

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Richtlinie
DKD-R 5-8**

**Kalibrierung von Hygrometern zur
direkten Erfassung der relativen
Feuchte**

Ausgabe 02/2019

<https://doi.org/10.7795/550.20190214>



	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	2 / 80

Deutscher Kalibrierdienst (DKD)

Im DKD sind Kalibrierlaboratorien von Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen seit der Gründung 1977 zusammengeschlossen. Am 03. Mai 2011 erfolgte die Neugründung des DKD als *technisches Gremium* der PTB und der akkreditierten Laboratorien.

Dieses Gremium trägt die Bezeichnung Deutscher Kalibrierdienst (DKD) und steht unter der Leitung der PTB. Die vom DKD erarbeiteten Richtlinien und Leitfäden stellen den Stand der Technik auf dem jeweiligen technischen Fachgebiet dar und stehen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) für die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden von der DAkkS als Rechtsnachfolgerin des DKD akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert wird.

Kontakt:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

DKD-Geschäftsstelle

Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Postfach 33 45 38023 Braunschweig

Telefon Sekretariat: (05 31) 5 92-8021

Internet: www.dkd.eu

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	3 / 80

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 5-8, Ausgabe 02/2019, Revision 0, Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20190214

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). In diesem Zusammenhang bedeutet „nicht-kommerziell“ (NC), dass das Werk nicht zum Zwecke der Einnahmenerzielung verbreitet oder öffentlich zugänglich gemacht werden darf. Eine Nutzung seiner Inhalte für die gewerbliche Verwendung in Laboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Hager, Helmut; G. Luft Mess- und Regeltechnik GmbH / MBW Calibration GmbH, Fellbach
Deschermeier, Regina; Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig
Harke, Andreas; Vötsch Industrietechnik GmbH, Balingen
Hee, Willi; Vötsch Industrietechnik GmbH, Balingen
Jehnert, Diana; ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen
Mitter, Helmut; BEV / E+E Elektronik Ges.m.b.H, Engerwitzdorf (Österreich)
Reinshaus, Peter; Küssaberg
Sander, Eugen; Testo industrial services GmbH, Kirchzarten
Scheibe, Mario; CTS Klima Temperatur Systeme GmbH, Hechingen
Schnelle-Werner, Olaf; ZMK & ANALYTIK GmbH, Bitterfeld-Wolfen
Schüür, Jens; ELMTEC Ingenieurgesellschaft mbH, Königslutter
Waldera, Rudolf; Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) als Ergebnis der Zusammenarbeit der PTB mit dem Fachausschuss *Temperatur und Feuchte* des DKD.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	4 / 80

Vorwort

DKD-Richtlinien sind Anwendungsdokumente zu den Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025. In den Richtlinien werden technische, verfahrensbedingte und organisatorische Abläufe beschrieben, die den akkreditierten Kalibrierlaboratorien als Vorbild zur Festlegung interner Verfahren und Regelungen dienen. DKD-Richtlinien können zum Bestandteil von Qualitätsmanagementhandbüchern der Kalibrierlaboratorien werden. Durch die Umsetzung der Richtlinien wird die Gleichbehandlung der zu kalibrierenden Geräte in den verschiedenen Kalibrierlaboratorien gefördert und die Kontinuität und Überprüfbarkeit der Arbeit der Kalibrierlaboratorien verbessert.

Die DKD-Richtlinien sollen nicht die Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren und -abläufen behindern. Abweichungen von Richtlinien und neue Verfahren sind im Einvernehmen mit der Akkreditierungsstelle zulässig, wenn fachliche Gründe dafür sprechen.

Kalibrierungen der akkreditierten Laboratorien geben dem Anwender Sicherheit für die Verlässlichkeit von Messergebnissen, erhöhen das Vertrauen der Kunden und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem nationalen und internationalen Markt und dienen als messtechnische Grundlage für die Mess- und Prüfmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Die vorliegende Richtlinie wurde im Rahmen des Fachausschusses *Temperatur und Feuchte* erstellt und vom Vorstand des DKD genehmigt.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	5 / 80

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	8
2	Begriffsbestimmungen.....	8
3	Symbole	11
3.1	Variablen.....	11
3.2	Indizes.....	12
4	Ziel der Kalibrierung	13
5	Bezugs- und Gebrauchsnormale	13
5.1	2-Druck-2-Temperatur-Feuchtegenerator	14
5.1.1	Funktionsprinzip	14
5.1.2	Anforderungen	15
5.1.3	Einflussgrößen	16
5.2	2-Druck-Feuchtegenerator	17
5.2.1	Funktionsprinzip	17
5.2.2	Anforderungen	17
5.2.3	Einflussgrößen	18
5.3	Taupunktspiegel-Hygrometer	19
5.3.1	Funktionsprinzip	19
5.3.2	Anforderungen	19
5.3.3	Einflussgrößen	20
5.4	Psychrometer	22
5.4.1	Funktionsprinzip	22
5.4.2	Anforderungen	22
5.4.3	Einflussgrößen	22
5.5	Relativer Feuchtesensor	24
5.5.1	Funktionsprinzip	24
5.5.2	Anforderungen	24
5.5.3	Einflussgrößen	25
5.6	Mechanische Hygrometer	26
5.7	Salzlösungen.....	26
5.8	Gastemperatur	27
5.8.1	Anforderungen	27
5.8.2	Einflussgrößen	27
5.9	Berechnungsgleichungen.....	29
5.10	Analogsignale.....	29
6	Kalibriereinrichtung.....	30
6.1	Gerätegruppen.....	30

6.1.1	Druck- / Temperatur – Feuchtgenerator	30
6.1.2	Klimaschrank	30
6.1.3	Mischgasgenerator.....	30
6.1.4	Salzlösung	30
6.2	Einflussgrößen	31
6.2.1	Räumliche Inhomogenität.....	31
6.2.2	Zeitliche Instabilität.....	32
6.2.3	Strahlungseinfluss	32
6.2.4	Druckdifferenzen	33
6.2.5	Strömungsverhältnisse.....	33
6.2.6	Rückwirkungen.....	33
7	Elektronische Kalibriergegenstände	34
7.1	Gerätearten	34
7.1.1	Sensorelement.....	34
7.1.2	Messumformung	34
7.2	Kalibrierfähigkeit.....	34
7.2.1	Funktionsprüfung	34
7.2.2	Vorbehandlung.....	35
7.3	Verpackung	35
7.4	Einflussgrößen	35
7.4.1	Mittelwert.....	35
7.4.2	Auflösung	35
7.4.3	Eigenerwärmung	35
7.4.4	Thermische Ankopplung.....	36
7.4.5	Hysterese.....	36
7.4.6	Einflüsse aus Umgebungsbedingungen	36
7.4.7	Analogsignale	36
8	Mechanische Kalibriergegenstände.....	37
8.1	Gerätearten	37
8.1.1	Messelement.....	37
8.2	Kalibrierfähigkeit.....	37
8.2.1	Funktionsprüfung	37
8.2.2	Vorbehandlung.....	37
8.3	Einflussgrößen	38
8.3.1	Mittelwert.....	38
8.3.2	Skalenteilung	38
8.3.3	Thermische Ankopplung.....	38

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	7 / 80

8.3.4	Hysterese	38
8.3.5	Wiederholbarkeit	38
9	Kalibrierverfahren	39
9.1	Vorbereitung	39
9.2	Einbau in die Kalibriereinrichtung	39
9.3	Kalibrierablauf	40
9.3.1	Ablauf A1	41
9.3.2	Ablauf A2	42
9.3.3	Ablauf B1	43
9.3.4	Ablauf B2	44
9.3.5	Ablauf C1	45
9.3.6	Ablauf C2	46
9.3.7	Ablauf D	46
9.4	Angleichzeit	47
9.4.1	Vorgeschlagenes Verfahren zu Bestimmung der Angleichzeit	48
10	Umgebungsbedingungen	49
11	Kalibrierschein	49
11.1	Kalibrierergebnis – Beispiel	49
12	Literaturverzeichnis	50
Anhang A	Messunsicherheitsbilanzen – Beispiele	51
	Kalibrierung in einem Klimaschrank	51
	Einbautiefe	51
	Schritt 1: Gastemperatur	52
	Schritt 2: Taupunkttemperatur	55
	Schritt 3: Berechnung relative Feuchte	58
	Schritt 4: Kalibrierergebnis	59
	Kalibrierung in einem Mischgasgenerator	61
	Einbautiefe	61
	Schritt 1: Feuchtereferenzwert im Mischgasgenerator	62
	Schritt 2: Kalibrierergebnis	66
	Kalibrierung in einem 2-Druck-Feuchtegenerator	68
	Einbautiefe	68
	Schritt 1: Bezugsnormal	69
	Schritt 2: Kalibrierergebnis	71
Anhang B	Musterkalibrierscheine (Auszüge)	73
Anhang C	Informationen zur thermischen Ankopplung	76
Anhang D	Informationen zu elektronischen Feuchtesensoren	77

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	8 / 80

1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Richtlinie dient dazu, Mindestanforderungen an Bezugsnorm, Kalibriereinrichtung, Kalibrierverfahren und Messunsicherheitsabschätzung bei der Kalibrierung von Hygrometern festzulegen. Sie gilt für Kalibriergegenstände mit direkter Erfassung der relativen Gasfeuchte mit resistiven, kapazitiven, resistiv-elektrolytischen, sowie mechanischen Sensorelementen. Im Sinne der Richtlinie werden unter Gasfeuchte gasförmige Stoffsysteme bestehend aus den Komponenten Wasser und Trägergas verstanden. Der Anwendungsbereich der Richtlinie umfasst die Trägergase Luft und Stickstoff. Bei anderen Trägergasen ist die Anwendung zu prüfen.

Soll parallel zur Feuchte auch die Gastemperatur kalibriert werden, so gelten für die Temperaturkalibrierungen, abhängig vom Sensorelement, die Richtlinien DKD-R 5-1 [1] oder DKD-R 5-3 [2].

2 Begriffsbestimmungen

Die in der vorliegenden Richtlinie verwendeten Begriffe und Definitionen orientieren sich an der VDI/VDE 3514 Blatt 1 [3] / Blatt 2 [4]. Unterschieden werden kann in Reinstoffe (in VDI/VDE 3514 Blatt 1 [3] als „reine Phase“ bezeichnet) bestehend aus einer Komponente (Einkomponentensystem), z.B. Wasser, und Gemischen (Mischgassysteme) bestehend aus mehreren Komponenten (Mehrkomponentensysteme), z.B. feuchte Luft. Das System kann einphasig, z.B. gasförmig, vorliegen oder mehrere Phasen, z.B. gasförmig und flüssig, aufweisen.

Luftfeuchte und Gasfeuchte

Luftfeuchte beschreibt den Wasserdampfanteil oder die Wasserdampfmenge in feuchter Luft. In der Praxis werden je nach Anwendungsfall und Anforderungen unterschiedliche Kenngrößen verwendet. Eine Auflistung verschiedener Berechnungsformeln für Feuchtegrößen und deren Unsicherheiten sind im DKD-L 5-1 [5] zu finden. Analog zur Luftfeuchte wird allgemein bei anderen Trägergasen, wie z.B. Stickstoff, von Gasfeuchte gesprochen.

Ideales Gas

Ein Reinstoff (Einkomponentensystem) oder ein Gemisch aus mehreren Komponenten (Mehrkomponentensystem) verhält sich wie ein ideales Gas, wenn sich jede Komponente wie ein ideales Gas verhält. Die einzelnen Komponenten sowie das Gesamtsystem (Gemisch) können mit dem idealen Gasgesetz beschrieben werden.

Wasserdampfdruck

Der anteilige Druck (Partialdruck) des Wassers in der Gasphase am Gasdruck p in reiner Phase (Einkomponentensystem, Reinstoff) oder in einem idealen Gas oder Gasgemisch wird laut VDI/VDE 3514 Blatt 1 [3] mit dem Wasserdampfdruck e bezeichnet.

Sättigungsdampfdruck in reiner Phase

Der Sättigungsdampfdruck in reiner Phase beschreibt den Druck, der sich in einem geschlossenen System mit Wasser (e_w , Fall a) in Abbildung 1) oder mit Eis (e_i , Fall b) in Abbildung 1), bei Abwesenheit anderer Komponente (Einkomponentensystem, Reinstoff) bei der gegebenen Temperatur t im Phasengleichgewicht einstellt. In diesem Fall ist der Wasserdampfdruck e somit gleich dem Sättigungsdampfdruck in reiner Phase und gleich dem Gasdruck p . Der Sättigungsdampfdruck in reiner Phase ist direkt messbar und nur von der Temperatur t abhängig. Der funktionale Zusammenhang des Sättigungsdampfdrucks von der Temperatur wird als Dampfdruckgleichung bezeichnet.

Bei Temperaturen kleiner $0,01\text{ °C}$ sind beide Zustände möglich: Sättigungsdampfdruck über Eis oder über Wasser. Bei gleicher Temperatur stellt sich über Wasser in diesem Fall ein etwas höherer Sättigungsdampfdruck ein, als über Eis.

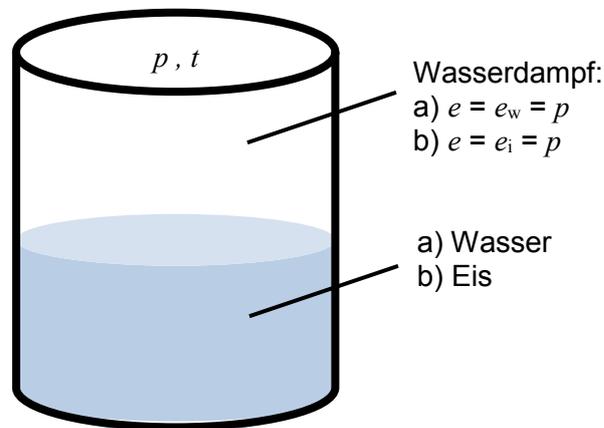


Abbildung 1: Schematische Darstellungen Sättigungsdampfdruck

Reales Gas

Verhalten sich beispielsweise eine Komponente in reiner Phase (Einkomponentensystem) oder ein Gemisch aus mehreren Komponenten nicht wie ein ideales Gas z.B. aufgrund unterschiedlicher Wechselwirkungen der Komponenten untereinander, so kommt es zu Abweichungen vom idealen Gasverhalten. Zur Unterscheidung vom idealen Verhalten werden die Symbole der entsprechenden Größen im realen Gas oder Gasgemischen mit einem Apostroph gekennzeichnet (z.B. $e \rightarrow e'$).

Wasserdampfpartialdruck

Der Wasserdampfpartialdruck e' ist laut VDI/VDE 3514 [3] der Partialdruck des Wassers in der Gasphase in einem realen Gas oder Gasgemisch.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	10 / 80

Sättigungsdampfdruck im Gemisch

Aufgrund von beispielsweise Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten untereinander in einem realen Gasgemisch (z.B. feuchte Luft) kommt es zu Unterschieden im Vergleich zum Verhalten der Komponente als Reinstoff (z.B. Wasser). Diese Unterschiede können mit dem sog. Enhancement-Faktor f berücksichtigt werden. Dieser berechnet sich aus der Gastemperatur t , dem Gasdruck p und dem Sättigungsdampfdruck in reiner Phase e_w bzw. e_i . Somit ergibt sich der Sättigungsdampfdruck im Gemisch über Wasser e'_w und über Eis e'_i über folgende Beziehungen¹:

$$e'_w(p, t) = e_w(t) \cdot f_w(p, t) \quad (1)$$

bzw.

$$e'_i(p, t) = e_i(t) \cdot f_i(p, t) \quad (2)$$

Frost- / Taupunkttemperatur

Wird ein feuchtes Gasgemisch, z.B. feuchte Luft, isobar abgekühlt, tritt bei der Taupunkttemperatur t_d Kondensation, bzw. bei der Frostpunkttemperatur t_f Reifbildung ein. An diesem Punkt ist der Wasserdampfpartialdruck gleich dem Sättigungsdampfdruck. Aus der Taupunkt- bzw. Frostpunkttemperatur lässt sich mit der Dampfdruckgleichung und dem Enhancement-Faktor f der Wasserdampfpartialdruck e' mit nachfolgenden Gleichungen berechnen:

$$e' = e'_w(p, t_d) = e_w(t_d) \cdot f_w(p, t_d) \quad (3)$$

bzw.

$$e' = e'_i(p, t_f) = e_i(t_f) \cdot f_i(p, t_f) \quad (4)$$

Relative Feuchte

Die relative Feuchte gibt das Verhältnis Wasserdampfpartialdruck e' zu Sättigungsdampfdruck e'_w , in Prozent² an, z.B. $U_w = 75 \%$.

Über $0 \text{ }^\circ\text{C}$, sowie nach WMO-Definition (World Meteorological Organization) auch unterhalb von $0 \text{ }^\circ\text{C}$, bezieht sich die relative Feuchte auf die Sättigung über Wasser e'_w :

$$U_w = \frac{e'}{e'_w(p, t)} \cdot 100 \% \quad (5)$$

Im Gegensatz dazu wird nach der technischen Definition die relative Feuchte bei Temperaturen unterhalb von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ auf die Sättigung über Eis e'_i bezogen:

$$U_i = \frac{e'}{e'_i(p, t)} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Bei Kalibrierungen unter $0 \text{ }^\circ\text{C}$ sollte die Definition der relativen Feuchte entsprechend der Anzeige des Kalibriergegenstandes (U_i , U_w) angegeben werden. Alternativ kann die Angabe nach WMO (bezogen auf Wasser) erfolgen, vorbehaltlich anderer Festlegungen durch den Kunden.

¹ Bei der Verwendung konkreter Berechnungsformeln für den Sättigungsdampfdruck in reiner Phase sowie dem Enhancement-Faktor muss bei der Anwendung von Zahlenwertgleichungen auf die Verwendung der richtigen Einheit der Eingangsgrößen geachtet werden, z.B. kann anstelle der Gastemperatur t in $^\circ\text{C}$ die Gastemperatur T in K zu verwenden sein.

² Die relative Feuchte ist eine dimensionslose Verhältnisangabe mit den Variablen U , U_i , U_w und $U_{w,hyp}$, die in der Regel in Prozent (%) angegeben wird. Weitere Präfixe oder Suffixe (z.B. % rh oder % r.F.) sind nicht zwingend erforderlich, können aber zur Klarstellung benutzt werden.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	11 / 80

Übersteigt der Sättigungsdampfdruck den Gasdruck (z.B. bei 1013,25 hPa und 99,974 °C), kann keine relative Feuchte von 100 % (ohne Druckerhöhung) mehr erreicht werden. Die relative Feuchte wird in diesem Falle als Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks, der den Gasdruck nicht übersteigen kann, zu einem hypothetischen Systemdruck, bei dem Sättigung mit Wasserdampf möglich wäre (höherer Druck als der Gasdruck) angegeben. Im Falle einer Sättigung besteht das feuchte Gasgemisch nur aus Wasserdampf (Sättigungsdampfdruck = Gasdruck) und ist somit einphasig (Reinstoff). Eine Korrektur des Sättigungsdampfdrucks ist deshalb nicht erforderlich. Als Bezugsgröße für die relative Feuchte dient damit der Sättigungsdampfdruck in reiner Phase. Die relative Feuchte ergibt sich somit aus der Beziehung:

$$U_{w,hyp} = \frac{e'}{e_w(t)} \cdot 100 \% \quad (7)$$

Aufgrund der Abhängigkeit der relativen Feuchte von der Gastemperatur t , müssen die Temperatur und deren thermische Einflüsse analog zu den Einflüssen der Feuchte bei der Kalibrierung und Messunsicherheitsrechnung berücksichtigt werden.

Wird die relative Feuchte im Gegensatz zu beispielsweise einem kapazitiven Polymersensor nicht direkt messtechnisch erfasst, sondern nach den Gleichungen (5), (6), oder (7) bestimmt, so muss berücksichtigt werden, dass der Wasserdampfpartialdruck e' nicht direkt gemessen werden kann. Dieser kann jedoch, wie beispielsweise in dieser Richtlinie in Kapitel 5.3 beschrieben, indirekt über die Bestimmung des Taupunkts mittels eines Taupunktspiegel-Hygrometers gemessen und mit nachfolgenden Beziehungen bestimmt werden:

$$e' = e'_{w}(p_M, t_d) = e_w(t_d) \cdot f_w(p_M, t_d) \quad (8)$$

bzw.

$$e' = e'_{i}(p_M, t_f) = e_i(t_f) \cdot f_f(p_M, t_f) \quad (9)$$

Dabei ist der Wasserdampfpartialdruck e' gleich dem Sättigungsdampfdruck bei der mit dem Taupunktspiegel-Hygrometer gemessenen Taupunkttemperatur t_d (Tauschicht) oder Frostpunkttemperatur t_f (Frostschicht) und dem am Spiegel herrschenden Druck p_M .

3 Symbole

3.1 Variablen

Variable	Bezeichnung	Einheit
e	Wasserdampfdruck	hPa
e'	Wasserdampfpartialdruck	hPa
e_i	Sättigungsdampfdruck in reiner Phase über Eis	hPa
e'_i	Sättigungsdampfdruck im Gemisch (z.B. feuchte Luft) über Eis	hPa
e_w	Sättigungsdampfdruck in reiner Phase über Wasser	hPa
e'_w	Sättigungsdampfdruck im Gemisch (z.B. feuchte Luft) über Wasser	hPa
e'_C	Wasserdampfpartialdruck in der Kalibrierkammer	hPa
e'_M	Wasserdampfpartialdruck über dem Spiegel des Taupunktspiegel-Hygrometers	hPa
f_i	Enhancement-Faktor für Eis	1
f_w	Enhancement-Faktor für Wasser	1

U	relative Feuchte ³	1 ⁴
U_i	relative Feuchte in Bezug auf Eis	1 ⁴
U_w	relative Feuchte in Bezug auf Wasser	1 ⁴
$U_{w,hyp}$	relative Feuchte in Bezug auf Wasser und einem hypothetischen Systemdruck	1 ⁴
T oder t	Gastemperatur	K bzw. °C
T_d oder t_d	Taupunkttemperatur	K bzw. °C
T_f oder t_f	Frostpunkttemperatur	K bzw. °C
T_i oder t_i	Feuchttemperatur einer vereisten Oberfläche	K bzw. °C
T_w oder t_w	Feuchttemperatur einer befeuchteten Oberfläche	K bzw. °C
T_C oder t_C	Temperatur der Kalibrierkammer	K bzw. °C
T_S oder t_S	Temperatur des Sättigers	K bzw. °C
p	Gasdruck (Absolutdruck)	hPa
p_C	Gasdruck (Absolutdruck) in der Kalibrierkammer	hPa
p_S	Gasdruck (Absolutdruck) im Sättiger	hPa
p_M	Gasdruck (Absolutdruck) am Spiegel des Taupunktspiegel-Hygrometers	hPa
ε	Emissionsgrad (s. Strahlungseinfluss)	1

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Variablen

3.2 Indizes

Indizes	Bezeichnung
'	(Apostroph) kennzeichnet reales Gas oder Gasgemisch
d	Taupunkt
f	Frostpunkt
i	über Eis
w	über Wasser
hyp	hypothetischer Zustand
C	Kalibrierkammer
M	Spiegel des Taupunktspiegel-Hygrometers
S	Sättiger

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Indizes

³ Die Variable U der relativen Feuchte darf nicht mit der Variable U der erweiterten Messunsicherheit verwechselt werden. Die Bedeutung der jeweils verwendeten Variablen ist im Einzelfall zu prüfen.

⁴ Die relative Feuchte ist eine dimensionslose Verhältnisangabe, die in der Regel in Prozent (%) angegeben wird.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	13 / 80

4 Ziel der Kalibrierung

Die Kalibrierung eines Hygrometers zur direkten Erfassung der relativen Feuchte dient zur Feststellung der Messabweichung der relativen Gasfeuchte zum Kalibrierwert (Sollwert), welcher durch Normale ermittelt oder dargestellt wurde, mit Angabe der zugehörigen Messunsicherheit, der Kalibrierbedingung und des Kalibrierablaufes. Die Ergebnisse werden in einem Kalibrierschein dokumentiert.

5 Bezugs- und Gebrauchsnormale

Alle verwendeten Bezugs- oder Gebrauchsnormale müssen direkt oder indirekt auf ein nationales Normal rückgeführt sein. Die Kalibrierung erfolgt durch direkten Vergleich der Messwerte des Kalibriergegenstandes mit den Messwerten oder dargestellten Werten des Bezugs- oder Gebrauchsnormales.

Für die Darstellung oder die Ermittlung der relativen Feuchte werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt (siehe auch VDI/VDE 3514 Blatt 2 [4]).

Kleinste Unsicherheiten sind mit sogenannten Primärverfahren erreichbar und werden mit Feuchtegeneratoren der Ausführungen 2-Druck, 2-Temperatur oder 2-Druck-2-Temperatur realisiert. Diese Generatoren erzeugen einen definierten und bekannten feuchten Gasstrom, der auf Temperatur- und Druckmessungen rückgeführt wird.

Als präzise und langzeitstabile Messgeräte der Gasfeuchte werden Taupunktspiegel-Hygrometer und Psychrometer eingesetzt. Zur Berechnung der relativen Feuchte werden die Gastemperatur und der Gasdruck benötigt.

Eine direkte Messung der relativen Feuchte erfolgt mit kapazitiven Polymersensoren oder resistiv-elektrolytischen Sensoren. Diese sind im Vergleich zu vorher genannten Verfahren weniger langzeitstabil und erfordern entsprechende Zwischenprüfungen.

Alle Einflussgrößen müssen mit kalibrierten Bezugs- oder Gebrauchsnormalen erfasst, ausgewertet und in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Bei Temperaturmessungen (z.B. Gastemperaturmessung, Messung der Temperatur in einem Sättiger, usw.) sind besonders die Einflüsse der thermischen Ankopplung, Eigenerwärmung und Strahlungseinfluss zu berücksichtigen.

Wird die relative Feuchte nicht direkt gemessen, sondern z.B. bei Feuchtegeneratoren aus Temperatur- und Druckwerten berechnet, so sind die Gültigkeiten und Unsicherheiten der verwendeten Berechnungsgleichungen zu berücksichtigen (siehe DKD-L 5-1 [5]).

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte, sind neben den hygrometrischen Einflüssen, auch alle thermischen Einflüsse zu berücksichtigen.

Über die verwendeten Bezugs- oder Gebrauchsnormale müssen Aufzeichnungen zur Bewertung des Langzeitverhaltens erstellt werden.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	14 / 80

5.1 2-Druck-2-Temperatur-Feuchtegenerator

5.1.1 Funktionsprinzip

Als Ausgangsbasis für die Kalibrierung im 2-Druck-2-Temperatur-Feuchtegenerator dient ein Trägergas z.B. öl- und staubfrei gefilterte Druckluft aus einem Kompressor, oder Stickstoff. Am Beispiel eines mit Druckluft betriebenen 2-Druck-2-Temperatur-Feuchtegenerators wird die Funktionsweise für die Sättigung über Wasser erklärt:

Druckluft, deren Feuchtegehalt in der Regel unterhalb des angestrebten Taupunktes liegt, wird in einem Befeuchter (auch Vorsättiger genannt) durch erwärmtes Wasser geleitet. Die Luft verlässt den Befeuchter nahe dem Sättigungszustand bei der gegebenen Temperatur. Anschließend wird die feuchte Luft in den Sättiger (auch Kondensator genannt) geleitet. Dies ist ein speziell gefertigter Metallblock mit einer großen inneren Oberfläche, der zur Temperierung zum Beispiel in einem Präzisionsthermostaten eingebracht ist. Die Sättigertemperatur liegt dabei unterhalb der Temperatur des Befeuchters. Durch Abkühlung der feuchten Luft auf die Temperatur des Sättigers kondensiert überschüssiges Wasser aus. Am Ausgang des Sättigers liegt daher vollständig gesättigte Luft bezogen auf die Temperatur t_s und des Drucks p_s des Sättigers vor. Mittels der Dampfdruckgleichung (siehe DKD-L 5-1 [5]) wird der Sättigungsdampfdruck $e_w(t_s)$ in reiner Phase berechnet. Durch Multiplikation mit dem Enhancement-Faktor $f_w(p_s, t_s)$ ergibt sich der Sättigungsdampfdruck der feuchten Luft. Diese feuchte Luft wird nun an einem Ventil in der Regel bis auf Umgebungsdruck entspannt und in die Kalibrierkammer geleitet. Dabei reduziert sich der Wasserdampfpartialdruck entsprechend dem Quotienten aus Kalibrierkammerdruck p_c und Sättigerdruck p_s . Unter der Voraussetzung der Gültigkeit der Dampfdruckgleichung lassen sich der Wasserdampfpartialdruck und somit die absolute Feuchte auf die Messung der Sättigertemperatur sowie des Sättigerdrucks und des Gasdrucks in der Kalibrierkammer rückführen. Durch Variation der Parameter Sättigertemperatur und -druck lässt sich so ein weiter Bereich für die Gasfeuchte einstellen.

Neben der Sättigung über Wasser kann auch eine Sättigung über Eis erfolgen. Hierbei wird ein Trägergas mit einem Feuchtegehalt unterhalb des darzustellenden Wertes verwendet. Es wird in einem speziell gefertigten Sättigerblock über eine Eisschicht geleitet, so dass sich wieder beim Austritt aus dem Sättiger ein gesättigter Zustand für den herrschenden Druck und der Temperatur im Sättiger einstellt. Analog zu Sättigung über Wasser kann auch hier der Wasserdampfpartialdruck aus dem Sättigungsdampfdruck $e_i(t_s)$ über Eis und dem entsprechenden Enhancement-Faktor $f_i(p_s, t_s)$ bestimmt werden.

Für die Darstellung der relativen Feuchte wird der Kalibriergegenstand in eine Kalibrierkammer eingebracht, die zur Temperierung zum Beispiel in einer Temperaturkammer angeordnet ist. Der feuchte Gasstrom wird durch eine entsprechende Konstruktion durch die Temperaturkammer geleitet, um vor Eintritt in die Kalibrierkammer die Messtemperatur mit der Temperatur t_c anzunehmen. Nach Angleichen des feuchten Gasstroms an die Messtemperatur in der Kalibrierkammer, stellt sich der Wert der relativen Feuchte ein. Die relative Feuchte errechnet sich aus den Temperatur- und Druckverhältnissen mit Formel (10):

$$U_{i,w} = \frac{e_{i,w}(t_s) \cdot f_{i,w}(p_s, t_s)}{e_{i,w}(t_c) \cdot f_{i,w}(p_c, t_c)} \cdot \frac{p_c}{p_s} \cdot 100 \% \quad (10)$$

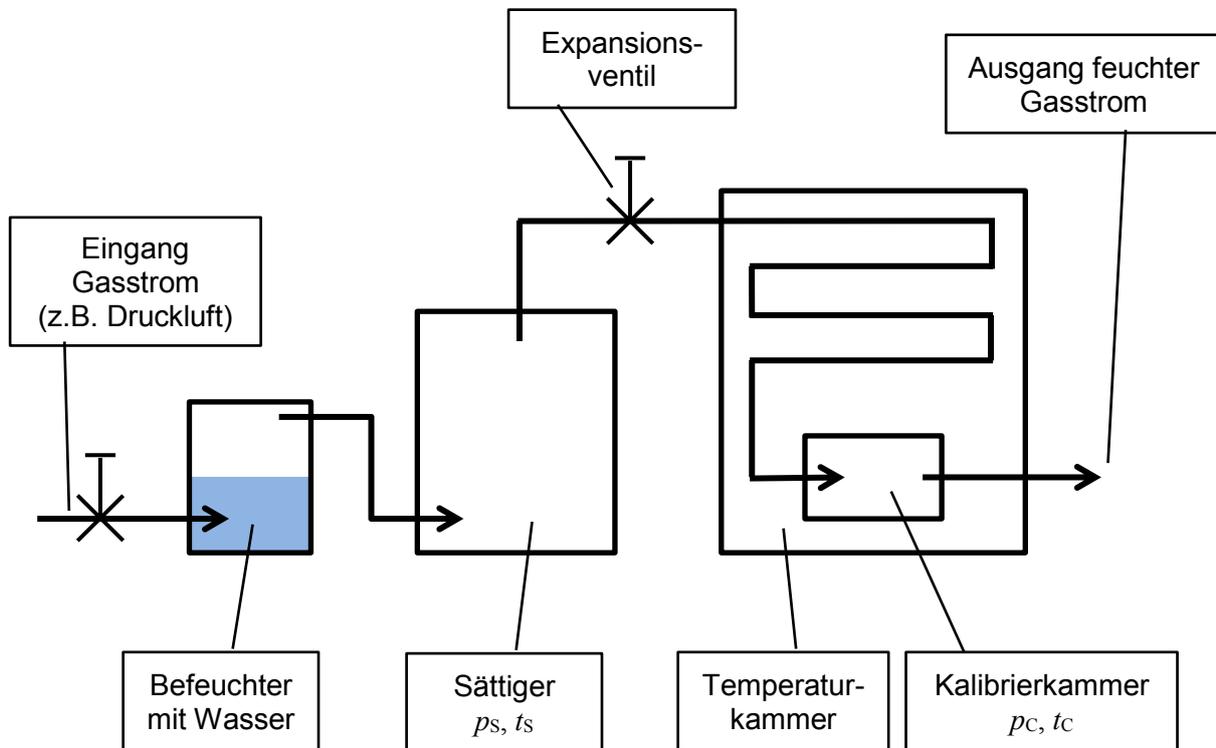


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines 2-Druck-2-Temperatur Feuchtegenerators mit Sättigung über Wasser

5.1.2 Anforderungen

Kernstück des Generators ist der Sättiger, welcher die Aufgabe hat, den feuchten Gasstrom zu 100 % mit Wasserdampf zu sättigen. Die zuverlässige Funktion des Sättigers ist zu validieren.

Zur ständigen Qualitätskontrolle wird empfohlen, zusätzlich ein Taupunktspiegel-Hygrometer als TransfERNormal einzusetzen, um den aus den Parametern des Generators berechneten Frost- oder Taupunkt mit dem angezeigten Frost- oder Taupunkt des Taupunktspiegel-Hygrometers vergleichen zu können. Eingriffskriterien sind festzulegen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	16 / 80

5.1.3 Einflussgrößen

Neben den Einflussgrößen der Kalibrierkammer (siehe Kapitel 6.2), der Temperaturmessungen (siehe Kapitel 5.8), sowie der Druckmessung (siehe auch DKD-R 6-1 [6]) sind folgende Einflussgrößen zu ermitteln und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen:

Kalibrierung

Die Messunsicherheit der Normale, die für die Messung des Sättiger- und Kalibrierkammerdrucks, sowie die Messung der Sättiger- und Kalibrierkammertemperatur eingesetzt werden, ist aus dem aktuellen Kalibrierschein zu entnehmen.

Die Messabweichungen müssen bei der Berechnung des Kalibrierergebnisses berücksichtigt werden. Die Kalibrierpunkte der jeweiligen Normale müssen den gesamten Einsatzbereich abdecken (Drucksensoren im jeweiligen Druckbereich von Sättiger und Kalibrierkammer, Temperatursensoren im jeweiligen Temperaturbereich von Sättiger und Kalibrierkammer). Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Auflösung

Wird eine abweichende Auflösung für Berechnungen verwendet, als die Auflösung, mit welcher bei der Kalibrierung im Kalibrierschein gerechnet wurde, so ist diese in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Berechnungen

Die Unsicherheit der verwendeten Formeln (z.B. Dampfdruckgleichung, Enhancement-Faktor) müssen in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 5.9).

Nichtlinearität

Zwischen den Kalibrierpunkten der Bezugsnormale ist eine Interpolation zulässig. Eine mögliche zusätzliche Abweichung oder Nichtlinearität ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Langzeitverhalten

Anhand der Kalibrierhistorie der Normale ist eine mögliche Drift zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Sättigungsverhalten

Das Sättigungsverhalten des Sättigers ist zu untersuchen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

5.2 2-Druck-Feuchtegenerator

5.2.1 Funktionsprinzip

Bei einem 2-Druck-Generator handelt es sich um eine vereinfachte Form des 2-Druck-2-Temperatur-Generators. Die Temperatur des Sättigers und der Kalibrierkammer sind konstruktiv gleich. Dadurch errechnet sich die relative Feuchte aus dem Quotient Kalibrierkammerdruck p_C zu Sättigerdruck p_S mit Berücksichtigung der Enhancement-Faktoren.

$$U_{i,w} = \frac{p_C}{p_S} \cdot \frac{f_{i,w}(p_S, t_S)}{f_{i,w}(p_C, t_C)} \cdot 100 \% \quad (11)$$

Eine weitere Vereinfachung kann auch die Kombination von Befeuchter und Sättiger in einer Kammer sein.

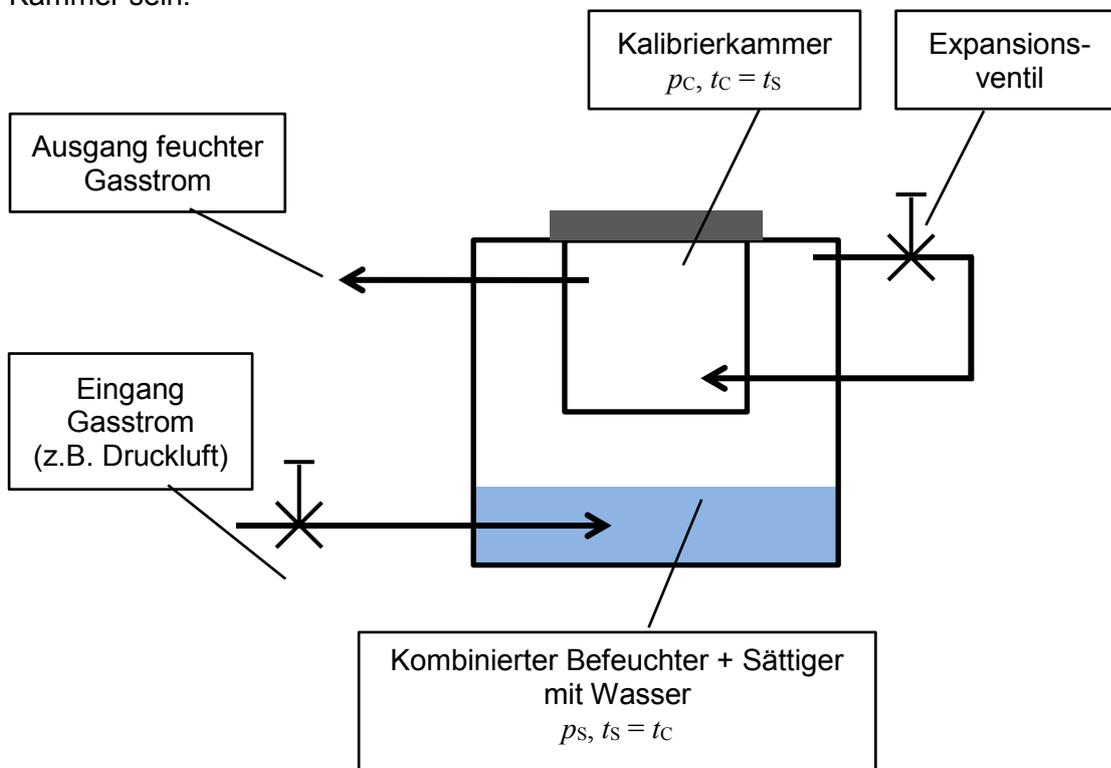


Abbildung 3: Schematische Darstellung 2-Druck-Feuchtegenerator mit kombinierter Befeuchtung und Sättigung

5.2.2 Anforderungen

Es gelten dieselben Anforderungen wie bei 2-Druck-2-Temperatur-Generatoren (siehe Kapitel 5.1.2), sofern die Rückführung ebenfalls über Druck- und Temperaturmessungen erfolgen soll. Alternativ kann die Rückführung durch Kalibrierung direkt in relativer Feuchte erfolgen (z.B. mit einem Taupunktspiegel-Hygrometer und Temperaturmessgerät).

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	18 / 80

5.2.3 Einflussgrößen

Es gelten dieselben Einflussgrößen wie bei 2-Druck-2-Temperatur-Generatoren (siehe Kapitel 5.1.3).

Erfolgt die Rückführung über die Kalibrierung in relativer Feuchte, sind neben den Einflussgrößen der Kalibrierkammer (siehe Kapitel 6.2), sowie der Druckmessung (siehe auch DKD-R 6-1 [6]) nachfolgende Einflussgrößen zu berücksichtigen:

Kalibrierung

Die Messunsicherheit ist aus dem aktuellen Kalibrierschein des Feuchtegenerators zu entnehmen. Die Messabweichungen müssen bei der Bestimmung des richtigen Wertes, oder in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Die Kalibrierpunkte müssen den gesamten Einsatzbereich der relativen Feuchte abdecken. Besitzt der Feuchtegenerator zudem eine Temperaturregelung, so muss die Kalibrierung in mehreren Klimapunkten dem vorgesehenen Einsatzbereich entsprechend durchgeführt werden (Empfehlung: mindestens bei kleinster, mittlerer und höchster Temperatur jeweils mindestens fünf Feuchtepunkte). Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Nichtlinearität

Zwischen den Kalibrierpunkten des Bezugsnormals ist eine Interpolation zulässig. Eine mögliche zusätzliche Abweichung oder Nichtlinearität ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Auflösung

Wird eine abweichende Auflösung für Berechnungen verwendet, als die Auflösung, mit welcher bei der Kalibrierung im Kalibrierschein gerechnet wurde, so ist diese in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Langzeitverhalten

Anhand der Kalibrierhistorie ist eine mögliche Drift zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	19 / 80

5.3 Taupunktspiegel-Hygrometer

5.3.1 Funktionsprinzip

Taupunktspiegel-Hygrometer arbeiten nach dem Kondensationsprinzip. Eine Oberfläche (Spiegel) wird solange (mit einem Peltierelement) gekühlt, bis Kondensation eintritt. Die Kondensatbildung wird z.B. optisch mittels Fotodioden detektiert. Die Oberfläche wird auf die Temperatur geregelt, bei der die Tau- oder Reifbildung eintritt (= Taupunkttemperatur bzw. Frostpunkttemperatur). Ein Temperatursensor unterhalb der Oberfläche misst die Spiegelttemperatur und somit die Tau- oder Frostpunkttemperatur.

Zur Bestimmung der relativen Feuchte sind neben der Taupunkttemperatur auch die Gastemperatur und der Gasdruck am Taupunktspiegel-Hygrometer zu messen. Aus diesen Parametern ist mittels Dampfdruckgleichung mit Berücksichtigung der Enhancement-Faktoren die relative Feuchte zu berechnen:

$$U_{i,w} = \frac{e(t_{d,f}) \cdot f_{i,w}(p, t_{d,f})}{e_{i,w}(t) \cdot f_{i,w}(p, t)} \cdot 100 \% \quad (12)$$

5.3.2 Anforderungen

Die Kalibrierung von Taupunktspiegel-Hygrometern muss immer in der Messgröße Tau- bzw. Frostpunkt erfolgen und muss den ganzen Kalibrierbereich abdecken (Beispiel: ist ein Taupunktspiegel-Hygrometer für Kalibrierungen von relative Feuchte im Bereich von 5 % bis 95 % bei Temperaturen von 5 °C bis 95 °C vorgesehen, so ist dieses ab einer Frostpunkttemperatur von -29 °C bis zu einer Taupunkttemperatur von +94 °C zu kalibrieren). Das Kalibrierpunktintervall sollte der angestrebten Messunsicherheit und dem Messbereich angepasst sein (Empfehlung: maximal 15 K-Schritte). Das maximale Rekalibrierintervall für Taupunktspiegel-Hygrometer als Normale beträgt 24 Monate. Durch die Einführung von geeigneten Zwischenprüfungen kann der Unsicherheitsanteil einer möglichen Drift reduziert werden.

Aufgrund des optischen Detektierens und der Kondensatbildung auf dem Spiegel, muss dieser regelmäßig geprüft und gereinigt werden. Ein ausreichender Gasaustausch ist sicherzustellen. Hierzu sind die Herstellerangaben zu berücksichtigen. Wird das feuchte Gas über Leitungen zum Spiegel geführt, so darf im Leitungssystem kein Totvolumen vorhanden sein. Sollen Taupunkte nahe oder über Umgebungstemperatur gemessen werden, so sind alle Leitungsteile inkl. Messkopf des Taupunktspiegel-Hygrometers zu beheizen (z.B. mit einer Temperatur von 30 K oberhalb der Taupunkttemperatur). Für das Leitungssystem dürfen nur geeignete Materialien, die weder hygroskopisch sind, noch ein Absorption- oder Desorptionsverhalten zeigen, verwendet werden (z.B. polierte Edelstahlleitungen, Teflonschläuche). Ein konstanter Gasstrom zum Spiegel ist sicherzustellen.

Anforderungen zur Gastemperaturmessung siehe Kapitel 5.8.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	20 / 80

5.3.3 Einflussgrößen

Folgende Einflussgrößen sind zu ermitteln und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Die Einflussgrößen der Gastemperaturmessung sind in Kapitel 5.8 aufgeführt.

Kalibrierung

Die Messunsicherheit ist aus dem aktuellen Kalibrierschein zu entnehmen. Die Messabweichungen müssen bei der Bestimmung des richtigen Wertes oder in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Die Kalibrierpunkte müssen den gesamten Einsatzbereich der Frost- und Taupunkttemperatur abdecken. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Auflösung

Wird eine abweichende Auflösung für Berechnungen verwendet, als die Auflösung, mit welcher bei der Kalibrierung im Kalibrierschein gerechnet wurde, so ist diese in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Berechnungen

Die Unsicherheit der verwendeten Formeln (z.B. Dampfdruckgleichung), oder eine Vernachlässigung der Enhancement-Faktoren muss in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 5.9).

Tau-/ Frostunterscheidung

Bei einer Spiegeltemperatur zwischen -36 °C und 0 °C kann sich Wasser (d.h. es handelt sich um einen Taupunkt) **oder** Reif (d.h. es handelt sich um einen Frostpunkt) auf dem Spiegel bilden. Für weiterführende Berechnungen (z.B. Wasserdampfpartialdruck) muss je nach Spiegelbelag (Tau oder Reif) die entsprechende Berechnungsgleichung verwendet werden. Die Verwendung der falschen Formel führt zu erheblichen Rechenfehlern. Durch ein geeignetes Verfahren muss die Unterscheidung zwischen Wasser und Eis auf dem Spiegel sichergestellt werden (z.B. durch Kühlen des Spiegels auf unter -36 °C und Sicherstellung, dass danach die Temperatur des Spiegels 0 °C nicht übersteigt). Falls das nicht möglich ist, muss der mögliche Rechenfehler in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Nichtlinearität

Zwischen den Kalibrierpunkten des Bezugsnormals ist eine Interpolation zulässig. Eine mögliche zusätzliche Abweichung oder Nichtlinearität ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Langzeitverhalten

Anhand der Kalibrierhistorie ist eine mögliche Drift zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	21 / 80

Temperaturabhängigkeit Messkopf

Je nach Bauart des Messkopfes (Messeinheit mit Spiegel) kann es zu Umgebungstemperaturabhängigkeit der Spiegeltemperaturmessung kommen. Bei Modellen mit externem Messkopf ist dieser üblicherweise im Kalibriervolumen eingebaut und unterschiedlichen Umgebungstemperaturen ausgesetzt. Bei Geräten mit interner Messeinheit, kann diese optional beheizt werden, so dass der Messkopf bei unterschiedlichen Temperaturen betrieben werden kann. Die Temperaturabhängigkeit ist zu untersuchen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Thermische Rückwirkung

Bei Taupunktspiegel-Hygrometern mit externem Messkopf wird dieser üblicherweise im Kalibriervolumen zur Taupunkttemperaturbestimmung eingebaut. Zu beachten ist, dass aufgrund der Wärmeabgabe des Messkopfes (das Kühlen des Spiegels z.B. mittels eines Peltierelement erzeugt Abwärme) eine Rückwirkung auf das Kalibriervolumen entsteht, was z.B. zu Temperatur-Inhomogenitäten führen kann. Die Beeinflussung kann minimiert werden, indem z.B. unter Berücksichtigung der Richtung der Gasströmung in der Kalibrierkammer der Taupunktspiegel-Messkopfes so platziert wird, dass die Abwärme des Messkopfes nicht durch das Messvolumen strömt. Die Rückwirkung ist zu untersuchen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Druckabfall

Bei Taupunktspiegel-Hygrometern mit internem Messkopf muss das zu messende Gas über Leitungen zum Spiegel geleitet werden. Der dort entstehende Druckabfall ist zu bestimmen und der aus der Frost- oder Taupunkttemperatur berechnete Wasserdampfpartialdruck ist entsprechend Formel (13) zu korrigieren.

$$e'_C = e'_M \cdot \frac{p_C}{p_M} \quad (13)$$

Der Unsicherheitsanteil der Bestimmung ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Absolutdruck

Zur Korrektur des Druckabfalls, sowie zur Berechnung der Enhancement-Faktoren ist der Absolutdruck mit einem kalibrierten Barometer zu messen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	22 / 80

5.4 Psychrometer

5.4.1 Funktionsprinzip

Ein Psychrometer besteht aus zwei Thermometern. Ein Thermometer (Trockenföhler) dient zur Erfassung der Lufttemperatur (t). Das zweite Thermometer (Nassföhler) ist in ein feuchtes Material (Docht genannt) gehüllt, meist befeuchtetes Baumwollgewebe und dient zur Erfassung der Feuchttemperatur (t_w oder t_i). Je trockener das Gas ist, desto schneller verdunstet das Wasser, was mehr Verdunstungskälte erzeugt, die zu einer größeren Temperaturdifferenz zwischen den beiden Temperaturföhleren führt. Ein eingebauter Ventilator sorgt für eine ausreichende Umströmung des Feuchttemperaturföhlers und verhindert, dass der schon entstandene Wasserdampf die Verdunstung behindert. Aus der Lufttemperatur, Feuchttemperatur, der Psychrometerkonstante, die abhängig von Bauart und Strömungsgeschwindigkeit ist, und dem Absolutdruck können diverse Feuchtekenngößen bestimmt werden. Als Rechengrundlage wird DKD-L 5-1 [5] empfohlen.

5.4.2 Anforderungen

Voraussetzungen für genaue Messungen sind, dass der Feuchttemperaturföhler immer ausreichend befeuchtet wird, der Luftstrom konstant ist und das Psychrometer, das verwendete Wasser, sowie der befeuchtete Docht keine Verunreinigungen aufweisen.

Aufgrund der Verdunstung von Wasser, wird die Feuchtigkeit der Luft erhöht, was eine Rückwirkung auf das Kalibriermedium zur Folge haben kann.

Die Kalibrierung von Psychrometern kann in den Messgrößen Temperatur (Trockenthermometer sowie Feuchtthermometer) oder relative Feuchte erfolgen.

Bei Rückführung über die Temperaturen muss eine Kalibrierung im gesamten Einsatzbereich der Thermometer durchgeführt werden (Beispiel: ist ein Psychrometer für Kalibrierungen von relativen Feuchten im Bereich von 10 % bis 95 % bei Temperaturen von 10 °C bis 50 °C vorgesehen, so ist das Trockenthermometer mindestens im Bereich von 10 °C bis 50 °C und das Feuchtthermometer, abhängig von der Psychrometerkonstante, im Bereich von 1 °C bis 50 °C zu kalibrieren). Es gelten die Anforderungen aus Kapitel 5.8.

Zudem ist eine Validierung der Psychrometerkonstante und anderer Faktoren wie z.B. Dochtbefeuchtung, Strömungsgeschwindigkeit, Strahlungseinflüsse, die das Messergebnis beeinflussen, notwendig. Diese Untersuchung kann z.B. durch Vergleichsmessungen in relativer Feuchte erfolgen.

Wird eine Feuchtekalibrierung favorisiert, so muss die Kalibrierung bei mehreren Klimapunkten dem Einsatzbereich entsprechend durchgeführt werden (Es wird empfohlen, mindestens bei kleinster, mittlerer und höchster Temperatur jeweils drei Feuchtepunkte zu kalibrieren).

Das maximale Rekalibrierintervall für Psychrometer als Normale beträgt 24 Monate. Zudem ist die Einführung von geeigneten Zwischenprüfungen (z.B. vierteljährliche Überprüfung der Thermometer am Eispunkt oder Wassertripelpunkt) erforderlich.

5.4.3 Einflussgrößen

Neben den Einflussgrößen der Temperaturmessungen (siehe Kapitel 5.8), sind folgende Einflussgrößen zu ermitteln und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen:

Kalibrierung

Die Messunsicherheit ist aus dem aktuellen Kalibrierschein zu entnehmen. Die Messabweichungen müssen bei der Bestimmung des richtigen Wertes, oder in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Die Kalibrierpunkte müssen den gesamten Einsatzbereich abdecken. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	23 / 80

Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Auflösung

Wird eine abweichende Auflösung für Berechnungen verwendet, als die Auflösung, mit welcher bei der Kalibrierung im Kalibrierschein gerechnet wurde, so ist diese in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Berechnungen

Die Unsicherheit der verwendeten Formeln (z.B. Dampfdruckgleichung) oder Konstanten (z.B. Psychrometerkonstante), sowie eine Vernachlässigung der Enhancement-Faktoren muss in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 5.9).

Nichtlinearität

Zwischen den Kalibrierpunkten des Bezugsnormals wird interpoliert. Eine mögliche zusätzliche Abweichung oder Nichtlinearität ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen (siehe auch DKD-R 5-6, Tabelle 6.2 [7]). Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Gasdruckabhängigkeit

Zur Berechnung von Feuchtekenngößen wird neben der Psychrometerkonstante, Trocken- und Feuchttemperatur, auch der Absolutdruck benötigt. Dieser ist mit einem kalibrierten Barometer zu messen und die Unsicherheit der Druckmessung in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Langzeitverhalten

Aufgrund der Kalibrierhistorie ist eine mögliche Drift zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Verunreinigungen von Wasser und Docht

Bevorzugt sollte destilliertes oder demineralisiertes Wasser zur Befeuchtung verwendet werden. Da Kontaminationen und Verunreinigungen Messabweichungen hervorrufen können, ist die Sauberkeit von Wasser, Thermometer und Docht sicher zu stellen. Unsicherheiten aufgrund von durch Messaufgaben bedingten Kontaminationen des Psychrometer-Dochtes oder Wassers sind in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Eigenerwärmung

Die Eigenerwärmung der Temperaturfühler ist zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Die Eigenerwärmung in Luft kann deutlich höher sein, als die Eigenerwärmung in Flüssigkeiten. Dies ist insbesondere bei der Kalibrierung der Thermometer in Flüssigkeiten zu beachten.

Strömungsschwankungen im Psychrometer

Aufgrund der direkten Abhängigkeit des Verdunstungseffektes von der Strömungsgeschwindigkeit sind Unsicherheiten aufgrund von durch den Ventilator bedingten Strömungsschwankungen in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	24 / 80

5.5 Relativer Feuchtesensor

5.5.1 Funktionsprinzip

Sensoren dieser Kategorie messen direkt die relative Feuchte. Als Sensorelement kommen kapazitive Polymersensoren oder resistiv-elektrolytische Sensoren zum Einsatz. Das Sensorsignal wird elektronisch in relative Feuchte umgerechnet. Andere Messprinzipien, wie beispielsweise resistive Festkörpersensoren, werden nicht als Bezugsnormale empfohlen.

5.5.2 Anforderungen

Werden relative Feuchtesensoren als Bezugsnormale eingesetzt, müssen mindestens zwei Normale (Diversität empfohlen) gleichzeitig verwendet werden. Die Differenz zwischen beiden Normalen ist in der Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Die Feuchtesensoren müssen im gesamten Einsatzbereich (Klimabereich) kalibriert werden. Der Abstand zwischen den Kalibrierpunkten der relativen Feuchte sollte 20 % nicht überschreiten (abhängig von der angestrebten Messunsicherheit). Wenn die Einsatztemperatur des Normals um mehr als ± 3 K von der Temperatur aus dem Kalibrierschein des Normals abweicht, ist das Normal bei mindestens zwei Temperaturen, die den gesamten Einsatzbereich einschließen, bei jeweils mehreren Feuchtepunkten zu kalibrieren. Wenn diese beiden Temperaturen mehr als 10 K voneinander abweichen, sollte bei entsprechend mehreren Temperaturen kalibriert werden (abhängig von der angestrebten Messunsicherheit).

Das maximale Rekalibrierintervall für relative Feuchtesensoren als Normale beträgt 12 Monate.

Es sollten Maßnahmen eingeführt werden, welche die Gefahr von zusätzlichen Driften reduzieren. Hierzu zählt die Vermeidung der Anwesenheit von Schadstoffen oder Schadgasen. Dies beinhaltet:

- Sauberkeit der Kalibriereinrichtung
- besonders gründliche Untersuchung der Kalibriergegenstände auf Kontaminationen
- Einsatz nur von geeigneten Reinigungsmitteln im Labor
- Lagerung der Sensoren in geeigneten Behältern oder Materialien
- ggf. vorübergehende Entfernung der Normale bei Umbauarbeiten oder Renovierungen im Laborbereich

Zudem ist die Einführung von geeigneten Zwischenprüfungen erforderlich, ansonsten sind mindestens 2 % Drift bei einem Rekalibrierintervall von 12 Monaten als Rechteckverteilung in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Das Zwischenprüfungsintervall sollte 1 Monat nicht überschreiten. Geeignete Maßnahmen mit ausreichend kleiner Unsicherheit sind zum Beispiel:

- Prüfung mit einer höherwertigen Referenz (z.B. Feuchtegenerator)
- Prüfung mittels nicht-konzentrierten (ungesättigten) Salzlösungen
- Vergleich mit einem für die Kalibrierung nicht genutzten Feuchtesensor

Die Zwischenprüfungen sind zu dokumentieren und die festgelegten Grenzwerte sind in der Messunsicherheit zu berücksichtigen. Bei Überschreitung der Grenzwerte sind geeignete Maßnahmen einzuleiten.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	25 / 80

5.5.3 Einflussgrößen

Folgende Einflussgrößen sind zu ermitteln und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen:

Kalibrierung

Die Messunsicherheiten sind aus dem aktuellen Kalibrierschein zu entnehmen. Die Messabweichungen müssen bei der Bestimmung des richtigen Wertes oder in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Die Kalibrierpunkte müssen den gesamten Einsatzbereich (Klimabereich) abdecken. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Auflösung

Wird eine abweichende Auflösung für Berechnungen verwendet, als die Auflösung, mit welcher bei der Kalibrierung im Kalibrierschein gerechnet wurde, so ist diese in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Nichtlinearität

Zwischen den Kalibrierpunkten der relativen Feuchte der Bezugsnormale ist eine Interpolation zulässig. Eine mögliche zusätzliche Abweichung oder Nichtlinearität ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Abhängig von den Abständen zwischen den Kalibrierpunkten der relativen Feuchte ist ein höherer oder niedriger Unsicherheitsbeitrag anzusetzen. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Temperaturabhängigkeit

Werden die Normale für Kalibrierungen der relativen Feuchte bei unterschiedlichen Temperaturen eingesetzt, so muss bei entsprechend mehreren Temperaturen kalibriert werden. Eine mögliche Abweichung zwischen den Kalibrierpunkten der relativen Feuchte bei unterschiedlichen Temperaturen ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Abhängig von den Abständen zwischen den Kalibriertemperaturen ist ein höherer oder niedriger Unsicherheitsbeitrag anzusetzen.

Langzeitverhalten

Anhand der Kalibrierhistorie ist eine mögliche Drift zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Wiederholbarkeit / Kurzzeitstabilität

Je nach kalibrierten Feuchtwerten, deren Abfolge und Historie kann es zu veränderten Messwerten kommen. Die Abschätzung muss in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Eigenerwärmung

Die Eigenerwärmung ist zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Die Bestimmung kann z.B. bei der Kalibrierung nach Kapitel 7.4.3 erfolgen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	26 / 80

Thermische Ankopplung

Durch geeigneten Einbau in die Kalibriereinrichtung sind Messabweichungen aufgrund mangelnder thermischer Ankopplung (wie z.B. Wärmeableitungen) zu vermeiden. Diese sind zu untersuchen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Eine Untersuchung der Wärmeableitungen kann erfolgen, indem z.B. 1 m Sensorkabel in die Kalibriereinrichtung mit eingebaut wird und stückweise herausgezogen wird.

Hysterese

Die Hysterese ist bei der Verwendung von relativen Feuchtesensoren als Normale bei Kalibrierungen zwingend zu berücksichtigen (z.B. Kalibrierung nach Kapitel 9.3.1 – Ablauf A1). Sollte diese nicht bestimmt werden, sind mindestens 3 % relative Feuchte (Rechteckverteilung) anzusetzen.

5.6 Mechanische Hygrometer

Mechanische Hygrometer zur direkten Erfassung der relativen Feuchte eignen sich nicht als Bezugs- oder Gebrauchsnormale für Kalibrierungen.

5.7 Salzlösungen

Salzlösungen als Referenzmaterial oder zertifiziertes Referenzmaterial eignen sich nicht im Rahmen dieser Richtlinie als Rückführung der relativen Feuchte, können aber, bei sorgfältiger und richtiger Anwendung, für Zwischenprüfungen verwendet werden.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	27 / 80

5.8 Gastemperatur

Bei Kalibrierungen der relativen Feuchte ist die Gastemperatur (Lufttemperatur) immer hinreichend genau mit zu bestimmen. Mit Widerstandsthermometer können kleinste Messunsicherheiten erreicht werden.

5.8.1 Anforderungen

Für die Erfassung der Gas- oder Lufttemperatur gelten die Anforderungen der DKD-R 5-1 [1]. Die Kalibrierpunkte der Temperatur müssen den gesamten Einsatzbereich abdecken.

Bei Messungen sollte besonders auf die Eigenerwärmung, die thermische Ankopplung (Wärmeableitung) und auf Strahlungseinflüsse geachtet werden. Beispielsweise kann die Eigenerwärmung in Luft deutlich höher sein als in Flüssigkeiten. Für den Fall, dass eine Kennlinie bestimmt werden soll, wird auf die Richtlinie DKD-R 5-6 [7] verwiesen. Die Einführung von geeigneten Zwischenprüfungen wird empfohlen, z.B. regelmäßige Überprüfung am Eispunkt, sowie Messung des Isolationswiderstandes.

5.8.2 Einflussgrößen

Bei der Verwendung von Widerstandsthermometern zur Erfassung der Gastemperatur sind mindestens nachfolgende Einflussgrößen zu berücksichtigen (siehe DKD-R 5-1 [1]):

Kalibrierung

Die Messunsicherheit ist aus dem aktuellen Kalibrierschein zu entnehmen. Die Messabweichungen müssen bei der Bestimmung des richtigen Wertes durch Korrektur oder in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden. Die Kalibrierpunkte müssen den gesamten Einsatzbereich abdecken. Eine Extrapolation ist nicht zulässig.

Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Auflösung

Wird eine abweichende Auflösung für Berechnungen verwendet, als die Auflösung, mit welcher bei der Kalibrierung im Kalibrierschein gerechnet wurde, so ist diese in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Nichtlinearität

Zwischen den Kalibrierpunkten des Bezugsnormals wird interpoliert. Eine Extrapolation ist nicht zulässig. Eine mögliche zusätzliche Abweichung oder Nichtlinearität ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen, dasselbe gilt auch im Falle einer Kennlinienbestimmung (siehe auch DKD-R 5-6, Tabelle 6.2 [7]).

Langzeitverhalten

Anhand der Kalibrierhistorie ist eine mögliche Drift zu bestimmen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	28 / 80

Thermische Ankopplung

Werden Kalibrierungen bei ungenügender thermischer Ankopplung oder unzureichender Einbautiefe durchgeführt, können hieraus erhebliche Messabweichungen resultieren.

Um z.B. Wärmeableitungen zu vermeiden, sollte – sofern möglich – das komplette Bezugsnormale, inklusive Verbindungskabel (sofern vorhanden mindestens 1 m) in die Kalibrierungseinrichtung eingebaut werden und der Kalibriertemperatur ausgesetzt sein. Ansonsten sind Untersuchungen durchzuführen und deren Ergebnisse zur thermischen Ankopplung in der Messunsicherheit zu berücksichtigen.

Elektrisches Messverfahren

Zur Messung des elektrischen Widerstandes des Sensorelementes ist ein geeignetes Messgerät und Messverfahren auszuwählen und richtet sich nach der angestrebten Messunsicherheit. Die Eigenschaften sind in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Anschlusschnik

Zur Messung des elektrischen Widerstandes des Sensorelementes kann zwischen 2-, 3- und 4-Leiter-Schaltung ausgewählt werden. Bei Verwendung von niederohmigen Sensoren (z.B. Pt100) sollte eine 4-Leiter-Schaltung bevorzugt werden. Bei hochohmigen Sensorelementen (z.B. NTC) kann auch eine 2-Leiter-Schaltung ausreichend sein. Eine mögliche Abweichung, die durch Leitungswiderstände entstehen kann, muss dann untersucht und in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Parasitäre Thermospannungen

Mögliche Einflüsse durch parasitäre Thermospannungen im Messkreis des Bezugsnormals müssen in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

Eigenerwärmung

Die Messstromstärke zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes des Sensorelementes führt zu einer Erwärmung desselben. Diese Eigenerwärmung ist nicht nur von der Stärke des Messstroms abhängig, sondern auch vom Messmedium. So ist in Luft mit einer höheren Eigenerwärmung zu rechnen, als in einer Flüssigkeit.

Neben der Eigenerwärmung kann auch eine Sensor- oder Geräteerwärmung durch integrierte Elektronik und deren Verlustleistung erfolgen.

Die Eigenerwärmung sowie Geräteerwärmung ist bei den verwendeten Bezugsnormalen zu untersuchen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

Isolationswiderstand

Eine regelmäßige Überprüfung des Isolationswiderstandes im Rahmen von Zwischenprüfungen (z.B. bei Pt100 nach DIN EN 60751, IEC 60751) wird empfohlen, da z.B. bei hohen Feuchten die Gefahr von Absorption von Wasserdampf durch den Sensoraufbau besteht, was zu einem Parallelwiderstand zum Messelement und somit zu einer möglichen Messabweichung führen kann.

Hysterese

Hystereseeffekte der verwendeten Bezugsnormale sind zu untersuchen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	29 / 80

5.9 Berechnungsgleichungen

Wird die relative Feuchte nicht direkt gemessen, sondern aus den Messwerten eines Taupunktspiegel-Hygrometers berechnet, oder primär mit einem 2-Druck-2-Temperatur-Feuchtegenerator erzeugt, so sind vorzugsweise die Formeln nach DKD-L 5-1 [5] zu verwenden. Die Unsicherheiten der verwendeten Berechnungsgleichungen, sowie die Rechenauflösungen sind in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Dabei ist zu beachten, dass diese Unsicherheiten abhängig vom Messprinzip und Berechnungsgleichung je nach Feuchtebereich deutlich unterschiedlich sein können. Bei der Auswahl der Berechnungsgleichungen muss der Bezug auf die Sättigung über Wasser oder Eis, bzw. den Taupunkt oder Frostpunkt bekannt und entsprechend berücksichtigt werden. Ist eine Unterscheidung nicht möglich, oder werden Berechnungen wie z.B. Enhancement-Faktor oder Druckabfall-Korrektur nicht durchgeführt, sind die möglichen daraus resultierenden Fehler zur Gänze in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

5.10 Analogsignale

Für die Kalibrierung von Kalibriergegenständen mit analogen Ausgangssignalen (z.B. Spannungssignal mit 0 V bis 10 V, oder Stromstärkesignal mit 4 mA bis 20 mA) wird ein Multimeter benötigt. Dieses muss im gesamten Einsatzbereich kalibriert sein. Die Einflussfaktoren des verwendeten Multimeters und des Messaufbaus sind in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Hierzu zählen unter anderem: die Messunsicherheit aus dem Kalibrierschein des Multimeters, Langzeitverhalten, Nichtlinearität, Thermospannungen, Shuntwiderstände und deren Temperaturabhängigkeiten.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	30 / 80

6 Kalibriereinrichtung

Für die Kalibrierung von Hygrometern wird zur Erzeugung von definierten Klimabedingungen (Temperatur und Feuchte) eine Kalibriereinrichtung benötigt. Da diese einen signifikanten Einfluss auf die Messunsicherheit haben kann, ist eine umfangreiche Validierung dieser notwendig.

6.1 Gerätegruppen

Für die Generierung von Klimabedingungen gibt es unterschiedliche Gerätearten, die sich in folgende Kategorien einordnen lassen.

6.1.1 Druck- / Temperatur – Feuchtgenerator

Diese Feuchtgeneratoren erzeugen einen definierten Gasstrom mit bekannter Feuchte, der in eine Kalibrierkammer geleitet wird. Häufig arbeiten diese nach dem 2-Druck-Prinzip. Weitere Ausführungen sind 2-Temperatur- oder 2-Druck-2-Temperatur-Feuchtgeneratoren. Die Referenzwertbestimmung erfolgt über Druck- und Temperaturmessung.

6.1.2 Klimaschrank

Klimaschränke (Volumina von z.B. größer 100 l) besitzen einen eingebauten Temperatur- und Feuchtesensor oder ein spezielles Psychrometer zur Regelung. Zur Reduzierung der Messunsicherheiten kann z.B. nur ein Teil der Kammer als Kalibriervolumen definiert werden. Es sollten vom Klimaschrank unabhängige Normale zur Referenzwertbestimmung verwendet werden, welche zusammen mit dem Kalibriergegenstand innerhalb des Kalibriervolumens platziert werden.

6.1.3 Mischgasgenerator

Mischgasgeneratoren (oft auch Feuchtekalibratoren genannt) haben im Vergleich zu Klimaschränken kleine Kalibrierkammern (z.B. 1 l bis 20 l), die speziell für die Kalibrierung von Hygrometern konzipiert sind. Zur Regelung ist ein Feuchtesensor oder Taupunktspiegel-Hygrometer mit einem Temperatursensor installiert. Die internen Regelsensoren können zur Referenzwertbestimmung verwendet werden, sofern diese rückführbar kalibriert sind. Dabei sind die Anforderungen nach Kapitel 5 zu berücksichtigen.

6.1.4 Salzlösung

Salzlösungen können für die Darstellung einer Feuchte verwendet werden, allerdings sind separate Referenzmessgeräte notwendig. Um stabile Feuchtwerte zu erhalten, muss für eine hohe Temperaturkonstanz sowie Dichtigkeit und Sauberkeit des Aufbaus gesorgt werden. Es ist sicherzustellen, dass sich das Gleichgewicht über der Lösung im Kalibriervolumen eingestellt hat, sowie keine Salzaerosole Bezugsnormal oder Kalibriergegenstand schädigen. Aufgrund der fehlenden Luftumwälzung ist mit einer langen Angleichzeit zu rechnen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	31 / 80

6.2 Einflussgrößen

Die Eigenschaften und Einflussgrößen der Kalibriereinrichtung müssen im Rahmen der Ermittlung der Messunsicherheit quantitativ bestimmt und berücksichtigt werden. Zuerst gilt es das Kalibriervolumen zu definieren. Üblicherweise ist dies die gesamte Kammer oder bei Klimaschränken auch nur ein Teilbereich. An jedem Eckpunkt und im Raumzentrum ist ein Messort festzulegen. Das Raumzentrum sollte als Referenzmessort definiert werden. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Messorten darf 50 cm nicht überschreiten, ansonsten ist die Anzahl der Messortpunkte zu erhöhen. Diese Messorte dienen zur Charakterisierung des Kalibriervolumens.

Die nachfolgend beschriebenen Messungen können auf die verschiedenen Messgrößen, wie z.B. Temperatur und Feuchte, angewendet werden.

Durch direkte Messung der relativen Feuchte sind Inhomogenitäten des Wasserdampfpartialdrucks und der Temperatur bereits im Messergebnis berücksichtigt, da die relative Feuchte von der Gastemperatur abhängig ist. Allerdings fehlt die Information, welche Eingangsgröße die Verteilung beeinflusst. Deshalb ist es ratsam, immer die Gastemperatur mit zu messen und auszuwerten, da die Temperatur oft einen dominanten Einfluss auf räumliche Inhomogenitäten hat. Durch Umrechnung der relativen Feuchte auf eine absolute Größe (z.B. Wasserdampfpartialdruck oder Taupunkt), oder durch direkte Messung (z.B. Taupunkttemperatur) ist eine Trennung der Einflussgrößen in Temperatur und absolute Feuchte möglich.

6.2.1 Räumliche Inhomogenität

Die räumliche Inhomogenität wird als maximale Abweichung der relativen Feuchte eines Messortes zum Referenzmessort bestimmt. Die Ursache kann zum einen die Verteilung des Wasserdampfes (absolute Feuchte) sein und zum anderen die Verteilung der Temperatur, da die relative Feuchte von der Temperatur abhängig ist. Bei Kalibrierkammern mit ausreichend starker Luftumwälzung kann die räumliche Verteilung der absoluten Feuchte homogen sein. Allerdings können Beladungen, Undichtigkeiten an Türdichtungen oder Durchführungen, sowie Be- und Entfeuchtungsanlage Inhomogenitäten hervorrufen. Die Anzahl der erforderlichen Messpunkte (Temperatur und Feuchte) zur Ermittlung der Inhomogenitäten richtet sich nach dem geplanten Einsatzbereich und der Kalibrierkammerausführung. Empfohlen wird Messungen bei niedriger und hoher Feuchte im gesamten Temperaturbereich in 20 K Temperaturschritten durchzuführen und einige Punkte erneut zu messen, um die Wiederholbarkeit zu bestimmen.

Die Messung der räumlichen Inhomogenitäten⁵ kann entweder durch gleichzeitige Platzierung von Sensoren (gleiche Bauart empfohlen) an jedem Messort und am Referenzmessort, oder durch Verwendung von zwei Sensoren erfolgen. Im letzteren Falle wird der erste Sensor am Referenzmessort fix platziert und der zweite Sensor durchläuft die Messorte nacheinander. Zu Beginn und am Ende werden beide Sensoren eng zueinander am Referenzmessort verglichen. Die maximale Abweichung der relativen Feuchte (oder nach Temperatur und absoluter Feuchte getrennt) eines Messortes zum Referenzmessort ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Abhängig vom Kalibrieraufbau muss eine Einordnung der Verteilungsart (z.B. Rechteck) erfolgen.

⁵ Bei größeren Kalibrierkammern (z.B. bei Klimaschränken) wird empfohlen, immer mehrere Normal-Thermometer gleichzeitig zu verwenden, um bei jeder Kalibrierung die räumliche Temperaturverteilung zu bestimmen. Dasselbe gilt für die Bestimmung des Strahlungseinflusses.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	32 / 80

6.2.2 Zeitliche Instabilität

Die zeitliche Instabilität für die Feuchte wird aus der Registrierung des zeitlichen Verlaufes der relativen Feuchte, oder nach Temperatur und absoluter Feuchte getrennt, über einen Zeitraum von mindestens 30 min nach Einstellung des eingeschwungenen Zustandes bestimmt. Der eingeschwungene Zustand gilt als erreicht, wenn keine systematischen Änderungen mehr feststellbar sind. Für die Messung der zeitlichen Instabilität sind in 30 min mindestens 30 Messwerte mit ungefähr konstantem Zeitintervall zu registrieren. Die zeitliche Instabilität ist in der Messunsicherheitsbilanz zur berücksichtigen. Empfohlen wird die maximal auftretende Schwankungsbreite (Amplitude) zum Mittelwert.

6.2.3 Strahlungseinfluss

Körper können aufgrund von Wärmeaustausch durch Strahlung eine von der Gastemperatur abweichende Temperatur annehmen. Dies gilt zum einen für die verwendeten Bezugs- oder Gebrauchsnormale, sowie für die Kalibriergegenstände. Der Strahlungseinfluss hängt von der Gastemperatur, dem Emissionsgrad ε und der Temperatur der Wärmequelle oder Wärmesenke und des Feuchtesensors und deren Oberflächen, der geometrischen Anordnung, sowie der Gasgeschwindigkeit ab. Typische Quellen von Strahlungseinflüssen sind:

- abweichende Oberflächentemperatur der Kammer zur Gastemperatur (Wandisolierung, Scheibe)
- beheizte Scheiben oder Türdichtungen
- Beladung (z.B. Geräte mit Abwärme innerhalb der Kalibrierkammer)
- Kammerbeleuchtung
- Heiz- oder Kühlelemente
- Durchführungen

Der Strahlungseinfluss wird mit steigender Temperaturdifferenz, steigender Oberfläche, sowie steigendem Emissionsgrad größer. Zusätzlich steigt dieser Einfluss mit der absoluten Temperatur überproportional an. Die Ermittlung des Strahlungseinflusses kann durch Messung der Temperatur im Zentrum des Kalibriervolumens mit einem Thermometer mit möglichst großem (d.h. $\varepsilon > 0,6$) und einem Thermometer mit möglichst kleinem Emissionsgrad (d.h. $\varepsilon < 0,15$) erfolgen. Eine empfohlene Anordnung ist die Verwendung eines Thermometers mit einer vergoldeten Oberfläche (niedriger Emissionsgrad) sowie eines Thermometers mit einer Teflon- oder geschwärzten Oberfläche (hoher Emissionsgrad). Die Emissionsgrade beider Thermometeroberflächen müssen hinreichend genau bekannt sein, vor allem im infraroten Wellenlängenbereich. Speziell für die Realisierung des kleinen Emissionsgrades muss eine Oxidation und Rauheit der Oberfläche vermieden werden. Das Thermometer mit kleinem Emissionsgrad zeigt dabei näherungsweise die Gastemperatur an. Die Gastemperatur ergibt sich dabei durch Extrapolation auf den Emissionsgrad $\varepsilon = 0$. Die festgestellte Differenz beider Thermometer ist ein Maß für den Strahlungseinfluss.

Die Gastemperatur kann auch mit einem Thermometer gemessen werden (niedriger Emissionsgrad empfohlen), das mit einem Strahlungsschirm (ebenfalls niedriger Emissionsgrad empfohlen) gegen Strahlungseinflüsse abgeschirmt ist. Dieser Strahlungsschirm muss ventiliert werden oder durch seine Anordnung und Bauform eine ausreichende Umströmung des Thermometers sichern. Mit dem Thermometer wird mit dem Strahlungsschirm näherungsweise die Gastemperatur gemessen. Diese kann dann mit einem Thermometer mit hohem Emissionsgrad und ohne Strahlungsschirm verglichen werden, um den Strahlungseinfluss zu bestimmen.

Der gesamte Strahlungseinfluss muss komplett als Rechteckverteilung in der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	33 / 80

6.2.4 Druckdifferenzen

Druckdifferenzen in der Kalibriereinrichtung, die z.B. in separaten Durchfluskkammern, in Rohrleitungen von Feuchtegeneratoren oder durch unterschiedliche Platzierung von Bezugsnormale und Kalibriergegenstand entstehen können, führen zur Änderung der Feuchte. Deshalb sind diese zu bestimmen, nach Möglichkeit zu korrigieren und in der Messunsicherheit zu berücksichtigen.

6.2.5 Strömungsverhältnisse

Im Kalibriervolumen ist die Strömungsrichtung der Luft zu bestimmen. Die Bezugs- oder Gebrauchsnormale sollten falls möglich parallel zur Strömungsrichtung und zum Kalibriergegenstand platziert werden, um eine gegenseitige Beeinflussung durch Abwärme, bedingt durch Verlustleistung zu minimieren. Alternativ kann der Referenzsensor stromaufwärts vor dem Kalibriergegenstand platziert werden, wenn die Abwärme bestimmt wurde und vernachlässigbar ist. Da die Angabe der Strömungsgeschwindigkeit oder der Luftwechselrate am Kalibriergegenstand im Kalibrierschein sinnvoll ist, muss mindestens einer von beiden Parametern bestimmt werden.

6.2.6 Rückwirkungen

Bei Verwendung von Geräten mit Eigenerwärmung oder Wärmeabgabe (z.B. Taupunktspiegel-Hygrometer mit externem Messkopf), muss die Auswirkung auf das Referenzsystem (z.B. Temperaturhomogenität) berücksichtigt werden. Eine gegenseitige Beeinflussung von Bezugs- oder Gebrauchsnormale und Kalibriergegenständen ist zu vermeiden. Dasselbe gilt für Geräte, die die Feuchtigkeit beeinflussen (z.B. Verdunstung bei Psychrometern). Die Rückwirkungen auf Bezugs- oder Gebrauchsnormale, Kalibriereinrichtung und Kalibriergegenstand sind zu vermeiden und im Kalibrieraufbau, sowie ggf. in der Messunsicherheitsbestimmung zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	34 / 80

7 Elektronische Kalibriergegenstände

7.1 Gerätearten

Diese Kalibrierrichtlinie ist anzuwenden bei der Kalibrierung von elektronischen Hygrometern, welche die relative Gasfeuchte direkt messen und gilt nicht für Geräte, welche die relative Feuchte aufgrund anderer Messgrößen berechnen wie z.B. Taupunktspiegel-Hygrometer oder Psychrometer.

7.1.1 Sensorelement

Folgende Sensorarten werden bei Hygrometern zur direkten Messung der relativen Gasfeuchte verwendet:

- resistive Festkörpersensoren
- kapazitive Polymersensoren
- resistiv-elektrolytische Sensoren

7.1.2 Messumformung

Das feuchtesensitive Sensorsignal wird von einer Elektronik in einen entsprechenden Messwert gewandelt und kann in unterschiedlichen Formen dargestellt werden:

- als Anzeigewert auf einem Display oder Monitor
- als Digitalwert, welcher über eine Schnittstelle (z.B. RS232) übertragen wird
- als Messwert über eine gesicherte Funkverbindung
- als Messwert im Speicher eines Datenloggers
- als Zuordnung zu einem analogen Ausgangssignal (z.B. 4 mA bis 20 mA)

7.2 Kalibrierfähigkeit

Kalibrierfähig sind alle Hygrometer, die den allgemeinen Regeln der Technik und den Herstellerangaben entsprechen, wobei eine Herstellerspezifikation vorliegen sollte. Die Eignung der Hygrometer für den Kalibrierauftrag ist durch eine Beschaffenheitsprüfung und Funktionskontrolle festzustellen. Beobachtungen, Auffälligkeiten, sowie relevante Geräteparameter (z.B. Abgleichdaten) sind zu dokumentieren. Bei festgestellten Unregelmäßigkeiten ist eine Rücksprache mit dem Kunden zu treffen.

7.2.1 Funktionsprüfung

Neben einer umfangreichen Sichtprüfung auf Vollständigkeit und Beschädigung, ist die Lesbarkeit der Beschriftungen zu prüfen. Vor allem im Bereich der Schutzkappe und des Messelementes ist eine genaue Untersuchung auf Schäden, Kontamination und Sauberkeit, erforderlich. Bei Mehrkanalgeräten muss die genaue Zuordnung von Sensor oder Fühler zu den Gerätekanälen vorliegen oder angegeben sein (davon ausgenommen sind Sensoren mit digitaler Übertragung). Der Kalibriergegenstand muss frei von Kontaminationen sein und keine Stoffe abgeben, welche die Kalibriereinrichtung und Referenzsysteme beeinflussen oder schädigen können.

Vor der Kalibrierung sollte die Bedienungsanleitung des Kalibriergegenstandes sorgfältig studiert werden, damit die Funktionsweise und die Bedienung bekannt sind. Die technischen Daten des Kalibriergegenstandes müssen vorliegen, damit Informationen über Stromversorgung, Messwertanzeige oder Messumformung vorhanden sind. Eine besondere Beachtung sollte dem Stromverbrauch oder der Verlustleistung beigemessen werden, um eine mögliche Eigenerwärmung identifizieren zu können. Besondere Vorsicht gilt bei Sensoren mit integrierter Heizung. In diesem Falle muss die Funktionsweise genau bekannt sein und bei der Kalibrierung berücksichtigt werden. Bei Kalibriergegenständen mit Messwertspeicherung (z.B. Datenlogger) muss die Messrate, die Art der Speicherung und evtl. Mittelwertbildung bekannt

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	35 / 80

sein. Sollte das Gerät vor der Inbetriebnahme die Eingabe von Abgleichdaten oder Sensorkoeffizienten benötigen, so ist dies zu berücksichtigen. Am Kalibriergegenstand ist eine Funktionsprüfung durchzuführen und falls benötigt mit zusätzlichem Test der Bedienelemente und Schnittstelle.

7.2.2 Vorbehandlung

Ein spezieller Alterungsprozess ist nicht sinnvoll. Stattdessen sollte eine Vorbehandlung in Form einer Lagerung bei Raumbedingungen von mindestens 24 h erfolgen. Hierzu ist das Gerät aus der Verpackung zu nehmen. Bei Kalibrierungen vor Ort sind die Einsatzbedingungen zu berücksichtigen.

7.3 Verpackung

Bei der Verwendung von Verpackungsmaterialien, Schaumstoffen, Behältern oder Transportkisten ist darauf zu achten, dass diese nicht durch Ausgasungen von Schadstoffen eine Drift oder Zerstörung des Feuchtesensors hervorrufen. Nicht geeignete Materialien dürfen nicht verwendet werden. Vorzugsweise sollte die Herstellerpackung verwendet werden.

7.4 Einflussgrößen

Die jeweiligen Einflussgrößen sind von der Sensorart und Gerätebauart stark abhängig und deshalb für jeden Kalibriergegenstand individuell zu bestimmen.

7.4.1 Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

7.4.2 Auflösung

Die Auflösung des Messwertes ist in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Die Auflösung kann nicht höher sein als die Anzeige- / Ableseauflösung.

7.4.3 Eigenerwärmung

Die Eigenerwärmung kann bedingt bestimmt werden, indem das Feuchtemessgerät erst dann eingeschaltet wird, wenn die Kalibrierkammer eingeregelt ist und der Kalibriergegenstand sich vollständig der Feuchte angeglichen hat. Dabei sind die Mindest-Einschwingzeiten laut Herstellerangaben zu berücksichtigen. Anhand der durch die Temperaturerhöhung bedingten Messwertänderung lässt sich die Eigenerwärmung anhand der Differenz zwischen dem Messwert unmittelbar nach dem Einschalten und nach einer Angleichzeit von mindestens 30 min abschätzen.

Die Eigenerwärmung kann auch durch Messungen bei stark unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgen (z.B. im Klimaschrank bei 3 m/s Strömungsgeschwindigkeit – geringe Eigenerwärmung und im Feuchtegenerator bei nahezu 0 m/s – hohe Eigenerwärmung).

Die Eigenerwärmung ist in der Messunsicherheit zu berücksichtigen, oder im Kalibrierschein als Wert anzugeben.

Kundenanforderungen an die Strömungsgeschwindigkeit sind bei der Kalibrierung, sofern darstellbar, zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	36 / 80

7.4.4 Thermische Ankopplung

Werden Kalibrierungen bei ungenügender thermischer Ankopplung oder unzureichender Einbautiefe durchgeführt, können hieraus erhebliche Messfehler resultieren.

Um z.B. Wärmeableitungen zu vermeiden, sollte – sofern möglich – der komplette Kalibriergegenstand, inklusive Verbindungskabel (sofern vorhanden mindestens 1 m) in die Kalibrier-einrichtung eingebaut werden und der Kalibriertemperatur ausgesetzt sein. Ansonsten sind Untersuchungen durchzuführen. Diese können auf zwei Weisen erfolgen:

1. Stückweises „Herausziehen“ um z.B. 10 % der Eintauchtiefe, zur Feststellung der Wärmeableitung;
2. Vergleichsmessung mit einem Referenzsystem „ohne Wärmeableitung“.

Die Wärmeableitung kann in der Größenordnung von 10 % der Differenz zwischen Kalibriertemperatur und Umgebungstemperatur betragen und muss in der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

7.4.5 Hysterese

Die Bewertung einer möglichen Hysterese ist abhängig vom gewählten Kalibrierablauf. Eine Untersuchung und Berücksichtigung erfolgt mit den Kalibrierabläufen A1 und A2 (siehe Kapitel 9.3.1, bzw. 9.3.2). Bei Kalibrierablauf D (siehe Kapitel 9.3.7) gilt die jeweilige Kundenanforderung. Alle anderen Abläufe beinhalten keine Berücksichtigung einer möglichen Hysterese.

7.4.6 Einflüsse aus Umgebungsbedingungen

Sind Umgebungseinflüsse vorhanden, sind diese zu berücksichtigen.

7.4.7 Analogsignale

Wird der Messwert der relativen Feuchte des Kalibriergegenstandes in Form eines Analogsignals ausgegeben (z.B. 4 mA bis 20 mA), so ist dieses mit einem kalibrierten Multimeter zu messen (siehe Kapitel 5.10) und anhand der Skalierung in relative Feuchte umzurechnen. Es wird empfohlen beide Werte, Analogsignal und die daraus berechnete relative Feuchte, sowie die Skalierung im Kalibrierschein anzugeben.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	37 / 80

8 Mechanische Kalibriergegenstände

8.1 Gerätearten

Neben den in Kapitel 7 beschriebenen elektronischen Kalibriergegenständen ist diese Kalibrierrichtlinie auch auf die Kalibrierung von mechanischen Hygrometern anwendbar, die die relative Gasfeuchte direkt messen, aber gilt nicht für Geräte, die die relative Feuchte aufgrund anderer Messgrößen berechnen wie z.B. Psychrometer.

8.1.1 Messelement

Das Messprinzip beruht auf einer Längenänderung eines Stoffes. Als Messelement werden diverse Haare, Baumwollfäden, Kunststofffäden oder Vliese verwendet. Mit zunehmender relativer Feuchte nimmt die Länge des Messelementes zu. Eine Übersetzung bringt die Längenänderung auf einen Zeiger. Bei Hygrographen erfolgt die Messwertübertragung auf einen Schreibhebel, der ein auf einer Trommel befestigtes Diagrammpapier beschreibt, oder ein aufgewickeltes Endlospapier.

8.2 Kalibrierfähigkeit

Kalibrierfähig sind alle Hygrometer, die den allgemeinen Regeln der Technik und den Herstellerangaben entsprechen, wobei eine Herstellerspezifikation vorliegen sollte. Die Eignung der Hygrometer für den Kalibrierauftrag ist durch eine Beschaffenheitsprüfung und Funktionskontrolle festzustellen. Beobachtungen, Auffälligkeiten, sowie relevante Gerätedaten (z.B. Diagrammpapiertyp) sind zu dokumentieren. Bei festgestellten Unregelmäßigkeiten ist eine Rücksprache mit dem Kunden zu treffen.

8.2.1 Funktionsprüfung

Vor der Kalibrierung sollte die Bedienungsanleitung des Gerätes sorgfältig studiert werden, damit die Funktionsweise bekannt ist. Hygrometer müssen in der vorgesehenen Aufstellung kalibriert werden, normalerweise senkrechte Position. Der Kalibriergegenstand muss frei von Kontaminationen sein und keine Stoffe abgeben, die die Kalibriereinrichtung und Referenzsysteme beeinflussen oder schädigen können.

Bei Trommel- oder Bandschreibern ist die Funktionsfähigkeit zu prüfen. Bei der Kalibrierung ist zu beachten, dass das vorgeschriebene Diagrammpapier und die passenden Schreibstifte in Originalform verwendet werden. Das Papier muss an der Unterkante der Trommel aufliegen. Bei schnellen Feuchtewechseln besteht die Gefahr, dass das Diagrammpapier auf der Trommel vertikal wandert. Der Schreibhebel darf nur sehr leicht gegen das Papier drücken. Dies lässt sich oft mit einer Stellschraube einstellen.

8.2.2 Vorbehandlung

Eine erste Vorbehandlung sollte in Form einer Lagerung bei Raumbedingungen von mindestens 24 h erfolgen. Hierzu ist das Gerät aus der Verpackung zu nehmen. Bei Kalibrierungen vor Ort sind die Einsatzbedingungen zu berücksichtigen.

Soll eine Regenerierung des Messelementes (z.B. bei Haar-Messelementen durch Befeuchtung mit Wasser) nach Kundenwunsch durchgeführt werden, ist zuerst eine Eingangskalibrierung durchzuführen. Die Regenerierung sollte nach Herstellerangaben durchgeführt werden. Anschließend ist eine Neukalibrierung erforderlich.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	38 / 80

8.3 Einflussgrößen

Die jeweiligen Einflussgrößen sind von der Sensorart und Gerätebauart abhängig und deshalb für jeden Kalibriergegenstand individuell zu bestimmen.

8.3.1 Mittelwert

Die beigeordnete Unsicherheit des Mittelwertes ist aus der Standardabweichung und der Anzahl der Messwerte zu berechnen und in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

8.3.2 Skalenteilung

Die Ablesbarkeit der Anzeigeeinrichtung ergibt sich aus dem Verhältnis der Zeigerbreite zum Mittenabstand zweier benachbarter Teilstriche (Skalenteilungswert). Als Verhältnis wird die Hälfte des Wertes zweier benachbarter Teilstriche empfohlen (vgl. auch DIN 43790).

8.3.3 Thermische Ankopplung

Siehe Kapitel 7.4.4.

8.3.4 Hysterese

Siehe Kapitel 7.4.5.

8.3.5 Wiederholbarkeit

Aufgrund der begrenzten Wiederholbarkeit bei mechanischen Hygrometern, sollte diese untersucht werden. Im gegenteiligen Fall ist ein Unsicherheitsbeitrag von mindestens 1 % als Normalverteilung ($k = 1$) in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	39 / 80

9 Kalibrierverfahren

Im Folgenden wird das Kalibrierverfahren beginnend mit Vorbereitung und Einbau in die Kalibriereinrichtung sowie insgesamt sieben verschiedenen Kalibrierabläufen erläutert.

9.1 Vorbereitung

Vorab ist eine Funktionsprüfung (siehe Kapitel 7.2 oder 8.2) durchzuführen. Eine Vorbehandlung ist entweder nach Kapitel 7.2.2 bzw. 8.2.2 sicher zu stellen, oder nach Kundenanforderung durchzuführen. Im letzteren Falle ist der Vorbehandlungsprozess im Kalibrierschein zu beschreiben.

9.2 Einbau in die Kalibriereinrichtung

Anhand der Bauart des Kalibriergegenstandes oder der Kundenanforderung muss entschieden werden, wie dieser in die Kalibriereinrichtung einzubauen ist (z.B. komplettes Gerät oder nur externer Sensor). Bei Unklarheiten ist Rücksprache mit dem Kunden zu treffen. Der Einbau sollte möglichst dem Anwendungsfall des Kunden entsprechen. Falls kein sinnvoller Messaufbau möglich ist, kann die Kalibrierung nicht durchgeführt werden. Alle Teile, die in die Kalibriereinrichtung eingebaut werden sollen, müssen für die geplanten Kalibrierpunkte freigegeben sein (z.B. haben Handgriffe von externen Sensoren einen limitierten Temperaturbereich). Die thermische Einbautiefe, wozu alle Teile des Kalibriergegenstandes zählen, die der Kalibriertemperatur ausgesetzt sind, ist zu dokumentieren und im Kalibrierschein anzugeben (Beispiele hierzu sind in Anhang A Messunsicherheitsbilanzen zu finden).

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	40 / 80

9.3 Kalibrierablauf

Bei der Kalibrierung der relativen Feuchte ist auf ausreichende hygrometrische **und** thermische Stabilität, sowie Einhaltung der Angleichzeit zu achten. Beim Einstellen der gewünschten Kalibrierpunkte ist zu beachten, dass Bezugsnormal und Kalibriergegenstand keiner Betauung ausgesetzt werden, d.h. die Temperatur der Geräte muss immer höher der Taupunkttemperatur in der Kalibriereinrichtung sein. Dasselbe gilt beim Beenden der Kalibrierung und beim Ausbau von Bezugsnormal oder Kalibriergegenstand. Falls notwendig, muss zum Abschluss ein definiertes Klima eingestellt werden, um Betauung oder Austrocknung der Sensoren zu verhindern.

Die Kalibrierpunkte bestehen aus Feuchte-Kalibrierpunkten bei einer oder mehreren Gastemperaturen. Pro Gastemperatur wird empfohlen die Kalibrierung bei mindestens 3 Feuchte-Kalibrierpunkten, die den Einsatzbereich des Kunden abdecken, durchzuführen. Zusätzlich können bei Feuchtesensoren, die die Gastemperatur separat ausweisen, auf Kundenwunsch auch weitere Gastemperaturen ohne Feuchte-Kalibrierpunkte mitkalibriert werden. Generell sollten die gewählten Kalibrierpunkte dem Einsatzbereich des Kunden angepasst werden.

Sind Feuchte-Kalibrierpunkte bei mehr als einer Gastemperatur zu kalibrieren, so gelten folgende Empfehlungen hinsichtlich der Reihenfolge:

- Es sollte mit der höchsten Gastemperatur begonnen werden und bevorzugt in absteigender Reihenfolge der Gastemperaturen kalibriert werden. Dies dient zur Minimierung einer möglichen Drift des Kalibriergegenstandes während der Kalibrierung.
- Es sind zuerst alle isothermen Feuchte-Kalibrierpunkte zu kalibrieren, bevor mit der nächsten Gastemperatur fortgefahren wird.

Für den Fall von weiteren Kalibrierpunkten ohne Feuchte-Kalibrierpunkte (nur Gastemperatur) gelten zusätzlich folgende Empfehlungen:

- Die Kalibrierung dieser zusätzlichen Kalibrierpunkte für die Gastemperatur sollte vor der Kalibrierung der Feuchte-Kalibrierpunkte durchgeführt werden, um eine Beeinflussung der Kalibrierung auf relative Feuchte durch eine anschließende Temperaturkalibrierung zu vermeiden.
- Übersteigt der Temperaturbereich der Temperaturkalibrierung den Temperaturbereich der Feuchtekalibrierung, so ist Rücksprache mit dem Kunden sinnvoll, da es bei hohen Temperaturen durch Ausgasung beim Kalibriergegenstand zu Kennlinienveränderungen kommen kann.

Generell wird bei Kalibrierungen bei hohen Temperaturen (größer 40 °C) empfohlen, zu Beginn eine Kalibrierung der relativen Feuchte bei Raumtemperatur (23 °C ± 3 K) durchzuführen, um mögliche Veränderungen des Sensors bei hohen Temperaturen zu dokumentieren (Beispiel siehe zweiter Musterkalibrierschein: Kalibrierung nach Methode B2 im Anhang B Musterkalibrierscheine (Auszüge)).

Im Folgenden sind für den Ablauf der Feuchte-Kalibrierpunkte bei einer Gastemperatur (isotherm) sieben verschiedene Kalibrierabläufe⁶ definiert.

⁶ Abhängig von Anforderungen und Einsatzzweck wird üblicherweise nach Ablauf B2 kalibriert. Bei hohen Anforderungen an Messaufgabe und Präzision sollte Ablauf A1 oder A2 gewählt werden.

9.3.1 Ablauf A1

Die Feuchte-Kalibrierpunkte werden bei diesem Ablauf zuerst aufsteigend, danach absteigend kalibriert (siehe Abbildung 4). Mit Ausnahme des obersten Kalibrierpunktes (N4) soll damit eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes untersucht werden.

Der erste Kalibrierwert (N1a) muss von niedriger Feuchte aus (S0) angesteuert werden (um mindestens 5 % niedriger, auf ausreichend lange Angleichzeit ist zu achten). Falls dies nicht möglich ist, so wird Ablauf A2 nach Kapitel 9.3.2 empfohlen. Dies ist z.B. der Fall bei 0 % Feuchte oder wenn mit Kalibrierwert N1a der untere Grenzwert der Kalibriereinrichtung bereits erreicht ist.

Im Kalibrierschein sind alle Kalibrierwerte einzeln anzugeben. Die Messunsicherheit ist für jeden Wert separat ohne Berücksichtigung einer möglichen Hysterese des Kalibriergegenstandes zu berechnen. Alternativ können die Ergebnisse durch arithmetische Mittelung zusammengefasst werden (N1a und N1b); (N2a und N2b); (N3a und N3b) – mit Ausnahme des obersten Kalibrierpunktes (N4). Bei der arithmetischen Mittelung ist die Hysterese der Kalibrierpunkte (N1a und N1b), (N2a und N2b) sowie (N3a und N3b) des Kalibriergegenstandes als Rechteckverteilung in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen (halbe Breite der Differenz zwischen den Messabweichungen a und b).

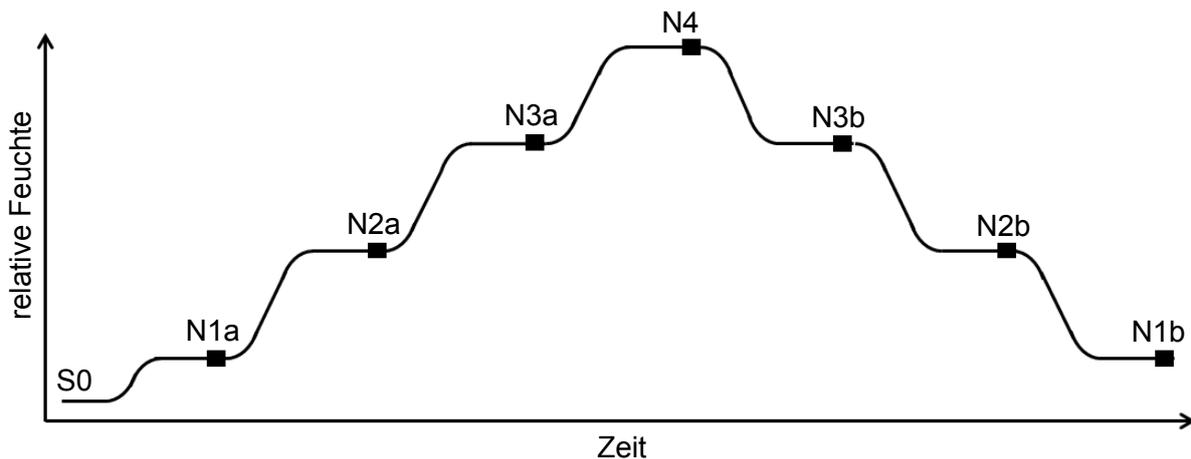


Abbildung 4: Visualisierung Kalibrierablauf A1: Wert der relativen Feuchte der Kalibriereinrichtung (Referenzwert) in Abhängigkeit von der Zeit

- ■ : Messwertaufnahme für Kalibrierergebnis
- S0: Startpunkt: definierte relative Feuchte (z.B. 10 %)
- N1a: Kalibrierwert Nr. 1: 1. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 20 %)
- N2a: Kalibrierwert Nr. 2: 2. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 50 %)
- N3a: Kalibrierwert Nr. 3: 3. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 80 %)
- N4: Kalibrierwert Nr. 4: 4. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 90 %)
- N3b: Kalibrierwert Nr. 5: 3. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 80 %)
- N2b: Kalibrierwert Nr. 6: 2. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 50 %)
- N1b: Kalibrierwert Nr. 7: 1. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 20 %)

9.3.2 Ablauf A2

Die Feuchte-Kalibrierpunkte werden bei diesem Ablauf innerhalb des Kalibrierbereichs zuerst aufsteigend, danach absteigend kalibriert (siehe Abbildung 5), wobei der erste Kalibrierwert (N1a) von oben (SR) angesteuert wird (z.B. von Raumfeuchte aus). Damit soll die Wiederholpräzision zwischen Kalibrierpunkt N1a und N1b und die Hysterese zwischen den Kalibrierpunkten N2a und N2b, sowie N3a und N3b des Kalibriergegenstandes mit untersucht werden. Kalibrierpunkt N4 wird nur einmal aufsteigend gemessen.

Im Kalibrierschein sind alle Kalibrierwerte einzeln anzugeben. Die Messunsicherheit ist für jeden Wert separat ohne Berücksichtigung einer möglichen Wiederholpräzision oder Hysterese des Kalibriergegenstandes zu berechnen. Alternativ können die Ergebnisse durch arithmetische Mittelung zusammengefasst werden (N1a und N1b); (N2a und N2b); (N3a und N3b) – mit Ausnahme des obersten Kalibrierpunktes (N4). Bei der arithmetischen Mittelung ist die Wiederholpräzision der Kalibrierpunkte (N1a und N1b), sowie die Hysterese der Kalibrierpunkte (N2a und N2b) und (N3a und N3b) des Kalibriergegenstandes als Rechteckverteilung in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen (halbe Breite der Differenz zwischen den Messabweichungen a und b).

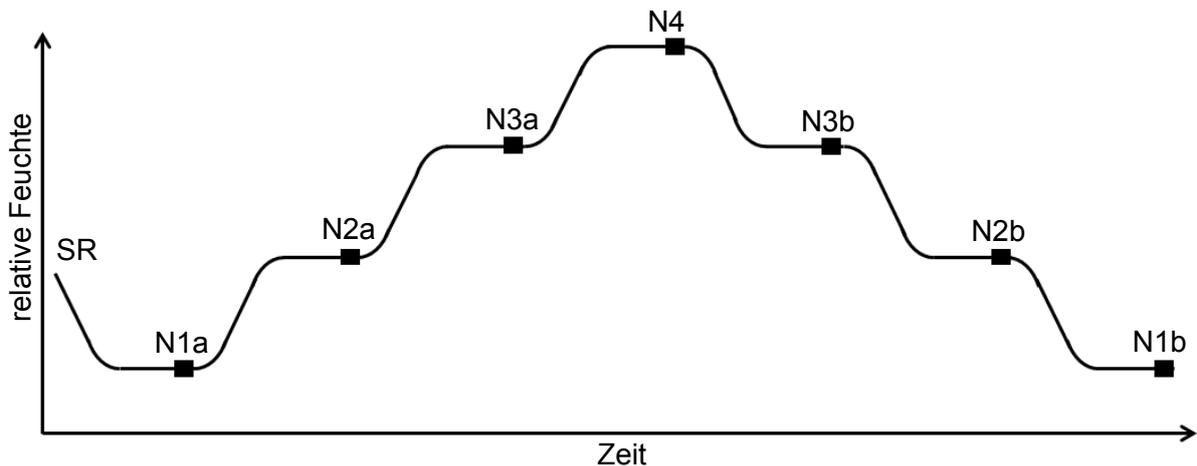


Abbildung 5: Visualisierung Kalibrierablauf A2: Wert der relativen Feuchte der Kalibriereinrichtung (Referenzwert) in Abhängigkeit von der Zeit

- ■ : Messwertaufnahme für Kalibrierergebnis
- SR: Startwert: relative Feuchte (z.B. Raumbedingung bei 50 %)
- N1a: Kalibrierwert Nr. 1: 1. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 20 %)
- N2a: Kalibrierwert Nr. 2: 2. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 50 %)
- N3a: Kalibrierwert Nr. 3: 3. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 80 %)
- N4: Kalibrierwert Nr. 4: 4. Kalibrierpunkt aufsteigend (z.B. 90 %)
- N3b: Kalibrierwert Nr. 5: 3. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 80 %)
- N2b: Kalibrierwert Nr. 6: 2. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 50 %)
- N1b: Kalibrierwert Nr. 7: 1. Kalibrierpunkt absteigend (z.B. 20 %)

9.3.3 Ablauf B1

Die Feuchte-Kalibrierpunkte werden aufsteigend kalibriert (siehe Abbildung 6). Der erste Punkt (N1) muss von niedriger Feuchte aus (S0) angesteuert werden. Dies gilt als erfüllt bei mindestens 5 % niedrigerem Wert als erster Kalibrierpunkt N1. Dabei ist auf eine ausreichend lange Angleichzeit zu achten. Falls dies nicht möglich ist, so wird Ablauf B2 nach Kapitel 9.3.4 empfohlen. Dies ist z.B. bei 0 % Feuchte der Fall, oder wenn mit Kalibrierpunkt N1 der untere Grenzwert der Kalibriereinrichtung bereits erreicht ist.

Eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes wird mit diesem Verfahren nicht untersucht.

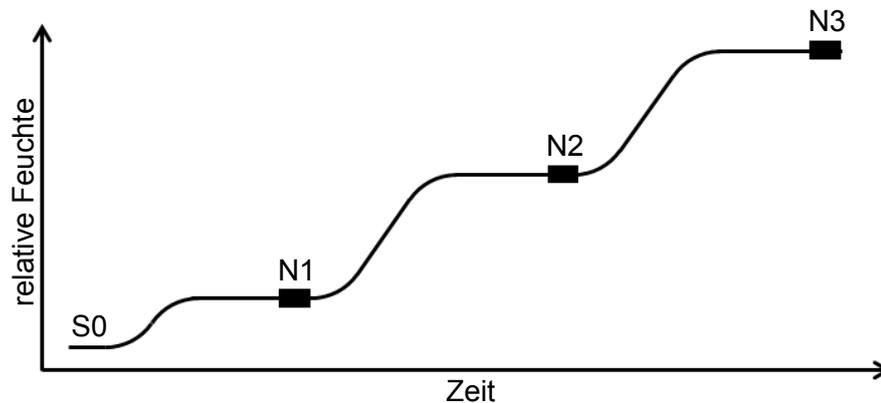


Abbildung 6: Visualisierung Kalibrierablauf B1: Wert der relativen Feuchte der Kalibriereinrichtung (Referenzwert) in Abhängigkeit von der Zeit

- ■ : Messwertaufnahme für Kalibrierergebnis
- S0: Startpunkt: definierte relative Feuchte (z.B. 10 %)
- N1: Kalibrierpunkt Nr. 1 aufsteigend (z.B. 20 %)
- N2: Kalibrierpunkt Nr. 2 aufsteigend (z.B. 50 %)
- N3: Kalibrierpunkt Nr. 3 aufsteigend (z.B. 80 %)

9.3.4 Ablauf B2

Die Feuchte-Kalibrierpunkte werden bei diesem Ablauf innerhalb des Kalibrierbereichs aufsteigend kalibriert (siehe Abbildung 7), wobei der erste Kalibrierpunkt N1 von oben (SR) angesteuert wird (z.B. von Raumfeuchte aus).

Eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes wird mit diesem Verfahren nicht untersucht.

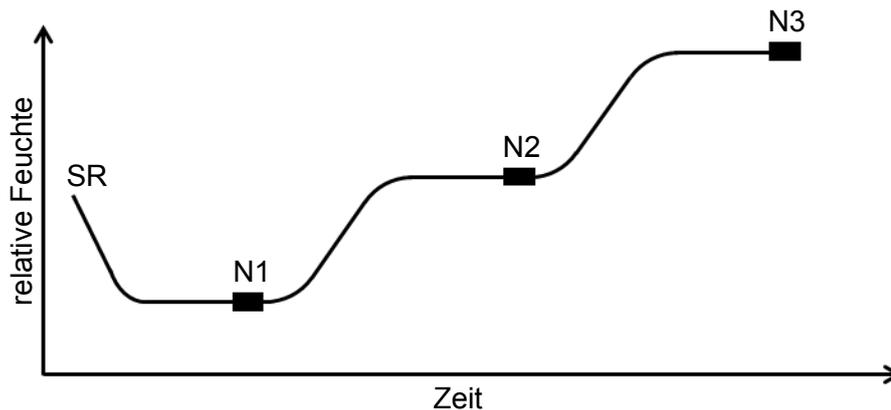


Abbildung 7: Visualisierung Kalibrierablauf B2: Wert der relativen Feuchte der Kalibriereinrichtung (Referenzwert) in Abhängigkeit von der Zeit

- ■ : Messwertaufnahme für Kalibrierergebnis
- SR: Startpunkt: relative Feuchte (z.B. Raumbedingung bei 50 %)
- N1: Kalibrierpunkt Nr. 1 absteigend (z.B. 20 %)
- N2: Kalibrierpunkt Nr. 2 aufsteigend (z.B. 50 %)
- N3: Kalibrierpunkt Nr. 3 aufsteigend (z.B. 80 %)

9.3.5 Ablauf C1

Die Feuchte-Kalibrierpunkte werden absteigend kalibriert (siehe Abbildung 8). Der erste Punkt (N1) muss von höherer Feuchte aus (S0) angesteuert werden⁷. Dies gilt als erfüllt, bei 5 % höherem Wert als erster Kalibrierpunkt N1. Dabei ist auf eine ausreichend lange Angleichzeit zu achten. Falls dies nicht möglich ist, so wird Ablauf C2 nach Kapitel 9.3.6 empfohlen. Dies ist z.B. bei 98 % Feuchte der Fall, oder wenn mit Kalibrierpunkt N1 der obere Grenzwert der Kalibriereinrichtung bereits erreicht ist

Eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes wird mit diesem Verfahren nicht untersucht.

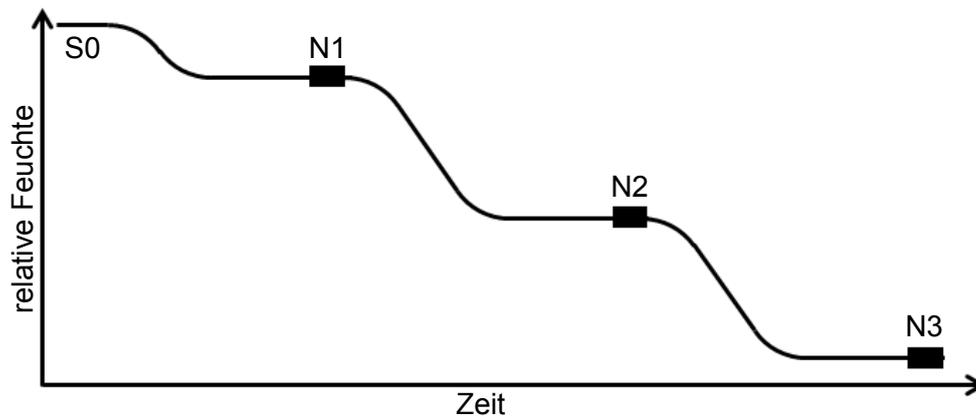


Abbildung 8: Visualisierung Kalibrierablauf C1: Wert der relativen Feuchte der Kalibriereinrichtung (Referenzwert) in Abhängigkeit von der Zeit

- ■ : Messwertaufnahme für Kalibrierergebnis
- S0: Startpunkt: definierte relative Feuchte (z.B. 90 %)
- N1: Kalibrierpunkt Nr. 1 absteigend (z.B. 80 %)
- N2: Kalibrierpunkt Nr. 2 absteigend (z.B. 50 %)
- N3: Kalibrierpunkt Nr. 3 absteigend (z.B. 20 %)

⁷ Bei einer relativen Feuchte von über 80 %, kann es bei Feuchtesensoren zu kurzzeitigen Kennlinienveränderungen kommen, weshalb geprüft werden sollte, ob von höherer Feuchte aus (S0) gestartet werden soll. Alternativ kann Ablauf C2 nach Kapitel 9.3.6 gewählt werden.

9.3.6 Ablauf C2

Die Feuchte-Kalibrierpunkte werden bei diesem Ablauf innerhalb des Kalibrierbereichs absteigend kalibriert (siehe Abbildung 9), wobei der erste Kalibrierpunkt N1 von unten (SR) angesteuert wird (z.B. von Raumfeuchte aus).

Eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes wird mit diesem Verfahren nicht untersucht.

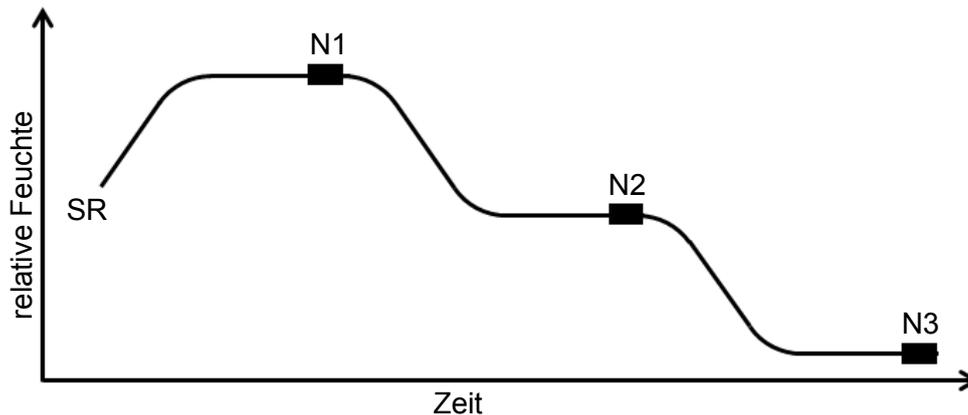


Abbildung 9: Visualisierung Kalibrierablauf C2: Wert der relativen Feuchte der Kalibriereinrichtung (Referenzwert) in Abhängigkeit von der Zeit

- ■ : Messwertaufnahme für Kalibrierergebnis
- SR: Startpunkt: relative Feuchte (z.B. Raumbedingung bei 50 %)
- N1: Kalibrierpunkt Nr. 1 aufsteigend (z.B. 80 %)
- N2: Kalibrierpunkt Nr. 2 absteigend (z.B. 50 %)
- N3: Kalibrierpunkt Nr. 3 absteigend (z.B. 20 %)

9.3.7 Ablauf D

Die Abfolge der Kalibrierpunkte erfolgt nach Kundenanforderungen. Im Kalibrierschein ist der Ablauf zu beschreiben.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	47 / 80

9.4 Angleichzeit

Eine ausreichend lange Angleichzeit ist einzuhalten und muss dokumentiert werden. Diese wird allgemein als die Zeit vom Erreichen einer hinreichenden Annäherung des Referenzwertes der Kalibriereinrichtung an den Sollwert bis zum Beginn der Messwertaufnahme, die für das Kalibrierergebnis verwendet wird, verstanden.

Für die Bestimmung der Angleichzeit ist nachfolgend ein Vorgehen vorgeschlagen, das Mindestanforderungen für ein solches Verfahren enthält. Alternative Verfahren sind zulässig. Zu beachten ist generell, dass die Angleichzeit abhängig vom Kalibrierpunkt (Feuchte und Temperatur) ist. Außerdem kann je nach Strömungsgeschwindigkeit in der Kalibriereinrichtung sowie Bauart des Kalibriergegenstandes eine Angleichzeit von mindestens 3 h erforderlich sein, bei geringerem Gasaustausch auch deutlich länger (siehe auch Hinweise in Anhang D Informationen zu elektronischen Feuchtesensoren).

9.4.1 Vorgeschlagenes Verfahren zu Bestimmung der Angleichzeit

Voraussetzung für das nachfolgend beschriebene Verfahren ist eine ausreichende thermische Ankopplung des Kalibriergegenstandes an die Kalibriereinrichtung.

Im Rahmen des vorgeschlagenen Verfahrens wird eine ausreichende Angleichzeit dann eingehalten, wenn die systematische Änderung des Messwertes innerhalb von 20 min kleiner als 20 % der angestrebten Messunsicherheit ist. Diese Bewertung muss auf mindestens 10 Messwerten basieren.

Die Umsetzung des Verfahrens ist in Abbildung 10 grafisch veranschaulicht.

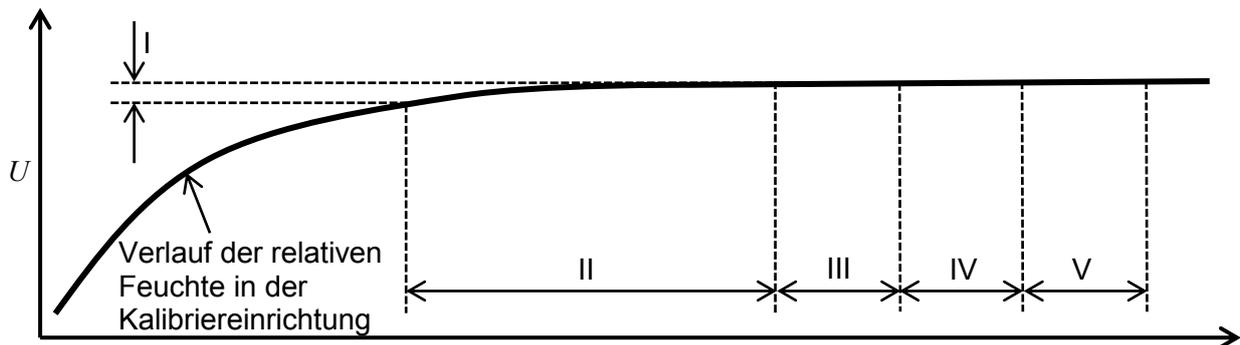


Abbildung 10: Visualisierung Angleichzeit der relativen Feuchte

- I) Kriterium für den Start der Wartezeit: Abweichung zum Sollwert kleiner 2 % und 0,2 K
- II) Wartezeit, mindestens 30 min
- III) Messwertaufnahme, mindestens 10 min sowie 10 Messwerte
- IV) Wartezeit, mindestens 10 min
- V) Messwertaufnahme, mindestens 10 min sowie 10 Messwerte

An der Kalibriereinrichtung wird der gewünschten Kalibrierpunkt eingestellt. Die erste Wartezeit beginnt ab dem Zeitpunkt, an dem der Referenzwert der Kalibriereinrichtung sich hinreichend nah an den Sollwert angenähert hat, hier wird dies auf eine Annäherung des Referenzwertes auf 0,2 K (Temperatur) und 2 % (relative Feuchte) des Sollwertes festgelegt. Nach einer Wartezeit von 30 min (Zeitabschnitt II) wird eine erste Messwertaufnahme von 10 min mit mindestens 10 Messwerten (Zeitabschnitt III) durchgeführt. Nach einer Wartezeit von weiteren 10 min (Zeitabschnitt IV) wird eine weitere Messwertaufnahme (Zeitabschnitt V) gestartet. Ist die systematische Änderung der Messabweichung des Kalibriergegenstandes zwischen Zeitabschnitt III und V kleiner als 20 % der angestrebten Messunsicherheit, so ist eine ausreichende Angleichzeit eingehalten worden. Zur Sicherstellung der thermischen Ankopplung ist auch die Messabweichung der Temperaturen zwischen den Zeitabschnitten III und V als weiteres Kriterium miteinzubeziehen.

Die Messwertaufnahme aus dem Zeitabschnitt V ist dann das Kalibrierergebnis. Die Angleichzeit berechnet sich dann aus der Summe der Zeiten aus den Zeitabschnitt II, III und IV.

Sollten die Kriterien für das Ende der Angleichzeit nicht erfüllt sein, dann wird eine weitere Messwertaufnahme an Zeitabschnitt V angeschlossen und die Kriterien erneut analog wie oben beschrieben geprüft. Die Angleichzeit verlängert sich entsprechend.

Die angegebenen Zeiten stellen Mindestanforderungen dar. Für eingehende Untersuchungen wird empfohlen, den Zeitabschnitt IV in Abbildung 10 auf mindestens 30 min auszudehnen, siehe auch Anhang D Informationen zu elektronischen Feuchtesensoren.

10 Umgebungsbedingungen

Die Kalibrierung sollte vorzugsweise bei einer stabilen Umgebungstemperatur durchgeführt werden. Der zulässige Temperaturbereich ist unter Berücksichtigung der Spezifikationen der verwendeten Referenzeinrichtung zu definieren und muss dokumentiert werden. Stellt das Raumklima einen Startwert für eine Kalibrierung dar, so sind die Temperatur und die relative Feuchte zu dokumentieren.

Wird für Berechnungen der Absolutdruck benötigt (z.B. bei Psychrometern oder Enhancement-Faktoren), so ist auch der Luftdruck zu dokumentieren.

Die Messung der Umgebungsbedingungen muss mit rückgeführten Messmitteln erfolgen.

11 Kalibrierschein

Der Kalibrierschein muss den Anforderungen der aktuell gültigen Normen (DIN EN ISO/IEC 17025), sowie den zusätzlichen Festlegungen der jeweiligen Akkreditierungsstelle, oder regionalen Metrologie-Organisationen genügen. Darüber hinaus sind nachfolgende Punkte anzugeben:

- Vorbehandlungsprozess, sofern abweichend von Kapitel 7.2.2 bzw. 8.2.2
- Kalibrierverfahren nach dieser Richtlinie
- Kalibrierablauf (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D)
- Kalibrierreihenfolge
- Einbautiefe (siehe Kapitel 9.2)
- Hinweis auf Berücksichtigung der Hysterese oder Wiederholbarkeit in der Messunsicherheit
- Umgebungstemperatur
- Umgebungsfeuchte, sofern relevant
- Kalibrierergebnisse mit Angabe der Temperatur
- Angabe der relativen Feuchte inklusive des Bezugs auf Sättigung über Eis (U_i) oder Wasser (U_w)

11.1 Kalibrierergebnis – Beispiel

Kalibrierergebnisse relative Feuchte

Referenzwerte		Kalibriergegenstand		
Gastemperatur t in °C	relative Feuchte U_w in %	angezeigter Wert U in %	Messabweichung ΔU in %	Messunsicherheit U in %
20	20,1	19,7	-0,4	0,4
20	50,0	49,9	-0,1	0,6
20	80,0	80,3	+0,3	0,8

Angegeben sind die Messergebnisse in der Reihenfolge der Kalibrierung.

Tabelle 3: Beispiel für die Angabe von Kalibrierergebnissen

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	50 / 80

12 Literaturverzeichnis

- [1] DKD, Richtlinie DKD-R 5-1: Kalibrierung von Widerstandsthermometer, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [2] DKD, Richtlinie DKD-R 5-3: Kalibrierung von Thermoelementen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [3] VDI/VDE 3514, Blatt 1: Gasfeuchtemessung; Kenngrößen und Formelzeichen, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2016.
- [4] VDI/VDE 3514, Blatt 2: Gasfeuchtemessung; Messverfahren, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013.
- [5] DKD, Leitfaden DKD-L 5-1: Feuchtekenngößen und Berechnungsgleichungen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, (in Vorbereitung).
- [6] DKD, Richtlinie DKD-R 6-1: Kalibrierung von Druckmessgeräten, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 03/2014, Revision 2.
- [7] DKD, Richtlinie DKD-R 5-6: Bestimmung von Thermometerkennlinien, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [8] EA-4/02 M: 2013, Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (Deutsche Übersetzung), DAkkS, Übersetzung vom 06.11.2018.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	51 / 80

Anhang A Messunsicherheitsbilanzen – Beispiele

Kalibrierung in einem Klimaschrank

Kalibrierung eines Hygrometers als Kalibriergegenstand (KG) mit kapazitivem Polymersensor als Messelement in einem Klimaschrank bei 80 % relative Feuchte und 20 °C Gastemperatur. Bezugsnormale (BN) sind ein Normalthermometer (TM), ein Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer (TPS) mit internem Messkopf das über eine Rohrleitung das Messgas aus der Kammer entnimmt, sowie ein Absolutdruckmessgerät (ADM). Die Kalibrierung erfolgte nach Ablauf B2 (siehe Kapitel 9.3.4). Nach einer Angleichzeit von 3 h wurde über einen Zeitraum von 10 min der arithmetische Mittelwert aus 60 Einzelwerten gebildet. Die Aufstellung ist in 4 Schritte gegliedert.

1. Bestimmung der Gastemperatur im Klimaschrank mit der dazugehörigen Unsicherheit.
2. Bestimmung der Taupunkttemperatur im Klimaschrank mit der dazugehörigen Unsicherheit.
3. Berechnung der relativen Feuchte aus der Gas- und Taupunkttemperatur und der dazugehörigen Unsicherheit.
4. Bestimmung der relativen Feuchte des Kalibriergegenstandes und dessen Messabweichung sowie der dazugehörigen erweiterten Messunsicherheit.

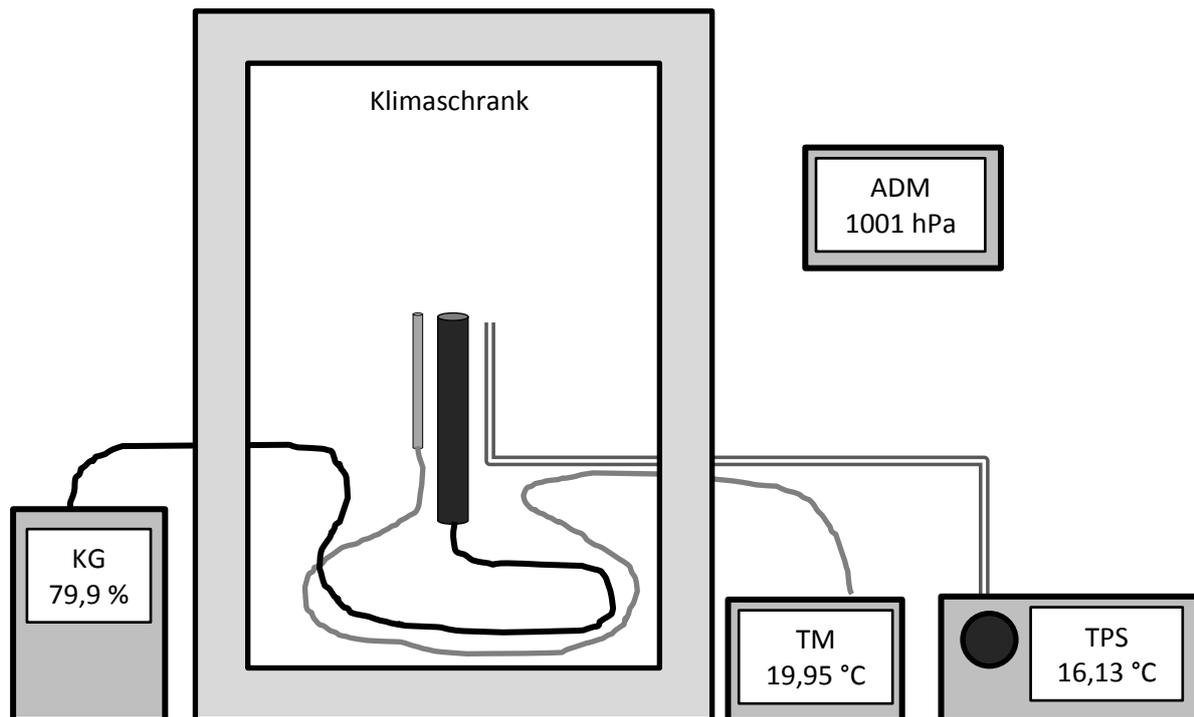


Abbildung 11: Schematische Darstellung Kalibrier Aufbau

Einbautiefe

Der externe Sensor des Kalibriergegenstandes ist komplett, inklusive 1 m seines Anschlusskabels im Klimaschrank (gemessen ab Innenwand der Kammer) eingebaut.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	52 / 80

Schritt 1: Gastemperatur

Unsicherheitsbilanz der Gastemperatur, welche die Beiträge des Bezugsnormals sowie des Klimaschranks enthalten.

Modellgleichung:

$$T_S = T_{i,s} + \delta T_{cal} + \delta T_{res} + \delta T_{int} + \delta T_{dri} + \delta T_{con} + \delta T_{thv} + \delta T_{htd} + \delta T_{sht} + \delta T_{hys} + \delta T_{inho} + \delta T_{rad} + \delta T_{insta} \quad (14)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$T_{i,s}$:

Temperatur gemessen mit dem Normalthermometer (60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des Normalthermometers bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 19,95 °C sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 10 mK.

δT_{cal} :

Unbekannte Messabweichung des Normalthermometers aufgrund der Kalibrierung. Die Normalmesseinrichtung für die Temperatur ist ein Pt100 mit dem zugehörigen Messgerät. Bei der Kalibrierung wurde eine Korrektur des Normalthermometers von -0,01 K festgestellt. Diese wird bei der Auswertung berücksichtigt. Die Unsicherheit U der Temperaturabweichung wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 20$ mK; normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt damit 10 mK.

δT_{res} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung des Normalthermometers. Die Auflösung der Lufttemperaturanzeige beträgt 10 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 5 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 2,9 mK.

δT_{int} :

Unbekannte Messabweichung der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 20 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 12 mK (siehe auch DKD-R 5-6, Tabelle 6.2 [7]).

δT_{dri} :

Unbekannte Messabweichung der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung. Aus den letzten Kalibrierungen des Normals ergab sich eine maximale Drift von 10 mK pro Jahr. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 10 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 6 mK.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	53 / 80

δT_{con} :

Unbekannte Messabweichung der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Anschlussstechnik des Normalthermometers. Das Pt100 des Normalthermometers ist in 4-Leiter-Technik an das zugehörige Messgerät angeschlossen.

Die Beiträge des Anschlusses sind damit kleiner als 1 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 1 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,6 mK.

δT_{thv} :

Unbekannte Messabweichung der Temperatur des Normalthermometers aufgrund von parasitären Thermospannungen im Messkreis des Normalthermometers. Das zugehörige Messgerät misst den Widerstand des Pt100-Normalthermometers mit alternierendem Gleichstrom und mittelt über mehrere Umpolungsperioden. Eventuelle parasitäre Thermospannungen im Messkreis werden damit kompensiert.

Die verbleibende Restunsicherheit aufgrund von Thermospannungen ist damit kleiner als 1 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 1 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,6 mK.

δT_{htd} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Wärmeableitung des Normalthermometers. Da der Lufttemperatursensor des Normals vollständig eintaucht und auch noch ein Teil des Kabels im Klimaschrank verläuft kann, dieser Beitrag vernachlässigt werden. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0 mK.

δT_{sht} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Eigenerwärmung des Normalthermometers. Aufgrund von Untersuchungen mit verschiedenen Messstromstärken bei den verwendeten Anströmgeschwindigkeiten des Lufttemperatursensors wird ein maximaler Unsicherheitsbeitrag von 30 mK abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 30 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

δT_{hys} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Hysterese des Normalthermometers. Aufgrund von Untersuchungen mit Aufsteigenden und Absteigenden Temperaturen wird ein maximaler Unsicherheitsbeitrag von 10 mK abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 10 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 6 mK.

δT_{inbo} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der räumlichen Inhomogenität der Temperatur in der Klimakammer. Die Untersuchung des Kalibriervolumens nach Kapitel 6.2.1 ergab eine maximale Abweichung der Temperatur an den Messorten zur Temperatur im Zentrum des Nutzvolumens von 0,2 K. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 200 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 115 mK.

δT_{rad} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund des Strahlungseinflusses auf die Messung der Temperatur in der Klimakammer. Die Untersuchung erfolgte mit zwei Thermometern mit unterschiedlichen Emissionsgraden nach Kapitel 6.2.3. Sie ergab eine maximale Abweichung der Temperatur zwischen den beiden Thermometern von 0,05 K. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 50 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 29 mK.

δT_{insta} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der zeitlichen Instabilität der Temperatur in der Klimakammer. Die Untersuchung des Kalibriervolumens Kapitel 6.2.2 ergab eine maximale Abweichung der Temperatur vom Mittelwert über 30 min von $\pm 0,1$ K. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 100 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 58 mK.

Diese Beiträge werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$T_{i,S}$	Messwert Bezugsnormales Thermometer	19,95 °C	0,010 K	0,010 K	Normal	1	1,00	0,010 K
δT_{cal}	Korrektur Bezugsnormales aus Kalibrierung	-0,010 K	0,020 K	0,010 K	Normal	2	1,00	0,010 K
δT_{res}	Auflösung Bezugsnormales	0,000 K	0,005 K	0,003 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,003 K
δT_{int}	Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten	0,000 K	0,020 K	0,012 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,012 K
δT_{dri}	Drift Bezugsnormales	0,000 K	0,010 K	0,006 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,006 K
δT_{con}	Anschluss-technik Bezugsnormales	0,000 K	0,001 K	0,001 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,001 K
δT_{thv}	parasitäre Thermospannungen Bezugsnormales	0,000 K	0,001 K	0,001 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,001 K
δT_{htd}	Wärmeableitung Bezugsnormales	0,000 K	0,000 K	0,000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,000 K
δT_{sht}	Eigenerwärmung Bezugsnormales	0,000 K	0,030 K	0,017 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,017 K
δT_{hys}	Hysterese Bezugsnormales	0,000 K	0,010 K	0,006 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,006 K
δT_{inho}	räumliche Inhomogenität Klimakammer	0,000 K	0,200 K	0,115 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,115 K
δT_{rad}	Strahlungseinflüsse	0,000 K	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,029 K
δT_{insta}	zeitliche Instabilität Klimakammer	0,000 K	0,100 K	0,058 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,058 K
T_S	Temperatur in der Klimakammer	19,940 °C					$u = 0,135$ K	

Tabelle 4: Messunsicherheitsbilanz für die Temperatur in der Klimakammer

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	55 / 80

Schritt 2: Taupunkttemperatur

Unsicherheitsbilanz der Taupunkttemperatur, welche die Beiträge des Bezugsnormals sowie des Klimaschranks enthalten.

Modellgleichung:

$$T_{d,S} = T_{d,i,S} + \delta T_{d,cal} + \delta T_{d,res} + \delta T_{d,int} + \delta T_{d,dri} + \delta T_{d,rep} - c_{Td} \cdot \delta T_{d,Tdep} + c_p \cdot \delta p_{C-M} + \delta T_{d,inho} + \delta T_{d,inst} \quad (15)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$T_{d,i,S}$:

Taupunkt gemessen mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer (60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 16,19 °C sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 10 mK.

$\delta T_{d,cal}$:

Unbekannte Messabweichung des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers aufgrund der Kalibrierung. Bei der Kalibrierung wurde eine Korrektur des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers von -0,02 K festgestellt. Diese wird bei der Auswertung korrigiert. Die Unsicherheit U der Taupunktabweichung wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 50$ mK; normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt damit 25 mK.

$\delta T_{d,res}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers. Die Auflösung der Taupunktanzeige beträgt 10 mK. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 5 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 2,9 mK.

$\delta T_{d,int}$:

Unbekannte Messabweichung des Taupunktes des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 20 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 12 mK.

$\delta T_{d,dri}$:

Unbekannte Messabweichung des Taupunktes des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung. Aus den letzten Kalibrierungen des Normals ergab sich eine maximale Drift von 50 mK pro Jahr. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 50 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 29 mK.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	56 / 80

$\delta T_{d,rep}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Wiederholbarkeit des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers. Aus Untersuchungen mit stabilem Taupunkt und wiederholten Einregeln des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers ist bekannt, dass die Wiederholbarkeit bis zu 50 mK betragen kann. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 50 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 29 mK.

$\delta T_{d,Tdep}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Abhängigkeit der Messung des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers von der Umgebungstemperatur. Aus Untersuchungen mit festem Taupunkt bei verschiedenen Umgebungstemperaturen ist bekannt, dass das Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer eine Umgebungstemperaturabhängigkeit des Taupunktes von 5 mK / K hat ($c_{Td} = 5 \text{ mK/K}$). Das Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer ist in Schritten von 10 K bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen kalibriert. Jede dieser Kalibrierungen deckt daher einen Umgebungstemperaturbereich von $\pm 5 \text{ K}$ ab. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 5 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 2,9 K und der Standardunsicherheitsbeitrag zum Taupunkt beträgt dann 14 mK.

δp_{C-M} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund eines Druckabfalles in der Messleitung zum Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass der Druckabfall bei dem vorliegenden Gasfluss maximal 5 mbar beträgt mit einer Unsicherheit von 1 mbar.

Bei 16 °C Taupunkttemperatur beträgt der Sensitivitätskoeffizient für den Taupunkt in Abhängigkeit vom Druck am Spiegel $c_p = 15,6 \text{ mK/mbar}$. Der Druckabfall von 5 mbar wird in der Auswertung der Taupunkttemperatur mit +0,078 K korrigiert.

Der Unsicherheitsbeitrag von 1 mbar wird als rechteckverteilter Beitrag angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,6 mbar und der Standardunsicherheitsbeitrag zum Taupunkt beträgt dann 9 mK.

$\delta T_{d,inho}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der räumlichen Inhomogenität des Taupunktes in der Klimakammer. Die Klimakammer ist umgewälzt. Der Taupunkt ist daher räumlich homogen. Aus Untersuchungen mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer ist bekannt, dass der Taupunkt lokal nicht um mehr als 50 mK vom Wert im Zentrum des Nutzvolumens abweicht. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 50 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 29 mK.

$\delta T_{d,inst}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Instabilität des Taupunktes in der Klimakammer. Die Untersuchung des Kalibriervolumens mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer ergab eine maximale Abweichung vom Mittelwert über 30 min von $\pm 0,1 \text{ K}$. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 100 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 58 mK.

Diese Beiträge werden in Tabelle 5 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$	
$T_{di,S}$	Messwert Bezugsnormal Taupunktspiegel	16,19 °C	0,010 K	0,010 K	Normal	1	1,00	0,010 K	
$\delta T_{d,cal}$	Korrektion Taupunktspiegel aus Kalibrierung	-0,020 K	0,050 K	0,025 K	Normal	2	1,00	0,025 K	
$\delta T_{d,res}$	Auflösung Messwerte Bezugsnormal	0,000 K	0,005 K	0,003 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,003 K	
$\delta T_{d,int}$	Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten	0,000 K	0,020 K	0,012 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,012 K	
$\delta T_{d,dri}$	Drift Bezugsnormal	0,000 K	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,029 K	
$\delta T_{d,rep}$	Wiederholbarkeit Taupunktmessung	0,000 K	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,029 K	
$\delta T_{d,Tdep}$	Temperaturabhängigkeit Messkopf Taupunktspiegel	0,000 K	5,000 K	2,887 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,005 K/K	0,014 K	
δp_{c-M}	Druckabfall in der Messleitung	0,078 K	1,000 mbar	0,58 mbar	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,0156 K/mbar	0,009 K	
$\delta T_{d,inho}$	räumliche Inhomogenität Klimakammer	0,000 K	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,029 K	
$\delta T_{d,inst}$	zeitliche Instabilität Klimakammer	0,000 K	0,100 K	0,058 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,058 K	
$T_{d,S}$	Taupunkttemperatur in der Klimakammer	16,248 K					$u = 0,084 K$		

Tabelle 5: Messunsicherheitsbilanz Taupunkttemperatur in der Klimakammer⁸

⁸ Die Messunsicherheit des Taupunktes kann ggf. auch in °C anstatt in K angegeben werden. Ihr Zahlenwert ändert sich hierdurch nicht. Die Einheit K ist für Messunsicherheiten von Temperaturen und Tau- bzw. Frostpunkten vorzuziehen.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	58 / 80

Schritt 3: Berechnung relative Feuchte

Aus den in Tabelle 4 und Tabelle 5 ermittelten Gas- und Taupunkttemperatur und dem Absolutdruck des ADM wird mit nachfolgender Gleichung (16) die relative Feuchte in der Klimakammer berechnet:

$$U_w = \frac{e(T_{d,S}) \cdot f_w(T_{d,S}, p_S)}{e_w(T_S) \cdot f_w(T_S, p_C)} \cdot 100 \% \quad (16)$$

Die unbekannte Abweichung $\delta U_{w,S}$ der berechneten relativen Feuchte wird durch folgende Modellgleichung dargestellt:

$$\delta U_{w,S} = c_T \cdot \delta T_S + c_{Td} \cdot \delta T_{d,S} + c_{p1} \cdot \delta p_C + c_{p2} \cdot \delta p_S + \delta U_{S,A} \quad (17)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

δT_S :

Gastemperatur gemessen mit dem Normalthermometer. Die Unsicherheit der Gastemperatur ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 4. Der Beitrag ist normalverteilt und die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 0,135 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient beträgt bei 20 °C und 79,3 % $c_T = 4,92 \% / K$.

$\delta T_{d,S}$:

Taupunkt gemessen mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer. Die Unsicherheit des Taupunktes ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 5. Der Beitrag ist normalverteilt und die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 0,084 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient beträgt bei 20 °C und 79,3 % $c_{Td} = 5,06 \% / K$.

δp_C ; δp_S :

Der Absolutdruck geht nur in die Enhancement-Faktoren ein. Die entsprechenden Sensitivitätskoeffizienten sind sehr klein, so dass diese Beiträge vernachlässigt werden können.

$\delta U_{S,A}$:

Berechnung der relativen Feuchte aus Gas- und Taupunkttemperatur. Die Unsicherheit der verwendeten Dampfdruckgleichung für den Sättigungsdampfdruck (berechnet aus der Gastemperatur), bzw. für den Wasserdampfpartialdruck (berechnet aus der Taupunkttemperatur) liegt bei jeweils 0,02 % (siehe DKD-L 5-1 [5]) und ist damit deutlich kleiner als die verwendete Auflösung des Rechenergebnisses von 0,1 %. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 6 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
δT_s	Temperatur in der Klimakammer	19,940 °C	0,135 K	0,135 K	Normal	1	4,92 %/K	0,66 %
δT_{dS}	Taupunkttemperatur in der Klimakammer	16,248 °C	0,084 K	0,084 K	Normal	1	5,06 %/K	0,42 %
$\delta U_{s,A}$	Formelfehler / Rundung berechnete relative Feuchte	0,00 %	0,10 %	0,058 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,06 %
$U_{w,S}$	relative Feuchte in der Kalibrierkammer	79,28 %					$u = 0,79 %$	

Tabelle 6: Messunsicherheitsbilanz für die berechnete relative Feuchte in der Klimakammer

Schritt 4: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Kalibriergegenstand angezeigten relativen Feuchte zur im Klimaschrank gemessenen Referenzfeuchte stellt das Kalibrierergebnis dar.

Die Unsicherheit der Referenzfeuchte und die Unsicherheitsbeiträge des Kalibriergegenstandes werden dem Kalibrierergebnis zugeordnet.

Durch Annahme einer Normalverteilung und Multiplikation der Standardmessunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit U .

Für das Kalibrierergebnis (Abweichung des Kalibriergegenstandes) gilt folgende Modellgleichung:

$$\Delta U_X = U_{i,X} - U_{w,S} + \delta U_{res,X} + c_T \cdot (\delta T_{htd,X} + \delta T_{sht,X}) + \delta U_{hys,X} + \delta U_{w,S} \quad (18)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$U_{w,S}$; $\delta U_{w,S}$:

Unsicherheit des Feuchtereferenzwertes (gemessen mit dem Normal-Thermometer und Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer in der Klimakammer). Die Unsicherheit der Referenzfeuchte ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 6. Der Beitrag wird als normalverteilt angenommen und die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 0,79 %.

$U_{i,X}$:

Relative Feuchte gemessen mit dem Kalibriergegenstand (kapazitiver Feuchtesensor) (60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des kapazitiven Feuchtesensors bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 79,9 % sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,04 %.

$\delta U_{res,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung des Kalibriergegenstandes. Die Auflösung der relativen Feuchteanzeige beträgt 0,1 %. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

$\delta T_{htd,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Wärmeableitung des Kalibriergegenstandes. Da der Sensor des Kalibriergegenstandes vollständig eingebaut ist, inklusive 1 m seines

Anschlusskabels, wird dieser Beitrag vernachlässigt und mit 0,0 K abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,0 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 20 °C und 79,3 % einen Wert von $c_T = 4,92 \text{ \%}/\text{K}$.

$\delta T_{\text{sht},X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Eigenerwärmung des Kalibriergegenstandes. Die Eigenerwärmung wird gemäß Kapitel 7.4.3 untersucht und zu maximal 0,1 K abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 20 °C und 79,3 % einen Wert von $c_T = 4,92 \text{ \%}/\text{K}$.

$\delta U_{\text{hys},X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Hysterese des Kalibriergegenstandes. Die Kalibrierung erfolgte nach Ablauf B2. Dieser beinhaltet keine Untersuchung einer möglichen Hysterese. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,0 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 7 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$U_{i,X}$	Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	79,9 %	0,04 %	0,04 %	Normal	1	1,00	0,04 %
$\delta U_{\text{res},X}$	Auflösung Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,03 %
$\delta T_{\text{htd},X}$	Wärmeableitung Kalibriergegenstand	0,0 %	0,00 K	0,00 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,92 %/K	0,00 %
$\delta T_{\text{sht},X}$	Eigenerwärmung Kalibriergegenstand	0,0 %	0,10 K	0,06 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,92 %/K	0,28 %
$\delta U_{\text{hys},X}$	Hysterese Kalibriergegenstand	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,00 %
$U_{w,S}$	relative Feuchte in der Kalibrierkammer	79,28 %	0,79 %	0,79 %	Normal	1	1,00	0,79 %
AU_X	Anzeigeabweichung Kalibriergegenstand	0,6 %	$U = 1,7 \text{ \%}$ ($k = 2$)			$u = 0,84 \text{ \%}$		

Tabelle 7: Messunsicherheitsbilanz relative Feuchte Kalibrierergebnis

Das Hygrometer hat bei 20 °C und 79,9 % eine Anzeigeabweichung von +0,6 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit⁹ U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 1,7 %.¹⁰

⁹ Die Variable U der relativen Feuchte darf nicht mit der Variable U der erweiterten Messunsicherheit verwechselt werden. Die Bedeutung der jeweils verwendeten Variable ist im Einzelfall zu prüfen.

¹⁰ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten:

„Das Hygrometer hat bei 20 °C und 79,9 % eine Korrektur von -0,6 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 1,7 %.“

Die Verwendung der Anzeigekorrektur bietet für den Anwender des Hygrometers den Vorteil dass der beste Schätzwert für die gemessene Feuchte durch Addition der Korrektur zur angezeigten Feuchte des Hygrometers bestimmt werden kann.

Kalibrierung in einem Mischgasgenerator

Kalibrierung eines Hygrometers mit kapazitivem Polymersensor als Messelement in einem Mischgasgenerator bei 50 % relative Feuchte und 23 °C Gastemperatur.

Gebrauchsnormale (GN) sind ein resistiv-elektrolytischer Sensor (GN1), sowie ein kapazitiver Polymersensor (GN2). Die Kalibrierung erfolgte nach Ablauf B1 (siehe Kapitel 9.3.3). Nach einer Angleichzeit von 2 h wurde über einen Zeitraum von 10 min der arithmetische Mittelwert aus 60 Einzelwerten gebildet. Die Aufstellung ist in 2 Schritte gegliedert.

1. Bestimmung der relativen Feuchte in der Kammer des Mischgasgenerators.
2. Bestimmung der relativen Feuchte des Kalibriergegenstandes und dessen Messabweichung sowie der dazugehörigen erweiterten Messunsicherheit.

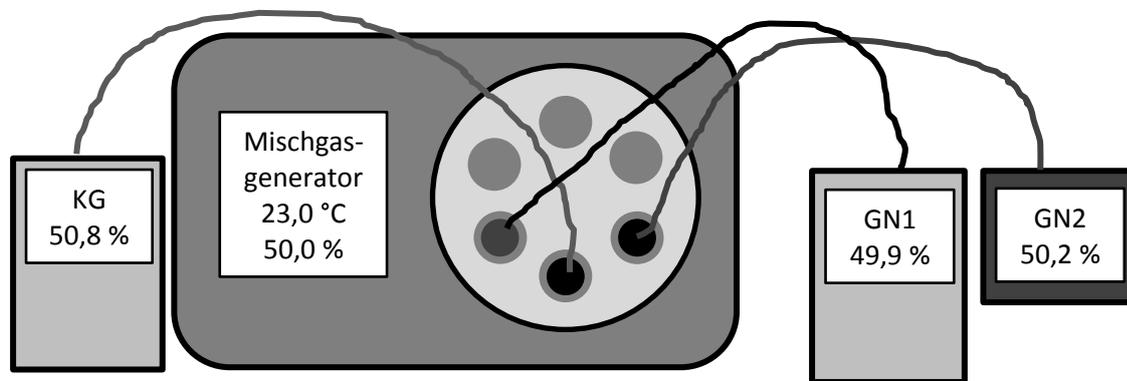


Abbildung 12: Schematische Darstellung Kalibrieraufbau

Einbautiefe

Der externe Sensor des Kalibriergegenstandes ist 15 cm tief (gemessen ab Innenkante Deckel des Mischgasgenerators) eingebaut.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	62 / 80

Schritt 1: Feuchtereferenzwert im Mischgasgenerator

Bestimmung des Feuchtereferenzwertes in der Kalibrierkammer Des Mischgasgenerators gemessen mit den Gebrauchsnormalen.

Modellgleichung:

$$\begin{aligned}
 U_{w,S} = & \frac{1}{2} \cdot (U_{i,S1} + U_{i,S2}) \\
 & + c_{S1} \cdot \delta U_{cal,S1} + c_{S1} \cdot \delta U_{res,S1} + c_{S1} \cdot \delta U_{int,S1} + c_{S1} \cdot \delta U_{dri,S1} + c_{S1} \cdot \delta U_{hys,S1} \\
 & + c_{S2} \cdot \delta U_{cal,S2} + c_{S2} \cdot \delta U_{res,S2} + c_{S2} \cdot \delta U_{int,S2} + c_{S2} \cdot \delta U_{dri,S2} + c_{S2} \cdot \delta U_{hys,S2} \\
 & + \delta U_{i,S1-2} + \delta U_{Tdep} + c_T \cdot (\delta T_{htd} + \delta T_{sht} + \delta T_{inho} + \delta T_{rad}) + \delta U_{inst}
 \end{aligned} \quad (19)$$

Die Sensitivitätskoeffizienten c_{S1} und c_{S2} ergeben sich zu:

$$c_{S1} = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{cal,S1}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{res,S1}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{int,S1}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{dri,S1}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{hys,S1}} \right) = \frac{1}{2} \quad (20)$$

$$c_{S2} = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{cal,S2}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{res,S2}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{int,S2}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{dri,S2}} \right) = \left(\frac{\partial U_{w,S}}{\partial U_{hys,S2}} \right) = \frac{1}{2} \quad (21)$$

Diese Modellgleichung gilt für den Fall, dass die Beiträge (Kalibrierung, Auflösung, Interpolation, Drift und Hysterese) der beiden Normalhygrometer als unkorreliert voneinander angesetzt werden können.

Dies ist zum Beispiel dann näherungsweise erfüllt, wenn beide Normalhygrometer nicht zum gleichen Zeitpunkt vom gleichen Kalibrierlabor unter Benutzung der gleichen Normale kalibriert wurden. Idealerweise sind die Kalibriertermine beider Normale um die halbe Kalibrierperiode gegeneinander verschoben.

Die Drift und die Hysterese sind insbesondere dann nicht oder sehr wenig korreliert, wenn unterschiedliche Messverfahren der Gebrauchsnormale (z.B. kapazitiv und resistiv-elektrolytisch) oder unterschiedliche Hersteller der Feuchtesensoren verwendet werden.

Möglich ist auch, die beiden Normale nicht ständig zusammen in Kalibrierungen einzusetzen, so dass diese nicht ständig den identischen Einflüssen ausgesetzt sind.¹¹

Für Beiträge beider Normale die wegen Nichterfüllung dieser Bedingungen als korreliert gelten, sind die zugehörigen Sensitivitätskoeffizienten für jedes Normal nicht zu 0,5, sondern zu $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$ anzusetzen! (siehe auch EA-4/02 M: 2013 Anhang D [8])

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$U_{i,S}$:

Mittelwert der mit den zugehörigen Anzeigekorrekturen korrigierten relativen Feuchteanzeigen der beiden Bezugsnormale wird aus allen Einzelmessungen der Normalhygrometer bestimmt (jeweils 60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen der Normalhygrometer bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des

¹¹ Es ist daher zu empfehlen:

- mehr als 2 Normalhygrometer vorzuhalten (Diversität empfohlen)
- bei jeder nächsten Kalibrierung die eine andere Kombination der Normalhygrometer aus dem Pool zu entnehmen
- alle Normalhygrometer einzeln rekalisieren zu lassen (ggf. auch bei verschiedenen Laboren)

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	63 / 80

niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 50,1 % sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,04 %.

$\delta U_{\text{cal},S1}$, $\delta U_{\text{cal},S2}$:

Unbekannte Messabweichung der Normalhygrometer aufgrund ihrer Kalibrierung. Die Normalhygrometer sind resistiv-elektrolytische bzw. kapazitive Feuchtesensoren mit dem jeweils zugehörigen Messgerät. Die Anzeige jedes Normalhygrometers wird vor der Berechnung des Mittelwertes beider Hygrometer mit der Anzeigekorrektur des zugehörigen Kalibrierscheines korrigiert. Die Unsicherheit U der relativen Feuchteabweichung wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 0,6$ %; normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt damit 0,3 %.

$\delta U_{\text{res},S1}$, $\delta U_{\text{res},S2}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung der Normalhygrometer. Die Auflösung der relativen Feuchteanzeige beträgt 0,1 %. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

$\delta U_{\text{int},S1}$, $\delta U_{\text{int},S2}$:

Unbekannte Messabweichung der relativen Feuchteanzeige der Normalhygrometer aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten.

Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,25 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,14 %.

$\delta U_{\text{dri},S1}$, $\delta U_{\text{dri},S2}$:

Unbekannte Messabweichung der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung. Aus den letzten Kalibrierungen der Normale ergab sich eine maximale Drift der Normalhygrometer von 2,0 % pro Jahr. Diese Drift stellt für jedes Normal einen rechteckverteilten Beitrag mit der Halbwertsbreite 2,0 % dar. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 1,2 %.

$\delta U_{\text{hys},S1}$, $\delta U_{\text{hys},S2}$:

Unbekannte Messabweichung der relativen Feuchteanzeige der Normalhygrometer aufgrund einer möglichen Hysterese. Eine Untersuchung nach Kalibrierablauf A1 ergab bei beiden Normalhygrometern nur geringe Hysterese-Effekte. Aufgrund des gewählten Kalibrierablaufes B1 wird jeder Kalibrierpunkt nur mit steigender relativer Feuchte angefahren. Die Hysterese wird in diesem Falle aufgrund der Untersuchungen entsprechend korrigiert (muss aber ggf. bei anderen Abläufen berücksichtigt werden).

Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,0 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 %.

$\delta U_{i,S1-2}$:

Unbekannte Messabweichung der Normalhygrometer aufgrund der Differenz der Anzeigen der beiden Normalhygrometer. Der zwischen den beiden Normalhygrometern beobachtete Unterschied der gemessenen relativen Feuchte darf nicht größer als $\pm 0,42$ % ($\cong 0,7 \cdot U_{\text{cal},S}$) sein. Liegt der Unterschied nicht innerhalb dieser Grenzen, müssen die Beobachtungen wiederholt und/oder die Gründe für die festgestellten großen Differenzen eingehender untersucht werden.

Beide Hygrometer zeigen eine Anzeigedifferenz von 0,3 %. Das Kriterium ist damit erfüllt und der Mittelwert der Anzeigen wird als Referenzwert benutzt.

Für den Mittelwert muss solange die Differenz der Anzeigen beider Normalhygrometer deutlich kleiner ist als die Unsicherheit der Kalibrierung der Normalhygrometer kein zusätzlicher

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	64 / 80

Messunsicherheitsbeitrag angesetzt werden. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,0 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 %.¹²

δU_{Tdep} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Abhängigkeit der Feuchtemessung der Normalhygrometer von der Gastemperatur. Die relative Feuchte der Normalhygrometer wurde an mehreren Punkten bei 15 °C und 25 °C kalibriert. Dazwischen erfolgt eine Interpolation. Aufgrund der Interpolation wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,35 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,20 %.¹³

δT_{htd} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Wärmeableitung der Normalhygrometer. Da die Sensoren der Normale nicht vollständig eintauchen, wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 23 °C und 50,1 % einen Wert von $c_T = 3,03 \%/K$.

δT_{sht} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Eigenerwärmung der Normalhygrometer. Aufgrund von Untersuchungen bei den verwendeten Anströmgeschwindigkeiten der Normalhygrometer wird ein maximaler Unsicherheitsbeitrag von 0,1 K abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 23 °C und 50,1 % einen Wert von $c_T = 3,03 \%/K$.

δT_{inbo} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der räumlichen Inhomogenität der relativen Feuchte in der Kalibrierkammer. Die Untersuchung des Kalibriervolumens wurde nach Kapitel 6.2.1 in den Messgrößen Temperatur und Taupunkttemperatur (= absolute Feuchte) durchgeführt. Die maximale Abweichung der Temperatur an den Messorten zur Temperatur im Zentrum des Nutzvolumens betrug $\pm 0,2$ K. Eine räumliche Inhomogenität der Taupunkttemperatur zwischen den Messorten wurde nicht festgestellt. Deshalb erfolgt die Berücksichtigung der räumlichen Inhomogenität der relativen Feuchte nur in der Messgröße Temperatur. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 200 mK angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 115 mK. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 23 °C und 50,1 % einen Wert von $c_T = 3,03 \%/K$.

δT_{rad} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund des Strahlungseinflusses auf die Messung der Temperatur in der Kalibrierkammer. Die Untersuchung erfolgte mit zwei Thermometern mit unterschiedlichen Emissionsgraden nach Kapitel 6.2.3. Sie ergab eine maximale Abweichung der Temperatur zwischen den beiden Thermometern von 0,05 K. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 50 mK angesetzt. Die

¹² Sollte die Abweichung der Anzeigen beider Normale größer als das 0,7-fache der erweiterten Kalibrierunsicherheit der Normale sein und keine Untersuchung der Ursachen und Wiederholung der Messungen erfolgen dann ist die Differenz der Anzeigen beider Normale als halbe Breite der Rechteckverteilung zu $\delta U_{i,S1-2}$ anzusetzen.

¹³ Sollten die Normalhygrometer verschiedenen Typs sein dann kann auch hier ein nicht korreliertes Verhalten angesetzt werden (siehe Beiträge zu Kalibrierung, Drift, ...).

zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 29 mK. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 23 °C und 50,1 % einen Wert von $c_T = 3,03 \text{ \%}/\text{K}$.

δU_{inst} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Instabilität der relativen Feuchte in der Kalibrierkammer. Die Untersuchung des Kalibriervolumens nach Kapitel 6.2.2 ergab eine maximale Abweichung der relativen Feuchte vom Mittelwert über 30 min von $\pm 0,3 \text{ \%}$. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,3 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,17 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 8 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$U_{i,S}$	Mittelwert der korrigierten Ablesungen der Normale	50,1 %	0,04 %	0,04 %	Normal	1	1,00	0,04 %
$\delta U_{\text{cal},S1}$	Kalibrierung Normal 1	0,0 %	0,60 %	0,30 %	Normal	2	0,50	0,15 %
$\delta U_{\text{cal},S2}$	Kalibrierung Normal 2	0,0 %	0,60 %	0,30 %	Normal	2	0,50	0,15 %
$\delta U_{\text{res},S1}$	Auflösung Messwerte Normal 1	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,01 %
$\delta U_{\text{res},S2}$	Auflösung Messwerte Normal 2	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,01 %
$\delta U_{\text{int},S1}$	Interpolation zwischen den Kalibriepunkten Normal 1	0,0 %	0,25 %	0,14 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,07 %
$\delta U_{\text{int},S2}$	Interpolation zwischen den Kalibriepunkten Normal 2	0,0 %	0,25 %	0,14 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,07 %
$\delta U_{\text{dri},S1}$	Drift von Normal 1	0,0 %	2,00 %	1,15 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,58 %
$\delta U_{\text{dri},S2}$	Drift von Normal 2	0,0 %	2,00 %	1,15 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,58 %
$\delta U_{\text{hys},S1}$	Hysterese Normal 1	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,00 %
$\delta U_{\text{hys},S2}$	Hysterese Normal 2	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,50	0,00 %
$\delta U_{i,S1-2}$	Differenz zwischen den beiden Normalen	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,00 %
$\delta U_{T\text{dep}}$	Temperaturabhängigkeit Feuchtemessung	0,0 %	0,35 %	0,20 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,20 %
δT_{htd}	Wärmeableitung	0,0 %	0,10 K	0,06 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,03 %/K	0,17 %
δT_{sht}	Eigenerwärmung	0,0 %	0,10 K	0,06 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,03 %/K	0,17 %
δT_{inho}	räumliche Inhomogenität Kalibrierkammer	0,0 %	0,20 K	0,12 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,03 %/K	0,35 %
δT_{rad}	Strahlungseinflüsse	0,0 %	0,05 K	0,03 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,03 %/K	0,09 %
δU_{inst}	zeitliche Instabilität Kalibrierkammer	0,0 %	0,30 %	0,17 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,17 %
$U_{w,S}$	relative Feuchte in der Kalibrierkammer	50,1 %					$u = 0,99 \text{ \%}$	

Tabelle 8: Messunsicherheitsbilanz der relative Feuchte im Mischgasgenerator (gemessen mit den Normalhygrometern)

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	66 / 80

Schritt 2: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Kalibriergegenstand angezeigten relativen Feuchte zur im Mischgasgenerator gemessenen Referenzfeuchte stellt das Kalibrierergebnis dar.

Die Unsicherheit der Referenzfeuchte und die Unsicherheitsbeiträge des Kalibriergegenstandes werden dem Kalibrierergebnis zugeordnet.

Durch Annahme einer Normverteilung und Multiplikation der Standardmessunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit U .

Für das Kalibrierergebnis gilt folgende Modellgleichung:

$$\Delta U_X = U_{i,X} - U_{w,S} + \delta U_{res,X} + c_T \cdot (\delta T_{htd,X} + \delta T_{sht,X}) + \delta U_{hys,X} + \delta U_{w,S} \quad (22)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$U_{w,S}$:

Unsicherheit des Feuchtereferenzwertes, der mit den Normalhygrometern in der Kalibrierkammer gemessen wurde. Die Unsicherheit der Referenzfeuchte ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 8. Der Beitrag wird als normalverteilt angenommen und die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 1,0 %.

$U_{i,X}$:

Relative Feuchte gemessen mit dem Kalibriergegenstand (kapazitiver Feuchtesensor) (60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des kapazitiven Feuchtesensors bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 50,8 % sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,04 %.

$\delta U_{res,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung des Kalibriergegenstandes. Die Auflösung der relativen Feuchteanzeige beträgt 0,1 %. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

$\delta T_{htd,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Wärmeableitung des Kalibriergegenstandes. Da der Sensor des Kalibriergegenstandes 15 cm und nicht komplett eintaucht, wird dieser Beitrag aufgrund von Untersuchungen mit maximal 0,1 K abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 23 °C und 50 % einen Wert von $c_T = 3,03 \text{ \%}/\text{K}$.

$\delta T_{sht,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Eigenerwärmung des Kalibriergegenstandes. Die Eigenerwärmung wird gemäß Kapitel 7.4.3 untersucht und zu maximal 0,1 K abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 K angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 K. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 23 °C und 50 % einen Wert von $c_T = 3,03 \text{ \%}/\text{K}$.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	67 / 80

$\delta U_{\text{hys},X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Hysterese des Kalibriergegenstandes. Die Kalibrierung erfolgte nach Ablauf B1 und beinhaltet keine Berücksichtigung einer möglichen Hysterese. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,0 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,0 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$U_{i,X}$	Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	50,8 %	0,04 %	0,04 %	Normal	1	1,00	0,04 %
$\delta U_{\text{res},X}$	Auflösung Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,03 %
$\delta T_{\text{htd},X}$	Wärmeableitung Kalibriergegenstand	0,0 %	0,10 K	0,06 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,03 %/K	0,17 %
$\delta T_{\text{sht},X}$	Eigenerwärmung Kalibriergegenstand	0,0 %	0,10 K	0,06 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,03 %/K	0,17 %
$\delta U_{\text{hys},X}$	Hysterese Kalibriergegenstand	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,00 %
$U_{w,S}$	relative Feuchte in der Kalibrierkammer	50,1 %	0,99 %	0,99 %	Normal	1	1,00	0,99 %
AU_X	Anzeigeabweichung Kalibriergegenstand	0,7 %	$U = 2,0 \%$ ($k = 2$)			$u = 1,02 \%$		

Tabelle 9: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis

Das Hygrometer hat bei 23 °C und 50,8 % eine Anzeigeabweichung von +0,7 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 2,1 %.¹⁴

¹⁴ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten:

„Das Hygrometer hat bei 23 °C und 50,8 % eine Korrektur von -0,7 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 2,1 %.“

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	68 / 80

Kalibrierung in einem 2-Druck-Feuchtgenerator

Kalibrierung eines Hygrometers mit kapazitivem Polymersensor als Messelement in einem 2-Druck-Feuchtgenerator bei 75 % relative Feuchte und 22 °C Gastemperatur. Der Feuchtgenerator wurde bezüglich der Anzeigeabweichung der Messgröße relative Feuchte kalibriert. Die Anzeige dient als Bezugsnormal (BN). Die Kalibrierung erfolgte nach Ablauf A1 (siehe Kapitel 9.3.1). Die Kalibrierung wurde zuerst aufwärts, danach abwärts durchgeführt. Nach einer Angleichzeit von 2 h wurde über einen Zeitraum von 10 min der arithmetische Mittelwert aus 60 Einzelwerten gebildet. Die Aufstellung ist in 2 Schritten gegliedert.

1. Bestimmung der relativen Feuchte in der Kammer des Feuchtgenerators.
2. Bestimmung der relativen Feuchte des Kalibriergegenstandes und dessen Messabweichung sowie der dazugehörigen erweiterten Messunsicherheit.

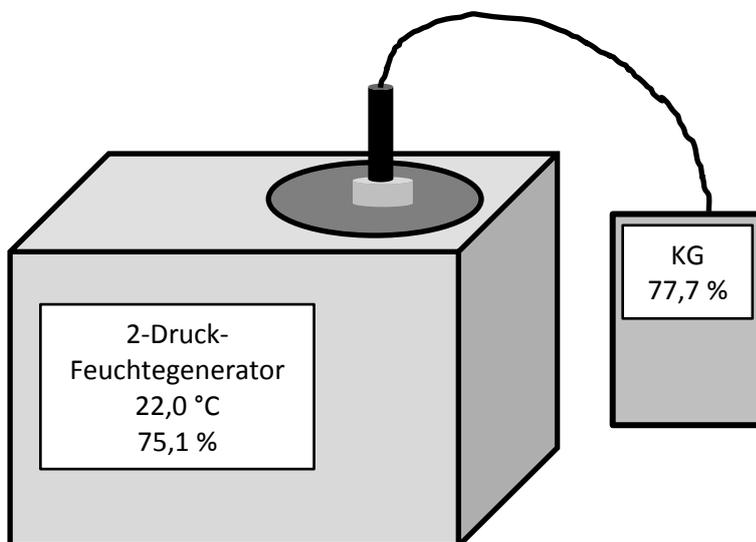


Abbildung 13: Schematische Darstellung Kalibrieraufbau

Einbautiefe

Der externe Sensor des Kalibriergegenstandes ist 5 cm tief (gemessen ab Innenkante Deckel des Feuchtgenerators) eingebaut.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	69 / 80

Schritt 1: Bezugsnormal

Modellgleichung:

$$U_{W,S} = U_{i,S} + \delta U_{\text{cal}} + \delta U_{\text{res}} + \delta U_{\text{int}} + \delta U_{\text{dri}} + c_t \cdot (\delta t_{\text{inho}} + \delta t_{\text{rad}}) + \delta U_{\text{inst}} \quad (23)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$U_{i,S}$:

Mittelwert der vom Feuchtegenerator angezeigten relativen Feuchte (60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesene Anzeige des Feuchtegenerators bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 75,1 % sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,02 %.

δU_{cal} :

Unbekannte Messabweichung des Feuchtegenerators aufgrund der Kalibrierung. Bei der Kalibrierung wurde eine mittlere Korrektur des Feuchtegenerators von 0,1 % festgestellt. Die Unsicherheit U der relativen Feuchteabweichung wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 0,6$ %; normalverteilt, $k = 2$). Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt damit 0,3 %.

δU_{res} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung des Feuchtegenerators. Die Auflösung der relativen Feuchteanzeige beträgt 0,1 %. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

δU_{int} :

Unbekannte Messabweichung der relativen Feuchteanzeige des Feuchtegenerators aufgrund der Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

δU_{dri} :

Unbekannte Messabweichung der relativen Feuchte des Feuchtegenerators aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung. Aus den letzten Kalibrierungen des Generators ergab sich eine maximale Drift von 0,2 % pro Jahr. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,2 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,12 %.

δt_{inho} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der räumlichen Inhomogenität der Temperatur in der Kalibrierkammer des Feuchtegenerators. Die Untersuchung des Kalibriervolumens nach Kapitel 6.2.1 ergab eine maximale Abweichung der Temperatur an den Messorten zur Temperatur im Zentrum des Nutzvolumens von 0,05 °C. Eine räumliche Inhomogenität der Taupunkttemperatur zwischen den Messorten wurde nicht festgestellt. Deshalb erfolgt die Berücksichtigung der räumlichen Inhomogenität der relativen Feuchte nur in der Messgröße Temperatur. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 °C angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,029 °C. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 22 °C und 75 % einen Wert von $c_t = 4,58$ %/°C.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	70 / 80

δt_{rad} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund des Strahlungseinflusses auf die Messung der Temperatur in der Kalibrierkammer des Feuchtegenerators. Die Untersuchung erfolgte mit zwei Thermometern mit unterschiedlichen Emissionsgraden nach Kapitel 6.2.3. Sie ergab eine maximale Abweichung der Temperatur zwischen den beiden Thermometern von 0,03 °C. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,03 °C angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,017 °C. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 22 °C und 75 % einen Wert von $c_t = 4,58 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

δU_{inst} :

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Instabilität der relativen Feuchte in der Kalibrierkammer. Die Untersuchung des Kalibriervolumens nach Kapitel 6.2.2 ergab eine maximale Abweichung der relativen Feuchte vom Mittelwert über 30 min von $\pm 0,1 \text{ \%}$. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 10 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$U_{i,S}$	Anzeige Bezugsnormale Feuchtegenerator	75,1 %	0,02 %	0,02 %	Normal	1	1,00	0,02 %
δU_{cal}	Kalibrierung Bezugsnormale	0,1 %	0,60 %	0,30 %	Normal	2	1,00	0,30 %
δU_{res}	Auflösung Bezugsnormale	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,03 %
δU_{int}	Interpolation zwischen den Kalibrierpunkten	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,03 %
δU_{dri}	Drift Bezugsnormale	0,0 %	0,20 %	0,12 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,12 %
δt_{inbo}	räumliche Inhomogenität Kalibrierkammer	0,0 %	0,05 °C	0,03 °C	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,58 %/°C	0,13 %
δt_{rad}	Strahlungseinflüsse	0,0 %	0,03 °C	0,02 °C	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,58 %/°C	0,08 %
δU_{inst}	zeitliche Instabilität Kalibrierkammer	0,0 %	0,10 %	0,06 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,06 %
$U_{w,S}$	relative Feuchte in der Kalibrierkammer	75,2 %					$u = 0,36 \text{ \%}$	

Tabelle 10: Messunsicherheitsbilanz relative Feuchte

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	71 / 80

Schritt 2: Kalibrierergebnis

Die Abweichung der vom Kalibriergegenstand angezeigten relativen Feuchte zur vom Feuchtegenerator dargestellten Referenzfeuchte stellt das Kalibrierergebnis dar.

Die Unsicherheit der Referenzfeuchte und die Unsicherheitsbeiträge des Kalibriergegenstandes werden dem Kalibrierergebnis zugeordnet.

Durch Annahme einer Normverteilung und Multiplikation der Standardmessunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit U .

Für das Kalibrierergebnis gilt die folgende Modellgleichung:

$$\Delta U_X = U_{i,X} - U_{w,S} + \delta U_{res,X} + c_T \cdot (\delta T_{htd,X} + \delta T_{sht,X}) + \delta U_{hys,X} + \delta U_{w,S} \quad (24)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$U_{w,S}$:

Unsicherheit des Feuchtereferenzwertes, die vom Feuchtegenerator dargestellt wird. Die Unsicherheit der Referenzfeuchte von 75,2 % ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 10. Der Beitrag wird als normalverteilt angenommen und die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 0,37 %.

$U_{i,X}$:

Relative Feuchte gemessen mit dem Kalibriergegenstand (kapazitiver Feuchtesensor) (60 Messwerte). Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des kapazitiven Feuchtesensors bestimmt. Wenn die Anzahl der Ablesungen klein ist (≤ 10) muss hier gegebenenfalls noch ein Faktor entsprechend der t-Verteilung zur Berücksichtigung des niedrigen Freiheitsgrades hinzugefügt werden (siehe EA-4/02 M [8]). Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 77,7 % sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,04 %.

$\delta U_{res,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Auflösung des Kalibriergegenstandes. Die Auflösung der relativen Feuchteanzeige beträgt 0,1 %. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,05 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

$\delta t_{htd,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Wärmeableitung des Kalibriergegenstandes. Da der Sensor des Kalibriergegenstandes nur 5 cm eintaucht, wird dieser Beitrag aufgrund von Untersuchungen mit 0,1 °C abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 °C angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 °C. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 22 °C und 75 % einen Wert von $c_t = 4,71 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

$\delta t_{sht,X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund einer Eigenerwärmung des Kalibriergegenstandes. Die Eigenerwärmung wird gemäß Kapitel 7.4.3 untersucht und zu maximal 0,1 °C abgeschätzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,1 °C angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,06 °C. Der zugehörige Sensitivitätskoeffizient hat bei 22 °C und 75 % einen Wert von $c_t = 4,71 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

	Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte https://doi.org/10.7795/550.20190214	DKD-R 5-8	
		Ausgabe:	02/2019
		Revision:	0
		Seite:	72 / 80

$\delta U_{\text{hys},X}$:

Unbekannte Messabweichung aufgrund der Hysterese des Kalibriergegenstandes. Die Hysterese wurde gemäß Kapitel 9.3.1 aus einer Messreihe mit steigender und fallender Feuchte bestimmt. Die Hysteresedifferenz beträgt 1,6 %. Für die Anzeige des Kalibriergegenstandes wird der Mittelwert der steigenden und fallenden Messreihe benutzt. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,8 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,46 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 11 zusammengefasst.

Größe	Benennung	Schätzwert	unbekannte Messabweichung	Standard-Messunsicherheit	Verteilung	Divisor	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
X_i	X_i	x_i	δx_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
$U_{i,X}$	Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	77,7 %	0,04 %	0,04 %	Normal	1	1,00	0,04 %
$\delta U_{\text{res},X}$	Auflösung Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,03 %
$\delta T_{\text{htd},X}$	Wärmeableitung Kalibriergegenstand	0,0 %	0,10 °C	0,06 °C	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,58 %/°C	0,26 %
$\delta T_{\text{sht},X}$	Eigenerwärmung Kalibriergegenstand	0,0 %	0,10 °C	0,06 °C	Rechteck	$\sqrt{3}$	4,58 %/°C	0,26 %
$\delta U_{\text{hys},X}$	Hysterese Kalibriergegenstand	0,0 %	0,80 %	0,46 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,00	0,46 %
$U_{w,S}$	relative Feuchte in der Kalibrierkammer	75,2 %	0,36 %	0,36 %	Normal	1	1,00	0,36 %
AU_X	Anzeigeabweichung Kalibriergegenstand	2,5 %	$U = 1,4 \%$		$(k = 2)$		$u = 0,70 \%$	

Tabelle 11: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis

Das Hygrometer hat bei 22 °C und 77,7 % eine Anzeigeabweichung von +2,5 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 1,4 %.¹⁵

¹⁵ Alternativ kann an Stelle der Anzeigeabweichung auch die Anzeigekorrektur verwendet werden. Diese unterscheidet sich von der Abweichung nur um das Vorzeichen. Im obigen Beispiel würde das Kalibrierergebnis dann lauten:

„Das Hygrometer hat bei 22 °C und 77,7 % eine Korrektur von -2,5 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 2,5 %.“

Anhang B Musterkalibrierscheine (Auszüge)

Kalibrierverfahren

Die Feuchtekalibrierung wurde nach der DKD-Richtlinie DKD-R 5-8 „Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte“, Ausgabe 02/2019 nach Ablauf A2 (aufwärts/abwärts) durchgeführt.

Messbedingungen

Die Kalibrierung wurde in einem Klimaschrank bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 2 m/s durchgeführt.

Der externe Fühler des Kalibriergegenstandes wurde inklusive 1 m seiner Anschlussleitung im Klimaschrank positioniert. Das Anzeigegerät war während der Kalibrierung außerhalb der Messkammer den Raumbedingungen ausgesetzt. Die Angleichzeit für jeden Kalibrierpunkt betrug mindestens 150 min.

Der Startwert für die Kalibrierung war die angegebene Umgebungsbedingung.

Der Wert der Hysterese ist in der Messunsicherheit nicht berücksichtigt.

Der Referenzwert der relativen Feuchte wurde aus den Messwerten der Lufttemperatur und Taupunkttemperatur der Bezugsnormale berechnet.

Umgebungsbedingungen

Temperatur 23,0 °C ± 1 K
 Relative Feuchte 45 % ± 10 %

Kalibrierergebnisse der relativen Feuchte

Referenzwerte		Kalibriergegenstand		
Gastemperatur t in °C	relative Feuchte U_w in %	angezeigter Wert U in %	Messabweichung ΔU in %	Messunsicherheit U in %
20	20,1	19,7	-0,4	0,6
20	50,0	49,9	-0,1	0,8
20	80,0	80,3	+0,3	1,0
20	90,1	91,2	+1,1	1,1
20	80,1	81,3	+1,2	1,0
20	50,0	50,6	+0,6	0,8
20	20,0	19,7	-0,3	0,6

Angegeben sind die Messergebnisse in der Reihenfolge der Kalibrierung.

Messunsicherheit

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß EA-4/02 M: 2013 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt bei einer Normalverteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Kalibrierverfahren

Die Feuchtekalibrierung wurde nach der DKD-Richtlinie DKD-R 5-8 „Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte“, Ausgabe 02/2019 nach Methode B2 (aufwärts) durchgeführt.

Messbedingungen

Die Kalibrierung wurde in einem Feuchtegenerator bei einer Luftwechselrate von ca. 10 / min durchgeführt. Die Rückführung erfolgt über Temperatur- und Druckmessungen. Der Kalibriergegenstand war komplett in der Kalibriereinrichtung eingebaut. Die Angleichzeit für jeden Kalibrierpunkt betrug mindestens 120 min. Der Startwert für die Kalibrierung war die angegebene Umgebungsbedingung. Eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes ist in der Messunsicherheit nicht berücksichtigt.

Umgebungsbedingungen

Temperatur 22,5 °C ± 1 K
 Relative Feuchte 56 % ± 10 %

Kalibrierergebnisse der relativen Feuchte

Referenzwerte		Kalibriergegenstand		
Gastemperatur <i>t</i> in °C	relative Feuchte <i>U_w</i> in %	angezeigter Wert <i>U</i> in %	Messabweichung ΔU in %	Messunsicherheit <i>U</i> in %
25	10,0	10,3	+0,3	0,3
25	40,0	40,3	+0,3	0,4
25	70,0	69,4	-0,6	0,6
70	10,1	10,5	+0,4	0,3
70	40,0	40,8	+0,8	0,4
70	69,9	71,2	+1,3	0,6
-10	10,0	11,0	+1,0	0,4
-10	40,1	40,5	+0,4	0,5
-10	70,1	68,9	-1,2	0,7
25	10,0	9,9	-0,1	0,3
25	40,0	40,2	+0,2	0,4
25	70,0	69,8	-0,2	0,6

Angegeben sind die Messergebnisse in der Reihenfolge der Kalibrierung. Die relative Feuchte bezieht sich auch bei -10 °C Gastemperatur auf die Sättigung über Wasser.

Messunsicherheit

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß EA-4/02 M: 2013 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt bei einer Normalverteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Kalibrierverfahren

Die Feuchtekalibrierung wurde nach der DKD-Richtlinie DKD-R 5-8 „Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte“, Ausgabe 02/2019 nach Methode C1 (abwärts) durchgeführt.

Messbedingungen

Die Kalibrierung wurde in einem Feuchtegenerator bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 1 m/s durchgeführt.

Der externe Sensor des Kalibriergegenstandes wurde 10 cm in die Kalibriereinrichtung eingetaucht. Die Angleichzeit für jeden Kalibrierpunkt betrug mindestens 120 min.

Die Startwerte für die Kalibrierung waren 75 % relative Feuchte bei 23 °C Gastemperatur. Eine mögliche Hysterese des Kalibriergegenstandes ist in der Messunsicherheit nicht berücksichtigt.

Umgebungsbedingungen

Temperatur 21,7 °C ± 1 K
 Relative Feuchte 34 % ± 10 %

Kalibrierergebnisse der relativen Feuchte

Referenzwerte		Kalibriergegenstand		
Gastemperatur t in °C	relative Feuchte U_w in %	angezeigter Wert U in %	Messabweichung ΔU in %	Messunsicherheit U in %
23	65,1	66,3	+1,2	1,5
23	40,0	40,9	+0,9	1,3
23	15,0	15,4	+0,4	1,2

Angegeben sind die Messergebnisse in der Reihenfolge der Kalibrierung.

Messunsicherheit

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß EA-4/02 M: 2013 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt bei einer Normalverteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Anhang C Informationen zur thermischen Ankopplung

Hinweise zu thermischer Ankopplung

Grundvoraussetzung bei Feuchtigkeitsmessungen mit einem Sensor für relative Feuchte ist die vollständige thermische Ankopplung des Sensors an die Gas- oder Lufttemperatur, da die relative Feuchte von der Temperatur abhängig ist. Bedingt durch Eigenerwärmung, Wärmeableitung, Strahlungseinfluss oder mangelnde Wartezeiten können sonst erhebliche Messfehler auftreten.

Nachfolgend ist die Änderung der relativen Feuchte, die sich bei einer Erwärmung des Feuchtesensors um 1 K gegenüber der Lufttemperatur von 20 °C ergibt, in Abhängigkeit der relativen Feuchte bei einer Temperatur von 20 °C dargestellt.

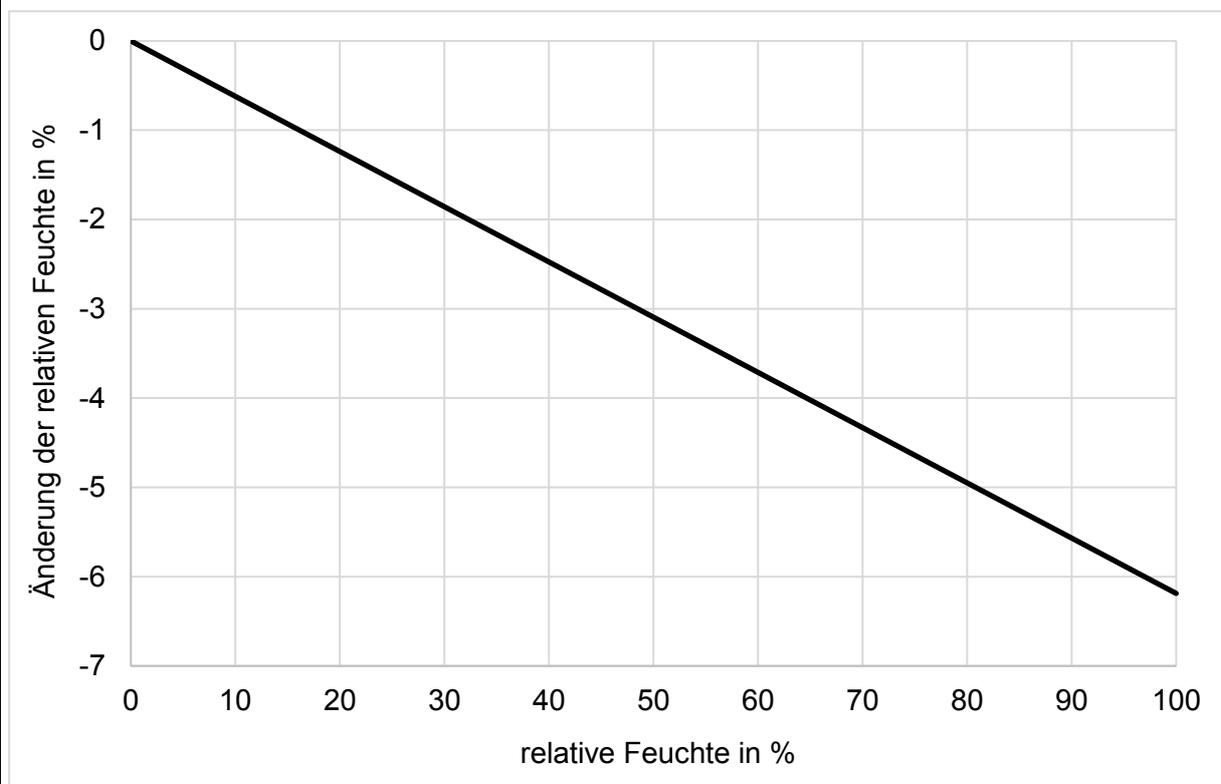


Abbildung 14: Änderung der relativen Feuchte in Abhängigkeit der relativen Feuchte bei einer Erwärmung von 1 K bezogen auf eine Lufttemperatur von 20 °C.

Es kommt zu einer Abnahme der relativen Feuchte, wobei die Sensitivität mit zunehmender relativer Feuchte ansteigt.

Umgekehrt kommt es bei einer Wärmeableitung des Feuchtesensors, d.h. die Temperatur des Sensors ist niedriger als die Lufttemperatur, zu einer Erhöhung der relativen Feuchte. Bei hoher Feuchte besteht zudem zusätzlich die Gefahr einer Betauung.

Anhang D Informationen zu elektronischen Feuchtesensoren

Hinweise zu Hysterese und Angleichverhalten von elektronischen Feuchtesensoren

Zur besseren Einordnung der Hysterese und des Angleichverhaltens sind nachfolgend Kalibrierergebnisse von 3 unterschiedlichen kapazitiven Feuchtesensoren (Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3) grafisch dargestellt.

Kalibrierablauf

Die Kalibrierung wurde nach Ablauf A1 (aufwärts / abwärts) bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,08 m/s und einer Lufttemperatur von 20 °C, mit folgenden relativen Feuchten durchgeführt:

S0: 40 %; N1a: 65 % - aufwärts; N2: 90 % - aufwärts; N1b: 65 % - abwärts

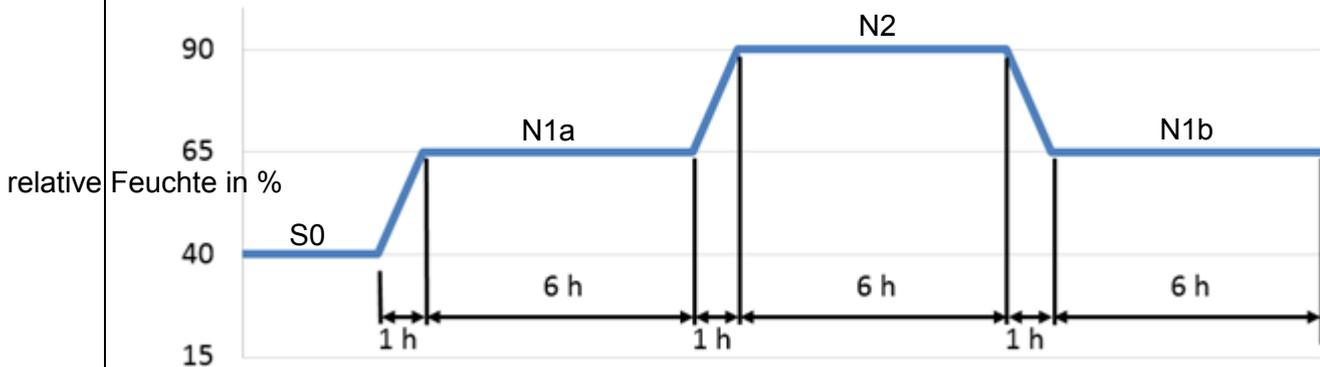


Abbildung 15: grafische Darstellung der Kalibrierabfolge (Ablauf A1)

Jeder Kalibrierpunkt wurde 6 h lang gehalten. Der Wechsel zum nächsten Punkt wurde langsam innerhalb 1 h ausgeführt.

Die Kalibrierung wurde in einem 2-Druck-Feuchtegenerator durchgeführt. Als Bezugsnormale wurden ein Taupunktspiegel und vier Pt100 Widerstandsthermometer, ausgelesen über eine Temperaturmessbrücke, verwendet.

Kalibrierergebnisse N1a und N1b

Nachfolgend sind die Messabweichungen der Feuchtesensoren bei den Kalibrierpunkten N1a (aufwärts) sowie N1b (abwärts) dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Mittelwert der Messabweichungen bei 6 h von N1a und N1b zu Null gesetzt, um nur den zeitlichen Verlauf der Hysterese darzustellen:

$$\frac{\Delta U_{N1a}(6:00) + \Delta U_{N1b}(6:00)}{2} \triangleq 0 \% \quad (25)$$

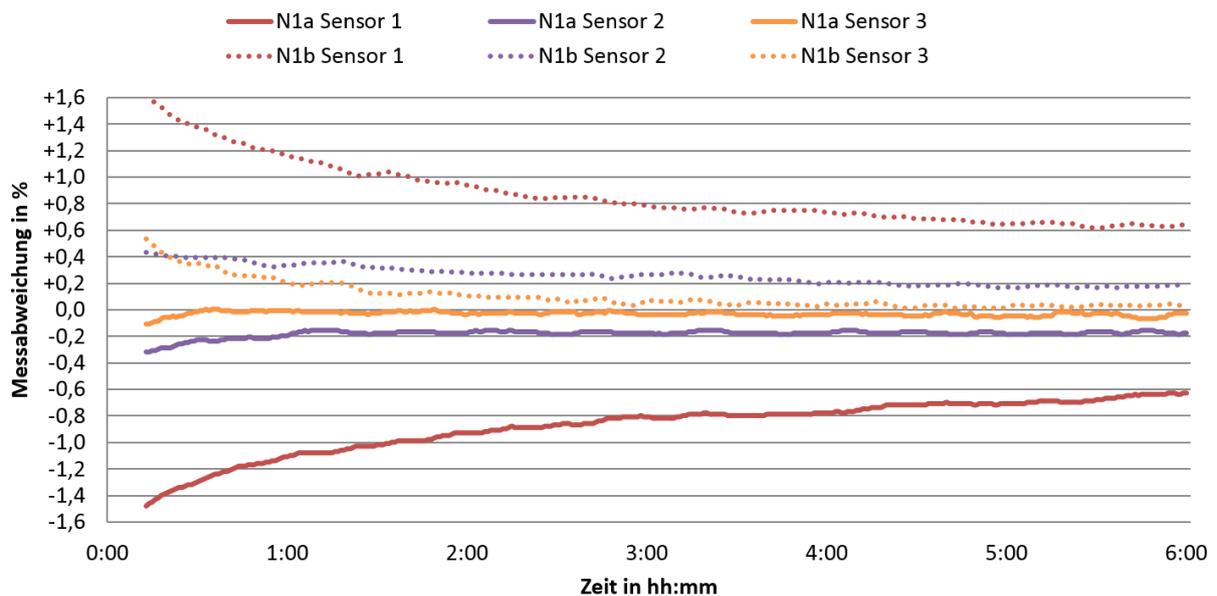


Abbildung 16: Messabweichungen der relativen Feuchte von 3 Feuchtesensoren in Abhängigkeit der Zeit bei den Punkten N1a und N1b

Ergebnis

Die drei Feuchtesensoren weisen ein unterschiedliches Angleichverhalten auf, z.B. sind Sensor 1 und 2 schneller angeglichen als Sensor 3. Auch zeigt Sensor 3 ein ausgeprägteres Hystereseverhalten als Sensor 1 und 2. Zudem ist die Hysterese bei kurzen Angleichzeiten unsymmetrisch (Hysterese aufsteigend ist kleiner als Hysterese fallend).

Kalibrierergebnisse N2

Nachfolgend sind die Messabweichungen der Feuchtesensoren bei dem Kalibrierpunkten N2 (aufwärts) dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Messabweichungen bei 6 h zu Null gesetzt, um nur den zeitlichen Verlauf des Angleichverhaltens darzustellen:

$$\Delta U_{N_2}(6:00) \triangleq 0 \% \quad (26)$$

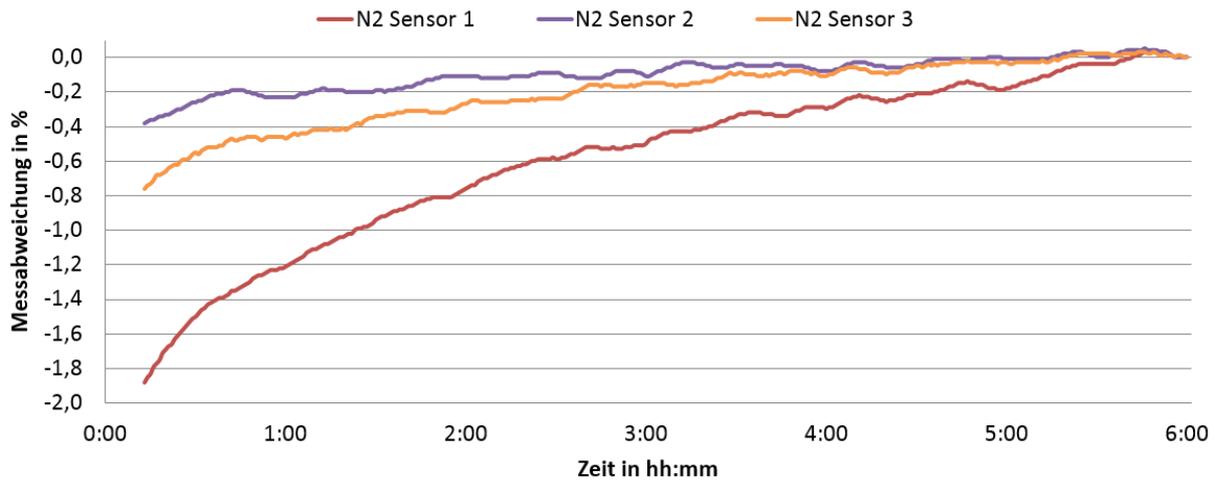


Abbildung 17: Messabweichungen der relativen Feuchte von 3 Feuchtesensoren in Abhängigkeit der Zeit bei dem Kalibrierpunkt N2

Ergebnis

Bei den Feuchtesensoren ist ein unterschiedliches Angleichverhalten zu beobachten. Speziell bei hoher relativer Feuchte (über 80 %) kann es zu einem stetigen Anstieg des Messwertes kommen.

Zusammenfassung

Die Verhaltensweisen bezüglich Hysterese und Angleichverhalten sind von mehreren Faktoren abhängig. Hierzu zählen: Aufbau des Feuchtemessgerätes (Einbau des Sensorelementes im Messgerät), Filter- oder Schutzkappe, Angleichzeit, Strömungsgeschwindigkeit, elektronische oder mathematische Korrekturen, Hersteller, sowie Temperatur und Feuchte.

Bei hohen Anforderungen an Messaufgabe und Präzision wird daher eine Untersuchung hinsichtlich Hysterese und Angleichverhalten empfohlen.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de