären Thermospannungen kann Messungen mit einer AC-Brücke vernachlässigt werden. Falls das Widerstandsthermometer mit einem Gleichstrommessgerät betrieben werden soll, sind zur Bestimmung von Messfehlern durch parasitäre Thermospannungen (nach Absprache mit dem Auftraggeber) ergänzende Messungen notwendig.
- δT Korrektur aufgrund der Unsicherheit der Temperatur des Kalibriergegenstands: In der Tabelle A.1 wurde die der Temperatur des Kalibriergegenstands beigeordnete Standardunsicherheit mit 10,3 mK angegeben.

Diese Beiträge werden in Tabelle A.2 zusammengefasst

Größe	Kurzbezeichnung	Schätzwert	Standardunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
R_{MB}	Ablesung Messbrücke	168,432 Ω	2,2 m Ω	Normal	1	2,2 m Ω
δR_R	Normalwiderstand	0 Ω	0,25 m Ω	Normal	1	0,25 m Ω
δR_{Br}	Messbrücke	0 Ω	0,15 m Ω	Normal	1	0,15 m Ω
δT	Temperatur Kalibriergegenstand	0 K	10,3 mK	Normal	0,4 Ω/K	4,1 m Ω
$R(t_x)$		168,432 Ω	4,66 m Ω			
$R(t_x)$					$k = 2$	9,32 m Ω

Tabelle A.2: Unsicherheit des Widerstandes des Kalibriergegenstands

Folgendes Messergebnis wird im Normalfall ¹ angegeben:

Der Widerstand des IPRTs bei der Temperatur von 180,234 °C beträgt 168,432 Ω . Die Messunsicherheit beträgt 9,4 m Ω . Dies entspricht einer Unsicherheit der Temperaturmessung von 24 mK.

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß DAkkS-DKD-3 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall.

¹ Der Normalfall trifft dann nicht zu, wenn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegt, bei der eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % nicht mit Hilfe eines Erweiterungsfaktors $k = 2$ erzielt wird. In diesem Fall ist die o. g. Annahme zu modifizieren. Dabei ist auf jeden Fall der Wert des Erweiterungsfaktors anzugeben. Nähere Angaben hierzu sind DKD-3 zu entnehmen oder bei der Akkreditierungsstelle des DKD zu erfragen.

A.3 Kalibrierung eines Präzisions-Widerstandsthermometers mit einem Ohmmeter

Bei der Temperatur t_x wird der Widerstand des Kalibriergegenstands (Pt-100-Präzisionsthermometer) gemessen. Die Messung des Widerstandes des Kalibriergegenstands erfolgt mit einem 5-stelligen kalibrierten Widerstandsmessgerät (Ohmmeter), für das ein DKD-Kalibrierschein vorliegt. Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$R(t_x) = R_W + \delta R_{\text{Ohm}} + \delta R_{\text{Drift}} + \delta R_{\text{Auf}} + \delta R_{\text{Par}} + c_t \cdot \delta T + \delta R_{\text{Hys}}$$

mit

R_W Anzeige des Ohmmeters

δR_{Ohm} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Ohmmeters

δR_{Drift} Korrektur aufgrund der Drift des Ohmmeters seit der letzten Kalibrierung

δR_{Auf} Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Ohmmeters

δR_{Par} Korrektur aufgrund von parasitären Thermospannungen

δT Korrektur aufgrund der Unsicherheit der Temperatur des Kalibriergegenstands

c_t Empfindlichkeit des Thermometers, beträgt hier $0,4 \Omega / \text{K}$

δR_{Hys} Korrektur aufgrund von Hystereseeffekten

Diese Beiträge wurden im Einzelnen wie folgt bestimmt:

R_W Anzeige des Ohmmeters: Das Ohmmeter zeigt einen Wert von $168,43 \Omega$ an. Die Standardabweichung des Mittelwertes mehrerer Messungen wird zu $0,005 \Omega$ bestimmt.

δR_{Ohm} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit bei der Kalibrierung des Ohmmeters. Laut Kalibrierschein beträgt die Messunsicherheit des Ohmmeters $0,020 \Omega$ ($k = 2$), die Standardmessunsicherheit also $10 \text{ m}\Omega$.

δR_{Drift} Korrektur aufgrund der Drift des Ohmmeters seit der letzten Kalibrierung: Aufgrund der bekannten Historie des Ohmmeters ist sichergestellt, dass die Drift seit der letzten Kalibrierung höchstens $\pm 20 \text{ m}\Omega$ beträgt. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $20 \text{ m}\Omega / \sqrt{3} = 11,5 \text{ m}\Omega$.

δR_{Auf} Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Ohmmeters. Die begrenzte Auflösung des Ohmmeters von $0,01 \Omega$ erlaubt eine Ablesung innerhalb von $\pm 0,005 \Omega$. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $5 \text{ m}\Omega / \sqrt{3} = 2,9 \text{ m}\Omega$.

δR_{Par} Korrektur aufgrund von parasitären Thermospannungen: Der Einfluss von parasitären Thermospannungen wurde durch Umpolung am Ohmmeter bestimmt. Wegen der begrenzten Auflösung des Ohmmeters war ein Effekt nicht nachweisbar und kann daher vernachlässigt werden.

δT Korrektur aufgrund der Unsicherheit der Temperatur des Kalibriergegenstands: In der Tabelle A.1 wurde die der Temperatur des Kalibriergegenstands beigeordnete Standardunsicherheit mit $10,3 \text{ mK}$ angegeben.

δR_{Hys} Korrektur aufgrund von Hystereseeffekten: Es wurden 2 Messungen durchgeführt. Bei der einen Messung befand sich das Thermometer vorher in einem Salzbad bei $250 \text{ }^\circ\text{C}$, bei der anderen Messung bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Ergebnisse unterschieden sich um $22 \text{ m}\Omega$. Damit ergibt sich ein Beitrag zur Messunsicherheit von $22 \text{ m}\Omega / 2\sqrt{3} = 0 \Omega$.

Diese Beiträge werden in Tabelle A.3 zusammengefasst:

Größe	Kurzbezeichnung	Schätzwert	Standard-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
R_W	Ablesung Ohmmeter	168,43 Ω	5 m Ω	Normal	1	5 m Ω
δR_{Ohm}	Kalibr. Ohmmeter	0 Ω	10 m Ω	Normal	1	10,0 m Ω
δR_{Drift}	Drift Ohmmeter	0 Ω	11,5 m Ω	Rechteck	1	11,5 m Ω
δR_{Auf}	Auflösung Ohmmeter	0 Ω	2,9 m Ω	Rechteck	1	2,9 m Ω
δR_{Hys}	Hystereseeffekte	0 Ω	6,4 m Ω	Rechteck	1	6,4 m Ω
δT	Temperatur Kalibriergegenstand	0 K	10,3 mK	Normal	0,4 Ω/K	4,1 m Ω
$R(t_x)$		168,43 Ω	18,0 m Ω			
$R(t_x)$					$k = 2$	33,6 m Ω

Tabelle A.3: Unsicherheit des Widerstandes des Kalibriergegenstands

Folgendes Messergebnis wird im Normalfall² angegeben:

Der Widerstand des IPTs bei der Temperatur von 180,234 °C beträgt 168,43 Ω . Die Messunsicherheit beträgt 0,04 Ω . Dies entspricht einer Unsicherheit der Temperaturmessung von 0,09 °C.

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß DKD-3 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Wertintervall.

A.4 Kalibrierung eines direkt anzeigenden elektrischen Thermometers

Bei der Temperatur t_x wird die Anzeige $A(t_x)$ eines direktanzeigenden elektrischen Thermometers abgelesen. Es handelt sich dabei um ein Pt-100-Thermometer mit einem zugehörigen Anzeigegerät, das eine Auflösung von 0,01 °C hat. Gesucht wird Korrektur $K(t_x)$, die zur Anzeige addiert werden muss, um die richtige Temperatur zu erhalten. Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$K(t_x) = t_x + \delta t_{\text{Auf}} - A(t_x)$$

mit

$K(t_x)$ Korrektur für das Thermometer

t_x Temperatur des Thermometers

$A(t_x)$ Ablesung des Thermometers

δt_{Auf} Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Thermometers

Diese Beiträge wurden im Einzelnen wie folgt bestimmt:

² Der Normalfall trifft dann nicht zu, wenn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegt, bei der eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % nicht mit Hilfe eines Erweiterungsfaktors $k = 2$ erzielt wird. In diesem Fall ist die o.g. Annahme zu modifizieren. Dabei ist auf jeden Fall der Wert des Erweiterungsfaktors anzugeben. Nähere Angaben hierzu sind DKD-3 zu entnehmen oder bei der Akkreditierungsstelle des DKD zu erfragen.

- t_x Temperatur des Thermometers: Nach Tabelle A.1 beträgt die Temperatur des Thermometers 180,234 °C mit einer Standardunsicherheit von 10,3 mK.
- $A(t_x)$ Ablesung des Thermometers: Das Thermometer zeigt eine Temperatur von 180,25 °C an. Während 5 min Messzeit wurde diese Temperatur konstant angezeigt; die statistische Schwankung ist damit innerhalb der Auflösung zu vernachlässigen.
- δt_{Auf} Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Thermometers: Bei einer Auflösung von 10 mK ist die Ablesung nur innerhalb von ± 5 mK möglich. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $5 \text{ mK} / \sqrt{3} = 2,9 \text{ mK}$.

Diese Beiträge werden in Tabelle A.4 zusammengefasst.

Größe	Kurzbezeichnung	Schätzwert	Standardunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_x	Temperatur Thermometer	180,234 °C	10,3 mK	Normal	1	10,3 mK
$A(t_x)$	Ablesung	180,25 °C	0 mK	Normal	1	0 mK
δt_{Auf}	Auflösung	0 K	2,9 mK	Rechteck	1	2,9 mK
$K(t_x)$	Korrektur	-16 mK	10,7 mK			
$K(t_x)$					$k = 2$	21 mK

Tabelle A.4: Unsicherheit der Temperaturanzeige des Kalibriergegenstands

Folgendes Messergebnis wird im Normalfall³ angegeben:

Bei der Temperatur von 180 °C muss die Korrektur $K(t_x) = -16 \text{ mK}$ zur Anzeige addiert werden, um die zu messende Temperatur zu erhalten. Die Messunsicherheit der Korrektur beträgt 21 mK.

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß DKD-3 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Wertintervall.

³ Der Normalfall trifft dann nicht zu, wenn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegt, bei der eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % nicht mit Hilfe eines Erweiterungsfaktors $k = 2$ erzielt wird. In diesem Fall ist die o.g. Annahme zu modifizieren. Dabei ist auf jeden Fall der Wert des Erweiterungsfaktors anzugeben. Nähere Angaben hierzu sind DKD-3 zu entnehmen oder bei der Akkreditierungsstelle des DKD zu erfragen.

A.5 Kalibrierung eines Widerstandsthermometers mit angeschlossenem Transmitter

Bei der Temperatur t_x soll der Ausgangsstrom des an das Thermometer angeschlossenen Transmitters gemessen und kalibriert werden. Der Thermometersensor ist vom Typ Pt 100. Der Transmitter liefert ein analoges Ausgangssignal, das linear mit der Temperatur steigt mit folgender Einstellung: $4 \text{ mA} \triangleq 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ mA} \triangleq 320 \text{ }^\circ\text{C}$, d.h. eine Änderung von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bewirkt eine Änderung des Signalstromes von 1 mA .

Zur Messung des Ausgangssignals wird ein Amperemeter mit einer Auflösung von $1 \mu\text{A}$ verwendet, für das ein DKD-Kalibrierschein vorliegt.

Das Modell für diese Messung ergibt sich zu

$$i(t_x) = i_{\text{Am}} + \delta i_{\text{AK}} + \delta i_{\text{AD}} + \delta i_{\text{Um}} + c_i \delta T + \delta i_{\text{EW}}$$

mit

i_{Am} Anzeige des Amperemeters

δi_{AK} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit des Amperemeters

δi_{AD} Korrektur aufgrund der Drift des Amperemeters seit der letzten Kalibrierung

δi_{Um} Korrektur aufgrund von Umgebungseinflüssen auf den Transmitter

δi_{EW} Korrektur aufgrund von Rückwirkungen des Eingangswiderstands der Auswerteelektronik

δT Korrektur aufgrund der Messunsicherheit der Temperatur des Bades

c_i Empfindlichkeit des Thermometers mit Transmitter, beträgt hier $50 \mu\text{A/K}$

Diese Beiträge wurden im Einzelnen wie folgt bestimmt:

i_{Am} Anzeige des Amperemeters: Das Amperemeter zeigt einen Messwert von $13,103 \text{ mA}$ mit einer Standardunsicherheit des Mittelwertes mehrerer Messungen von $1,7 \mu\text{A}$.

δi_{AK} Korrektur aufgrund der Messunsicherheit des Amperemeters: Aus dem Kalibrierschein ergibt sich bei einem Messstrom von 94 mA eine Korrektur von $2,2 \mu\text{A}$ mit einer Unsicherheit von $1,8 \mu\text{A}$ ($k = 2$). Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $0,9 \mu\text{A}$.

δi_{AD} Korrektur aufgrund der Drift des Amperemeters seit der letzten Kalibrierung: aufgrund der bekannten Historie des Amperemeters wird geschlossen, dass die Drift seit der letzten Kalibrierung nicht größer als $\pm 2 \mu\text{A}$ sein wird. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $2 \mu\text{A} / \sqrt{3} = 1,2 \mu\text{A}$.

δi_{Um} Korrektur aufgrund von Umgebungseinflüssen auf den Transmitter: Aufgrund der Angaben des Kunden beträgt die Betriebstemperatur des Transmitters im Einsatz zwischen $40 \text{ }^\circ\text{C}$ und $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei der Kalibrierung betrug die Temperatur des Transmitters $52 \text{ }^\circ\text{C}$. Aufgrund der Herstellerspezifikation kann der Ausgangsstrom durch die zu erwartenden Einflüsse um maximal $\pm 6 \mu\text{A}$ verändert werden. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $6 \mu\text{A} / \sqrt{3} = 3,5 \mu\text{A}$.

δi_{EW} Korrektur aufgrund von Rückwirkungen des Eingangswiderstandes der nachgeschalteten Auswerteelektronik. Gemäß Datenblatt beträgt der Einfluss maximal $8 \mu\text{A}$. Daraus ergibt sich eine Standardmessunsicherheit von $8 \mu\text{A} / \sqrt{3} = 4,6 \mu\text{A}$.

δT Korrektur aufgrund der Messunsicherheit der Temperatur des Bades: Nach Tabelle A.1 beträgt die Temperatur des Thermometers $180,234 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einer Standardunsicherheit von $10,3 \text{ mK}$.

Diese Beiträge werden in Tabelle A.5 zusammengefasst.

Größe	Kurzbezeichnung	Schätzwert	Standard-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
i_{Am}	Anzeige Amperemeter	13,103 mA	1,7 μ A	Normal	1	1,7 μ A
δi_{AK}	Kalibrierung Amperemeter	2,2 μ A	0,9 μ A	Normal	1	0,9 μ A
δi_{AD}	Drift Amperemeter	0 μ A	1,2 μ A	Rechteck	1	1,2 μ A
δi_{Um}	Umgebungstemperatur	0 μ A	3,5 μ A	Rechteck	1	3,5 μ A
δi_{EW}	Eingangswiderstand	0 μ A	4,6 μ A	Rechteck	1	4,6 μ A
δT	Temperatur Kalibriergegenstand	0 K	10,3 mK	Normal	50 μ A/K	0,5 μ A
$K(t_x)$	Signalstrom	13,1052 mA	6,2 μ A			
$K(t_x)$					$k = 2$	12,4 μ A

Tabelle A.5: Unsicherheit des Signalstromes des Transmitters

Folgendes Messergebnis wird im Normalfall⁴ angegeben:

Bei der Temperatur von 180,234 °C wird ein Signalstrom von 13,1052 mA ausgegeben. Die Messunsicherheit beträgt 12 μ A, was einer Temperaturunsicherheit von 0,17 K entspricht.

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß DAkkS-DKD-3 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall. Die Messunsicherheit gilt für eine Betriebstemperatur des Transmitters zwischen 40 °C und 60 °C.

⁴ Der Normalfall trifft dann nicht zu, wenn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegt, bei der eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % nicht mit Hilfe eines Erweiterungsfaktors $k = 2$ erzielt wird. In diesem Fall ist die o.g. Annahme zu modifizieren. Dabei ist auf jeden Fall der Wert des Erweiterungsfaktors anzugeben. Nähere Angaben hierzu sind DKD-3 zu entnehmen oder bei der Akkreditierungsstelle des DKD zu erfragen.

Anhang B: Messunsicherheit bei Messungen mit einem Widerstandsthermometer

Die obigen Beispiele A1 bis A4 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). 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 B.1 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 0,5 K
Widerstand der Zuleitungen	Berechnung des Leitungswiderstandes	Bis zu etlichen K
Parasitäre Thermospannungen	Umpolung	Bis zu 0,2 K bei Pt 100
Drift des Thermometers, Langzeitstabilität	Kontrolle an Fixpunkten (Eispunkt)	Bis zu 0,5 K
Auswerteelektronik (bei direktanzeigenden Thermometern)	Datenblatt	Bis zu 0,5 K

Tabelle B.1: Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit bei Messungen mit Widerstandsthermometern