

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**Richtlinie
DKD-R 5-7**

Kalibrierung von Klimaschränken

Ausgabe 01/2025

<https://doi.org/10.7795/550.20250120>



	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	2 / 66

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Richtlinie DKD-R 5-7, Kalibrierung von Klimaschränken, Ausgabe 01/2025, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

DOI: 10.7795/550.20250120


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 nur nicht-kommerziell verbreitet werden darf. Eine Nutzung der Inhalte für die kommerzielle Verwendung in Kalibrierlaboratorien ist ausdrücklich erlaubt.



Autoren:

Deschermeier, Regina; Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig;
Dillmann, Eugen; Weiss Technik GmbH, Balingen;
Friederici, Sven; Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Berlin;
Gutknecht, Harald; Thermo Electron LED GmbH, Langenselbold;
Hager, Helmut; Techmetrics GmbH, Winnenden;
Harke, Andreas; Weiss Technik GmbH, Balingen;
Hermann, Dirk; ThermoTEC Weilburg GmbH & Co. KG, Weilburg;
Jehnert, Diana; ZMK & ANALYTIK GmbH, Wolfen;
Krummeck, Stefan; JUMO GmbH & Co. KG, Fulda;
Mandzo, Tihomir; CTS Clima Temperatur Systeme GmbH, Hechingen;
Nikasch, Manuela; RS-Simulatoren Prüf- und Messtechnik GmbH, Oberhausen;
Reinelt, Thomas; Weiss Technik GmbH, Reiskirchen;
Sander, Christian; Testo Industrial Services GmbH, Kirchzarten;
Schnelle-Werner, Olaf; ZMK & ANALYTIK GmbH, Wolfen;
Waldera, Rudolf; Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen;
Waldschmidt, Dirk; Weiss Technik GmbH, Reiskirchen.

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.

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	3 / 66

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: 0531 592-8021
Internet: www.dkd.eu

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	4 / 66

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. Außerdem kann durch die Umsetzung der Richtlinien der Stand der Technik auf dem jeweiligen Gebiet in die Laborpraxis Eingang finden.

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.

Die vorliegende Ausgabe ersetzt alle bisherigen Ausgaben der DKD-R 5-7.

Ab dem 01.01.2028 darf nur noch die vorliegende Ausgabe angewendet werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Geltungsbereich	7
2	Begriffsbestimmungen.....	7
3	Symbole	9
3.1	Variablen.....	9
3.2	Indizes.....	11
4	Ziel der Kalibrierung	12
5	Anforderungen an den Klimaschrank (Kalibrierfähigkeit)	13
6	Kalibriermethoden	15
7	Kalibrierverfahren	17
7.1	Anordnung der Messorte	17
7.1.1	Kalibrierung für das Nutzvolumen nach Methode (A) oder (B).....	17
7.1.2	Kalibrierung für Messorte nach Methode (C)	18
7.1.3	Kalibrierung für das Nutzvolumen nach Methode (D)	18
7.2	Bestimmung der räumlichen Temperaturinhomogenität	20
7.3	Bestimmung der zeitlichen Temperaturinstabilität	20
7.4	Bestimmung des Strahlungseinflusses	21
7.5	Bestimmung des Beladungseinflusses	23
7.5.1	Aktive Beladung mit Verlustleistung	24
7.6	Relative Feuchte	24
7.6.1	Feuchteinhomogenität.....	25
7.6.2	Feuchteinstabilität	26
7.7	Anzahl der Kalibrierpunkte	26
8	Unsicherheitsbeiträge.....	27
8.1	Räumliche Inhomogenität δT_{inhom} ; δU_{inhom}	27
8.2	Zeitliche Instabilität δT_{instab} ; δU_{instab}	28
8.3	Strahlungseinfluss $\delta T_{radiation}$	28
8.4	Einfluss der Beladung δT_{load} ; δU_{load}	29
8.5	Einfluss der Umgebungsbedingungen δT_{env} ; δU_{env}	29
8.6	Anzeigeauflösung $\delta T_{res,X}$; $\delta U_{res,X}$	29
8.7	Messabweichung der Normalmesseinrichtung δTS ; δUS	30
9	Umgebungsbedingungen	30
10	Kalibrierschein.....	31
11	Literaturverzeichnis	33
Anhang A	Messunsicherheitsbilanzen (Beispiel).....	34
Anhang B1	Musterkalibrierschein für die Kalibrierung nach Methode (A) bzw. (B)	
(Variante 1)	56

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	6 / 66

Anhang B2	Musterkalibrierschein für die Kalibrierung nach Methode (A) bzw. (B) (Variante 2)	58
Anhang B3	Musterkalibrierschein für die Kalibrierung nach Methode (D).....	60
Anhang C	Musterkalibrierschein für die Kalibrierung eines Messortes nach Methode (C)....	62
Anhang D	Beiblatt zum Kalibrierschein für Klimaschränke	64
Anhang E	Zusatzinformationen für den Einsatz von Klimaschränken im Rahmen der metrologischen Rückführbarkeit	65

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	7 / 66

1 Zweck und Geltungsbereich

Diese Richtlinie dient dazu, Mindestanforderungen an das Kalibrierverfahren und an die Messunsicherheitsbestimmung bei der Kalibrierung von Klimaschränken festzulegen.

Sie gilt für die Kalibrierung von Klimaschränken bezüglich Gastemperatur und relativer Gasfeuchte oder nur bezüglich der Gastemperatur.

Im Sinne der Richtlinie werden unter Gasfeuchte gasförmige Stoffsysteme, ausschließlich bestehend aus den Komponenten Wasser und Trägergas, verstanden.

Der Anwendungsbereich der Richtlinie umfasst die Trägergase Luft und Stickstoff. Bei anderen Trägergasen ist ein Validierungsnachweis erforderlich.

Die Richtlinie gilt ebenfalls für die Kalibrierung von einzelnen Messorten in Klimaschränken; in diesem Fall gilt nicht der gesamte Klimaschrank als kalibriert.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

2 Begriffsbestimmungen

Klimaschrank

Eine technische Einrichtung, mit der in einem abgeschlossenen Volumen in einem Arbeitsbereich gezielt vorgegebene Werte der Gastemperatur T und ggf. zusätzlich der relativen Feuchte U realisiert werden können, wird im Sinne dieser Richtlinie als Klimaschrank bezeichnet.


Dabei wird durch technische Mittel (thermische Isolierung, Luftumwälzung, Strahlungsschirme usw.) die zeitliche Instabilität und räumliche Inhomogenität von Gastemperatur und -feuchte sowie die Abweichungen der im Nutzvolumen vorliegenden Gastemperaturen und -feuchten zu den Sollwerten bzw. den von den zugehörigen Messeinrichtungen erfassten Werten minimiert.

Klimaschränke im Rahmen dieser Richtlinie haben ein durch die Messorte aufgespanntes Nutzvolumen, wobei das Verhältnis zwischen der größten und kleinsten räumlichen Ausdehnung dieses Nutzvolumens kleiner als 5 ist.

Klimaschränke können mobil oder stationär sein. Die Wandungen, die zur thermischen Isolierung zur Umgebung dienen, dürfen jedoch nicht unmittelbar Bestandteil von Gebäuden oder Fahrzeugen sein, sondern müssen dem Klimaschrank eindeutig zugeordnet werden können.

Die Kalibrierung im Rahmen dieser Richtlinie kann bezüglich Gastemperatur und relativer Feuchte oder auch nur bezüglich der Gastemperatur (Temperaturschrank) erfolgen.

Die Herstellerbezeichnung für einen Klimaschrank entsprechend dieser Richtlinie kann gegebenenfalls abweichend sein (Klimakammer, Wärmeschrank, Tiefkühlschrank, etc.); wesentlich für die Einstufung als Klimaschrank ist die Erfüllung der Anforderungen gemäß Kapitel 5.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	8 / 66

Messort

Ein Messort ist die räumliche Position, an der zur Kalibrierung ein Temperatur- bzw. Feuchtesensor im Nutzvolumen angeordnet ist.

Ein Messort ist somit ein kleines Volumen, das durch die Abmessungen der Sensorelemente und deren Positioniergenauigkeit definiert ist (d. h. maximale Ausdehnung in jeder Dimension ca. 5 cm). Wird nur an einem Messort gemessen, gilt das Kalibrierergebnis nur für diesen Messort. Eine Extrapolation auf ein größeres Volumen ist nicht zulässig.

Innenraumvolumen

Das Innenraumvolumen wird über den für den Anwender zugänglichen Innenraum definiert.

Nutzvolumen

Das Nutzvolumen ist der von den Messorten der zur Kalibrierung eingesetzten Sensoren aufgespannte Teil des Innenraumvolumens. Dieses kann je nach Anordnung der Messorte deutlich vom Innenraumvolumen des Klimaschranks abweichen. Die Kalibrierung des Klimaschranks gilt prinzipiell nur für dieses Nutzvolumen. Dabei müssen die Mindestanforderungen an die Messortlage nach dieser Richtlinie erfüllt werden (siehe Kapitel 5 und 7.1).

Wenn die Kalibrierung nur an einzelnen isolierten Messorten, die kein Volumen aufspannen, ausgeführt wird, gelten nur diese, nicht jedoch der Klimaschrank und sein Innenraumvolumen als kalibriert [siehe Kalibriermethode (C)].

Eine Besonderheit stellt die Kalibriermethode (D) dar. Hier gilt bei Beachtung der erforderlichen Positionierung der Sensoren (siehe Abschnitt 7.1.3) ebenfalls das gesamte Nutzvolumen als kalibriert.

Referenzmessort

Der Referenzmessort ist diejenige Position im Nutzvolumen, für welche die Abweichung zwischen Gastemperatur und -feuchte von den Anzeigewerten angegeben wird.

Bevorzugt wird die geometrische Mitte des Nutzvolumens als Referenzmessort ausgewählt.

Auf Kundenwunsch sind jedoch auch andere Festlegungen des Referenzmessortes möglich. Die Lage des Referenzmessortes muss im Kalibrierschein angegeben werden.

Atmosphärischer Druck

Unter „atmosphärischem Druck“ wird im Sinne dieser Richtlinie der Druckbereich 50 hPa unterhalb bis 50 hPa oberhalb des nicht durch technische Maßnahmen veränderten Umgebungsdrucks verstanden.

Gastemperatur / Gasfeuchte

Die Gastemperatur bezeichnet die Temperatur des Gasgemisches im Nutzvolumen des Klimaschranks; die Gasfeuchte entsprechend die relative Feuchte des Gasgemisches. Im Rahmen der Richtlinie werden die Gasgemische Luft/Wasser und Stickstoff/Wasser betrachtet. Für das Gasgemisch Luft/Wasser werden im Sprachgebrauch auch die Begriffe Lufttemperatur / Luftfeuchte verwendet.

3 Symbole

3.1 Variablen

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Variablen

Variable	Bezeichnung	Einheit
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
U^1	relative Feuchte	1 ²
δT_{inhom}	räumliche Inhomogenität der Gastemperatur	K
δU_{inhom}	räumliche Inhomogenität der relativen Feuchte	1 ²
$T_{\text{ref}} / T_{\text{ref, load}}$ oder $t_{\text{ref}} / t_{\text{ref, load}}$	Gastemperatur des Referenzortes (unbeladen / beladen)	K bzw. °C
$U_{\text{ref}} / U_{\text{ref, load}}$	relative Feuchte des Referenzortes (unbeladen / beladen)	1 ²
δT_{instab}	zeitliche Instabilität der Gastemperatur	K
δU_{instab}	zeitliche Instabilität der relativen Feuchte	1 ²
\bar{T} oder \bar{t}	zeitlich-mittlere Gastemperatur	K bzw. °C
\bar{U}	zeitlich-mittlere relative Feuchte	1 ²
$\delta T_{\text{radiation}}$	Strahlungseinfluss auf die Gastemperatur	K
T_{le} oder t_{le}	Temperatur eines Körpers mit kleinem Emissionsgrad	K bzw. °C
T_{he} oder t_{he}	Temperatur eines Körpers mit hohem Emissionsgrad	K bzw. °C
T_{wall} oder t_{wall}	Wandtemperatur	K bzw. °C
δT_{load}	Beladungseinfluss auf die Gastemperatur	K
δU_{load}	Beladungseinfluss auf die relative Feuchte	1 ²
δT_{env}	Umgebungseinfluss auf die Gastemperatur	K
δU_{env}	Umgebungseinfluss auf die relative Feuchte	1 ²
$\delta T_{\text{res, std}} / \delta T_{\text{res}}$	Auflösung des Normalthermometers / der Temperaturanzeige des Klimaschranks	K

¹ 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.

² Die relative Feuchte ist eine dimensionslose Verhältnisangabe, 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.


Variable	Bezeichnung	Einheit
$\delta U_{\text{res, std}} / \delta U_{\text{res}}$	Auflösung des Normalhygrometers / der Feuchteanzeige des Klimaschranks	1 ³
$\delta T_{i, \text{ std}}$	Messabweichung des Normalthermometers am Messort i ($i = 1, \dots, N$)	K
$\delta U_{i, \text{ std}}$	Messabweichung des Normalhygrometers am Messort i ($i = 1, \dots, N$)	1 ³
$\delta T_{\text{ cal}}$	Messabweichung des Normalthermometers aus seiner Kalibrierung	K
$\delta U_{\text{ cal}}$	Messabweichung des Normalhygrometers aus seiner Kalibrierung	1 ³
$\delta T_{\text{ drift}}$	Drift des Normalthermometers im Rekalibrierungszeitraum	K
$\delta U_{\text{ drift}}$	Drift des Normalhygrometers im Rekalibrierungszeitraum	1 ³
$\delta T_{\text{ heat}}$	Messabweichung des Normalthermometers auf Grund der Eigenerwärmung	K
$T_{\text{ ind, S}}$ oder $t_{\text{ ind, S}}$	Anzeige des Normalthermometers	K bzw. °C
$U_{\text{ ind, S}}$	Anzeige des Normalhygrometers	1 ³
$\Delta T_{\text{ X}}$	Abweichung der Gastemperatur für den Klimaschrank	K
$\Delta U_{\text{ X}}$	Abweichung der relativen Feuchte für den Klimaschrank	1 ³
$T_{\text{ ind, X}}$ oder $t_{\text{ ind, X}}$	Anzeige der Gastemperatur im Klimaschrank	K bzw. °C
$U_{\text{ ind, X}}$	Anzeige der relativen Feuchte im Klimaschrank	1 ³
T_i oder t_i	Messwert der Gastemperatur für Messort i im Klimaschrank	K bzw. °C
U_i	Messwert der relativen Feuchte für Messort i im Klimaschrank	1 ³
L	Kantenlänge des Innenraumes	m
x	Wandabstand	m

³ Die relative Feuchte ist eine dimensionslose Verhältnisangabe, 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.

3.2 Indizes

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Indizes

Indizes	Bezeichnung
d	Taupunkt
f	Frostpunkt
inhom	Inhomogenität
instab	Instabilität
ref	Referenzort
load	beladen
radiation	Strahlungseinfluss
le	kleiner Emissionsgrad
he	hoher Emissionsgrad
env	Umgebung
res	Auflösung
std	Normal
cal	Kalibrierung
heat	Eigenerwärmung
ind	Anzeige
<i>i</i>	Messort <i>i</i>

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	12 / 66

4 Ziel der Kalibrierung


Die Kalibrierung eines Klimaschranks dient der Feststellung der Abweichung⁴ der von den Anzeigen des Klimaschranks angezeigten Werte der Klimakenngrößen Gastemperatur und relative Feuchte in den zur Nutzung vorgesehenen Teilen des Innenraumvolumens bzw. an einzelnen Messorten aus dem Innenraumvolumen. Neben diesen Abweichungen werden zusätzliche Eigenschaften wie Inhomogenitäten, Stabilitäten usw. zur Charakterisierung des Klimaschranks und möglicher Einwirkungen auf das Prüfgut im Klimaschrank bestimmt. Diese Ergebnisse sind einerseits für den Nutzer des Klimaschranks von großem Interesse, da sie dessen Eigenschaften bei der Nutzung beschreiben, und andererseits für die Bestimmung der Messunsicherheit der Kalibrierergebnisse erforderlich.

Damit ergeben sich folgende Ziele:

- Kalibrierung der Anzeigen von Temperatur und relativer Feuchte durch Vergleich mit den im Nutzvolumen mit Referenzeinrichtungen gemessenen Werten für Gastemperatur und -feuchte (Angabe der Abweichungen bzw. Korrekturen)
- Feststellung der Unsicherheit der Temperatur und der relativen Feuchte bei der Kalibrierung unter definierten Bedingungen
- Auf Kundenwunsch kann im Rahmen der Kalibrierung der Nachweis des Einhaltens von Anwendertoleranzen unter definierten Bedingungen und/oder technischen Spezifikationen erfolgen.
- Auf Kundenwunsch kann die Kalibrierung auch nur an einzelnen Messorten erfolgen. Dabei werden jedoch einige Unsicherheitsanteile nicht ermittelt und nicht berücksichtigt. Das Ergebnis gilt dann jeweils nur für diese Orte, nicht jedoch für den gesamten Klimaschrank. [→ Kalibriermethode (C)].

Die Kalibrierung liefert keine vollständigen Informationen über die Klimagrößen Temperatur und relative Feuchte an der Oberfläche oder gar im Innenraumvolumen von im Klimaschrank befindlichem Prüfgut. Die Bestimmung der Körpertemperatur bzw. Materialfeuchte des Prüfgutes erfordert den Einsatz von kalibrierten Thermometern bzw. Feuchtemessgeräten im Prüfgut.

⁴ Alternativ zur Abweichung zwischen Anzeige und Referenzwert (Normal) kann auch die erforderliche Korrektur zur Anzeige angegeben werden. Diese unterscheidet sich in ihrem Wert von der Abweichung nur um das Vorzeichen.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	13 / 66

5 Anforderungen an den Klimaschrank (Kalibrierfähigkeit)

Klimaschränke sind im Sinne dieser Richtlinie nur dann kalibrierfähig, wenn sie die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Vorhandensein von Sensoren für Gastemperatur und ggf. zusätzlich für Gasfeuchte mit den zugehörigen Anzeigen als Bestandteil des Klimaschranks
- Vorhandensein von Regeleinrichtungen für die zu kalibrierenden Größen (relative Feuchte und/oder Temperatur) als Bestandteil des Klimaschranks, wobei eine Temperaturregelung in jedem Falle vorhanden sein muss
- Atmosphärischer Druck im Innenraum (Umgebungsdruck ± 50 hPa)
- System arbeitet mit feuchter Luft oder Stickstoff.
Bei reinen Temperaturmessungen sind auch andere Gase zulässig, sofern sie die Temperaturmessung nicht beeinflussen. Feste oder flüssige Zusatzstoffe (wie z. B. Salze) sind generell ausgeschlossen. Kalibrierfähigkeit auf Gasfeuchte nach dieser Richtlinie ist nur für feuchte Luft oder Stickstoff gegeben (s. Kapitel 1).
- Angaben zu Wärmequellen und -senken im Innenraumvolumen müssen vorliegen.
Ausgeschlossen sind direkte Strahlungsquellen (z. B. Strahler zur Sonnensimulation o. ä.)

Zusätzlich kann das Vorliegen von technischen Unterlagen von Vorteil sein, ist aber keine Bedingung.

Insbesondere Angaben zur Hersteller-Spezifikation sowie über die Art und Lage der Sensoren, die Eigenschaften der Isolation sowie die Ausführung der Temperierung und Befeuchtung können hilfreich für die Bewertung der Kalibrierergebnisse sein.

Bezüglich der maximalen Arbeits- und Kalibrierbereiche unterscheidet diese Richtlinie zwischen Klimaschränken mit aktiver Luftumwälzung und ohne aktive Luftumwälzung (erzwungene Konvektion) im Innenraum. In beiden Fällen muss der Klimaschrank eine aktive Heizung und/oder Kühlung besitzen.

a) Klimaschränke mit Umwälzeinrichtungen für das Gas / die Luft:

- Das Umluftsystem muss integraler Bestandteil des Kalibriergegenstandes sein und eine metrologisch sinnvolle Luftumwälzung gewährleisten.
Bei variabler Einstellung der Umwälzrate ist die Mindestanforderung gemäß Herstellerspezifikation einzuhalten. Die Einstellung der Umwälzrate, sofern variabel, ist im Kalibrierschein anzugeben (z. B. Drehzahl).
- Für die Kalibrierung der relativen Feuchte nach den Methoden (A), (B) und (D) gilt die Voraussetzung, dass der Gas-/ Luftdurchsatz eine Umwälzung des gesamten Gas-/ Luftvolumens in max. 30 s gewährleistet. Für den Nachweis ist die Herstellerspezifikation ausreichend.
Verfügt der Kalibriergegenstand über ein Umluftsystem, erfüllt jedoch nicht das o. g. Kriterium für die Gas-/ Luftwechselrate, so ist nur die Kalibrierung nach Methode (C) uneingeschränkt zulässig. Für die Methoden (A), (B) und (D) ist nur das Verfahren (F3) nach Kapitel 7.6 zulässig.
- Der maximale Gastemperaturbereich beträgt bei Erfüllung des Kriteriums für die Gas-/ Luftwechselrate -180 °C bis 500 °C. Andernfalls wird der Gastemperaturbereich eingeschränkt auf -160 °C bis 350 °C (siehe Tabelle 3). Kalibrierungen für die relative

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	14 / 66

Feuchte sind nur in entsprechenden Teilbereichen technisch und physikalisch möglich sowie sinnvoll.

b) Klimaschränke ohne Umwälzeinrichtungen für das Gas / die Luft:

- Der maximale Gastemperaturbereich beträgt -160 °C bis 350 °C.
- Das maximale Nutzvolumen ist auf 2000 l beschränkt.
- Die Kalibrierung der Größe relative Feuchte ist nicht zulässig.
- Aktive Beladung, die Verlustleistung umsetzt, ist nicht zulässig.

Die Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Kalibriermöglichkeiten in Abhängigkeit von der Gas-/Luftumwälzung im Prüfraumvolumen.

Tabelle 3: Übersicht der Kalibriermöglichkeiten in Abhängigkeit von der Gas- / Luftumwälzung

Einschränkungen bezogen auf:	Umluftsystem vorhanden:		
		ja	nein
	Der Kalibriergegenstand wälzt das Gas / die Luft im Prüfraumvolumen innerhalb von 30 s mindestens einmal um.	Der Kalibriergegenstand kann das Gas / die Luft des Prüfraumvolumens nicht innerhalb von 30 s mindestens einmal umwälzen.	natürliche Konvektion
Nutzvolumen (Kapitel 5)	nicht limitiert	nicht limitiert	max. 2000 Liter
Temperaturbereich (Kapitel 5)	-180°C bis 500°C	-160°C bis 350°C	-160°C bis 350°C
Kalibriermethoden (Kapitel 6)	alle Methoden zulässig	Kalibrierung der Temperatur: alle Methoden zulässig Kalibrierung der Feuchte: Methode (C) uneingeschränkt zulässig; Methode (A), (B), (D) nur nach Verfahren (F3) (Kapitel 7.6)	Kalibrierung der Temperatur: alle Methoden zulässig Kalibrierung der Feuchte: nicht zulässig
Feuchtemessverfahren (Kapitel 7.6)	alle Verfahren zulässig	Nur Verfahren 3 zulässig bei Methode A, B und D Methode C: alle Verfahren zulässig	Kalibrierung der Feuchte: nicht zulässig
aktive Beladung (Abschnitt 7.5.1)	max. 10 % der Heiz-/Kühlleistung des Kalibriergegenstandes	max. 10 % der Heiz-/Kühlleistung des Kalibriergegenstandes	nicht zulässig

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	15 / 66

6 Kalibriermethoden

Für die Kalibrierung eines Klimaschranks können folgende vier wesentlich unterschiedliche Methoden eingesetzt werden (die Messungen beziehen sich dabei immer auf Gastemperatur und relative Feuchte):

- (A)** Die Kalibrierung erfolgt für das von den Messorten aufgespannte Nutzvolumen im unbeladenen Klimaschrank. Für die Messortanzahl und Lage gelten die Mindestanforderungen (siehe Kapitel 7.1).

Die Kalibrierung umfasst:


- die Bestimmung der Anzeigeabweichung zwischen Anzeige und dem Referenzmessort im unbeladenen Zustand,
- die Bestimmung der räumlichen Inhomogenität im leeren Nutzvolumen,
- die Bestimmung der zeitlichen Instabilität im leeren Nutzvolumen,
- die Bestimmung des Strahlungseinflusses für den Referenzmessort,
- auf Kundenwunsch die Bestimmung des Beladungseinflusses für den Referenzmessort durch Vergleich beladenes und leeres Nutzvolumen.

- (B)** Die Kalibrierung erfolgt für das von den Messorten aufgespannte Nutzvolumen im beladenen Klimaschrank. Die Beladung kann der typischen Nutzung durch den Anwender entsprechen oder durch Auffüllen von mindestens 40 % des Nutzvolumens mit Probekörpern erfolgen. Für die einzelnen Untersuchungen und Unsicherheitskomponenten gelten die Regelungen für Methode (A). Der Einfluss der Beladung selbst wird durch eine zusätzliche Messung an einem zentralen Messort im unbeladenen Zustand ermittelt.

Die Kalibrierung umfasst:

- die Bestimmung der Anzeigeabweichung zwischen Anzeige und Referenzmessort, jeweils im beladenen Zustand,
- die Bestimmung der räumlichen Inhomogenität im beladenen Nutzvolumen,
- die Bestimmung der zeitlichen Instabilität im beladenen Nutzvolumen,
- die Bestimmung des Strahlungseinflusses für den Referenzmessort,
- die Bestimmung des Beladungseinflusses⁵ für den Referenzmessort durch Vergleich beladenes und leeres Nutzvolumen an allen Kalibrierpunkten.

⁵ Anmerkung: Optional kann die Bestimmung des Beladungseinflusses entfallen. In diesem Fall ist im Kalibrierschein darauf hinzuweisen, dass der Einfluss der Beladung nicht in der Messunsicherheit enthalten ist.

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	16 / 66

(C) Die Kalibrierung erfolgt für einzelne Messorte im Klimaschrank, die **kein** Nutzvolumen aufspannen.

Die Kalibrierung umfasst:

- die Bestimmung der Anzeigeabweichung zwischen Messung am Messort und Anzeige jeweils im beladenen oder unbeladenen Zustand,
- die Bestimmung der lokalen räumlichen Inhomogenität am Messort,
- die Bestimmung der zeitlichen Instabilität am Messort,
- die Bestimmung des Strahlungseinflusses am Messort,
- auf Kundenwunsch die Bestimmung des Beladungseinflusses am Messort durch Vergleich beladenes und leeres Nutzvolumen.

(D) Die Kalibrierung erfolgt für das Nutzvolumen von sehr kleinen unbeladenen Klimaschränken (Innenraumvolumen bis 70 l) durch die diagonale Anordnung von drei Temperatursensoren. Das räumliche Zentrum bildet den Referenzmessort.

Die Kalibrierung umfasst:

- die Bestimmung der Anzeigeabweichung zwischen Anzeige und Referenzmessort im unbeladenen Zustand,
- die Bestimmung der räumlichen Inhomogenität im leeren Nutzvolumen,
- die Bestimmung der zeitlichen Instabilität im leeren Nutzvolumen,
- die Bestimmung des Strahlungseinflusses für den Referenzmessort,
- auf Kundenwunsch die Bestimmung des Beladungseinflusses für den Referenzmessort durch Vergleich beladenes und leeres Nutzvolumen.

7 Kalibrierverfahren

7.1 Anordnung der Messorte

7.1.1 Kalibrierung für das Nutzvolumen nach Methode (A) oder (B)

Bei der Kalibrierung nach den Methoden (A) und (B) sind Messungen an mehreren Orten im Nutzvolumen auszuführen.

Die Festlegungen bezüglich der Anzahl und räumlichen Lage der Messpunkte sind bis zu einem Nutzvolumen von 2000 l analog DIN EN 60068, Teil 3-5 [2] zu treffen, d. h. die Messorte bilden die Eckpunkte und das Raumzentrum eines Quaders, der das Nutzvolumen aufspannt (9 Messorte).

Bei Nutzvolumen > 2000 l muss zusätzlich die Oberfläche des Nutzvolumens mit einem Messgitternetz mit einem Abstand der Messpunkte von maximal 1 m abgedeckt werden.

Auf Kundenwunsch können auch abweichende Positionierungen erfolgen. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass das Nutzvolumen durch das von den Messpunkten aufgespannte Volumen eingeschlossen wird, der maximale Abstand benachbarter Messorte 1 m nicht überschreitet und die räumlichen Extremwerte der Klimagrößen für das Nutzvolumen erfasst werden (alle Bedingungen sind gleichzeitig zu erfüllen). Alternative Messortwahlen z. B. analog zu DIN 12880 [6] sind möglich, wenn sie im Kalibrierschein beschrieben werden und die angegebenen Bedingungen als Mindestforderungen erfüllt werden.

Das Kalibrierergebnis gilt nur für das von den Messorten aufgespannte Volumen. Die räumliche Interpolation der Messwerte ist nur für das von den Messorten eingeschlossene Nutzvolumen zulässig.


Die angegebene Messunsicherheit, mit Bezug auf den Referenzmessort, gilt für das gesamte Nutzvolumen. Eine Interpolation der Unsicherheitsbeiträge ist nicht zulässig. Extrapolationen der Messergebnisse über das von den Messorten aufgespannte Volumen hinaus sind nicht zulässig. Die Abmessungen des Innenraumvolumens des Klimaschranks und die gewählte Lage der Messorte müssen im Kalibrierschein in einer Skizze angegeben werden.

Zur Definition der Wandabstände x in Abhängigkeit von der Kantenlänge L des Innenraumvolumens gilt Tabelle 4 in Anlehnung an die Festlegungen der DIN EN 60068, Teil 3-5 [2] oder der DIN 12880 [6].

Tabelle 4: Praktische Abmessungen für das Innenraumvolumen

Größe	Innenraumvolumen in l	Empfohlener Wandabstand x	Minimaler Wandabstand x_{\min} in mm
I.	bis 1000	$L/10$	50
II.	> 1000 bis 2000	$L/10$	100
III.	> 2000	$L/10$	150

*Anmerkung: Nicht alle Klimaschränke haben eine kubische Form (Innenraumvolumen / Nutzvolumen).
Anordnungen nach DIN 12880 [6] können den minimalen Wandabstand reduzieren.*

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	18 / 66

7.1.2 Kalibrierung für Messorte nach Methode (C)

Kalibrierungen nur an einzelnen Orten im Nutzvolumen [Methode (C)] sind nur auf speziellen Kundenwunsch zulässig. In diesem Fall gilt das Kalibrierergebnis nur für die untersuchten Messorte. Hierauf ist im Kalibrierschein hinzuweisen. Als Kalibriergegenstand ist im Kalibrierschein „**Messort(e) im Klimaschrank**“ anzugeben. Der Beitrag der lokalen räumlichen Inhomogenität an den Messorten muss für jeden Messort durch die Verwendung von zwei im Abstand von ca. 2 cm bis 5 cm benachbarten Thermometern erfasst werden. Es muss mindestens ein Abstand entsprechend der aktiven Sensorlänge eingehalten werden. Dabei wird eines dieser Thermometer an der zur Angabe des Kalibrierergebnisses festgelegten Position (Messort) angebracht, während das zweite Thermometer mit dem erforderlichen Abstand positioniert wird. Das Messergebnis dieses Thermometers dient nur zur Bestimmung der lokalen räumlichen Inhomogenität und geht nicht explizit in das Kalibrierergebnis ein.

Diese Messung kann bei deutlich unterschiedlichem Emissionsgrad beider Thermometer gleichzeitig zur Bestimmung des Strahlungseinflusses dienen.

Die ermittelte Differenz beider Thermometer wird jedoch vollständig für die lokale Inhomogenität angesetzt. Daher sind in diesem Beitrag dann zusätzliche Strahlungseinflüsse enthalten.

Im Kalibrierschein ist eindeutig anzugeben, dass die ermittelte Differenz beider Thermometer sowohl den Beitrag der lokalen Inhomogenität als auch den Strahlungseinfluss enthält.

Eine Eliminierung des Strahlungseinflusses auf die Bestimmung der lokalen Inhomogenität am Messort setzt die Verwendung zweier gleicher Thermometer mit kleinem Emissionsgrad mit 2 cm bis 5 cm Abstand und eines dritten Thermometers mit einem großen Emissionsgrad am Messort voraus⁶.

Bei der Kalibrierung für mehr als einen Messort nach Methode (C) (ohne Aufspannung eines Nutzvolumens) kann die Verwendung von zwei Thermometern an einem Messort entfallen, wenn aus der Differenz der Thermometer der einzelnen Messorte eine sinnvolle Abschätzung des durch die lokale Inhomogenität und die Positioniergenauigkeit bedingten Unsicherheitsbeitrages erfolgt. Das Verfahren ist im Kalibrierschein zu beschreiben.

Die Abmessungen des Innenraumvolumens des Klimaschranks und die gewählte Lage der Messorte müssen im Kalibrierschein in einer Skizze angegeben werden.

7.1.3 Kalibrierung für das Nutzvolumen nach Methode (D)

Im Regelfall werden Kalibrierungen des Nutzvolumens nach Methode (A) oder (B) durchgeführt. Im Fall von sehr kleinen Innenraumvolumina (bis 70 l) kann es in Abhängigkeit von den Abmessungen der eingesetzten Normale bereits zu einem Zustand der Beladung kommen. Das heißt, eine Kalibrierung nach Methode (A) und damit eine Aussage über den unbeladenen Zustand des Kalibriergegenstandes, wären nicht möglich.

Deshalb ist in diesem Fall Methode (D) als Alternative zu Methode (A) zulässig.

Für Innenraumvolumina > 70 l ist die Methode (D) ausgeschlossen.

In Anwendung der Methode (D) werden mindestens 3 Messorte gewählt. Diese sind räumlich diagonal (Raumdiagonale) im Nutzvolumen anzuordnen.

Dabei sind mindestens zwei Eckpunkte und der Schnittpunkt der Raumdiagonalen zu wählen. Weitere Punkte auf der Raumdiagonale können optional ausgewählt werden.

⁶ Anmerkung: Der Messunsicherheitsbeitrag wird durch die Messung mit nur zwei Thermometern potentiell größer, der Aufwand ist dafür aber geringer als bei dem Verfahren mit drei Thermometern.

Dabei ist zu beachten, dass bei nichtkubischen Räumen die maximale Länge zu wählen ist.

Das Nutzvolumen bei Methode (D) ergibt sich durch Parallelverschiebung der Innenraumflächen des Klimaschranks durch die Eckpunkte der Raumdiagonale.

Das räumliche Zentrum bildet den Referenzmessort. Zusätzlich ist am Referenzmessort ein Sensor zur Bestimmung des Strahlungseinflusses zu positionieren.

Zur Veranschaulichung ist im Kalibrierschein eine Skizze bzgl. der Anordnung der Fühlerpositionen einzufügen.

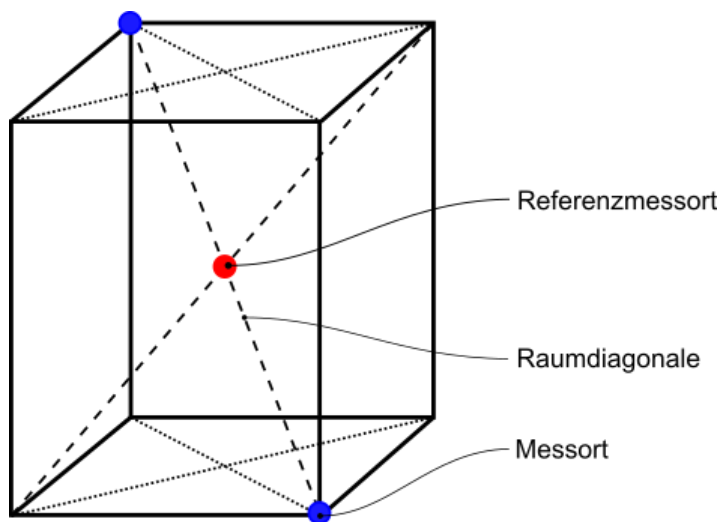


Abbildung 1: Beispiel für die Anordnung der Fühlerpositionen (Ansicht der Nutzvolumenberechnung)


Im Unterschied zu Methode (C) dieser Richtlinie, gilt die Kalibrierung nach Methode (D) für das gesamte Nutzvolumen.

Die empfohlenen und minimalen Wandabstände x bei Anwendung der Methode (D) sind in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5: Praktische Abmessungen für das Innenraum- und Nutzvolumen

Innenraumvolumen in ℓ	Empfohlener Wandabstand x	Minimaler Wandabstand x_{\min} in mm
bis 70	$L/10$	30^7
<i>Anmerkung: Nicht alle Klimaschränke haben eine kubische Form (Innenraumvolumen / Nutzvolumen). Anordnungen nach DIN 12880 [6] können den minimalen Wandabstand reduzieren.</i>		

⁷ Messungen in der Grenzschicht sind zu vermeiden.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	20 / 66

7.2 Bestimmung der räumlichen Temperaturinhomogenität

Die räumliche Inhomogenität der Gastemperatur wird als maximale Abweichung der Temperatur eines Eck- bzw. Randflächenmessortes nach DIN EN 60068-3-5 [2] vom Referenzmessort (meist im Zentrum des Nutzvolumens) bestimmt.

Die räumliche Inhomogenität ist für alle Kalibriertemperaturen zu bestimmen. Die räumliche Inhomogenität wird nur bei Kalibrierungen für ein Nutzvolumen nach Methode (A), (B) bzw. (D) untersucht (siehe Abschnitt 7.1.1 und 7.1.3).

Bei Kalibrierungen nach Methode (C) wird nur die lokale Inhomogenität zur Abschätzung des inhomogenitätsbedingten Unsicherheitsbeitrages bestimmt (siehe Abschnitt 7.1.2).

7.3 Bestimmung der zeitlichen Temperaturinstabilität

Die zeitliche Instabilität für die Gastemperatur wird aus der Registrierung des zeitlichen Verlaufes der Temperatur über einen Zeitraum von mindestens 30 min nach Einstellung des angeglichenen Zustandes bestimmt.


Der angegliche Zustand gilt als erreicht, wenn keine systematischen Änderungen der Temperatur mehr messbar sind. In Abhängigkeit von Kalibriertemperatur, Innenraumvolumen, Differenz zwischen den Kalibrierpunkten, Umgebungsbedingungen, Gas-/Luftgeschwindigkeiten, etc. kann die Wartezeit sehr unterschiedlich sein.

Der Temperatenausgleich ist ohne Gas-/Luftumwälzung wesentlich behindert. Die dadurch bedingten längeren Ausgleichszeiten müssen beachtet werden. Die Messungen dürfen erst 30 min nach Erreichen des angeglichenen Zustandes durchgeführt werden, d. h. wenn die Temperaturen an allen Messorten für mindestens 30 min keine systematischen Änderungen mehr zeigen.

Die verbleibenden zeitlichen Änderungen dürfen die angegebene und in der Messunsicherheit berücksichtigte zeitliche Instabilität nicht übersteigen.

Für die Messung der zeitlichen Temperaturinstabilität sind in 30 min mindestens 30 Messwerte mit ungefähr konstantem Zeitintervall zu registrieren.

Die Messung ist mindestens für den Referenzmessort und für jede Kalibriertemperatur notwendig. Die zeitliche Instabilität ist bei allen Kalibriermethoden zu untersuchen.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	21 / 66

7.4 Bestimmung des Strahlungseinflusses

Bei Gastemperaturen im Klimaschrank, die von der Umgebungstemperatur abweichen, hat die innere Wand des Klimaschranks prinzipiell eine von der Gastemperatur abweichende Temperatur. Unter diesen Bedingungen nehmen jedoch Körper im Nutzvolumen aufgrund des Wärmeaustausches durch Strahlung nicht die Gastemperatur an. Dies gilt sowohl für Beladungen des Nutzers als auch für die zur Kalibrierung verwendeten Thermometer.

Die Differenz zwischen der zu bestimmenden Gastemperatur und der Temperatur eines Thermometers hängt von dem Emissionsgrad der Thermometeroberfläche, der Geometrie / den Abmessungen sowie der Anordnung des Sensors, der Gas- / Luftgeschwindigkeit am Sensor und von der Differenz zwischen Gas-, Luft- und Wandtemperatur ab.

Der Strahlungseinfluss wird mit steigender Differenz zwischen Gas- und Wandtemperatur größer. Zusätzlich steigt dieser Einfluss mit der absoluten Temperatur überproportional an.

Der Einfluss der Strahlung auf die Abweichung der Temperatur eines Körpers von der Gastemperatur kann auf Kundenwunsch auch mit einem typischen Probekörper des Kunden bestimmt werden. Hierbei wird dann mit einem Thermometer mit kleinem Emissionsgrad bzw. Strahlungsschirm die Gastemperatur und mit einem in den Probekörper eingebrachten Thermometer die Körpertemperatur gemessen. Diese Methode ersetzt dann die Bestimmung des Strahlungseinflusses. Sie muss im Kalibrierschein beschrieben werden und schränkt das Ergebnis auf diese typischen Bedingungen ein. Sie ist ebenfalls sehr sinnvoll für Kunden, die im Nutzvolumen immer gleichartige Körper lagern.

Die Abschätzung des Strahlungseinflusses ist mit einem der 3 folgenden Verfahren möglich:

- (S1) Die Ermittlung des Strahlungseinflusses kann durch Messung der Temperatur am Referenzmessort mit zwei Thermometern mit unterschiedlichem Emissionsgrad ε erfolgen. Eines der Thermometer sollte einen möglichst großen Emissionsgrad haben (d. h. $\varepsilon > 0,6$), das andere einen möglichst kleinen (d. h. $\varepsilon < 0,15$).

Die Emissionsgrade beider Thermometeroberflächen müssen hinreichend genau bekannt sein. Die festgestellte Differenz beider Thermometer ist ein Maß für den Strahlungseinfluss bei von der Gastemperatur abweichender Wandtemperatur. Das Thermometer mit kleinem Emissionsgrad zeigt dabei näherungsweise die gesuchte Gastemperatur an. Die Gastemperatur ergibt sich dabei durch Extrapolation auf den Emissionsgrad $\varepsilon = 0$.

Der zusätzlich zur Bestimmung des Strahlungseinflusses verwendete Sensor mit großem Emissionsgrad sollte zylinderförmig und mindestens 20 mm lang sein sowie einen Mindestdurchmesser von 4 mm aufweisen. Der Durchmesser kann auch mit wärmeleitenden Hülsen realisiert werden.

Ein großer Emissionsgrad kann z. B. durch eine PTFE-Oberfläche oder geschwärzte Oberflächen realisiert werden. Ein kleiner Emissionsgrad des Normalthermometers kann z. B. durch reflektierende Beschichtungen wie z. B. poliertes Nickel oder Gold realisiert werden. Andere Realisierungen sind möglich.

Speziell für die Realisierung des kleinen Emissionsgrades muss eine Oxidation oder Rauheit der Oberfläche vermieden werden.

- (S2) Die Gastemperatur kann auch mit einem Thermometer gemessen werden, das mit einem Strahlungsschirm gegen den Wandeinfluss abgeschirmt ist. Dieser Strahlungsschirm muss ventiliert werden oder durch seine Anordnung und Bauform eine ausreichende Umströmung des Thermometers durch die Luftumwälzung sichern.

Mit dem Thermometer wird mit dem Strahlungsschirm näherungsweise die Gastemperatur gemessen. Mit einem zweiten Thermometer mit hohem Emissionsgrad wird die Temperatur bei Strahlungseinfluss bestimmt.

Die festgestellte Differenz beider Messungen ist ein Maß für den Strahlungseinfluss bei von der Gastemperatur abweichender Wandtemperatur.

- (S3) Für Temperaturen von 0 °C bis 50 °C kann eine messtechnische Bestimmung des Strahlungseinflusses entfallen. Dann wird für den Strahlungseinfluss ein Maximalbeitrag zur Messunsicherheit von 0,3 K angesetzt. Sollte die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Gastemperatur (im Klimaschrank) während der Kalibrierung 30 K überschreiten, ist der Strahlungseinfluss in jedem Fall nach (S1) oder (S2) zu ermitteln⁸.

Verfahren (S1) und (S2) sind dabei ausgerichtet auf eine möglichst sichere Messung der realen Gastemperatur. Sie dienen nicht zur Abschätzung des Strahlungseinflusses auf die Temperatur eines Körpers im Nutzvolumen.

Verfahren (S3) liefert unter den genannten Bedingungen eine Abschätzung für den Strahlungseinfluss auf die Messunsicherheit.

Der Strahlungseinfluss ist bei Kalibriermethode (A) bis (D) zu berücksichtigen.

Es werden die Messungen mit dem kleinsten Emissionsgrad ($\varepsilon < 0,15$) als Ergebnis angegeben. Eine Korrektur der Messergebnisse bezüglich des Strahlungseffektes auf $\varepsilon = 0$ erfolgt nicht. Sie ist jedoch auf Kundenwunsch möglich (Hinweis im Kalibrierschein).

⁸ Anmerkung: Verfahren (S3) basiert nur auf einer Abschätzung für den Strahlungseinfluss als Beitrag zur Messunsicherheit, die jedoch nur bei Einhaltung der genannten Bedingungen zulässig ist. Auf Kosten eines potentiell größer abgeschätzten zugehörigen Messunsicherheitsbeitrages ergibt sich somit eine Verringerung des Aufwandes.

7.5 Bestimmung des Beladungseinflusses

Die Kalibrierung von Klimaschränken erfolgt normalerweise ohne Beladung [Methode (A)]. Auf Kundenwunsch kann die Kalibrierung bei einer bestimmten Beladung erfolgen [Methode (B)]. Diese wird dann im Kalibrierschein beschrieben und das Ergebnis gilt nur für solche speziellen Verhältnisse. Dieses Verfahren ist besonders sinnvoll, wenn der Kunde den Kalibriergegenstand immer mit ähnlicher Beladung betreibt und diese Anordnung wesentlich von einem leeren Nutzvolumen abweicht.

Insbesondere bei Klimaschränken ohne Zwangsumwälzung kann die räumliche Verteilung der Temperatur stark von der Beladung beeinflusst werden. In diesem Fall sollte daher für alle Kalibriertemperaturen eine Untersuchung des Beladungseinflusses für den Referenzmessort durchgeführt werden.

Hierzu kann eine typische Beladung des Anwenders bzw. eine Beladung mit Probekörpern erfolgen. Die Beladung soll die maximale Beeinträchtigung des räumlichen Ausgleiches der Temperatur simulieren. Sie ist im Kalibrierschein zu beschreiben.

Ohne spezielle Angaben/Forderungen des Kunden umfasst diese Beladung mindestens 40 % des Nutzvolumens. Der Beladungseinfluss auf die räumliche Homogenität sollte durch Messungen im unbeladenen und im beladenen Zustand an mindestens einem Messort erfasst werden.

Sollte der Referenzmessort durch die Beladung nicht zugänglich sein, ist der Referenzmessort für beide Messungen (beladen und unbeladen) entsprechend zu versetzen.

Bei Kalibrierung nach Methode (B) bezieht sich das Kalibrierergebnis auf den beladenen Zustand. Der Beitrag der Beladung zur Messunsicherheit ist berücksichtigt. Es erfolgt eine Kalibrierung mindestens für den Referenzmessort mit und ohne Beladung und die maximale Differenz wird als halbe Breite eines rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages angesetzt.

Die Untersuchung des Beladungseinflusses kann mit einer kundentypischen Beladung oder mit einer Testbeladung erfolgen. Dabei muss das Volumen der Testbeladung mindestens 40 % des Nutzvolumens betragen. Die gewählte Beladung ist im Kalibrierschein zu beschreiben.


Zusammen mit der Beladungsmessung ergeben sich insgesamt folgende erforderliche Messungen. Voraussetzung ist in diesem Fall, dass der Referenzmessort in der Mitte des Nutzvolumens liegt (Standard).

Kalibriermethode	unbeladen		beladen	
	Messorte	Referenzmessort	Messorte	Referenzmessort
(A)	x	<input checked="" type="checkbox"/>	-	(x)
(B)	-	(x)	x	<input checked="" type="checkbox"/>
(C)	-	<input checked="" type="checkbox"/>	-	(x)
	-	(x)	-	<input checked="" type="checkbox"/>
(D)	x	<input checked="" type="checkbox"/>	-	(x)

= Bezugsmessung (Abweichung zur Anzeige als Ergebnis im Kalibrierschein)

x = Messung (zur Ermittlung von Messunsicherheitsbeiträgen und Zusatzinformationen im Kalibrierschein)

(x) = auf Kundenwunsch

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	24 / 66

7.5.1 Aktive Beladung mit Verlustleistung

Wenn die Beladung des Klimaschranks aktiv Verlustleistung umsetzt (d. h. Wärmezu- oder -abfuhr durch die Beladung erfolgt), darf die innerhalb des Volumens des Klimaschranks umgesetzte Verlustleistung maximal 10 % der verfügbaren Kühl- bzw. Heizleistung (der kleinere der beiden Werte ist entscheidend) betragen. Diese Leistung muss im Nutzvolumen räumlich nahezu gleichmäßig verteilt erzeugt werden, andernfalls sind für kleinere räumliche Abschnitte entsprechend nur geringere Verlustleistungen zulässig (Wichtung der Klimatisierungsleistung des Klimaschranks mit dem Verhältnis aus dem Volumen der Wärmequelle zum Nutzvolumen).

Der Einfluss der umgesetzten Verlustleistung auf die räumliche Temperaturverteilung muss im Rahmen der Messunsicherheitsbeiträge des Beladungseinflusses ermittelt werden. Dies erfolgt durch eine Bestimmung des Beladungseinflusses mit und ohne Verlustleistung der Beladung (ein- und ausgeschaltete Wärmequellen). Die festgestellte Differenz wird zum Unsicherheitsbeitrag der Beladung hinzugefügt (siehe Kapitel 8.4). Bei Kalibrierungen nach Methode (B) muss die Beladung während der Kalibrierung aktiv sein.


7.6 Relative Feuchte

Für die Bestimmung der räumlichen Verteilung der relativen Feuchte im Nutzvolumen eines umgewälzten Klimaschranks stehen die drei nachfolgenden Verfahren zur Verfügung. Das gewählte Verfahren muss im Kalibrierschein dokumentiert werden. Die in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens resultierenden Beiträge zur Messunsicherheit müssen bestimmt und in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden.

- (F1) Messung der absoluten Feuchte (z. B. in Form der Taupunkttemperatur oder der Frostpunkttemperatur) am Referenzmessort und Berechnung der räumlichen Verteilung der relativen Feuchte auf der Basis der gemessenen Verteilung der Gastemperatur
- (F2) Messung der relativen Feuchte am Referenzmessort und Berechnung der absoluten Feuchte am Referenzmessort aus der am Referenzmessort gemessenen Gastemperatur und anschließender Berechnung der räumlichen Verteilung der relativen Feuchte auf der Basis der gemessenen Verteilung der Gastemperatur
- (F3) Messung der relativen Feuchte an allen Messorten analog der Bestimmung der Verteilung der Gastemperatur (Kapitel 7.1)

Verfahren (F1) und (F2) sind dann einsetzbar, wenn die Annahme erfüllt ist, dass die absolute Feuchte im Nutzvolumen homogen verteilt ist. Diese Annahme ist gerechtfertigt, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Der Klimaschrank muss eine ausreichende Gas-/ Luftumwälzung ausweisen. Nach Kapitel 5 wird dies erreicht, wenn das gesamte Gas-/Luftvolumen in maximal 30 s einmal umgewälzt wird.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	25 / 66

- Bei Messung nach Methode (B) darf die Beladung keinen Einfluss auf die Verteilung der absoluten Feuchte ausüben, d. h. eine Beeinflussung der absoluten Feuchte durch Kondensation und/oder Verdampfung von Wasser an der Oberfläche der Beladung müssen ausgeschlossen werden können. Sollte die Art der Beladung (z. B. offene Proben) einen Einfluss auf die Verteilung der absoluten Feuchte ausüben, so ist für die Kalibrierung der Feuchte nur Verfahren (F3) zulässig. Art und Menge der Beladung sind im Kalibrierschein genau anzugeben.
- Im Nutzvolumen sind keine aktiven Quellen oder Senken für Wasserdampf vorhanden.
- Es findet kein Gas- / Luftaustausch mit der Umgebung durch Undichtigkeiten statt.

Für die Messung sowie die Bestimmung der Messunsicherheit der absoluten und relativen Feuchte am Referenzmessort in Verfahren (F1) bzw. (F2) sind sinngemäß die Vorgaben der DKD-R 5-8 [12] einzuhalten.

Im Speziellen muss bei der Bestimmung der relativen Feuchte am Referenzmessort nach Verfahren (F2) beim Einsatz von relativen Feuchtesensoren die Vorgabe der DKD-R 5-8 [12] (Kapitel 5.5) zum zeitgleichen Einsatz von zwei Normalhygrometern eingehalten werden.

Dies gilt nicht beim Einsatz von Psychrometern. Hier sind die allgemeinen Hinweise des Einsatzes eines Psychrometers als Normal zur Bestimmung der relativen Feuchte aus DKD-R 5-8 [12] (Kapitel 5.4) zu berücksichtigen.


Des Weiteren müssen bei Verfahren (F2) die entsprechenden Beiträge in der Messunsicherheitsbilanz aus Messung und Berechnung (u. a. Unsicherheit der Messung der relativen Feuchte, Unsicherheit der Bestimmung der Gastemperatur am Referenzmessort, Unsicherheit des Gasdruckes und Umrechnung relative in absolute Feuchte) berücksichtigt werden.

Bei Methode (C) wird die relative Feuchte entweder durch Messung der absoluten Feuchte und Gastemperatur am betrachteten Messort und anschließender Berechnung ermittelt oder durch direkte Messung der relativen Feuchte und Gastemperatur am Messort. Dies entspricht entweder Verfahren (F1) ohne Bestimmung der räumlichen Verteilung bzw. Verfahren (F3) angewendet nur auf den Messort. Verfahren (F2) kann bei mehr als einem Messort nach Methode (C) sinngemäß angewendet werden, sodass die absolute Feuchte nur an einem der betrachteten Messorte bestimmt wird. Im Falle der Anwendung von Verfahren (F2) oder (F3) auf die Methode (C) muss die Messung bei der direkten Messung der relativen Feuchte mittels relativer Feuchtesensoren analog obiger Ausführungen mit zwei Normalhygrometern am betrachteten Messort erfolgen.

7.6.1 Feuchteinhomogenität

Die räumliche Inhomogenität wird als maximale Abweichung der relativen Feuchte eines Eck- bzw. Randflächenmessortes nach DIN EN 60068-3-5 [2] von der relativen Feuchte des Referenzmessortes (meist im Zentrum des Nutzvolumens) bestimmt. Sie ist für alle Kalibrierpunkte mit relativer Feuchte getrennt zu bestimmen.

Die räumliche Inhomogenität wird nur bei Kalibrierungen für ein Nutzvolumen nach Methode (A), (B) bzw. (D) untersucht. Hierfür können die oben beschriebenen Verfahren (F1), (F2) und (F3) angewendet werden.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	26 / 66

Bei Kalibrierungen nach Methode (C) wird nur die lokale Inhomogenität zur Abschätzung des inhomogenitätsbedingten Unsicherheitsbeitrages bestimmt (siehe Abschnitt 7.1.2).

7.6.2 Feuchteinstabilität

Für die Messung der zeitlichen Feuchteinstabilität sind nach Einstellung des angeglichenen Zustandes in 30 min mindestens 30 Messwerte mit ungefähr konstantem Zeitintervall zu registrieren.

Die Messung ist mindestens für den Referenzmessort und für jeden Klimapunkt notwendig.

Wird die absolute Feuchte nur am Referenzmessort [d. h. nach Verfahren (F1) und (F2)] bestimmt, so ist zu jedem Zeitpunkt aus der Gastemperatur des Messortes sowie der Gastemperatur und der zugehörigen absoluten Feuchte des Referenzmessortes zu diesem Zeitpunkt die relative Feuchte am Messort zu bestimmen.

Weitergehende Untersuchungen sind nicht Bestandteil dieser Richtlinie.

7.7 Anzahl der Kalibrierpunkte

Bei der Kalibrierung des Klimaschranks in einem Temperatur- oder Feuchtebereich ist die Kalibrierung bei mindestens drei Temperaturen (bei reiner Temperaturkalibrierung oder einer Feuchte) bzw. mindestens drei relativen Feuchten (bei einer Gastemperatur) aus dem jeweiligen Einsatzbereich nötig.

Die Anzahl der Messpunkte kann auf den Anfangs- und den Endwert des Einsatzbereiches (mindestens zwei statt drei Messpunkte) verringert werden, wenn die Temperaturdifferenz maximal 20 K oder die Differenz der relativen Feuchte maximal 50 % beträgt. Die Auswahl der Messpunkte ist anhand der obigen Vorgaben mit dem Kunden abzustimmen.


Z. B.

- 1) Einsatzbereich: 20 °C bis 60 °C und 30 % bis 75 % relative Feuchte
Kalibrierpunkte: 30 % und 75 % bei 20 °C, 40 °C und 60 °C
- 2) Einsatzbereich: 20 °C bis 60 °C und 15 % bis 85% relative Feuchte
Kalibrierpunkte: 15 %, 50 %, 85 % bei 20 °C, 40 °C und 60 °C
- 3) Einsatzbereich: 20 °C bis 40 °C und 30 % bis 75% relative Feuchte
Kalibrierpunkte: 30 %, 75 % bei 20 °C und 40 °C

Eine Kalibrierung für nur einen Temperatur- bzw. Feuchtepunkt (Sollwert) aus dem Arbeitsbereich des Klimaschranks ist auf Kundenwunsch zulässig, schränkt jedoch das Kalibrierergebnis auf diesen Arbeitspunkt (\pm erweiterte Messunsicherheit) ein.

Hierauf ist im Kalibrierschein hinzuweisen.

Einpunktkalibrierungen werden zur Abdeckung eines Temperatur- oder Feuchtebereiches ausgeschlossen.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	27 / 66

8 Unsicherheitsbeiträge

Die anzugebende Messunsicherheit setzt sich im Wesentlichen aus der Unsicherheit der Messung von Temperatur und relativer Feuchte mit den Referenzmesseinrichtungen, den Unsicherheiten der Anzeigeeinrichtungen des Klimaschranks, den Beiträgen der zeitlichen und räumlichen Verteilungen im Nutzvolumen sowie den Beladungseinflüssen zusammen.

Da Klimaschränke zur Darstellung definierter Gastemperaturen und -feuchten dienen, muss im Kalibrierschein die Unsicherheit, die den generierten Gastemperaturen bzw. -feuchten zugeordnet ist, angegeben werden.

Die Temperatur des Prüfgutes im Nutzvolumen kann deutlich von der Gastemperatur abweichen. Die Temperatur des Prüfgutes kann vom Nutzer mit einem kalibrierten Thermometer bei der Nutzung des Klimaschranks mit meist kleineren Unsicherheiten bestimmt werden. Die Temperatur von definierten Probekörpern und deren Unsicherheit kann auf Kundenwunsch, bei genauer Spezifikation der Messbedingungen und der Probekörper, angegeben werden.

Sollten einzelne Einflüsse auf das Kalibrierergebnis und seine Messunsicherheit nicht bestimmt werden können, so muss ihr maximal möglicher Beitrag zur Unsicherheit abgeschätzt und berücksichtigt werden. Im Kalibrierschein sollte dann darauf hingewiesen werden, dass der betreffende Einfluss in der angegebenen Unsicherheit nur abgeschätzt wurde. Die Grundlage/Quelle für diese Schätzung ist anzugeben. Räumliche Interpolationen der Messunsicherheitsbeiträge sind nicht zulässig.

Generell muss darauf hingewiesen werden, dass die Unsicherheiten abhängig von den Nutzungsbedingungen sind. Die Messbedingungen der Kalibrierung sind daher möglichst vollständig zu beschreiben. Wenn die Nutzungsbedingungen des Anwenders nicht stark variieren, sollte vor der Kalibrierung eine Abstimmung der Kalibrierbedingungen erfolgen, mit dem Ziel, bei der Kalibrierung möglichst den Bedingungen der Nutzung durch den Anwender nahe zu kommen.

8.1 Räumliche Inhomogenität δT_{inhom} ; δU_{inhom}

Die räumliche Inhomogenität wird als maximale Abweichung der relativen Feuchte bzw. Temperatur eines Eck- bzw. Randflächenmessortes vom Referenzmessort (meist im Zentrum des Nutzvolumens) bestimmt.

Sie stellt die halbe Breite eines rechteckverteilten Beitrages mit dem Erwartungswert 0 dar.

$$|\delta T_{inhom}| \leq \max |T_{ref} - T_i| \quad (1)$$


$$|\delta U_{inhom}| \leq \max |U_{ref} - U_i| \quad (2)$$

Für die zuzuordnenden Standardunsicherheiten ergibt sich:

$$u(\delta T_{inhom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max |T_{ref} - T_i| \quad (3)$$

$$u(\delta U_{inhom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max |U_{ref} - U_i| \quad (4)$$

Die räumliche Inhomogenität ist bei den Kalibriermethoden (A) bis (D) und für alle Kalibriertemperaturen bzw. -feuchten zu berücksichtigen. Sie gilt bei den Methoden (A), (B) und (D) für jeden Punkt des gesamten Nutzvolumens und bei Methode (C) nur für die jeweiligen Messorte. Die Ergebnisse für δT_{inhom} und δU_{inhom} werden im Kalibrierschein angegeben (siehe Anhang B und C).

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	28 / 66

8.2 Zeitliche Instabilität δT_{instab} ; δU_{instab}

Die zeitliche Instabilität wird am Referenzmessort aus der Registrierung des zeitlichen Verlaufes von Temperatur bzw. relativer Feuchte über einen Zeitraum von mindestens 30 min nach Einstellung des angeglichene Zustandes bestimmt.

Die größte Abweichung über 30 min vom zeitlichen Mittelwert wird als halbe Breite eines rechteckverteilten Beitrages mit dem Erwartungswert 0 angesetzt.

$$|\delta T_{instab}| \leq \max |\bar{T}_{ref} - T_{ref,i}| \quad (5)$$

$$|\delta U_{instab}| \leq \max |\bar{U}_{ref} - U_{ref,i}| \quad (6)$$

Für die zuzuordnenden Standardunsicherheiten ergibt sich:

$$u(\delta T_{instab}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max |\bar{T}_{ref} - T_{ref,i}| \quad (7)$$

$$u(\delta U_{instab}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max |\bar{U}_{ref} - U_{ref,i}| \quad (8)$$

Die zeitliche Instabilität ist bei den Kalibriermethoden (A) bis (D) und bei allen Kalibriertemperaturen und -feuchten zu berücksichtigen und im Kalibrierschein anzugeben (siehe Anhang B und C).

8.3 Strahlungseinfluss $\delta T_{radiation}$

Für die Abschätzung des Beitrages des Strahlungseinflusses zur Messunsicherheit sind 3 Verfahren zulässig (siehe Kapitel 7.4). Für die einzelnen Verfahren ergeben sich folgende Beiträge zur Messunsicherheit⁹:

- Beim Verfahren (S1) sollen 20 % der bestimmten Differenz als halbe Breite einer Rechteckverteilung als Unsicherheitsbeitrag zur Gastemperatur berücksichtigt werden.

$$|\delta T_{radiation}| \leq 0,2 \cdot \max |T_{le} - T_{he}| \quad (9)$$

$$u(\delta T_{radiation}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot \max |T_{le} - T_{he}| \quad (10)$$

- Beim Verfahren (S2) sollen 100 % der bestimmten Differenz als halbe Breite einer Rechteckverteilung als Unsicherheitsbeitrag zur Gastemperatur berücksichtigt werden.

$$|\delta T_{radiation}| \leq \max |T_{le} - T_{he}| \quad (11)$$


$$u(\delta T_{radiation}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max |T_{le} - T_{he}| \quad (12)$$

- Beim Verfahren (S3) werden 0,3 K als halbe Breite einer Rechteckverteilung als Unsicherheitsbeitrag zur Gastemperatur berücksichtigt.

$$|\delta T_{radiation}| \leq 0,3K \quad (13)$$

$$u(\delta T_{radiation}) = \frac{0,3K}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

⁹ Wenn die Forderungen gemäß Kapitel 7.4 bezüglich der Emissionsgrade der Thermometer nicht erfüllt werden, müssen die angesetzten Beiträge zur Messunsicherheit über die angegebenen Anteile hinaus erhöht werden.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	29 / 66

Der Strahlungseinfluss ist bei den Kalibriermethoden (A) bis (D) für alle Kalibriertemperaturen zu berücksichtigen. Im Kalibrierschein werden die für die Berechnung von $\delta T_{\text{radiation}}$ bestimmten maximalen Differenzen des jeweiligen Verfahrens, d. h. **ohne** den obigen Wichtungsfaktor [0,2 beim Verfahren (S1)] angegeben. Die Bewertung dieser Werte wird durch die Angabe des zugrunde liegenden Bestimmungsverfahrens ermöglicht.

8.4 Einfluss der Beladung δT_{load} ; δU_{load}

Als Unsicherheitsbeitrag der Beladung werden 20 % der Differenz der Temperatur des Referenzmessortes (beladener Zustand – leeres Nutzvolumen) als halbe Breite eines rechteckverteilten Beitrages mit dem Erwartungswert 0 angesetzt.

$$|\delta T_{\text{load}}| \leq 0,2 \cdot \max |T_{\text{ref}} - T_{\text{ref,load}}| \quad (15)$$

$$|\delta U_{\text{load}}| \leq 0,2 \cdot \max |U_{\text{ref}} - U_{\text{ref,load}}| \quad (16)$$

Für die zuzuordnenden Standardunsicherheiten ergibt sich:

$$u(\delta T_{\text{load}}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot \max |T_{\text{ref}} - T_{\text{ref,load}}| \quad (17)$$

$$u(\delta U_{\text{load}}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot \max |U_{\text{ref}} - U_{\text{ref,load}}| \quad (18)$$


Bei aktiver Beladung mit Verlustleistungsumsatz wird die festgestellte Differenz als halbe Breite einer Rechteckverteilung zum Unsicherheitsbeitrag der Beladung (im nicht aktiven Zustand) hinzugefügt. Bei Kalibrierungen nach Methode (B) muss die Beladung während der Kalibrierung aktiv sein. Als Beladungseinfluss wird im Kalibrierschein die Differenz der Temperatur des Referenzmessortes (beladener Zustand – leeres Nutzvolumen) (ohne Wichtungsfaktor 0,2) angegeben (siehe Anhang B und C).

8.5 Einfluss der Umgebungsbedingungen δT_{env} ; δU_{env}

Die Umgebungsbedingungen während der Kalibrierung werden im Kalibrierschein angegeben. Der Einfluss von Umgebungsbedingungen, die von denen bei der Kalibrierung abweichen (der zulässige Variationsbereich entsprechend der Herstellerspezifikationen muss eingehalten werden), muss abgeschätzt werden, wenn er für die Nutzung relevant ist. Für solche abweichenden Bedingungen müssen gegebenenfalls zusätzliche Unsicherheitsbeiträge angesetzt werden.

8.6 Anzeigauflösung $\delta T_{\text{res},X}$; $\delta U_{\text{res},X}$

Die Auflösung der Anzeigen für Temperatur bzw. relative Feuchte gehen als rechteckverteilter Unsicherheitsbeitrag ein. Die kleinste Auflösung beträgt 0,5 Digit. Dies ist die halbe Breite eines rechteckverteilten Beitrages mit dem Erwartungswert 0.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	30 / 66

8.7 Messabweichung der Normalmesseinrichtung $\delta T_S ; \delta U_S$

Dieser Beitrag ergibt sich aus einer Teilbilanz für die verwendeten Normalmesseinrichtungen.

$$T_S = T_{\text{ind},S} + \Delta T_S + \delta T_S \quad \text{mit} \quad \delta T_S = \delta T_{\text{cal}} + \delta T_{\text{drift}} + \delta T_{\text{res}} + \delta T_{\text{sht}} + \dots \quad (19)$$

$$U_S = U_{\text{ind},S} + \Delta U_S + \delta U_S \quad \text{mit} \quad \delta U_S = \delta U_{\text{cal}} + \delta U_{\text{drift}} + \delta U_{\text{res}} + \dots \quad (20)$$

Hierbei ist bei der Verwendung von Widerstandsthermometern als Normale die Eigenerwärmung δT_{sht} zu berücksichtigen.

Diese kann in Gas / Luft deutlich größer sein als bei der Kalibrierung in Flüssigkeitsbädern.


Bei erweiterten Messunsicherheiten ($k = 2$) kleiner als 0,3 K in umgewälzten Klimaschränken bzw. kleiner als 0,5 K in nicht umgewälzten Klimaschränken ist dieser Beitrag durch Verwendung unterschiedlicher Messströme bei der Messung oder durch eine entsprechende Bestimmung bei der Kalibrierung des Widerstandsthermometers in ruhender bzw. bewegter Luft zu berücksichtigen. Wenn eine Messung mit unterschiedlichen Messströmen nicht möglich ist, kann die Bestimmung des Beitrages auch durch eine vergleichende Kalibrierung im Flüssigkeitsbad und ruhender bzw. bewegter Luft (Gas) erfolgen.

In Abhängigkeit des gewählten Verfahrens zur Bestimmung der relativen Feuchte (s. Kapitel 7.6) muss die Kalibrierung der eingesetzten Normale und die Berücksichtigung der Einflussfaktoren nach geeigneten, wenn vorhanden, normativen Dokumenten erfolgen, z. B. für relative Feuchte und Hygrometer nach der Richtlinie DKD-R 5-8 [12].

9 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.

Wird für Berechnungen der Absolutdruck benötigt, so ist auch der Umgebungsdruck zu dokumentieren.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	31 / 66

10 Kalibrierschein

Der Kalibrierschein muss den Anforderungen der aktuell gültigen Normen (DIN EN ISO/IEC 17025) [14], sowie den zusätzlichen Festlegungen der jeweiligen Akkreditierungsstelle bzw. regionaler Metrologie-Organisationen genügen.

Als Ergebnis wird im Kalibrierschein die Abweichung der angezeigten Werte von den gemessenen Referenzwerten oder alternativ die Anzeige Korrektur angegeben.

Methode (A), (B), (D) Der Referenz-/ Bezugswert für die Bestimmung der Anzeigeabweichung, den Strahlungs- und ggf. den Beladungseinfluss bezieht sich auf den Referenzmessort (in der Regel die räumliche Mitte des Nutzvolumens).

Methode (C) Der Referenz-/ Bezugswert für die Ermittlung der Anzeigeabweichung sowie für den Strahlungs- und ggf. den Beladungseinfluss bezieht sich auf den gewählten Messort.
Bei mehreren Messorten genügt die Ermittlung des Strahlungseinflusses an nur einem der Messorte.

Die Messbedingungen und die Unsicherheiten der Anzeigeabweichungen werden angegeben. Für die Ergebnisse der zusätzlichen Untersuchungen zur Charakterisierung der Verhältnisse im Nutzvolumen oder am Messort werden für den Strahlungs- und Beladungseinfluss sowie die Inhomogenität und Instabilitäten die jeweiligen Differenzen entsprechend den Kapitel 7.2 bis 7.5 und nicht die resultierenden Standardunsicherheitsbeiträge angegeben.

Hierbei müssen die Messmethoden entsprechend Kapitel 7.4 bzw. zugeordnete Beladungen entsprechend Kapitel 7.5 eindeutig beschrieben sein.


Wenn bestimmte Untersuchungen nicht durchführbar waren, muss darauf deutlich im Kalibrierschein hingewiesen werden. Die maximalen Werte der entsprechenden Beiträge zur Messunsicherheit müssen abgeschätzt und berücksichtigt werden.

Auf alle nicht im Ergebnis und in der Messunsicherheit enthaltenen Beiträge ist im Kalibrierschein hinzuweisen.

Im Fall der Kalibriermethode (C) *muss* der Kalibriergegenstand im Kalibrierschein **mit „Messort(e) im Klimaschrank“** bezeichnet werden.

Die Einhaltung von Kunden- bzw. Herstellertoleranzen wird nur auf Kundenwunsch geprüft.

Gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [14] muss die zugrunde gelegte Entscheidungsregel mit dem Kunden vor der Kalibrierung abgestimmt und dokumentiert werden.

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	32 / 66

Ein vollständiges Kalibrierergebnis besteht u. a. aus den folgenden Angaben (Beispiele siehe Anhang B und C):


- Anzeigeabweichung für die Temperatur und ggf. die relative Feuchte am Referenzmessort [Methode (A), (B) und (D)] bzw. für den (die) einzelnen Messort(e) [Methode (C)]
- Messunsicherheit für die Anzeige der Temperatur und ggf. der relativen Feuchte
- Räumliche Verteilung der Temperatur und ggf. der relativen Feuchte [Methode (A), (B) und (D)]
- Weitere Untersuchungsergebnisse zur Charakterisierung wie z. B. Inhomogenität, Instabilität, Strahlungseinfluss, Beladungseinfluss
- Messbedingungen, wie Zuluftklappenstellung, Einstellung der Umwälzrate, z. B. Drehzahl (wenn verstellbar), etc.
- Verwendetes Trägergas
- Lage des Referenzmessortes
- Konformitätsaussage für Temperatur / relative Feuchte (nur auf Kundenwunsch)

Dem Kalibrierschein wird ein Informationsblatt (siehe Anhang D) beigelegt, in dem auf die speziellen Einfluss- und Fehlerquellen bei der Anwendung hingewiesen wird. Dieses Beiblatt ist Bestandteil des Kalibrierscheines (Papierform / PDF-Format) und wird bei der Seitenangabe als letzte Seite des Kalibrierscheines mitgezählt.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	33 / 66

11 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 60068-1:2015 Umgebungseinflüsse – Teil 1: Allgemeines und Leitfaden
- [2] DIN EN IEC 60068-3-5:2018 Umgebungseinflüsse – Teil 3-5: Unterstützende Dokumentation und Leitfaden, Bestätigung des Leistungsvermögens von Temperaturprüfkammern
- [3] DIN EN IEC 60068-3-6:2018 Umgebungseinflüsse – Teil 3-6: Unterstützende Dokumentation und Leitfaden, Bestätigung des Leistungsvermögens von Temperatur- und Klima-Prüfkammern
- [4] DIN EN IEC 60068-3-7:2022 Umgebungseinflüsse – Teil 3-7: Unterstützende Dokumentation und Leitfaden, Messungen in Temperaturprüfkammern für Prüfungen A (Kälte) und B (trockene Wärme) (mit Prüfgut)
- [5] DIN EN 60068-3-11:2008 Umgebungseinflüsse - Teil 3-11: Unterstützende Dokumentation und Leitfaden - Berechnung der Messunsicherheit von Umgebungsbedingungen in Klimaprüfkammern
- [6] DIN 12880:2007 Elektrische Laborgeräte - Wärme- und Brutschränke
- [7] DIN 13277:2022 Kühl- und Gefrier-Lagerungsgeräte für Labor- und Medizinanwendungen - Terminologie, Anforderungen, Prüfung
- [8] EA-4/02 M: 2022 Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (Deutsche Übersetzung), Freigabe EA 05. November 2021, Übersetzung vom 31.08.2022
- [9] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of the uncertainty of measurement, Ausgabe September 2008
- [10] DKD, Richtlinie DKD-R 5-1: Kalibrierung von Widerstandsthermometern, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 11/2023, Revision 0.
- [11] DKD, Richtlinie DKD-R 5-3: Kalibrierung von Thermoelementen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [12] DKD, Richtlinie DKD-R 5-8: Kalibrierung von Hygrometern zur direkten Erfassung der relativen Feuchte, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 02/2019, Revision 0.
- [13] DKD, Richtlinie DKD-R 5-6: Bestimmung von Thermometerkennlinien, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin, Ausgabe 09/2018, Revision 0.
- [14] DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	34 / 66

Anhang A Messunsicherheitsbilanzen (Beispiel)

Die in diesem Abschnitt behandelten Fälle für die Berechnung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung dienen als Beispiele und sind nicht unmittelbar auf eine tatsächlich durchgeführte Kalibrierung zu übertragen. Vielmehr sind in jedem Einzelfall die Beiträge zur Messunsicherheit sorgfältig individuell zu bestimmen.

A1 – Temperaturbilanz

Kalibrierung eines Klimaschranks mit Umluft nach Methode (A) bei einer Temperatur von 120 °C mit Widerstandsthermometern als Normalthermometer

Für die Abweichung ΔT_X der Anzeige der Temperatur $T_{\text{ind},X}$ des Klimaschranks von der mit den Normalen gemessenen Gastemperatur T_S für den Referenzmessort ergibt sich folgendes Modell:

$$\Delta T_X = T_{\text{ind},X} - T_S + \delta T_S + \delta T_{\text{inhom}} + \delta T_{\text{instab}} + \delta T_{\text{radiation}} + \delta T_{\text{load}} + \delta T_{\text{res},X} + \delta T_{\text{env}} \quad (21)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

T_S :

Mittelwert der Temperatur, gemessen mit dem Normalthermometer, korrigiert um die zugehörige Anzeige­korrektur

Der Typ-A Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des Normalthermometers bestimmt. Im Beispiel ergibt sich für die Standardabweichung des Mittelwertes 10 mK.

Der Typ-B-Beitrag der Normalmesseinrichtung wird bestimmt aus einer Teilbilanz für die Temperaturmessung.

$$T_S = T_{\text{ind},S} + \Delta T_S + \delta T_S \quad (22)$$

$$\delta T_S = \delta T_{\text{cal}} + \delta T_{\text{drift}} + \delta T_{\text{res}} + \delta T_{\text{sht}} + \delta T_{\text{int}} + \delta T_{\text{con}} + \delta T_{\text{thv}} + \delta T_{\text{htd}} + \delta T_{\text{hys}} \quad (23)$$

δT_{cal} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Kalibrierung.


Die Normalmesseinrichtung für die Temperatur ist ein Pt100 mit dem zugehörigen Messgerät. Die Kennlinie des Sensors wird im Messgerät bei der Kalibrierung justiert, so dass keine Korrekturen an der Temperaturanzeige anzubringen sind ($\Delta T_{\text{cal}} = 0$). Die Unsicherheit U der Temperatur wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 50$ mK; $k = 2$). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 25 mK.

δT_{drift} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Drift seit der letzten Kalibrierung. Aus der Historie des Thermometers wird abgeschätzt, dass die Unsicherheit der Temperatur aufgrund der Drift des Pt100 (Normal) seit der letzten Kalibrierung 50 mK nicht überschreitet (rechteckverteilt). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 29 mK.

δT_{res} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Auflösung. Die Auflösung des Normalthermometers beträgt 10 mK. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich damit als

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	35 / 66

rechteckverteilter Beitrag mit der Breite 10 mK. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 2,9 mK.

δT_{sht} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Eigenerwärmung. Aus der Untersuchung des Pt100 (Normal) im Gas-/Luftstrom bei verschiedenen Messströmen wird abgeschätzt, dass die Unsicherheit der Temperatur aufgrund der Eigenerwärmung des Pt100 30 mK nicht überschreitet (rechteckverteilt). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

δT_{int} :

Korrektur 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 [13]).

δT_{con} :

Korrektur 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} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund von parasitären Thermo-spannungen im Messkreis des Normalthermometers. Das zugehörige Messgerät misst den Widerstand des Pt100-Normalthermometers mit alternierendem Gleichstrom und mittelt über mehrere Umpolungsperioden. Eventuelle parasitäre Thermo-spannungen im Messkreis werden damit kompensiert. Die verbleibende Restunsicherheit aufgrund von Thermo-spannungen 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} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund einer Wärmeableitung. 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_{hys} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Hysterese. 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 Standard-unsicherheit beträgt dann 6 mK.

Für den Kalibriergegenstand ergeben sich folgende Beiträge:

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	36 / 66

$T_{\text{ind},X}$:

Die Anzeige der Temperatur des Klimaschranks ergibt sich aus dem Mittelwert der Ablesungen im Zeitraum von 30 min. Die zugehörige Unsicherheit wird durch die Standardabweichung des Mittelwertes von 130 mK gebildet (normalverteilt).

Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 130 mK.

δT_{inhom} :

Die Temperaturinhomogenität wird aus den Messergebnissen für die einzelnen Messorte i bezogen auf den Referenzmessort bestimmt (siehe Kapitel 8.1). Die größte Differenz aller Temperaturen zur Temperatur am Referenzmessort beträgt 0,5 K (halbe Breite des rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 289 mK.

δT_{instab} :

Die Temperaturinstabilität wird aus einer Messreihe für den Referenzmessort bestimmt. Die so ermittelte maximale Temperaturinstabilität wird für die Messunsicherheitsberechnung verwendet. Die größte Abweichung innerhalb von 30 min zum Mittelwert über diesen Zeitraum beträgt 0,3 K (halbe Breite des rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages; siehe Kapitel 8.2). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 173 mK.

$\delta T_{\text{radiation}}$:

Der Strahlungseinfluss auf die Temperaturmessung wird nach Methode (S1) (siehe Kapitel 7.4 und 8.3) mit zwei Thermometern mit niedrigem bzw. hohem Emissionsgrad bestimmt. Die festgestellte Differenz der Temperaturen beider Thermometer beträgt 2 K. 20 % dieses Wertes werden als halbe Breite eines rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages angesetzt. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 231 mK.

δT_{load} :

Für den Referenzmessort wird die Temperatur im unbeladenen und im nach Kundenvorgaben definiert beladenen Klimaschrank gemessen. Die Differenz beträgt 0,8 K. 20 % dieses Wertes werden als halbe Breite eines rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages angesetzt (siehe Kapitel 8.4). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 92 mK.

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

Die Auflösung der Temperaturanzeige des Klimaschranks beträgt 0,1 K. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich damit als rechteckverteilter Beitrag mit der Breite 100 mK. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 29 mK.


δT_{env} :

Abweichung der Temperatur auf Grund abweichender Umgebungsbedingungen bei der Nutzung, s. Kapitel 8.5. Ist nur relevant, wenn die Umgebungsbedingungen bei Kalibrierung und Nutzung unterschiedlich sind, und ist im Folgenden weggelassen.

Damit ergibt sich folgende Messunsicherheitsbilanz (Tabelle 6).

Tabelle 6: Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines Klimaschranks mit Umluft nach Methode (A) bei einer Temperatur von 120 °C


Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Divisor	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
T_S	Anzeige Normalthermometer	121,22 °C	0,024 K	0,024 K	Normal	1	1	0,024 K
δT_{cal}	Kalibrierung Normalthermometer	0	0,050 K	0,025 K	Normal	2	1	0,025 K
δT_{drift}	Drift Normalthermometer	0	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,029 K
δT_{res}	Auflösung Normalthermometer	0	0,005 K	0,003 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,003 K
δT_{sht}	Eigenerwärmung Pt100	0	0,030 K	0,017 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,017 K
δT_{int}	Interpolation zw. Kalibrierpunkten	0	0,020 K	0,012 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,012 K
δT_{con}	Anschluss technik Normalthermometer	0	0,001 K	0,001 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,001 K
δT_{thv}	Parasitäre Thermospannung Normalthermometer	0	0,001 K	0,001 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,001 K
δT_{htd}	Wärmeableitung Normalthermometer	0	0,000 K	0,000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,000 K
δT_{hys}	Hysterese Normalthermometer	0	0,010 K	0,006 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,006 K
$T_{ind, X}$	Anzeige Klimaschranktemperatur	120,0 °C	0,130 K	0,130 K	Normal	1	1	0,130 K
δT_{inhom}	Temperaturinhomogenität	0	0,500 K	0,289 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,289 K
δT_{instab}	Temperaturinstabilität	0	0,300 K	0,173 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,173 K
$\delta T_{radiation}$	Strahlungseinfluss	0	0,400 K	0,231 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,231 K
δT_{load}	Beladungseinfluss	0	0,160 K	0,092 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,092 K
$\delta T_{res, X}$	Auflösung	0	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,029 K
ΔT_X	Anzeigeabweichung	-1,2 K						$u = 0,442 \text{ K}$

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	38 / 66

Die erweiterte Messunsicherheit für die Kalibrierung der Temperaturanzeige des Klimaschranks bezogen auf das Nutzvolumen beträgt

$$U = k \cdot u(\Delta T_x) = 2 \cdot 442 \text{ mK} \cong 0,89 \text{ K.}$$

Wenn bei dieser Bilanz ein rechteckverteilter Beitrag, z. B. die Inhomogenität o. Ä., deutlich alle anderen Beiträge überwiegt, ist für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von annähernd 95 % ein Erweiterungsfaktor $k \neq 2$ anzusetzen, weil der Messunsicherheit dann keine Normalverteilung zu Grunde liegt. Da in diesem Beispiel mehrere rechteckverteilte Beiträge nahezu gleicher Größenordnung zur kombinierten Gesamtmessunsicherheit beitragen, kann hier näherungsweise eine Normalverteilung angenommen und der Erweiterungsfaktor zu $k=2$ angesetzt werden. Aufgrund eines zu geringen effektiven Freiheitsgrades für die Standardmessunsicherheit des Ergebnisses kann sich auch ein Erweiterungsfaktor $k > 2$ ergeben.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	39 / 66

A2 – Bilanz für relative Feuchte (Beispiel für die Bestimmung der Referenzfeuchte durch Verwendung eines Taupunktspiegel-Hygrometers als Normal):

Kalibrierung eines Klimaschranks nach Methode (A) bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % bei 25 °C Lufttemperatur mit einem Taupunktspiegel-Hygrometer mit externem Messkopf nach Verfahren (F1) und Widerstandsthermometern als Normale.

Für die Abweichung ΔU_X der Anzeige der relativen Feuchte $U_{\text{ind},X}$ des Klimaschranks von der mit dem Normal bestimmten relativen Feuchte $U_{w,S}$ für den Referenzmessort ergibt sich folgendes Modell:

$$\Delta U_X = U_{\text{ind},X} - U_{w,S} + \delta U_{w,S} + \delta U_{\text{inhom}} + \delta U_{\text{instab}} + \delta U_{\text{load}} + \delta U_{\text{res},X} + \delta U_{\text{env}} \quad (24)$$

Die Referenzfeuchte $U_{w,S}$ wird aus der am Referenzmessort gemessenen Gas- und Taupunkttemperatur und dem Absolutdruck berechnet.

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

Die Messunsicherheitsberechnung für das Kalibrierergebnis erfolgt in mehreren Teilschritten.


Schritt 1 Messunsicherheitsbilanz für die Gastemperatur

Schritt 2 Messunsicherheitsbilanz für die Taupunkttemperatur

Schritt 3 Messunsicherheitsbilanz für die Berechnung der relativen Feuchte

Schritt 4 Messunsicherheitsbilanz für das Kalibrierergebnis

Die Modellgleichungen und ihre Komponenten der genannten Teilschritte werden nachfolgend im Einzelnen erläutert und in Messunsicherheitsbilanzen zusammengefasst.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	40 / 66

Schritt 1: Gastemperatur

Die Unsicherheitsbilanz der Gastemperatur setzt sich aus den Beiträgen für das Normalthermometer zusammen.

Die Beiträge des Klimaschranks sind in diesem Teilschritt noch nicht enthalten. Diese werden in Teilschritt 4 berücksichtigt.

Für die Gastemperatur T_S gilt folgende Modellgleichung:

$$T_S = T_{\text{ind,S}} + \Delta T_S + \delta T_S \quad (25)$$

$$\delta T_S = \delta T_{\text{cal}} + \delta T_{\text{drift}} + \delta T_{\text{res}} + \delta T_{\text{sht}} + \delta T_{\text{int}} + \delta T_{\text{con}} + \delta T_{\text{thv}} + \delta T_{\text{htd}} + \delta T_{\text{hys}} \quad (26)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

T_S :

Mittelwert der Temperatur, gemessen mit dem Normalthermometer, korrigiert um die zugehörige Anzeige­korrektur

Der Typ-A Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des Normalthermometers bestimmt. Im Beispiel ergibt sich für die Standardabweichung des Mittelwertes 10 mK.

δT_{cal} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Kalibrierung. Die Normalmesseinrichtung für die Temperatur ist ein Pt100 mit dem zugehörigen Messgerät. Die Kennlinie des Sensors wird im Messgerät bei der Kalibrierung justiert, so dass keine Korrekturen an der Temperaturanzeige anzubringen sind ($\Delta T_{\text{cal}} = 0$). Die Unsicherheit U der Temperatur wird dem Kalibrierschein entnommen ($U = 50$ mK; normalverteilt, $k = 2$). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 25 mK.

δT_{drift} :


Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Drift seit der letzten Kalibrierung. Aus der Historie des Thermometers wird abgeschätzt, dass die Unsicherheit der Temperatur aufgrund der Drift des Pt100 (Normal) seit der letzten Kalibrierung 50 mK nicht überschreitet (rechteckverteilt). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 29 mK.

δT_{res} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Auflösung. Die Auflösung des Normalthermometers beträgt 10 mK. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich damit als rechteckverteilter Beitrag mit der Breite 10 mK. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt 2,9 mK.

δT_{sht} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Eigenerwärmung. Aus der Untersuchung des Pt100 (Normal) im Gas-/Luftstrom bei verschiedenen Messströmen wird abgeschätzt, dass die Unsicherheit der Temperatur aufgrund der Eigenerwärmung des Pt100 30 mK nicht überschreitet (rechteckverteilt). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 17 mK.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	41 / 66

δT_{int} :

Korrektur 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 12 mK (siehe auch DKD-R 5-6, Tabelle 6.2 [13]).

δT_{con} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Anschlusstechnik. 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 0,6 mK.

δT_{thv} :

Korrektur 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 0,6 mK.

δT_{htd} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers 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_{hys} :

Korrektur der Temperatur des Normalthermometers aufgrund der Hysterese. 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 6 mK.

Die Beiträge werden in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Messunsicherheitsbilanz für die Gastemperatur

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Divisor	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$T_{\text{ind,S}}$	Anzeige Normalthermometer	24,70 °C	0,010 K	0,010 K	Normal	1	1	0,010 K
δT_{cal}	Kalibrierung Normalthermometer	0	0,050 K	0,025 K	Normal	2	1	0,025 K
δT_{drift}	Drift Normalthermometer	0	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,029 K
$\delta T_{\text{res, std}}$	Auflösung Normalthermometer	0	0,005 K	0,003 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,003 K
δT_{heat}	Eigenerwärmung Pt100	0	0,030 K	0,017 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,017 K
δT_{int}	Interpolation zw. Kalibrierpunkten	0	0,020 K	0,012 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,012 K
δT_{con}	Anschluss technik Normalthermometer	0	0,001 K	0,001 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,001 K
δT_{thv}	Parasitäre Thermospannung Normalthermometer	0	0,001 K	0,001 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,001 K
δT_{htd}	Wärmeableitung Normalthermometer	0	0,000 K	0,000 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,000 K
δT_{hys}	Hysterese Normalthermometer	0	0,010 K	0,006 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,006 K
T_S	Gastemperatur	24,70 °C						$u = 0,046 \text{ K}$

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	43 / 66

Schritt 2: Taupunkttemperatur

Die Unsicherheitsbilanz der Taupunkttemperatur setzt sich aus den Beiträgen für das Taupunktspiegel-Hygrometer zusammen.

Die Beiträge des Klimaschranks sind in diesem Teilschritt noch nicht enthalten. Diese werden in Teilschritt 4 berücksichtigt.

Für die Taupunkttemperatur $T_{d,S}$ gilt folgende Modellgleichung:

$$T_{d,S} = T_{d,ind,S} + \Delta T_{d,S} + \delta T_{d,cal} + \delta T_{d,res} + \delta T_{d,int} + \delta T_{d,drift} + \delta T_{d,rep} - c_{Td} \cdot \delta T_{d,Tdep} \quad (27)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$T_{d,S}$:

Mittelwert der Taupunkttemperatur, gemessen mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer, korrigiert um die zugehörige Anzeige­korrektur

Der Typ-A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers bestimmt. Im Beispiel ergibt sich für die Standardabweichung des Mittelwertes 10 mK.

$\delta T_{d,cal}$:

Korrektur der Taupunkttemperatur des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers aufgrund der Kalibrierung. Bei der Kalibrierung wurde eine Abweichung 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.

$\delta T_{d,res}$:


Korrektur der Taupunkttemperatur des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers aufgrund der Auflösung. 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.

$\delta T_{d,int}$:

Korrektur der Taupunkttemperatur 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.

$\delta T_{d,drift}$:

Korrektur der Taupunkttemperatur 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 Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	44 / 66

$\delta T_{d,rep}$:

Korrektur der Taupunkttemperatur des Normal-Taupunktspiegel-Hygrometers aufgrund einer Wiederholbarkeit. 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.


$\delta T_{d,Tdep}$:

Korrektur der Taupunkttemperatur 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 c_{Td} des Taupunktes von 5 mK / K hat ($c_{Td} = 5 \text{ mK} / \text{K}$). 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.

Die Beiträge werden in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Messunsicherheitsbilanz für die Taupunkttemperatur

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Divisor	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$T_{d,ind,S}$	Anzeige Taupunkthygrometer	14,10 °C	0,010 K	0,010 K	Normal	1	1	0,010 K
$\delta T_{d,cal}$	Abweichung Taupunkthygrometer aus der Kalibrierung	-0,02 K	0,050 K	0,025 K	Normal	2	1	0,025 K
$\delta T_{d,res}$	Auflösung Taupunkthygrometer	0	0,005 K	0,003 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,003 K
$\delta T_{d,int}$	Interpolation zw. Kalibrierpunkten	0	0,020 K	0,012 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,012 K
$\delta T_{d,drift}$	Drift Taupunkthygrometer	0	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,029 K
$\delta T_{d,rep}$	Wiederholbarkeit Taupunktmessung	0	0,050 K	0,029 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,029 K
$\delta T_{d,Tdep}$	Temperaturabhängigkeit Messkopf Taupunkthygrometer	0	5,000 K	2,887 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,005 K/K	0,014 K
$T_{d,S}$	Taupunkttemperatur	14,08 °C						$u = 0,053 \text{ K}$

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	46 / 66

Schritt 3: Berechnung der relativen Feuchte (Referenzfeuchte)

Aus der Gas- und Taupunkttemperatur sowie dem Absolutdruck wird mit nachfolgender Gleichung die Referenzfeuchte [12] berechnet:

$$U_{w,S} = \frac{e(T_{d,S}) \cdot f_w(T_{d,S}, p)}{e_w(T_S) \cdot f_w(T_S, p)} \cdot 100 \% \quad (28)$$

Für die unbekannte Abweichung $\delta U_{w,S}$ der berechneten Referenzfeuchte gilt folgende Modellgleichung:

$$\delta U_{w,S} = c_T \cdot \delta T_S + c_{Td} \cdot \delta T_{d,S} + c_p \cdot \delta p + \delta U_{S,A} \quad (29)$$

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 7. Der Beitrag ist normalverteilt.

Der zugehörige Empfindlichkeitskoeffizient bei 24,7 °C und einer relativen Feuchte von 51,6 % beträgt $c_T = 3,09 \% / K$.

$\delta T_{d,S}$:

Taupunkt gemessen mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer.

Die Unsicherheit des Taupunktes ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 8. Der Beitrag ist normalverteilt.

Der zugehörige Empfindlichkeitskoeffizient bei 24,7 °C und einer relativen Feuchte von 51,6 % beträgt $c_T = 3,35 \% / K$.

δp :

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

$\delta U_{S,A}$:

Berechnung der relativen Feuchte aus Gas- und Taupunkttemperatur.

Die Unsicherheit aus der verwendeten Dampfdruckgleichung für den Sättigungsdampfdruck (berechnet aus der Gastemperatur), bzw. für den Wasserdampfpartialdruck (berechnet aus der Taupunkttemperatur) wird mit 0,02 % abgeschätzt. Es wird ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,02 % angesetzt. Die zugeordnete Standardunsicherheit beträgt dann 0,012 %.

Diese Beiträge werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Messunsicherheitsbilanz für die berechnete Referenzfeuchte

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Divisor	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
T_S	Gastemperatur	24,70 °C	0,046 K	0,046 K	Normal	1	3,09 %/K	0,142 %
$\delta T_{d,S}$	Taupunkttemperatur	14,08 °C	0,053 K	0,053 K	Normal	1	3,35 %/K	0,177 %
$\delta U_{S,A}$	Formelfehler	0,00	0,02 %	0,012 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1	0,012 %
$U_{w,S}$	Berechnete Referenzfeuchte	51,6 %					$u = 0,227 \%$	

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:

$$\Delta U_X = U_{\text{ind},X} - U_{w,S} + \delta U_{w,S} + \delta U_{\text{inhom}} + \delta U_{\text{instab}} + \delta U_{\text{load}} + \delta U_{\text{res},X} + \delta U_{\text{env}} \quad (30)$$

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung ergeben sich folgende Beiträge:

$U_{w,S}$:

Feuchtereferenzwert, berechnet aus der mit dem Normalthermometer gemessenen Gastemperatur und der mit dem Normal-Taupunktspiegel-Hygrometer gemessenen Taupunkttemperatur im Klimaschrank

$\delta U_{w,S}$:

Die Unsicherheit der Referenzfeuchte ergibt sich als Ergebnis der entsprechenden Subbilanz nach Tabelle 9. Der Beitrag wird als normalverteilt angenommen.

$U_{\text{ind},X}$:

Die Anzeige für die relative Feuchte im Klimaschrank ergibt sich aus dem Mittelwert der Ablesungen im Zeitraum von 30 min. Die zugehörige Unsicherheit wird durch die Standardabweichung des Mittelwertes von im Beispiel 0,24 % gebildet (normalverteilt). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,24 %.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	48 / 66

δU_{inhom} :

Die Feuchteinhomogenität wird aus den Messergebnissen für die einzelnen Messorte i bezogen auf den Referenzmessort (siehe Kapitel 8.1) bestimmt. Die größte Differenz aller relativen Feuchten zur relativen Feuchte am Referenzmessort (meist Zentrum des Nutzvolumens) beträgt 1,8 % (halbe Breite des rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 1,04 %.

δU_{instab} :

Die Feuchteinstabilität wird aus einer Messreihe für den Referenzmessort bestimmt. Die so ermittelte maximale Instabilität der relativen Feuchte wird für die Messunsicherheitsberechnung verwendet. Die größte Abweichung innerhalb von 30 min zum Mittelwert beträgt 1,2 % (halbe Breite des rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages; siehe Kapitel 8.2). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,69 %.

δU_{load} :

Für den Referenzmessort wird die relative Feuchte im unbeladenen und im nach Kundenvorgaben definiert beladenen Klimaschrank gemessen (Methode B). Die Differenz beträgt 2,2 %. 20 % dieses Wertes werden als halbe Breite eines rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages angesetzt (siehe Kapitel 8.4). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,25 %.

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

Die Auflösung der von der Anzeige des Klimaschranks angezeigten relativen Feuchte beträgt 1,0 %. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich damit als rechteckverteilter Beitrag mit der Breite 1,0 %. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 %.

δU_{env} :

Abweichung der relativen Feuchte aufgrund abweichender Umgebungsbedingungen bei der Nutzung ist nur relevant, wenn die Umgebungsbedingungen bei Kalibrierung und Nutzung unterschiedlich sind, und wird im Folgenden vernachlässigt.

Diese Beiträge werden in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Messunsicherheitsbilanz Kalibrierergebnis

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Divisor	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$U_{w,s}$	Berechnete Referenzfeuchte	51,6 %	0,23 %	0,23 %	Normal	1	1,0	0,23 %
$U_{ind,X}$	Feuchteanzeige Kalibriergegenstand	50 %	0,24 %	0,24 %	Normal	1	1,0	0,24 %
δU_{inhom}	Feuchteinhomogenität	0,0 %	1,8 %	1,04 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	1,04 %
δU_{instab}	Feuchteinstabilität	0,0 %	1,2 %	0,69 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,69 %
δU_{load}	Beladungseinfluss	0,0 %	0,44 %	0,25 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,25 %
$\delta U_{res,X}$	Auflösung	0,0 %	0,5 %	0,29 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,29 %
ΔU_X	Anzeigeabweichung Kalibriergegenstand	-1,6 %						$u = 1,35 \%$

Der Klimaschrank hat bei 25 °C und 51,6 % eine Anzeigeabweichung von -1,6 %, bei einer erweiterten Messunsicherheit U (basierend auf der Annahme einer Normalverteilung und dem Erweiterungsfaktor $k = 2$) von 2,7 %.

Wenn bei dieser Bilanz ein rechteckverteilter Beitrag, z. B. die Inhomogenität o. Ä., deutlich alle anderen Beiträge überwiegt, ist für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von annähernd 95 % ein Erweiterungsfaktor $k \neq 2$ anzusetzen, weil die Messunsicherheit dann nicht auf einer Normalverteilung basiert. Da in diesem Beispiel mehrere rechteckverteilte Beiträge nahezu gleicher Größenordnung zur kombinierten Gesamtmessunsicherheit beitragen, kann hier näherungsweise eine Normalverteilung angenommen und der Erweiterungsfaktor zu $k = 2$ angesetzt werden. Aufgrund eines zu geringen effektiven Freiheitsgrades für die Standardmessunsicherheit des Ergebnisses kann sich auch ein Erweiterungsfaktor $k > 2$ ergeben.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	50 / 66

A3 – Bilanz für relative Feuchte (Beispiel für die Bestimmung der Referenzfeuchte durch Verwendung von kapazitiven Feuchtesensoren als Normal):

Kalibrierung eines **Messortes** im Klimaschrank nach **Methode (C)** bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % bei 23 °C mit zwei Normalhygrometern (kapazitive Polymersensoren) nach Verfahren (F3) und Widerstandsthermometern als Normale

Für die Abweichung ΔU_X der Anzeige der relativen Feuchte $U_{\text{ind},X}$ des Klimaschranks von der mit den Normalen gemessenen relativen Feuchte $U_{w,S}$ für den Messort ergibt sich folgendes Modell:

$$\Delta U_X = U_{\text{ind},X} - U_{w,S} + \delta U_{w,S} + \delta U_{\text{inhom}} + \delta U_{\text{instab}} + \delta U_{\text{load}} + \delta U_{\text{res},X} + \delta U_{\text{env}} \quad (31)$$

Für die Bestimmung des Feuchtereferenzwertes $U_{w,S}$ gilt folgende Modellgleichung

$$\begin{aligned} U_{w,S} = U_S & \\ & + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{cal},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{res},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{int},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{drift},S1} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{hys},S1} \\ & + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{cal},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{res},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{int},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{drift},S2} + \frac{1}{2} \cdot \delta U_{\text{hys},S2} \\ & + \delta U_{i,S1-2} + \delta U_{T\text{dep}} + c_T \cdot (\delta T_{\text{htd}} + \delta T_{\text{sht}}) \end{aligned} \quad (32)$$

Der Empfindlichkeitskoeffizient c_T ergibt sich bei 23 °C und einer relativen Feuchte von 52,2 % zu $c_T = 3,16 \text{ \% / K}$.


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 Feuchtesensoren unterschiedlicher Hersteller verwendet werden. Möglich ist auch, die beiden Normale nicht ständig zusammen in Kalibrierungen einzusetzen, so dass diese nicht ständig den identischen Einflüssen ausgesetzt sind.

Gelten die Beiträge beider Normale wegen Nichterfüllung dieser Bedingungen als korreliert, sollten die jeweiligen Beiträge unter Berücksichtigung der Korrelation zu einem zugehörigen Unsicherheitsbeitrag des Mittelwertes zusammengefasst und dieser zusammengefasste Wert statt der beiden Einzelbeiträge in die Messunsicherheitsbilanz eingesetzt werden (für eine Abschätzung eines Maximalwertes für diesen zusammengefassten Unsicherheitsbeitrag siehe auch EA-4/02 M: 2022, Anhang D [8]).

Für die einzelnen Komponenten der Modellgleichung des Feuchtereferenzwertes ergeben sich folgende Beiträge:

U_S :

Mittelwert der mit den zugehörigen Anzeigekorrekturen korrigierten relative Feuchteanzeigen der beiden Normale wird aus allen Einzelmessungen der Normalhygrometer bestimmt. Der Typ-

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	51 / 66

A-Unsicherheitsbeitrag wird aus der Standardabweichung des Mittelwertes für die mehrfach abgelesenen Anzeigen der Normalhygrometer bestimmt.

Im Beispiel ergibt sich ein Mittelwert von 52,2 % sowie für die Standardabweichung des Mittelwertes 0,04 %.

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

Korrektur der relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der 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 %.

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

Korrektur der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der Drift seit der letzten Rekalibrierung der Historie der Hygrometer wird abgeschätzt, dass die Unsicherheit der Feuchtemessung aufgrund der Drift seit der letzten Kalibrierung eine relative Feuchte von 1,0 % nicht überschreitet (rechteckverteilt). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,58 %.

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

Korrektur der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der Auflösung. Die Auflösung der vom Normalhygrometer angezeigten relativen Feuchte beträgt 0,1 %. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich damit als rechteckverteilter Beitrag mit der Breite 0,1 %. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,03 %.

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

Korrektur 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 %.

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

Korrektur der relativen Feuchteanzeige der Normalhygrometer aufgrund einer möglichen Hysterese. Eine Untersuchung ergab bei beiden Normalhygrometern nur geringe Hysterese-Effekte. Jeder Kalibrierpunkt wird 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 %.

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

Korrektur der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der Differenz der korrigierten Anzeigen der beiden Normalhygrometer. Der zwischen den beiden Normalhygrometern beobachtete Unterschied der gemessenen relativen Feuchte darf nicht größer als $\pm 0,42$ % ($= 0,7 \cdot U_{\text{cal},S}$) sein. Bei unterschiedlichen Messunsicherheiten muss als Worstcase die größere herangezogen werden.

Liegt der Unterschied nicht innerhalb dieser Grenzen, sollten die Beobachtungen wiederholt und/oder die Gründe für die festgestellten großen Differenzen eingehender untersucht werden.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	52 / 66

Beide Hygrometer haben 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 Messunsicherheitsbeitrag angesetzt werden. Es wird daher ein rechteckverteilter Beitrag mit der Halbwertsbreite der Verteilung von 0,0 % angesetzt. Die zugeordnete Standard-unsicherheit beträgt dann 0,0 %.

Sollte die Differenz der korrigierten 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 anzusetzen.

δU_{Tdep} :

Korrektur der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der Abhängigkeit der Feuchtemessung der Normalhygrometer von der Gastemperatur. Die relative Feuchte der Normalhygrometer wurde an mehreren Punkten bei 20 °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 %.


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

δT_{htd} :

Korrektur der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund einer Wärmeableitung. Da die Sensoren der Normale vollständig eintauchen 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} :

Korrektur der gemittelten relativen Feuchte der Normalhygrometer aufgrund der Eigenerwärmung. 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 Empfindlichkeitskoeffizient hat bei 23 °C und 52,2 % einen Wert von $c_T = 3,16 \% / K$.

	Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	53 / 66

Für den Kalibriergegenstand ergeben sich die folgenden Beiträge:

$U_{\text{ind},X}$:

Die Anzeige für die relative Feuchte im Klimaschrank ergibt sich aus dem Mittelwert der Ablesungen im Zeitraum von 30 min. Die zugehörige Unsicherheit wird durch die Standardabweichung des Mittelwertes von im Beispiel 0,24 % gebildet (normalverteilt) Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,24 %

δU_{inhom} :

Die lokale Feuchteinhomogenität wird aus den Messergebnissen für den einzelnen Messort i durch Verwendung eines weiteren, im Abstand von 2 cm bis 5 cm benachbarten Feuchtesensors bestimmt.

Die so ermittelte maximale lokale Feuchteinhomogenität der relativen Feuchte am Messort i beträgt 0,6 % (halbe Breite des rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,35 %

δU_{instab} :

Die Feuchteinstabilität wird aus einer Messreihe für den Messort bestimmt.

Die so ermittelte maximale Instabilität der relativen Feuchte am Messort i wird für die Messunsicherheitsberechnung verwendet. Die größte Abweichung innerhalb von 30 min zum Mittelwert am Messort i beträgt 0,5 % (halbe Breite des rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages; siehe Kapitel 8.2). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 %

δU_{load} :

Für den Referenzmessort wird die relative Feuchte im unbeladenen und im nach Kundenvorgaben definiert beladenen Klimaschrank gemessen (Methode B). Die Differenz beträgt 2,2 %. 20 % dieses Wertes werden als halbe Breite eines rechteckverteilten Unsicherheitsbeitrages angesetzt (siehe Kapitel 8.4). Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,26 %.

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

Die Auflösung der von der Anzeige des Klimaschranks angezeigten relativen Feuchte beträgt 1,0 %. Die zugehörige Unsicherheit ergibt sich damit als rechteckverteilter Beitrag mit der Breite 1,0 %. Die zugehörige Standardunsicherheit beträgt dann 0,29 %.

δU_{env} :

Abweichung der relativen Feuchte aufgrund abweichender Umgebungsbedingungen bei der Nutzung Ist nur relevant, wenn die Umgebungsbedingungen bei Kalibrierung und Nutzung unterschiedlich sind, und wird im Folgenden vernachlässigt.

Damit ergibt sich folgende Unsicherheitsbilanz (Tabelle 11) für die Kalibrierung eines **Messortes** im Klimaschrank nach **Methode (C)** bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % bei 23 °C.

Tabelle 11: Messunsicherheitsbilanz für die Kalibrierung eines **Messortes** im Klimaschrank nach **Methode (C)** bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % bei 23 °C

Größe	Benennung	Schätzwert	Unsicherheit oder Halbbreite	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Divisor	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
U_S	Mittelwert der korrigierten Ablesung der Normale	52,2 %	0,04 %	0,04 %	Normal	1	1,0	0,04 %
$\delta U_{cal,S1}$	Kalibrierung Normal 1	0,0 %	0,6 %	0,3 %	Normal	2	0,5	0,15 %
$\delta U_{cal,S2}$	Kalibrierung Normal 2	0,0 %	0,6 %	0,3 %	Normal	2	0,5	0,15 %
$\delta U_{drift,S1}$	Drift Normal 1	0,0 %	1,0 %	0,58 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,29 %
$\delta U_{drift,S2}$	Drift Normal 2	0,0 %	1,0 %	0,58 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,29 %
$\delta U_{res,1}$	Auflösung Normal 1	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,01 %
$\delta U_{res,2}$	Auflösung Normal 2	0,0 %	0,05 %	0,03 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,01 %
$\delta U_{int,S1}$	Interpolation zw. Kalibrierpunkten Normal 1	0,0 %	0,25 %	0,14 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,07 %
$\delta U_{int,S2}$	Interpolation zw. Kalibrierpunkten Normal 2	0,0 %	0,25 %	0,14 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,07 %
$\delta U_{hys,S1}$	Hysterese Normal 1	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,00 %
$\delta U_{hys,S2}$	Hysterese Normal 2	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	0,5	0,00 %
$\delta U_{i,S1-2}$	Differenz zw. Normalen	0,0 %	0,00 %	0,00 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,00 %
δU_{Tdep}	Temperaturabhängigkeit Feuchtemessung	0,0 %	0,35 %	0,20 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,20 %
δT_{htd}	Wärmeableitung	0,0 %	0,0 K	0,00 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,16 %/K	0,00 %
δT_{sht}	Eigenerwärmung	0,0 %	0,1 K	0,06 K	Rechteck	$\sqrt{3}$	3,16 %/K	0,18 %
$U_{i,X}$	Anzeige Klimaschrankfeuchte	49 %	0,24 %	0,24 %	Normal	1	1,0	0,24 %
δU_{inhom}	Lokale Feuchteinhomogenität am Messort	0,0 %	0,6 %	0,35 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,35 %
δU_{instab}	Feuchteinstabilität	0,0 %	0,5 %	0,29 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,29 %
δU_{load}	Beladungseinfluss	0,0 %	0,45 %	0,26 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,26 %
$\delta U_{res,X}$	Auflösung	0,0 %	0,5 %	0,29 %	Rechteck	$\sqrt{3}$	1,0	0,29 %
ΔU_X	Anzeigeabweichung	-3,2 %					$u = 1,16 \%$	

	<p style="text-align: center;">Kalibrierung von Klimaschränken https://doi.org/10.7795/550.20250120</p>	DKD-R 5-7	
		Ausgabe:	01/2025
		Revision:	0
		Seite:	55 / 66

Die erweiterte Messunsicherheit für die Kalibrierung der Anzeige für die relative Feuchte im Klimaschrank bezogen auf den Messort beträgt $U = k \cdot u(\Delta U_x) = 2 \cdot 1,16 \% \cong 2,4 \%$.

Wenn bei dieser Bilanz ein rechteckverteilter Beitrag, z. B. die Inhomogenität o. Ä., deutlich alle anderen Beiträge überwiegt, ist für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von annähernd 95 % ein Erweiterungsfaktor $k \neq 2$ anzusetzen, weil der Messunsicherheit dann keine Normalverteilung zu Grunde liegt.

Da in diesem Beispiel mehrere rechteckverteilte Beiträge nahezu gleicher Größenordnung zur kombinierten Gesamtmessunsicherheit beitragen, kann hier näherungsweise eine Normalverteilung angenommen und der Erweiterungsfaktor zu $k = 2$ angesetzt werden.

Aufgrund eines zu geringen effektiven Freiheitsgrades für die Standardmessunsicherheit des Ergebnisses kann sich auch ein Erweiterungsfaktor $k > 2$ ergeben.

Ergebnisse zur Charakterisierung des Nutzvolumens:

Temperatur					
Regler-einstellung rel. Feuchte in %	Regler-einstellung Temperatur in °C	Inhomogenität in K	Instabilität in K	Strahlungseinfluss in K	Beladungseinfluss in K

rel. Feuchte				
Regler-einstellung Temperatur in °C	Regler-einstellung rel. Feuchte in %	Inhomogenität in %	Instabilität in %	Beladungseinfluss in %

Die Temperatur- und Feuchtemesswerte sind Mittelwerte aus Mehrfachmessungen. Die angegebenen Gastemperaturen wurden mit einem Thermometer mit einem Emissionsgrad $\varepsilon < 0,15$ ermittelt. Der verbleibende Strahlungseffekt wurde nicht korrigiert, sondern in der angegebenen Messunsicherheit berücksichtigt. Die angegebenen Beiträge zur Charakterisierung des Volumens stellen die maximalen Variationsbereiche der Temperatur bzw. Feuchte unter den angegebenen Messbedingungen dar. Die Kalibrierung erfolgte in Luft.

Die angegebenen Ergebnisse gelten nur für das von den Messorten aufgespannte Nutzvolumen des Klimaschranks. Alle anderen Teile des Innenraumvolumen gelten nicht als kalibriert.

Die Messergebnisse gelten für den Zustand des oben aufgeführten Kalibriergegenstandes zum Zeitpunkt der Kalibrierung und nur für die angegebenen Kalibrierpunkte.

Die Gastemperatur bzw. Gasfeuchte ergeben sich nach den Beziehungen:

$$\text{Gastemperatur} = \text{Temperaturanzeige} - \text{Anzeigeabweichung}$$

$$\text{Gasfeuchte} = \text{Feuchteanzeige} - \text{Anzeigeabweichung}$$

Bitte beachten Sie auch den Hinweis zum Einsatz von Klimaschränken auf beigefügtem Informationsblatt.

Messunsicherheit

Die Messunsicherheiten für die Temperaturen und relativen Feuchten wurden aus den Unsicherheiten von der Kalibrierung der Normale, der eingesetzten Messverfahren und der untersuchten Eigenschaften des Klimaschranks bestimmt.

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: 2022 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Anhang B2 Musterkalibrierschein für die Kalibrierung nach Methode (A) bzw. (B) (Variante 2)

Messergebnisse

Regler-einstellung	Anzeige Kalibrier-gegenstand	Temp. / rel. Feuchte Normal im Referenzort	Anzeige-abweichung	Anzeige-korrektur	Messun-sicherheit
25,0 °C					
97,0 %					
40,0 °C					
93,0 %					
55,0 °C					
20,0 %					
85,0 °C					
85,0 %					

Weitere Untersuchungsergebnisse: Räumliche Verteilung

Regler-einstellung	Temperatur Normalthermometer / rel. Feuchte Normalhygrometer								
	1 (Ref.-Ort)	2	3	4	5	6	7	8	9
25,0 °C									
97,0 %									
40,0 °C									
93,0 %									
55,0 °C									
20,0 %									
85,0 °C									
85,0 %									

Ergebnisse zur Charakterisierung des Nutzvolumens:

Regler-einstellung	Inhomogenität	Instabilität	Strahlungs-einfluss	Beladungs-einfluss
25,0 °C				
97,0 %				
40,0 °C				
93,0 %				
55,0 °C				
20,0 %				
85,0 °C				
85,0 %				

Die Temperatur- und Feuchtemesswerte sind Mittelwerte aus Mehrfachmessungen. Die angegebenen Gastemperaturen wurden mit einem Thermometer mit einem Emissionsgrad $\varepsilon < 0,15$ ermittelt. Der verbleibende Strahlungseffekt wurde nicht korrigiert, sondern in der angegebenen Messunsicherheit berücksichtigt. Die angegebenen Beiträge zur Charakterisierung des Volumens stellen die maximalen Variationsbereiche der Temperatur bzw. Feuchte unter den angegebenen Messbedingungen dar. Die Kalibrierung erfolgte in Luft.

Die angegebenen Ergebnisse gelten nur für das von den Messorten aufgespannte Nutzvolumen des Klimaschranks. Alle anderen Teile des Innenraumvolumen gelten nicht als kalibriert.

Die Messergebnisse gelten für den Zustand des oben aufgeführten Kalibriergegenstandes zum Zeitpunkt der Kalibrierung und nur für die angegebenen Kalibrierpunkte.

Die Gastemperatur bzw. Gasfeuchte ergeben sich nach den Beziehungen:

Gastemperatur = Temperaturanzeige - Anzeigeabweichung

Gasfeuchte = Feuchteanzeige - Anzeigeabweichung

Bitte beachten Sie auch den Hinweis zum Einsatz von Klimaschränken auf beigefügtem Informationsblatt.

Messunsicherheit

Die Messunsicherheiten für die Temperaturen und relativen Feuchten wurden aus den Unsicherheiten von der Kalibrierung der Normale, der eingesetzten Messverfahren und der untersuchten Eigenschaften des Klimaschranks bestimmt.

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: 2022 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Anhang B3 Musterkalibrierschein für die Kalibrierung nach Methode (D)
Messergebnisse

Regler-einstellung	Anzeige Kalibrier-gegenstand	Temperatur Normal am Referenzort	Anzeige-abweichung	Anzeige-korrektur	Messun-sicherheit
25,0 °C					
40,0 °C					

Weitere Untersuchungsergebnisse: Räumliche Verteilung

Regler-einstellung	Temperatur Normalthermometer		
	1 (Ref.-Ort)	2	3
25,0 °C			
40,0 °C			

Ergebnisse zur Charakterisierung des Nutzvolumens:

Regler-einstellung	Inhomogenität	Instabilität	Strahlungs-einfluss	Beladungs-einfluss
25,0 °C				
40,0 °C				

Die Temperaturwerte sind Mittelwerte aus Mehrfachmessungen. Die angegebenen Gastemperaturen wurden mit einem Thermometer mit einem Emissionsgrad $\varepsilon < 0,15$ ermittelt. Der verbleibende Strahlungseffekt wurde nicht korrigiert, sondern in der angegebenen Messunsicherheit berücksichtigt. Die angegebenen Beiträge zur Charakterisierung des Nutzvolumens stellen die maximalen Variationsbereiche der Temperatur unter den angegebenen Messbedingungen dar. Die Kalibrierung erfolgte in Luft.

Die angegebenen Ergebnisse gelten nur für das Nutzvolumen des Klimaschranks, welches durch die räumlich diagonal angeordneten Messorte (Raumdiagonale) definiert wird. Die Anordnung der Fühlerpositionen im Nutzvolumen ist der Skizze zu entnehmen. Alle anderen Teile des Innenraumvolumen gelten nicht als kalibriert.

Die Messergebnisse gelten für den Zustand des oben aufgeführten Kalibriergegenstandes zum Zeitpunkt der Kalibrierung und nur für die angegebenen Kalibrierpunkte.

Die Gastemperatur ergibt sich nach der Beziehung:

$$\text{Gastemperatur} = \text{Temperaturanzeige} - \text{Anzeigeabweichung}$$

Bitte beachten Sie auch den Hinweis zum Einsatz von Klimaschränken auf beigefügtem Informationsblatt.

Messunsicherheit

Die Messunsicherheiten für die Temperaturen und relativen Feuchten wurden aus den Unsicherheiten von der Kalibrierung der Normale, der eingesetzten Messverfahren und der untersuchten Eigenschaften des Klimaschranks bestimmt. 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: 2022 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Anhang C Musterkalibrierschein für die Kalibrierung eines Messortes nach Methode (C)

Messergebnisse

Gastemperatur:

Regler-einstellung rel. Feuchte in %	Regler-einstellung Temperatur in °C	Temperatur Normal im Messort in °C	Temperatur- anzeige Kalibrier- gegenstand in °C	Anzeige- abweichung in K	Messun- sicherheit in K

Gasfeuchte:

Regler-einstellung Temperatur in °C	Regler-einstellung rel. Feuchte in %	rel. Feuchte Normal im Messort in %	Anzeige der rel. Feuchte Kalibrier- gegenstand in %	Anzeige- abweichung rel. Feuchte in %	Messun- sicherheit rel. Feuchte in %

Weitere Untersuchungsergebnisse zur Charakterisierung der Bedingungen am Messort:

Temperatur Regler- einstellung rel. Feuchte in %	Regler- einstellung Temperatur in °C	Lokale Inhomogenität in K	Instabilität in K	Strahlungs- einfluss in K	Beladungs- einfluss in K

rel. Feuchte Regler- einstellung Temperatur in °C	Regler- einstellung rel. Feuchte in %	Lokale Inhomogenität in %	Instabilität in %	Beladungs- einfluss in %

Die Temperatur- und Feuchtemesswerte sind Mittelwerte aus Mehrfachmessungen. Die angegebenen Gastemperaturen wurden mit einem Thermometer mit einem Emissionsgrad $\varepsilon < 0,15$ ermittelt. Der verbleibende Strahlungseffekt wurde nicht korrigiert, sondern in der angegebenen Messunsicherheit berücksichtigt. Die angegebenen Beiträge zur Charakterisierung der Bedingungen

am Messort stellen die maximalen Variationsbereiche der Temperatur bzw. Feuchte unter den angegebenen Messbedingungen dar.

Die Kalibrierung erfolgte in Luft.

Die angegebenen Ergebnisse gelten nur für den Messort bzw. das Volumen eines Würfels von maximal 5 cm Kantenlänge, in dessen Zentrum der Messort liegt. Alle anderen Teile des Innenraumvolumens gelten nicht als kalibriert.

Die Messergebnisse gelten für den Zustand des oben aufgeführten Kalibriergegenstandes zum Zeitpunkt der Kalibrierung und nur für die angegebenen Kalibrierpunkte.

Die Gastemperatur bzw. Gasfeuchte am Messort ergeben sich nach den Beziehungen:

Gastemperatur = Temperaturanzeige - Anzeigeabweichung

Gasfeuchte = Feuchteanzeige - Anzeigeabweichung

Bitte beachten Sie auch den Hinweis zum Einsatz von Klimaschränken auf beigefügtem Informationsblatt

Messunsicherheit

Die Messunsicherheiten für die Temperaturen und relativen Feuchten wurden aus den Unsicherheiten von der Kalibrierung der Normale, der eingesetzten Messverfahren und der untersuchten Eigenschaften des Klimaschranks bestimmt.

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: 2022 ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

Anhang D Beiblatt zum Kalibrierschein für Klimaschränke

Hinweis zur Kalibrierung und zum Einsatz von Klimaschränken

Allgemeines

Die Kalibrierung gilt ohne weitere Angaben im Kalibrierschein nur für die Gastemperatur und/oder Gasfeuchte im leeren Nutzvolumen des Klimaschranks.

Bei anderen als den jeweils angegebenen Messbedingungen ist mit teilweise erheblichen Abweichungen (bis zu mehreren Kelvin) zum Kalibrierwert zu rechnen.

Strahlungseinflüsse

Beim Einsatz der Klimaschränke im Temperaturbereich oberhalb der Raumtemperatur haben bei vielen Modellen die Wände eine niedrigere Temperatur als das Gas. Auf Grund von Strahlungsverlusten ist in diesen Fällen die Gastemperatur höher als die Temperatur eines Thermometers oder Prüfobjektes im Nutzvolumen.

Ebenso können erhebliche Temperaturunterschiede zwischen der Temperatur des Thermometers und der Temperatur eines Gegenstandes (→ „Objekt im Nutzvolumen“) im Klimaschrank auftreten. Speziell dann, wenn das Emissionsvermögen bzw. der Emissionsgrad (ε) des Gegenstandes nicht mit dem des Thermometers übereinstimmt, sind in der Regel große Unterschiede zu erwarten.

Aufgrund des Strahlungsgesetzes vergrößert sich der Einfluss dieses Effektes bei höheren Temperaturen überproportional. Unterhalb der Raumtemperatur kehrt sich das Vorzeichen des Strahlungseinflusses um, jedoch ist die Auswirkung deutlich kleiner und oft vernachlässigbar.

Je nach Modell des Klimaschranks sind oberhalb von 150 °C Unterschiede von mehreren Kelvin möglich.

Objekt im Nutzvolumen

Objekte im Nutzvolumen werden im Allgemeinen nicht die Gastemperatur annehmen, die bei der Kalibrierung vorherrschte, weil

- 1) die Bedingungen der Beladung, sofern sie bei der Kalibrierung nicht exakt nachgebildet wurden, das Temperaturfeld im Nutzvolumen beeinflussen und verändern,
- 2) Position, Größe und Material des Objektes im Allgemeinen nicht mit den Eigenschaften des Thermometers übereinstimmen, welches zur Kalibrierung des Klimaschranks genutzt wurde und
- 3) das Objekt qualitativ, jedoch nicht quantitativ, vergleichbaren → Strahlungseinflüssen unterworfen ist, wie ein Thermometer.

Relative Feuchte im Nutzvolumen

Die Verteilung der relativen Feuchte im Nutzvolumen kann wesentlich verändert werden, wenn im Nutzvolumen Quellen oder Senken für Wasserdampf vorhanden sind, eine wirksame Durchmischung des Nutzvolumens nicht gewährleistet ist oder durch Undichtigkeiten Gasaustausch mit der Umgebung stattfinden kann.

Messunsicherheit

Die angegebene Messunsicherheit gilt nur bei Einhaltung der jeweils dokumentierten Messbedingungen. Sie gilt für die Temperatur- bzw. Feuchteanzeige des Klimaschranks bezogen auf die Temperatur bzw. relative Feuchte des Gases im Klimaschrank an einer definierten Position bzw. für ein definiertes Volumen.

Nur bei gleichem Beladungszustand, Messort(en) bzw. Nutzvolumen und ähnlichen Thermometereigenschaften ($\varepsilon < 0,2$) kann der Kalibrierwert innerhalb der angegebenen Messunsicherheit reproduziert werden.

Der Strahlungseffekt des verwendeten Normals, bezogen auf den hier kalibrierten Klimaschrank, wurde ermittelt und in der Messunsicherheit berücksichtigt. Eine Korrektur des Effektes fand nicht statt, es sei denn, es ist im Kalibrierschein ausdrücklich vermerkt.

Anhang E Zusatzinformationen für den Einsatz von Klimaschränken im Rahmen der metrologischen Rückführbarkeit

Beim Einsatz von Klimaschränken in Prüf- oder Kalibrierverfahren erfolgt die Kalibrierung der Klimaschränke zur Erfüllung der Forderungen nach metrologischer Rückführbarkeit.

Hier anzusetzende Anforderungen

- Kalibrierintervall und Kalibriermethoden
- Kalibrierpunkte und –umfang
- Bewertungskriterien

ergeben sich aus den Anforderungen des Prüf- oder Kalibrierverfahrens und hierbei insbesondere aus der Abschätzung des Risikos und der Auswirkungen von Abweichungen größer als die ange-setzte Messunsicherheit für die jeweilige Anwendung.

Allgemeingültige Vorgaben können hier nicht getroffen werden! Es sind aber die zutreffenden Richt-linien der DKD-R-5-Reihe zu beachten.

Grundsätzlich gilt:

- Die Forderungen nach Rückführung des Klimaschranks als Ganzes entfallen, wenn während der Prüfung / Kalibrierung mit rückgeführten Thermometern und Hygrometern am Ort der Prüfung / Kalibrierung (in-situ) Gastemperatur und Gasfeuchte gemessen werden. In diesem Falle müssen jedoch die ansonsten in der Kalibrierung enthaltenen wesentlichen Beiträge zur Messunsicherheit zusätzlich ermittelt und betrachtet werden (Inhomogenität, Instabilität, Strahlung, Beladung, ...). Es empfiehlt sich daher ein Messsystem mit einer ausreichenden Zahl von Thermometern (Bestimmung der Inhomogenität) und Zeitauflösung (Bestimmung der Instabilität) sowie passendem Emissionsgrad einzusetzen. Hierfür können dann geeignete Nachweise vom Anwender definiert werden. Handreichungen für die Festlegung des Umfangs und von Wiederholungen liefern die entsprechenden Kapitel dieser Richtlinie. Diese Verfahrensweise empfiehlt sich, insbesondere wenn große Bereiche, stark wechselnde Beladungen o. ä. vorliegen.
- Für die Charakterisierung sind die Anforderungen aus den Richtlinien DKD-R 5-1 und DKD-R 5-8 zu berücksichtigen.
- Wenn die Rückführung als Ganzes erforderlich ist, dann stellt häufig die Methode der Reduktion des Nutzvolumens auf einen Bruchteil des Innenraumvolumens ggf. mit Verwendung zusätzlicher Strahlungsschirme und Luftleiteinrichtungen eine Möglichkeit zur Erhöhung der Stabilität und Reproduzierbarkeit der Verhältnisse im Nutzvolumen dar. Auf dieses angepasste Nutzvolumen sind alle Punkte der Richtlinie in vollem Umfang anwendbar. Die im Allgemeinen resultierende Verringerung der Messunsicherheitsbeiträge führt zu einer Erhöhung der Reproduzierbarkeit und Stabilität der Kalibrierergebnisse und ermöglicht in der Folge Erleichterungen bei der Risikoabschätzung.
- Verlängerungen von Rückführungs- bzw. Untersuchungsintervallen erfordern immer den Nachweis der Zulässigkeit und die Überwachung der Einhaltung der zugrundeliegenden Voraussetzungen. Hier sind Methoden von Zwischenprüfungen, Eignungsprüfungen und Vergleichsmessungen sowie ggf. weitere qualitätssichernde Maßnahmen anzuwenden. Kalibrierungen nach Methode (C) am Referenzmessort und an mindestens dem jeweiligen Messort, bei dem nach Methode (A), (B) oder (D) bei der Kalibrierung die Extrembeiträge der Messunsicherheit gefunden wurden, können hier z. B. sinnvolle Zwischenprüfungen dar-stellen. Dabei sind zumindest die Kalibrierpunkte die am weitesten von den zulässigen Umgebungsbedingungen abweichen (Maximum und Minimum) zu untersuchen. Eine Risiko-abschätzung ist erforderlich!
- Bezüglich der Auswirkungen möglicher Driften der Klimaschränken internen Temperatur- und Feuchtemesstechnik sind die Anforderungen aus den jeweiligen Kalibrier Richtlinien für Thermometer und Hygrometer zu beachten.

Es liegt in der Verantwortung des Anwenders (einsetzendes Prüf- oder Kalibrierlabor) basierend auf seinen Risikoabschätzungen sachgerechte und nachweisbare Regelungen zu treffen.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de