

XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)

XIV.1 Direktanzeigende Thermometer (Einstech- / Tauchfühler)

Kalibrierungen von Thermometern (s. Kapitel I.2, Interne Kalibrierung von Thermometern) werden im Temperaturlabor der esz AG calibration & metrology im Vergleich mit kalibrierten IPRT Pt100 Mantel-Widerstandsthermometern oder Thermoelementen gemäß der Richtlinie „*DKD-R 5-1 Kalibrierung von Widerstandsthermometern*“ durchgeführt wobei sich die Kalibrierung auf Messgeräte für Anwender, Industrie oder Feldeinsatz für

- direktanzeigende Thermometer oder
- IPRT (Widerstandsthermometer ohne Anzeige)

bezieht. Die Kalibrierung von Thermoelementen ist in Richtlinie „*DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen*“ bzw. Abs. XVI.4 beschrieben. Die Anzeigergeräte sind direkt an das elektrische Labor angeschlossen und rückgeführt (vgl. QMH Abs. XVI). Fühlerspezifische Kennlinien werden direkt durch die Anzeigergeräte berücksichtigt oder in der Kalibriersoftware als Korrekturformel (i.d.R. Polynom 3. Grades) hinterlegt und berücksichtigt. Zur Ermittlung der Polynomkoeffizienten dienen immer die aktuellen Kalibrierscheine des Normals. Die Temperatur am Kalibriergegenstand wird bei einem direkt anzeigenden Thermometer möglichst zeitgleich mit der Messung am Normal abgelesen. Um die zeitliche Instabilität der Temperiereinrichtung zu „glätten“ empfiehlt sich die Berechnung von zeitlichen Mittelwerten der Ablesungen („Einzelmittelwerte“ oder Mittelwertfunktion an der Anzeige des Normals bzw. Messobjektes anstelle von Einzelablesungen). Für Widerstandsthermometer stehen manuelle Messstellenumschalter oder die automatische Messstellenumschaltung der Anzeigergeräte zur Verfügung, so dass hintereinander der Messwert an Normal und Kalibriergegenstand abgelesen wird. Der dokumentierte Messwert ergibt sich hierbei als Mittelwert der Ergebnisse am Normal und Kalibriergegenstand z.B. aus 5 Messungen (Einzelmittelwerten) mit ihrer empirischen Standardabweichung des Mittelwerts. Dabei muss beachtet werden, dass lediglich die gegenseitige Abweichung gemittelt wird oder vor der Mittelwertbildung die Messwerte auf den Kalibrierwert des Normals des ersten Einzelmittelwerts normiert werden, damit eine mögliche Temperaturdrift der Temperiereinrichtung nicht in das Ergebnis einfließt, sondern nur die zufälligen Messabweichungen aus der Wiederholungsmessung.

Weitere Vorgaben zur Durchführung und der Auswahl der Messpunkte bei Temperaturkalibrierungen enthält die Arbeitsanweisung „[AA0093 - Temperaturmesstechnik](#)“.

XIV.1.1 Übersicht der Temperiereinrichtungen und Normale

Für Einstech- und Tauchmessungen stehen unterschiedliche Kalibriernormale und Temperiereinrichtungen zur Verfügung. Zur gegenseitigen Validierung und Überbrückung während Ausfall- oder Rekalibrierungszeiten wird angestrebt mindestens zwei quasi-redundante Normale in den Temperiereinrichtungen vorzuhalten. Eine Übersicht der Rückführung (vgl. QMH Abs. II) und dieser „Redundanz“ enthält die Datei

<http://dmserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/000000-Aufteilung-Temperaturfühler.vsd>

Sind Temperiereinrichtungen „ortsveränderlich“, können diese auch vor-Ort beim Kunden eingesetzt werden.

XIV.1.1.1 Eisbad und Fixpunktzelle

Der Nullpunkt von ca. 0 °C kann durch eine Eiswürfel-Schmelzwasserlösung (Eisflocken) in Glasbehältern mit Magnetrührer oder in einer Thermoskanne hergestellt werden. Die Eiswürfel werden in einem Mixer zerkleinert für eine größere Oberfläche. Wichtig ist es immer nur mit destilliertem Wasser zu arbeiten, sowohl für das Eis, als auch für das Wasser. Alternativ und deutlich stabiler wird die Fixpunktzelle Hart Scientific 5901B-G zur Erzeugung des 0,01 °C-Wassertripelpunktes verwendet.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	1

Die Zelle ist eine schlanke Fixpunktzelle aus Glas mit einer Eintauchtiefe von 10 cm für Durchmesser bis 6,3 mm und kann optimal im Fixpunktautomat Fluke 9210 verwendet werden. In Anlehnung an die „Supplementary Information for the IST-90“ gibt der Hersteller folgendes Verfahren zur Vorbereitung der Fixpunktzelle im Kalibrator an:

- Vorgekühlte Zelle einfrieren (Kühlzeit bei -5 °C ca. 15min), Funktion FREEZE (SET + DOWN)aktivieren

AdV

Flashes “AdV” indicating the Advance Program Menu

FREEZE

Displays the next program step in the sequence

- nach ca. 15 Minuten ertönt akustischer Meldeton

rEAdY

Flashes “rEAdY” indicating the operator needs to initiate freezing

- Zelle vorsichtig entnehmen und kippen
- Gerätefunktion MAINTAIN aktivieren

AdV

Flashes “AdV” indicating the Advance Program Menu

MAINT

Displays the next program step in the sequence

- Rampe wird auf $0,1\text{ °C}$ gefahren
- Fixpunkt von $0,01\text{ °C}$ ist verfügbar
- zum Auftauen nach Betrieb Gerätefunktion MELT aktivieren

Die Zelle ist aufgrund der Bruchgefahr beim Transport lediglich indirekt über die IPRT-Normale rückgeführt und dient v.a. zur gegenseitigen Verifikation und zur Validierung des R_0 -Widerstandes der Thermometer im gegenseitigen Vergleich.

XIV.1.1.2 Kalibrierbäder / -Thermostate:

Temperaturen von -80 °C bis $+300\text{ °C}$ werden in umgewälzten Thermostatbädern mit unterschiedlichen Medien erzeugt (Ethanol, Silikonöl oder empfohlene Temperierflüssigkeit des Herstellers). Abweichende Temperaturen darüber können in Trockenblockkalibratoren realisiert werden. Der zu kalibrierende Temperaturfühler (bzw. Thermometer mit Anzeige) wird zusammen mit dem Referenzthermometer an der gleichen Position möglichst dicht beieinander ins Medium getaucht. Dabei sollte auf eine ausreichende Eintauchtiefe der beiden Fühler ($> 10\text{ cm}$) geachtet werden. Weitere Details und Informationen zum Kalibrierverfahren sind den Richtlinien „DKD-R 5-1 Kalibrierung von Widerstandsthermometern“, „DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen“ (s. XIV.4) bzw. der Arbeitsanweisung „[AA0093 - Temperaturmesstechnik](#)“ zu entnehmen.

XIV.1.1.3 Trockenblockkalibratoren wie Hart Scientific 9103-A, Fluke 9170 und Fluke 9172

Diese Blockkalibratoren der Metrologieklasse können zwischen -40 °C und $+400\text{ °C}$ sehr stabil temperiert werden. Die Einsätze für den Block besitzen verschiedene gegenüberliegende Bohrungen z.B. mit 3 mm, 4 mm und 6 mm Durchmesser oder auch US-amerikanischen-Größen. Blockkalibratoren können auch mobil für Kalibrierungen vor Ort beim Kunden eingesetzt werden.

Keinesfalls dürfen die Bohrungen mit Fremdmaterial (wie zum Beispiel Flüssigkeiten, Quarzsand etc.) befüllt werden, da hierdurch der Kalibrator beschädigt wird.

XIV.1.1.4 Blockkalibrator Jofra 650SE:

Die Erzeugung von ca. 30 °C bis 300 °C kann im Blockkalibrator Jofra 650 SE erfolgen. Die Kalibrierung wird immer zusammen mit einem Referenzfühler durchgeführt, der zur Kontrolle der Temperatur in der homogenen Zone dient. Für die optimale thermische Ankopplung des Messobjekts muss ein Wärmeträgermittel verwendet werden (z.B. Quarzsand), das zusätzlich zum Messobjekt in die Hülse eingefüllt wird, sobald der Innendurchmesser der verwendeten Hülse maximal $0,5\text{ mm}$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	2

größer ist als der des zu kalibrierenden Thermometers (s. a. „DKD-R 5-4 Kalibrierung von Temperatur Blockkalibratoren“).

XIV.1.1.5 Blockkalibrator Fluke 9150:

Im Temperaturbereich 150 °C bis 1200 °C kann mit dem Hochtemperatur-Blockkalibrator Fluke 9150 gearbeitet werden. Zur Messung der Blocktemperatur stehen zwei Edelmetall Thermoelement Typ-R zur Verfügung. Es sind Keramikeinsätze mit verschiedenen Bohrlochdurchmessern verfügbar.

XIV.2 Untersuchungen der Einflussgrößen

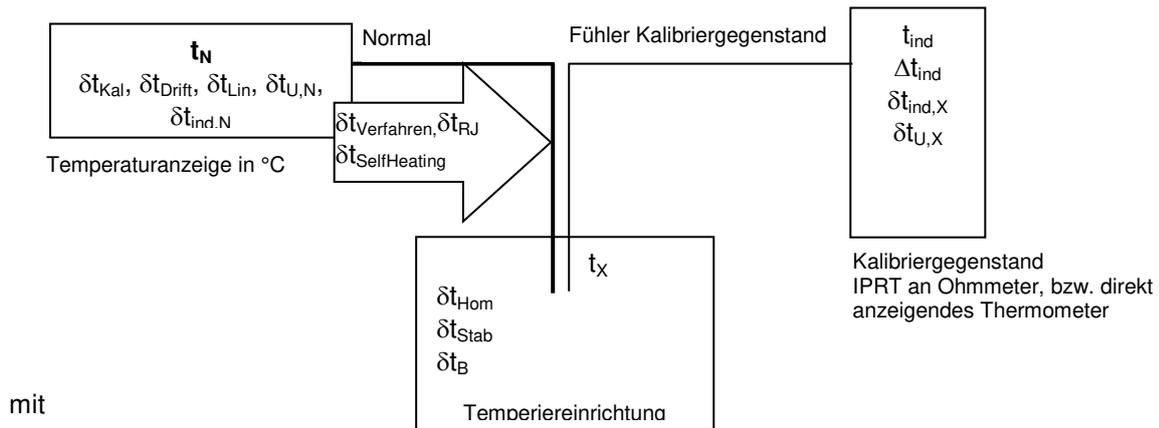
Um die Messunsicherheiten der Verbunde aus Temperiereinrichtung, Thermometer (Temperaturfühler) und Anzeigegerät beschreiben zu können müssen deren einzelne Einflüsse auf die Gesamtunsicherheit individuell je Kombination untersucht werden. Dazu gehören insbesondere

- Stabilität der Temperiereinrichtung
- Homogenität (Temperaturverteilung) der Temperiereinrichtung
- zeitliche Drift des Thermometers (Temperaturfühler)
- Interpolationsabweichung nach Kennlinienkorrektion¹

XIV.2.1 Zusammenfassung der Einflussgrößen

Die genauen Intervallgrenzen der jeweiligen Einflussgrößen der eingesetzten Normale und Temperiereinrichtungen sind den entsprechenden Tabellenkalkulationsblättern (Excel-Tabellen) im Dokumentmanagementsystem zu entnehmen, die Messunsicherheitsbilanzen werden gemäß Kapitel XIV.3 und XIV.4 aufgebaut: <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur>

XIV.3 Messunsicherheitsbilanz



- mit
- t_N Temperatur-Messwert am Anzeigegerät in °C. Am Anzeigegerät oder die Kalibriersoftware kann die Kennlinie bereits für den jeweiligen Messpunkt berücksichtigt werden und das Ergebnis direkt abgelesen werden (alternativ wird die Kennlinie über die Kalibriersoftware korrigiert).
 - t_x Temperatur des Kalibriergegenstands / Fühlers im Thermostatbad / -Ofen.
 - t_{ind} Temperatur-Messwert am Kalibriergegenstand (direkt anzeigendes Thermometer) bzw. anhand der DIN-Kennlinie am Temperaturmesssystem in °C.
 - Δt_{ind} Abweichung des Messwertes vom (richtigen) Kalibrierwert
 - δt_{kal} Die Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Normals wird zu Null mit der Messunsicherheit (normalverteilt $k=2$) aus dem Kalibrierschein geschätzt. Zwischen

¹ Die Kennlinienkorrektion wird so ausgewählt, dass deren Einfluss auf die Gesamtunsicherheit meist vernachlässigt werden kann

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 3
---------------------------	--	--	--	-------------------

den Stützpunkten der Kalibrierung wird die Kennlinie zur Temperaturberechnung z.B. als Funktion $t_N(R)$ herangezogen (üblicherweise Polynom 3. Grades) und interpoliert.

δt_{Drift} Korrektur aufgrund einer möglichen Drift des Normals. Sie wird durch die Historie, Herstellerangaben oder Vergleichsmessungen abgeschätzt.

δt_{Lin} Korrektur aufgrund der Interpolation (Kennlinie) an von den diskret kalibrierten Punkten abweichenden Temperaturpunkten im Messbereich. Die maximale Abweichung der interpolierten Werte von den Kontrollpunkten wird als Grenze einer Rechteckverteilung verwendet.. Für die Angabe der kleinsten Messunsicherheit wird sie zu Null gesetzt.

$\delta t_{U,N}$
 $\delta t_{U,X}$ Korrektur aufgrund der elektrischen Unsicherheit der Messung (Gleichstromwiderstand bei Einsatz eines PRT-Normals oder Gleichspannung bei Einsatz eines Normalthermoelementes) am Anzeigegerät von Normal bzw. Kalibriergegenstand (entfällt bei direkt anzeigenden Thermometern). Diese Messunsicherheit ist im entsprechenden Messbereich durch die Bilanzen der Gleichstromwiderstands- bzw. Gleichspannungskalibrierung für Temperaturanzeigeräte (Normalverteilung, $k=2$) oder durch die Herstellerangabe (Rechteckverteilung) gegeben. Den elektrischen Unsicherheiten wird der Temperaturwert zugeordnet und in der Messunsicherheitsbilanz verwendet.

$\delta t_{ind,N}$
 $\delta t_{ind,X}$ Abweichung durch die Rundung der Anzeige (Digits) von Messgerät bzw. Thermometer. Ausschlaggebend ist die niederwertigste Stelle der Anzeige wodurch im „worst case“ eine Abweichung von $\pm 0,5$ Digit entsteht. Der Unsicherheitsbeitrag wird rechteckverteilt in diesem Intervall angenommen. Die Anzeige des Kalibriergegenstandes kann erst im konkreten Fall berücksichtigt werden. Gute Thermometer bieten allerdings Auflösungen von 1 mK, deren Beitrag dann vernachlässigbar klein ist.

$\delta t_{Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse v. a. wie Korrekturen durch mögliche Wärmeableitungen am Kalibriergegenstand oder Normal. Es wird angenommen, dass diese Parameter bei ausreichender Eintauchtiefe >10 cm vernachlässigbar klein sind

$\delta t_{Self-Heating}$ Einfluss der Messstromstärke: Dieser Einfluss auf das Normal kann vernachlässigt werden, sofern die Messstromstärke der externen Kalibrierung des Normals mit der bei der Verwendung übereinstimmt (1 mA). Der Einfluss der Messstromstärke auf das Messobjekt kann durch die Veränderung der Messstromstärke am Anzeigegerät abgeschätzt werden. Die Geräte unterstützen dazu neben 1 mA eine zweite Messstromstärke 1,4 mA bei doppelter Leistung ($\approx \sqrt{2}$ mA). Mit dieser Funktion lässt sich die Selbsterwärmung bei 1 mA sehr schnell bestimmen, denn sie ergibt sich aus der beobachteten Widerstandsdifferenz zwischen 1 mA und 1,4 mA Messstromstärke.

Die Extrapolation des Widerstands des Messobjektes R_{DUT} auf 0 mA ist damit sehr einfach möglich:

$$R_{DUT}(0 \text{ mA}) = 2 \cdot R_{DUT}(1 \text{ mA}) - R_{DUT}(1,4142 \text{ mA})$$

Genähert ergibt sich für die berechnete Temperatur t_x des Messobjektes

$$t_x(0 \text{ mA}) \approx t_x(1 \text{ mA}) - [t_x(1,4142 \text{ mA}) - t_x(1 \text{ mA})]$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	4

Wird die Selbsterwärmung nicht für jedes Messobjekt bestimmt, so ist dieser Einfluss als Unsicherheitsintervall zu berücksichtigen. Die Untersuchung der eigenen PRT² hat gezeigt, dass dieser Beitrag bis zu ca. 20 mK betragen kann.

- δt_{RJ} Wird als Normal ein Thermoelement eingesetzt, so ist die Unsicherheit der Vergleichsstelle (Reference Junction, RJ) zu berücksichtigen
- δt_{Hom} Korrektur aufgrund der Inhomogenität in der Tempertiereinrichtung.
- δt_{Stab} Die zeitliche Instabilität der Thermostaten wurde durch Probemessungen im Intervall von ca. 30 Minuten bestimmt.
- δt_B Temperaturkorrektur aufgrund von unzureichender axialer Homogenität bei Einsatz eines Blockkalibrators

XIV.3.2 Modellgleichungen:

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich für die **Temperatur des Kalibriergegenstandes (im Bad / Ofen)** die Modellgleichung als (mit $\delta t_{ind,N}=0$)

$$(1) t_X = t_N + \delta t_{Kal} + \delta t_{Drift} + \delta t_{Lin} + \delta t_{U,N} + \delta t_{Verfahren} \left[+ \delta t_{RJ} + \delta t_{SelfHeating} \right] + \delta t_{Hom} + \delta t_{Stab} + \delta t_B$$

und für die Abweichung der gemessenen **Temperatur am Anzeigerät**

$$(2) \Delta t_{ind} = t_{ind} - t_X + \delta t_{ind,X} \quad \text{bei direkt anzeigenden Thermometern bzw.}$$

$$(3) \Delta t_{ind} = t_{ind} - t_X + \delta t_{U,X} + \delta t_{ind,X} \quad \text{bei Kalibrierung von Widerstands-Fühlern ohne Anzeigerät}$$

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

XIV.3.3 Messunsicherheitsbilanz

Für die der Temperatur des Kalibriergegenstandes beizuordnende Standardmessunsicherheit ergibt sich daraus:

$$u^2(t_X) = u^2(t_N) + u^2(\delta t_{Kal}) + u^2(\delta t_{Drift}) + u^2(\delta t_{Lin}) + u^2(\delta t_{U,N}) + u^2(\delta t_{Verfahren}) + u^2(\delta t_{Hom}) + u^2(\delta t_{Stab}) + u^2(\delta t_B) + \left[+ u^2(\delta t_{RJ}) + u^2(\delta t_{SelfHeating}) \right]$$

und für die Abweichung der Anzeige Δt_{ind}

$$u^2(\Delta t_{ind}) = u^2(t_X) + u^2(t_{ind}) + u^2(\delta t_{ind,X}) \left[+ u^2(\delta t_{U,X}) \right]^3$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_N	$\overline{t_N}$	$U(t_N)$	Normal A		$u(t_N)$
t_{ind}	$\overline{t_{ind}}$	$U(t_{ind})$	Normal A		$u(t_{ind})$
δt_{Kal}	0	$U(\delta t_{Kal})/2$	Normal	1	$u(t_{Kal})$
δt_{Drift}	0	$\Delta(\delta t_{Drift})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Drift})$

² <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/000000-Einfluss-Selbsterwaermung-Pt100.xls>

³ [...] entsprechend (3) ist der Anteile $u^2(\delta t_{U,X})$ hinzuzuaddieren für die Gesamtunsicherheit aber fast unerheblich.

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
δt_{Lin}	0	$\Delta(\delta t_{Lin})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Lin})$
$\delta t_{U,N}$	0	$U(\delta t_{U,N})/2$	Normal ⁴	1	$u(t_{U,N})$
$\delta t_{U,X}$	0	$U(\delta t_{U,X})/2$	Normal ³	1	$u(t_{U,X})$
$\delta t_{ind,X}$	0	$\Delta(\delta t_{ind,X})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{ind,X})$
$\delta t_{Verfahren}$	0	$\Delta(\delta t_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Verfahren})$
δt_{RJ}	0	$\Delta(\delta t_{RJ})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{RJ})$
$\delta t_{SelfHeating}$	0	$\Delta(\delta t_{SelfHeating})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{SelfHeating})$
δt_{Hom}	0	$\Delta(\delta t_{Hom})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Hom})$
δt_{Stab}	0	$\Delta(\delta t_{Stab})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Stab})$
δt_B	0	$\Delta(\delta t_B)/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_B)$
Δt_{ind}	$\overline{t_{ind}} - \overline{t_N}$				$u(\Delta t_{ind})$

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

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

Ergebnisse siehe Abschnitt XIV.6 bzw. mitgeltende MU-Tabellen

XIV.4 Thermoelemente – Thermoelementthermometer

XIV.4.1 Verfahren

Die Kalibrierung erfolgt gemäß Richtlinie „DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen“. Die Verbindungsstelle (Thermomaterial - Kupfer) wird dabei isoliert (z.B. verdrillte Verbindung mit Schrumpfschlauchisolation, Kupferblock) in ein Eisbad geführt oder in der Fixpunktzelle (TPW) gehalten. Die Temperatur-Verifikation erfolgt über ein kalibriertes Pt100 Messsystem, wenn der Eispunkt für die Bezugstemperatur von 0 °C (Bezugstemperatur) im Wasserbad-Eisflockengemisch hergestellt und gemessen wird. Bei Verwendung einer Direktmessmethode an einem Voltmeter wie z.B. Keithley 181 für die Thermospannung (siehe Kapitel XV) ergibt sich mit den dem Messwert am nächsten liegenden Punkten $U_1(T_1)$ und $U_2(T_2)$ aus den Grundwerttabellen die interpolierte Temperatur zu

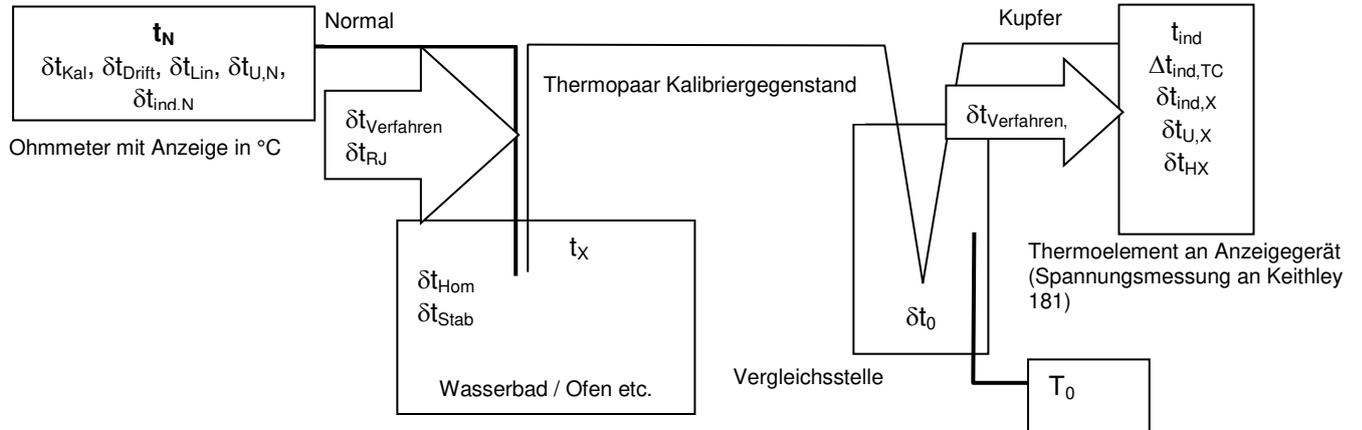
$$t(U_{ind}) = T_1 + \frac{U_{ind} - U_1}{\Delta U} \cdot \text{°C} \quad \text{mit } \Delta U = U_2 - U_1$$

Alternativ kann die Berechnung am PC erfolgen (Excel-Tabellen oder Programm JUMOSENS bzw. eszSense). Des Weiteren kann die Messung und Anzeige an einem der direkt anzeigenden Temperaturmesssysteme erfolgen (z.B. Fluke 1560, Beamex MC5, Fluke 55xxA) und der Messwert für die verschiedensten Thermopaar-Kombinationen direkt in °C abgelesen werden. Die Geräte

⁴ wird die Herstellerangabe verwendet ist eine Rechteckverteilung der Gewichtung $U(\delta t_{U,N})/\sqrt{3}$ anzusetzen

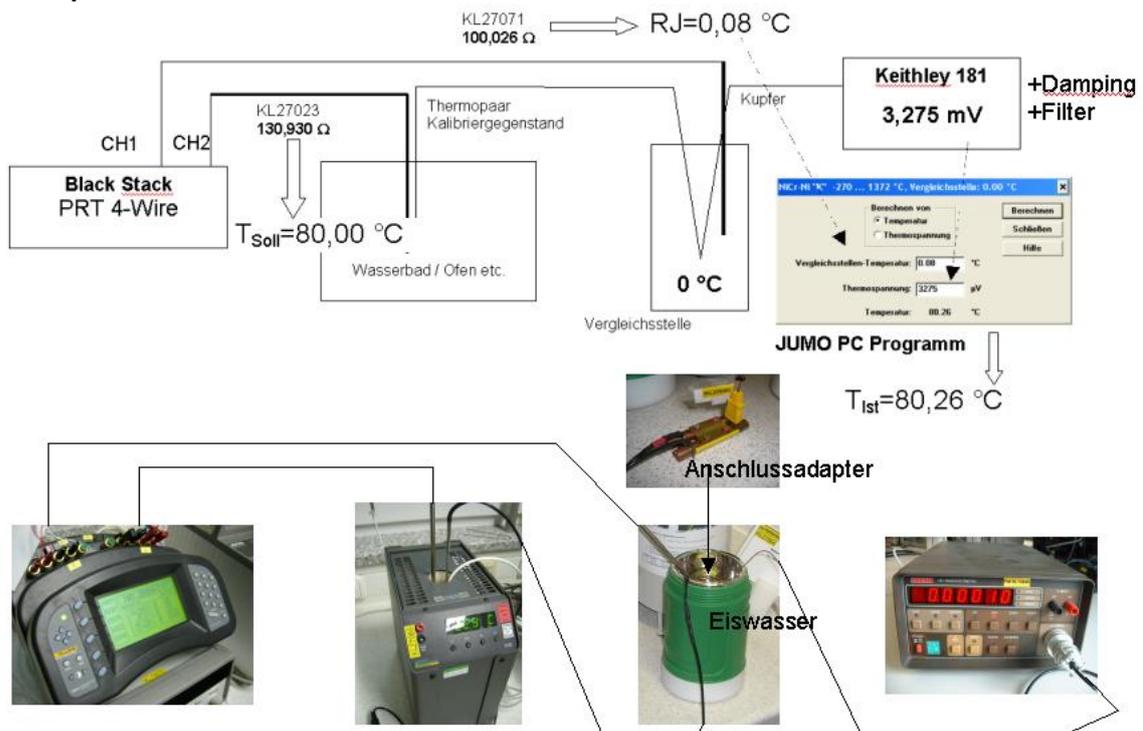
Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 6
---------------------------	--	--	--	-------------------

ermitteln die entsprechenden Temperaturen aufgrund der Gleichungskoeffizienten der DIN 60584 Grundwertgleichungen.



Bei Verwendung von Extensions- oder Ausgleichsleitungen müssen diese kalibriert sein und als weitere Anteile in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Messbeispiel



Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 7
---------------------------	--	--	---	-------------------

XIV.4.2 Modellgleichung

Die in XVI.3.3 dargestellte Messunsicherheitsbilanz erweitert bzw. modifiziert sich um

$\Delta t_{ind,TC}$	Abweichung des Messwertes vom (richtigen) Kalibrierwert bei Thermoelementmessung.
δt_0	Korrektur aufgrund der Messung der Vergleichsstellentemperatur des Messobjektes. Das Unsicherheitsintervall ergibt sich durch die Bilanzen der 0 °C Messung oder durch die Berücksichtigung der Abweichung der automatischen Vergleichsstellenkompensation (CJC) bei Verwendung einer elektronischen CJC.
$\delta t_{ind,X}$	Abweichung durch die Rundung der Anzeige (Digits). An den eingesetzten Normale kann bis zu 1 nV aufgelöst und angezeigt werden. Die Auswertung im Sinne einer stabilen Anzeige ist nach Thermospannungsumrechnung damit innerhalb von mindestens ± 10 mK möglich. Daher wird angenommen, dass die Auflösung der Anzeige bei Thermospannungsmessung mindestens 10 mK beträgt.
$\delta t_{Verfahren}$ $\delta t_{Verfahren,X}$	Zusätzliche verfahrensbedingte Einflüsse (Störspannungen, EMV, TE-Hysterese, Einfluss der Eintauchtiefe etc.) können i.d.R. vernachlässigt werden müssen aber eventuell im berücksichtigt werden (Rechteckverteilung).
δt_{HX}	Unbekannte Spannungsunterschiede aufgrund von Inhomogenitäten der Thermodrähte. Der Einfluss ist vom Messobjekt (DUT) abhängig und muss daher individuell untersucht und berücksichtigt werden. Für die Berechnung der kleinsten angebbaren Messunsicherheit wurden Messungen zur Abschätzung typischer Thermoleitungsinhomogenität durchgeführt. Für Nichtedelmetallthermoelemente (Typ-K) wurden dazu im Bad bei 250 °C die relativen Differenzen der Thermospannung (EMF) zur Ausgangsposition (vollständig getaucht) beim Herausziehen ausgewertet ⁵ . Für Edelmetallthermoelemente dienten die Untersuchungen der externen Kalibrierungen der Typ-R-Elemente Fluke 5649. Es ließ sich zeigen, dass die Unsicherheitsintervalle (Rechteckverteilung) abhängig von der Temperatur t unter $0,1\% \cdot t$ (bzw. $0,2\% \cdot t$ für $t < 0$ °C) und für edle Thermoelemente unter $0,05\% \cdot t$ liegen.
δt_{LX}	Sofern verwendet, werden die Abweichungen durch Verwendung von Ausgleichsleitungen innerhalb von $\pm 0,1$ K geschätzt. Für die Angabe der kleinsten Messunsicherheiten wird von einer Kalibrierung ohne weiteren Ausgleichs- oder Thermoleitungen ausgegangen.

Die Modellgleichung für **die Temperatur im Bad bzw. Ofen** ergibt sich nach wie vor analog XVI.3.2 zu (mit $\delta t_{ind,N=0}$)

$$(1) t_X = t_N + \delta t_{Kal} + \delta t_{Drift} + \delta t_{Lin} + \delta t_{U,N} + \delta t_{Verfahren} + \delta t_{Hom} + \delta t_{Stab} + \delta t_B$$

und für die Abweichung der gemessenen **Temperatur am Anzeigegerät** ergibt sich:

$$(4) \Delta t_{ind,TC} = t_{ind} - t_X + \delta t_{U,X} + \delta t_{Verfahren,X} + \delta t_{ind,X} + \delta t_0 + \delta t_{HX} + \delta t_{LX} \quad \text{bei Kalibrierung von Thermopaaren}$$

⁵ <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/000000-Inhomogenitaetsmessung-Thermolemente.xls>

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 8
---------------------------	--	--	---	-------------------

XIV.4.3 Messunsicherheitsbilanz

Analog erweitert sich das Messunsicherheitsbilanz aus XIV.3.3 um den Anteil der Unsicherheit bei Thermoelementmessung:

$$u^2(\Delta t_{ind,TC}) = u^2(t_x) + u^2(t_{ind}) + u^2(\delta t_{ind,X}) + u^2(\delta t_{U,X}) + u^2(\delta t_0) + u^2(\delta t_{HX}) + u^2(\delta t_{LX}) + u^2(\delta t_{Verfahren,X})$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz für die Temperatur t_x :

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_N	$\overline{t_N}$	$U(t_N)$	Normal A		$u(t_N)$
δt_{Kal}	0	$U(\delta t_{Kal})/2$	Normal	1	$u(t_{Kal})$
δt_{Drift}	0	$\Delta(\delta t_{Drift})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Drift})$
δt_{Lin}	0	$\Delta(\delta t_{Lin})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Lin})$
$\delta t_{U,N}$	0	$U(\delta t_{U,N})/2$	Normal	1	$u(t_{U,N})$
δt_{RJ}	0	$\Delta(\delta t_{RJ})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{RJ})$
$\delta t_{Verfahren}$	0	$\Delta(\delta t_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Verfahren})$
δt_{Hom}	0	$\Delta(\delta t_{Hom})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Hom})$
δt_{Stab}	0	$\Delta(\delta t_{Stab})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Stab})$
δt_B	0	$\Delta(\delta t_B)/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_B)$
t_x	$\overline{t_N}$				$u(t_x)$

Messunsicherheitsbilanz für die der EMK des Kalibriergegenstandes beizuordnenden Temperatur t_{ind} bzw. der Abweichung zur richtigen Temperatur im Bad $\Delta t_{ind,TC}$:

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_{ind}	$\overline{t_{ind}}$	$U(t_{ind})$	Normal A		$u(t_{ind})$
t_x	$\overline{t_N}$	$U(\Delta t_x)$	Normal		$u(t_x)$
$\delta t_{U,X}$	0	$U(\delta t_{U,X})/2$	Normal	1	$u(t_{U,X})$
$\delta t_{Verfahren,X}$	0	$\Delta(\delta t_{Verfahren,X})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Verfahren,X})$
$\delta t_{ind,X}$	0	$\Delta(\delta t_{ind,X})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{ind,X})$
δt_0	0	$\Delta(\delta t_0)/2$	Normal	1	$u(t_0)$
δt_{HX}	0	$\Delta(\delta t_{HX})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{HX})$
δt_{LX}	0	$\Delta(\delta t_{LX})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{LX})$
$\Delta t_{ind,TC}$	$\overline{t_x} - \overline{t_N}$				$u(\Delta t_{ind,TC})$

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis $\Delta t_{x,TC}$ beizuordnende absolute erweiterte Messunsicherheit ($k=2$):

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

Ergebnisse siehe Abschnitt XIV.6 bzw. mitgeltende MU-Tabellen

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	10

XIV.5 Kalibrierung von Temperatur und Feuchte im Klimaschrank oder Klimagenerator⁶

Für große Messobjekte wie Klimaschreiber oder Datenlogger stehen Klimaschränke, wie z. B. Weiss SB1/300/80, oder spezielle Klimageneratoren, wie z. B. Kaymont Model 2000 oder rotronic HydroGen2, zur Verfügung. Genauso können Kalibriergegenstände, deren Sensorik nicht als Tauch- oder Einstechfühler konzipiert ist im Klimaschrank oder -generator kalibriert werden. Als Nutzvolumen kann im Klimaschrank ein Kunststoffrohr oder alternativ ein Drahtkäfig verwendet werden, deren Eigenschaften in Voruntersuchungen (Homogenität der Temperaturverteilung) analysiert wurden. Das Nutzvolumen im Klimagenerator besteht entweder aus der in sich abgeschlossenen Messkammer oder einem Messkammeraufsatz aus Plexiglas für große Messobjekte. Der Referenzmessort für die Messung der Temperatur befindet sich dabei immer im Zentrum dieses Nutzvolumens, wobei die Ermittlung von Messkorrekturen des Kalibriergegenstandes immer im Vergleich mit einem Normalthermometer bzw. Feuchtemessgerät (Taupunktspiegel, möglichst dicht am Messobjekt positioniert) erfolgt.

Zur Verringerung des Einflusses von Instabilitäten ist empfehlenswert, dass ein Messwert aus mehreren Einzelmittelwerten mit seiner empirischen Standardabweichung des Gesamt-Mittelwerts gebildet wird. Die Einzelmittelwerte stellen ihrerseits ebenfalls den Mittelwert der Ablesung von Messobjekt bzw. Normal z.B. über ein Zeitintervall von fünf Minuten dar. Dabei muss beachtet werden, dass lediglich die gegenseitige Abweichung gemittelt wird oder vor der Mittelwertbildung die Messwerte auf den Kalibrierwert des Normals des ersten Einzelmittelwert normiert werden, damit eine mögliche Temperaturdrift der Temperiereinrichtung nicht in das Ergebnis einfließt, sondern nur die zufälligen Messabweichungen aus der Wiederholungsmessung.



Bild XIV.5.1a Beispielhafter Messaufbau für Feuchte und Temperatur im Klimaschrank

⁶ Abgewandelt zu diesem Verfahren ist es möglich eine Einpunkt-Kalibrierung im Messraum unter Umgebungsbedingungen durchzuführen. Die Einflussgrößen von Homogenität und Stabilität von Feuchte bzw. Temperatur sind in einem solchen Fall individuell oder als typische Werte für den jeweiligen Messraum zu ermitteln und zu berücksichtigen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	11



Bild XIV.5.2a Klimagenerator Kaymont 2000 (hier mit Plexiglastür)



- Taupunktspiegel
- Referenztemperaturfühler
- zusätzlicher Kontrollfühler (Feuchte / Temperatur)

Bild XVI.5.2c Kammeraufsatz für große Messobjekte (23 °C)

Feuchtekalibrierung mit Taupunktspiegel als Normal (z.B. General Eastern Optica / 1111H- Dew Point Monitor, MBW 473 oder 373)

Im Klimaschrank oder Klimagenerator werden z. B. im Abstand von einer Minute mindestens fünf Messwerte sowohl von Temperatur, Taupunkt und relativer Feuchte an Normal und Messobjekt aufgenommen und daraus ein Mittelwert je Kalibrierpunkt ermittelt, wiederholt und ggf. ein Mehrfachmittelwert aus allen Einzelmittelwerten gebildet und dokumentiert. Die Erfassung der Feuchte im Nutzvolumen erfolgt über einen kalibrierten Taupunktspiegel zusammen mit einem Referenzsensor für die Luftstromtemperatur.

Kalibriert werden elektrische Hygrometer, Feuchtemessgeräte und Klimalogger. Die Kalibrierung von Haarhygrometern (Klimaschreiber) ist ebenfalls möglich.

Es wird empfohlen, den Referenzwert der relativen Feuchte anhand der Bestimmungsgleichung⁷ aus den Wasserdampf-Partialdrücken entsprechend den korrigierten⁸ Messwerten für Temperatur und Taupunkt des Normal zu errechnen und zu validieren (nicht vom Display ablesen), da das Gerät Taupunkte und Temperaturen misst und alle anderen Werte intern kalkuliert.

$$h_{ref} = 100\% \cdot \left(\frac{p_w(T_D)}{p_{ws}(T_A)} \right) = 100\% \cdot e^{\left(\frac{mT_D}{k+T_D} - \frac{mT_A}{k+T_A} \right)} \quad (1)^9$$

⁷ General Eastern Optica Operator's Manual Revision 0

⁸ sofern erforderlich werden die Messwerte für Taupunkttemperatur und Temperatur z.B. über ein Polynom 2. Ordnung korrigiert

⁹ XL-Tabelle K:\Intranet\DKD-QS\DKD\Messunsicherheiten\QMH - Tabellen\Messunsicherheiten Tabelle XIV Temperatur.xls

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	12

aus

$$p(T) = l \cdot e^{\left(\frac{mT}{k+T}\right)}$$

mit

h_{ref}	Kalibrierwert für relative Feuchte am Normal	
p_w	Dampfdruck in mbar	k 240,97
p_{ws}	Sättigungsdampfdruck in mbar	m 17,502
T_D	(korrigierte) Taupunkttemperatur in °C	l 6,1121
T_A	(korrigierte) Luftstromtemperatur in °C	e 2,7183 (Eulersche Zahl)

Für Taupunktspiegelhygrometer (z.B. Michell S8000 Remote) welche nur die Frostpunkttemperatur angeben können, ist für den Frostpunkt-Bereich (Temperaturen < 0 °C) die folgende Bestimmungsgleichung¹⁰ für den Referenzwert der relativen Feuchte zu verwenden:

$$h_{ref} = 100\% \cdot \left(\frac{p_w(T_F)}{p_{ws}(T_A)}\right) = 100\% \cdot \frac{n}{l} \cdot e^{\left(\frac{o \cdot T_F}{q+T_F} - \frac{m \cdot T_A}{k+T_A}\right)}$$

aus

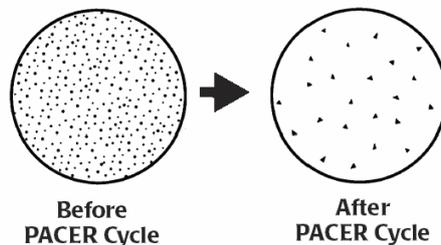
$$p(T_F) = n \cdot e^{\left(\frac{o \cdot T_F}{q+T_F}\right)} \quad \text{und} \quad p(T_A) = l \cdot e^{\left(\frac{m \cdot T_A}{k+T_A}\right)}$$

mit

h_{ref}	Kalibrierwert für relative Feuchte am Normal	k 240,97
p_w	Dampfdruck in mbar	m 17,502
p_{ws}	Sättigungsdampfdruck in mbar	l 6,1121
T_F	(korrigierte) Frostpunkttemperatur in °C	n 6,1115
T_A	(korrigierte) Luftstromtemperatur in °C	o 22,452
		q 272,55
		e 2,7183 (Eulersche Zahl)

Dabei muss sichergestellt sein, dass sich eine Eisschicht auf dem Spiegel befindet. Dies ist z.B. durch einen speziellen Unterkühlungsprozess des Taupunktspiegelhygrometers möglich. Dabei wird der Spiegel zunächst soweit abgekühlt bis sich eine Eisschicht gebildet hat um dann gewährleisten zu können, dass es sich bei der Messung um einen Frostpunkt handelt. (Optional: Bei anderen Geräten, die einen negativen Taupunkt anzeigen, handelt es sich um supergekühltes Wasser auf der Spiegeloberfläche.)

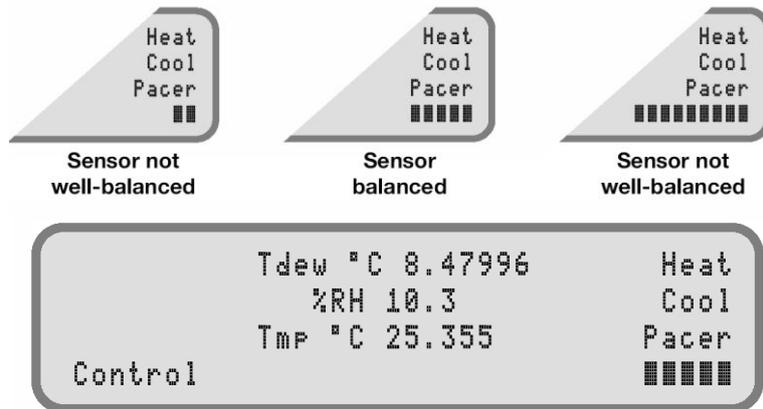
Genauer Betrieb und Bedienung des Normal ist dessen Bedienungsanleitung zu entnehmen. Für verlässliche Messwerte muss der Spiegel sauber und gereinigt sein und z.B. nach Durchführung eines automatischen Reinigungszyklus (PACER, rel. Humidity = 100%) betriebsbereit sein.



Gültige Messungen werden nur bei guter Aussteuerung der Sensoroptik erzielt („BALANCE“) und wenn das System und das Klima eingeschwungen ist (z.B. „CONTROL“-Status).

¹⁰ General Eastern Optica Operator's Manual Revision 0

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 13
---------------------------	--	--	---	--------------------



Beispiel für Abgleich der Sensoroptik (BALANCE) und Meldung des stabilen Systemstatus (CONTROL) beim Taupunktspiegel GE Optica

Feuchtekalibrierung an direkt anzeigendem Feuchtemessgerät

Alternativ zum oben beschriebenen Taupunkt-Verfahren kann auch mit einem kalibrierten Feuchtemessgerät die relative Feuchte in der Messkammer bestimmt und mit Messobjekten verglichen werden.

XIV.5.1 Voruntersuchungen

Um die Messunsicherheiten der Verbunde aus Klimaeinrichtung, Sensor (Taupunktspiegel oder Feuchtemessgerät) und Anzeigegerät beschreiben zu können müssen deren einzelne Einflüsse auf die Gesamtunsicherheit individuell je Kombination untersucht werden. Dazu gehören insbesondere

- Stabilität der Temperatur der Temperiereinrichtung
- Stabilität der Taupunkttemperatur der Temperiereinrichtung
- Homogenität der Temperatur (Temperaturverteilung) der Temperiereinrichtung
- zeitliche Drift des Thermometers (Temperaturfühler und dessen Anzeige)
- zeitliche Drift des Taupunktspiegels (oder Feuchtefühler und dessen Anzeige)
- Interpolationsabweichung nach Kennlinienkorrektion¹¹

XIV.5.1.1 Stabilität von Temperatur und Taupunkttemperatur

Die Stabilitätsuntersuchung sollte über einen Zeitraum von mindestens 30 Minuten durchgeführt werden. Je nach angewandter Messvorschrift lässt sich der Einfluss, dessen Intervallbreite und Gewichtung unterschiedlich definieren:

Vergleich beliebiger Einzelmesswerte oder eines einzelnen Mittelwertes von Normal und Messobjekt

In diesem Fall definiert sich die Intervallbreite (Halbbreite) a_{Stab} des Stabilitätseinflusses zu

$$a_{Stab} = \frac{MAX - MIN}{2}$$

mit MAX und MIN als jeweils beobachteter maximaler bzw. minimaler Messwert, d.h. Gewichtung als Rechteckverteilung, oder

$$a_{Stab} = \sigma$$

mit σ als einfache Standardabweichung der Messwerte, d.h. Gewichtung als Normalverteilung

¹¹ Die Kennlinienkorrektion wird so ausgewählt, dass deren Einfluss auf die Gesamtunsicherheit meist vernachlässigt werden kann

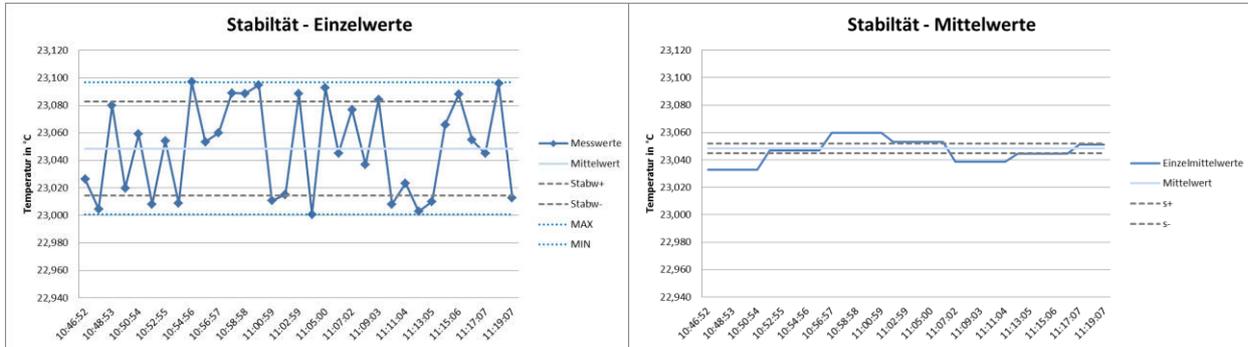
Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 14
---------------------------	--	--	--	--------------------

Vergleich wiederholter Mittelwerte von Normal und Messobjekt

In diesem Fall definiert sich die Intervallbreite (Halbbreite) a_{Stab} des Stabilitätseinflusses zu

$$a_{Stab} = s$$

mit s als empirischer Standardunsicherheit des Mittelwertes bei Verwendung zeitlicher Einzelmittelwerte, z.B. aus 5 Minuten, d.h. Gewichtung ebenfalls als Normalverteilung



Stabilitätseinfluss verschiedener Messstrategien

XIV.5.1.1 Homogenität der Temperatur (Temperaturverteilung)

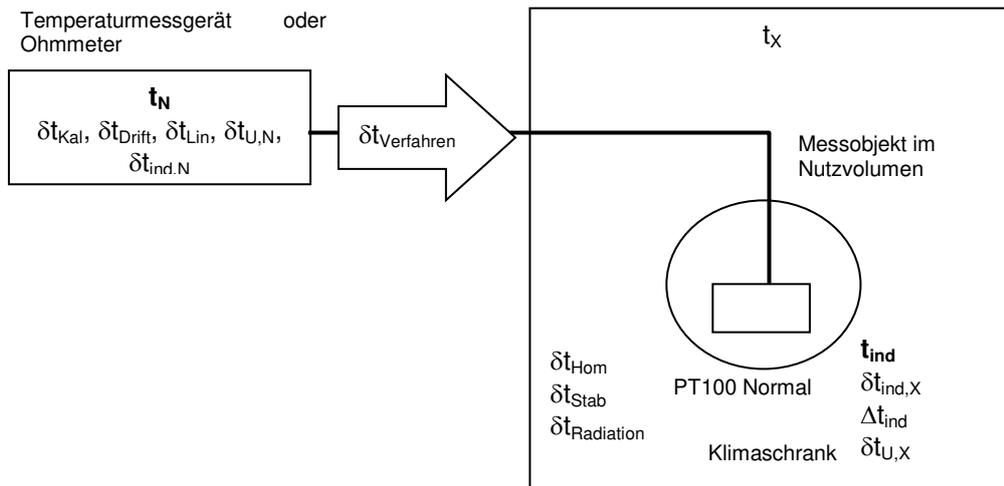
Unterschiedliche Homogenitätsdefinitionen können zu unterschiedlichen Intervallbreiten und Gewichtungen führen. Üblich ist die Untersuchung des maximalen Temperaturunterschieds relativ zum Zentrum des Nutzvolumens. Da Messobjekt und Normal meist örtlich sehr dicht zusammengeführt werden empfiehlt sich die Gewichtung als Dreiecksverteilung, da extreme Positionierungen im Nutzvolumen eher unwahrscheinlich sind.

Eine Untersuchung der Homogenität der Taupunkttemperatur ist bei umgewälzten Temperiereinrichtungen nicht erforderlich, da sich dann an jedem Messort dieselbe absolute Feuchte

(Taupunkttemperatur) einstellen wird, so dass die Inhomogenität der relativen Feuchte nur von der Verteilung der Temperatur im Messvolumen abhängig ist.

XIV.5.2 Messunsicherheit - Temperatur

Temperaturmessgerät oder Ohmmeter



mit den Größen analog Kapitel XIV.3 bzw.

t_N Temperatur-Messwert am Referenzfühler in °C. Verwendet werden i.d.R. Gebrauchsnormale zur Anzeige der Temperatur im Zentrum der homogenen Zone.

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 15
---------------------------	--	--	---	--------------------

Die zugehörige Unsicherheit wird durch die Standardunsicherheit des Mittelwertes der ermittelten Abweichung berücksichtigt.

- $\delta t_{ind,N}$ Die Unschärfe der Auflösung des Normalis
- $t_{ind}, \Delta t_{ind}$ Anzeige für die Temperatur am Kalibriergegenstandes und deren Abweichung
- δt_{Kal} Kalibrierunsicherheit oder Spezifikation inklusive Drift des verwendeten Temperaturnormalis.
- $\delta t_{Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch mögliche Eigenerwärmung durch den Messstrom, Umgebungsbedingungen oder Beladung.
- δt_{Hom} Korrektur aufgrund von Inhomogenitäten im Klimaschrank- oder Generator
- δt_{Stab} Korrektur durch zeitliche Instabilität im Klimaschrank oder Generator
- $\delta t_{Radiation}$ Temperaturkorrektur aufgrund des Strahlungseinflusses..

Modellgleichung

Mit den genannten Größen wird die Modellgleichung für die Abweichung der Temperatur am Anzeigegerät (Kalibriergegenstand) formuliert als:

$$t_X = t_N + \delta t_{ind,N} + \delta t_{Kal} + \delta t_{Verfahren} + \delta t_{Hom} + \delta t_{Stab} + \delta t_{Radiation} \text{ und } \Delta t_{ind} = t_{ind} - t_X + \delta t_{ind,X}$$

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_N	$\overline{t_N}$	$s(\Delta t_{ind})$	Normal A	1	$u(t_N)$
t_{ind}	$\overline{t_{ind}}$				
$\delta t_{ind,N}$	0	$\Delta(\delta t_{ind,N})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{ind,N})$
δt_{Kal}	0	$\Delta(\delta t_{Kal})/\sqrt{3}$	Rechteck ¹²	1	$u(t_{Kal})$
$\delta t_{ind,X}$	0	$\Delta(\delta t_{ind,X})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{ind,X})$
$\delta t_{Verfahren}$	0	$\Delta(\delta t_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Verfahren})$
δt_{Hom}	0	$\Delta(\delta t_{Hom})/\sqrt{3}$	Rechteck ¹³	1	$u(t_{Hom})$
δt_{Stab}	0	$\Delta(\delta t_{Stab})/\sqrt{3}$	Rechteck ¹⁴	1	$u(t_{Stab})$
$\delta t_{Radiation}$	0	$\Delta(\delta t_{Radiation})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Radiation})$
Δt_{ind}	$\overline{t_{ind}} - \overline{t_N}$				$u(\Delta t_{ind})$

¹² bei Verwendung von Spezifikationen; sonst normalverteilt aus Kalibrierunsicherheit U_{Kal} (k=2) und maximaler Drift $\Delta(\delta_{Drift})$ innerhalb $\Delta(\delta_{Kal}) = \sqrt{(\Delta(\delta_{Drift})/\sqrt{3})^2 + (U_{Kal}/2)^2}$

¹³ ggf. Dreiecks-Gewichtung mit Wurzel(6)

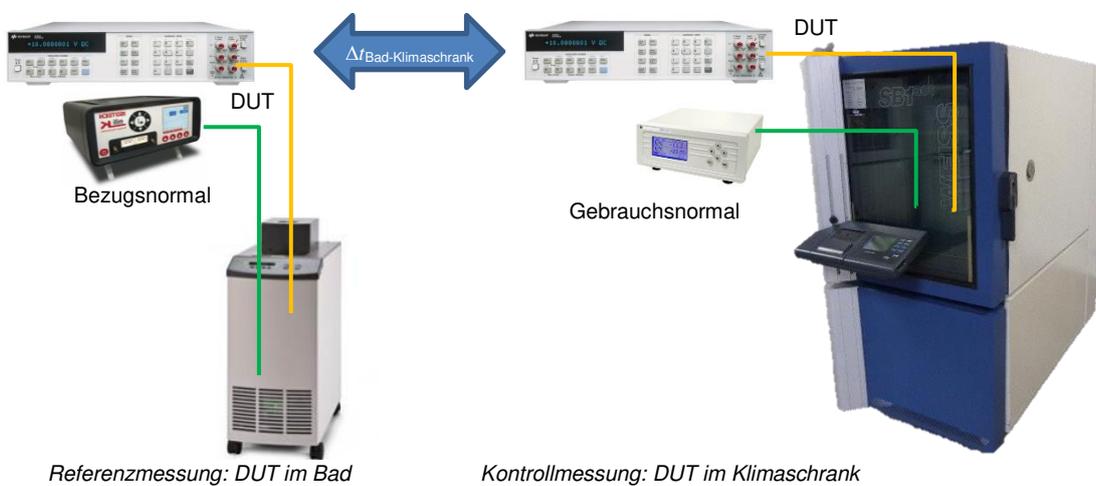
¹⁴ je nach „Messstrategie“ ggf. auch normalverteilt

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

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

XIV.5.3.1 Temperaturkalibrierung im Klimaschrank/- generator oder Gebrauchsnormaltemperiereinrichtung: „Empirische“ Messunsicherheitsbilanz

Alternativ zur in Abs. XIV.5.3 gezeigten Unsicherheitsberechnung kann die Messunsicherheit bei Verwendung von Temperiereinrichtungen überschneidender Bereiche durch den Vergleich der Ergebnisse derselben Messobjekte bestimmt werden, sofern die Stichprobenlänge ausreichend ($n \geq 3$) und repräsentativ für Messobjekte unterschiedlicher Bauform ist. Geeignet ist beispielsweise der Vergleich von Thermometern, die zuvor durch eine Tauchmessung im Bad mit kleinen Unsicherheiten charakterisiert wurden, mit deren Ergebnissen in Klimaschrank oder Klimagenerator.



Die Unsicherheitsbilanz lässt sich dann mit der Differenz der „Referenzmessung“ zur „Gebrauchsmessung“ bilden, die die Anteile des Verfahrens und des Gebrauchsnormals beinhaltet

Modellgleichung

Die Modellgleichung für die Messabweichung des Kalibriergegenstand formuliert sich dann zu:

$$t_X - \Delta t_X + \delta t_{ind,X} = t_{GN} + \delta t_{ind,GN} + \delta t_{GN} + \delta t_{BN} + \delta t_{Verfahren}$$

$$\Delta t_X = t_{GN} - t_X - \delta t_{ind,X} + \delta t_{ind,GN} + \delta t_{GN} + \delta t_{BN} + \delta t_{Verfahren}$$

mit

t_X Anzeige des Messobjekts (DUT) in °C als Mittelwert von z.B. 5 Minuten Messintervall
 $\delta t_{ind,X}$ mit der Abweichung des Ziffernsprungs $\delta t_{ind,X}$ der Intervallbreite von ± 1 Digit (niederwertigste Stelle der Anzeige des Messobjekts). Bei „guten“ Messobjekten ist die Anzeigauflösung klein genug und kann vernachlässigt werden.

Δt_X Messabweichung des Kalibriergegenstandes. Die zugehörige Unsicherheit wird durch die Standardunsicherheit des Mittelwertes berücksichtigt.

t_{GN} Gemessene Temperatur am Gebrauchsnormal und deren Abweichung durch den Ziffernsprung der Anzeige (ebenfalls aus dem Mittelwert der Ablesungen von z.B. 5 Messungen im Abstand von einer Minute). Üblicherweise ist dieser Anteil bereits in der Gebrauchsnormalunsicherheit δt_{GN} enthalten und muss nicht zusätzlich berücksichtigt werden.
 $\delta t_{ind,GN}$

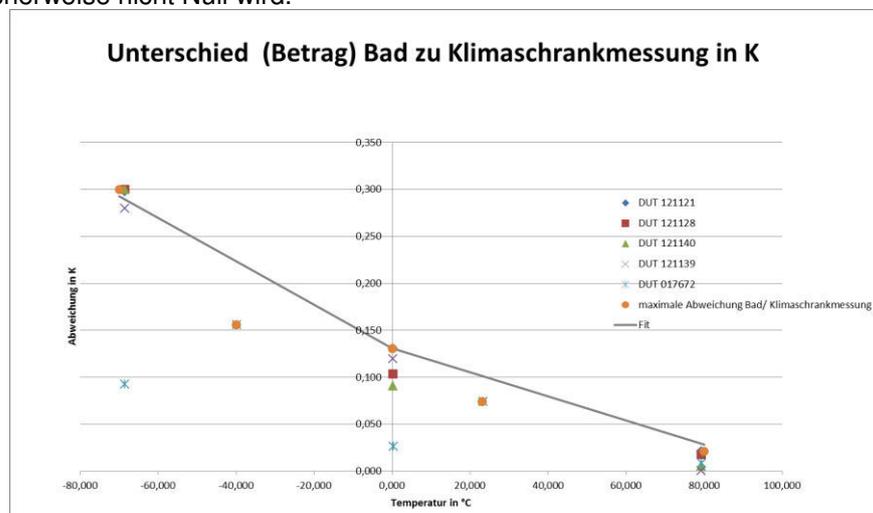
δt_{GN} Unbekannte Abweichung durch die Unsicherheit des Gebrauchsnormals, die z. B. als

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	17

Unterbilanz aus Drift und Interpolationsabweichung oder der Spezifikation gewonnen werden kann. Wird ein „worst-case“-Intervall angenommen so liegen die Werte innerhalb der Grenzen einer Rechteckverteilung.

δt_{BN} Unbekannte Abweichung durch die Unsicherheit des Bezugsnormals (Badmessung), die üblicherweise durch die Unterbilanz des Verfahrens im Bad beschrieben wird (Normalverteilung, $k=2$)

$\delta t_{Verfahren}$ Verfahrensabhängiger Einfluss durch die Temperiereinrichtung. Die Intervallgrenzen werden durch den Vergleich unterschiedlicher Messobjekte bestimmt, die sowohl im Bad (Tauchmessung) als auch in der zu untersuchenden Temperiereinrichtung (z. B. Klimaschrank, Luftmessung) gemessen werden können. Die Differenz enthält dabei bereits Anteile der Unsicherheit des Gebrauchsnormals und dessen „Kennlinienqualität“ (Interpolationsabweichung). Es ist praktikabel die größte gemessene Abweichung als Grenze eine u-Verteilung anzunehmen, da die Differenz typischerweise nicht Null wird.

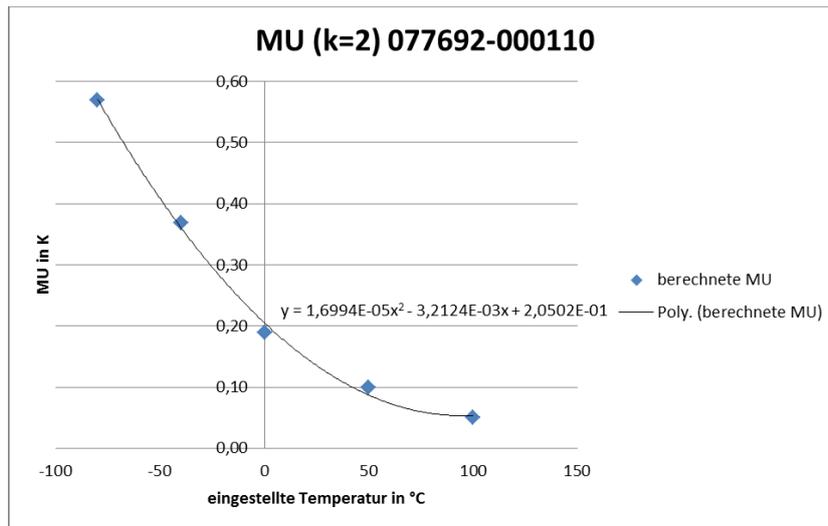


Gemessene Abweichungen unterschiedlicher Messobjekte im Bad und im Klimaschrank mit den Grenzen der Abschätzung einer wahrscheinlichen u-Verteilung¹⁵

Die tabellarische Aufstellung der Messunsicherheitsbilanz ist in den Unsicherheitstabellen der Gebrauchsnormale enthalten, z. B. <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/077692.xlsx>. Die Unsicherheit wird dann geeignet über den Bereich abgeschätzt.

¹⁵ K:\Intranet\DKD-QS\DKD\Ringvergleiche\intern\Vergleich-Fühler-im-Klimaschrank-und-Bad.xlsx

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	18



Exemplarische Messunsicherheitsangabe (Fit) des Gebrauchsnormals GE Sensing T-100E (ID 077692) im Klimaschrank Weiss SB1/300/80 über den Einsatzbereich von -70 °C bis 100 °C

XIV.5.3 Messunsicherheit – Taupunkt

mit den Größen analog Kapitel XIV.3 bzw. XIV.5.2

t_N Taupunkttemperatur-Messwert am Taupunktspiegel in °C. Die zugehörige
 $\delta t_{ind,N}$ Unsicherheit wird durch die Standardunsicherheit des Mittelwertes der Abweichung zwischen Messobjekt und Normal berücksichtigt.

t_{ind} Die Anzeige für die gemessene Taupunkttemperatur am Kalibriergegenstand ergibt
 $\delta t_{ind,X}$ sich aus dem Mittelwert der Ablesungen.

δt_{ind} Die Unschärfe der Auflösung ist abhängig vom Kalibriergegenstand

δt_{Kal} Die Abweichung aufgrund der Kalibrierung des Normals wird zu Null mit der Messunsicherheit (Normalverteilt, k=2) aus dem Kalibrierschein angenommen

δt_N Die nominelle Abweichung (ohne Kennlinienkorrektion) ist ebenfalls dem Kalibrierschein des Normals entnehmbar. Mit Kennlinienkorrektion wird die Unsicherheit der Interpolation als Einflussgröße verwendet.

δt_{Drift} Die Drift des Normals wird aus der Historie zurückliegender Kalibrierungen bestimmt. Hilfsweise kann die Spezifikation des Normals verwendet werden, die Drift und maximale Anzeigeabweichung zusammenfasst.

$\delta t_{Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch Eigenerwärmung des Taupunktspiegels durch den Messstrom, Verunreinigung des Spiegels oder Beladung etc., die z.B. durch Wiederholungsmessungen unter unterschiedlichen Bedingungen abgeschätzt werden können. Im Idealfall sind diese vernachlässigbar klein.

δt_{Hom} Korrektur aufgrund von Inhomogenitäten im Klimaschrank, im gut umgewälzten Messvolumen des Klimaschranks sind diese vernachlässigbar klein.

δt_{Stab} Korrektur durch zeitliche Instabilität im Klimaschrank

Modellgleichung

$$t_X = t_N + \delta t_{ind,N} + \delta t_{Kal} + \delta t_N + \delta t_{Drift} + \delta t_{Spez} + \delta t_{Verfahren} + \delta t_{Hom} + \delta t_{Stab} \text{ und}$$

$$\Delta t_{ind} = t_{ind} - t_X + \delta t_{ind,X}$$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	19

Tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
t_N	$\overline{t_N}$	$s(\Delta t_{ind})$	Normal A	1	$u(t_N)$
t_{ind}	$\overline{t_{ind}}$				
$\delta t_{ind,N}$	0	$\Delta(\delta t_{ind,N})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{ind,N})$
δt_{Kal}	0	$U(\delta t_{Kal})/2$	Normal	1	$u(t_{Kal})$
δt_N	0	$U(\delta t_N)/2$	Normal	1	$u(t_N)$
δt_{Drift}	0	$\Delta(\delta t_{Drift})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Drift})$
$\delta t_{ind,X}$	0	$\Delta(\delta t_{ind,X})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{ind,X})$
$\delta t_{Verfahren}$	0	$\Delta(\delta t_{Verfahren})/\sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(t_{Verfahren})$
δt_{Hom}	0	$\Delta(\delta t_{Hom})/\sqrt{3}$	Rechteck ¹⁶	1	$u(t_{Hom})$
δt_{Stab}	0	$\Delta(\delta t_{Stab})/\sqrt{3}$	Rechteck ¹⁷	1	$u(t_{Stab})$
Δt_{ind}	$\overline{t_{ind}} - \overline{t_N}$				$u(\Delta t_{ind})$

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

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

XIV.5.4 Messunsicherheit – relative Feuchte

Gemäß der Bestimmungsgleichung¹⁸ aus den Wasserdampf-Partialdrücken errechnet sich aus den gemessenen Werten der Luftstromtemperatur und Taupunkttemperatur die relative Feuchte zu

$$h_{ind,N} = 100\% \cdot \left(\frac{p_w(T_D)}{p_{ws}(T_A)} \right) = 100\% \cdot e^{\left(\frac{m_D T_D}{k_D + T_D} - \frac{m T_A}{k + T_A} \right)} \quad (1)$$

aus

$$p(T) = l \cdot e^{\left(\frac{mT}{k+T} \right)}$$

mit

$h_{ind,N}$	vom Normal angezeigte relative Feuchte	k	240,97
p_w	Dampfdruck in mbar	k_D	240,97
p_{ws}	Sättigungsdampfdruck in mbar	m_D	17,502
T_D	Taupunkttemperatur in °C	m	17,502
T_A	Luftstromtemperatur in °C	l	6,1121
e	Eulersche Zahl		2,7183

Mit den Eingangsgrößen

$$T_D = T_{D,gemessen} + \delta T_{D,N} + \delta T_{D,Drift} + \delta T_{D,Kal} + \delta T_{D,Stab} + \delta T_{D,Hom} + \delta T_{D,Verfahren}$$

¹⁶ ggf. Dreiecks-Gewichtung mit Wurzel(6)

¹⁷ je nach „Messstrategie“ ggf. auch normalverteilt

¹⁸ General Eastern Optica Operator's Manual Revision 0

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	20

$$T_A = T_{A,gemessen} + \delta T_{A,N} + \delta T_{A,Drift} + \delta T_{A,Kal} + \delta T_{A,Stab} + \delta T_{A,Hom} + \delta T_{Radiation} + \delta T_{A,Verfahren} \text{ und}$$

und o.g. Gleichung (1) formuliert sich die **Modellgleichung** bei der Messung der relativen Feuchte im Vergleich mit dem Taupunktspiegel zu

$$\Delta h_{ind,X} = h_{ind,N} - h_{ind,X} + \delta h_{ind,X} + \delta h_{ind,N}$$

$h_{ind,N}$
 $h_{ind,X}$ Mittelwert der anhand der Bestimmungsgleichung aus den Wasserdampf-Partialdrücken entsprechend den Messwerten für Temperatur und Taupunkt errechnete relative Feuchte am Normal (N) und mittlerer angezeigter Wert am Kalibriergegenstand (X).

Δh_{ind} Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes

$\delta h_{ind,N}$ Anzeigauflösung des Normals in % relativer Feuchte

$\delta h_{ind,X}$ Die Anzeigauflösung des Kalibriergegenstandes ist erst im konkreten Fallbestimmbar

$T_{D,gemessen}$ gemessener Taupunkt am Normal

$\delta T_{D,N}$ bzw.
 $\delta T_{D,Lin}$ Die maximale nominelle Abweichung (unkorrigiert $\delta T_{D,N}$ bzw. korrigiert $\delta T_{D,Lin}$) der angezeigten Taupunkttemperatur vom richtigen Wert wird dem Kalibrierschein entnommen oder als Abweichung von der Korrekturkennlinie berechnet

$\delta T_{D,Drift}$ Die maximale Drift der Taupunktanzeige wird aus der Historie der Rekalibrierungen bestimmt

$\delta T_{D,Kal}$ Aus dem Kalibrierschein des Gerätes entnehmbare Unsicherheit der Taupunkttemperaturkalibrierung (Normalverteilung, $k=2$)

$\delta T_{D,Stab}$ Korrektur durch zeitliche Instabilität der Taupunkttemperatur beispielsweise im Klimaschrank innerhalb der typischen Messzeit

$\delta T_{D,Hom}$ Korrektur aufgrund von Inhomogenitäten der Taupunkttemperatur im Klimaschrank; im gut umgewälzten Messvolumen des Klimaschranks sind diese vernachlässigbar klein.

$\delta T_{D,Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch Eigenerwärmung des Taupunktspiegels durch den Messstrom, Verunreinigung des Spiegels oder Beladung etc., die z.B. durch Wiederholungsmessungen unter unterschiedlichen Bedingungen abgeschätzt werden können. Im Idealfall sind diese vernachlässigbar klein.

$T_{A,gemessen}$ gemessener Temperatur des Luftstroms am Normal

$\delta T_{A,N}$ bzw.
 $\delta T_{A,Lin}$ Die maximale nominelle Abweichung vom angezeigten Wert der Temperatur wird dem Kalibrierschein entnommen oder als Abweichung von der Korrekturkennlinie berechnet

$\delta T_{A,Drift}$ Die Drift des verwendeten Temperaturfühlers wird aus der Historie der Rekalibrierungen bestimmt

$\delta T_{A,Kal}$ Abweichung durch die Unsicherheit der Kalibrierung des Thermometers bei Vergleich gegen die eigenen Referenz-PRT (Tauchmessung im Bad)

$\delta T_{A,Stab}$ Korrektur durch zeitliche Instabilität der Temperatur im Klimaschrank oder Klimagenerator

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	21

- $\delta T_{A,Hom}$ Korrektur aufgrund von Temperatur-Inhomogenitäten im Klimaschrank oder Klimagenerator
- $\delta T_{A,Verfahren}$ Verfahrensbedingte Einflüsse wie Korrekturen durch Eigenerwärmung des Temperaturfühlers durch den Messstrom oder Beladung etc., die z.B. durch Wiederholungsmessungen unter unterschiedlichen Bedingungen abgeschätzt werden können. Im Idealfall sind diese vernachlässigbar klein.
- $\delta t_{Radiation}$ Temperaturkorrektur aufgrund des Strahlungseinflusses. Der Einfluss kann durch Vergleich von Bad (Tauchmessung) und Luftmessungen eines Prüflings quantifiziert werden.

Mit den Sensitivitätskoeffizienten als

$$\frac{\partial(\Delta h)}{\partial T_{D,i}} = 100 \cdot e^{\left(\frac{mT_D}{k+T_D} - \frac{mT_A}{k+T_A}\right)} \cdot \frac{m \cdot k}{(k+T_D)^2} = c_D,$$

$$\frac{\partial(\Delta h)}{\partial T_{D,i}} = -100 \cdot e^{\left(\frac{mT_D}{k+T_D} - \frac{mT_A}{k+T_A}\right)} \cdot \frac{m \cdot k}{(k+T_A)^2} = c_A \text{ und } \left| \frac{\partial(\Delta h)}{\partial h_i} \right| = 1$$

ergibt sich das Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung von relativer Feuchte im Klimaschrank

$$u^2(\Delta h_{ind}) = u^2(\Delta \bar{h}_{ind}) + u^2(\delta h_{ind,X}) + \sum_{i=1}^n c_D^2 u^2(T_{D,i}) + \sum_{j=1}^p c_A^2 u^2(T_{A,j})$$

damit ergibt sich die tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz:

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$T_{D,gemessen}$	T_D				
$T_{A,gemessen}$	T_A				
$h_{ind,N}$	\bar{h}_N	$s(\Delta h_{ind})$	Normal A	1	$u(h_N)$
$h_{ind,X}$	\bar{h}_{ind}				
$\delta h_{ind,N}$	0	$\Delta(\delta h_{ind,N}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(h_{ind,N})$
$\delta h_{ind,X}$	0	$\Delta(\delta h_{ind,X}) / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u(h_{ind,X})$
$\delta T_{D,N}$	0	$\Delta(\delta T_{D,N}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_D	$u(T_{D,N})$
$\delta T_{D,Drift}$	0	$\Delta(\delta T_{D,Drift}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_D	$u(T_{D,Drift})$
$\delta T_{D,Kal}$	0	$U(\delta T_{D,Kal}) / 2$	Normal	c_D	$u(T_{D,Kal})$
$\delta T_{D,Stab}$	0	$\Delta(\delta T_{D,Stab}) / \sqrt{3}$	Rechteck ¹⁹	c_D	$u(T_{D,Stab})$
$\delta T_{D,Hom}$	0	$\Delta(\delta T_{D,Hom}) / \sqrt{3}$	Rechteck ²⁰	c_D	$u(T_{D,Hom})$
$\delta T_{D,Verfahren}$	0	$\Delta(\delta T_{D,Verfahren}) / \sqrt{3}$	Rechteck	c_D	$u(T_{D,Verfahren})$

¹⁹ je nach „Messstrategie“ ggf. auch normalverteilt

²⁰ ggf. Dreiecks-Gewichtung mit Wurzel(6)

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 22
---------------------------	--	--	--	--------------------

Größe	Schätzwert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$\delta T_{A,N}$	0	$\Delta(\delta T_{A,N}) / \sqrt{3}$	Rechteck	C_A	$u(T_{D,N})$
$\delta T_{A,Drift}$	0	$\Delta(\delta T_{A,Drift}) / \sqrt{3}$	Rechteck	C_A	$u(T_{D,Drift})$
$\delta T_{A,Kal}$	0	$U(\delta T_{A,Kal}) / 2$	Normal	C_A	$u(T_{D,Kal})$
$\delta T_{A,Stab}$	0	$\Delta(\delta T_{A,Stab}) / \sqrt{3}$	Rechteck ²¹	C_A	$u(T_{D,Stab})$
$\delta T_{A,Hom}$	0	$\Delta(\delta T_{A,Hom}) / \sqrt{3}$	Rechteck ²²	C_A	$u(T_{D,Hom})$
$\delta T_{A,Radiation}$	0	$\Delta(\delta T_{A,Radiation}) / \sqrt{3}$	Rechteck	C_A	$u(T_{D,Radiation})$
$\delta T_{A,Verfahren}$	0	$\Delta(\delta T_{D,Verfahren}) / \sqrt{3}$	Rechteck	C_A	$u(T_{D,Verfahren})$
Δh_{ind}	$\overline{h_{ind}} - \overline{h_N}$				$u(\Delta h_{ind})$

XIV.5.4 Messunsicherheit – relative Feuchte im Direktmessverfahren

Praktikabler als die Berechnung aus Taupunkttemperatur und Umgebungstemperatur jedoch mit höherer Unsicherheit kann die relative Feuchte im Direktmessverfahren bestimmt werden. Die **Modellgleichung** für die angezeigte relative Feuchte am Messobjekt schreibt sich in diesem Fall zu:

$$h_{DUT} - \Delta h_{DUT} + \delta h_{ind,DUT} = h_N + \delta h_{nom} + \delta h_{Drift} + \delta h_{DUT} + \delta h_{Kal} + \delta h_{Stab} + \delta T_{Hom}$$

mit

- h_N Am Normal (N) und am Kalibriergegenstand (X) abgelesener bzw. gemittelter Wert
- h_{DUT}
- Δh_{DUT} Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes
- $\delta h_{ind,N}$ Anzeigeauflösung des Normals
- $\delta h_{ind,DUT}$ Anzeigeauflösung des Kalibriergegenstandes. Diese kann erst im konkreten Fall zu bestimmt werden. Für die Bestimmung der kleinsten angebbaren Unsicherheit kann dieser ohne Einfluss auf das Gesamtergebnis als klein genug angenommen werden
- δh_{nom} Maximale Nominalabweichung des Normals nach Kennlinienkorrektur (Interpolationsabweichung) oder spezifiziertes Akzeptanzintervall (Toleranzgrenzen)
- δh_{Drift} Maximale Abweichung (Drift) des Normals innerhalb des Abgleich-/Rekalibrierungsintervalls. Hilfsweise kann die Herstellerangabe der sog. „Genauigkeit“ (enthält Nominalabweichung und Drift) verwendet werden.
- δh_{Kal} Kalibrierunsicherheit des Normal, entnehmbar aus dem Kalibrierschein
- δh_{Stab} Feuchtestabilität in der Temperiereinrichtung
- δh_{Hom} Feuchteinhomogenität in der Temperiereinrichtung

²¹ je nach „Messstrategie“ ggf. auch normalverteilt
²² ggf. Dreiecks-Gewichtung mit Wurzel(6)

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 23
---------------------------	--	--	--	--------------------

damit ergibt sich die **tabellarische Darstellung der Messunsicherheitsbilanz**:

Größe	Schätzwert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
h_N	$h_{N,abgelesen}$				
h_{DUT}	$h_{DUT,abgelesen}$				
$\delta h_{ind,N}$	0	$a_{ind,N} / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u_{ind,N}$
$\delta h_{ind,DUT}$	0	$a_{ind,DUT} / \sqrt{3}$	Rechteck	1	$u_{ind,DUT}$
δh_{nom}	0	$a_{nom} / \sqrt{3}$	Rechteck ²³	1	u_{nom}
δh_{Drift}	0	$a_{Drift} / \sqrt{3}$	Rechteck	1	u_{Drift}
δh_{Kal}	0	$a_{Kal} / 2$	Normal	1	u_{Kal}
δh_{Stab}	0	$a_{Stab} / \sqrt{3}$	Rechteck ²⁴	1	u_{Stab}
δh_{Hom}	0	$a_{Stab} / \sqrt{3}$	Rechteck ²⁵	1	u_{Hom}
Δh_{DUT}					u_{Δ}

XIV.5.5 Besondere Klimaeinrichtungen

Manchmal sind Fühler fest verbaut in Geräten oder Räumen und können nicht zur Kalibrierung in spezielle Klimaschränke oder –Generatoren gebracht werden. In dem Fall müssen die zu messenden Fühler an Ort und Stelle mit dem Kalibriernormal verglichen werden.

Es ist besonders darauf zu achten, den räumlichen Abstand zwischen Normal und Messobjekt (DUT) so klein wie möglich zu wählen. Auch ist darauf zu achten externe Einflüsse zu minimieren, z.B. durch Klimaanlage, Luftströme oder besondere Einstrahlung. Dies kann z.B. durch Kapselung der Messung erfolgen. Sind solche Einflüsse in der konkreten Messaufgabe nicht auszuschließen so müssen sie extra in der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

Die Messunsicherheitsbilanz entspricht im Wesentlichen der Bilanz aus XIV.5.2. Es sind jedoch der Einfluss der Inhomogenität und Stabilität im Messraum besonders zu untersuchen.

XIV.6 Ergebnisse

Die zu Grunde liegenden **Zahlenwerte und Ergebnisse** der Berechnungen für die einzelnen Bereiche sind der mitgeltenden Excel-Tabelle in den Verzeichnissen des Dokumentmanagementsystem (DMS) zu entnehmen:

- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XIV-Temperatur.xls>
- <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Messunsicherheiten-Tabelle-XIV-Temperatur-Feuchte-Taupunktspiegel.xls>

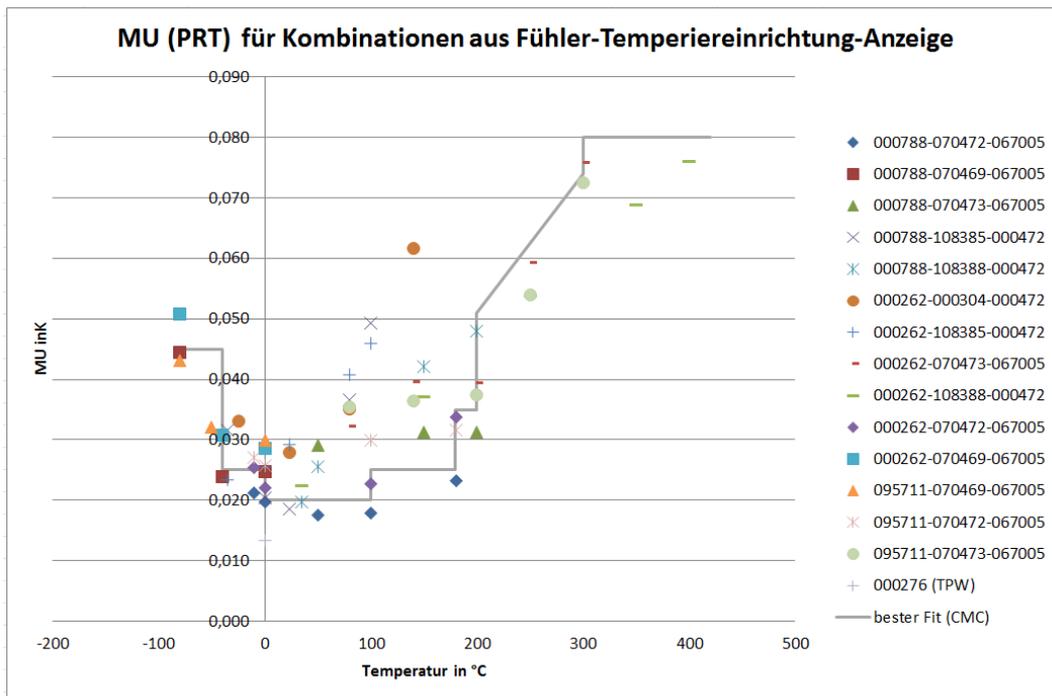
Die kleinsten angebbaren Messunsicherheiten werden durch die Gegenüberstellung der verschiedenen Methoden und Kombinationen von Normal, Temperiereinrichtung und Anzeigeräten ermittelt. Zum Beispiel enthält die Tabelle <http://dmsserver/technik/Messunsicherheiten/QMH-Tabellen/Temperatur/000788.xlsx> entsprechende Vergleiche.

²³ je nach Anzahl der betrachteten Stützpunkte auch u-verteilt

²⁴ je nach „Messstrategie“ ggf. auch normalverteilt

²⁵ ggf. Dreiecks-Gewichtung mit Wurzel(6)

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 24
---------------------------	--	--	---	--------------------



Auswertungen und Gegenüberstellung verschiedener Kombinationen von Normal, Temperiereinrichtung und Anzeigegegeräten (hier für Widerstandsthermometer bis 400 °C)

Die verbindlichen (akkreditierten) Ergebnisse sind üblicherweise Bereichsweise zusammengefasst (jeweils aufgerundet oder linear interpoliert) und werden im Leistungsnachweis aufgeführt.

XIV.7 Kalibrierung von Temperiereinrichtungen

Die Kalibrierung von Temperiereinrichtungen und deren Unsicherheiten wird in Arbeitsanweisung [AA0153-Kalibrierung von Temperiereinrichtungen](#) beschrieben. Die Kalibrierung von Klimaschränken, Temperaturschränken und Generatoren enthält [Arbeitsanweisung AA0072](#).

XIV.8 Flüssigkeitsthermometer

XIV.8.1 Grundlagen und Verfahren

Flüssigkeitsthermometer bestehen meist aus mit Flüssigkeit gefüllten Glaskapillaren. Auf die Kapillare ist eine Skala angebracht. Die Ausdehnung der Flüssigkeit ist relativ zur Temperatur.

Bei Flüssigkeitsthermometern ist besonders auf die Eintauchtiefe zu achten. Flüssigkeitsthermometer besitzen eine sogenannte Fadenkorrektur, benannt nach dem Flüssigkeitis“faden“ im Innern. Je nachdem wie tief so ein Thermometer eingetaucht ist wird eine andere Temperatur angezeigt. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen drei Typen:

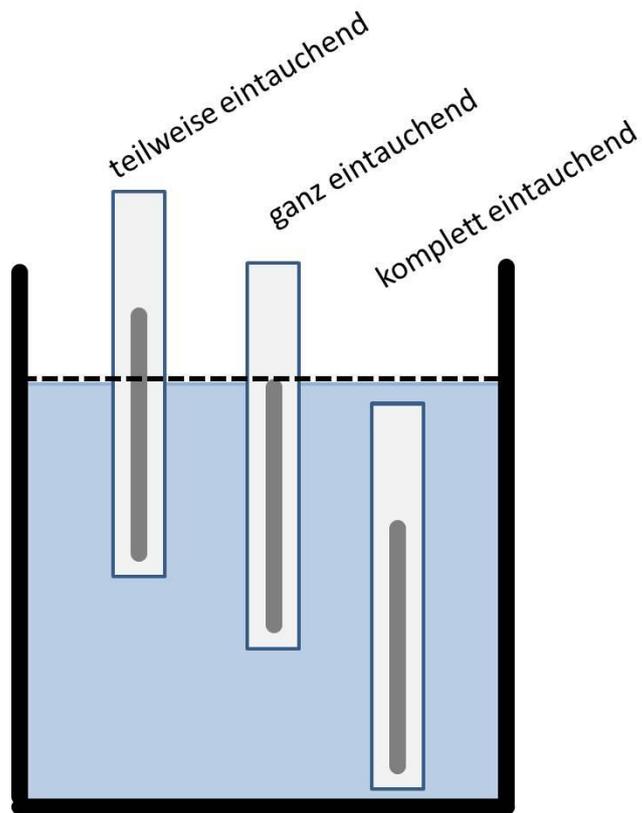
Teilweise Eintauchend: Ein Teil der Flüssigkeitssäule befindet sich über- ein anderer Teil unterhalb der Oberfläche des zu messenden Mediums.

Ganz Eintauchend: Wenn das Thermometer bis zur Höhe der Flüssigkeitssäule eingetaucht ist.

Komplett Eintauchend: Wenn das ganze Thermometer getaucht ist.

Wird ein Thermometer gemäß seiner Bestimmung eingesetzt muss keine Fadenkorrektur vorgenommen werden.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
DMS.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	25



XIV.8.2 Messunsicherheit

Das Messunsicherheitsbudget für die Messung von Glasthermometern richtet sich nach dem Normal und entspricht im Wesentlichen den Tabellen wie in XIV.1 und XIV.4. Entfallen können die dortigen Anteile für Widerstandsfühler und Thermoelemente, z. B. Selbsterwärmung und Inhomogenität.

Für die Verwendung von Flüssigkeitsthermometer gelten damit wieder die gleichen Bilanzen wie für Widerstands- oder Thermoelementfühler, bereinigt um Einflüsse der elektrischen Anzeige, die entfallen.

Ausgabe: DMS.46	erstellt von: PF am: s.DMS06.08.2018	geprüft/ genehmigt von: s. DMS am: s. DMS	Kapitel Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	Seite 26
---------------------------	--	--	---	--------------------



© 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.46	von: PF am: s.DMS06.08.2018	von: s. DMS am: s. DMS	Qualitätsmanagementhandbuch - XIV Kalibrierung thermodynamischer Messgrößen (Temperatur und Feuchte)	27