

XVI Temperaturanzeige und Simulation¹

XVI.1 Kalibrierverfahren Temperatursimulation

In elektrischer Simulation können Temperaturanzeigeegeräte z. B. gemäß der Richtlinie „DKD-R 5-5 Kalibrierung von Temperaturanzeigeegeräten und –simulatoren durch elektrische Simulation und Messung“ (EA-10/11) kalibriert werden. Dazu werden grundsätzlich elektrische Normale verwendet und über die Messgrößen wie „Gleichstromwiderstand“ und „Gleichspannung“ rückgeführt. Die Art des Messobjektes spielt dabei eine untergeordnete Rolle, solange die Grundwerte (Zusammenhang zwischen elektrischer Größe und Temperaturanzeige) z. B. als Gleichung oder Tabelle genau genug beschrieben werden kann. Weitere Angaben zur Ausführung sind in Arbeitsanweisung AA0304 enthalten: <http://dmserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0304-Kalibrierumfang-Temperaturanzeigeegeraete-und-Temperatursimulatoren.doc>

Exemplarisch wird hier auf die Vorgehensweise für Anzeigegeräte und Simulatoren für Widerstandsthermometer gemäß DIN 60751 bzw. Thermoelementen eingegangen. Abgewandelt lassen sich diese aber für alle Arten von Temperaturanzeigeegeräten (oder –simulatoren) wie NTC- oder PTC-Anzeigen nach Steinhart-Hart-Gleichung anwenden.

XVI.1.1 Widerstandssimulation



Widerstandstemperaturen werden in 4-Leiter-Technik üblicherweise gemäß der Grundwertreihen der DIN 60751 erzeugt und am Anzeigegerät (Kalibriergegenstand) gemessen. Der genaue Wert des Simulationswiderstandes kann durch eine vorangehende Widerstandsmessung an einem Systemmultimeter wie Keysight 3458A bestimmt werden („einkalibrieren“, vgl. dazu Kapitel IV.2 „Widerstandskalibrierung mit zuvor eingemessenen Normalen“) und wird über die Grundwertgleichungen in den genauen Temperaturwert umgerechnet. Die dem gemessenen Widerstandswert entsprechende ideale Temperatur $t(R_t)$ ergibt sich im Beispiel der DIN EN 60751 als

$$t(R_t) = \frac{\sqrt{B \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \frac{A^2}{4}} - \frac{A}{2}}{B}$$

z.B. mit den für 385-Platin geltenden Konstanten $A=3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ und $B=-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$ und $R_0=100 \text{ Ω}$. Alternativ kann diese Berechnung durch Software (MS-Excel, Programm JUMOSENS) am PC erfolgen.

¹ weitere Informationen enthält Arbeitsanweisung AA0340 - <http://dmserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0304-Kalibrierumfang-Temperaturanzeigeegeraete-und-Temperatursimulatoren.doc>

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|--|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 1 |

XVI.1.2 Thermospannungssimulation ohne oder mit ausschaltbarer Kompensationsstelle

Besitzen die zu kalibrierenden Anzeigegeräte keine Vergleichsstellenkompensation oder ist diese

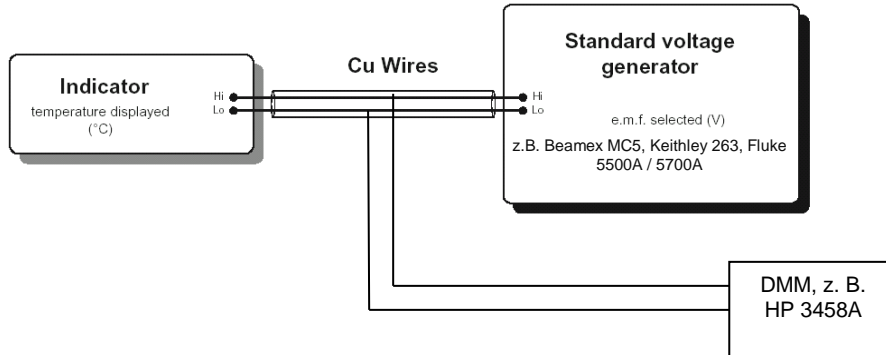


Bild XVI.2 Thermospannungssimulation mit Kupferleitung bei ausgeschalteter Vergleichsstelle aus EA-10/11

abschalt- oder programmierbar ($T_{ref}=0\text{ °C}$), so kann die äquivalente Thermospannung über Kupferleitungen direkt am Kalibriergegenstand gemessen und in °C angezeigt werden (Bild XVI.2). Mit einem DC-Kalibrator wie Fluke 5700A, 5720A oder Keithley 263 (s. Kapitel III bzw. XV) oder gleichzeitiger Verifikation der Gleichspannungsquelle an einem hochauflösendem Voltmeter (wie HP 3458A oder Keithley 181, siehe Kapitel XV) wird mit Hilfe der entsprechenden Grundwerttabellen für Thermospannung (z. B. der DIN EN 60584 oder DIN EN 62460 die dem Temperaturwert zugehörige Spannung erzeugt. Der Anschluss erfolgt üblicherweise über „Mini-TC auf Banane“-Adapter oder geeignete Verbindungen. Mit den dem erzeugten Referenzwert am nächsten liegenden Punkten $U_1(T_1)$ und $U_2(T_2)$ aus den Tabellen ergibt sich die interpolierte Temperatur (Kalibrierwert) zu

$$t(U_{ref}) = T_1 + \frac{U_{ind} - U_1}{\Delta U} \cdot \text{°C} \text{ mit } \Delta U = U_2 - U_1^2$$

Andere Spannungsquellen als Fluke 57xxA oder Keithley 263, die diese Berechnung bereits durchführen und ein Ablesen der Spannung in °C möglich machen, sollten vor jeder Messung einkalibriert oder bei der Messung „gemonitort“ werden. Andernfalls werden zusätzliche Unsicherheitsbeträge in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt.

² Alternativ kann die Berechnung am PC erfolgen (Excel-Tabellen oder Programm JUMOSENS).

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/ genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 2 |

XVI.1.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstellenkompensation

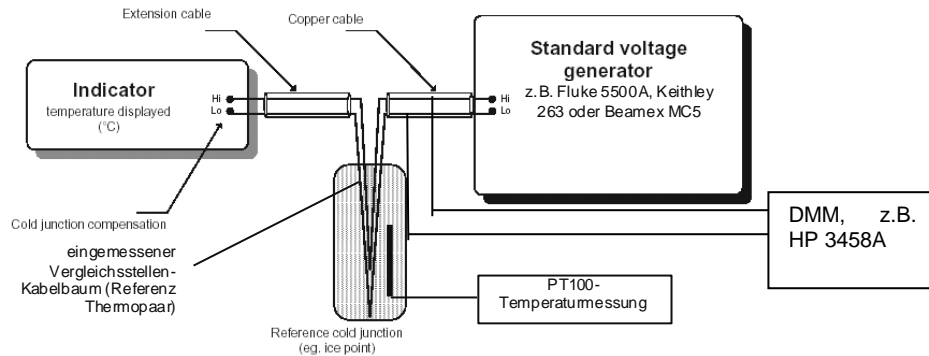


Bild XVI.3 Thermospannungssimulation mit externer Vergleichsstelle aus EA-10/11

Werden Geräte kalibriert, die mit interner Vergleichsstellenkompensation betrieben werden ($T_{ref} = int.$) muss wie in Bild XVI.3 die Referenztemperatur z.B. gleichzeitig über PT100 Messung bestimmt werden, über die Kalibrierdauer konstant gehalten und in die Kalibrierung miteinbezogen werden. Am besten geschieht dies über eine Eiswassermischung („crushed ice“) in einem Thermobehälter (Thermoskanne) oder in der Fixpunktzelle am Wassertripelpunkt (TPW). Für die gebräuchlichsten Thermopaare stehen Vergleichsstellenverbindungen zur Verfügung (Übergang Thermolegierung – Kupfer in eingeschweißter Schutzhülle), deren Anschlusspaare mindestens für Temperaturdifferenzen von 23 °C charakterisiert und kalibriert wurden (vgl. Kapitel XIV).

Die kleinsten Messunsicherheiten sind anwendbar, wenn vor der Kalibrierung die Korrektur dieser Ausgleichs- und Verbindungsleitungen bestimmt wird³. Eine mögliche Reihenfolge

- 1) Bestimmung der Korrektur der Thermoleitung im Wasserbad (vgl. Kapitel XIV) im PT100 Vergleich
- 2) Bestimmung der Abweichung des Anzeigerätes (Vergleichsstellenkompensation EIN) unter Berücksichtigung der Korrektur aus 1)

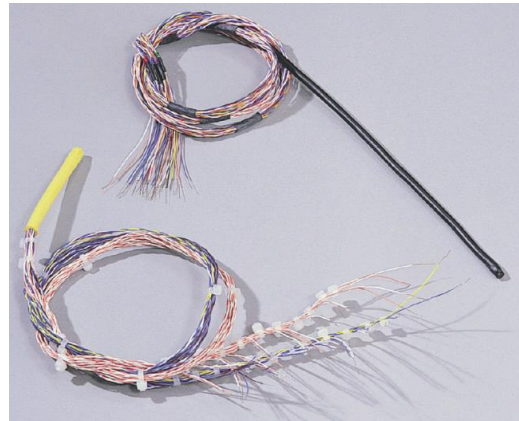


Bild XVI.4 Vergleichsstelle als Kabelbaum

³ siehe auch <http://dmserver/technik/Arbeitsanweisungen/AA0113-Kalibrierumfang-Thermo-und-Ausgleichsleitungen.doc>

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|--|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 3 |

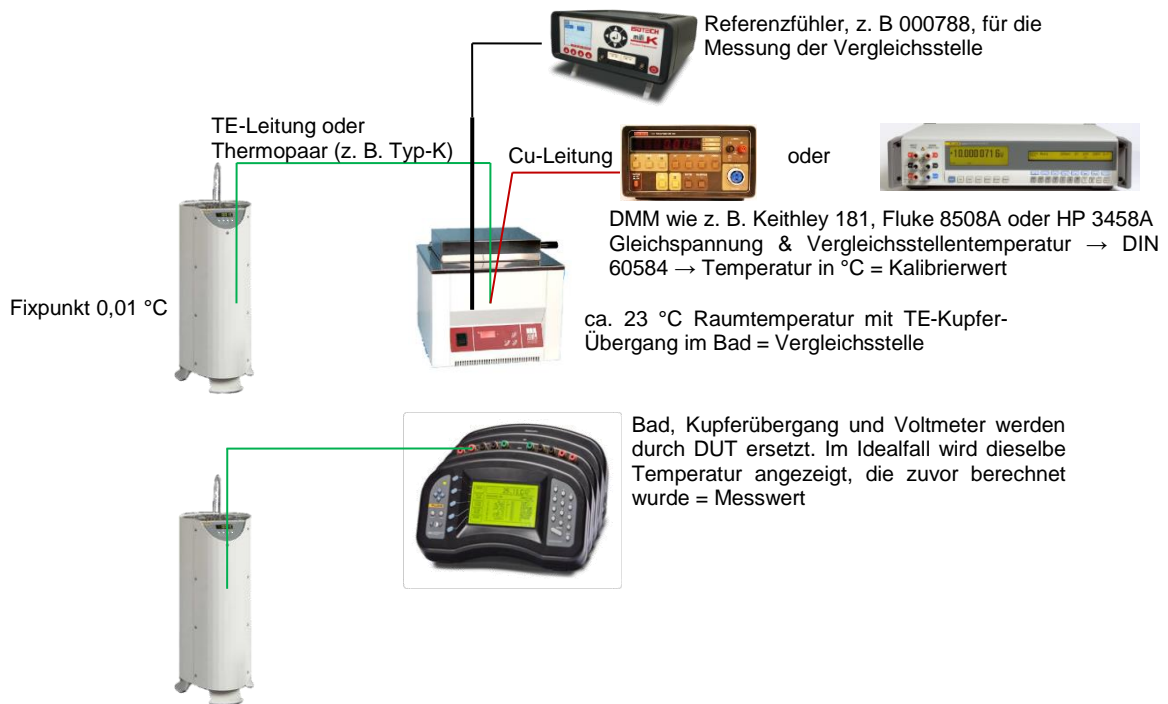
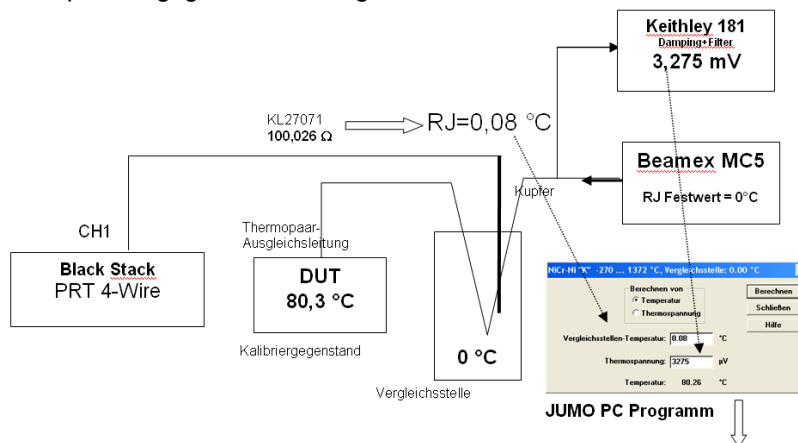


Bild XVI.1.3.1 - Kalibrierung der Abweichung der internen Vergleichsstelle von Temperaturanzeigeräten

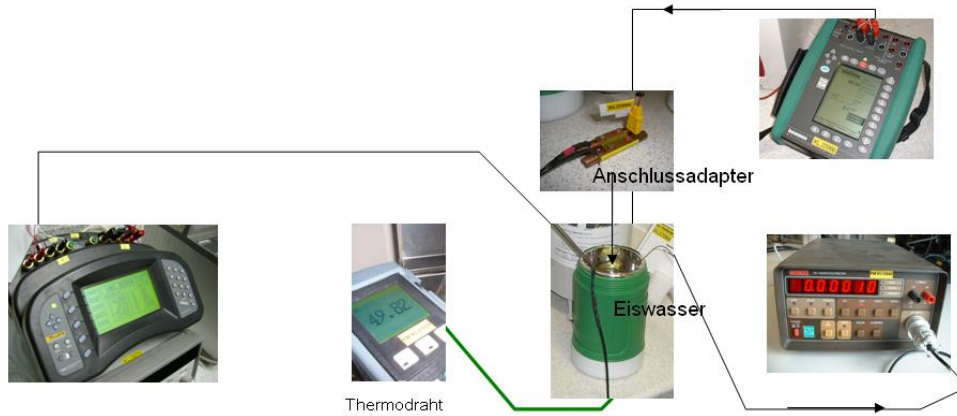
Werden Temperaturkalibratoren verwendet, die bereits ein Ablesen der äquivalenten Temperatur für die entsprechenden Thermospannungsreihen ermöglichen (Fluke 5500A, Beamex MC5) so ist deren Funktion und Einhaltung der Messunsicherheit vor der Kalibrierung im Vergleich mit den Normalspannungsquellen Fluke 5700 und Keithley 263 sicherzustellen.

Messbeispiel

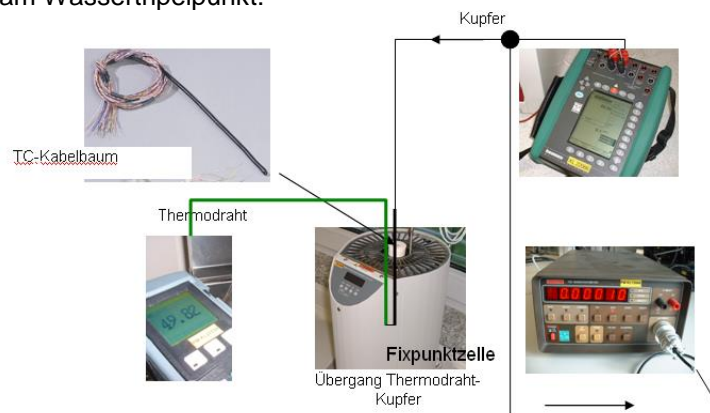
mit Beamex MC5 als Spannungsgenerator, Vergleichsstelle im Eisbad



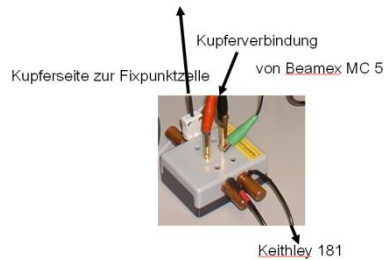
| Ausgabe: | erstellt | geprüft/ genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 4 |



mit Vergleichsstelle am Wassertripelpunkt:



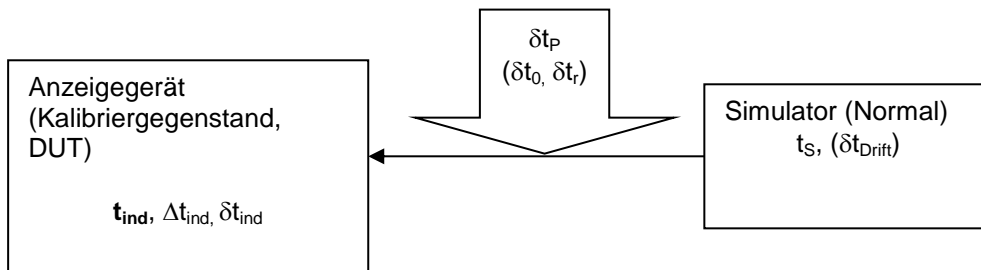
Anschlussadapter:



XVI.2 Messunsicherheit

XVI.2.1 Widerstandssimulation

Skizze des Messverfahrens:



mit

t_{ind} Temperatur-Messwert am Anzeigegerät in °C.

Δt_{ind} Abweichung der Anzeige vom (richtigen) Kalibrierwert

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|--|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 5 |

- δt_{ind} Abweichung durch die Rundung der Anzeige (Digits) des Messgerätes. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige wodurch im „worst case“ eine Abweichung von 1 Digit entsteht. Der Unsicherheitsbeitrag wird rechteckverteilt in diesem Intervall angenommen. Die Anzeige des Kalibriergegenstandes kann erst im konkreten Fall berücksichtigt werden. Gute Anzeigeinstrumente bieten Auflösungen von 1 mK oder besser.
- t_s Eingestellte Temperatur am Widerstandsnormal in °C. Die Grundwertgleichungen der entsprechenden Fühlertypen ergeben den zu wählenden Normalwiderstand, der im Vier-Leiter-Verfahren der Simulation des Messpunktes dient. Die Korrektur aufgrund der Messunsicherheit durch Kalibrierung des Normals ist Normalverteilt (k=2) dem Messverfahren für Kalibrierung von Widerstand mit eingemessenen Normalen Kapitel IV am entsprechenden Messpunkt zu entnehmen. Die Widerstandsunsicherheit wird anhand der Grundwertgleichungen (-Tabellen) der DIN 60751 in den beizuordnenden Wert in °C umgerechnet. Liegt die Messunsicherheit dieses Verfahrens beispielsweise bei maximal 3 mΩ für die Kalibrierung mit einem 100 Ω Widerstand, so ergibt sich abgebildet auf die Temperaturskala also etwa 8 mK in diesem Bereich.
- δt_{Drift} Wird unmittelbar vor der Messung das Widerstandsnormal verifiziert (eingemessen) so kann die zeitliche Drift des Kalibrierwertes im kurzen Intervall vernachlässigt werden.
- δt_p Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch mögliche Offsets, unbekannte Leitungswiderstände oder Kurzzeitstabilität. Üblicherweise sind diese Einflüsse bereits in $U(t_s)$ bereits enthalten.

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich für die Abweichung der Anzeige am Kalibriergegenstand aus

$$t_{ind} - \Delta t_{ind} + \delta t_{ind} = t_s + \delta t_p + \delta t_{Drift}$$

die **Modellgleichung**

$$\Delta t_{ind} = t_{ind} + \delta t_{ind} - (t_s + \delta t_p + \delta t_{Drift})$$

mit allen Sensitivitätskoeffizienten $c_i = \left| \frac{\partial \Delta t_{ind}}{\partial t_i} \right| = 1$

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 6 |

Messunsicherheitsbilanz

Für die der Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes in Temperatursimulation beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta t_{ind}) = u^2(t_{ind}) + u^2(\delta t_{ind}) + u^2(t_s) + u^2(\delta t_p)$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

| Größe | Schätzwert | Standardmessunsicherheit | Verteilung | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
| t_{ind} | $\overline{t_{ind}}$ | $U(t_{ind})$ | Normal A | | $u(t_{ind})$ |
| t_s | T_s | $U(t_s)/2$ | Normal | 1 | $u(t_s)$ |
| δt_{ind} | 0 | $\Delta(\delta t_{ind})/\sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_{ind})$ |
| δt_p | 0 | $\Delta(\delta t_p)/\sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_p)$ |
| δt_{Drift} | 0 | $\Delta(\delta t_{Drift})/\sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_{Drift})$ |
| Δt_{ind} | $\overline{t_{ind}} - T_s$ | | | | $u(\Delta t_{ind})$ |

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis Δt_x beizuordnende absolute erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$U_{abs}(\Delta t_{ind}) = 2u(\Delta t_{ind})$$

XVI.2.2 Thermospannungssimulation ohne Vergleichsstelle

Es gelten Budget und Modellgleichung aus XVI.2.1. Statt der Verwendung eines Widerstandsnormales erfolgt die Kalibrierung durch Erzeugung von DC-Spannungen gemäß der Verfahren aus Kapitel XV (Millivoltkalibrierung) und Kapitel III (Kalibrierung DC-U). Für die Erzeugung der Spannung gilt abweichend:

t_s Eingestellte Temperatur am Spannungsnormal in °C. Die Grundwerttabellen der entsprechenden Fühlertypen ergeben die zu wählende Gleichspannung, die an Kupferleitungen der Simulation des Messpunktes dient. Wird das Normal vor der Messung einkalibriert und der genaue Temperaturwert ermittelt, so ist nur die Korrektur aufgrund der Unsicherheit bei Spannungserzeugung zu berücksichtigen. Andernfalls ist die erweiterte Unsicherheit des verwendeten Spannungsnormals zu verwenden. Diese ist Normalverteilt (k=2) dem Messverfahren für Kalibrierung von Gleichspannung zu entnehmen. Die Spannungsunsicherheit wird anhand der Grundwerttabellen der DIN 60584 und Linearisierung um den Messpunkt in den beizuordnenden Wert in °C umgerechnet (Sensitivität am Messpunkt). Liegt die Messunsicherheit dieses Verfahrens beispielsweise bei 1 µV für die Kalibrierung am Nullpunkt 0 °C ergibt sich abgebildet auf die Typ-K Temperaturskala also etwa 0,03 K in diesem Bereich.

δt_{Drift} Wird unmittelbar vor der Messung die Spannungsquelle eingemessen so kann die zeitliche Drift des Kalibrierwertes im kurzen Intervall vernachlässigt werden. Bei Verwendung einer kalibrierten Quelle ist dieser Anteil üblicherweise bereits im Unsicherheitsbeitrag von t_s enthalten.

δt_p Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch mögliche Offsets, unbekannte Effekte oder Kurzzeitstabilität. Üblicherweise sind diese Einflüsse bereits in $U(t_s)$ enthalten.

δt_{ind} Für Thermospannung bieten gute Anzeigeinstrumente Auflösungen bis zu 1 mK.

XVI.2.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstelle

Zusätzlich zu den in XVI.2.2 genannten Größen werden in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt bzw. modifiziert:

Δt_r Die verwendete Anschlussleitung muss im kleinen Temperaturintervall ideal sein um genaue Ergebnisse zu erzielen. Die tatsächlichen Abweichungen können durch eine Kalibrierung der Anschlussleitung (Thermoelementkalibrierung QMH Abs. XIV.4) z.B. im Bad gegen eines der Referenz-PTRs genau bestimmt werden, vgl. Bild XVI.1.3.1. Erfahrungsgemäß bewegen sich deren Abweichungen im Umgebungstemperaturbereich (ΔT bis 40 K) allerdings bis maximal 6 mK/K. Die im Labor genutzten Typ-K Ausgleichleitungen können sogar besser als 2 mK/K charakterisiert werden.

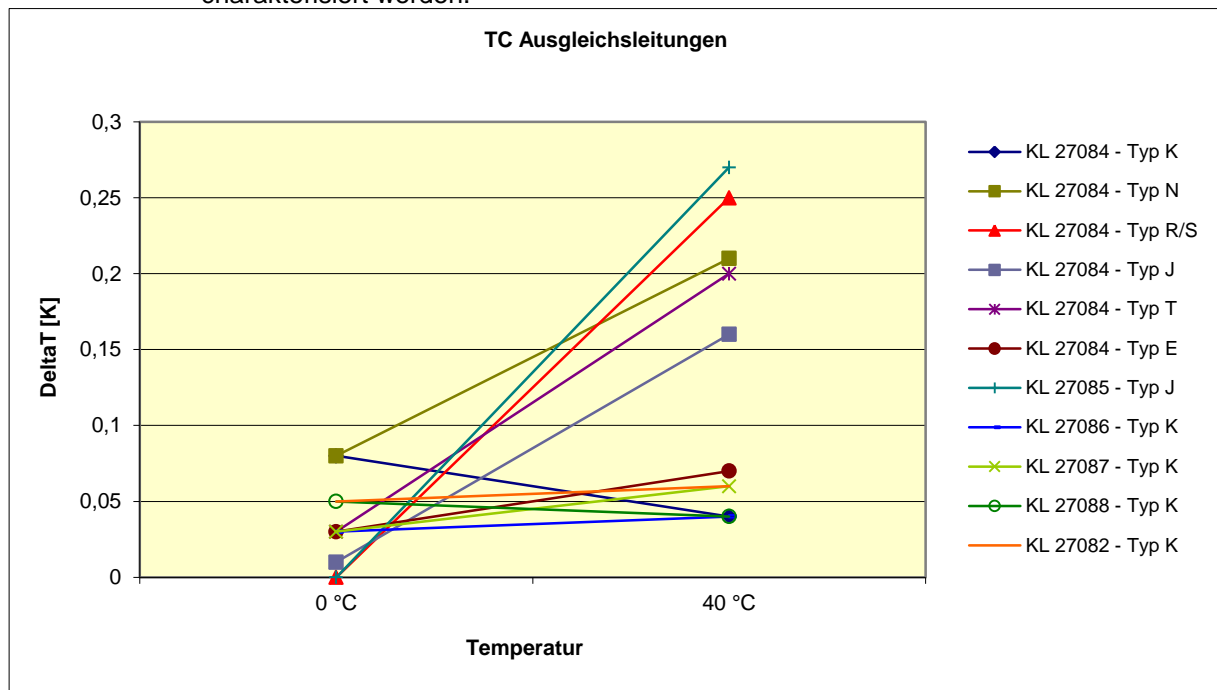


Bild XVI.5 Ausgleichsleitungen bei verschiedenen Temperaturdifferenzen im Vergleich

δt_R Bleibt die Abweichung der Ausgleichsleitung unkorrigiert, so ist deren gemessene Abweichung oder maximale Grenzabweichung (Spezifikation) als U-verteilt bzw. rechteckverteilt Unsicherheitsintervall zu berücksichtigen.

δt_o Abweichung aufgrund der Bestimmung der Korrektur der Ausgleichsleitung (z.B. am PT100 Messsystem). Der Beitrag im Budget ergibt sich durch die Unsicherheit der Temperaturnormale (vgl. QMH Abs. XIV)⁴ zu 40 mK

entsprechend erweitert sich die **Modellgleichung**:

$$\Delta t_{ind,komp} = t_{ind} + \delta t_{ind} - (t_s + \delta t_p + \delta t_{Drift} + \delta t_o + \delta t_r)$$

$$u^2(\Delta t_{ind,komp}) = u^2(\Delta t_{ind}) + u^2(\delta t_o) + u^2(\delta t_r) = u^2(\Delta t_{ind}) + (0,1K / \sqrt{3})^2$$

und Erweiterung der **tabellarischen Übersicht**:

⁴ z. B. <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/000788.xlsx> – Reiter 000473-000472: MU-Berechnung für HP 3458A als TE-Anzeigegerät

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/ genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 8 |

| Größe | Schätzwert | Standard-messunsicherheit | Verteilung | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag |
|--------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| Δt_r | $\Delta t_{r,Kal}$ | | | | |
| δt_r | 0 | $a_{Spec}/\sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_r)$ |
| δt_0 | 0 | 40 mK / 2 | Normal | 1 | 20 mK |

bestenfalls somit

$$U_{abs}(\Delta t_{ind,komp}) = \sqrt{(U(\Delta t_{ind}))^2 + (40 \text{ mK})^2}$$

Demnach ergibt sich ein zusätzlicher Unsicherheitsbetrag zu gerundet 40 mK der bei Kalibrierung mit Vergleichsstellenkompensation, der quadratisch der Messunsicherheit zu addieren ist.

XVI.3 Kalibrierverfahren Temperaturanzeige

Analog zu Kapitel XVI.1 können in elektrischer Messung Temperatursimulatoren gemäß der Richtlinie „DKD-R 5-5 Kalibrierung von Temperaturanzeigergeräten und –simulatoren durch elektrische Simulation und Messung“ (EA-10/11) kalibriert werden. Messung und Rückführung erfolgen entsprechend den Beschreibungen der Kapitel IV und XV.

XVI.3.1 Kalibrierung von Widerstandssimulatoren

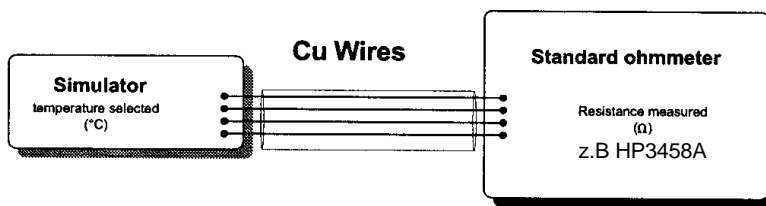


Bild XVI.3.1 Widerstandsmessung (4-Draht) aus EA-10/11

PT100 Widerstandstemperaturen werden in 4-Leiter-Technik z.B. am Digitalmultimeter HP 3458A oder Labormultimeter Fluke 8508A gemessen (vgl. Kapitel IV) und gemäß der Grundwertreihen der DIN 60751 in den entsprechenden Temperaturwert umgerechnet. Die nötigen Rechenoperationen für 385-IPRT können dabei am besten über Microsoft Excel oder das PC-Programm JUMOSENS durchgeführt werden. Das Kalibrierverfahren erlaubt die Verwendung der Unsicherheit bei Widerstandsmessung mit Abbildung auf die entsprechende Temperaturskala.

XVI.3.1 Thermospannungssimulatoren ohne oder mit ausschaltbarer Kompensationsstelle

Besitzen die zu kalibrierenden Temperatursimulatoren keine Vergleichsstellenkompensation oder ist diese abschaltbar ($T_{ref}=0 \text{ °C}$), so kann die äquivalente Thermospannung über Kupferleitungen direkt

- am Multimeter Fluke 8508A, HP 3458A
- am Millivoltmeter Keithley 181
- an den Thermoelementanzeigergeräten Fluke 5500A oder Beamex MC5.

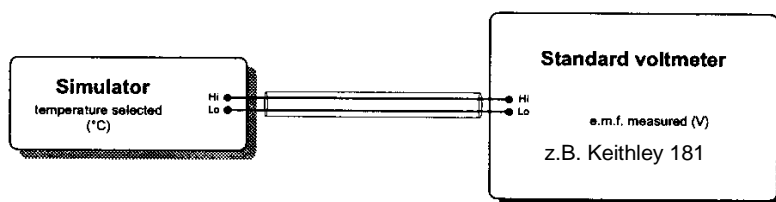


Bild XVI.3.2 Thermospannungsmessung mit Kupferleitung bei ausgeschalteter Vergleichsstelle aus EA-10/11

gemessen werden. Letztere ermöglichen die Anzeige der Thermospannung für die gebräuchlichsten Thermopaare bereits in °C. Die Messunsicherheitsberechnung geht von direkter Messung der Spannung am Millivoltmeter bzw. Multimeter aus, die Umrechnung in °C erfolgt anhand der Grundwerttabellen und linearer Interpolation zwischen den Werten (vgl. Kapitel XIV). Mit den dem Messwert am nächsten liegenden Punkten $U_1(T_1)$ und $U_2(T_2)$ aus den Tabellen ergibt sich die interpolierte Temperatur zu

$$t(U_{ind}) = T_1 + \frac{U_{ind} - U_1}{\Delta U} \cdot \Delta T \quad \text{mit } \Delta U = U_2 - U_1^5$$

Wird diese Berechnung durch Anzeigegeräte wie Beamex MC5 oder Fluke 5500A durchgeführt und das Ergebnis direkt in °C abgelesen, muss die Korrektur der Anzeige des Spannungsmessgerätes vor der Kalibrierung ermittelt und berücksichtigt werden (Vergleichsverfahren, vgl. Kapitel XV) um kleinste Messunsicherheiten zu erzielen. Andernfalls wird dieser zusätzliche Unsicherheitsbeitrag in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt.

Der Anschluss erfolgt i.d.R. über Mini-TC-Stecker, die durch geeignete Adapter an das Messinstrument angeschlossen werden können (Kupfer-Klemmverbindung).

XVI.3.3 Thermospannungssimulation mit interner Vergleichsstellenkompensation

Werden Geräte kalibriert, die eine interne Vergleichsstelle und Kompensationsschaltung besitzen muss wie in Bild XVI.3.3 die Referenztemperatur über PT100 Messung berücksichtigt (z.B. 0°C) und über die Kalibrierdauer konstant gehalten werden (vgl. Kapitel XVI.1.3). Um den Korrekturwert der Thermo-Ausgleichsleitung (Kabelbaum, Referenz-Thermoelement) zu berücksichtigen muss dieser zuvor im Vergleich mit Pt100-Messung bestimmt worden sein (z.B. bei 23 °C). Die Reihenfolge für die Einhaltung der kleinsten Messunsicherheit bei der Kalibrierung ergibt sich z.B. zu

- 1) Bestimmung der Korrektur der Thermoleitung im Wasserbad (vgl. Kapitel XIV) und Pt100 Vergleich
- 2) Bestimmung der Abweichung des Kalibriergegenstandes (Vergleichsstellenkompensation EIN) unter Berücksichtigung der Korrektur aus 1)

Dabei wird angenommen, dass die ermittelten Korrekturen im Rahmen der Messunsicherheit im kurzen Intervall konstant sind. Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit werden die Schätzwerte der Korrekturen zu Null angenommen.

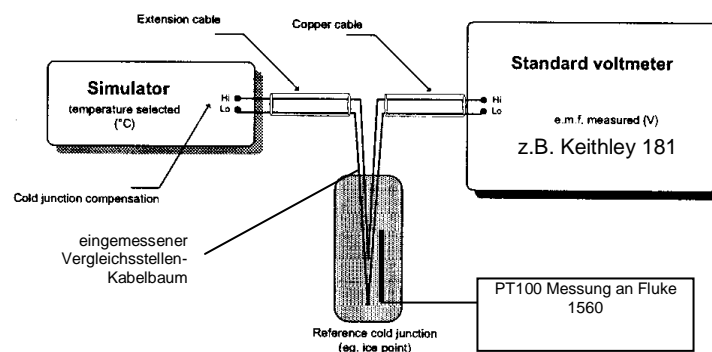


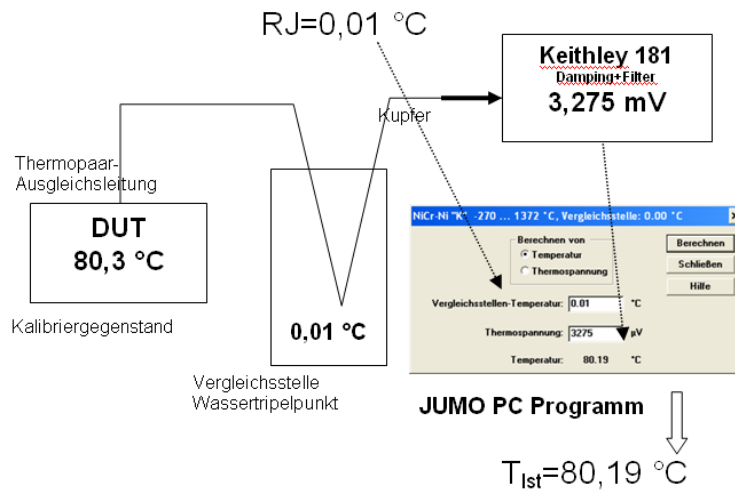
Bild XVI.3.3 Thermospannungsmessung mit externer Vergleichsstelle aus EA-10/11

Andere Anzeigegeräte als Fluke 8505A, HP 3458A oder Keithley 181, die eine Umrechnung bereits durchführen und ein Ablesen der Spannung in °C möglich machen, müssen vor einer Messung einkalibriert oder auf Einhaltung der Messunsicherheit überprüft werden. Andernfalls werden zusätzliche Unsicherheitsbeträge in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt.

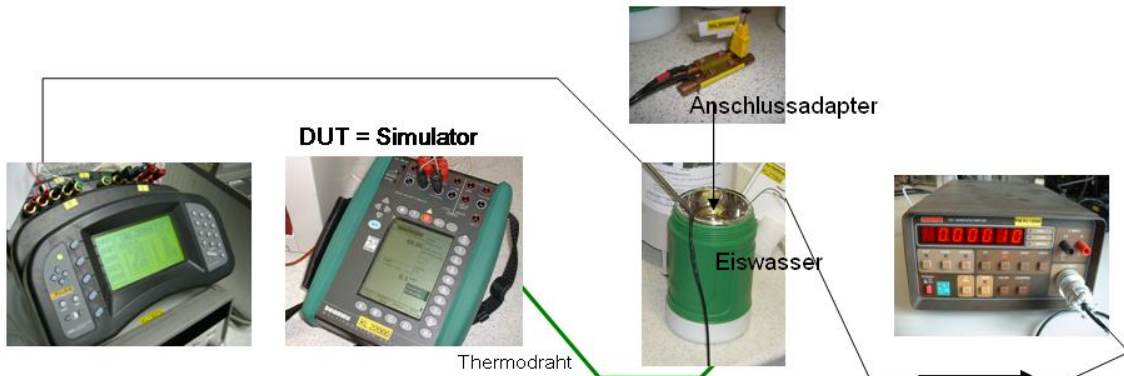
⁵ Alternativ kann die Berechnung am PC erfolgen (Excel-Tabellen oder Programm JUMOSENS).

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/ genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|--|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 10 |

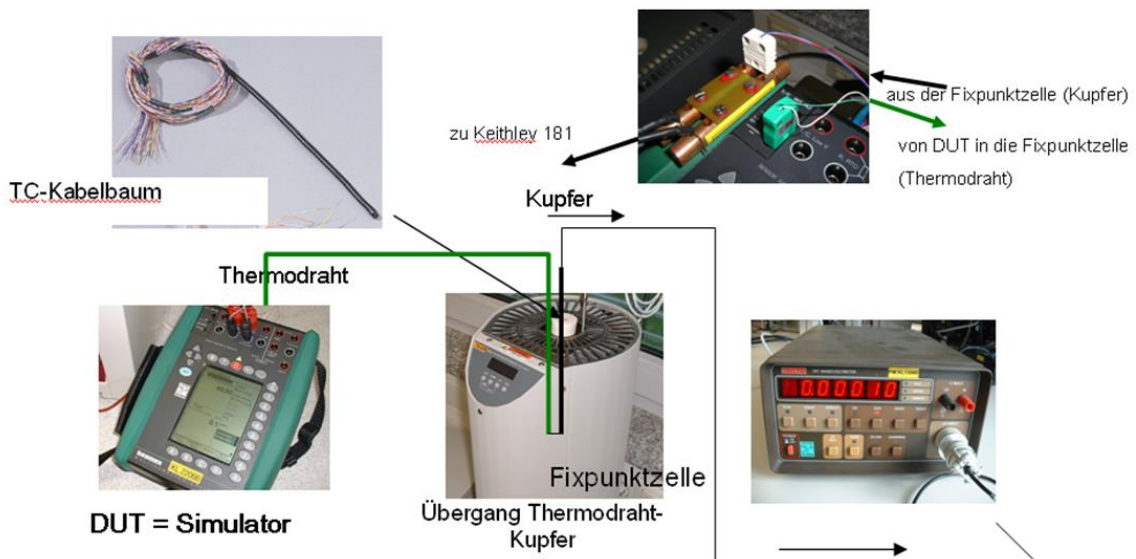
Messbeispiel



Aufbau mit Vergleichsstelle im Eisbad:



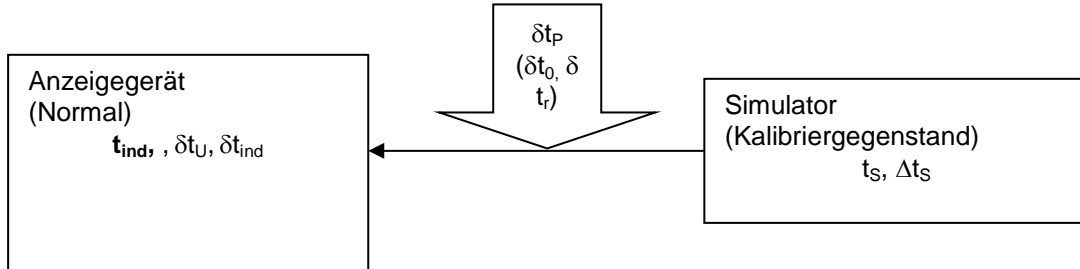
mit Vergleichsstelle am Wassertripelpunkt:



XVI.4 Messunsicherheit

XVI.4.1 Widerstandsmessung

Skizze des Messverfahrens:



mit

t_{ind} Temperatur-Messwert am Anzeigegerät in °C . Der elektrische Wert wird auf Basis von Grundwerttabellen und -Gleichungen in den Temperaturwert umgerechnet.

δt_U Mögliche Korrektur aufgrund der Unsicherheit der Messung am Anzeigegerät. Diese Messunsicherheit ist im entsprechenden Messbereich durch die Budgets der Kalibrierung der elektrischen Größe gegeben. Diesen Unsicherheiten wird der Temperaturwert zugeordnet und normalverteilt in der Messunsicherheitsbilanz verwendet.

t_s Eingestellte Temperatur am Widerstandssimulator in °C (Kalibrierwert).

Δt_s Abweichung der simulierten Temperatur vom eingestellten Kalibrierwert

δt_{ind} Abweichung durch die Rundung der Anzeige (Digits) des Messgerätes. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige wodurch im „worst case“ eine Abweichung von 1 Digit entsteht. Der Unsicherheitsbeitrag wird rechteckverteilt in diesem Intervall angenommen. Die Auflösung des Anzeigeeinstrumentes Fluke 8508A ist dabei besser als 1mK.

δt_p Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch mögliche Offsets, unbekannte Leitungswiderstände oder Kurzzeitstabilität. Z.T. sind diese Einflüsse bereits in $U(\delta t_U)$ bereits enthalten. Es wird jedoch angenommen, dass weitere Parameter das Ergebnis maximal im Bereich von ± 5 mK beeinflussen (Rechteckverteilung).

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich für die Abweichung des erzeugten vom eingestellten Wert am Kalibriergegenstand aus

$$t_s - \Delta t_s = t_{ind} + \delta t_U + \delta t_{ind} + \delta t_p$$

die **Modellgleichung**

$$\Delta t_s = t_s - (t_{ind} + \delta t_U + \delta t_{ind} + \delta t_p)$$

mit allen Sensitivitätskoeffizienten $c_i = \left| \frac{\partial \Delta t_s}{\partial t_i} \right| = 1$

Messunsicherheitsbilanz

Für die der Abweichung des Ausgangs des Kalibriergegenstandes bei Temperatursimulation beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(\Delta t_s) = u^2(\delta t_U) + u^2(t_{ind}) + u^2(\delta t_{ind}) + u^2(\delta t_p)$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 12 |

| Größe | Schätzwert | Standard-messunsicherheit | Verteilung | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag |
|------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| t_S | T_S | | | | |
| t_{ind} | \bar{t}_{ind} | $U(t_{ind})$ | Normal A | 1 | $u(t_{ind})$ |
| δt_{ind} | 0 | $\Delta(\delta t_{ind}) / \sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_{ind})$ |
| δt_U | 0 | $\Delta(\delta t_U) / 2$ | Normal | 1 | $u(\delta t_U)$ |
| δt_P | 0 | $\Delta(\delta t_P) / \sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_P)$ |
| Δt_S | $T_S - \bar{t}_{ind}$ | | | | $u(\Delta t_S)$ |

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis Δt_x beizuordnende absolute erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$U_{abs}(\Delta t_S) = 2u(\Delta t_S)$$

Rechentabelle für Pt100 Anzeigeeinstrumente

| Kalibrierwert [°C] | R nach ITS-90 [Ω] | U(δt _U) [Ω] | U(δt _U) [K] | Δ(δt _{ind}) [K] | Δ(δt _P) [K] | U _{abs} =2u(Δt _S) [K] |
|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|--|
| -100 | 60,256 | 1,7E-3 | 0,0069 | 0,0005 | 0,005 | 0,009 |
| 0 | 100,000 | 2,2E-3 | 0,0056 | 0,0005 | 0,005 | 0,008 |
| 23 | 108,959 | 2,2E-3 | 0,0057 | 0,0005 | 0,005 | 0,008 |
| 100 | 138,506 | 2,6E-3 | 0,0070 | 0,0005 | 0,005 | 0,009 |
| 250 | 194,098 | 3,4E-3 | 0,0094 | 0,0005 | 0,005 | 0,011 |
| 300 | 212,052 | 3,7E-3 | 0,0103 | 0,0005 | 0,005 | 0,012 |
| 500 | 280,978 | 4,6E-3 | 0,0139 | 0,0005 | 0,005 | 0,015 |
| 750 | 360,638 | 5,7E-3 | 0,0189 | 0,0005 | 0,005 | 0,020 |

XVI.4.2 Thermospannungsmessung ohne Vergleichsstelle

Es gelten Budget und Modellgleichung aus XVI.4.1. Statt der Verwendung eines Widerstandsmessgerätes erfolgt die Kalibrierung durch Messung von DC-Spannungen gemäß der Verfahren aus Kapitel XV (z.B. an Keithley 181 Millivoltkalibrierung) und Kapitel III (Kalibrierung DC-U). Für die Erzeugung der Spannung gilt abweichend:

δt_P Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch mögliche Offsets, unbekannte Materialinhomogenitäten oder Kurzzeitstabilität, die ggf. individuell je Messung zu berücksichtigen sind (Rechteckverteilung).

δt_{ind} Für Thermospannung bieten gute Anzeigeeinstrumente Auflösungen von etwa 10 mK.

XVI.4.3 Thermospannungsmessung mit Vergleichsstellenkompensation

Wie in XVI.2.3 schreibt sich unter Berücksichtigung von δt_o und δt_r die neue Modellgleichung:

$$\Delta t_S = t_S - (t_{ind} + \delta t_U + \delta t_{ind} + \delta t_P + \delta t_o + \delta t_r)$$

$$u^2(\Delta t_{S,komp}) = u^2(\Delta t_S) + u^2(\delta t_o) + u^2(\delta t_r) = u^2(\Delta t_{ind}) + (0,1K / \sqrt{3})^2$$

und Erweiterung der tabellarischen Übersicht:

| Größe | Schätzwert | Standard-messunsicherheit | Verteilung | Sensitivitätskoeffizient | Unsicherheitsbeitrag |
|--------------|------------|---------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| δt_o | 0 | 0,04K / 2 | Normal | 1 | $u(\delta t_o)$ |
| δt_r | 0 | 0,1K / $\sqrt{3}$ | Rechteck | 1 | $u(\delta t_r)$ |

also

$$U_{abs}(\Delta t_{ind,komp}) = \sqrt{(U(\Delta t_{ind}))^2 + (0,15 K)^2}$$

Demnach ergibt sich abhängig von der verwendeten Ausgleichsleitung ein zusätzlicher Unsicherheitsbetrag von ca. 0,15 K, der bei Kalibrierung mit Vergleichsstellenkompensation quadratisch der Messunsicherheit zu addieren ist.

XVI.5 Ergebnis

Zahlenwerte und Berechnungsbeispiele für verschiedene Bereiche sind z.B. der Excel-Tabelle

- <http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XVI-Temperaturanzeige-und-Simulation-Beispiele-MU-Umrechnung.xls>

oder den Tabellen der elektrischen Normale zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

Durch die Rückführung und Abbildung der Temperaturwerte auf die korrespondierenden elektrischen Größen kann zu jeder elektrischen Unsicherheit ein entsprechender Wert auf der Temperaturachse angegeben werden. Mit der "Widerstandempfindlichkeit" E_R als Steigung in K/Ω , also der Ableitung im Punkt R ergibt sich für die Unsicherheit

$$U(t) = U(R) \cdot E_R = U(R) \cdot \frac{dt}{dR}(R)$$

Dies gilt für alle Typen von simulierten Widerstandreihen nach o.g. Verfahren. Der Einfluss des Messobjektes ist bei dieser Vereinfachung separat zu berücksichtigen (Wiederholbarkeit, Anzeigeschwankung und –auflösung).

Analog kann mit der Spannungsempfindlichkeit E_U ausgedrückt in K/V und der Unsicherheit elektrischer Gleichspannungen $U(V_{DC})$ für elektrische Temperaturanzeige und –simulation formuliert werden:

$$U(t) = U(V_{DC}) \cdot E_V = U(V_{DC}) \cdot \frac{dt}{dV}(V)$$

Bei Verwendung einer Vergleichsstellenkompensation erweitert sich das Ergebnis der rein elektrischen Messung um die Unsicherheitsbeiträge der Vergleichsstelle und die der Ausgleichsleitung.

$$U(t_{CJC}) = 2\sqrt{(U(t)/2)^2 + (U(t_{Vergleichsstelle})/\sqrt{3})^2 + (U(t_{Ausgleichsleitung})/\sqrt{3})^2}$$

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 14 |



© esz AG, 2018

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

| Ausgabe: | erstellt | geprüft/genehmigt | Kapitel | Seite |
|----------|----------------------|---------------------------|---|-------|
| DMS.10 | von: PF am: s.DMS | von: s. DMS am: s. DMS | Qualitätsmanagementhandbuch - XVI Temperaturanzeige und Simulation | 15 |