

## XIV Messgröße Temperatur und Feuchte

XIV Messgröße Temperatur und Feuchte .....	1
XIV.1 Kalibrierverfahren .....	1
A Eisbad und Fixpunktzelle .....	2
B Wasserbad: .....	2
C Blockkalibrator Hart Scientific 9103-A.....	2
D Blockkalibrator Jofra 650SE:.....	2
XIV.1.1 Widerstandsthermometer .....	4
XIV.2.1 Rückführung und Drift .....	5
XIV.2.2 Vor-Untersuchung Wasserbad.....	5
XIV.2.3 Vor-Untersuchung Blockkalibrator .....	6
A Stabilität:.....	6
B radiale Homogenität (Unterschied zwischen den Bohrungen):.....	6
C axiale Homogenität: .....	7
XIV.3.1 Skizze des Messverfahrens .....	7
XIV.3.2 Modellgleichungen: .....	8
XIV.3.3 Messunsicherheitsbudget.....	8
XIV.4 Thermoelemente - Thermoelementthermometer.....	10
XIV.4.1 Verfahren.....	10
Messbeispiel.....	11
XIV.4.2 Modellgleichung .....	11
XIV.4.2 Modellgleichung .....	12
XIV.4.3 Messunsicherheitsbudget.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
XIV.5 Kalibrierung von Temperatur und Feuchte im Klimaschrank oder Klimagenerator .....	13
XIV.5.1 Voruntersuchungen .....	17
A Zeitliches Verhalten - Temperatur.....	17
B Inhomogenität - Temperatur.....	18
XIV.5.2 Messunsicherheit - Temperatur.....	20
XIV.5.3 Messunsicherheit – Taupunkt .....	21
XIV.5.4 Messunsicherheit – relative Feuchte.....	22
XIV.6 Ergebnisse .....	23
XIV.A Bildmaterial .....	24

### XIV.1 Kalibrierverfahren

Zum Kalibrieren von Temperatur (s. Kapitel I.2, Interne Kalibrierung von Thermometern) bietet das Equipment für Temperatur, Druck und Feuchte der esz GmbH zahlreiche Messmöglichkeiten. Kleinste Unsicherheiten werden dabei im Vergleich mit einem kalibrierten IPRT PT100 Mantel-Widerstandsthermometer an Präzisionsanzeigegeräten erreicht. Das gegen die Widerstandsnormale kalibrierte Anzeigegerät Fluke 1560 (Black Stack) ermöglicht die Messung von 4-Draht-Widerstand und die Ausgabe des Messwertes direkt in °C bei Berücksichtigung fühlerspezifischer Kennlinien. Zur Ermittlung der Polynomkoeffizienten dient der aktuelle Kalibrierschein des Normal, für dessen Kalibrierpunkte diese Daten z.B. über die Software „Advanced Grapher“ als Regression eines Polynoms 4. Grades oder höher berechnet wurden. Die Temperatur am Kalibriergegenstand wird bei einem direkt anzeigenden Thermometer möglichst Zeitgleich mit der Messung am Normal abgelesen. Für Widerstandsfühler stehen manuelle Messstellenumschalter oder die automatische Messstellenumschaltung des Anzeigegerätes zur Verfügung, so dass hintereinander 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 im kurzen Abstand.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	1 von 25

**A 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. Alternativ wird die Fixpunktzelle Hart Scientific 5901B-G zur Erzeugung des 0,01 °C-Wassertripelpunktes verwendet. 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 schütteln
- 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°C gefahren
- Fixpunkt von 0,01 °C ist verfügbar
- zum Auftauen nach Betrieb Gerätefunktion MELT aktivieren

Die Zelle dient zur Verifikation des R<sub>0</sub>-Widerstandes der Thermometer im gegenseitigen Vergleich gegenüber dem Eispunkt im Rahmen der Messunsicherheit.

**B Wasserbad:**

Temperaturen von 23 °C bis 80 °C werden in einem gerührten Thermostatbad mit destilliertem Wasser erzeugt, Temperaturen darunter können durch Zumischen von „Crushed Ice“, Eiswürfeln oder Eisflocken im Wasserbad oder in einer Thermoskanne hergestellt werden (oder Glasbehälter mit Magnetrührer). Der zu kalibrierende Temperaturfühler (bzw. Thermometer mit Anzeige) wird zusammen mit dem Referenzthermometer an der gleichen Position möglichst dicht beieinander ins Wasser getaucht. Dabei sollte auf eine ausreichende Eintauchtiefe der beiden Fühler (> 10 cm) geachtet werden. Weitere Details und Informationen zum Kalibrierverfahren sind den Richtlinien „DKD-R 5-1 Kalibrierung von Widerstandsthermometern“ oder „DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen“ (s. XIV.4) zu entnehmen.

**C Blockkalibrator Hart Scientific 9103-A**

Der Block des Kalibrators 9103 kann zwischen -25 °C und +140 °C sehr stabil temperiert werden. Damit ergibt sich der Anwendungsbereich für die Kalibrierung von Thermometern zwischen -25 °C und 23 °C bzw. ab >80 °C bis 140 °C. Der Einsatz für den Block besitzt jeweils 2 gegenüberliegende Bohrungen mit 3 mm, 4mm und 6 mm Durchmesser. Als Wärmeträgermaterial bei abweichenden Durchmessern der zu kalibrierenden Fühler wird darüber hinaus bei kleinen Temperaturen z.B. Alkohol bzw. Quarzsand bei höheren Temperaturen verwendet werden.

**D Blockkalibrator Jofra 650SE:**

Die Erzeugung >140 °C bis 300 °C erfolgt im Blockkalibrator Jofra 650 SE. Der Kalibrator besitzt hierfür zwei Bohrungen oder einen Einsatz für die thermische Kontaktierung in Quarzsand. 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 in der Zentralbohrung dient neben den verschiedenen Hülsen als Wärmeträgermittel Quarzsand, der zusätzlich zum Messobjekt in die Hülse eingefüllt wird, sobald der Innendurchmesser der verwendeten

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	2 von 25

Hülse maximal 0,5 mm größer ist als der des zu kalibrierenden Thermometers (s. a. „DKD-R 5-4 Kalibrierung von Temperatur Blockkalibratoren“).

Hersteller	Modell	Gegenstand	Identifikation	Anwendungsbereich
ISOTECH	935-14-95	Referenz Pt100 IPRT	PM KL27023	0 °C bis 300 °C als Vergleichsnormal
ISOTECH	935-14-13	Referenz Pt100 IPRT	PM KL27119	-30 °C bis 140 °C als Vergleichsnormal
Hart Scientific	5614	Referenz Pt100 IPRT	PM KL27071	0 °C bis 300 °C als Vergleichsnormal
Fluke	1560/2560/2565	Thermometer Readout	PM KL 27109, SN 77721	DC-Widerstand gemäß Akkreditierung
Keithley	181	Nanovoltmeter	PM KL13040	DC Thermospannung
Hart Scientific	5901B-G	Fixpunktzelle und	PM KL27064	0,01 °C
Fluke	9210	Fixpunktautomat	PM KL27070	Wassertripelpunkt
GFL	1012	Thermostadbad	PM KL27026	23 °C bis ≤80 °C
Hart Scientific	9103-A	Blockkalibrator	PM KL27065	>80 °C bis ≤140 °C
Jofra	650SE	Blockkalibrator	PM KL27035	>140 °C bis 300 °C

Tabelle XIV.1 - Kalibriereinrichtungen für kleinste Messunsicherheiten im Temperaturbereich

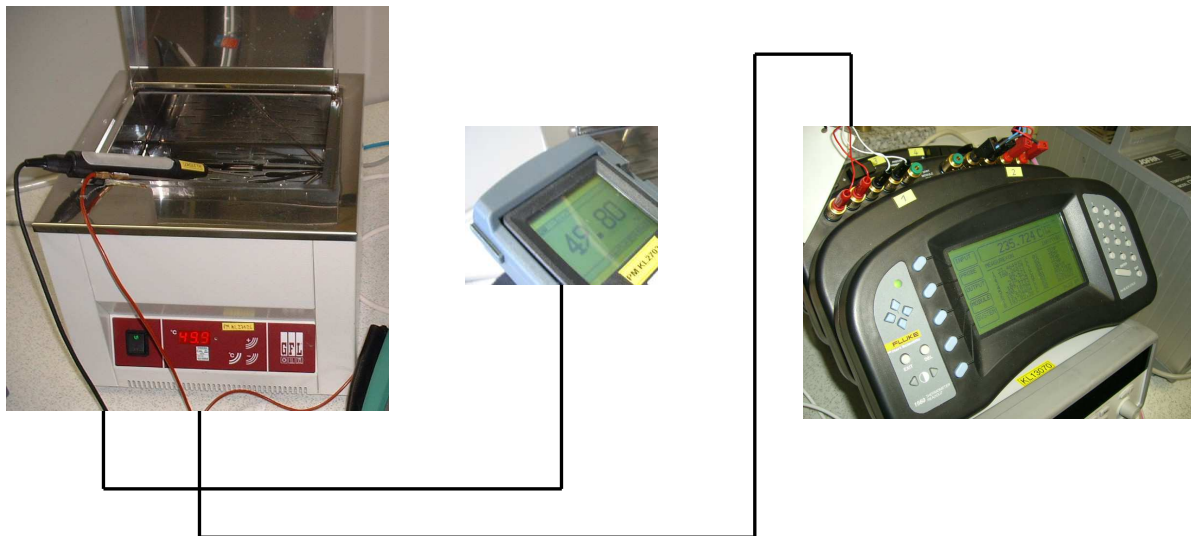


Bild XIV.1 - Kalibrierung eines direkt anzeigenden Thermometers durch Vergleichsverfahren mit PT100 Normal an Fluke 1560 im geregelten Thermostatbad

Daneben stehen weitere kalibrierte PT100-Thermometer, PT100-Kalibratoren, Temperaturöfen, Quecksilberhauptnormal- und Thermoelementthermometer zu Vergleichszwecken und als Gebrauchsnormale zur Verfügung.

**XIV.1.1 Widerstandsthermometer**

Die Durchführung erfolgt gemäß der Richtlinie „DKD-R 5-1 Kalibrierung von Widerstandsthermometern“ wobei sich die Kalibrierung i.d.R. auf Messgeräte für Anwender, Industrie oder Feldeinsatz im Vergleichsverfahren für

- direktanzeigende Thermometer oder
- IPRT mit einem Ohmmeter

einschränkt. Aus den Grundwertgleichungen der DIN EN 60751 ergeben sich dabei z.B. folgende Zusammenhänge (Temperaturen größer oder gleich 0 °C):

Die dem gemessenen Widerstandswert entsprechende ideale Temperatur  $t(R)$  ergibt sich als

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

mit den für 385-Platin geltenden Konstanten  $A=3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$  und  $B=-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$  und  $R_0=100 \text{ } \Omega$ .

Der Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Temperatur wird berechnet als

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

und reziprok zur Bestimmung des realen Widerstandswertes  $R_{0,real}$  im Messbereich um  $t_0$

$$R_{0,real}(t_0) = \frac{R_{t_0}}{1 + At_0 + Bt_0^2}$$

unter Annahme, dass der Widerstand eine ähnliche Kennlinie aufweist wie die eines idealen PT100 Fühlers.

Für den Bereich unterhalb von 0 °C gilt:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + C(t - 100 \text{ °C}) \cdot t^3) \text{ mit } C=-4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-4} \text{ bzw.}$$

$$T(R_t) = 1,7614389 \cdot 10^{-8} \cdot R_t^4 - 1,0013571 \cdot 10^{-5} \cdot R_t^3 + 0,0028591 \cdot R_t^2 + 2,2162523 \cdot R_t - 241,9643399$$

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 4 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	--------------------------

## XIV.2 Rückführung, Historie und Vor-Untersuchungen

### XIV.2.1 Rückführung und Drift

Die direkte Rückführung erfolgt über zwei kalibrierte IPRT im Bereich von 0 °C bis 300 °C. Um die

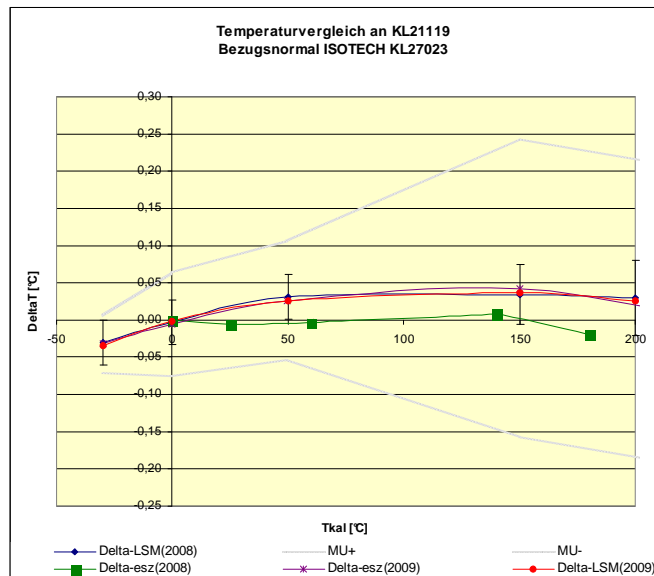


Bild XIV.2a Ergebnisse Ringvergleichsmessung, DUT: ISOTECH935-14-13, Pt100 Abweichung der Messergebnisse DKD-K-18021 (esz) und DKD-K-06701 (LSM)

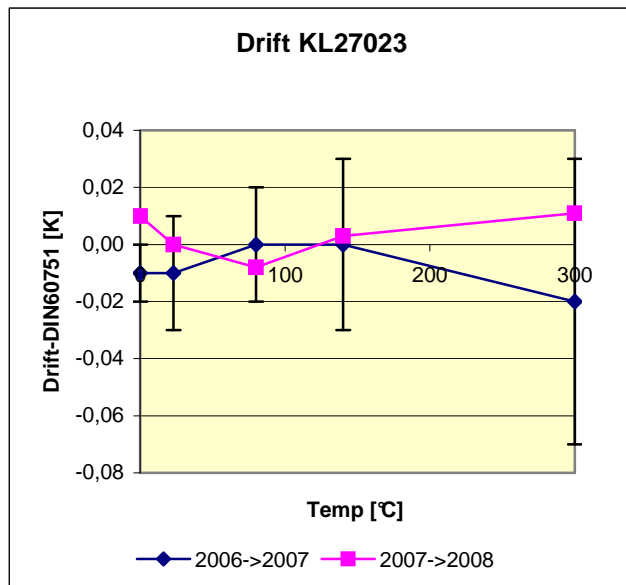


Bild XIV.2b Drift des ISOTECH935-14-95, Pt100 Referenznormals

Auswertung der Messergebnisse möglichst genau zu ermitteln wird die durch die Rekalibrierung ermittelte reale Kennlinie für die Berechnung der Kalibriertemperatur herangezogen. Die Hersteller geben pro Jahr eine maximale Drift von 30 mK bis 80 °C, 40 mK bis 140 °C und 60 mK bis 300 °C an. Durch Überprüfung des  $R_0$ -Wertes bei 0 °C mit der Fixpunktzelle und die Ergebnisse der Vergleichsmessungen und der vorliegenden Driftauswertungen kann sogar angenommen werden, dass die zeitliche Drift geringer ist (ca. 20 mK bei 300 °C). Die Angaben dienen somit als Maximalgrenzen des Unsicherheitsintervall der zeitlichen Drift.

### XIV.2.2 Vor-Untersuchung Wasserbad

Zur Bestimmung der Einflüsse von Instabilität und Inhomogenität im Wasser bzw. Eisbad wurden mit dem Referenzfühler zeitliche und räumliche Untersuchungen an unterschiedlichen Positionen (Ecke links hinten - Ecke rechts vorne) über mindestens 30 Minuten (Messintervall 1 Minute) durchgeführt. Als Maß für die zeitliche Instabilität wurde die maximale Temperaturdifferenz vom Mittelwert im Messintervall gewählt. Inhomogenitäten werden durch die maximale Differenz zwischen den unterschiedlichen Messpositionen ausgedrückt.

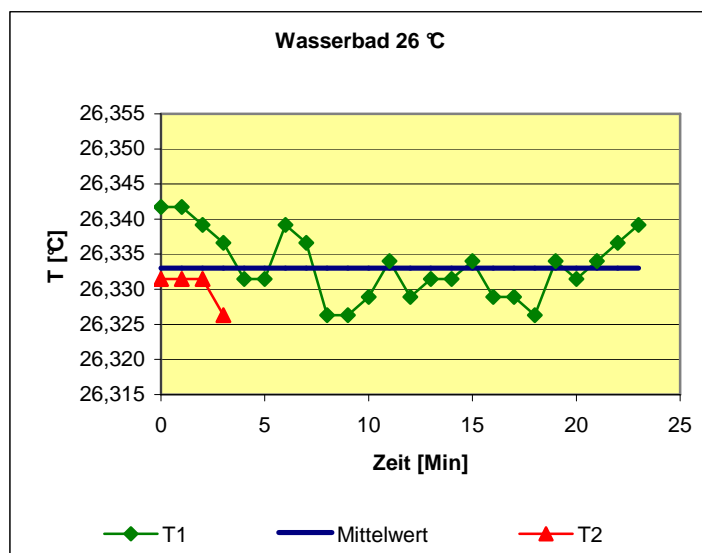


Bild XIV.3 - Zeitlicher Verlauf der Temperatur an unterschiedlicher Position in Thermostaten bei 26 °C. Die zeitliche Instabilität konnte aus den Voruntersuchungen bis 80 °C zu maximal 19 mK Abweichung vom Mittelwert bestimmt werden. Inhomogenitäten durch unterschiedliche Positionierung werden zu maximal 40 mK Unterschied abgeschätzt.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	5 von 25

**XIV.2.3 Vor-Untersuchung Blockkalibrator**

Die Blockkalibratoren wurden hinsichtlich Stabilität und radialer bzw. axialer Homogenität entsprechend „DKD-R 5-4 Kalibrierung von Temperatur Blockkalibratoren“ v.a. auf die Temperaturverteilung innerhalb der homogenen Zone untersucht.

**A Stabilität:**

Zur Stabilitätsmessung wurde analog der Messung im Wasserbad in der Mittenbohrung der Temperaturverlauf über einen Zeitraum von bis zu 60 Minuten erfasst und ausgewertet. Das Halbinsintervall zwischen Maximum und Minimum der beobachteten Werte wird für die verschiedenen Kalibriertemperaturen als Unsicherheitsintervall mit Rechteckverteilung angenommen. Aufgezeichnet wurde die relative Temperaturstabilität im Beobachtungsintervall die z.B. innerhalb von etwa ±55 mK für Temperaturen >140 °C (Jofra 650SE) und maximal ±15 mK für Temperaturen unter 140 °C (Hart Scientific 9103) beobachtet und angenommen werden (s. Bild XIV.4).

	Temperatur	Stabilität
Hart Scientific 9103-A	-25 °C	±8 mK
	0 °C	±7,5 mK
	23 °C	±6,0 mK
	140 °C	±16 mK
Jofra 650SE	140 °C	±55 mK
	300 °C	±50 mK

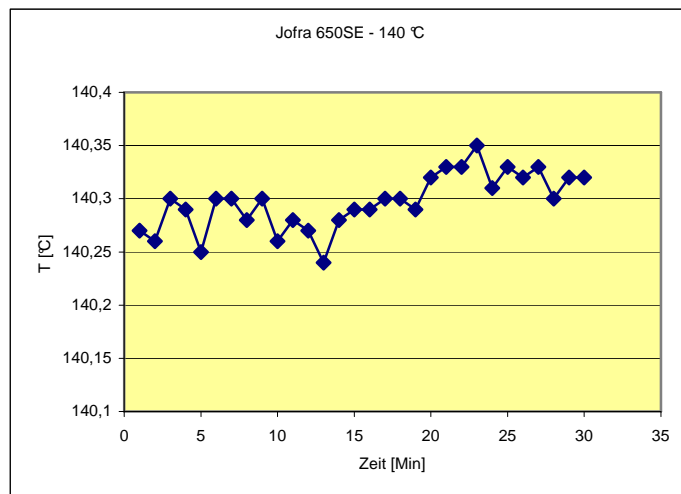


Bild XIV.4 - Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Blockkalibrator bei 140°C. Der Maximale Unterschied zwischen 140,24 °C und 140,35 °C beträgt 110 mK, d.h. ±55 mK wird als Unsicherheitsintervall mit Rechteckverteilung angenommen.

**B radiale Homogenität (Unterschied zwischen den Bohrungen):**

Es wurde der Unterschied zwischen zwei gegenüberliegender Bohrungen des Hart 9103 durch Messung dieser Temperaturen mit demselben Thermometer bei identischem Bohrungsdurchmesser bestimmt (6 mm Hülse). Zusätzlich ist ganz am Rand der homogenen Zone eine Kontrollbohrung vorhanden. Für die Bestimmung der Inhomogenität wurde in der Zentralbohrung und dieser Kontrollbohrung gemessen und die Unterschiede als Bohrlochdifferenz dokumentiert (s. Bild XIV.5).

	Temperatur	Bohrlochdifferenz
Hart Scientific 9103-A	-25 °C	10 mK
	0 °C	5 mK
	23 °C	12 mK
	140 °C	5 mK
Jofra 650SE	150 °C	0,05 K
	300 °C	0,08 K

**C axiale Homogenität:**

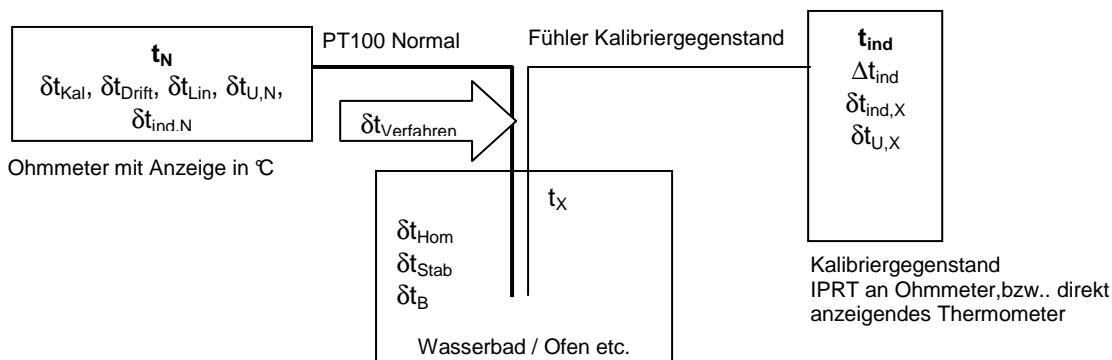
Die axiale Homogenität des Jofra 650SE wurde mit einem Typ-K Thermoelement gemessen, das eine klein genuge Sensorlänge aufweist um Messungen der Temperaturverteilung bei 0 cm (auf dem Boden), 2cm, 4cm und 6cm durchzuführen. Hierzu wurde das Thermometer im Bohrloch aus der Mittenbohrung in gleichen Abständen herausgezogen und die Temperaturdifferenz gegenüber der Ausgangsposition dokumentiert. Im Bereich zwischen 80 °C und 300 °C kann die axiale Homogenität auf der 2 cm Ebene (Messung mit langem Sensor) beispielsweise durch 0,00051T-3,3mK angenähert werden und dient für Sensoren innerhalb dieser Baulänge als Unsicherheitsintervall (entspricht ±0,15 K bei 300 °C).

In den Kalibratoren wurde die axiale Homogenität auf die Messung der Temperatur mit einem Referenz PRT mit relativ langem Sensor 2 cm über dem Boden eingeschränkt. Die ermittelten Differenzen zwischen Bodenebene und 2cm-Ebene dienen somit als Unsicherheitsintervall mit Rechteckverteilung.

	Temperatur	axiale Inhomogenität
Hart Scientific 9103-A	-25 °C	18 mK
	0 °C	20 mK
	23 °C	8 mK
	140 °C	32 mK
Jofra 650SE	150 °C	0,09 K
	300 °C	0,15 K

**XIV.3 Messunsicherheitsbudget**

**XIV.3.1 Skizze des Messverfahrens**



**XIV.3.2 Modellgleichungen:**

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

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

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

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

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

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

**XIV.3.3 Messunsicherheitsbudget**

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

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

und für die Abweichung der Anzeige  $\Delta t_{ind}$

$$u^2(\Delta t_{ind}) = u^2(t_X) + u^2(t_{ind}) + u^2(\delta t_{ind,X}) \left[ + u^2(\delta t_{U,X}) \right]^1$$

<sup>1</sup> [...] entsprechend (3) ist der Anteile  $u^2(\delta t_{U,X})$  hinzuzuaddieren für die Gesamtunsicherheit aber fast unerheblich.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	8 von 25

Gemäß DKD-3:2002 Abschnitt4 ergibt sich aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis  $\Delta t_{ind}$  beizuordnende absolute erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ )<sup>2</sup>:

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

**weitere Ergebnisse siehe Abschnitt XV.5 bzw. mitgeltende MU-Tabellen**

---

<sup>2</sup> Der reale k-Faktor ist durch den wesentlichen Anteil von Rechteckverteilungen  $\leq 2$ . Der Einfachheit halber wird mit einem Maximalwert von  $k=2$  gerechnet.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	9 von 25

## XIV.4 Thermoelemente - Thermoelementthermometer

### XIV.4.1 Verfahren

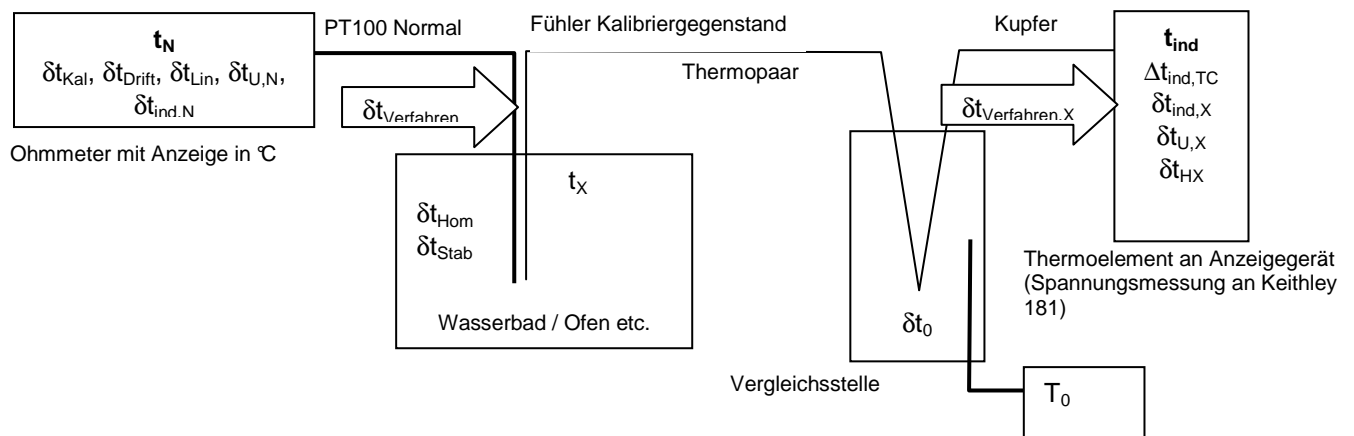
Die Kalibrierung erfolgt gemäß Richtlinie „DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen“. Die Verbindungsstelle (Thermomaterial - Kupfer) wird dabei isoliert (z.B. verdrehte Verbindung mit Schrumpfschlauchisolation, Kupferblock) in ein Eisbad geführt, Temperatur-Verifikation erfolgt über ein kalibriertes PT100 Messsystem, indem z.B. der Eispunkt für die Bezugstemperatur von 0°C (Bezugstemperatur) im Wasserbad-Eisflockengemisch hergestellt und gemessen wird. Bei Verwendung der Direktmessmethode an Keithley 181 für die Thermospannung aus 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

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

Alternativ kann die Berechnung am PC erfolgen (Excel-Tabellen oder Programm JUMOSENS). Des Weiteren kann die Messung und Anzeige an einem der Temperaturmesssysteme erfolgen (z.B. Beamex MC5, Fluke 5500A, Fluke 1560) und der Messwert für die verschiedensten Thermopaar-Kombinationen direkt in °C abgelesen werden. Die Geräte ermitteln die entsprechenden Temperaturen aufgrund der Gleichungskoeffizienten der DIN 60584 Grundwertgleichungen. Für die Anwendung der kleinsten Unsicherheiten an diesen Geräten muss das Anzeigegerät für das Thermopaar im entsprechenden Messbereich vor der Thermopaarkalibrierung einkalibriert (Kapitel XVI und XV) und die ermittelten Korrekturen berücksichtigt werden. Entsprechend muss auch das Temperaturanzeigegerät für die Bestimmung der Vergleichsstellentemperatur im Vergleich mit dem Referenznormal bei 0 °C „eingemessen“ werden. D.h. die Korrektur der Anzeige des Spannungsmessgerätes bzw. Temperaturindikators wird vor der Kalibrierung ermittelt und berücksichtigt (Vergleichsverfahren, vgl. Kapitel XV).



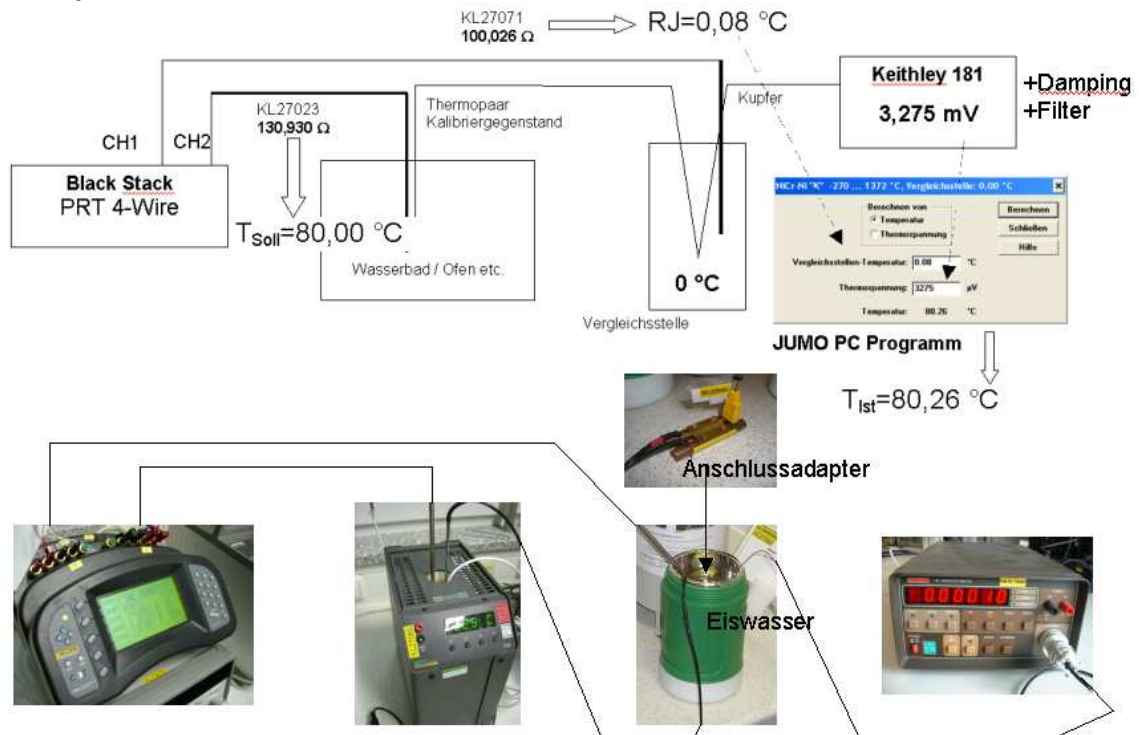
Bild XIV.3 - Beamex MC5



Bei Verwendung von Extensions- oder Ausgleichsleitungen sind diese zu kalibrieren und unter Umständen als weitere Anteile im Messunsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	10 von 25

Messbeispiel



<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 11 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

**XIV.4.2 Modellgleichung**

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:

$$(4) \Delta t_{ind,TC} = t_{ind} - t_x + \delta t_{U,X} + \delta t_{Verfahren,X} + \delta t_{ind,X} + \delta t_0 + \delta t_{HX} + \delta t_{LX}$$

bei Kalibrierung von Thermopaaren

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):

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

**weitere Ergebnisse siehe Abschnitt XV.5**

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 12 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

## XIV.5 Kalibrierung von Temperatur und Feuchte im Klimaschrank oder Klimagenerator

Für große Messobjekte wie Klimaschreiber oder Datenlogger stehen ein umgewälzter Klimaschrank, Weiss SB1/300/80, und ein Klimagenerator, Kaymont Model 2000, zur Verfügung. Genauso können Kalibriergegenstände, deren Sensorik nicht als Tauch- oder Einsteckfühler geeignet ist im Klimaschrank oder -generator kalibriert werden. Als Nutzvolumen im Klimaschrank wird ein Kunststoffrohr oder alternativ ein Drahtkäfig verwendet, deren Klimaeigenschaften in Voruntersuchungen 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) an dieser Stelle erfolgt.

Im Klimaschrank werden im Abstand von 1 Minute mindestens 5 Messwerte aufgenommen und daraus ein Mittelwert je Kalibriertemperatur oder -feuchte (ebenfalls Mittelwert) ermittelt und dokumentiert.

### Weiss Technik SB1/300/40

Gesamtvolumen	300 Liter
Innenmaße H x B x T	68 cm x 54 cm x 82 cm
einstellbarer Temperaturbereich	-75 °C bis +180 °C
nutzbarer Temperaturbereich	
im Kunststoffrohr	0 °C bis 60 °C
im Drahtkäfig	0 °C bis 180 °C
Klimabetrieb	10 °C bis 95 °C
genutzter Klimabereich	20 °C bis 30 °C
Feuchtebereich	20 %r.F. bis 90 %r.F.

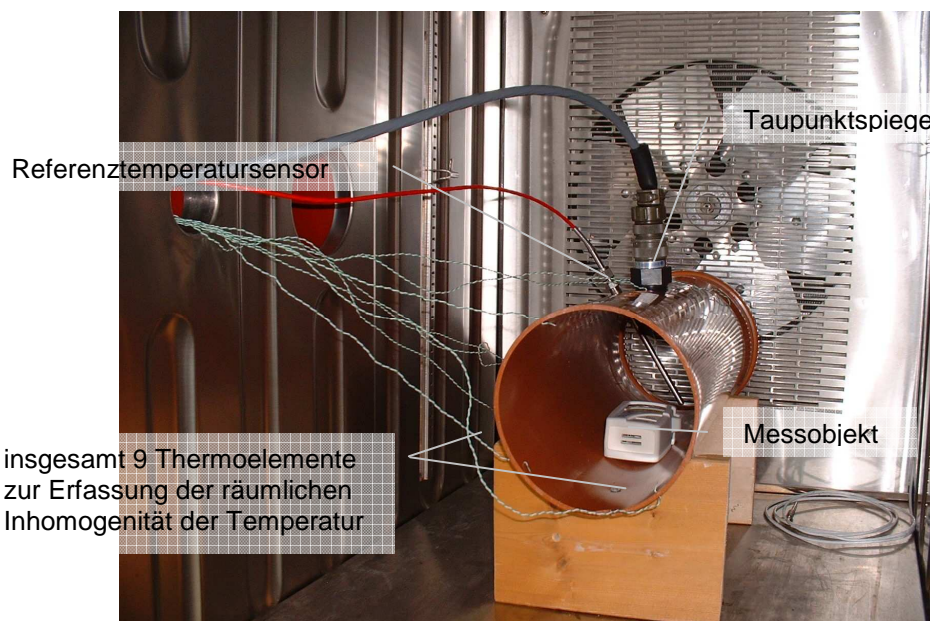


Bild XVI.5.1 Kalibrierung von Temperaturschreibern 0 °C bis 60 °C



Temperaturen >60 °C bzw. große Messobjekte werden im Drahtkäfig kalibriert

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 13 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

**Kaymont Modell 2000**

einstellbarer Temperaturbereich im Innenvolumen	+10 °C bis +50 °C
im Plexiglasaufsatz	Umgebungstemperatur (23 °C)
Klimabetrieb	+20 °C bis +30 °C
genutzter Klimabereich	20 °C bis 30 °C
Feuchtbereich	20 %r.F. bis 90 %r.F.
Kammertüren	Plexiglas (für Umgebungstemperatur 23 °C)
	Isoliert (für Temperaturen +10 °C bis +50 °C)

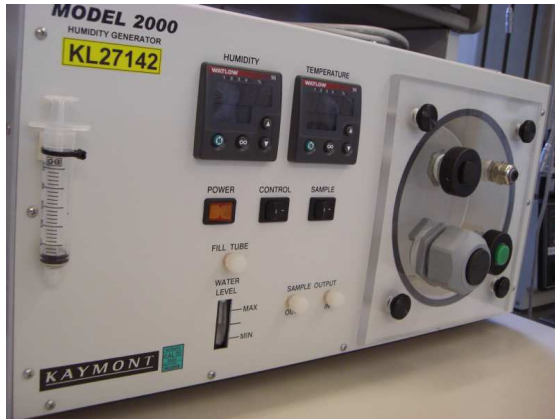


Bild XVI.5.2a Klimagenerator Kaymont 2000 (hier mit Plexiglastür)



Bild XVI.5.2b Messfühleranordnung zur Inhomogenitätsmessung im Innenvolumen

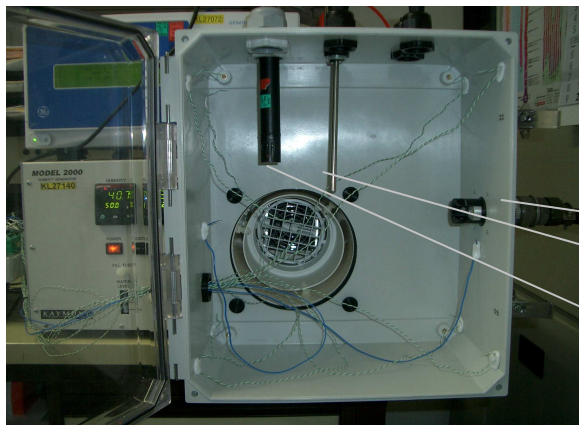


Bild XVI.5.2c Kammeraufsatz für große Messobjekte (23 °C)

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

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 14 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

**Feuchtekalibrierung am General Eastern Optica / 1111H- Dew Point Monitor**  
 (siehe auch Arbeitsanweisung AA0073)

Taupunktmessbereich -15 °C bis 45 °C  
 Temperatursensor Pt100, erhöhte Genauigkeit

Ebenfalls im Klimaschrank oder Klimagenerator werden 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 und dokumentiert. Die Erfassung der Feuchte im Nutzvolumen erfolgt über einen kalibrierten Taupunktspiegel zusammen mit einem Referenzsensor für Temperatur.

Kalibriert werden nur direkt anzeigende elektrische Hygrometer, Feuchtemessgeräte und Klimalogger. Die Kalibrierung von Haarhygrometern (Klimaschreiber) ist ebenfalls möglich. Für eine Kalibrierung von Psychrometern ist das Verfahren nicht geeignet.

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

$$h_{Optica} = 100\% \cdot \left( \frac{p_w(T_D)}{p_{ws}(T_A)} \right) = 100\% \cdot e^{\left( \frac{mT_D}{k+T_D} - \frac{mT_A}{k+T_A} \right)} \quad (1)^3$$

aus

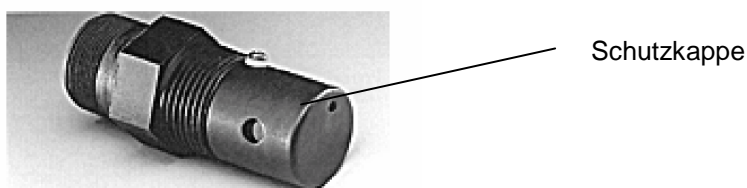
$$p(T) = l \cdot e^{\left( \frac{mT}{k+T} \right)}$$

mit

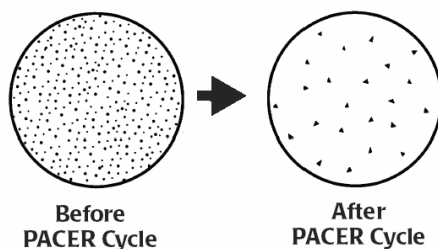
$h_{Optica}$  Kalibrierwert für relative Feuchte am Normal

$p_w$	Dampfdruck in mbar	k	240,97
$p_{ws}$	Sättigungsdampfdruck in mbar	m	17,502
$T_D$	Taupunkttemperatur in °C	l	6,1121
$T_A$	Luftstromtemperatur in °C	e	2,7183

- Schutzkappe vor der Messung vom Taupunktspiegel entfernen und im Klimaschrank im Zentrum des Nutzvolumens (Kunststoffrohr oder Drahtkäfig) einbauen



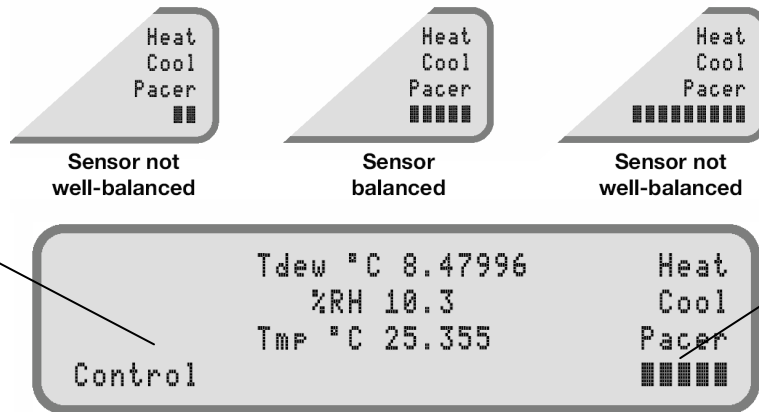
- Nach dem Einschalten bleibt das Display für ca. 1 Minute leer und es ertönt lauter Signalton
- Danach startet der automatische Reinigungszyklus (PACER, rel. Humidity = 100%)



<sup>3</sup> XL-Tabelle K:\Intranet\DKD-QS\DKD\Messunsicherheiten\QMH - Tabellen\Messunsicherheiten Tabelle XIV Temperatur.xls

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 15 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

- Gültige Messungen werden erst erzielt wenn das System und das Klima eingeschwungen ist (CONTROL und BALANCE mit etwa 5 bis 7 Anzeigebalken).



Regelkreis OK  
 Taupunkt stabil

5 bis 7 Balken

Indication	Meaning
Initializing	The unit is initializing.
Balance	The unit is performing a PACER balance to clear the mirror
Acquiring	The unit is acquiring a stable mirror temperature
Service	The sensor optics require service, cleaning or adjustment
Control	The unit is actively controlling the mirror temperature at a stable dew point
Alarm 1	Alarm 1 has activated
Alarm 2	Alarm 2 has activated
Lockout	Heat, Cool, and PACER front panel controls disabled
Heat	Sensor Heating is active
Cool	Sensor Cooling is active

**Displaymeldungen**

- Spiegel muss in regelmäßigen Abständen mit Alkohol und faserfreien Reinigungspads gesäubert werden.

**XIV.5.1 Voruntersuchungen**

**A Zeitliches Verhalten - Temperatur**

Zur Bewertung der zeitlichen Instabilität wurde der Temperaturverlauf über mindestens 30 Minuten im Abstand von einer Minute bei den Temperaturen 0 °C, 25 °C, 30 °C, 40 °C und 60°C aufgezeichnet und ausgewertet. Die Aufzeichnungen begannen jeweils erst nach mindestens 30 Minuten nach Erreichen des eingeschwungenen Zustandes. Die Untersuchung zeigt ebenfalls, dass sich der eingeschwungene Zustand i.d.R. nach ca. 30 Minuten nach Änderung der Vorgabetemperatur einstellt.

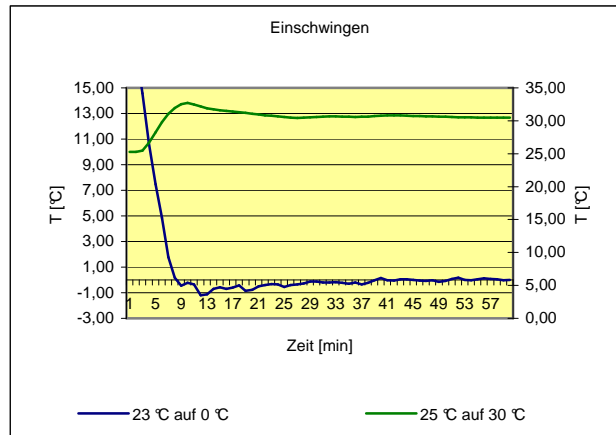


Bild XVI.5.2 Einschwingverhalten des Klimaschranks nach dem Einschalten

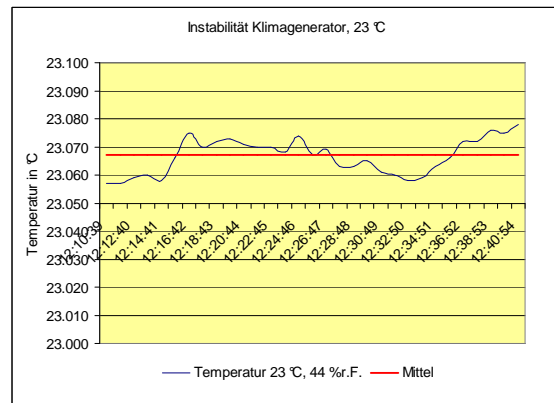
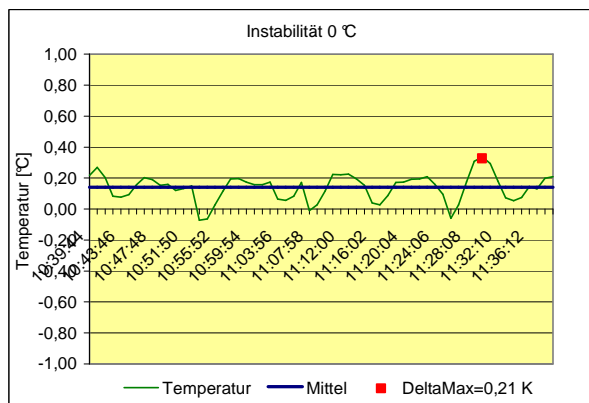


Bild XVI.5.3a Temperatur Instabilität bei 0°C im Klimaschrank (links) und Klimagenerator (rechts)

**Instabilitätsmessung**

eingestellte Temperatur	gemessene Temperatur 30 Min. Ø (Klimaschrank)	max. Abweichung vom Mittelwert		
		Klimaschrank	Klimagenerator im Innenvolumen	Klimagenerator mit großem Volumen
0 °C	0,15 °C	0,21 K		
15 °C	15,1 °C	0,02 K	0,01 K	
20 °C	20,1 °C	-0,03 K	0,03 K	
25 °C	25,3 °C	0,06 K	0,01 K	0,09 K
30 °C	30,3 °C	0,07 K	0,04 K	
40 °C	41,7 °C	0,07 K	0,03 K	
60 °C <sup>*)</sup>	62,0 °C	0,15 K		
80 °C <sup>*)</sup>	82,4 °C	0,17 K		
100 °C <sup>*)</sup>	100,5 °C	0,10 K		

<sup>\*)</sup> im Drahtkäfig, ohne Klimabetrieb

**Zeitliches Verhalten - Feuchte**

Ähnliche Untersuchungen wurden ebenfalls im Klimabetrieb bei verschiedenen rel. Feuchtwerten am Taupunktspiegel durchgeführt. Das Einschwingverhalten der Feuchte folgt in etwa der Temperatur: Signifikante Feuchtegradienten sind nach etwa 30 bis 40 Minuten nicht mehr zu erkennen.

eingestellte Temperatur ca.	eingestellte Feuchte ca.	entspricht Taupunkt in °C	max. Abweichung vom Mittelwert					
			Klimaschrank		Klimagenerator Innenvolumen		Klimagenerator, großes Volumen	
			Feuchte [%r.F.]	Taupunkt [K]	Feuchte [%r.F.]	Taupunkt [K]	Feuchte [%r.F.]	Taupunkt [K]
20 °C	15 % r.F.	-6,5			0,2	0,12		
	30 %r.F.	1,9	0,2	0,1				
	90 %r.F.	18,3	1,7	0,3				
25 °C	15 % r.F.	-3,0			0,2	0,16		
	20 %r.F.	0,5	0,5	0,3	0,1	0,08	0,1	0,04
	50 %r.F.	13,9	0,7	0,2	0,2	0,07	0,3	0,04
	70 %r.F.	19,1	1,2	0,3			0,6	0,03
	80 %r.F.	21,3			0,2	0,03		
	90 %r.F.	23,2	1,0	0,2			0,4	0,06
30 °C	20 %r.F.	4,6	0,2	0,2				
	50 %r.F.	18,4	0,5	0,2				
	70 %r.F.	23,9	0,9	0,2				
	90 %r.F.	28,2	1,6	0,3	0,3	0,08		

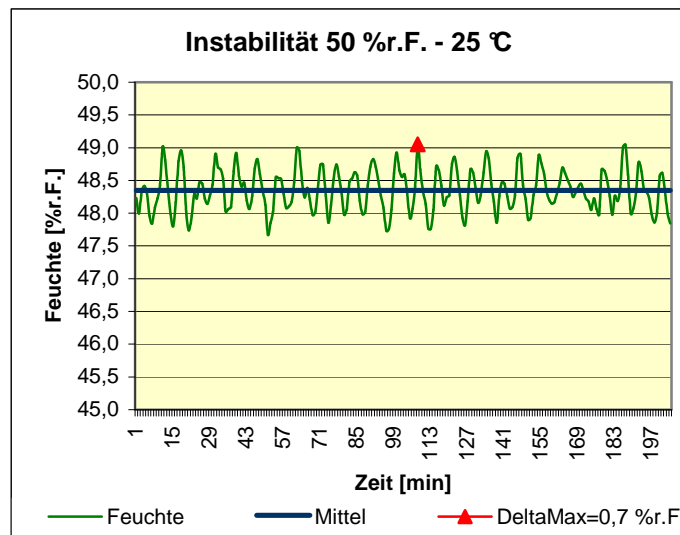


Bild XVI.5.3c Feuchte Instabilität 50 %r.F. bei 25 °C

**B Inhomogenität - Temperatur**

Die Inhomogenität im Nutzvolumen wurde über einkalibrierte Thermoelmente bei den Temperaturen 0 °C, 10 °C, 25 °C, 30 °C, 40 °C, 60°C, 80 °C und 100 °C bestimmt. Die Messpunkte spannten dabei einen Quader an den Ecken des Kunststoffrohres, des Innenvolumens, des Nutzvolumens im Plexiglasraum oder des Drahtkäfigs auf.

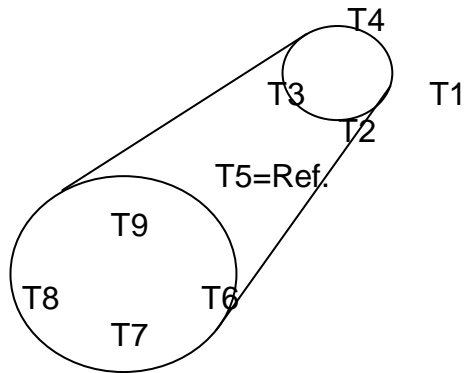


Bild XVI.5.4a Verteilung der Messorte

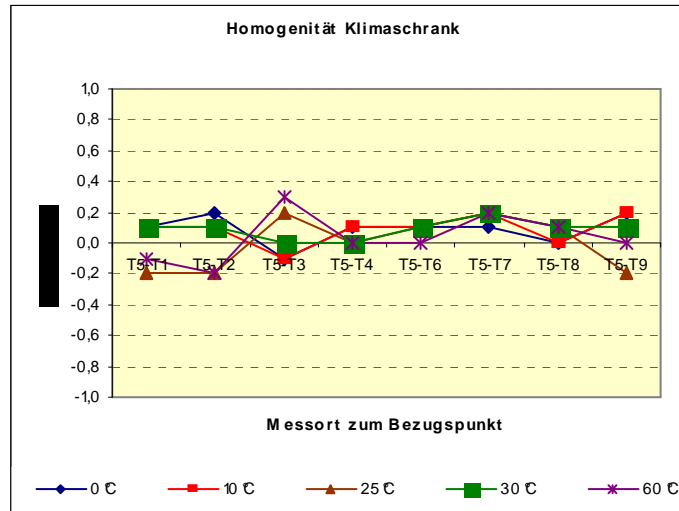


Bild XVI.5.4a Temperaturdifferenzen bzgl. Zentrum

### Inhomogenitätsmessung

eingestellte Temperatur	Delta Max bez. auf das Zentrum im Kunststoffrohr	Klimaschrank im Drahtkäfig	Klimagenerator Innenvolumen	Klimagenerator Plexiglasvolumen
0 °C	0,2 K	0,2 K		
10 °C	0,2 K	0,2 K	0,1 K	
25 °C	0,2 K	0,2 K	0,1 K	0,2 K
30 °C	0,2 K	0,2 K	0,12 K	
40 °C	0,2 K	0,2 K	0,13 K	
60 °C	0,3 K	0,2 K		
80 °C	0,3 K	0,3 K		
100 °C	0,3 K	0,3 K		

### Inhomogenität - Feuchte

Die Bestimmung der Feuchteinhomogenität im umgewälzten Klimaschrank erfolgt auf Basis der gemessenen räumlichen Verteilung der Lufttemperatur unter der Annahme, dass die absolute Feuchte im Nutzvolumen konstant bleibt. Mit einer maximalen Temperaturinhomogenität von 0,2 K ergeben sich nahezu temperaturunabhängige Inhomogenitätsintervalle. Die Tabelle zeigt den Zusammenhang inwiefern sich Änderungen der Umgebungstemperatur und Feuchte auf die angezeigte Taupunkttemperatur auswirken (Projektion der Temperatursensitivität auf die Feuchteskala, Formeln siehe XIV.5.3):

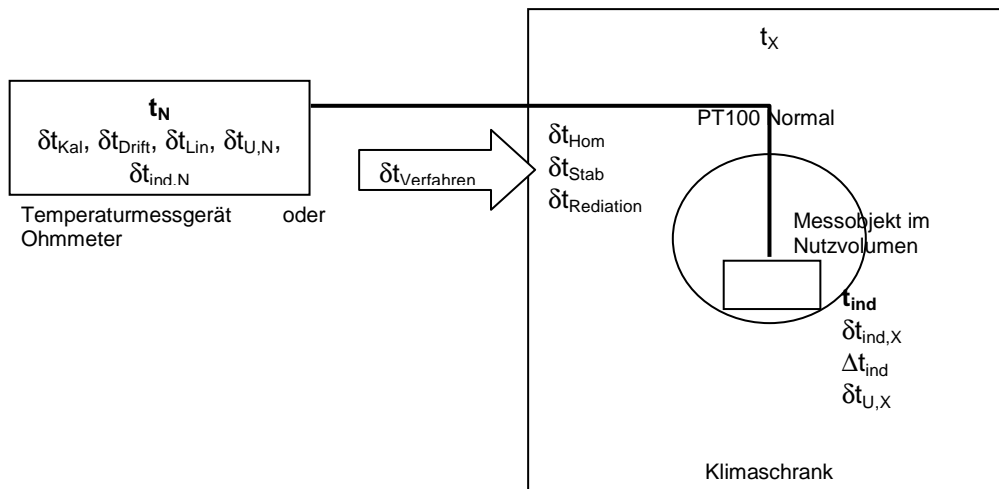
Temperatur ±0,2 K	Feuchte relativ	±Delta <sub>HOM</sub> [%r.F.]	±Delta <sub>HOM</sub> Taupunkt
20 °C	30 %r.F.	0,4	0,01 K
	50 %r.F.	0,6	
	70 %r.F.	0,8	
	90 %r.F.	1,1	
25 °C	30 %r.F.	0,3	
	90 %r.F.	1,0	
30 °C	30 %r.F.	0,3	
	90 %r.F.	1,0	

**Strahlungseinfluss**

Der Strahlungseinfluss durch von der Umgebungstemperatur abweichende Werte im Klimaschrank wurde nach Methode 3, Kapitel 7.4, der Richtlinie DKD-R 5-7 ermittelt. Dazu wurde versucht sowohl Wand- (mit aufgeklebten Thermoelementen) als auch Lufttemperatur im Zentrum des Nutzvolumens zu bestimmen:

eingestellte Temperatur	linke Wand	Zentrum	rechte Wand
0 °C	0,9 °C	0,6 °C	0,8 °C
40 °C	40,7 °C	40,9 °C	40,8 °C
60 °C	62,5 °C	63,0 °C	62,6 °C
80 °C	79,4 °C	79,9 °C	79,5 °C
100 °C	99,2 °C	100,1 °C	99,3 °C

**XIV.5.2 Messunsicherheit - Temperatur**  
**Skizze des Messverfahrens:**



**Modellgleichung**

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

$$t_x = t_N + \delta t_{ind,N} + \delta t_{Kal} + \delta t_{Verfahren} + \delta t_{Hom} + \delta t_{Stab} + \delta t_{Radiation} \text{ und}$$

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

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

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

erweiterte Messunsicherheit (k=2):

$$U_{abs}(\Delta t_{ind}) = 0,4 \text{ K}$$

#### XIV.5.3 Messunsicherheit – Taupunkt

##### Modellgleichung

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

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

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

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 21 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	-----------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

**XIV.5.4 Messunsicherheit – relative Feuchte**

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

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

aus

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

mit

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

Mit den Eingangsgrößen

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

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

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

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

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

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

<b>Ausgabe:</b> 5.5.11	<b>erstellt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>geprüft/ genehmigt</b> von: PF am: 08.01.09	<b>Kapitel</b> XIV Messgröße Temperatur und feuchte	<b>Seite</b> 22 von 25
---------------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------------

## XIV.6 Ergebnisse

Die zu Grunde liegenden **Zahlenwerte und Ergebnisse** der Berechnungen für die einzelnen Bereiche sind der mitgeltenden Excel-Tabelle

- „Messunsicherheiten Tabelle TemperaturXIV.xls“

zu entnehmen, die Ergebnisse werden im Leistungsnachweis aufgeführt. Zusammengefasst ergibt sich, jeweils gerundet oder linear interpoliert:

Pt-100 Fühler, Widerstandsthermometer/ direkt anzeigende Thermometer

Kalibrierwert	$U_{abs}=2u(\Delta t_{ind})$ [K]	Bedingung
-25 °C bis <0 °C	50 mK	Metallblockkalibrator
0 °C	40 mK	Eisbad oder Wassertripelpunkt
>0 °C bis 25 °C	50 mK	direkter Vergleich mit Normalwiderstandsthermometern im Metallblockkalibrator oder Wasserbad (bis 80 °C)
>25 °C bis 80 °C	70 mK	
>80 °C bis 140 °C	80 mK	
>140 °C bis 200 °C	0,2 K	
>200 °C bis 300 °C	0,3 K	
0 °C bis 15 °C	0,4 K	im Klimaschrank
>15 °C bis 40 °C	0,3 K	
>40 °C bis 60 °C	0,4 K	
>60 °C bis 100 °C	0,5 K	
15 °C bis 40 °C	0,2 K	im Klimagenerator

Thermoelemente

Kalibrierwert	$U_{abs}=2u(\Delta t_{ind,TC})$ [K]	Bedingung
-25 °C bis 140 °C	0,3 K	im Bad bzw. Metallblockkalibrator, Vergleichstelle im Eisbad
>140 °C bis 300 °C	0,4 K	

Taupunkttemperatur

Kalibrierwert	$U_{abs}=2u(\Delta t_{ind})$ [K]	Bedingung
2 °C bis 29 °C	0,4 K	im Klimaschrank
0 °C bis 29 °C	0,2 K	im Klimagenerator

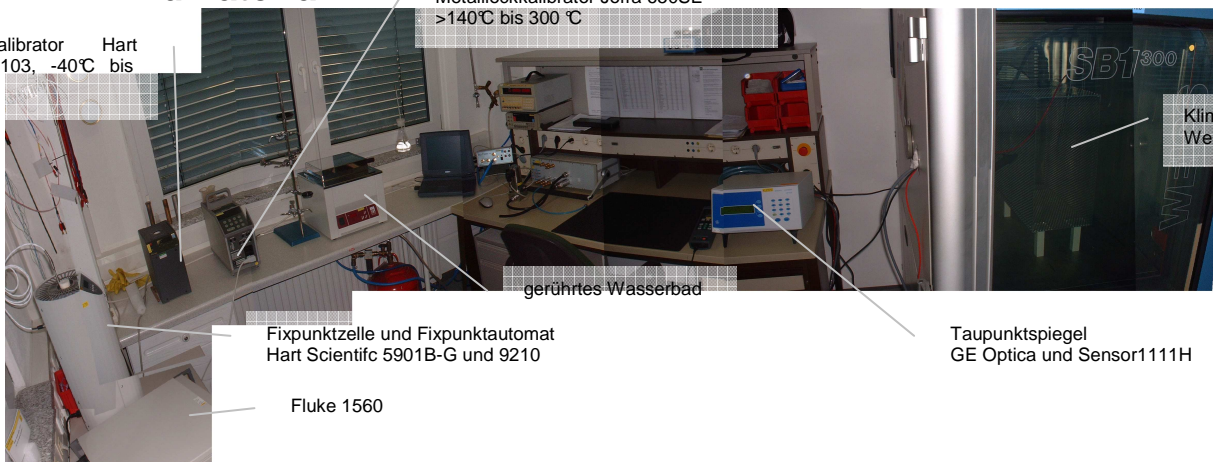
relative Luftfeuchte

Kalibrierwert	$U_{abs}=2u(\Delta t_{ind})$ [K]	Bedingung
20 % bis 40 %	1,5 %	im Klimaschrank 20 °C bis 30 °C Taupunkttemperatur $\geq 2$ °C
>40 % bis 60 %	2 %	
>60 % bis 80 %	2,5 %	
>80 % bis 90 %	3 %	
20 % bis 40 %	0,7 %	im Klimagenerator 20 °C bis 30 °C Taupunkttemperatur $\geq 0$ °C
>40 % bis 60 %	1,0 %	
>60 % bis 90 %	1,5 %	
22 % bis 40 %	0,9 %	im Klimagenerator, erweitertes Volumen 23 °C Taupunkttemperatur $\geq 0$ °C
>40 % bis 60 %	1,3 %	
>60 % bis 90 %	1,7 %	

### XIV.A Bildmaterial

Metalllockkalibrator Hart Scientific 9103, -40°C bis 140 °C

Metalllockkalibrator Jofra 650SE  
>140°C bis 300 °C



Klimaschrank Weiss SB1-300

gerührtes Wasserbad

Fixpunktzelle und Fixpunktautomat Hart Scientific 5901B-G und 9210

Taupunktspiegel GE Optica und Sensor1111H

Fluke 1560

Bild XIV.A.1 Blick ins Temperaturlabor

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	24 von 25

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: PF am: 08.01.09	von: PF am: 08.01.09	XIV Messgröße Temperatur und feuchte	25 von 25