

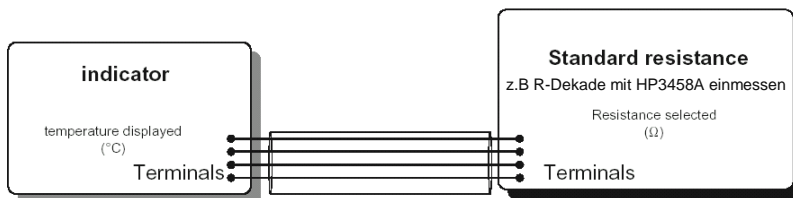
XVI Temperaturanzeige und Simulation

- XVI Temperaturanzeige und Simulation..... 1
- XVI.1 Kalibrierverfahren Temperatursimulation..... 1
 - XVI.1.1 Widerstandssimulation 1
 - XVI.1.2 Thermospannungssimulation ohne oder mit ausschaltbarer Kompensationsstelle..... 2
 - XVI.1.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstellenkompensation 2
- XVI.2 Messunsicherheit 5
 - XVI.2.1 Widerstandssimulation 5
 - XVI.2.2 Thermospannungssimulation ohne Vergleichsstelle..... 5
 - XVI.2.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstelle 5
- XVI.3 Kalibrierverfahren Temperaturanzeige 6
 - XVI.3.1 Kalibrierung von Widerstandssimulatoren..... 6
 - XVI.3.1 Thermospannungssimulatoren ohne oder mit ausschaltbarer Kompensationsstelle 6
 - XVI.3.3 Thermospannungssimulation mit interner Vergleichsstellenkompensation 7
- XVI.4 Messunsicherheit 9
 - XVI.4.1 Widerstandsmessung..... 9
 - XVI.4.2 Thermospannungsmessung ohne Vergleichsstelle 10
 - XVI.4.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstellenkompensation 10
- XVI.5 Ergebnis 11

XVI.1 Kalibrierverfahren Temperatursimulation

In elektrischer Simulation können Temperaturanzeigeegeräte gemäß der Richtlinie „DKD-R 5-5 Kalibrierung von Temperaturanzeigeegeräten und –simulatoren durch elektrische Simulation und Messung“ (EA-10/11) kalibriert werden. Sowie für Widerstandsthermometer als auch für Thermoelementspannungen stehen neben der direkten Erzeugung der Kalibriergrößen an den Normalgeräten Simulatoren (Beamex MC5), Pt100 Einstelldekaden (Adelo PT6-1 und PT6-2), Kalibratoren (Fluke 5500A, Wavetek 9000) oder Pt100-Generatoren (Beamex MC5) zur Verfügung. Alle diese Geräte ermöglichen eine Kalibrierung der Temperatur und das Ablesen der Werte direkt in °C.

XVI.1.1 Widerstandssimulation



Widerstandstemperaturen werden in 4-Leiter-Technik gemäß der Grundwertreihen der DIN 60751 erzeugt und am Anzeigegerät (Kalibriergegenstand) gemessen. Der genaue Wert des Simulationswiderstandes kann durch eine vorangehende Widerstandsmessung an HP 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 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 $R_0=100 \text{ } \Omega$. Alternativ kann diese Berechnung durch Software (MS-Excel, Programm JUMOSENS) am PC erfolgen.

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/genehmigt von: PF am: 08.01.2009	Kapitel XVI - -Temperaturanzeige und Simulation	Seite 1 von 11
---------------------------	--	---	---	--------------------------

XVI.1.2 Thermospannungssimulation ohne oder mit ausschaltbarer Kompensationsstelle

Besitzen die zu kalibrierenden Anzeigegeräte keine Vergleichsstellenkompensation oder ist diese 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

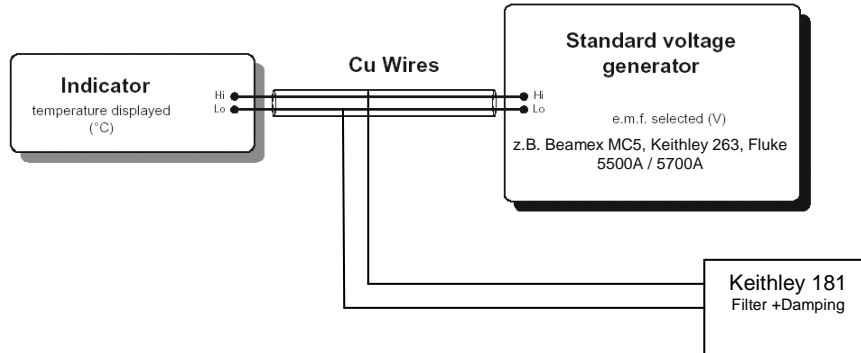


Bild XVI.2 Thermospannungssimulation mit Kupferleitung bei ausgeschalteter Vergleichsstelle aus EA-10/11

Fluke 5700 oder Keithley 263 (s. Kapitel III bzw. XV) und gleichzeitiger Verifikation am Nanovoltmeter Keithley 181 (siehe Kapitel XV) wird für die kleinsten Messunsicherheiten mit Hilfe der Grundwerttabellen für Thermospannung der DIN EN 60584 die dem Temperaturwert zugehörige Spannung erzeugt. Der Anschluss erfolgt z.B. 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

$$t(U_{ref}) = T_1 + \frac{U_{ind} - U_1}{\Delta U} \cdot \text{°C} \text{ mit } \Delta U = U_2 - U_1^1$$

Andere Spannungsquellen als Fluke 5700 oder Keithley 263, die diese Berechnung bereits durchführen und ein Ablesen der Spannung in °C möglich machen, müssen vor jeder Messung einkalibriert werden oder es werden zusätzliche Unsicherheitsbeiträge im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

XVI.1.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstellenkompensation

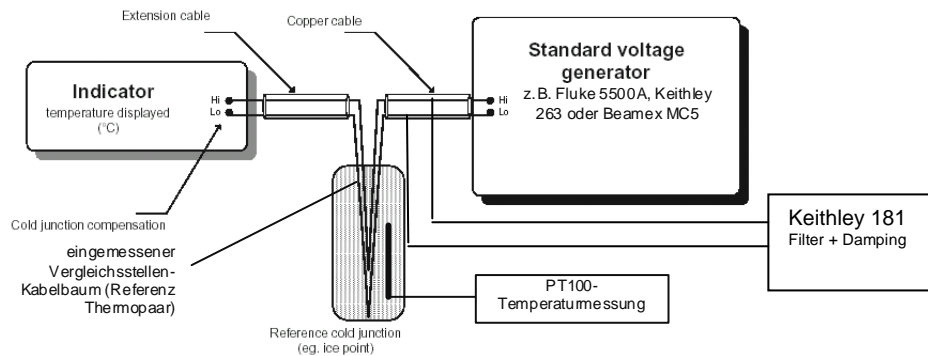


Bild XVI.3 Thermospannungssimulation mit externer Vergleichsstelle aus EA-10/11

¹ Alternativ kann die Berechnung am PC erfolgen (Excel-Tabellen oder Programm JUMOSENS).

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 08.01.2009	Kapitel XVI - -Temperaturanzeige und Simulation	Seite 2 von 11
---------------------------	--	--	---	--------------------------

Werden Geräte kalibriert, die mit interner Vergleichsstellenkompensation betrieben werden ($T_{ref} = \text{int.}$) 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). Für die gebräuchlichsten Thermopaare steht eine Vergleichsstellenkabelbaum zur Verfügung (Referenzthermopaar: Thermolegierung – Kupfer), deren Anschlusspaare mindestens im Temperaturunterschiedsbereich von 23 °C überprüft und kalibriert wurden (vgl. Kapitel XIV). Die kleinsten Messunsicherheiten sind anwendbar, wenn vor der Kalibrierung die Korrektur dieser Ausgleichs- und Verbindungsleitungen bestimmt wird. Eine mögliche Reihenfolge

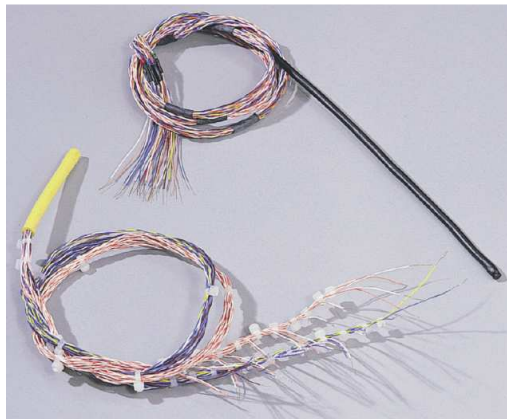


Bild XVI.4 Vergleichsstelle als Kabelbaum

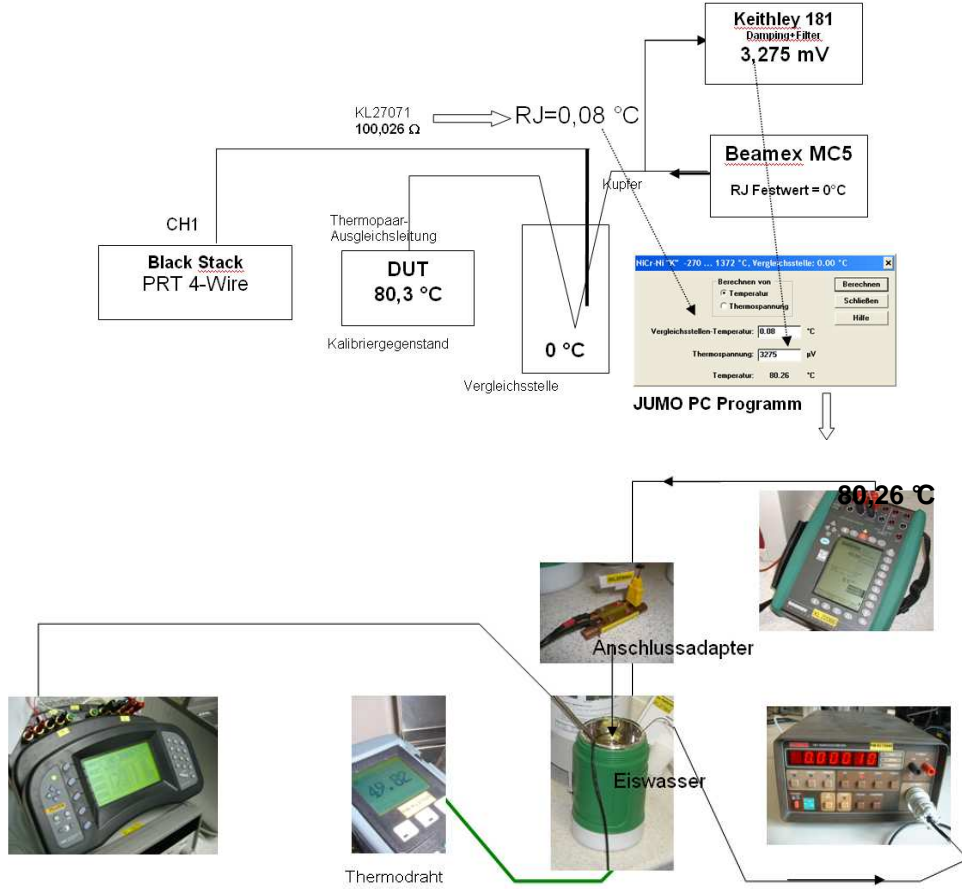
- 1) Bestimmung der Korrektur der Thermoleitung im Wasserbad (vgl. Kapitel XIV) im PT100 Vergleich
- 2) Bestimmung der Abweichung des Anzeigeegerätes (Vergleichsstellenkompensation EIN) unter Berücksichtigung der Korrektur aus 1)

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

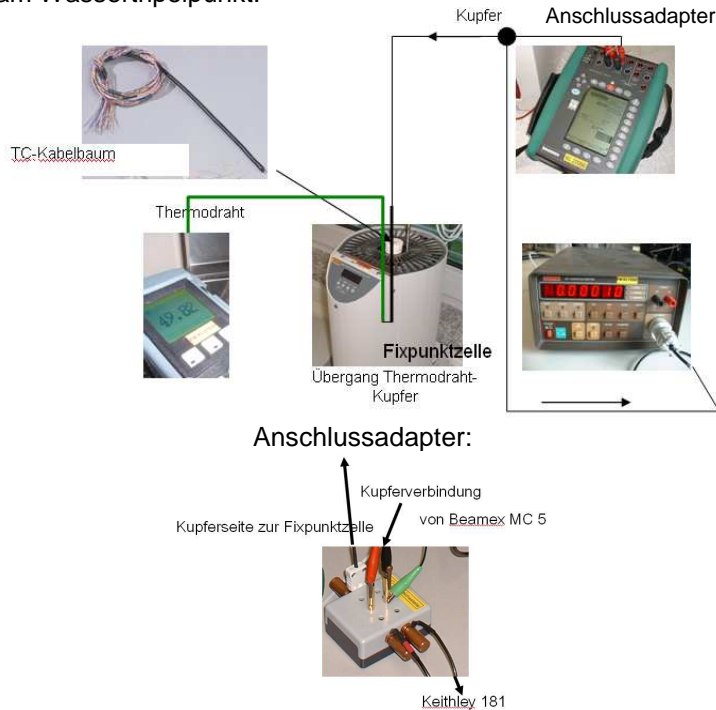
Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: PF am: 08.01.2009	XVI - –Temperaturanzeige und Simulation	3 von 11

Messbeispiel

mit Beamex MC5 als Spannungsgenerator, Vergleichsstelle im Eisbad



mit Vergleichsstelle am Wassertripelpunkt:

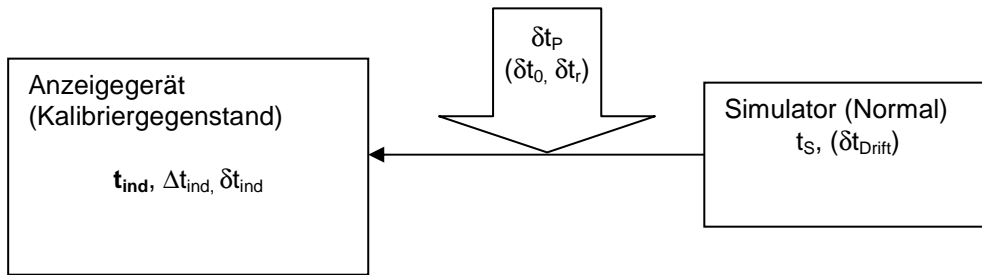


Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: PF am: 08.01.2009	XVI -- Temperaturanzeige und Simulation	4 von 11

XVI.2 Messunsicherheit

XVI.2.1 Widerstandssimulation

Skizze des Messverfahrens:



die **Modellgleichung**

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

Messunsicherheitsbudget

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

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

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 Widerstandsnormalen 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:

XVI.2.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstelle

Zusätzlich zu den in XVI.2.2 genannten Größen werden im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt bzw. modifiziert:

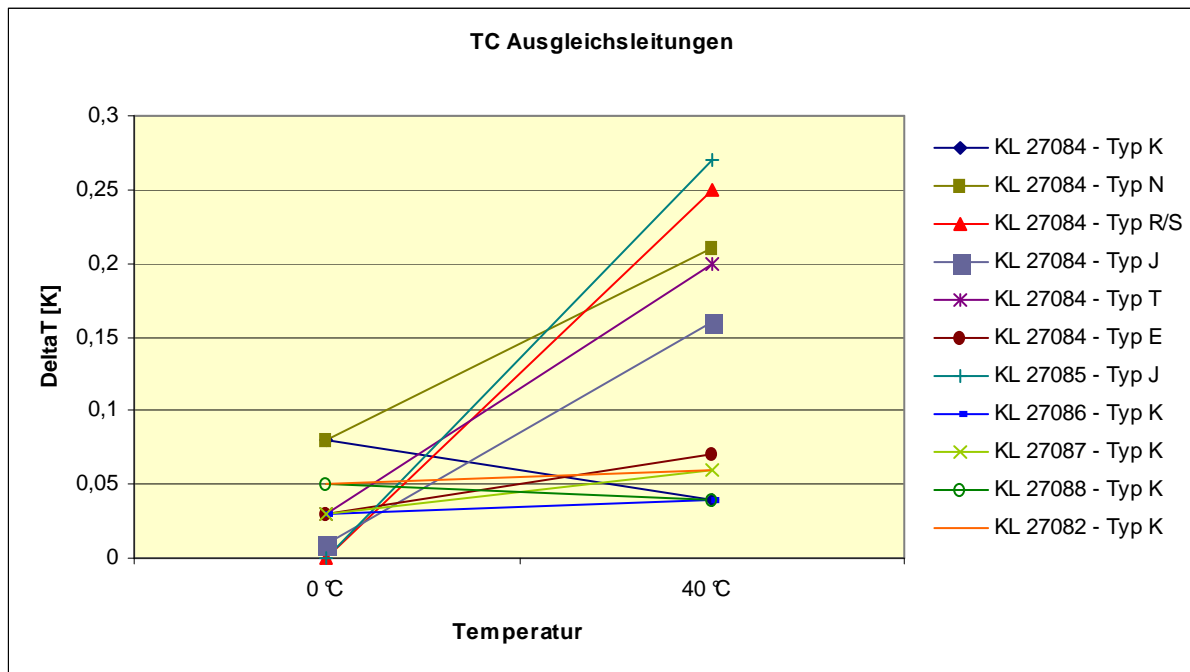


Bild XVI.5 Ausgleichsleitungen bei verschiedenen Temperaturdifferenzen im Vergleich

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: PF am: 08.01.2009	XVI - -Temperaturanzeige und Simulation	5 von 11

entsprechend erweitert sich die **Modellgleichung**:

$$\Delta t_{ind,komp} = t_{ind} + \delta t_{ind} - (t_s + \delta t_p + \delta t_{Drift} + \delta t_0 + \delta t_r)$$

also

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

Demnach ergibt sich ein zusätzlicher Unsicherheitsbetrag zu 0,12 K 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

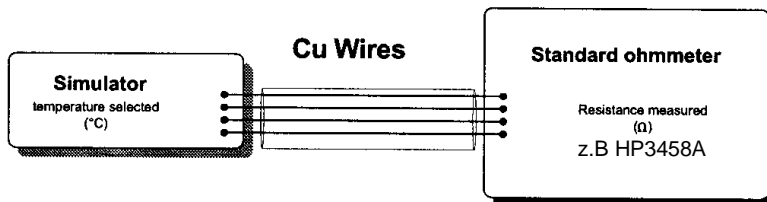


Bild XVI.3.1 Widerstandsmessung (4-Draht) aus EA-10/11

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.

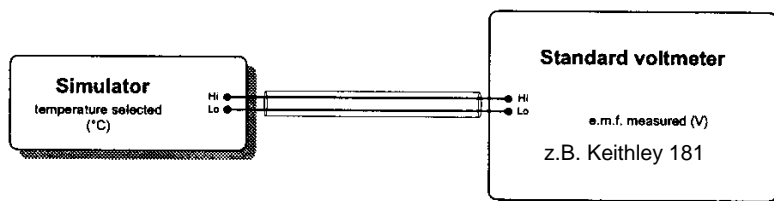


Bild XVI.3.2 Thermospannungsmessung mit Kupferleitung bei ausgeschalteter Vergleichsstelle aus EA-10/11

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

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 08.01.2009	Kapitel XVI - –Temperaturanzeige und Simulation	Seite 6 von 11
---------------------------	--	--	---	--------------------------

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

Wird diese Berechnung durch Anzeigergeräte 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 im Messunsicherheitsbudget 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.

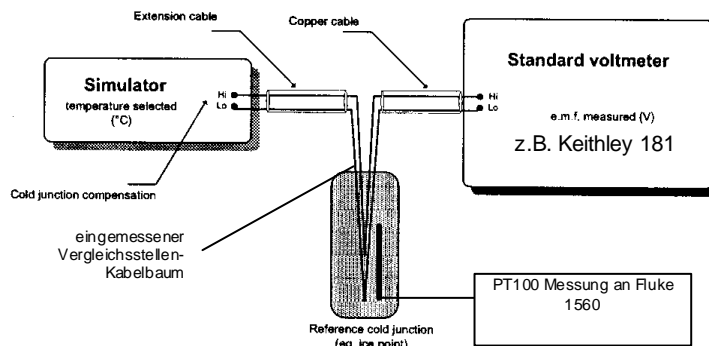


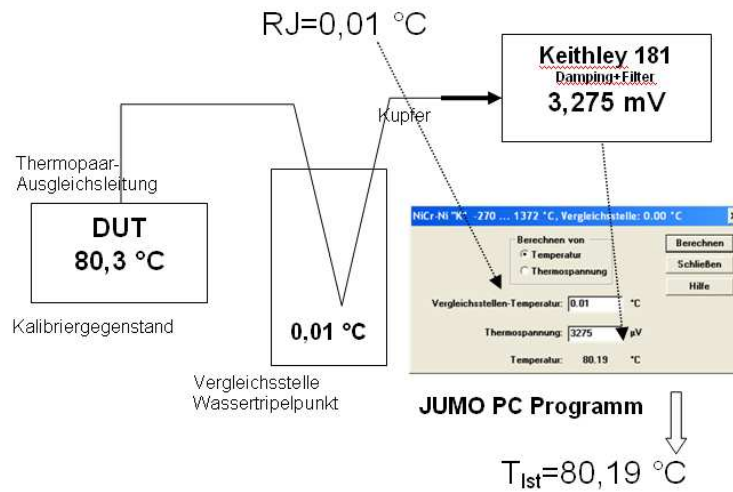
Bild XVI.3.3 Thermospannungsmessung mit externer Vergleichsstelle aus EA-10/11

Andere Anzeigergeräte 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 Unsicherheitsbeiträge im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt.

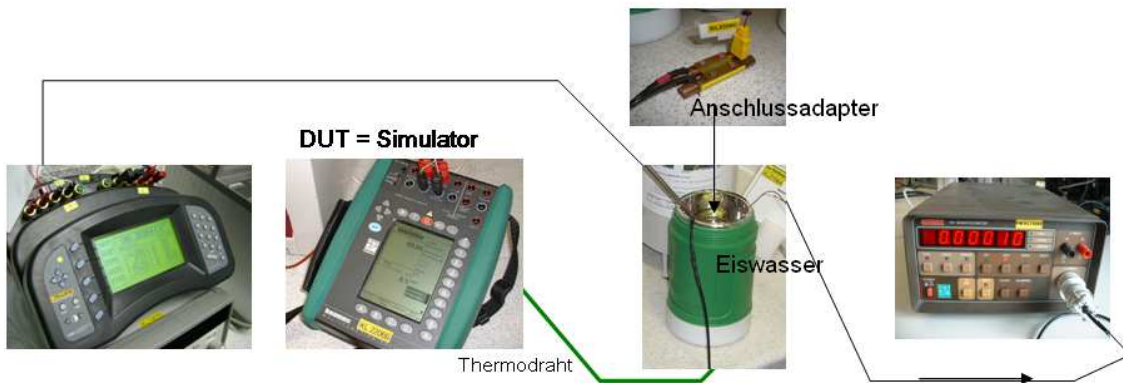
² Alternativ kann die Berechnung am PC erfolgen (Excel-Tabellen oder Programm JUMOSENS).

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: PF am: 08.01.2009	XVI - -Temperaturanzeige und Simulation	7 von 11

Messbeispiel



Aufbau mit Vergleichsstelle im Eisbad:



mit Vergleichsstelle am Wassertripelpunkt:

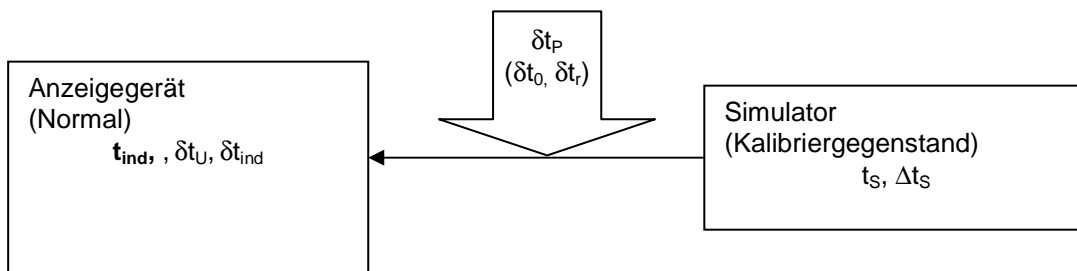


Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 08.01.2009	Kapitel XVI -- Temperaturanzeige und Simulation	Seite 8 von 11
---------------------------	--	--	---	--------------------------

XVI.4 Messunsicherheit

XVI.4.1 Widerstandsmessung

Skizze des Messverfahrens:



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

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.2009	von: PF am: 08.01.2009	XVI - -Temperaturanzeige und Simulation	9 von 11

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

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

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:

XVI.4.3 Thermospannungssimulation mit Vergleichsstellenkompensation

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

$$\Delta t_S = t_S - (t_{ind} + \delta t_U + \delta t_{ind} + \delta t_P + \delta t_0 + \delta t_r)$$

$$u^2(\Delta t_{S,komp}) = u^2(\Delta t_S) + u^2(\delta t_0) + u^2(\delta t_r) = u^2(\Delta t_{ind}) + (0,2K / 2)^2$$

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

Demnach ergibt sich ein zusätzlicher Unsicherheitsbetrag zu 0,2 K, der bei Kalibrierung mit Vergleichsstellenkompensation quadratisch der Messunsicherheit zu addieren ist.

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/genehmigt von: PF am: 08.01.2009	Kapitel XVI - –Temperaturanzeige und Simulation	Seite 10 von 11
---------------------------	--	---	---	---------------------------

XVI.5 Ergebnis

Alle weiteren zu Grunde liegenden **Zahlenwerte** der Berechnungen für die einzelnen Bereiche sind der Excel-Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle XIV Temperatur Simulation und Anzeige.xls“ zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

Da die errechneten Messunsicherheiten für Widerstandssimulatoren durch die Direktmessung am Multimeter der o.g. Verfahren immer kleiner sind als bei der Verwendung des Verfahren aus Kapitel XVI.1 kann die Unsicherheitsinterpolation für Kalibrierung von Temperaturanzeigeräten mit

$$U_{abs}(t) = 0,01K + 2,5 \cdot t \cdot \frac{mK}{100^\circ C}$$

als Obergrenze sowohl für Simulatoren als auch für Anzeigeräte verwendet werden.

Für Thermoelementsimulation und –anzeige gilt, da in beiden Fällen als Normalspannungsmessgerät das Nanovoltmeter Keithley 181 als Referenz verwendet wird, dass die daraus resultierenden Gesamtunsicherheiten identisch sein müssen.

Die Messunsicherheitsauswertungen für Typ K, J, E, N, T, S und B ergeben dabei Interpolationsformeln, die die Maximalgrenzen der Messunsicherheiten in diesem Bereich beschreiben. So errechnet sich beispielsweise eine interpolierte Obergrenze der Messunsicherheit für

Typ- K, J, E, N, T z.B. als

$$U_{abs}(t) = 0,05K + 0,23mK \cdot t/^\circ C \quad \text{für } t \geq 0^\circ C$$

$$U_{abs}(t) = 0,05K - 0,055mK \cdot t/^\circ C \quad \text{für } t < 0^\circ C$$

und für **Typ R und S**

$$U_{abs}(t) = 0,3K \quad \text{für } t \geq 0^\circ C$$

bzw. als Obergrenze für **Typ B**

$$U_{abs}(t) = 0,6K \quad \text{für } t \geq 200^\circ C$$

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: PF am: 08.01.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 08.01.2009	Kapitel XVI - –Temperaturanzeige und Simulation	Seite 11 von 11
---------------------------	--	--	---	---------------------------