

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



DKD

**Directriz
DKD-R 5-8**

**Calibración de higrómetros para la
medición directa de la humedad
relativa**

Edición 08/2019

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



| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 2 / 80 |

Deutscher Kalibrierdienst (DKD) - Servicio Alemán de Calibración

Constituido en 1977, el DKD reúne a laboratorios de calibración de empresas industriales, de institutos de investigación, de autoridades técnicas, así como de instituciones de inspección y ensayo. El 3 mayo de 2011, se realizó la constitución del nuevo DKD como *Organismo Técnico* del PTB y de los laboratorios acreditados.

Este organismo técnico, o sea gremio, se denomina *Deutscher Kalibrierdienst* (DKD – Servicio Alemán de Calibración) y está bajo la dirección del PTB. Las directrices y guías elaboradas por el DKD representan el estado de la técnica en los respectivos campos técnicos y están a la disposición del organismo de acreditación alemán (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS)) para la acreditación de laboratorios de calibración.

Los laboratorios de calibración acreditados son acreditados y supervisados por la DAkkS como sucesora legal del organismo de acreditación del DKD. Realizan calibraciones de dispositivos de medición y de medidas materializadas para las magnitudes y rangos de medida establecidos durante la acreditación. Los certificados de calibración emitidos por estos laboratorios sirven como prueba de la trazabilidad a los patrones nacionales, tal como lo exige la familia de normas DIN EN ISO 9000 y la norma DIN EN ISO/IEC 17025.

Contacto:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
 Oficina del DKD
 Bundesallee 100 38116 Braunschweig
 Apartado de correos 33 45 38023 Braunschweig
 Teléfono Oficina DKD: 0049-531-592 8021
 Internet: www.dkd.eu

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 3 / 80 |

Sugerencia para citar la fuente:

Directriz DKD-R 5-8, Edición 08/2019, Revisión 0, Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig y Berlin. DOI: 10.7795/550.20190214ES

Edición original alemán:

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

Esta obra, incluyendo cada una de sus partes, está protegida por derechos del autor y está sujeta a la licencia de usuario Creative Commons CC by-nc-nd 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>). En este contexto, la expresión “no comercial” (NC) significa que la obra no debe ser distribuida o puesta a disposición del público con el fin de generar ingresos. La explotación de los contenidos para el uso comercial en laboratorios de calibración está expresamente permitida.



Autores:

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

Publicado por el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) para el Servicio Alemán de Calibración (DKD) como resultado de la colaboración del PTB con el Comité Técnico *Temperatura y Humedad* del DKD.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 4 / 80 |

Prefacio

Las Directrices del DKD son documentos de uso o aplicación en conformidad con los requisitos de la norma DIN EN ISO/IEC 17025. Las Directrices describen procesos técnicos, de procedimiento y de organización que sirven a los laboratorios de calibración acreditados como modelo para el establecimiento de procedimientos y reglamentos internos. Las Directrices del DKD pueden formar parte de los manuales de gestión de la calidad de los laboratorios de calibración. La implementación de las directrices garantiza que los dispositivos que han de ser calibrados se traten de forma igual en los distintos laboratorios de calibración y ayuda a mejorar la continuidad y la verificabilidad del trabajo de los laboratorios de calibración.

Las Directrices del DKD no deben impedir la continuidad del desarrollo de los métodos y de los procesos de calibración. Cuando existen motivos técnicos que lo justifiquen y de acuerdo con el organismo de acreditación, se permiten desviaciones respecto de las Directrices, así como la aplicación de métodos nuevos.

Las calibraciones realizadas por laboratorios acreditados proporcionan al usuario la seguridad de obtener resultados de medición fiables, aumentan la confianza de los clientes y la competitividad en el mercado nacional e internacional. Además, sirven de base metrológica para el control de los equipos de medición y ensayo en el marco de las medidas de control de calidad.

La presente Directriz fue elaborada por el Comité Técnico *Temperatura y Humedad* y aprobada por la junta directiva del DKD.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 5 / 80 |

Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Objetivo y ámbito de aplicación | 8 |
| 2 | Definiciones..... | 8 |
| 3 | Símbolos | 11 |
| 3.1 | Variables | 11 |
| 3.2 | Índices..... | 12 |
| 4 | Objetivo de la calibración | 13 |
| 5 | Patrones de referencia y patrones de trabajo | 13 |
| 5.1 | Generador de humedad de 2 presiones / 2 temperaturas | 14 |
| 5.1.1 | Principio de funcionamiento | 14 |
| 5.1.2 | Exigencias..... | 15 |
| 5.1.3 | Magnitudes de influencia..... | 16 |
| 5.2 | Generador de humedad de 2 presiones | 17 |
| 5.2.1 | Principio de funcionamiento | 17 |
| 5.2.2 | Exigencias..... | 17 |
| 5.2.3 | Magnitudes de influencia..... | 18 |
| 5.3 | Higrómetro de punto de rocío | 19 |
| 5.3.1 | Principio de funcionamiento | 19 |
| 5.3.2 | Exigencias..... | 19 |
| 5.3.3 | Magnitudes de influencia..... | 20 |
| 5.4 | Psicrómetros | 22 |
| 5.4.1 | Principio de funcionamiento | 22 |
| 5.4.2 | Exigencias..... | 22 |
| 5.4.3 | Magnitudes de influencia..... | 22 |
| 5.5 | Sensor de humedad relativa..... | 24 |
| 5.5.1 | Principio de funcionamiento | 24 |
| 5.5.2 | Exigencias..... | 24 |
| 5.5.3 | Magnitudes de influencia..... | 25 |
| 5.6 | Higrómetros mecánicos..... | 26 |
| 5.7 | Soluciones salinas | 26 |
| 5.8 | Temperatura del gas | 27 |
| 5.8.1 | Exigencias..... | 27 |
| 5.8.2 | Magnitudes de influencia..... | 27 |
| 5.9 | Ecuaciones de cálculo..... | 29 |
| 5.10 | Señales analógicas | 29 |
| 6 | Dispositivo de calibración | 30 |
| 6.1 | Grupos de dispositivos | 30 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.1.1 | Generador de humedad de presión / de temperatura..... | 30 |
| 6.1.2 | Armario climatizado..... | 30 |
| 6.1.3 | Generador de gas mixto..... | 30 |
| 6.1.4 | Solución salina..... | 30 |
| 6.2 | Magnitudes de influencia..... | 31 |
| 6.2.1 | Falta de homogeneidad espacial..... | 31 |
| 6.2.2 | Inestabilidad temporal..... | 32 |
| 6.2.3 | Influencia de la radiación..... | 32 |
| 6.2.4 | Diferencias de presión..... | 33 |
| 6.2.5 | Condiciones de flujo..... | 33 |
| 6.2.6 | Reacciones..... | 33 |
| 7 | Objetos de calibración electrónicos..... | 34 |
| 7.1 | Tipos de dispositivos..... | 34 |
| 7.1.1 | Elemento sensor..... | 34 |
| 7.1.2 | Conversión de medida..... | 34 |
| 7.2 | Aptitud a ser calibrado..... | 34 |
| 7.2.1 | Prueba de funcionamiento..... | 34 |
| 7.2.2 | Tratamiento previo..... | 35 |
| 7.3 | Embalaje..... | 35 |
| 7.4 | Magnitudes de influencia..... | 35 |
| 7.4.1 | Valor medio..... | 35 |
| 7.4.2 | Resolución..... | 35 |
| 7.4.3 | Calentamiento propio..... | 35 |
| 7.4.4 | Acoplamiento térmico..... | 36 |
| 7.4.5 | Histéresis..... | 36 |
| 7.4.6 | Influencias de las condiciones ambientales..... | 36 |
| 7.4.7 | Señales analógicas..... | 36 |
| 8 | Objetos de calibración mecánicos..... | 37 |
| 8.1 | Tipos de dispositivos..... | 37 |
| 8.1.1 | Elemento medidor..... | 37 |
| 8.2 | Aptitud a ser calibrado..... | 37 |
| 8.2.1 | Prueba de funcionamiento..... | 37 |
| 8.2.2 | Tratamiento previo..... | 37 |
| 8.3 | Magnitudes de influencia..... | 38 |
| 8.3.1 | Valor medio..... | 38 |
| 8.3.2 | Graduación de la escala..... | 38 |
| 8.3.3 | Acoplamiento térmico..... | 38 |

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 7 / 80 |

| | | |
|--|--|----|
| 8.3.4 | Histéresis | 38 |
| 8.3.5 | Repetibilidad | 38 |
| 9 | Procedimiento de calibración | 39 |
| 9.1 | Preparativos | 39 |
| 9.2 | Instalación en el dispositivo de calibración | 39 |
| 9.3 | Secuencia de calibración | 40 |
| 9.3.1 | Secuencia A1 | 41 |
| 9.3.2 | Secuencia A2 | 42 |
| 9.3.3 | Secuencia B1 | 43 |
| 9.3.4 | Secuencia B2 | 44 |
| 9.3.5 | Secuencia C1 | 45 |
| 9.3.6 | Secuencia C2 | 46 |
| 9.3.7 | Secuencia D | 46 |
| 9.4 | Tiempo de ajuste | 47 |
| 9.4.1 | Método propuesto para determinar el tiempo de ajuste | 48 |
| 10 | Condiciones ambientales | 49 |
| 11 | Certificado de calibración | 49 |
| 11.1 | Resultado de calibración – Ejemplo | 49 |
| 12 | Bibliografía | 50 |
| Apéndice A Balances de incertidumbre – Ejemplos | | 51 |
| Calibración en un armario climatizado | | 51 |
| Profundidad de montaje | | 51 |
| Paso 1: Temperatura del gas | | 52 |
| Paso 2: Temperatura del punto de rocío | | 55 |
| Paso 3: Cálculo de la humedad relativa | | 58 |
| Paso 4: Resultado de calibración | | 59 |
| Calibración en un generador de gas mixto | | 61 |
| Profundidad de montaje | | 61 |
| Paso 1: Valor de referencia de la humedad en el generador de gas mixto | | 62 |
| Paso 2: Resultado de calibración | | 66 |
| Calibración en un generador de humedad de dos presiones | | 68 |
| Profundidad de montaje | | 68 |
| Paso 1: Patrón de referencia | | 69 |
| Paso 2: Resultado de calibración | | 71 |
| Apéndice B Modelos del certificado de calibración (extractos) | | 73 |
| Apéndice C Informaciones sobre el acoplamiento térmico | | 76 |
| Apéndice D Información sobre los sensores electrónicos de humedad | | 77 |

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 8 / 80 |

1 Objetivo y ámbito de aplicación

El objetivo de la presente Directiva es establecer requisitos mínimos para el patrón de referencia, el equipo de calibración, los procedimientos de calibración y la estimación de la incertidumbre de medida en la calibración de higrómetros. Se aplica a los objetos de calibración de medición directa de la humedad relativa del gas a través de sensores resistivos, capacitivos, resistivos-electrolíticos y mecánicos. Según lo definido en esta directriz, la humedad del gas implica los sistemas de materiales gaseosos compuestos por los componentes agua y gas portador. El ámbito de aplicación de la Directiva abarca los gases portadores aire y nitrógeno. En el caso de otros gases portadores, la aplicación ha de comprobarse.

En el caso de que la temperatura del gas se debe calibrar paralelamente a la humedad, las directrices DKD-R 5-1 [1] o DKD-R 5-3 [2] se aplican a las calibraciones de temperatura, dependiendo del elemento sensor.

2 Definiciones

Los términos y definiciones utilizados en la presente directriz se basan en la directriz VDI/VDE 3514 Hoja 1 [3] / Hoja 2 [4]. Se puede distinguir entre sustancias puras (denominadas “fase pura” en VDI/VDE 3514 Hoja 1 [3]) compuesto por un componente (sistema de un solo componente), por ejemplo, agua, y mezclas (sistemas de mezcla de gases) compuestos por varios componentes (sistemas multicomponentes), por ejemplo, aire húmedo. El sistema puede ser monofásico, p. ej. gaseoso, o tener varias fases, p. ej. gaseoso y líquido.

Humedad del aire y humedad del gas

La humedad del aire describe el contenido en vapor de agua o la cantidad de vapor de agua en el aire húmedo. En la práctica, se utilizan diferentes parámetros en función de la aplicación y los requisitos. En la guía DKD-L 5-1 [5] encontrará una lista de diferentes fórmulas de cálculo para los parámetros de humedad y sus incertidumbres. En analogía a la humedad del aire, se habla de la humedad del gas cuando uno se refiere a otros gases portadores, como por ejemplo el nitrógeno.

Gas ideal

Una sustancia pura (sistema de un solo componente) o una mezcla de varios componentes (sistema multicomponente) se comporta como un gas ideal si cada componente individual se comporta como un gas ideal. Tanto los componentes individuales como el sistema completo (mezcla) se pueden describir con la ley del gas ideal.

Presión del vapor de agua

La presión proporcional (presión parcial) del agua en la fase gaseosa en la presión del gas p en la fase pura (sistema de un solo componente, sustancia pura) o en un gas ideal o una mezcla de gases se designa según VDI/VDE 3514 Blatt 1 [3] con la presión de vapor de agua e .

Presión de vapor saturado en fase pura

La presión de vapor saturado en fase pura describe la presión que se produce en el equilibrio de fase en un sistema cerrado con agua (e_w , caso a) en la Figura 1) o con hielo (e_i , caso b) en la Figura 1) en ausencia de otros componentes (sistema monocomponente, sustancia pura) a una temperatura t dada. En este caso, la presión del vapor de agua e es igual a la presión de vapor saturado en la fase pura e igual a la presión de gas p . La presión de vapor saturado en fase pura se puede medir directamente y solo depende de la temperatura t . La relación funcional entre la presión de vapor saturado y la temperatura se denomina ecuación de presión de vapor.

A temperaturas inferiores a 0,01 °C, ambos estados son posibles: presión de vapor saturado sobre hielo o sobre agua. En este caso, la presión de vapor de saturación es ligeramente superior encima del agua que encima del hielo.

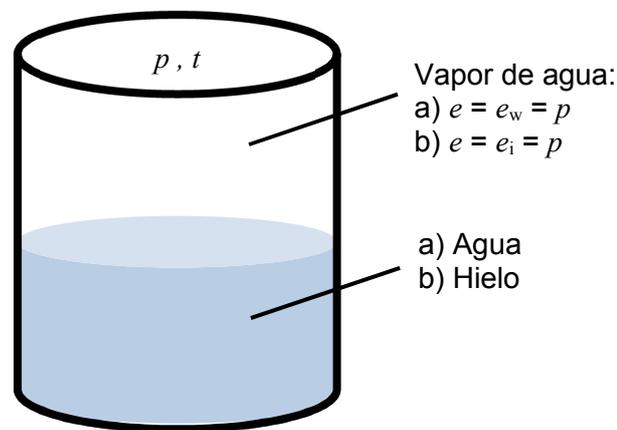


Figura 1: Esquema de la presión de vapor saturado

Gas real

Si, por ejemplo, un componente en fase pura (sistema de un solo componente) o una mezcla de varios componentes no se comportan como un gas ideal, p. ej. debido a diferentes interacciones entre los componentes, se producen desviaciones del comportamiento ideal del gas. Como criterio de distinción para la desviación del comportamiento ideal, los símbolos de las cantidades correspondientes en el gas real o en las mezclas de gases están marcados con un apóstrofe (por ejemplo, $e \rightarrow e'$).

Presión parcial de vapor de agua

Según la directriz VDI/VDE 3514 [3], la presión parcial de vapor de agua e' es la presión parcial del agua en la fase gaseosa en un gas real o en una mezcla de gases.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 10 / 80 |

Presión de vapor saturado en una mezcla

Debido, por ejemplo, a las interacciones entre los distintos componentes en una mezcla de gases real (por ejemplo, aire húmedo), se observan diferencias en comparación con el comportamiento del componente como sustancia pura (por ejemplo, agua). Estas diferencias pueden tomarse en cuenta utilizando el llamado factor de mejora f . Este factor se calcula a partir de la temperatura del gas t , la presión del gas p y la presión de vapor saturado en fase pura, e_w o e_i . Así, la presión de vapor de saturación en la mezcla encima del agua e'_w y encima del hielo e'_i se determina a través de las siguientes relaciones¹:

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

o

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

Temperatura de punto de congelación / Temperatura de punto de rocío

Si una mezcla de gases húmeda, p. ej. aire húmedo, se enfría isobáricamente, habrá condensación (a la temperatura del punto de rocío t_d) o bien formación de escarcha (a la temperatura del punto de congelación t_f). A este punto, la presión parcial de vapor de agua es igual a la presión de vapor saturado. La presión parcial de vapor de agua e' puede calcularse a partir del punto de rocío o de la temperatura del punto de congelación con la ecuación de la presión de vapor y el factor de mejora f utilizando las siguientes ecuaciones:

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

o

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

Humedad relativa

La humedad relativa indica la relación entre la presión parcial de vapor de agua e' y la presión de vapor saturado e'_w , como porcentaje², por ejemplo, $U_w = 75 \%$.

Por encima de $0 \text{ }^\circ\text{C}$, y según la definición de la WMO (Organización Meteorológica Mundial; WMO por sus siglas en inglés) también por debajo de $0 \text{ }^\circ\text{C}$, la humedad relativa se refiere a la saturación sobre el agua e'_w :

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

Por el contrario, según la definición técnica, la humedad relativa a temperaturas inferiores a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ está relacionada con la saturación sobre hielo e'_i :

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

Para calibraciones por debajo de $0 \text{ }^\circ\text{C}$, la definición de la humedad relativa debe indicarse de acuerdo con la indicación del objeto a calibrar (U_i , U_w). Alternativamente, la especificación puede hacerse de acuerdo con la WMO (en relación con el agua), siempre que no existan

¹ Al utilizar fórmulas de cálculo concretas para la presión de vapor de saturación en fase pura, así como el factor de mejora, se debe tener en cuenta la unidad correcta de las variables de entrada al aplicar ecuaciones de valor numérico; por ejemplo, puede ser que se ha de utilizar la temperatura del gas T en K en vez de la temperatura del gas t in $^\circ\text{C}$.

² La humedad relativa es una relación sin dimensiones con las variables U , U_i , U_w y $U_{w,\text{hyp}}$ que normalmente se indica como porcentaje (%). Otros prefijos o sufijos (por ejemplo, % rh o % r.F.) no son obligatorios, pero pueden utilizarse para fines de aclaración.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 11 / 80 |

otras especificaciones por parte del cliente. Si la presión de vapor saturado supera la presión del gas (por ejemplo, a 1013,25 hPa y 99,974 °C), ya no puede alcanzarse una humedad relativa del 100 % (sin aumentar la presión). En este caso, la humedad relativa se indica como relación entre la presión parcial de vapor de agua, que no puede superar la presión del gas, y una presión hipotética del sistema a la que sería posible la saturación con vapor de agua (presión superior a la presión del gas). En caso de saturación, la mezcla de gases húmeda sólo contiene vapor de agua (presión de vapor saturado = presión del gas) y, por lo tanto, es monofásica (sustancia pura). Por consiguiente, no hace falta corregir la presión de vapor saturado. El valor de referencia para la humedad relativa es, por lo tanto, la presión de vapor saturado en la fase pura. La humedad relativa es el resultado de la relación:

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

Debido a la dependencia de la humedad relativa de la temperatura del gas t , la temperatura y sus influencias térmicas deben considerarse – de manera análoga a las influencias de la humedad – en la calibración y el cálculo de la incertidumbre de medida.

Si, por ejemplo, la humedad relativa no se mide directamente – a diferencia de un sensor de polímero capacitivo – sino se determina según las ecuaciones (5), (6) o (7), hay que tener en cuenta que la presión parcial de vapor de agua e' no se puede medir directamente. Sin embargo - y tal como se describe, por ejemplo, en el Capítulo 5.3 de la presente directriz - la presión parcial de vapor de agua puede medirse indirectamente determinando el punto de rocío mediante un higrómetro de punto de rocío y determinarse mediante las relaciones siguientes:

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

o

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

La presión parcial de vapor de agua e' es igual a la presión de vapor saturado a la temperatura del punto de rocío t_d (capa de rocío) o a la temperatura del punto de congelación t_f (capa de escarcha) medida con el higrómetro de punto de rocío y con la presión p_M que predomina en el espejo p_M .

3 Símbolos

3.1 Variables

| Variable | Denominación | Unidad |
|----------|---|--------|
| e | Presión del vapor de agua | hPa |
| e' | Presión parcial de vapor de agua | hPa |
| e_i | Presión de vapor saturado en fase pura encima del hielo | hPa |
| e'_i | Presión de vapor saturado en la mezcla (por ejemplo, aire húmedo) encima del hielo | hPa |
| e_w | Presión de vapor saturado en fase pura encima del agua | hPa |
| e'_w | Presión de vapor saturado en la mezcla (por ejemplo, aire húmedo) encima del agua | hPa |
| e'_C | Presión parcial de vapor de agua en la cámara de calibración | hPa |
| e'_M | Presión parcial de vapor de agua encima del espejo del higrómetro de punto de rocío | hPa |
| f_i | Factor de intensificación para el hielo | 1 |

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 12 / 80 |

| | | |
|---------------|---|----------------|
| f_w | Factor de intensificación para el agua | 1 |
| U | Humedad relativa ³ | 1 ⁴ |
| U_i | Humedad relativa en relación con hielo | 1 ⁴ |
| U_w | Humedad relativa en relación con agua | 1 ⁴ |
| $U_{w,hyp}$ | Humedad relativa en relación con agua y una presión hipotética del sistema | 1 ⁴ |
| T o t | Temperatura del gas | K o °C |
| T_d o t_d | Temperatura del punto de rocío | K o °C |
| T_f o t_f | Temperatura del punto de congelación | K o °C |
| T_i o t_i | Temperatura húmeda de una superficie helada | K o °C |
| T_w o t_w | Temperatura húmeda de una superficie húmeda | K o °C |
| T_C o t_C | Temperatura de la cámara de calibración | K o °C |
| T_S o t_S | Temperatura del dispositivo de saturación (saturador) | K o °C |
| p | Presión del gas (presión absoluta) | hPa |
| p_C | Presión del gas (presión absoluta) en la cámara de calibración | hPa |
| p_S | Presión del gas (presión absoluta) en el dispositivo de saturación (saturador) | hPa |
| p_M | Presión del gas (presión absoluta) en el espejo del higrómetro del punto de rocío | hPa |
| ε | Emisividad (ver influencia de la radiación) | 1 |

Tabla 1: Resumen de las variables utilizadas

3.2 Índices

| Índices | Denominación |
|---------|---|
| ' | (Apóstrofe) denota gas real o mezcla de gases |
| d | Punto de rocío |
| f | Punto de congelación |
| i | sobre hielo |
| w | sobre agua |
| hyp | Estado hipotético |
| C | Cámara de calibración |
| M | Espejo del higrómetro de punto de rocío |
| S | Dispositivo de saturación (saturador) |

Tabla 2: Resumen de los índices utilizados

³ La variable U de la humedad relativa no debe confundirse con la variable U de la incertidumbre expandida de medida. El significado de las variables utilizadas debe ser verificado individualmente en cada caso.

⁴ La humedad relativa es una relación sin dimensiones que normalmente se indica como porcentaje (%).

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 13 / 80 |

4 Objetivo de la calibración

La calibración de un higrómetro para la medición directa de la humedad relativa sirve para determinar la desviación de la medición de la humedad relativa del gas con respecto al valor de calibración (valor prescrito) que se ha determinado o representado mediante patrones, indicándose la incertidumbre asociada, la condición de calibración y el procedimiento de calibración. Los resultados se documentan en un certificado de calibración.

5 Patrones de referencia y patrones de trabajo

Todos los patrones de referencia o de trabajo utilizados deben ser directa o indirectamente trazables a un patrón nacional. La calibración se llevará a cabo comparando directamente los valores medidos del objeto de calibración con los valores medidos o los valores indicados por el patrón de referencia o de trabajo.

Para visualizar o determinar la humedad relativa se utilizan diferentes métodos (véase también VDI/VDE 3514 Hoja 2 [4]).

Incertidumbres mínimas se pueden lograr con los llamados métodos primarios. Se realizan mediante generadores de humedad del tipo “2 presiones”, “2 temperaturas” o “2 presiones/2 temperaturas”. Estos generadores generan un flujo de gas húmedo definido y conocido que se traza a las mediciones de temperatura y presión.

Los higrómetros de punto de rocío y psicrómetros se utilizan como instrumentos de medición precisos y estables a largo plazo para la humedad del gas. La temperatura y la presión del gas son necesarias para calcular la humedad relativa.

La medición directa de la humedad relativa se realiza a través de sensores capacitivos de polímero o sensores resistivos-electrolíticos. En comparación con los métodos mencionados anteriormente, estos sensores son menos estables a largo plazo y requieren pruebas intermedias correspondientes.

Todos los factores de influencia deben registrarse con patrones de referencia o de trabajo calibrados, evaluarse y tomarse en cuenta en el cálculo de la incertidumbre de medida.

Para las mediciones de temperatura (por ejemplo, medición de la temperatura del gas, medición de la temperatura en un saturador, etc.), especialmente las influencias del acoplamiento térmico, del calentamiento propio y de la influencia de la radiación han de tenerse en cuenta.

Si la humedad relativa no se mide directamente sino se calcula utilizando los valores de temperatura y presión como, por ejemplo, en el caso de los generadores de humedad, se han de considerar la validez y las incertidumbres de las ecuaciones de cálculo utilizadas (véase DKD-L 5-1 [5]).

Dado que la humedad relativa depende de la temperatura, además de las influencias higrométricas, se deben tener en cuenta todas las influencias térmicas.

Para la evaluación del comportamiento a largo plazo, deberán llevarse registros de los patrones de referencia o de trabajo utilizados.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 14 / 80 |

5.1 Generador de humedad de 2 presiones / 2 temperaturas

5.1.1 Principio de funcionamiento

Un gas portador (por ejemplo, aire comprimido filtrado sin aceite ni polvo de un compresor o nitrógeno) sirve de base para la calibración en el generador de humedad de 2 presiones/2 temperaturas. Utilizando el ejemplo de un generador de humedad de 2 presiones/2 temperaturas que funciona con aire comprimido, se explica el modo de funcionamiento para la saturación sobre agua:

El aire comprimido, cuyo contenido de humedad suele ser inferior al punto de rocío deseado, pasa por agua caliente dentro de un humidificador (también conocido como dispositivo de presaturación o presaturador). El aire sale del humidificador casi saturado a la temperatura dada. A continuación, el aire húmedo es conducido al saturador (también llamado condensador). Se trata de un bloque metálico de fabricación especial con una gran superficie interior que se inserta, por ejemplo, en un termostato de precisión para regular la temperatura. La temperatura del saturador es inferior a la del humidificador. Durante el enfriamiento del aire húmedo a la temperatura del dispositivo de saturación, el exceso de agua es condensado. A la salida del dispositivo se encuentra, por lo tanto, aire completamente saturado relacionado a la temperatura t_s y la presión p_s del saturador. La presión del vapor de saturación $e_w(t_s)$ en la fase pura se calcula mediante la ecuación de presión del vapor (véase DKD-L 5-1 [5]). La presión del vapor de saturación del aire húmedo se obtiene mediante la multiplicación por el factor de mejora $f_w(p_s, t_s)$. Por regla general, este aire húmedo se descomprime en una válvula hasta alcanzar la presión ambiente y se conduce a la cámara de calibración. La presión parcial de vapor de agua se reduce en función del cociente entre la presión de la cámara de calibración p_c y la presión del dispositivo de saturación p_s . Siempre que la ecuación de la presión de vapor sea válida, la presión parcial de vapor de agua y, por lo tanto, la humedad absoluta, pueden trazarse a la medición de la temperatura del dispositivo de saturación, así como a la presión del dispositivo de saturación y a la presión del gas en la cámara de calibración. Variando los parámetros de temperatura y presión del saturador, se puede ajustar un amplio rango para la humedad del gas.

Además de la saturación sobre agua, también puede producirse una saturación sobre hielo. En este caso se utiliza un gas portador con un contenido de humedad inferior al valor que debe representarse. El gas se conduce sobre una capa de hielo en un bloque saturador especialmente fabricado; al salir del saturador, se obtiene de esta manera un estado saturado para la presión reinante y la temperatura en el saturador. De forma análoga a la saturación por encima del agua, la presión parcial de vapor de agua también puede determinarse a partir de la presión de vapor de saturación $e_i(t_s)$ sobre hielo y el correspondiente factor de mejora $f_i(p_s, t_s)$.

Para visualizar la humedad relativa, el objeto a calibrar se coloca en una cámara de calibración. A su vez, esta cámara de calibración se encuentra, por ejemplo, en una cámara de temperatura para poder regular la temperatura. El flujo de gas húmedo pasa a través de la cámara de temperatura por una construcción apropiada para asumir la temperatura de medición (que es la temperatura t_c) antes de entrar en la cámara de calibración. Después de haber ajustado el flujo de gas húmedo a la temperatura de medición en la cámara de calibración, se ajusta el valor de la humedad relativa. La humedad relativa se calcula a partir de las condiciones de temperatura y presión con la fórmula (10):

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

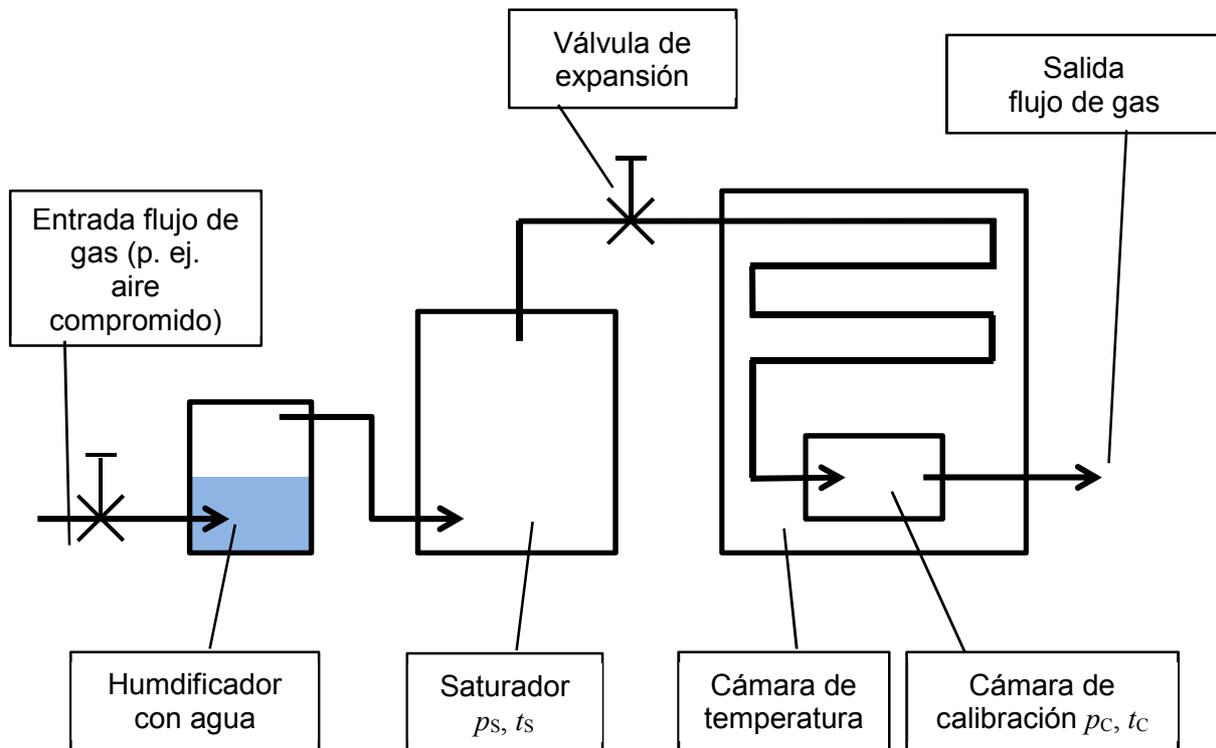


Figura 2: Esquema de un generador de humedad de 2 presiones y 2 temperaturas con saturación sobre agua

5.1.2 Exigencias

La pieza central del generador es el saturador. Su tarea es saturar el flujo de gas húmedo en un 100 % con vapor de agua. El funcionamiento fiable del saturador debe ser validado. Para el control de calidad continuo, se recomienda utilizar adicionalmente un higrómetro de punto de rocío como patrón de transferencia para poder comparar el punto de rocío o de congelación calculado a partir de los parámetros del generador con el punto de rocío o de congelación indicado por el higrómetro de punto de rocío. Deben definirse los criterios de intervención

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 16 / 80 |

5.1.3 Magnitudes de influencia

Además de las magnitudes de influencia de la cámara de calibración (véase Capítulo 6.2), de las mediciones de temperatura (véase Capítulo 5.8) y de la medición de presión (véase también DKD-R 6-1 [6]), se han de determinar las siguientes magnitudes de influencia que también deben ser incluidas en el presupuesto de incertidumbre:

Calibración

La incertidumbre de medida de los patrones utilizados para la medición de la presión del saturador y de la cámara de calibración, así como para la medición de la temperatura del saturador y de la cámara de calibración se encuentra en el certificado actual de calibración. Al calcular el resultado de calibración, hay que tener en cuenta los errores de medición. Los puntos de calibración de los respectivos patrones deben cubrir todo el rango de aplicación (sensores de presión en los respectivos rangos de presión del saturador y de la cámara de calibración, sensores de temperatura en los respectivos rangos de temperatura del saturador y de la cámara de calibración). La extrapolación no se permite.

Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

Resolución

Si para los cálculos se utiliza una resolución diferente a la resolución utilizada en la calibración del certificado de calibración, esta resolución ha de tomarse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Cálculos

La incertidumbre de las fórmulas utilizadas (p. ej. ecuación de presión de vapor, factor de mejora) han de considerarse en el presupuesto de incertidumbre (véase también Capítulo 5.9).

Alinealidad

La interpolación se permite entre los puntos de calibración de los patrones de referencia. Cualquier desviación o no linealidad adicional se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre. No se permite la extrapolación.

Comportamiento a largo plazo

Una posible deriva se determinará sobre la base del historial de calibración y se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Comportamiento de saturación

El comportamiento de saturación del saturador ha de investigarse y debe ser incluida en el presupuesto de incertidumbre.

5.2 Generador de humedad de 2 presiones

5.2.1 Principio de funcionamiento

Un generador de 2 presiones es una forma simplificada del generador de 2 presiones y 2 temperaturas. La temperatura del saturador y de la cámara de calibración es estructuralmente la misma. Así, la humedad relativa se calcula a partir del cociente entre la presión de la cámara de calibración p_C y la presión del saturador p_S , teniendo en cuenta los factores de mejora.

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

Otra simplificación adicional puede ser la combinación de humidificador y saturador en una sola cámara.

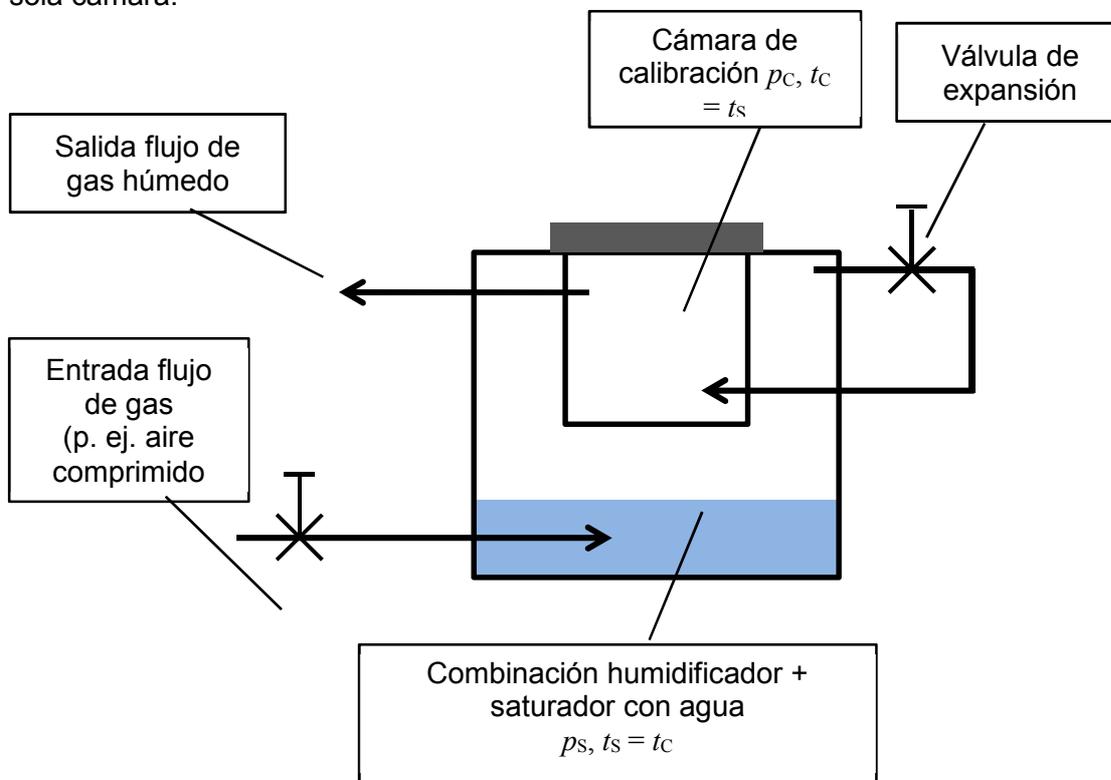


Figura 3: Esquema de un generador de humedad de 2 presiones con humidificación y saturación combinadas

5.2.2 Exigencias

Si la trazabilidad también debe establecerse a través de mediciones de presión y temperatura, habrá que aplicar los mismos requisitos que para los generadores de 2 presiones y 2 temperaturas (véase Capítulo 5.1.2). Alternativamente, la trazabilidad puede establecerse mediante una calibración directamente en humedad relativa (por ejemplo, con un higrómetro de punto de rocío y un medidor de temperatura).

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 18 / 80 |

5.2.3 *Magnitudes de influencia*

Se aplican las mismas magnitudes de influencia que para los generadores de 2 presiones/ 2 temperaturas (véase capítulo 5.1.3).

Si la trazabilidad se establece mediante calibración en humedad relativa, además de las variables de influencia de la cámara de calibración (véase Capítulo 6.2) y de la medición de la presión (véase también DKD-R 6-1 [6]), se deben tener en cuenta los siguientes factores de influencia:

Calibración

La incertidumbre de medida puede ser tomada del certificado de calibración actual del generador de humedad. Los errores de medición deben tenerse en cuenta a la hora de determinar el valor correcto, o en el presupuesto de la incertidumbre. Los puntos de calibración deben cubrir todo el rango de aplicaciones de la humedad relativa. Si el generador de humedad también tiene un control de temperatura, la calibración debe realizarse en varios puntos climáticos de acuerdo con el área de aplicación prevista (recomendación: al menos cinco puntos de humedad cada uno a baja, media y alta temperatura). La extrapolación no está permitida.

Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

Alinealidad

Se permite la interpolación entre los puntos de calibración del patrón de referencia. Cualquier desviación o no-linealidad adicional se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre. No se permite la extrapolación

Resolución

Si para los cálculos se utiliza una resolución diferente a la resolución utilizada en la calibración del certificado de calibración, esta resolución ha de tomarse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Comportamiento a largo plazo

Una posible deriva se determinará sobre la base del historial de calibración y se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 19 / 80 |

5.3 Higrómetro de punto de rocío

5.3.1 Principio de funcionamiento

Los higrómetros de punto de rocío funcionan según el principio de condensación. Una superficie (espejo) se enfría (con un elemento Peltier) hasta que se produce la condensación. La formación del condensado se detecta ópticamente, por ejemplo, mediante fotodiodos. La superficie se regula a la temperatura a la que se produce la formación de rocío o escarcha (= temperatura del punto de rocío o temperatura del punto de congelación). Un sensor de temperatura debajo de la superficie mide la temperatura del espejo y, por lo tanto, la temperatura del punto de rocío o de congelación.

Aparte de la temperatura del punto de rocío, se tienen que medir también la temperatura y la presión del gas en el higrómetro de punto de rocío para determinar la humedad relativa. A partir de estos parámetros, se calculará la humedad relativa mediante la ecuación de la presión de vapor teniendo en cuenta los factores de mejora:

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

5.3.2 Exigencias

La calibración de los higrómetros de punto de rocío debe realizarse siempre en la magnitud de medida 'punto de rocío' o 'punto de congelación' y debe cubrir todo el rango de calibración (ejemplo: si un higrómetro de espejo con punto de rocío está previsto para la calibración de la humedad relativa en el intervalo de 5 % al 95 % a temperaturas de entre 5 °C y 95 °C, este higrómetro ha de calibrarse partiendo de una temperatura del punto de congelación de -29 °C hasta una temperatura del punto de rocío de +94 °C). El intervalo del punto de calibración debe adaptarse a la incertidumbre de medida y al rango de medición deseados (recomendación: pasos máximos de 15 K). El intervalo máximo de recalibración para los higrómetros de punto de rocío es de 24 meses. Mediante la introducción de pruebas intermedias adecuadas, se puede reducir la fracción de incertidumbre de una posible deriva. Debido a la detección óptica y a la condensación en el espejo, éste debe ser examinado y limpiado regularmente. Debe garantizarse el intercambio adecuado de gases. Para ello hay que tener en cuenta las especificaciones del fabricante. Si el gas húmedo es conducido al espejo a través de conductos, no debe haber volumen muerto en el sistema de conductos. Si se desea medir puntos de rocío cercanos o superiores a la temperatura ambiente, se deben calentar todas las partes de los conductos, incluido el cabezal de medición del higrómetro de punto de rocío (p. ej. a una temperatura 30 K por encima del punto de rocío). Para el sistema de conductos sólo se pueden utilizar materiales adecuados que no sean higroscópicos ni presenten un comportamiento de absorción o desorción (por ejemplo, tubos de acero inoxidable pulido, mangueras de teflón). Debe asegurarse un flujo constante de gas hacia el espejo. Exigencias para la medición de la temperatura del gas, ver Capítulo 5.8.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 20 / 80 |

5.3.3 Magnitudes de influencia

Los siguientes factores de influencia han de determinarse e incluirse en el presupuesto de la incertidumbre. Las variables que influyen en la medición de la temperatura del gas se enumeran en el Capítulo 5.8.

Calibración

La incertidumbre de medida se encuentra en el certificado de calibración actual. Las desviaciones de la medición deben tenerse en cuenta a la hora de determinar el valor correcto o en el presupuesto de incertidumbre de la medición. Los puntos de calibración deben cubrir todo el rango de aplicación de la temperatura de congelación y del punto de rocío. La extrapolación no está permitida.

Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

Resolución

Si para los cálculos se utiliza una resolución diferente a la resolución utilizada en la calibración del certificado de calibración, esta resolución ha de tomarse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Cálculos

La incertidumbre de las fórmulas utilizadas (p. ej. La ecuación de la presión del vapor) o la omisión de los factores de mejora deben tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre de la medición (véase también Capítulo 5.9).

Distinción rocío/escarcha

Con una temperatura de espejo entre -36 °C y 0 °C , puede formarse agua (es decir, se trata de un punto de rocío) o escarcha (es decir, se trata de un punto de congelación) en el espejo. Para los cálculos adicionales (por ejemplo, la presión parcial de vapor de agua) se debe utilizar la ecuación de cálculo correspondiente en función de la capa de espejo (rocío o escarcha). El uso de una fórmula incorrecta provoca errores de cálculo considerables. La distinción entre agua y hielo en el espejo debe asegurarse mediante un procedimiento adecuado (por ejemplo, enfriando el espejo a una temperatura inferior a -36 °C y asegurándose de que la temperatura del espejo no supere posteriormente los 0 °C). De no ser posible, el posible error de cálculo debe tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Alinealidad

Se permite la interpolación entre los puntos de calibración del patrón de referencia. Cualquier desviación o no-linealidad adicional ha de tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre. No se permite la extrapolación.

Comportamiento a largo plazo

Una posible deriva se determinará sobre la base del historial de calibración y se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 21 / 80 |

Dependencia de temperatura del cabezal de medición

Dependiendo del diseño del cabezal de medición (unidad de medición con espejo), la medición de la temperatura del espejo puede depender de la temperatura ambiente. En los modelos con cabezal de medición externo, éste suele ser instalado en el volumen de calibración y está expuesto a diferentes temperaturas ambientales. En el caso de los instrumentos con una unidad de medición interna, ésta se puede calentar opcionalmente para que el cabezal de medición pueda ser operado a diferentes temperaturas. La dependencia de la temperatura deberá investigarse y tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Reacción térmica

En el caso de los higrómetros de punto de rocío con cabezal de medición externo, éste suele instalarse en el volumen de calibración para determinar la temperatura del punto de rocío. Hay que tener en cuenta que debido a la emisión de calor del cabezal de medición (el enfriamiento del espejo, p. ej. ejemplo mediante un elemento Peltier, genera calor residual) afecta el volumen de calibración, lo que puede provocar, por ejemplo, inhomogeneidades de temperatura. La influencia puede minimizarse, por ejemplo, posicionando el cabezal de medición del espejo de punto de rocío de forma adecuada. Teniendo en cuenta la dirección del flujo de gas en la cámara de calibración, el cabezal de medición se colocará de forma que el calor de escape del cabezal no fluya a través del volumen de medición. La reacción térmica ha de investigarse y debe tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Caída de presión

En el caso de los higrómetros de punto de rocío con cabezal de medición interno, el gas a medir debe ser conducido al espejo a través de conductos. La caída de presión que se produzca allí ha de determinarse y la presión parcial de vapor de agua calculada a partir de la temperatura del punto de congelación o del punto de rocío debe ser corregida con arreglo a la fórmula (13).

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

El componente de incertidumbre de la determinación debe ser considerado en el presupuesto de incertidumbre.

Presión absoluta

Para corregir la caída de presión y calcular los factores de mejora, la presión absoluta debe medirse con un barómetro calibrado y tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 22 / 80 |

5.4 Psicrómetros

5.4.1 Principio de funcionamiento

Un psicrómetro consta de dos termómetros. Un termómetro (bulbo seco) se utiliza para medir la temperatura del aire (t). El segundo termómetro (bulbo húmedo) está envuelto en un material húmedo (llamado mecha), generalmente tela de algodón húmeda, y se utiliza para medir la temperatura húmeda (t_w o t_i). Cuanto más seco sea el gas, más rápido se evapora el agua, produciendo más refrigeración por evaporación, lo que a su vez conduce a una mayor diferencia de temperatura entre los dos sensores de temperatura. Un ventilador integrado garantiza que la circulación alrededor del bulbo húmedo sea suficiente y evita que el vapor de agua ya formado impida la evaporación. Se pueden determinar varios parámetros de humedad a partir de la temperatura del aire, la temperatura de humedad, la constante del psicrómetro (que depende del diseño y de la velocidad del flujo) y la presión absoluta. Se recomienda la directriz DKD-L 5-1 [5] como base de cálculo.

5.4.2 Exigencias

Para obtener mediciones precisas es necesario que el sensor de temperatura de humedad esté siempre suficientemente humidificado, que el flujo de aire sea constante y que el psicrómetro, el agua utilizada y la mecha humidificada estén libres de impurezas. Debido a la evaporación del agua, la humedad del aire aumenta, lo que puede afectar al medio de calibración.

La calibración de los psicrómetros se puede realizar en las magnitudes de medida 'temperatura' (termómetro seco y termómetro húmedo) o 'humedad relativa'.

Si el establecimiento de la trazabilidad se realiza a través de la temperatura, la calibración debe realizarse para todo el rango de aplicación de los termómetros (por ejemplo, si un psicrómetro está destinado a calibrar la humedad relativa en el rango del 10 % al 95 % a temperaturas de 10 °C a 50 °C, el termómetro seco debe calibrarse al menos en el rango de 10 °C a 50 °C y el termómetro húmedo, dependiendo de la constante del psicrómetro, en el rango de 1 °C a 50 °C). Se aplican las exigencias del Capítulo 5.8.

Además, es necesario validar la constante del psicrómetro y otros factores como la humectación de la mecha, la velocidad del flujo y las influencias de la radiación que influyen en el resultado de la medición. Esta investigación puede llevarse a cabo, por ejemplo, mediante mediciones comparativas de la humedad relativa.

Si se favorece una calibración de humedad, la calibración debe realizarse en varios puntos climáticos según el área de aplicación (se recomienda calibrar al menos tres puntos de humedad, cada uno a baja, media y alta temperatura).

El intervalo máximo de recalibración para los psicrómetros es de 24 meses. Además, es necesario introducir pruebas intermedias adecuadas (por ejemplo, comprobación trimestral de los termómetros en el punto de hielo o en el punto triple de agua).

5.4.3 Magnitudes de influencia

Además de las variables de influencia de las mediciones de temperatura (véase Capítulo 5.8), se deberán determinar y tomar en cuenta las siguientes variables de influencia en el presupuesto de incertidumbre:

Calibración

La incertidumbre de medida se encuentra en el certificado de calibración actual. Las desviaciones de la medición deben tenerse en cuenta a la hora de determinar el valor correcto o en el presupuesto de incertidumbre. Los puntos de calibración deben cubrir todo el campo de aplicación. La extrapolación no está permitida.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 23 / 80 |

Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

Resolución

Si para los cálculos se utiliza una resolución diferente a la resolución utilizada en la calibración del certificado de calibración, esta resolución ha de tomarse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Cálculos

La incertidumbre de las fórmulas utilizadas (por ejemplo, la ecuación de la presión del vapor) o las constantes (por ejemplo, la constante del psicrómetro), así como el descuido de los factores de mejora, deben tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre (véase también capítulo 5.9).

Alinealidad

Hay interpolación entre los puntos de calibración del patrón de referencia. Una posible desviación adicional o no-linealidad debe tenerse en cuenta en la incertidumbre del balance de medición (véase también DKD-R 5-6, Tabla 6.2 [7]). La extrapolación no está permitida.

Dependencia de la presión del gas

Aparte de la constante del psicrómetro, la temperatura seca y húmeda, también se requiere la presión absoluta para el cálculo de los parámetros de humedad. La presión absoluta debe medirse con un barómetro calibrado y la incertidumbre de la medición de la presión debe tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Comportamiento a largo plazo

Una posible deriva se determinará sobre la base del historial de calibración y se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Contaminación del agua y de la mecha

Para la humectación se utilizará preferentemente agua destilada o desmineralizada. Dado que las contaminaciones e impurezas pueden causar errores de medición, se debe asegurar la limpieza del agua, del termómetro y de la mecha. Las incertidumbres debidas a la contaminación de la mecha del psicrómetro o del agua causada por las tareas de medición deben tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Calentamiento propio

El calentamiento propio de los sensores de temperatura ha de determinarse y debe ser considerado en el presupuesto de incertidumbre. El calentamiento propio en el aire puede ser significativamente mayor que el calentamiento propio en los líquidos. Esto es de especial importancia en la calibración de termómetros en líquidos.

Variación del flujo en el psicrómetro

Debido a la dependencia directa del efecto de la evaporación de la velocidad de flujo, las incertidumbres debidas a las variaciones del flujo causadas por el ventilador deben tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 24 / 80 |

5.5 Sensor de humedad relativa

5.5.1 Principio de funcionamiento

Los sensores de esta categoría sirven para medir la humedad relativa de forma directa. Como elemento sensor se emplean sensores capacitivos de polímero o sensores electrolíticos resistivos. La señal del sensor se convierte electrónicamente en humedad relativa. Otros principios de medición como, por ejemplo, sensores de estado sólido no se recomiendan como patrones de referencia.

5.5.2 Exigencias

Si se utilizan sensores de humedad relativa como patrones de referencia, hay que utilizar al menos dos patrones (se recomienda diversidad) simultáneamente. La diferencia entre los dos patrones debe ser considerada en la incertidumbre de medida.

Los sensores de humedad deben calibrarse para todo el rango de aplicación (rango climático). La distancia entre los puntos de calibración de la humedad relativa no debe superar el 20 % (dependiendo de la incertidumbre de medida deseada). Si la temperatura de operación del patrón se desvía en más de ± 3 K de la temperatura que figura en el certificado de calibración del patrón, el patrón deberá calibrarse al menos a dos temperaturas que cubran todo el campo de operación y en varios puntos de humedad. Si estas dos temperaturas difieren en más de 10 K, la calibración debe realizarse de forma correspondiente a varias temperaturas (dependiendo de la incertidumbre de medida deseada).

El intervalo máximo de recalibración para los sensores de humedad relativa como patrón es de 12 meses.

Deben introducirse medidas para reducir el riesgo de derivas adicionales. Esto incluye evitar la presencia de contaminantes o gases. Esto comprende:

- estado de limpieza del dispositivo de calibración
- inspección especialmente minuciosa de los objetos de calibración para detectar posibles contaminaciones
- utilizar sólo productos de limpieza adecuados en el laboratorio
- almacenamiento de los sensores en recipientes o materiales adecuados
- en caso necesario, retirada temporal de los patrones durante trabajos de transformación o renovación en la zona del laboratorio

Además, es necesario introducir ensayos intermedios adecuados; de lo contrario, con un intervalo de recalibración de 12 meses deberá tenerse en cuenta una deriva de al menos el 2 % como distribución rectangular en el presupuesto de incertidumbre. El intervalo de ensayo intermedio no debe ser superior a 1 mes. Medidas adecuadas con una incertidumbre suficientemente pequeña son, por ejemplo:

- ensayo con una referencia de valor superior (p. ej. generador de humedad)
- ensayo con soluciones salinas no concentradas (insaturadas)
- comparación con un sensor de humedad no utilizado para la calibración

Los ensayos intermedios han de documentarse y los valores límite especificados han de tenerse en cuenta en la incertidumbre de medida. Si se superan los valores límite, han de tomarse las medidas adecuadas.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 25 / 80 |

5.5.3 *Magnitudes de influencia*

Las siguientes variables de influencia han de determinarse y tenerse en cuenta en presupuesto de incertidumbre:

Calibración

La incertidumbre de medida se encuentra en el certificado de calibración actual. Las desviaciones de la medición deben tenerse en cuenta a la hora de determinar el valor correcto o en el presupuesto de incertidumbre. Los puntos de calibración deben cubrir todo el campo de aplicación. La extrapolación no está permitida.

Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

Resolución

Si para los cálculos se utiliza una resolución diferente a la resolución utilizada en la calibración del certificado de calibración, esta resolución ha de tomarse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Alinealidad

Hay interpolación entre los puntos de calibración del patrón de referencia. Una posible desviación adicional o no-linealidad debe tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre. Dependiendo de las distancias entre los puntos de calibración de la humedad relativa, se ha de suponer una contribución mayor o menor a la incertidumbre. La extrapolación no está permitida.

Dependencia de la temperatura

Si los patrones para la calibración de la humedad relativa se utilizan a diferentes temperaturas, la calibración debe efectuarse de forma correspondiente, es decir a varias temperaturas. Una posible desviación entre los puntos de calibración de la humedad relativa a diferentes temperaturas ha de considerarse en la incertidumbre de medida. Dependiendo de las distancias entre las temperaturas de calibración, se debe suponer una contribución de incertidumbre mayor o menor.

Comportamiento a largo plazo

Una posible deriva se determinará sobre la base del historial de calibración y se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Repetibilidad / Estabilidad a corto plazo

Dependiendo de los valores de humedad calibrados, su secuencia e historial, los valores medidos pueden variar. La estimación debe tenerse en el presupuesto de incertidumbre.

Calentamiento propio

El calentamiento propio ha de determinarse y debe ser considerado en el presupuesto de incertidumbre. La determinación se puede realizar, por ejemplo, durante la calibración según el Capítulo 7.4.3.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 26 / 80 |

Acoplamiento térmico

Mediante una instalación adecuada en el dispositivo de calibración, pueden evitarse las desviaciones de medición causadas por un acoplamiento térmico insuficiente (por ejemplo, la disipación del calor). Estas desviaciones han de investigarse y tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre. Las disipaciones de calor pueden investigarse, por ejemplo, instalando un cable sensor de 1 m en el dispositivo de calibración y extrayéndolo pieza por pieza.

Histéresis

Si en las calibraciones se utilizan sensores de humedad relativa como patrones, es absolutamente necesario tener en cuenta la histéresis (p. ej. Calibración según 9.3.1 – Secuencia A1). Si no se determina la histéresis, hay que considerar al menos un 3 % de humedad relativa (distribución rectangular).

5.6 Higrómetros mecánicos

Los higrómetros mecánicos para la medición directa de la humedad relativa no son apropiados como patrones de referencia o de trabajo para calibraciones.

5.7 Soluciones salinas

En relación con la presente directriz, las soluciones salinas como material de referencia o material de referencia certificado no resultan adecuadas para establecer la trazabilidad de la humedad relativa. Sin embargo, si se emplean con cuidado y correctamente, pueden utilizarse para pruebas intermedias.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 27 / 80 |

5.8 *Temperatura del gas*

Al calibrar la humedad relativa, la temperatura del gas (temperatura del aire) debe determinarse siempre con suficiente precisión. Para lograr las incertidumbres más pequeñas se utilizan termómetros de resistencia.

5.8.1 *Exigencias*

Los requisitos de la directriz DKD-R 5-1 [1] se aplican para la medición de la temperatura del gas o del aire. Los puntos de calibración de la temperatura deben cubrir todo el rango de aplicación.

Durante las mediciones hay que prestar especial atención al calentamiento propio, al acoplamiento térmico (disipación de calor) y a las influencias de la radiación. Por ejemplo, el calentamiento propio en el aire puede ser significativamente superior al que se produce en los líquidos. En caso de que se deba determinar una curva característica, se hace referencia a la directriz DKD-R 5-6 [7]. Se recomienda la introducción de ensayos intermedios adecuados, por ejemplo, la inspección periódica en el punto de hielo y la medición de la resistencia del aislamiento.

5.8.2 *Magnitudes de influencia*

Al utilizar termómetros de resistencia para medir la temperatura del gas, se deben tener en cuenta al menos las siguientes variables de influencia (véase DKD-R 5-1 [1]):

Calibración

La incertidumbre de medida se encuentra en el certificado de calibración actual. Las desviaciones de la medición deben tenerse en cuenta a la hora de determinar el valor correcto o en el presupuesto de incertidumbre. Los puntos de calibración deben cubrir todo el campo de aplicación. La extrapolación no está permitida.

Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

Resolución

Si para los cálculos se utiliza una resolución diferente a la resolución utilizada en la calibración del certificado de calibración, esta resolución ha de tomarse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Alinealidad

Hay interpolación entre los puntos de calibración del patrón de referencia. La extrapolación no está permitida. Una posible desviación adicional o no-linealidad debe tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre; lo mismo se aplica en caso de la determinación de una curva característica (véase también DKD-R 5-6, Tabla 6.2 [7]).

Comportamiento a largo plazo

Una posible deriva se determinará sobre la base del historial de calibración y se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 28 / 80 |

Acoplamiento térmico

Si las calibraciones se realizan con un acoplamiento térmico insuficiente o con una profundidad de instalación insuficiente, pueden producirse errores de medición considerables. Para evitar disipaciones de calor, por ejemplo, sería necesario instalar el patrón de referencia por completo en el dispositivo de calibración - incluyendo el cable de conexión (si está disponible al menos 1 m) - y exponerlo a la temperatura de calibración. En caso contrario, deberán realizarse investigaciones cuyos resultados sobre el acoplamiento térmico se incluirán en la incertidumbre de medida.

Método de medición eléctrico

Para medir la resistencia eléctrica del elemento sensor, hay que elegir un instrumento y un método de medición adecuado. Estos dependen de la incertidumbre deseada. Las propiedades deben tenerse en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Técnica de conexión

Para medir la resistencia eléctrica del elemento sensor, se puede elegir entre circuitos de 2, 3 y 4 hilos. Cuando se utilizan sensores de baja impedancia (por ejemplo, Pt100), es preferible utilizar un circuito de 4 hilos. Para elementos de sensores de alta impedancia (p. ej. NTC (del inglés: negative temperatura coefficient)), un circuito de 2 hilos también puede ser suficiente. Una posible desviación que puede ser causada por resistencias de línea debe ser investigada y tomada en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Tensiones termoeléctricas parásitas

Las posibles influencias debidas a tensiones termoeléctricas parásitas en el circuito de medición del patrón de referencia han de ser consideradas en el presupuesto de incertidumbre.

Calentamiento propio

La corriente de medición utilizada para determinar la resistencia eléctrica del elemento sensor provoca que éste se caliente. Este calentamiento propio no sólo depende de la intensidad de la corriente de medición, sino también del medio de medición. Así pues, es de esperar que el autocalentamiento sea mayor en el aire que en un líquido.

Aparte del calentamiento propio, el sensor o dispositivo también puede calentarse por la electrónica integrada y su disipación de energía.

En el caso de los patrones de referencia utilizados, hay que investigar el calentamiento propio, así como el calentamiento de los dispositivos y tenerlos en cuenta en el presupuesto de incertidumbre.

Resistencia de aislamiento

Se recomienda la comprobación periódica de la resistencia de aislamiento en el marco de ensayos intermedios (p. ej. con Pt100 según DIN EN 60751, IEC 60751) ya que, por ejemplo, en caso de alta humedad, existe el peligro de que la estructura del sensor absorba vapor de agua lo que puede provocar una resistencia paralela al elemento de medición y, por lo tanto, una posible desviación de medición.

Histéresis

Los efectos de histéresis de los patrones de referencia utilizados han de investigarse y considerarse en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 29 / 80 |

5.9 Ecuaciones de cálculo

Si la humedad relativa no se mide directamente sino se calcula a partir de los valores medidos por un higrómetro de punto de rocío, o se genera principalmente con un generador de 2 presiones y 2 temperaturas, es preferible utilizar las fórmulas según DKD-L 5-1 [5]. Las incertidumbres de las ecuaciones de cálculo utilizadas, así como los resultados del cálculo deben considerarse en el presupuesto de incertidumbre. Cabe señalar que estas incertidumbres pueden variar considerablemente en función del principio de medición y de la ecuación de cálculo utilizada y del respectivo rango de humedad. Al seleccionar las ecuaciones de cálculo, debe conocerse y tenerse en cuenta la referencia a la saturación encima del agua o el hielo, o al punto de rocío o al punto de congelación. Si una diferenciación no es posible o si no se realizan cálculos como, por ejemplo, el factor de mejora o la corrección de la caída de presión, los posibles errores resultantes deben considerarse en su totalidad en el presupuesto de incertidumbre.

5.10 Señales analógicas

Para la calibración de objetos con señales de salida analógicas (p. ej. señal de tensión de 0 V a 10 V o señal de corriente de 4 mA a 20 mA) se necesita un multímetro. Este debe ser calibrado para todo el rango de aplicación. Los factores de influencia del multímetro utilizado y de la configuración de medida han de ser considerados en el presupuesto de incertidumbre. Estos incluyen: la incertidumbre de medida del certificado de calibración del multímetro, el comportamiento a largo plazo, la no-linealidad, las tensiones termoeléctricas, las resistencias de derivación y sus dependencias de temperatura.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 30 / 80 |

6 Dispositivo de calibración

Para la calibración de higrómetros se necesita un dispositivo de calibración que genere condiciones climáticas definidas (temperatura y humedad). Dado que el dispositivo de calibración puede tener una influencia significativa sobre la incertidumbre de medida, es necesaria una amplia validación del mismo.

6.1 Grupos de dispositivos

Hay diferentes tipos de dispositivos para generar condiciones climáticas. Se pueden clasificar en las siguientes categorías.

6.1.1 Generador de humedad de presión / de temperatura

Estos generadores de humedad generan un flujo de gas definido con humedad conocida que se introduce en una cámara de calibración. Suelen funcionar según el principio de 2 presiones. Otras versiones son generadores de humedad de 2 temperaturas o de 2 presiones/ 2 temperaturas. El valor de referencia se determina mediante la medición de la presión y la temperatura.

6.1.2 Armario climatizado

Los armarios climáticos (volúmenes de, por ejemplo, más de 100 l) llevan incorporado un sensor de temperatura y humedad o un psicrómetro especial para fines de control/regulación. Para reducir las incertidumbres de medida, es posible, por ejemplo, definir sólo una parte de la cámara como volumen de calibración. Para determinar el valor de referencia deberían utilizarse patrones que sean independientes del armario climatizado y que estén colocados dentro del volumen de calibración junto con el objeto de calibración.

6.1.3 Generador de gas mixto

En comparación con los armarios climatizados, los generadores de gas mixto (a menudo también llamados calibradores de humedad) tienen pequeñas cámaras de calibración (por ejemplo, de 1 l a 20 l) que están especialmente diseñadas para la calibración de higrómetros. Para la regulación, se instala un sensor de humedad o un higrómetro de punto de rocío con sensor de temperatura. Los sensores internos de control pueden utilizarse para determinar el valor de referencia, siempre y cuando estén calibrados con trazabilidad. Deben tenerse en cuenta los requisitos del capítulo 5.

6.1.4 Solución salina

Se pueden utilizar soluciones salinas para la representación de la humedad, pero se requieren medidores de referencia separados. Para obtener valores de humedad estables, se ha de garantizar una alta estabilidad de temperatura, así como la estanqueidad y limpieza del dispositivo/de la configuración del calibrado. Debe asegurarse que se haya establecido el equilibrio por encima de la solución en el volumen de calibración y que ningún aerosol salino dañe el patrón de referencia o el objeto de calibración. Debido a la falta de circulación de aire, se debe esperar un largo tiempo de ajuste.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 31 / 80 |

6.2 Magnitudes de influencia

Las propiedades y las variables de influencia del dispositivo de calibración deben determinarse cuantitativamente y tenerse en cuenta al determinar la incertidumbre de medida. Primero, hay que definir el volumen de calibración. Normalmente se trata de la cámara completa o, en el caso de los armarios climatizados, sólo de un área parcial. Se debe definir un punto de medición en cada punto de esquina y en el centro. El centro debería ser definido como el lugar de medición de referencia. La distancia entre dos puntos de medición adyacentes no debe superar los 50 cm; de lo contrario, debe aumentarse el número de puntos de medición. Estos puntos de medición se utilizan para caracterizar el volumen de calibración. Las mediciones que se describen a continuación pueden aplicarse a las distintas magnitudes de medición, como la temperatura y la humedad.

A través de la medición directa de la humedad relativa, la falta de homogeneidad de la presión parcial de vapor de agua y de la temperatura ya está considerada en el resultado de la medición, dado que la humedad relativa depende de la temperatura del gas. Sin embargo, no hay información que indique qué variable de entrada influye en la distribución. Por lo tanto, es aconsejable medir y evaluar siempre la temperatura del gas, ya que la temperatura a menudo tiene una influencia dominante en las heterogeneidades espaciales. Convirtiendo la humedad relativa en un valor absoluto (p. ej. presión parcial de vapor de agua o punto de rocío), o mediante medición directa (p. ej. temperatura del punto de rocío), es posible separar las variables de influencia en temperatura y humedad absoluta.

6.2.1 Falta de homogeneidad espacial

La falta de homogeneidad espacial (o sea heterogeneidad espacial) se define como la desviación máxima de la humedad relativa de un lugar de medición con respecto al lugar de medición de referencia. Por un lado, la causa puede ser la distribución del vapor de agua (humedad absoluta) y, por otro lado, la distribución de la temperatura, ya que la humedad relativa depende de la temperatura. En cámaras de calibración donde la circulación de aire es suficientemente fuerte, la distribución espacial de la humedad absoluta puede ser homogénea. Sin embargo, las cargas, las fugas en los sellados de las puertas o en los conductos, así como en los sistemas de humidificación y deshumidificación pueden causar heterogeneidad. El número de puntos de medición necesarios (temperatura y humedad) para determinar las heterogeneidades depende del área de aplicación prevista y del diseño de la cámara de calibración. Se recomienda efectuar mediciones a baja y alta humedad en todo el rango de temperatura en pasos de temperatura de 20 K y volver a medir algunos puntos para determinar la repetibilidad.

La medición de las heterogeneidades espaciales⁵ puede realizarse mediante la colocación simultánea de sensores (se recomienda el mismo tipo) en cada punto de medición y en el punto de medición de referencia, o mediante el uso de dos sensores. En este último caso, el primer sensor se fija en el punto de medición de referencia y el segundo pasa por los puntos de medición uno tras otro. Al principio y al final, ambos sensores se comparan entre sí en el punto de medición de referencia. La desviación máxima de la humedad relativa (o separada por temperatura y humedad absoluta) de un lugar de medición del lugar de medición de referencia debe tenerse en cuenta en el cálculo del presupuesto de incertidumbre. Dependiendo de la configuración del calibrado, se debe clasificar el tipo de distribución (p. ej. rectángulo).

⁵ Para cámaras de calibración más grandes (por ejemplo, armarios climatizados) se recomienda utilizar siempre varios termómetros estándar al mismo tiempo para determinar la distribución espacial de la temperatura durante cada calibración. Lo mismo se aplica a la determinación de la influencia de la radiación.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 32 / 80 |

6.2.2 Inestabilidad temporal

La inestabilidad temporal de la humedad se determina registrando el curso temporal de la humedad relativa, o separadamente por temperatura y humedad absoluta, a lo largo de un período de al menos 30 minutos después de que se haya establecido el estado estable. Se considera que se ha alcanzado el estado de estabilización cuando ya no se pueden detectar cambios sistemáticos. Para medir la inestabilidad temporal, se han de registrar en 30 minutos al menos 30 valores medidos con intervalos de tiempo aproximadamente constantes. La inestabilidad temporal debe ser considerada en el presupuesto de incertidumbre. Se recomienda el rango máximo de variación (amplitud) con respecto al valor medio.

6.2.3 Influencia de la radiación

Los cuerpos pueden asumir una temperatura diferente de la temperatura del gas debido al intercambio de calor por radiación. Esto es válido tanto para los patrones de referencia o de trabajo utilizados como para los objetos de calibración. La influencia de la radiación depende de la temperatura del gas, de la emisividad ε y de la temperatura de la fuente de calor o disipador de calor y del sensor de humedad y sus superficies, de la disposición geométrica, así como de la velocidad del gas. Las fuentes típicas de influencia de la radiación son:

- temperatura de la superficie de la cámara diferente de la temperatura del gas (aislamiento de la pared, cristal)
- cristales/ventanas con calefacción o sellados de puerta
- carga (por ejemplo, dispositivos con calor residual dentro de la cámara de calibración)
- iluminación de la cámara
- elementos calefactores o refrigerantes
- conductos

La influencia de la radiación crece con el aumento de la diferencia de temperatura, el aumento de la superficie y el aumento de la emisividad. Además, esta influencia aumenta desproporcionadamente con la temperatura absoluta. La influencia de la radiación puede determinarse midiendo la temperatura en el centro del volumen de calibración con un termómetro con una emisividad lo más grande posible (es decir, $\varepsilon > 0,6$) y un termómetro con una emisividad lo más pequeña posible (es decir, $\varepsilon < 0,15$). Una recomendación sería utilizar un termómetro con una superficie dorada (baja emisividad) y un termómetro con una superficie de teflón o ennegrecida (alta emisividad). Las emisividades de ambas superficies de termómetro deben conocerse con suficiente precisión, especialmente en el rango de longitud de onda infrarroja. Especialmente para realizar la baja emisividad, se debe evitar la oxidación y la rugosidad de la superficie. El termómetro con baja emisividad indica la temperatura aproximada del gas. La temperatura del gas se obtiene por extrapolación a la emisividad $\varepsilon = 0$. La diferencia entre los dos termómetros es una medida de la influencia de la radiación.

La temperatura del gas puede medirse también con un termómetro (se recomienda baja emisividad) que está protegido contra la radiación por un escudo de radiación (también se recomienda baja emisividad). Este escudo protector de radiación debe ser ventilado o bien su posicionamiento y diseño deben asegurar un flujo suficiente alrededor del termómetro. El termómetro con pantalla de radiación se utiliza para medir de manera aproximada la temperatura del gas. Esta temperatura se puede comparar con la temperatura medido por un termómetro de alta emisividad sin pantalla de radiación para determinar la influencia de la radiación.

La influencia total de la radiación debe tenerse en cuenta por completo como una distribución rectangular en la incertidumbre de medida.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 33 / 80 |

6.2.4 Diferencias de presión

Las diferencias de presión en el dispositivo de calibración que pueden producirse, por ejemplo, en cámaras de flujo separadas, en las tuberías de los generadores de humedad o debido a la diferente posición del patrón de referencia y del objeto de calibración, provocan cambios en la humedad. Por lo tanto, éstas deben ser determinadas, corregidas -si es posible- y consideradas en la incertidumbre de medida.

6.2.5 Condiciones de flujo

En el volumen de calibración se ha de determinar la dirección del flujo de aire. Si es posible, los patrones de referencia o de trabajo deben colocarse de forma paralela a la dirección del flujo y al objeto a calibrar, a fin de reducir al mínimo la influencia mutua del calor residual causado por la disipación de energía. Alternativamente, el sensor de referencia puede colocarse delante del objeto a calibrar si el calor residual ha sido determinado y se considera despreciable. Dado que es razonable especificar en el certificado de calibración la velocidad del flujo o el tipo de cambio de aire en el objeto de calibración, se debe determinar al menos uno de los dos parámetros.

6.2.6 Reacciones

Al utilizar dispositivos con calentamiento propio o disipación de calor (por ejemplo, higrómetros de punto de rocío con cabezal de medición externo), se debe tener en cuenta el efecto sobre el sistema de referencia (por ejemplo, la homogeneidad de la temperatura). Hay que evitar las influencias mutuas entre los patrones de referencia o de trabajo y los objetos de calibración. Lo mismo es válido para los dispositivos que influyen en la humedad (por ejemplo, la evaporación en psicrómetros). Se deben evitar reacciones o efectos sobre los patrones de referencia o de trabajo, el equipo de calibración y el objeto de calibración; estas reacciones deberán tenerse en cuenta en el montaje del dispositivo de calibración y, en su caso, en la determinación de la incertidumbre de la medida.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 34 / 80 |

7 Objetos de calibración electrónicos

7.1 Tipos de dispositivos

Esta directriz de calibración se aplica a la calibración de higrómetros electrónicos que miden la humedad relativa de forma directa y no se aplica a los instrumentos que calculan la humedad relativa a partir de otras variables medidas, como los higrómetros de punto de rocío o los psicrómetros.

7.1.1 Elemento sensor

Los siguientes tipos de sensores se utilizan con higrómetros para la medición directa de la humedad relativa del gas:

- sensores de estado sólido resistivos
- sensores capacitivos de polímero
- sensores resistivos-electrolíticos

7.1.2 Conversión de medida

La señal del sensor sensible a la humedad se convierte en un valor medido correspondiente por el sistema electrónico y se puede visualizar de diferentes formas:

- como valor de visualización en una pantalla o monitor
- como valor digital que se transmite a través de una interfaz (p. ej. RS232)
- como valor de medición a través de una conexión de radio segura
- como valor medido en la memoria de un registrador de datos
- como asignación a una señal de salida analógica (p. ej. 4 mA a 20 mA)

7.2 Aptitud a ser calibrado

Todos los higrómetros que cumplen con las reglas generales de la tecnología y las indicaciones del fabricante pueden ser calibrados. La especificación del fabricante debería estar disponible. La aptitud de los higrómetros para el pedido de calibración debe determinarse mediante un control de calidad y un control de funcionamiento. Las observaciones, las anomalías y los parámetros pertenecientes al producto (por ejemplo, los datos de ajuste) deberán documentarse. En caso de que se descubran irregularidades, se debe consultar al cliente.

7.2.1 Prueba de funcionamiento

Aparte de un control visual exhaustivo para comprobar la integridad y detectar posibles daños, también se debe comprobar la legibilidad de las etiquetas. Especialmente en el área de la tapa protectora y del elemento de medición, se requiere una inspección precisa para detectar daños o contaminaciones y para comprobar el estado de limpieza. En el caso de dispositivos multicanales, la asignación exacta del sensor o de la sonda a los canales del dispositivo debe estar disponible o ser especificada (no se aplica a los sensores con transmisión digital). El objeto a calibrar debe estar libre de contaminación y no debe emitir sustancias que puedan influir o dañar el dispositivo de calibración y los sistemas de referencia.

Antes de la calibración, es preciso estudiar detenidamente el manual de instrucciones del objeto a calibrar, de modo que se conozca su modo de funcionamiento y su manejo. Los datos técnicos del objeto a calibrar deben estar disponibles para tener informaciones sobre la alimentación de tensión, la indicación del valor medido o la conversión del valor medido. Para poder identificar un posible calentamiento propio, se debe prestar especial atención al consumo de energía o a la disipación de la misma. Se debe prestar especial atención a los sensores con calefacción integrada. En este caso, el modo de funcionamiento debe conocerse detalladamente y tenerse en cuenta durante la calibración. En el caso de objetos de

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 35 / 80 |

calibración con memoria de los valores medidos (p. ej. registrador de datos), se debe conocer la velocidad de medición, el tipo de memoria y el promediado. Si el instrumento requiere la introducción de los datos de comparación/ajuste o de los coeficientes del sensor antes de la puesta en marcha, esto debe tenerse en cuenta. Se debe realizar una prueba de funcionamiento del objeto a calibrar y, si es necesario, una prueba adicional de los elementos de operación y de la interfaz.

7.2.2 *Tratamiento previo*

Un proceso especial de envejecimiento no tiene sentido. En su lugar, se debería realizar un pretratamiento en forma de almacenamiento en condiciones ambientales durante al menos 24 horas. Para ello, el dispositivo deberá retirarse de su embalaje. Para la calibración in situ se deben tener en cuenta las condiciones de uso.

7.3 **Embalaje**

En cuanto al uso de materiales de embalaje, espumas, contenedores o cajas de transporte, hay que asegurarse de que éstos no provoquen una deriva o destrucción del sensor de humedad a través de desgasificaciones de contaminantes. No se deben utilizar materiales inadecuados. Es preferible utilizar el embalaje del fabricante.

7.4 **Magnitudes de influencia**

Las respectivas variables de influencia dependen en gran medida del tipo de sensor y del tipo de equipo, por lo que deben determinarse individualmente para cada objeto a calibrar.

7.4.1 *Valor medio*

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

7.4.2 *Resolución*

La resolución del valor medido se tendrá en cuenta en el presupuesto de incertidumbre. La resolución no puede ser superior a la resolución de la pantalla/lectura.

7.4.3 *Calentamiento propio*

El calentamiento propio se puede determinar de forma condicional encendiendo el analizador de humedad sólo después de que la cámara de calibración haya sido ajustada y el objeto a calibrar se haya ajustado completamente al contenido de humedad. Han de tenerse en cuenta los tiempos mínimos de estabilización de acuerdo con las especificaciones del fabricante. El calentamiento propio puede estimarse a partir de la diferencia entre el valor medido inmediatamente después de la puesta en marcha y después de un tiempo de ajuste de al menos 30 minutos sobre la base del cambio en el valor medido causado por el aumento de temperatura.

La determinación del calentamiento propio también puede efectuarse mediante mediciones a velocidades de flujo muy diferentes (p. ej. en el armario climatizado a una velocidad de flujo de 3 m/s – bajo calentamiento propio, y en el generador de humedad a casi 0 m/s – calentamiento propio alto).

El calentamiento propio debe tenerse en cuenta en la incertidumbre de medida o indicarse como valor en el certificado de calibración.

Durante la calibración se tendrán en cuenta las exigencias del cliente en cuanto a la velocidad de flujo, siempre que puedan realizarse.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 36 / 80 |

7.4.4 Acoplamiento térmico

Si se realizan calibraciones con un acoplamiento térmico insuficiente o una profundidad de instalación insuficiente, pueden producirse errores de medición considerables.

Por ejemplo, para evitar la disipación de calor, el objeto de calibración completo, incluido el cable de conexión (si está disponible al menos 1 m), debe instalarse en el dispositivo de calibración y exponerse a la temperatura de calibración. En caso contrario, deben realizarse investigaciones. Éstas se pueden llevar a cabo de dos maneras:

1. “Sacamiento” por partes (poco a poco), por ejemplo, por un 10 % de la profundidad de inmersión, para determinar la disipación de calor;
2. Medición comparativa con un sistema de referencia “sin disipación de calor”.

El orden de magnitud de la disipación de calor puede ser el 10 % de la diferencia entre la temperatura de calibración y la temperatura ambiente y debe tenerse en cuenta en la incertidumbre de medida.

7.4.5 Histéresis

La evaluación de una posible histéresis depende de la secuencia de calibración seleccionada. Las secuencias de calibración A1 y A2 (ver capítulo 9.3.1 o 9.3.2) se utilizan para su examinación y valoración. Para la secuencia de calibración D (véase capítulo 9.3.7) hay que tener en cuenta los requisitos del cliente. Para las demás secuencias, una posible histéresis no se tiene en cuenta.

7.4.6 Influencias de las condiciones ambientales

Si existen influencias ambientales, éstas han de tenerse en cuenta.

7.4.7 Señales analógicas

Si el valor medido de la humedad relativa del objeto a calibrar se emite en forma de señal analógica (p. ej. 4 mA a 20 mA), debe medirse con un multímetro calibrado (véase el Capítulo 5.10) y convertirse en humedad relativa mediante la escalada. Se recomienda indicar ambos valores, la señal analógica y la humedad relativa calculada a partir de ella, así como la escalada en el certificado de calibración.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 37 / 80 |

8 Objetos de calibración mecánicos

8.1 Tipos de dispositivos

Además de los objetos de calibración electrónicos descritos en el Capítulo 7, esta directriz de calibración también se aplica a la calibración de higrómetros mecánicos que miden la humedad relativa de forma directa, pero no se aplica a los instrumentos que calculan la humedad relativa basándose en otras variables de medición, como los psicrómetros.

8.1.1 Elemento medidor

El principio de medición se basa en un cambio en la longitud de un material. Como elementos de medición se utilizan diversos pelos, hilos de algodón, hilos de plástico o vellones. Con el aumento de la humedad relativa también aumenta la longitud del elemento de medición. La modificación de la longitud se transmite a un puntero. En los higrógrafos, los datos de medición se transmiten a una palanca de escritura que registra los valores medidos como curvas de medición en un papel de diagrama fijado a un cilindro giratorio (tambor) o en papel continuo.

8.2 Aptitud a ser calibrado

Todos los higrómetros que cumplen con las reglas generales de la tecnología y las especificaciones del fabricante pueden ser calibrados. Las especificaciones del fabricante deben estar disponibles. La aptitud de los higrómetros para el pedido de calibración debe determinarse mediante un control de calidad y un control de funcionamiento. Las observaciones, las anomalías y los parámetros pertenecientes al producto (por ejemplo, el tipo de papel de diagrama) deberán documentarse. En caso de que se descubran irregularidades, se debe consultar al cliente.

8.2.1 Prueba de funcionamiento

Antes de la calibración, es preciso estudiar detenidamente el manual de instrucciones del objeto a calibrar, de modo que se conozca su modo de funcionamiento. Los higrómetros deben calibrarse en la posición prevista, normalmente en posición vertical. El objeto a calibrar debe estar libre de contaminación y no debe emitir sustancias que puedan afectar o dañar el dispositivo de calibración y los sistemas de referencia.

Debe comprobarse el funcionamiento de los registradores de tambor o de cinta. Durante la calibración, hay que asegurarse de que el papel milimetrado prescrito y los lápices correspondientes se utilicen en su forma original. El papel debe apoyarse en el borde inferior del tambor. Al cambiar la humedad rápidamente, existe el riesgo de que el papel milimetrado se mueva verticalmente sobre el tambor. La palanca de escritura sólo debe apretar ligeramente contra el papel. A menudo, esto se puede ajustar con un tornillo de ajuste.

8.2.2 Tratamiento previo

Un pretratamiento inicial consistirá en el almacenamiento en condiciones ambientales durante al menos 24 horas. Para ello, el dispositivo deberá retirarse de su embalaje. Para la calibración in situ hay que tener en cuenta las condiciones de uso.

Si se debe regenerar el elemento de medición (p. ej., en el caso de elementos de medición de pelo humedeciéndolos con agua) según los deseos del cliente, primero se tiene que efectuar una calibración de entrada. La regeneración debe llevarse a cabo de acuerdo con las instrucciones del fabricante. A continuación, hay que realizar una nueva calibración.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 38 / 80 |

8.3 Magnitudes de influencia

Las respectivas magnitudes de influencia dependen del tipo de sensor y del instrumento, por lo que deben determinarse individualmente para cada objeto a calibrar.

8.3.1 Valor medio

La incertidumbre asociada del valor medio se calculará a partir de la incertidumbre típica y del número de los valores medidos y se incluirá en el presupuesto de incertidumbre.

8.3.2 Graduación de la escala

La legibilidad del dispositivo indicador viene determinada por la relación entre el ancho del puntero y la distancia entre dos líneas de graduación adyacentes (valor de graduación de escala). La relación recomendada es la mitad del valor de dos líneas de graduación adyacentes (véase también DIN 43790).

8.3.3 Acoplamiento térmico

Véase Capítulo 7.4.4.

8.3.4 Histéresis

Véase Capítulo 7.4.5.

8.3.5 Repetibilidad

Dado que la repetibilidad en los higrómetros mecánicos es limitada, debe ser investigada. De lo contrario, una contribución de incertidumbre de al menos el 1 % se incluirá como distribución normal ($k = 1$) en el presupuesto de incertidumbre.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 39 / 80 |

9 Procedimiento de calibración

A continuación, se explicará el procedimiento de calibración, comenzando con la preparación e instalación en el dispositivo de calibración, así como presentando un total de siete procedimientos, o sea secuencias de calibración diferentes.

9.1 Preparativos

Previamente, se debe realizar una prueba de funcionamiento (véase Capítulo 7.2 o Capítulo 8.2). Hay que asegurar un pretratamiento de acuerdo con los capítulos 7.2.2 o 8.2.2, o de acuerdo con los requisitos del cliente. En este último caso, el proceso de pretratamiento se describirá en el certificado de calibración.

9.2 Instalación en el dispositivo de calibración

Dependiendo del diseño del objeto a calibrar o de las exigencias del cliente, se debe decidir cómo éste se va a instalar en el dispositivo de calibración (por ejemplo, el dispositivo completo o sólo el sensor externo). En caso de dudas, hay que consultar al cliente. En la medida de lo posible, la instalación debe orientarse en el uso, o sea caso de aplicación del cliente. Si una configuración/montaje de medición razonable no es posible, la calibración no puede llevarse a cabo. Todas las piezas que se instalen en el dispositivo de calibración deben estar homologadas para los puntos de calibración previstos (los mangos de los sensores externos, por ejemplo, tienen un rango de temperatura limitado). La profundidad de instalación térmica, que incluye todas las partes del objeto de calibración que están expuestas a la temperatura de calibración, debe documentarse e indicarse en el certificado de calibración (se pueden encontrar ejemplos en el Apéndice A Balances de incertidumbre).

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 40 / 80 |

9.3 Secuencia de calibración

Al calibrar la humedad relativa, se debe asegurar una estabilidad higrométrica y térmica adecuada; además, se debe respetar el tiempo de acondicionamiento. Al ajustar los puntos de calibración deseados, hay que tener en cuenta que el patrón de referencia y el objeto de calibración no se ven expuestos a la condensación, es decir, la temperatura de los instrumentos siempre debe ser superior a la temperatura del punto de rocío en el dispositivo de calibración. Lo mismo es válido al terminar la calibración y al retirar el patrón de referencia o el objeto de calibración. De ser necesario, debe ajustarse un clima definido al final para evitar la condensación o el secado de los sensores.

Los puntos de calibración son puntos de calibración de humedad a una o más temperaturas de gas. Para cada temperatura de gas se recomienda realizar la calibración en al menos 3 puntos de calibración de humedad que cubran el ámbito de aplicación del cliente. En el caso de los sensores de humedad que registran la temperatura del gas por separado, también es posible calibrar otras temperaturas de gas sin puntos de calibración de humedad, si el cliente así lo requiere. En general, los puntos de calibración seleccionados deberían adaptarse al ámbito de aplicación del cliente.

Si hay que calibrar puntos de calibración de humedad a más de una temperatura de gas, se aplican las siguientes recomendaciones con respecto a la secuencia de calibración:

- Debería comenzarse con la temperatura de gas más alta y calibrar preferiblemente en orden decreciente de las temperaturas de gas. Esto sirve para minimizar una posible deriva del objeto de calibración durante la calibración.
- Antes de continuar con la siguiente temperatura del gas, habrá que calibrar todos los puntos de calibración de humedad isotérmica.

En caso de otros puntos de calibración sin puntos de calibración de humedad (sólo temperatura del gas), se aplican las siguientes recomendaciones adicionales:

- La calibración de estos puntos de calibración adicionales para la temperatura del gas debe realizarse antes de la calibración de los puntos de calibración de la humedad para evitar que la calibración de la humedad relativa se vea influenciada por una calibración de temperatura posterior.
- Si el rango de temperatura de la calibración de temperatura excede el rango de temperatura de la calibración de humedad, una consulta con el cliente sería razonable, dado que a temperaturas altas se pueden producir cambios en las curvas características en el objeto de calibración debido a una desgasificación.

Para calibraciones a temperaturas altas (superiores a 40 °C), se recomienda generalmente que al principio se calibre la humedad relativa a temperatura ambiente (23 °C ± 3 K). Esto sirve para documentar posibles cambios en el sensor a temperaturas altas (Ejemplo: véase el segundo modelo de un certificado de calibración: Calibración de acuerdo con el método B2 en el Apéndice B Muestras de certificados de calibración (excerptas)).

A continuación, se definen siete secuencias de calibración⁶ diferentes para la secuencia de calibración de los puntos de calibración de humedad a una sola temperatura de gas (isotérmica).

⁶ Dependiendo de las exigencias y del uso previsto, la calibración se realiza normalmente después de la secuencia B2. Para altas exigencias en cuanto a la tarea de medición y la precisión, se debe seleccionar la secuencia A1 o A2.

9.3.1 Secuencia A1

En esta secuencia, los puntos de calibración de humedad se calibran primero en orden ascendente y luego en orden descendente (ver Figura 4). A excepción del punto de calibración superior (N4), esto sirve para investigar una posible histéresis del objeto de calibración.

El primer valor de calibración (N1a) debe ser acercado desde un nivel bajo de humedad (S0) (al menos un 5 % más bajo; hay que procurar que el tiempo de acondicionamiento sea lo suficientemente largo). Si esto no es posible, se recomienda la secuencia A2 según capítulo 9.3.2. Este es el caso, por ejemplo, con 0 % de humedad o si el valor límite inferior del dispositivo de calibración ya se ha alcanzado con el valor de calibración N1a.

En el certificado de calibración, los valores de calibración deben ser indicados por separado. La incertidumbre de medida se calculará por separado para cada valor sin tener en cuenta una posible histéresis del objeto a calibrar.

Alternativamente, los resultados pueden resumirse mediante promedios aritméticos (N1a y N1b); (N2a y N2b); (N3a y N3b) – con la excepción del punto de calibración superior (N4). En el caso de la media aritmética, la histéresis de los puntos de calibración (N1a y N1b), (N2a y N2b) y (N3a y N3b) del objeto a calibrar se tendrá en cuenta como distribución rectangular en el presupuesto de incertidumbre (mitad de la anchura de la diferencia entre las desviaciones de medición a y b).

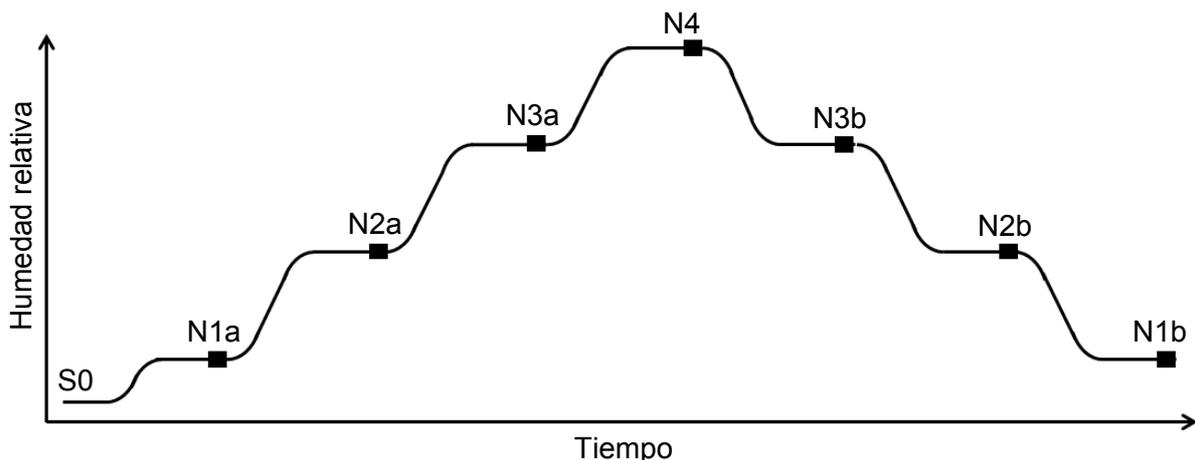


Figura 4: Visualización de la secuencia de calibración A1: Valor de la humedad relativa del dispositivo de calibración (valor de referencia) en función del tiempo

- ■ : Registro del valor medido para el resultado de la calibración
- S0: Punto inicial: Humedad relativa definida (p. ej. 10 %)
- N1a: Valor de calibración Nro. 1: 1. Punto de calibración ascendente (p. ej. 20 %)
- N2a: Valor de calibración Nro. 2: 2. Punto de calibración ascendente (p.ej. 50 %)
- N3a: Valor de calibración Nro. 3: 3. Punto de calibración ascendente (p. ej. 80 %)
- N4: Valor de calibración Nro. 4: 4. Punto de calibración ascendente (p. ej. 90 %)
- N3b: Valor de calibración Nro. 5: 3. Punto de calibración descendente (p. ej. 80 %)
- N2b: Valor de calibración Nro. 6: 2. Punto de calibración descendente (p. ej. 50 %)
- N1b: Valor de calibración Nro. 7: 1. Punto de calibración descendente (p.ej. 20 %)

9.3.2 Secuencia A2

Aquí, los puntos de calibración de la humedad se calibran primero en orden ascendente dentro del rango de calibración y luego en orden descendente (véase Figura 5), por lo que el primer valor de calibración (N1a) se acerca desde arriba (SR) (p. ej. a partir de la humedad ambiental). Lo que se pretende es investigar al mismo tiempo la repetibilidad entre los puntos de calibración N1a y N1b y la histéresis entre los puntos de calibración N2a y N2b, así como N3a y N3b del objeto de calibración. El punto de calibración N4 sólo se mide una vez, en orden ascendente.

En el certificado de calibración, los valores de calibración deben ser indicados por separado. La incertidumbre de medida se calculará por separado para cada valor sin tener en cuenta una posible repetibilidad o histéresis del objeto a calibrar. Alternativamente, los resultados pueden resumirse mediante promedios aritméticos (N1a y N1b); (N2a y N2b); (N3a y N3b) – con la excepción del punto de calibración más alto (N4). En el caso de la media aritmética, la histéresis de los puntos de calibración (N1a y N1b), así como la histéresis de los puntos de calibración (N2a y N2b) y (N3a y N3b) del objeto a calibrar se tendrá en cuenta como distribución rectangular en el presupuesto de incertidumbre (semiancho de la diferencia entre las desviaciones de medición a y b).

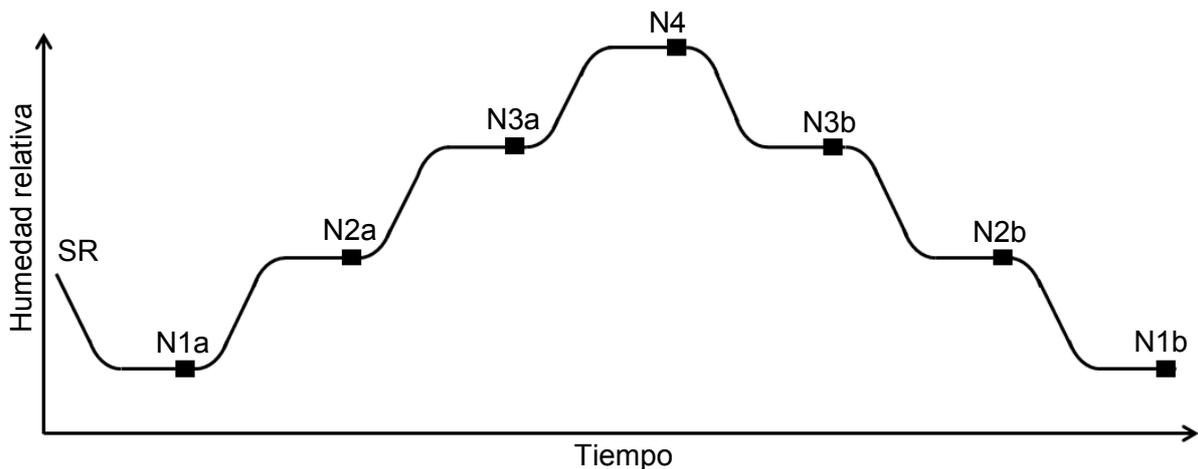


Figura 5: Visualización de la secuencia de calibración A2: Valor de humedad relativa del dispositivo de calibración (valor de referencia) en función del tiempo

- ■ : Registro del valor medido para el resultado de la calibración
- SR: Valor inicial: Humedad relativa (p. ej. condición ambiental a 50 %)
- N1a: Valor de calibración Nro. 1: 1. Punto de calibración descendente (p. ej. 20 %)
- N2a: Valor de calibración Nro. 2: 2. Punto de calibración ascendente (p. ej. 50 %)
- N3a: Valor de calibración Nro. 3: 3. Punto de calibración ascendente (p. ej. 80 %)
- N4: Valor de calibración Nro. 4: 4. Punto de calibración ascendente (p. ej. 90 %)
- N3b: Valor de calibración Nro. 5: 3. Punto de calibración descendente (p. ej. 80 %)
- N2b: Valor de calibración Nro. 6: 2. Punto de calibración descendente (p. ej. 50 %)
- N1b: Valor de calibración Nro. 7: 1. Punto de calibración descendente (p. ej. 20 %)

9.3.3 Secuencia B1

Los puntos de calibración de la humedad se calibran en orden ascendente (véase Figura 6). El primer punto (N1) debe ser acercado desde un nivel bajo de humedad (S0). Esta condición se considera cumplida si el primer punto de calibración N1 tiene un valor de al menos un 5 % inferior. Hay que procurar que el tiempo de acondicionamiento sea lo suficientemente largo. Si esto no es posible, se recomienda la secuencia B2 según el capítulo 9.3.4. Este es el caso, por ejemplo, con 0 % de humedad, o si el valor límite inferior del dispositivo de calibración ya se ha alcanzado con el punto de calibración N1.

Este procedimiento no incluye la investigación de una posible histéresis del objeto de calibración.

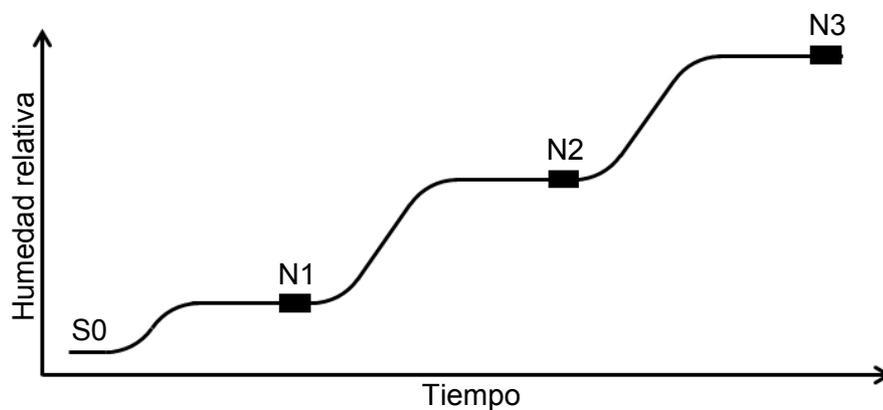


Figura 6: Visualización de la secuencia de calibración B1: Valor de humedad relativa del dispositivo de calibración (valor de referencia) en función del tiempo

- ■ : Registro del valor medido para el resultado de la calibración
- S0: Punto inicial: Humedad relativa definida (p. ej. 10 %)
- N1: Punto de calibración Nro. 1 ascendente (p. ej. 20 %)
- N2: Punto de calibración Nro. 2 ascendente (p. ej. 50 %)
- N3: Punto de calibración Nro. 3 ascendente (p. ej. 80 %)

9.3.4 Secuencia B2

Aquí, los puntos de calibración de la humedad se calibran en orden ascendente dentro del rango de calibración (véase Figura 7), por lo que el primer punto de calibración N1 se acerca desde arriba (SR) (p. ej. a partir de la humedad ambiental).

Este procedimiento no incluye la investigación de una posible histéresis del objeto de calibración.

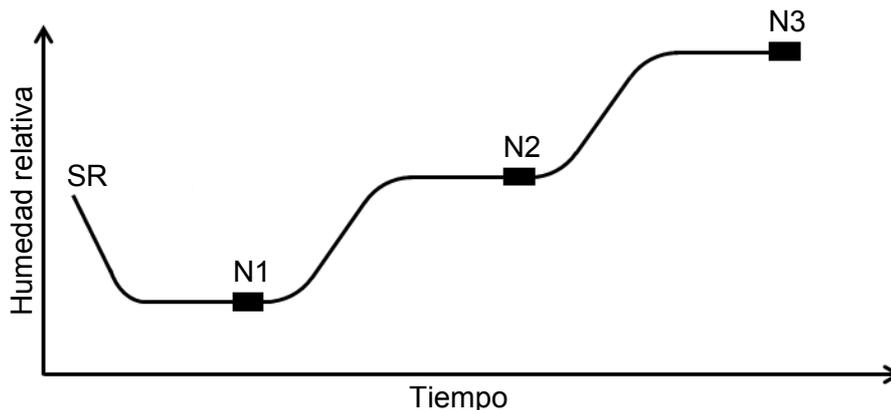


Figura 7: Visualización de la secuencia de calibración B2: Valor de humedad relativa del dispositivo de calibración (valor de referencia) en función del tiempo

- ■ : Registro del valor medido para el resultado de la calibración
- SR: Punto inicial: Humedad relativa (p. ej. condición ambiental a 50 %)
- N1: Punto de calibración Nro. 1 descendente (p. ej. 20 %)
- N2: Punto de calibración Nro. 2 ascendente (p. ej. 50 %)
- N3: Punto de calibración Nro. 3 ascendente (p. ej. 80 %)

9.3.5 Secuencia C1

Los puntos de calibración de la humedad se calibran en orden descendente (véase Figura 8). El primer punto (N1) debe acercarse desde una humedad más alta (S0)⁷. Esta condición se considera cumplida si el primer punto de calibración N1 tiene un valor de al menos un 5 % superior. Hay que procurar que el tiempo de adaptación sea lo suficientemente largo. Si esto no es posible, se recomienda la secuencia C2 según capítulo 9.3.6. Este es el caso, por ejemplo, con 98 % de humedad, o si el valor límite superior del dispositivo de calibración ya se ha alcanzado con el punto de calibración N1.

Este procedimiento no incluye la investigación de una posible histéresis del objeto de calibración.

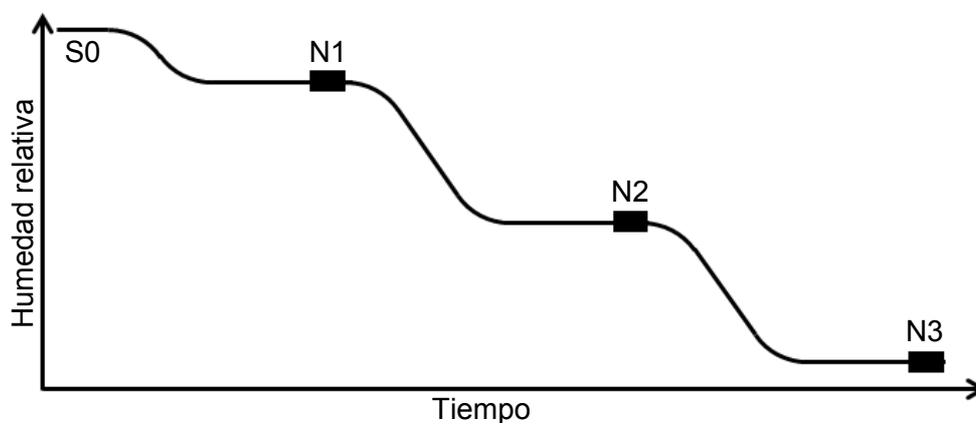


Figura 8: Visualización de la secuencia de calibración C1: Valor de humedad relativa del dispositivo de calibración (valor de referencia) en función del tiempo

- ■ : Registro del valor medido para el resultado de la calibración
- S0: Punto inicial: Humedad relativa definida (p. ej. 90 %)
- N1: Punto de calibración Nro. 1 descendente (p. ej. 80 %)
- N2: Punto de calibración Nro. 2 descendente (p. ej. 50 %)
- N3: Punto de calibración Nro. 3 descendente (p. ej. 20 %)

⁷ Con una humedad relativa superior al 80 % pueden producirse cambios a corto plazo en las curvas características de los sensores de humedad, por lo que se debe comprobar si se debe comenzar con una humedad más alta (S0). Alternativamente, se puede seleccionar la secuencia C2 según capítulo 9.3.6.

9.3.6 Secuencia C2

Aquí, los puntos de calibración de la humedad se calibran de forma descendente dentro del rango de calibración (véase Figura 9), por lo que el primer punto de calibración N1 se acerca desde abajo (SR) (p. ej. a partir de la humedad ambiental).

Este procedimiento no incluye la investigación de una posible histéresis del objeto de calibración.

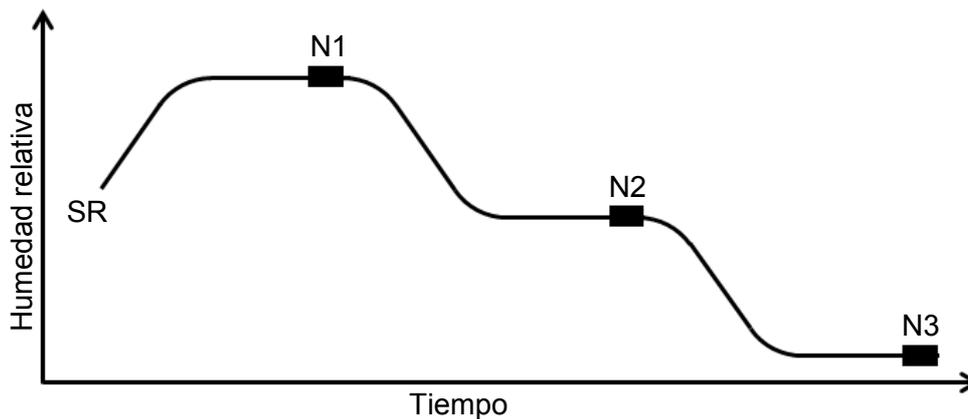


Figura 9: Visualización de la secuencia de calibración C2: Valor de humedad relativa del dispositivo de calibración (valor de referencia) en función del tiempo

- ■ : Registro del valor medido para el resultado de la calibración
- SR: Punto inicial: Humedad relativa (p. ej. condición ambiental a 50 %)
- N1: Punto de calibración Nro. 1 ascendente (p. ej. 80 %)
- N2: Punto de calibración Nro. 2 descendente (p. ej. 50 %)
- N3: Punto de calibración Nro. 3 descendente (p. ej. 20 %)

9.3.7 Secuencia D

La secuencia de los puntos de calibración se realiza según las necesidades del cliente. El procedimiento ha de describirse en el certificado de calibración.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 47 / 80 |

9.4 *Tiempo de ajuste*

Hay que observar un tiempo de ajuste lo suficientemente largo; este tiempo de ajuste ha de documentarse. Bajo el tiempo de ajuste* se entiende generalmente el tiempo antes del registro de los datos de medición que se usa para el resultado de calibración, es decir el tiempo que transcurre hasta que el valor de referencia del dispositivo de calibración haya alcanzado el valor nominal.

Para determinar el tiempo de ajuste, se propone a continuación un método que contiene requisitos mínimos para dicho procedimiento. Se permiten métodos alternativos. En general, debe tenerse en cuenta que el tiempo de ajuste depende del punto de calibración (humedad y temperatura). Además, dependiendo de la velocidad del flujo en el dispositivo de calibración y del diseño del objeto a calibrar, puede que se requiera un tiempo de ajuste de al menos 3 horas; en caso de que el intercambio de gases sea menor, puede ser aún más largo (véanse también las notas en el Apéndice D Información sobre los sensores electrónicos de humedad).

*Alternativamente, se suelen utilizar los términos tiempo de acondicionamiento o tiempo de adaptación

9.4.1 Método propuesto para determinar el tiempo de ajuste

Un prerrequisito para el procedimiento descrito a continuación es un acoplamiento térmico suficiente del objeto de calibración con el dispositivo de calibración.

En el marco del procedimiento propuesto, se mantendrá un tiempo de ajuste suficiente si el cambio sistemático del valor medido en un plazo de 20 minutos es inferior al 20 % de la incertidumbre de medida deseada. Esta evaluación debe basarse como mínimo en 10 valores medidos.

La implementación del procedimiento se muestra gráficamente en la Figura 10.

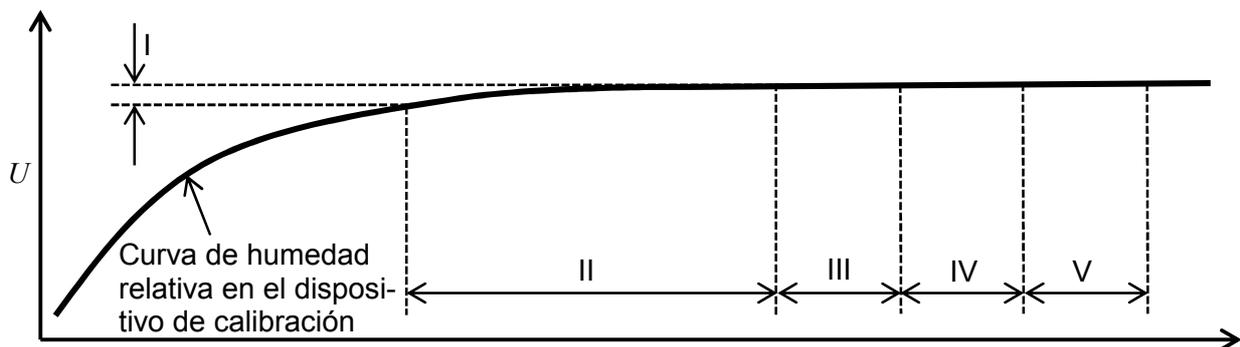


Figura 10: Visualización tiempo de ajuste de la humedad relativa

- I) Criterio para el inicio del tiempo de espera: desviación del valor nominal inferior a 2 % y 0,2 K
- II) Tiempo de espera, al menos 30 minutos
- III) Registro de datos de medición, al menos 10 minutos y 10 valores medidos
- IV) Tiempo de espera, al menos 10 minutos
- V) Registro de datos de medición, al menos 10 minutos y 10 valores medidos

El punto de calibración deseado se ajusta en el dispositivo de calibración. El primer tiempo de espera comienza a partir del momento en que el valor de referencia del dispositivo de calibración se ha acercado suficientemente al valor nominal; aquí, la aproximación del valor de referencia es de 0,2 K (temperatura) y 2 % (humedad relativa) del valor nominal. Después de un tiempo de espera de 30 minutos (intervalo temporal II), se efectúa una primera medición de 10 minutos con al menos 10 valores de medición (intervalo temporal III). Después de un tiempo de espera de otros 10 minutos (intervalo temporal IV), se inicia otro registro de valores medidos (intervalo temporal V). Si el cambio sistemático en la desviación de medición del objeto a calibrar entre los intervalos temporales III y V es inferior al 20 % de la incertidumbre de medida deseada, se ha observado un tiempo suficiente de ajuste. Para asegurar el acoplamiento térmico, el error de medición de las temperaturas entre los intervalos temporales III y V también debe incluirse como criterio adicional.

Entonces, el registro de los valores medidos del intervalo temporal V es el resultado de la calibración. El tiempo de ajuste se calcula a partir de la suma de los tiempos de los intervalos temporales II, III y IV.

Si no se cumplen los criterios para el fin del tiempo de ajuste, se vuelve a realizar otro registro de valores medidos después del intervalo temporal V y se vuelven a verificar los criterios tal y como se ha descrito anteriormente. El tiempo de ajuste se extiende de forma correspondiente. Los tiempos indicados son requisitos mínimos. Para realizar investigaciones detalladas, se recomienda ampliar el intervalo temporal IV de la Figura 10 a 30 minutos como mínimo; véase también Apéndice D Información sobre los sensores electrónicos de humedad.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 49 / 80 |

10 Condiciones ambientales

Preferiblemente, la calibración debería realizarse a una temperatura ambiente estable. El rango de temperatura admisible debe ser definido teniendo en cuenta las especificaciones del equipo de referencia utilizado y debe ser documentado. Si el clima del ambiente interior representa un valor inicial para una calibración, se documentarán la temperatura y la humedad relativa.

Si se requiere la presión absoluta para los cálculos (p. ej. para psicrómetros o factores de mejora), también se debe documentar la presión atmosférica.

La medición de las condiciones ambientales debe realizarse con equipos de medición trazables.

11 Certificado de calibración

El certificado de calibración debe cumplir los requisitos de las normas vigentes (DIN EN ISO/IEC 17025), así como los requisitos adicionales del organismo de acreditación correspondiente o de las organizaciones regionales de metrología. Además, deben indicarse los siguientes puntos:

- Proceso de pretratamiento, si es diferente del capítulo 7.2.2 o 8.2.2
- Procedimiento de calibración conforme a esta directriz
- Secuencia de calibración (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D)
- Orden de calibración
- Profundidad de montaje (véase capítulo 9.2)
- Nota acerca de la consideración de la histéresis o la repetibilidad en la incertidumbre de medida
- Temperatura ambiente
- Humedad ambiental, si procede
- Resultados de calibración con indicación de la temperatura
- Indicación de la humedad relativa, incluida la referencia a la saturación por encima del hielo (U_i) o del agua (U_w)

11.1 Resultado de calibración – Ejemplo

Resultados de calibración humedad relativa

| Valores de referencia | | Objeto a calibrar | | Incertidumbre de medida U en % |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Temperatura del gas t en °C | Humedad relativa U_w en % | Valor indicado U en % | Error de medición ΔU en % | |
| 20 | 20,1 | 19,7 | -0,4 | 0,4 |
| 20 | 50,0 | 49,9 | -0,1 | 0,6 |
| 20 | 80,0 | 80,3 | +0,3 | 0,8 |

Los resultados de la medición se muestran en el orden en el que se realizó la calibración.

Tabla 3: Ejemplo para la especificación de los resultados de calibración

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 50 / 80 |

12 Bibliografía

- [1] DKD, Richtlinie DKD-R 5-1: Kalibrierung von Widerstandsthermometern, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig y Berlin, Edición 09/2018, Revisión 0.
- [2] DKD, Richtlinie DKD-R 5-3: Kalibrierung von Thermoelementen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig y Berlin, Edición 09/2018, Revisión 0.
- [3] VDI/VDE 3514, Blatt 1: Gasfeuchtemessung; Kenngrößen und Formelzeichen, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2016.
- [4] VDI/VDE 3514, Blatt 2: Gasfeuchtemessung; Messverfahren, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013.
- [5] DKD, Leitfaden DKD-L 5-1: Feuchtekenngößen und Berechnungsgleichungen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig y Berlin, (se está elaborando).
- [6] DKD, Richtlinie DKD-R 6-1: Kalibrierung von Druckmessgeräten, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig y Berlin, Edición 03/2014, Revisión 2.
- [7] DKD, Richtlinie DKD-R 5-6: Bestimmung von Thermometerkennlinien, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig y Berlin, Edición 09/2018, Revisión 0.
- [8] EA-4/02 M: 2013, Ermittlung der Messunsicherheit bei Kalibrierungen (traducción al alemán), DAkkS, Traducción del 06.11.2018.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 51 / 80 |

Apéndice A Balances de incertidumbre – Ejemplos

Calibración en un armario climatizado

Calibración de un higrómetro como objeto de calibración (OC) con sensor capacitivo de polímero como elemento de medición en un armario climatizado a una humedad relativa del 80 % y una temperatura de gas de 20 °C.

Como patrones de referencia se utilizan: un termómetro estándar (TE), un higrómetro de punto de rocío (HPR) con cabezal de medición interno que extrae el gas de la cámara a través de una tubería, así como un instrumento medidor de presión absoluta (MPA). La calibración se realizó según secuencia B2 (véase Capítulo 9.3.4). Después de un acondicionamiento de 3 horas, se formó el valor medio aritmético a partir de 60 valores individuales a lo largo de un período de 10 minutos. La secuencia se divide en 4 pasos.

1. Determinación de la temperatura del gas en el armario climatizado incluyendo su respectiva incertidumbre.
2. Determinación del punto de rocío en el armario climatizado incluyendo su respectiva incertidumbre.
3. Cálculo de la humedad relativa a partir de la temperatura de gas y del punto de rocío y la incertidumbre correspondiente.
4. Determinación de la humedad relativa del objeto a calibrar y de su respectivo error de medición, así como la determinación de su respectiva incertidumbre de medida.

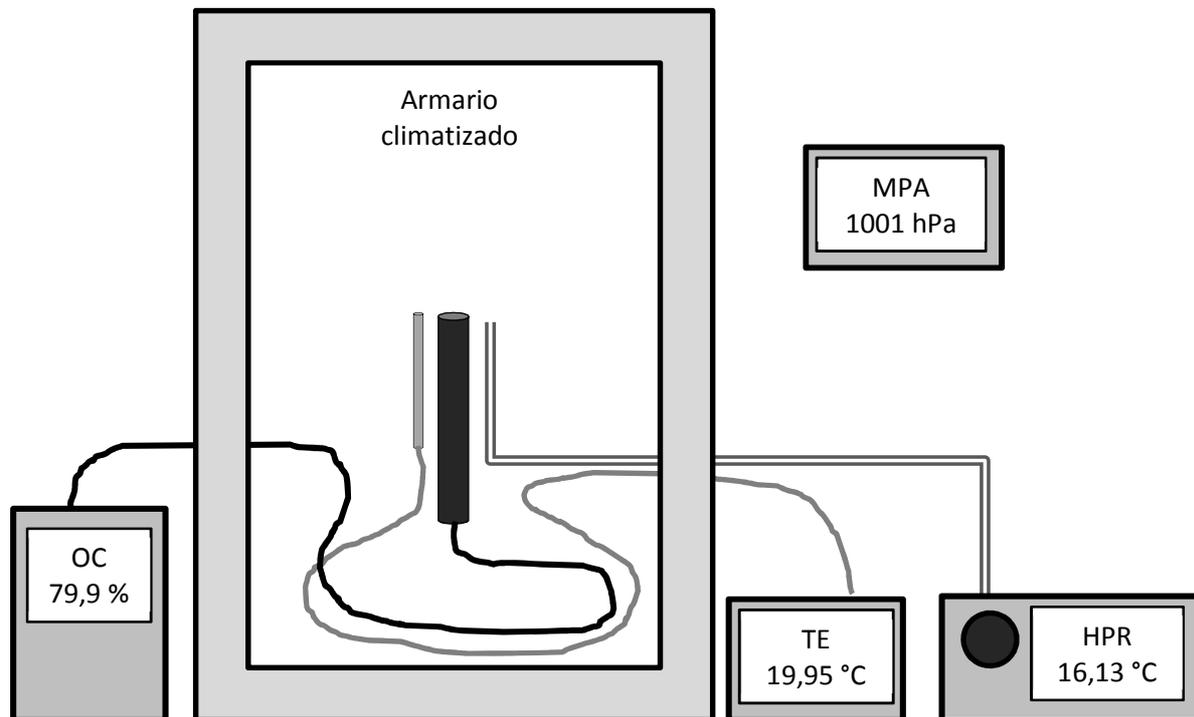


Figura 11: Esquema de la configuración de calibrado

Profundidad de montaje

El sensor externo del objeto a calibrar está completamente instalado en el armario climatizado, incluyendo 1 m de su cable de conexión (medido desde la pared interior de la cámara).

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 52 / 80 |

Paso 1: Temperatura del gas

Balance de incertidumbre de la temperatura del gas; contiene las contribuciones del patrón de referencia y de la cámara climática (armario climatizado).

Ecuación modelo:

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

$T_{i,s}$:

Temperatura medida con el termómetro patrón (60 valores medidos). La contribución a la incertidumbre del Tipo A se determina a partir de la desviación estándar del valor medio de las lecturas del termómetro patrón. Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 19,95 °C y 10 mK para la desviación estándar del valor medio.

δT_{cal} :

Error de medición desconocido del termómetro patrón a causa de la calibración. El dispositivo de medición estándar para la temperatura es un Pt100 con el dispositivo de medición correspondiente. Durante la calibración, se determinó una corrección del termómetro patrón de -0,01 K. Esto se tiene en cuenta en la evaluación.

La incertidumbre U de la desviación de temperatura es la que se encuentra en el certificado de calibración ($U = 20$ mK; distribución normal, $k = 2$). Por lo tanto, la incertidumbre estándar asociada es de 10 mK.

δT_{res} :

Error de medición desconocido a causa de la resolución del termómetro patrón. La resolución del indicador de temperatura del aire es 10 mK. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 5 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 2,9 mK.

δT_{int} :

Error de medición desconocido de la temperatura del termómetro patrón a causa de la interpolación entre los puntos de calibración. Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 20 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 12 mK (véase también DKD-R 5-6, Tabla 6.2 [7]).

δT_{dri} :

Error de medición desconocido de la temperatura del termómetro patrón a causa de la deriva desde la última recalibración. Las últimas calibraciones del patrón dieron como resultado una deriva máxima de 10 mK por año. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 10 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 6 mK.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 53 / 80 |

δT_{con} :

Error de medición desconocido de la temperatura del termómetro patrón a causa de la tecnología de conexión del termómetro patrón. El Pt100 del termómetro patrón se conecta al instrumento de medición correspondiente mediante un circuito de 4 hilos.

Así pues, las contribuciones de la conexión son inferiores a 1 mK. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 1 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,6 mK.

δT_{thv} :

Error de medición desconocido de la temperatura del termómetro patrón por tensiones termoeléctricas parásitas en el circuito de medición del termómetro patrón. El instrumento de medición correspondiente mide la resistencia del termómetro patrón Pt100 con corriente continua alternante y determina el promedio a lo largo de varios períodos de inversión de polaridad. De esta forma se compensan posibles tensiones termoeléctricas parásitas en el circuito de medición.

Por lo tanto, la incertidumbre restante a causa de las tensiones termoeléctricas es inferior a 1 mK. Por eso se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 1 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,6 mK.

δT_{htd} :

Error de medición desconocido a causa de una disipación del calor del termómetro patrón. Dado que el sensor de temperatura del aire del patrón está completamente sumergido y una parte del cable también pasa por el armario climatizado, no es necesario tener en cuenta esta contribución. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0 mK.

δT_{sht} :

Error de medición desconocido por el calentamiento propio del termómetro patrón. Basándose en investigaciones con diferentes intensidades de corriente de medición en las velocidades de flujo utilizadas del sensor de temperatura del aire, se estima una contribución máxima de incertidumbre de 30 mK. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 30 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 17 mK.

δT_{hys} :

Error de medición desconocido por la histéresis del termómetro patrón. Basándose en investigaciones con temperaturas ascendentes y descendentes, se estima una contribución máxima de incertidumbre de 10 mK. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 10 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 6 mK.

δT_{inho} :

Error de medición desconocido por falta de homogeneidad espacial de la temperatura en la cámara climática. El examen del volumen de calibración según el capítulo 6.2.1 mostró una desviación máxima de 0,2 K entre la temperatura en los puntos de medición y la temperatura en el centro del volumen útil. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 200 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 115 mK.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 54 / 80 |

δT_{rad} :

Error de medición desconocido debido a la influencia de la radiación en la medición de la temperatura en la cámara climática. La investigación se llevó a cabo con dos termómetros con diferentes emisividades según el capítulo 6.2.3. Como resultado se obtuvo una desviación máxima de la temperatura entre los dos termómetros de 0,05 K. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 50 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 29 mK.

δT_{insta} :

Error de medición desconocido por la inestabilidad temporal de la temperatura en la cámara climática. El examen del volumen de calibración según capítulo 6.2.2 mostró una desviación máxima de $\pm 0,1$ K de la temperatura del valor medio durante 30 minutos. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 100 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 58 mK.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 4.

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad | Contribución a la incertidumbre |
|---------------------------|--|------------------|-------------------------------|------------------------|--------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ |
| $T_{i,S}$ | Valor medido del patrón de referencia termómetro | 19,95 °C | 0,010 K | 0,010 K | normal | 1 | 1,00 | 0,010 K |
| δT_{cal} | Corrección patrón de referencia de la calibración | -0,010 K | 0,020 K | 0,010 K | normal | 2 | 1,00 | 0,010 K |
| δT_{res} | Resolución patrón de referencia | 0,000 K | 0,005 K | 0,003 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,003 K |
| δT_{int} | Interpolación entre los puntos de calibración | 0,000 K | 0,020 K | 0,012 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,012 K |
| δT_{dri} | Deriva patrón de referencia | 0,000 K | 0,010 K | 0,006 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,006 K |
| δT_{con} | Tecnología de conexión patrón de referencia | 0,000 K | 0,001 K | 0,001 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,001 K |
| δT_{thv} | Tensiones termoelectricas parásitas patrón de referencia | 0,000 K | 0,001 K | 0,001 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,001 K |
| δT_{htd} | Disipación del calor patrón de referencia | 0,000 K | 0,000 K | 0,000 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,000 K |
| δT_{sht} | Calentamiento propio patrón de referencia | 0,000 K | 0,030 K | 0,017 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,017 K |
| δT_{hys} | Histéresis patrón de referencia | 0,000 K | 0,010 K | 0,006 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,006 K |
| δT_{inbo} | Falta de homogeneidad espacial cámara climática | 0,000 K | 0,200 K | 0,115 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,115 K |
| δT_{rad} | Efectos de la radiación | 0,000 K | 0,050 K | 0,029 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,029 K |
| δT_{insta} | Inestabilidad temporal cámara climática | 0,000 K | 0,100 K | 0,058 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,058 K |
| T_S | Temperatura en la cámara climática | 19,940 °C | | | | | $u = 0,135$ K | |

Tabla 4: Balance de incertidumbre para la temperatura en la cámara climática

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 55 / 80 |

Paso 2: Temperatura del punto de rocío

Balance de incertidumbre de la temperatura del punto de rocío incluyendo las contribuciones del patrón de referencia y del armario climatizado.

Ecuación modelo:

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

$T_{d,i,S}$:

Punto de rocío medido con el higrómetro de punto de rocío (patrón) (60 valores medidos). La contribución a la incertidumbre tipo A se determina a partir de la desviación estándar del valor medio de las lecturas del higrómetro de punto de rocío (patrón). Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 16,19 °C y 10 mK para la desviación estándar del valor medio.

$\delta T_{d,cal}$:

Error de medición desconocido del higrómetro de punto de rocío (patrón) debido a la calibración. Durante la calibración, se detectó una corrección del higrómetro de punto de rocío (patrón) -0,02 K. Ésta se va a corregir en la evaluación.

La incertidumbre U de la desviación del punto de rocío se toma del certificado de calibración ($U = 50$ mK; distribución normal, $k = 2$). Por lo tanto, la incertidumbre estándar asociada es de 25 mK.

$\delta T_{d,res}$:

Error de medición desconocido a causa de la resolución del higrómetro de punto de rocío (patrón). La resolución de la indicación del punto de rocío es de 10 mK. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 5 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 2,9 mK.

$\delta T_{d,int}$:

Error de medición desconocido del punto de rocío del higrómetro de punto de rocío (patrón) a causa de la interpolación entre los puntos de calibración. Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 20 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 12 mK.

$\delta T_{d,dri}$:

Error de medición desconocido del punto de rocío del higrómetro de punto de rocío (patrón) causado por la deriva desde su última recalibración. Las últimas calibraciones del patrón dieron como resultado una deriva máxima de 50 mK por año. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 50 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 29 mK.

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 56 / 80 |

$\delta T_{d,rep}$:

Error de medición desconocido a causa de la repetibilidad del higrómetro de punto de rocío (patrón). Estudios con punto de rocío estable y ajuste repetido del higrómetro de punto de rocío (patrón) demuestran que la repetibilidad puede ser de hasta 50 mK. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 50 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 29 mK.

$\delta T_{d,Tdep}$:

Error de medición desconocido causado por la dependencia de la medición del higrómetro de punto de rocío (patrón) de la temperatura ambiente. Estudios con un punto de rocío fijo a diferentes temperaturas ambiente han demostrado que el higrómetro de punto de rocío (patrón) tiene una dependencia de la temperatura ambiente del punto de rocío de 5 mK / K ($c_{Td} = 5 \text{ mK/K}$). El higrómetro de punto de rocío (patrón) ha sido calibrado en pasos de 10 K, a diferentes temperaturas del ambiente. Por lo tanto, cada una de estas calibraciones cubre un rango de temperatura ambiente de $\pm 5 \text{ K}$. Así que se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 5 K. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 2,9 K y la contribución de incertidumbre estándar al punto de rocío es de 14 mK.

δp_{C-M} :

Error de medición desconocido causado por una caída de presión en la línea de medición hacia el higrómetro de punto de rocío (patrón). Estudios demuestran que la caída de presión en el flujo de gas presente es de 5 mbar como máximo, con una incertidumbre de 1 mbar. A una temperatura de punto de rocío de 16 °C, el coeficiente de sensibilidad para el punto de rocío en función de la presión en el espejo es de $c_p = 15,6 \text{ mK/mbar}$. La caída de presión de 5 mbar se corrige con +0,078 K en la evaluación de la temperatura del punto de rocío. La contribución a la incertidumbre de 1 mbar se calcula como una contribución distribuida rectangularmente. La incertidumbre estándar asociada es de 0,6 mbar y la contribución de incertidumbre estándar al punto de rocío es de 9 mK.

$\delta T_{d,inho}$:

Error de medición desconocido debido a la falta de homogeneidad espacial del punto de rocío en la cámara climática. El aire de la cámara climática está circulando. Por consiguiente, el punto de rocío es espacialmente homogéneo. De estudios realizados con el higrómetro de punto de rocío (patrón) se desprende que el punto de rocío el punto de rocío no se desvía localmente en más de 50 mK del valor en el centro del volumen útil. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 50 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 29 mK.

$\delta T_{d,inst}$:

Error de medición desconocido por la inestabilidad del punto de rocío en la cámara climática. El examen del volumen de calibración con el higrómetro de punto de rocío (patrón) mostró una desviación máxima del valor medio de $\pm 0,1 \text{ K}$ a lo largo de 30 minutos. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 100 mK. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 58 mK.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 5.

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad-koeffizient | Contribución a la incertidumbre | |
|---------------------|--|-----------------|-------------------------------|------------------------|--------------|------------|--|---------------------------------|--|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ | |
| $T_{d,s}$ | Valor medido patrón de referencia espejo refrigerado | 16,19 °C | 0,010 K | 0,010 K | normal | 1 | 1,00 | 0,010 K | |
| $\delta T_{d,cal}$ | Corrección espejo refrigerado de la calibración | -0,020 K | 0,050 K | 0,025 K | normal | 2 | 1,00 | 0,025 K | |
| $\delta T_{d,res}$ | Resolución valores medidos patrón de referencia | 0,000 K | 0,005 K | 0,003 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,003 K | |
| $\delta T_{d,int}$ | Interpolación entre los puntos de calibración | 0,000 K | 0,020 K | 0,012 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,012 K | |
| $\delta T_{d,dri}$ | Deriva patrón de referencia | 0,000 K | 0,050 K | 0,029 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,029 K | |
| $\delta T_{d,rep}$ | Repetibilidad medición del punto de rocío | 0,000 K | 0,050 K | 0,029 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,029 K | |
| $\delta T_{d,Tdep}$ | Dependencia de la temperatura cabezal de medición espejo refrigerado | 0,000 K | 5,000 K | 2,887 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,005 K/K | 0,014 K | |
| δp_{C-M} | Caída de presión en la línea de medición | 0,078 K | 1,000 mbar | 0,58 mbar | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,0156 K/mbar | 0,009 K | |
| $\delta T_{d,inho}$ | Falta de homogeneidad espacial cámara climática | 0,000 K | 0,050 K | 0,029 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,029 K | |
| $\delta T_{d,inst}$ | Inestabilidad temporal cámara climática | 0,000 K | 0,100 K | 0,058 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,058 K | |
| $T_{d,s}$ | Temperatura del punto de rocío en la cámara climática | 16,248 K | | | | | $u = 0,084 K$ | | |

Tabla 5: Balance de incertidumbre de la temperatura de punto de rocío en la cámara climática⁸

⁸ Si es necesario, la incertidumbre de medida del punto de rocío también puede indicarse en °C en vez de indicarla en K. Esto no cambia su valor numérico. Es preferible utilizar la unidad K para las incertidumbres de medida de temperaturas y puntos de rocío o de congelación.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 58 / 80 |

Paso 3: Cálculo de la humedad relativa

A partir de las temperaturas del gas y del punto de rocío determinadas que se muestran en las Tabla 4 y Tabla 5, y de la presión absoluta del ADM, la humedad relativa en la cámara climática se calcula utilizando la siguiente ecuación (16):

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

El error desconocido $\delta U_{w,S}$ de la humedad relativa calculada se representa mediante la siguiente ecuación modelo:

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

δT_S :

Temperatura del gas medido con el termómetro patrón. La incertidumbre de la temperatura del gas se obtiene como resultado del sub-balance según Tabla 4. La contribución tiene una distribución normal y la incertidumbre estándar asociada es de 0,135 K. El coeficiente de sensibilidad correspondiente a 20 °C y 79,3 % es $c_T = 4,92 \% / K$.

$\delta T_{d,S}$:

Punto de rocío medido con el higrómetro de punto de rocío (patrón). La incertidumbre del punto de rocío se obtiene como resultado del sub-balance según Tabla 5. La contribución tiene una distribución normal y la incertidumbre estándar asociada es de 0,084 K. El coeficiente de sensibilidad correspondiente a 20 °C y 79,3 % es $c_{Td} = 5,06 \% / K$.

δp_C ; δp_S :

La presión absoluta sólo se incluye en los factores de mejora. Los coeficientes de sensibilidad correspondientes son muy pequeños por lo que estas contribuciones pueden obviarse.

$\delta U_{S,A}$:

Cálculo de la humedad relativa a partir de la temperatura del gas y del punto de rocío. La incertidumbre de la ecuación de presión del vapor utilizado para la presión del vapor saturado (calculado a partir de la temperatura del gas) o para la presión parcial de vapor de agua (calculado a partir de la temperatura del punto de rocío) es del 0,02 % respectivamente (véase DKD-L 5-1 [5]) y es, por lo tanto, claramente inferior a la resolución utilizada del resultado del cálculo de 0,1 %. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 %. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,06 %.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 6.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 59 / 80 |

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad | Contribución a la incertidumbre |
|------------------|--|----------------|-------------------------------|------------------------|--------------|------------|--------------------------------|---------------------------------|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ |
| δT_s | Temperatura en la cámara climática | 19,940 °C | 0,135 K | 0,135 K | normal | 1 | 4,92 %/K | 0,66 % |
| $\delta T_{d,s}$ | Temperatura del punto de rocío en la cámara climática | 16,248 °C | 0,084 K | 0,084 K | normal | 1 | 5,06 %/K | 0,42 % |
| $\delta U_{s,A}$ | Error de fórmula / redondeo humedad relativa calculada | 0,00 % | 0,10 % | 0,058 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,06 % |
| $U_{w,s}$ | Humedad relativa en la cámara climática | 79,28 % | | | | | $u = 0,79 %$ | |

Tabla 6: Balance de incertidumbre para la humedad relativa calculada en la cámara climática

Paso 4: Resultado de calibración

La desviación de la humedad relativa indicada por el objeto a calibrar respecto a la humedad de referencia medida en la cámara climática representa el resultado de la calibración.

La incertidumbre de la humedad de referencia y las contribuciones a la incertidumbre del objeto a calibrar serán asignadas al resultado de la calibración.

Partiendo de una distribución normal y multiplicando la incertidumbre de medida estándar por el factor de cobertura $k = 2$, se obtiene la incertidumbre expandida U .

La ecuación modelo para el resultado de la calibración será la siguiente (desviación del objeto a calibrar):

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

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

Incertidumbre del valor de referencia de la humedad (medido con el termómetro patrón y el higrómetro patrón en la cámara climática). La incertidumbre de la humedad de referencia se obtiene como resultado del sub-balance según Tabla 6. Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,79 %.

$U_{i,X}$:

Humedad relativa medida con el objeto a calibrar (sensor de humedad capacitivo) (60 valores medidos). La contribución a la incertidumbre del tipo A se determina a partir de la desviación estándar del valor medio de las lecturas del sensor de humedad capacitivo. Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 79,9 % y de 0,04 % para la desviación estándar del valor medio.

$\delta U_{res,X}$:

Error de medición desconocido debido a la resolución del objeto a calibrar. La resolución del indicador de la humedad relativa es de 0,1 %. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 %. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,03 %.

$\delta T_{htd,X}$:

Error de medición desconocido causado por la disipación de calor del objeto a calibrar. Dado que el sensor del objeto a calibrar está completamente instalado, incluyendo 1 m de su cable

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 60 / 80 |

de conexión, se ignora esta contribución y se estima en 0,0 K. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,0 K. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,0 K. El coeficiente de sensibilidad correspondiente a 20 °C y 79,3 % es $c_T = 4,92 \text{ \%}/\text{K}$.

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

Error de medición desconocido causado por el calentamiento propio del objeto a calibrar. El calentamiento propio se examina según Capítulo 7.4.3 y se estima en 0,1 K como máximo. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 K. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,06 K. El coeficiente de sensibilidad correspondiente a 20 °C y 79,3 % es $c_T = 4,92 \text{ \%}/\text{K}$.

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

Error de medición desconocido por la histéresis del objeto a calibrar. La calibración se realizó según Secuencia B2. Esta secuencia no incluye la investigación de una posible histéresis. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,0 %. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,0 %.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 7.

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad | Contribución a la incertidumbre |
|---------------------------|---|----------------|---|------------------------|--------------|------------|---|---------------------------------|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ |
| $U_{i,X}$ | Indicación de la humedad objeto a calibrar | 79,9 % | 0,04 % | 0,04 % | normal | 1 | 1,00 | 0,04 % |
| $\delta U_{\text{res},X}$ | Resolución de la indicación de la humedad del objeto a calibrar | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,03 % |
| $\delta T_{\text{htd},X}$ | Disipación del calor del objeto a calibrar | 0,0 % | 0,00 K | 0,00 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 4,92 %/K | 0,00 % |
| $\delta T_{\text{sht},X}$ | Calentamiento propio del objeto a calibrar | 0,0 % | 0,10 K | 0,06 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 4,92 %/K | 0,28 % |
| $\delta U_{\text{hys},X}$ | Histéresis objeto a calibrar | 0,0 % | 0,00 % | 0,00 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,00 % |
| $U_{w,S}$ | Humedad relativa en la cámara climática | 79,28 % | 0,79 % | 0,79 % | normal | 1 | 1,00 | 0,79 % |
| AU_X | Desviación de la indicación objeto a calibrar | 0,6 % | $U = 1,7 \text{ \%}$ ($k = 2$) | | | | $u = 0,84 \text{ \%}$ | |

Tabla 7: Balance de incertidumbre de la humedad relativa resultado de calibración

A 20 °C y 79,3 %, el higrómetro muestra una desviación de la indicación de +0,6 %, con una incertidumbre de medida expandida⁹ U (suponiendo una distribución normal y el factor de cobertura $k = 2$) de 1,7 %.¹⁰

⁹ La variable U d de la humedad relativa no debe confundirse con la variable U de la incertidumbre expandida. El significado de la variable utilizada debe comprobarse caso por caso.

¹⁰ Alternativamente, se puede utilizar la corrección de la indicación en lugar de la desviación de la indicación. Esta se distingue de la desviación sólo por el signo. En el ejemplo anterior, el resultado de la calibración sería entonces: "El higrómetro tiene una corrección de 0,6 % a 20 °C y 79,9 %, con una incertidumbre expandida U (suponiendo una distribución normal y el factor de cobertura $k = 2$) de 1,7 %."

Para el usuario del higrómetro, la ventaja de utilizar la corrección de la visualización consiste en que se puede determinar el mejor valor estimado de la humedad medida mediante la adición de la corrección a la humedad visualizada del higrómetro.

Calibración en un generador de gas mixto

Calibración de un higrómetro con sensor capacitivo de polímero como elemento medidor en un generador de gas mixto a una humedad relativa del 50 % y una temperatura del gas de 23 °C.

Un sensor resistivo-electrolítico (PdT1) y un sensor capacitivo de polímero (PdT2) se utilizan como patrones de trabajo (PdT). La calibración se realizó según secuencia B1 (véase Capítulo 9.3.3). Después de un acondicionamiento de 2 horas, se formó el valor medio aritmético a partir de 60 valores individuales a lo largo de un período de 10 minutos. La secuencia se divide en 2 pasos.

1. Determinación de la humedad relativa en la cámara del generador de gas mixto.
2. Determinación de la humedad relativa del objeto a calibrar y su error de medición, así como la determinación de la respectiva incertidumbre de medida.

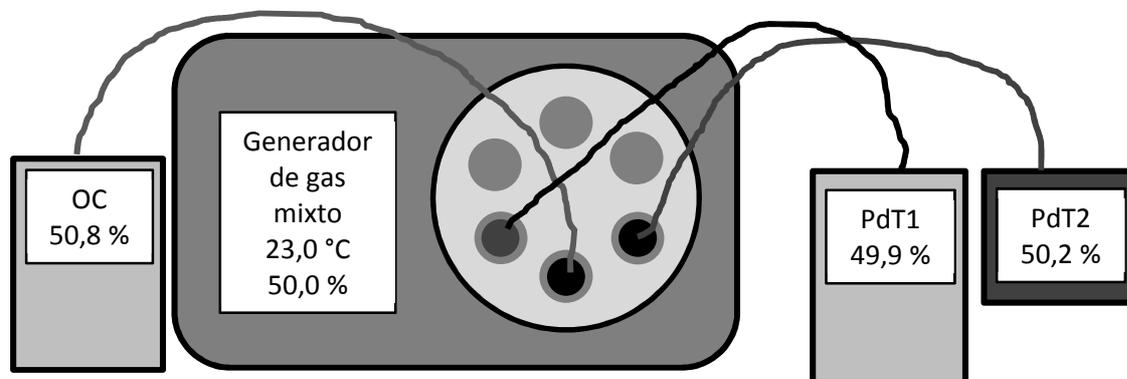


Figura 12: Esquema de la configuración de calibrado

Profundidad de montaje

El sensor externo del objeto a calibrar tiene una profundidad de 15 cm (medido desde el borde interior de la tapa del generador de gas mixto)

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 62 / 80 |

Paso 1: Valor de referencia de la humedad en el generador de gas mixto

Determinación del valor de referencia de la humedad en la cámara climática del generador de gas mixto, medido con los patrones de referencia.

Ecuación modelo:

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

Los coeficientes de sensibilidad c_{S1} y c_{S2} se calculan de la siguiente manera:

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

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

Esta ecuación modelo se aplica si las contribuciones (calibración, resolución, interpolación, deriva e histéresis) de los dos higrómetros patrones pueden considerarse no correlacionados. Esto se cumple aproximadamente, por ejemplo, si ambos higrómetros patrones no fueron calibrados al mismo tiempo por el mismo laboratorio de calibración utilizando los mismos patrones. Lo ideal sería que las fechas de calibración de ambos patrones se seleccionen de forma que se compensen entre sí - es decir, que sean aplazadas por la mitad del período de calibración.

Al utilizar diferentes métodos de medición de los patrones de trabajo (p.ej. capacitivo y resistivo-electrolítico) o sensores de humedad de diferentes fabricantes, la deriva y la histéresis no están correlacionadas o lo están en una medida muy reducida.

Otra posibilidad sería evitar que los dos patrones se utilicen juntos de forma permanente en las calibraciones; de este modo, no quedarán expuestos constantemente a influencias idénticas.¹¹

Para las contribuciones de ambos patrones que se consideran correlacionadas por no cumplir con estas condiciones, los coeficientes de sensibilidad correspondientes para cada patrón no se deben fijar en 0,5, sino en $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$! (véase también EA-4/02 M: 2013 Apéndice D [8])

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

$U_{i,S}$:

El valor medio de las lecturas de humedad relativa de los dos patrones de referencia corregidas con las correspondientes correcciones de indicación se determina a partir de todas las mediciones individuales de los higrómetros patrones (60 valores medidos cada uno). La contribución a la incertidumbre del tipo A se determina a partir de la desviación estándar del

¹¹ Por lo tanto, se recomienda:

- tener a su disposición más de 2 higrómetros patrones (se recomienda diversidad)
- coger del conjunto de dispositivos una combinación diferente de higrómetros patrones para cada nueva calibración
- dejar recalibrar todos los higrómetros patrones individualmente (si es necesario también en diferentes laboratorios)

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 63 / 80 |

valor medio de las lecturas del higrómetro patrón. Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 50,1 % y 0,04 % para la desviación estándar del valor medio.

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

Error de medición desconocido de los higrómetros patrones debido a su calibración. En el caso de los higrómetros patrones se trata de sensores de humedad resistivos-electrolíticos o capacitivos con sus respectivos dispositivos de medición. Antes de calcular el valor medio de ambos higrómetros, se corrige la indicación de cada higrómetro patrón utilizando la corrección de indicación del certificado de calibración correspondiente. La incertidumbre U de la desviación de la humedad relativa se toma del certificado de calibración ($U = 0,6$ %; distribución normal, $k = 2$). Por lo tanto, la incertidumbre estándar atribuida es del 0,3 %.

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

Error de medición desconocido debido a la resolución de los higrómetros patrones. La resolución de la indicación de la humedad relativa es de 0,1 %. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 %. Entonces, la incertidumbre estándar asociada es de 0,03 %.

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

Error de medición desconocido de la indicación de la humedad relativa de los higrómetros patrones causado por la interpolación entre los puntos de calibración.

Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,25 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,14 %.

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

Error de medición desconocido de la humedad relativa promedio de los higrómetros patrones debido a la deriva desde la última recalibración. Las últimas calibraciones de los patrones mostraron una deriva máxima de los higrómetros patrones de 2,0 % al año. Para cada patrón, esta deriva representa una contribución distribuida de forma rectangular con una anchura media de 2,0 %. La incertidumbre estándar asociada es de 1,2 %.

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

Error de medición desconocido de la indicación de la humedad relativa debido a una posible histéresis. Un examen realizado según secuencia de calibración A1 sólo mostró efectos de histéresis menores en ambos higrómetros. Dado que se ha seleccionado la secuencia de calibración B1, cada punto de calibración se aproxima sólo con humedad relativa ascendente. En este caso, la histéresis se corrige de forma correspondiente sobre la base de las investigaciones (pero puede que haya que considerarla para otros procesos).

Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,0 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,0 %.

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

Error de medición desconocido de los higrómetros patrones debido a la diferencia de la indicación de ambos higrómetros. La diferencia de humedad relativa observada entre los dos higrómetros patrones no debe ser superior a $\pm 0,42$ % ($\cong 0,7 \cdot U_{cal,S}$). Si la diferencia se encuentra fuera de estos límites, deberán repetirse las observaciones y/o investigarse de forma más detallada las causas de las grandes diferencias detectadas.

Ambos higrómetros muestran una diferencia de indicación de 0,3 %. Esto significa que el criterio se ha cumplido; el valor medio de las indicaciones se utiliza como valor de referencia. Mientras que la diferencia entre las lecturas de ambos higrómetros patrones sea claramente menor que la incertidumbre de la calibración de los higrómetros patrones, no deberá tenerse

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 64 / 80 |

en cuenta ninguna contribución adicional a la incertidumbre para el valor medio. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,0 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,0 %.¹²

δU_{Tdep} :

Error de medición desconocido debido a la dependencia de la medición de la humedad de los higrómetros patrones de la temperatura del gas. La humedad relativa de los higrómetros patrones fue calibrado en varios puntos a 15 °C y 25 °C. Entre ellos, se realiza una interpolación. A causa de la interpolación, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,35 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,20 %.¹³

δT_{htd} :

Error de medición desconocido debido a la disipación del calor de los higrómetros patrones. Dado que los sensores de los patrones no se sumergen completamente, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 K. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 K. A 23 °C y 50,1 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_T = 3,03 \%/K$.

δT_{shf} :

Error de medición desconocido debido al calentamiento propio de los higrómetros patrones. Sobre la base de investigaciones respecto a las velocidades de flujo (velocidad de entrada) de los higrómetros patrones utilizados, se estima una contribución máxima a la incertidumbre de 0,1 K. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 K. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 K. A 23 °C y 50,1 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_T = 3,03 \%/K$.

δT_{inho} :

Error de medición desconocido debido a la falta de homogeneidad espacial de la humedad relativa en la cámara climática. La investigación del volumen de calibración se realizó conforme al Capítulo 6.2.1, para las magnitudes de temperatura y temperatura del punto de rocío (humedad absoluta). La desviación máxima de la temperatura en los lugares de medición de la temperatura en el centro del volumen útil era de $\pm 0,2$ K. No se detectó ninguna heterogeneidad espacial de la temperatura del punto de rocío entre los puntos de medición. Por lo tanto, la falta de homogeneidad espacial de la humedad relativa sólo se tiene en cuenta para la magnitud de temperatura. Por consiguiente, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 200 mK. La incertidumbre estándar asociada es de 115 mK. A 23 °C y 50,1 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_T = 3,03 \%/K$.

δT_{rad} :

Error de medición desconocido debido a la influencia de la radiación sobre la medición de la temperatura en la cámara climática. La investigación se llevó a cabo utilizando dos termómetros con diferentes emisividades de acuerdo con el Capítulo 6.2.3. El resultado fue una desviación máxima de la temperatura de 0,05 K. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 50 mK. La incertidumbre estándar

¹² Si la desviación de las indicaciones de ambos patrones es más de 0,7 veces mayor que la incertidumbre expandida de calibración de los patrones y si no se investigan las causas y no se repiten las mediciones, la diferencia de las indicaciones de ambos patrones ha de considerarse como anchura media de la distribución rectangular de $\delta U_{i,S1-2}$.

¹³ Si los higrómetros patrones son de diferentes tipos, se puede asumir un comportamiento no correlacionado (véase contribuciones a la calibración, deriva, ...).

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 65 / 80 |

asociada es de 29 mK. A 23 °C y 50,1 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_T = 3,03 \text{ \%}/\text{K}$.

δU_{inst} :

Error de medición desconocido debido a la inestabilidad de la humedad relativa en la cámara climática. La investigación del volumen de calibración según Capítulo 6.2.2.2 dio como resultado una desviación máxima de la humedad relativa del valor medio de $\pm 0,3 \text{ \%}$ a lo largo de 30 minutos. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,3 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,17 %.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 8.

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad | Contribución a la incertidumbre |
|----------------------------|--|----------------|-------------------------------|------------------------|--------------|------------|---|---------------------------------|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ |
| $U_{i,S}$ | Valor medio de las lecturas corregidas de los patrones | 50,1 % | 0,04 % | 0,04 % | normal | 1 | 1,00 | 0,04 % |
| $\delta U_{\text{cal},S1}$ | Calibración Patrón 1 | 0,0 % | 0,60 % | 0,30 % | normal | 2 | 0,50 | 0,15 % |
| $\delta U_{\text{cal},S2}$ | Calibración Patrón 2 | 0,0 % | 0,60 % | 0,30 % | normal | 2 | 0,50 | 0,15 % |
| $\delta U_{\text{res},S1}$ | Resolución valores medidos Patrón 1 | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,01 % |
| $\delta U_{\text{res},S2}$ | Resolución valores medidos Patrón 2 | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,01 % |
| $\delta U_{\text{int},S1}$ | Interpolación entre los puntos de calibración Patrón 1 | 0,0 % | 0,25 % | 0,14 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,07 % |
| $\delta U_{\text{int},S2}$ | Interpolación entre los puntos de calibración Patrón 2 | 0,0 % | 0,25 % | 0,14 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,07 % |
| $\delta U_{\text{dri},S1}$ | Deriva del Patrón 1 | 0,0 % | 2,00 % | 1,15 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,58 % |
| $\delta U_{\text{dri},S2}$ | Deriva del Patrón 2 | 0,0 % | 2,00 % | 1,15 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,58 % |
| $\delta U_{\text{hys},S1}$ | Histéresis Patrón 1 | 0,0 % | 0,00 % | 0,00 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,00 % |
| $\delta U_{\text{hys},S2}$ | Histéresis Patrón 2 | 0,0 % | 0,00 % | 0,00 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 0,50 | 0,00 % |
| $\delta U_{i,S1-2}$ | Diferencia entre ambos patrones | 0,0 % | 0,00 % | 0,00 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,00 % |
| $\delta U_{T\text{dep}}$ | Dependencia de la temperatura medición de la humedad | 0,0 % | 0,35 % | 0,20 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,20 % |
| δT_{htd} | Disipación del calor | 0,0 % | 0,10 K | 0,06 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 3,03 %/K | 0,17 % |
| δT_{sht} | Calentamiento propio | 0,0 % | 0,10 K | 0,06 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 3,03 %/K | 0,17 % |
| δT_{inho} | Falta de homogeneidad cámara climática | 0,0 % | 0,20 K | 0,12 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 3,03 %/K | 0,35 % |
| δT_{rad} | Efectos de la radiación | 0,0 % | 0,05 K | 0,03 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 3,03 %/K | 0,09 % |
| δU_{inst} | Inestabilidad temporal cámara de calibración | 0,0 % | 0,30 % | 0,17 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,17 % |
| $U_{w,S}$ | Humedad relativa en la cámara de calibración | 50,1 % | | | | | $u = 0,99 \text{ \%}$ | |

Tabla 8: Balance de incertidumbre de la humedad relativa en el generador de gas mixto (medida con los termómetros patrones)

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 66 / 80 |

Paso 2: Resultado de calibración

La desviación de la humedad relativa visualizada por el objeto de calibración respecto a la humedad de referencia medida en el generador de gas mixto representa el resultado de la calibración.

La incertidumbre de la humedad de referencia y las contribuciones de incertidumbre del objeto a calibrar se asignan al resultado de la calibración.

Asumiendo una distribución normal y multiplicando la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$, se obtiene la incertidumbre expandida U .

La ecuación modelo para el resultado de la calibración será la siguiente:

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

$U_{w,S}$:

Incertidumbre del valor de referencia de la humedad medido en la cámara climática utilizando los higrómetros patrones. La incertidumbre de la humedad de referencia es el resultado del sub-balance correspondiente según Tabla 8. Se supone que la contribución está distribuida normalmente y la incertidumbre estándar asociada es de 1,0 %.

$U_{i,X}$:

Humedad relativa medida con el objeto a calibrar (sensor de humedad capacitivo) (60 valores medidos). La contribución a la incertidumbre tipo A se determina a partir de la desviación estándar del valor medio de las lecturas del sensor de humedad capacitivo. Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 50,8 % y de 0,04 % para la desviación estándar del valor medio.

$\delta U_{res,X}$:

Error de medición desconocido debido a la resolución del objeto a calibrar. La resolución de la indicación de la humedad relativa es de 0,1 %. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,03 %.

$\delta T_{htd,X}$:

Error de medición desconocido debido a la disipación del calor del objeto a calibrar. Dado que el sensor del objeto a calibrar tiene una longitud de 15 cm y no está sumergido por completo, esta contribución se estima sobre la base de investigaciones a 0,1 K como máximo. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 K. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 K. A 23 °C y 50 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_T = 3,03 \text{ \%}/\text{K}$.

$\delta T_{sh,t,X}$:

Error de medición desconocido debido al calentamiento propio del objeto a calibrar. El calentamiento propio se examina conforme a Capítulo 7.4.3 y se estima a 0,1 K como máximo. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 K. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 K. A 23 °C y 50 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_T = 3,03 \text{ \%}/\text{K}$.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 67 / 80 |

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

Error de medición desconocido a causa de la histéresis del objeto a calibrar. La calibración se realizó según Secuencia B1. Una posible histéresis no se toma en cuenta. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,0 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,0 %.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 9.

| Magnitud X_i | Denominación X_i | Valor estimado x_i | Error de medición desconocido δx_i | Incertidumbre estándar $u(x_i)$ | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|---------------------------|---|-------------------------|---|------------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| $U_{i,X}$ | Indicación de la humedad objeto a calibrar | 50,8 % | 0,04 % | 0,04 % | normal | 1 | 1,00 | 0,04 % |
| $\delta U_{\text{res},X}$ | Resolución de la indicación de la humedad objeto a calibrar | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,03 % |
| $\delta T_{\text{htd},X}$ | Disipación del calor objeto a calibrar | 0,0 % | 0,10 K | 0,06 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 3,03 %/K | 0,17 % |
| $\delta T_{\text{sht},X}$ | Calentamiento propio objeto a calibrar | 0,0 % | 0,10 K | 0,06 K | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 3,03 %/K | 0,17 % |
| $\delta U_{\text{hys},X}$ | Histéresis objeto a calibrar | 0,0 % | 0,00 % | 0,00 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,00 % |
| $U_{w,S}$ | Humedad relativa en la cámara de calibración | 50,1 % | 0,99 % | 0,99 % | normal | 1 | 1,00 | 0,99 % |
| ΔU_X | Error de medición del objeto a calibrar | 0,7 % | $U = 2,0 \%$ ($k = 2$) | | | $u = 1,02 \%$ | | |

Tabla 9: Balance de incertidumbre del resultado de calibración

A 23 °C y 50,8 %, el higrómetro tiene una desviación de la indicación de +0,7 %, con una incertidumbre expandida U (partiendo de una distribución normal y con el factor de cobertura $k = 2$) de 2,1 %.¹⁴

¹⁴ Alternativamente, se puede utilizar la corrección de la indicación en lugar de la desviación de la indicación. Esta se distingue de la desviación sólo por el signo. En el ejemplo anterior, el resultado de la calibración sería entonces: "El higrómetro tiene una corrección de -0,7 % a 23 °C y 50,8 %, con una incertidumbre expandida U (suponiendo una distribución normal y el factor de cobertura $k = 2$) de 2,1 %."

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 68 / 80 |

Calibración en un generador de humedad de dos presiones

Calibración de un higrómetro con sensor capacitivo de polímero como elemento de medición en un generador de humedad de 2 presiones con una humedad relativa del 75 % y una temperatura del gas de 22 °C. El generador de humedad se calibró con respecto a la desviación de la indicación de la magnitud “humedad relativa”. La indicación sirve como patrón de referencia. La calibración se realizó según la Secuencia A1 (véase Capítulo 9.3.1). La calibración se realizó primero hacia arriba y luego hacia abajo. Después de un tiempo de 2 horas, se formó el promedio aritmético de 60 valores individuales tomados durante un período de 10 minutos. La calibración se divide en 2 pasos.

1. Determinación de la humedad relativa en la cámara del generador de humedad.
2. Determinación de la humedad relativa del objeto a calibrar y su error de medición incluyendo la incertidumbre expandida correspondiente.

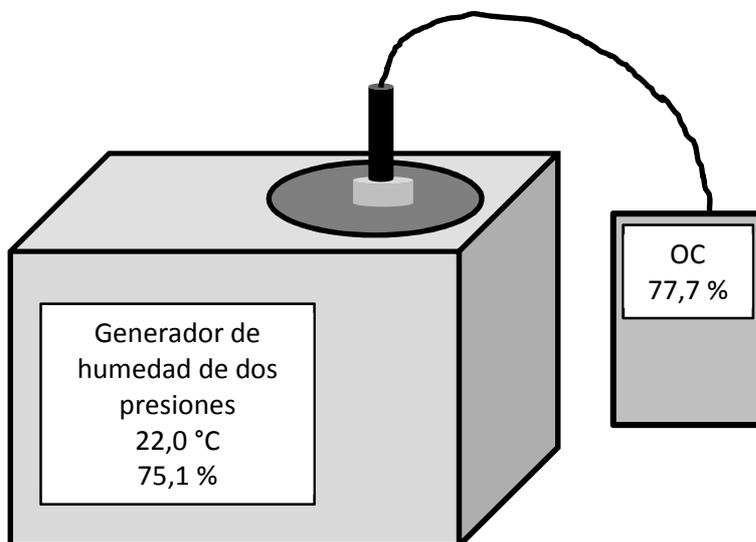


Figura 13: Esquema de la configuración de calibrado

Profundidad de montaje

El sensor externo del objeto a calibrar tiene una profundidad de 5 cm (medido desde el borde interior de la tapa del generador de humedad).

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 69 / 80 |

Paso 1: Patrón de referencia

Ecuación modelo:

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

$U_{i,S}$:

Valor medio de la humedad relativa indicada por el generador de humedad (60 valores medidos). La contribución a la incertidumbre del tipo A se determina a partir de la desviación estándar del valor medio de las lecturas del generador de humedad. Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 75,1 % y de 0,02 % para la desviación estándar del valor medio.

δU_{cal} :

Error de medición desconocido del generador de humedad debido a la calibración. Durante la calibración se determinó una corrección media del generador de humedad de 0,1 %. La incertidumbre U de la desviación relativa de la humedad se toma del certificado de calibración ($U = 0,6$ %; distribución normal, $k = 2$). La incertidumbre estándar asociada es de 0,3 %.

δU_{res} :

Error de medición desconocido debido a la resolución del generador de humedad. La resolución de la indicación de la humedad relativa es de 0,1 %. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,03 %.

δU_{int} :

Error de medición desconocido de la indicación de la humedad relativa del generador de humedad debido a la interpolación entre los puntos de calibración. Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,03 %.

δU_{dri} :

Error de medición desconocido de la humedad relativa del generador de humedad debido a la deriva desde la última recalibración. Las últimas calibraciones del generador mostraron una deriva máxima de 0,2 % al año. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,2 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,12 %.

δt_{inho} :

Error de medición desconocido debido a la falta de homogeneidad espacial de la temperatura en la cámara climática del generador de humedad. El examen del volumen de calibración según el Capítulo 6.2.1 dio como resultado una desviación máxima de 0,05 °C entre la temperatura en los puntos de medición y la temperatura en el centro del volumen útil. Por consiguiente, la falta de homogeneidad espacial de la humedad relativa sólo se tiene en cuenta para la magnitud "temperatura". Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 °C. La incertidumbre estándar asociada es de 0,029 °C. A 22 °C y 75 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_t = 4,58$ %/°C.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 70 / 80 |

δt_{rad} :

Error de medición desconocido debido a la influencia de la radiación en la medición de la temperatura en la cámara de calibración del generador de humedad. La investigación se llevó a cabo utilizando dos termómetros con diferentes emisividades de acuerdo con el Capítulo 6.2.3. La desviación máxima de la temperatura entre los dos termómetros fue de 0,03 °C. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,03 °C. La incertidumbre estándar asociada es de 0,017 °C. A 22 °C y 75 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_t = 4,58 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

δU_{inst} :

Error de medición desconocido debido a la inestabilidad de la humedad relativa en la cámara de calibración. El examen del volumen de calibración según el Capítulo 6.2.2 dio como resultado una desviación máxima de la humedad relativa del valor medio de $\pm 0,1 \text{ \%}$ a lo largo de 30 minutos. Se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 %.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 10.

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad | Contribución a la incertidumbre |
|--------------------------|--|----------------|-------------------------------|------------------------|--------------|------------|---|---------------------------------|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ |
| $U_{i,S}$ | Indicación patrón de referencia generador de humedad | 75,1 % | 0,02 % | 0,02 % | normal | 1 | 1,00 | 0,02 % |
| δU_{cal} | Calibración patrón de referencia | 0,1 % | 0,60 % | 0,30 % | normal | 2 | 1,00 | 0,30 % |
| δU_{res} | Resolución patrón de referencia | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,03 % |
| δU_{int} | Interpolación entre los puntos de calibración | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,03 % |
| δU_{dri} | Deriva patrón de referencia | 0,0 % | 0,20 % | 0,12 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,12 % |
| δt_{inho} | Falta de homogeneidad espacial cámara de calibración | 0,0 % | 0,05 °C | 0,03 °C | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 4,58 %/°C | 0,13 % |
| δt_{rad} | Efectos de la radiación | 0,0 % | 0,03 °C | 0,02 °C | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 4,58 %/°C | 0,08 % |
| δU_{inst} | Inestabilidad temporal cámara de calibración | 0,0 % | 0,10 % | 0,06 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,06 % |
| $U_{w,S}$ | Humedad relativa en la cámara de calibración | 75,2 % | | | | | $u = 0,36 \text{ \%}$ | |

Tabla 10: Balance de incertidumbre de la humedad relativa

| | | | |
|---|---|-----------|---------|
|  | Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa https://doi.org/10.7795/550.20190214ES | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 71 / 80 |

Paso 2: Resultado de calibración

La desviación de la humedad relativa indicada por el objeto a calibrar respecto a la humedad de referencia indicada por el generador de humedad representa el resultado de la calibración. La incertidumbre de la humedad de referencia y las contribuciones a la incertidumbre del objeto de calibración se asignan al resultado de la calibración.

Suponiendo una distribución estándar y multiplicando la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$, se obtiene la incertidumbre expandida U .

La ecuación modelo para el resultado de la calibración será la siguiente:

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

Para los diferentes componentes de la ecuación modelo se obtienen las siguientes contribuciones:

$U_{w,S}$:

Incertidumbre del valor de referencia de la humedad representada por el generador de humedad. La incertidumbre de la humedad de referencia del 75,2 % es el resultado del sub-balance correspondiente según la Tabla 10. Se estima una contribución distribuida normalmente y la incertidumbre estándar es de 0,37 %.

$U_{i,X}$:

Humedad relativa medida con el objeto a calibrar (sensor de humedad capacitivo) (60 valores medidos). La contribución a la incertidumbre del tipo A se determina a partir de la desviación estándar del valor medio de las lecturas del generador de humedad. Si el número de lecturas es pequeño (≤ 10), puede ser necesario añadir aquí un factor correspondiente a la distribución t para tener en cuenta el bajo grado de libertad (véase EA-4/02 M [8]). El ejemplo muestra un valor medio de 77,7 % y de 0,04 % para la desviación estándar del valor medio.

$\delta U_{res,X}$:

Error de medición desconocido debido a la resolución del objeto a calibrar. La resolución de la indicación de la humedad relativa es de 0,1 %. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,05 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,03 %.

$\delta t_{htd,X}$:

Error de medición desconocido causado por la disipación del calor del objeto a calibrar. Dado que sólo 5 cm del sensor del objeto a calibrar están sumergidos, esta contribución se estima sobre la base de investigaciones en 0,1 °C. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 °C. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 °C. A 22 °C y 75 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_t = 4,71 \text{ \%}/\text{°C}$.

$\delta t_{sht,X}$:

Error de medición desconocido debido al calentamiento propio del objeto a calibrar. El calentamiento propio se examina según Capítulo 7.4.3 y se estima a 0,1 °C como máximo. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,1 °C. La incertidumbre estándar asociada es de 0,06 °C. A 22 °C y 75 %, el coeficiente de sensibilidad correspondiente tiene un valor de $c_t = 4,71 \text{ \%}/\text{°C}$.

| | | | |
|---|--|-----------|---------|
|  | <p>Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa</p> <p>https://doi.org/10.7795/550.20190214ES</p> | DKD-R 5-8 | |
| | | Edición: | 08/2019 |
| | | Revisión: | 0 |
| | | Página: | 72 / 80 |

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

Error de medición desconocido debido a la histéresis del objeto a calibrar. La histéresis se determinó conforme a Capítulo 9.3.1, a partir de una serie de mediciones con humedad ascendente y descendente. La diferencia de la histéresis asciende a 1,6 %. El valor medio de las series de mediciones ascendentes y descendentes se utiliza para la indicación del objeto a calibrar. Por lo tanto, se estima una contribución rectangular con un semiancho de la distribución de 0,8 %. La incertidumbre estándar asociada es de 0,46 %.

Estas contribuciones se resumen en la Tabla 11.

| Magnitud | Denominación | Valor estimado | Error de medición desconocido | Incertidumbre estándar | Distribución | Divisor | Coefficiente de sensibilidad | Contribución a la incertidumbre |
|---------------------------|---|----------------|---|------------------------|--------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| X_i | X_i | x_i | δx_i | $u(x_i)$ | | | c_i | $u_i(y)$ |
| $U_{i,X}$ | Indicación de la humedad objeto a calibrar | 77,7 % | 0,04 % | 0,04 % | normal | 1 | 1,00 | 0,04 % |
| $\delta U_{\text{res},X}$ | Resolución de la indicación de la humedad objeto a calibrar | 0,0 % | 0,05 % | 0,03 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,03 % |
| $\delta T_{\text{htd},X}$ | Disipación del calor objeto a calibrar | 0,0 % | 0,10 °C | 0,06 °C | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 4,58 %/°C | 0,26 % |
| $\delta T_{\text{sht},X}$ | Calentamiento propio objeto a calibrar | 0,0 % | 0,10 °C | 0,06 °C | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 4,58 %/°C | 0,26 % |
| $\delta U_{\text{hys},X}$ | Histéresis objeto a calibrar | 0,0 % | 0,80 % | 0,46 % | rectángulo | $\sqrt{3}$ | 1,00 | 0,46 % |
| $U_{w,S}$ | Humedad relativa en la cámara de calibración | 75,2 % | 0,36 % | 0,36 % | normal | 1 | 1,00 | 0,36 % |
| ΔU_X | Error de medición objeto a calibrar | 2,5 % | $U = 1,4 \%$ ($k = 2$) | | | $u = 0,70 \%$ | | |

Tabla 11: Balance de incertidumbre resultado de calibración

A 22 °C y 77,7 %, el higrómetro tiene una desviación de la indicación de +2,5 %, con una incertidumbre expandida U (partiendo de una distribución normal y con el factor de cobertura $k = 2$) de 1,4 %.¹⁵

¹⁵ Alternativamente, se puede utilizar la corrección de la indicación en lugar de la desviación de la indicación. Esta se distingue de la desviación sólo por el signo. En el ejemplo anterior, el resultado de la calibración sería entonces: "El higrómetro tiene una corrección de -2,5 % a 22 °C y 77,7 %, con una incertidumbre expandida U (suponiendo una distribución normal y el factor de cobertura $k = 2$) de 2,5 %."

Apéndice B Modelos del certificado de calibración (extractos)

Método de calibración

La calibración de la humedad se realizó según la Directriz DKD-R 5-8 “Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa”, Edición 08/2019 según secuencia A2 (hacia arriba/abajo).

Condiciones de medición

La calibración se realizó en un armario climatizado a una velocidad de flujo de aproximadamente 2 m/s.

El sensor externo del objeto de calibración se colocó en el armario climatizado, incluyendo 1 m de su cable de conexión. Durante la calibración, la unidad indicadora fue expuesta a las condiciones ambientales fuera de la cámara de medición. El tiempo de ajuste para cada punto de calibración fue como mínimo 150 minutos.

La condición ambiental indicada constituyó el valor inicial de la calibración.

El valor de la histéresis no se tiene en cuenta en la incertidumbre de medida.

El valor de referencia de la humedad relativa se calculó a partir de los valores medidos de la temperatura del aire y de la temperatura del punto de rocío de los patrones de referencia.

Condiciones ambientales

Temperatura 23,0 °C ± 1 K
Humedad relativa 45 % ± 10 %

Resultados de calibración de la humedad relativa

| Valores de referencia | | Objeto a calibrar | | |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Temperatura del gas t en °C | Humedad relativa U_w en % | Valor indicado U en % | Error de medición ΔU en % | Incertidumbre U en % |
| 20 | 20,1 | 19,7 | -0,4 | 0,6 |
| 20 | 50,0 | 49,9 | -0,1 | 0,8 |
| 20 | 80,0 | 80,3 | +0,3 | 1,0 |
| 20 | 90,1 | 91,2 | +1,1 | 1,1 |
| 20 | 80,1 | 81,3 | +1,2 | 1,0 |
| 20 | 50,0 | 50,6 | +0,6 | 0,8 |
| 20 | 20,0 | 19,7 | -0,3 | 0,6 |

Los resultados de la medición se indican en el orden de la calibración.

Incertidumbre de medida

La incertidumbre indicada es la incertidumbre expandida que se obtiene multiplicando la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$. Se determinó de acuerdo con EA-4/02 M: 2013. En caso de una distribución normal, el valor de la magnitud de medida está dentro del intervalo de valores con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Método de calibración

La calibración de la humedad se realizó según la Directriz DKD-R 5-8 “Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa”, Edición 08/2019 según el método B2 (hacia arriba).

Condiciones de medición

La calibración se realizó en un generador de humedad con una frecuencia de cambio de aire de aproximadamente 10 / minuto. La trazabilidad se establece mediante mediciones de temperatura y presión.

El objeto de calibración estaba completamente instalado en el dispositivo de calibración.

El tiempo de ajuste para cada punto de calibración fue de al menos 120 minutos.

La condición ambiental indicada constituyó el valor inicial de la calibración.

Una posible histéresis del objeto de calibración no se tiene en cuenta en la incertidumbre de medida.

Condiciones ambientales

Temperatura 22,5 °C ± 1 K
 Humedad relativa 56 % ± 10 %

Resultados de calibración de la humedad relativa

| Valores de referencia | | Objeto a calibrar | | |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Temperatura del gas t en °C | Humedad relativa U_w en % | Valor indicado U en % | Error de medición ΔU en % | Incertidumbre U en % |
| 25 | 10,0 | 10,3 | +0,3 | 0,3 |
| 25 | 40,0 | 40,3 | +0,3 | 0,4 |
| 25 | 70,0 | 69,4 | -0,6 | 0,6 |
| 70 | 10,1 | 10,5 | +0,4 | 0,3 |
| 70 | 40,0 | 40,8 | +0,8 | 0,4 |
| 70 | 69,9 | 71,2 | +1,3 | 0,6 |
| -10 | 10,0 | 11,0 | +1,0 | 0,4 |
| -10 | 40,1 | 40,5 | +0,4 | 0,5 |
| -10 | 70,1 | 68,9 | -1,2 | 0,7 |
| 25 | 10,0 | 9,9 | -0,1 | 0,3 |
| 25 | 40,0 | 40,2 | +0,2 | 0,4 |
| 25 | 70,0 | 69,8 | -0,2 | 0,6 |

Los resultados de la medición se indican en el orden de la calibración.

Incluso a una temperatura de gas de -10 °C, la humedad relativa se refiere a la saturación sobre agua.

Incertidumbre de medida

La incertidumbre indicada es la incertidumbre expandida que se obtiene multiplicando la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$. Se determinó de acuerdo con EA-4/02 M: 2013. En caso de una distribución normal, el valor de la magnitud de medida está dentro del intervalo de valores con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Método de calibración

La calibración de la humedad se realizó según la Directriz DKD-R 5-8 “Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa”, Edición 08/2019 según el método C1 (hacia abajo).

Condiciones de medición

La calibración se realizó en un generador de humedad a una velocidad de flujo de aprox. 1 m/s.

El sensor externo del objeto a calibrar se sumergió 10 cm en el dispositivo de calibración. Para cada punto de calibración, el tiempo de ajuste fue de al menos 120 minutos.

Los valores iniciales para la calibración eran un 75% de humedad relativa a una temperatura de gas de 23 °C.

Una posible histéresis del objeto de calibración no se tiene en cuenta en la incertidumbre de medida.

Condiciones ambientales

Temperatura 21,7 °C ± 1 K
 Humedad relativa 34 % ± 10 %

Resultados de calibración de la humedad relativa

| Valores de referencia | | Objeto a calibrar | | |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Temperatura del gas t en °C | Humedad relativa U_w en % | Valor indicado U en % | Error de medición ΔU en % | Incertidumbre U en % |
| 23 | 65,1 | 66,3 | +1,2 | 1,5 |
| 23 | 40,0 | 40,9 | +0,9 | 1,3 |
| 23 | 15,0 | 15,4 | +0,4 | 1,2 |

Los resultados de la medición se indican en el orden de la calibración.

Incertidumbre de medida

La incertidumbre indicada es la incertidumbre expandida que se obtiene multiplicando la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$. Se determinó de acuerdo con EA-4/02 M: 2013. En caso de una distribución normal, el valor de la magnitud de medida está dentro del intervalo de valores con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Apéndice C Informaciones sobre el acoplamiento térmico

Indicaciones acerca del acoplamiento térmico

El requisito básico para la medición de la humedad con un sensor para humedad relativa es el acoplamiento térmico completo del sensor a la temperatura del gas o del aire, dado que la humedad relativa depende de la temperatura. De lo contrario, pueden producirse errores de medición considerables debido al autocalentamiento, a la disipación de calor, a la influencia de la radiación o a tiempos de espera demasiado cortos.

A continuación, se muestra el cambio de la humedad relativa que resulta de un calentamiento del sensor de humedad de 1 K con respecto a la temperatura del aire de 20 °C, en función de la humedad relativa a una temperatura de 20 °C.

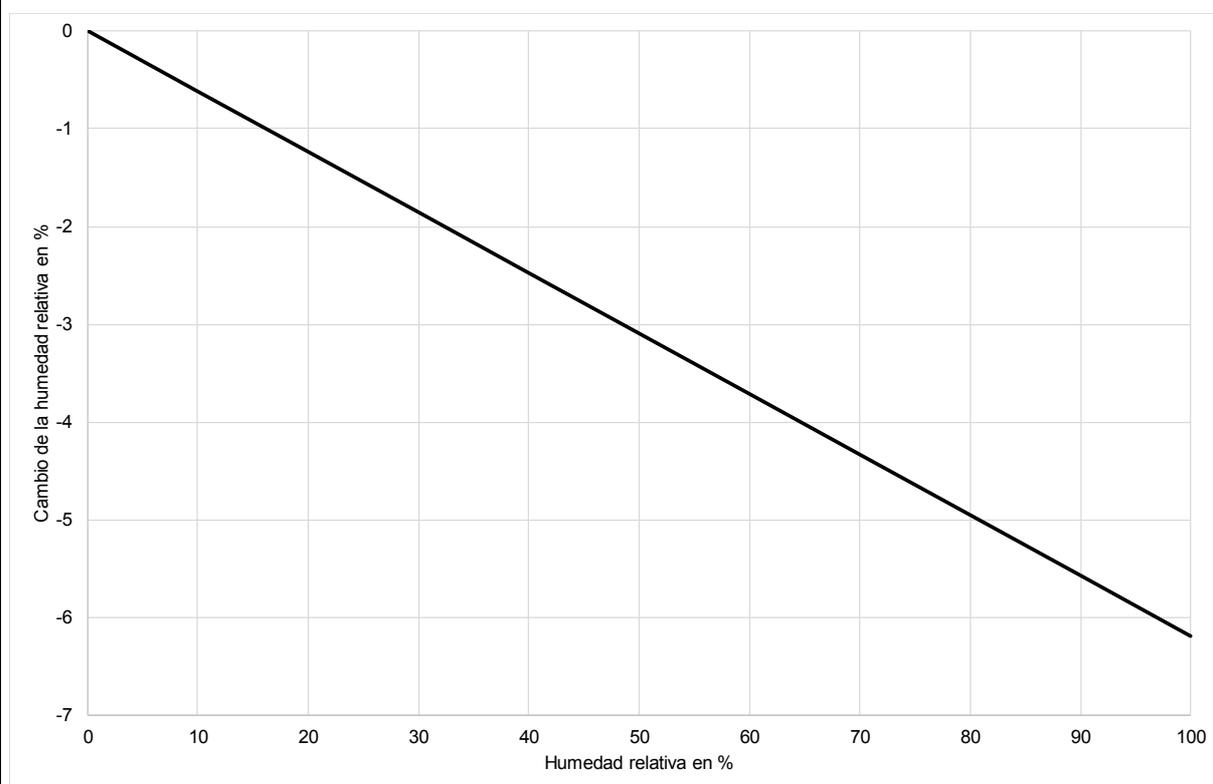


Figura 14: Cambio de la humedad relativa en función de la humedad relativa con un calentamiento de 1 K con respecto a una temperatura del aire de 20 °C.

La humedad relativa disminuye y la sensibilidad aumenta con el aumento de la humedad relativa.

Por el contrario, si el sensor de humedad disipa el calor, es decir, la temperatura del sensor es inferior a la del aire, la humedad relativa aumenta.

Si la humedad es alta, también existe el riesgo de condensación.

Apéndice D Información sobre los sensores electrónicos de humedad

Indicaciones acerca de la histéresis y el comportamiento de ajuste de los sensores electrónicos de humedad

A continuación, hay una representación gráfica de los resultados de calibración de 3 diferentes sensores capacitivos de humedad (sensor 1, sensor 2, sensor 3) que permiten una mejor estimación de la histéresis y del comportamiento de ajuste.

Proceso de calibración

La calibración se realizó según secuencia A1 (hacia arriba/hacia abajo) a una velocidad de flujo de 0,08 m/s y una temperatura del aire de 20 °C, con las siguientes humedades relativas:

S0: 40 %; N1a: 65 % - ascendente; N2: 90 % - ascendente; N1b: 65 % - descendente

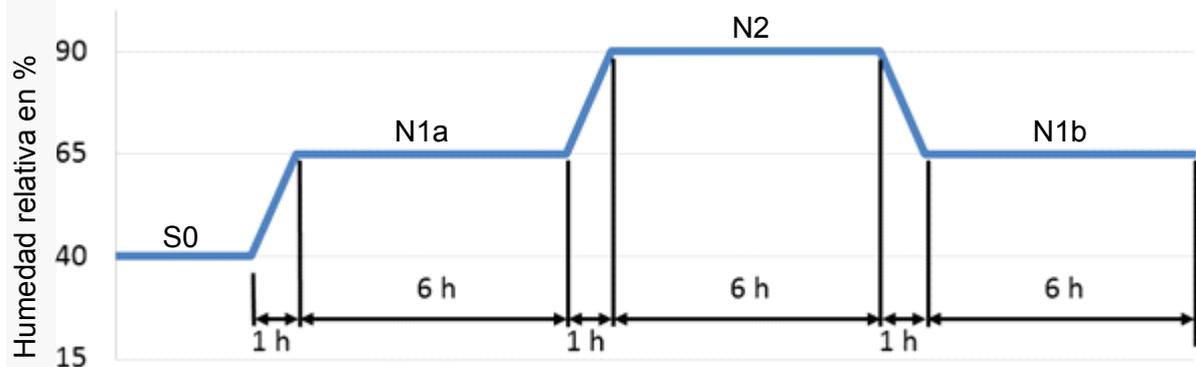


Figura 15: Representación gráfica del orden de calibración (secuencia A1)

Cada punto de calibración se mantuvo durante 6 horas. El cambio al siguiente punto se realizó lentamente, durante un período de 1 hora.

La calibración se llevó a cabo utilizando un generador de humedad de dos presiones. Un espejo de punto de rocío y cuatro termómetros de resistencia Pt100, leídos a través de un puente de medición de temperatura, sirvieron como patrones de referencia.

Resultados de calibración N1a y N1b

A continuación, se muestran los errores de medición de los sensores de humedad en los puntos de calibración N1a (hacia arriba) y N1b (hacia abajo). Para una mejor comparabilidad, el valor medio de las desviaciones de N1a y N1b se puso a cero después de 6 horas para así representar solamente el curso temporal de la histéresis:

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

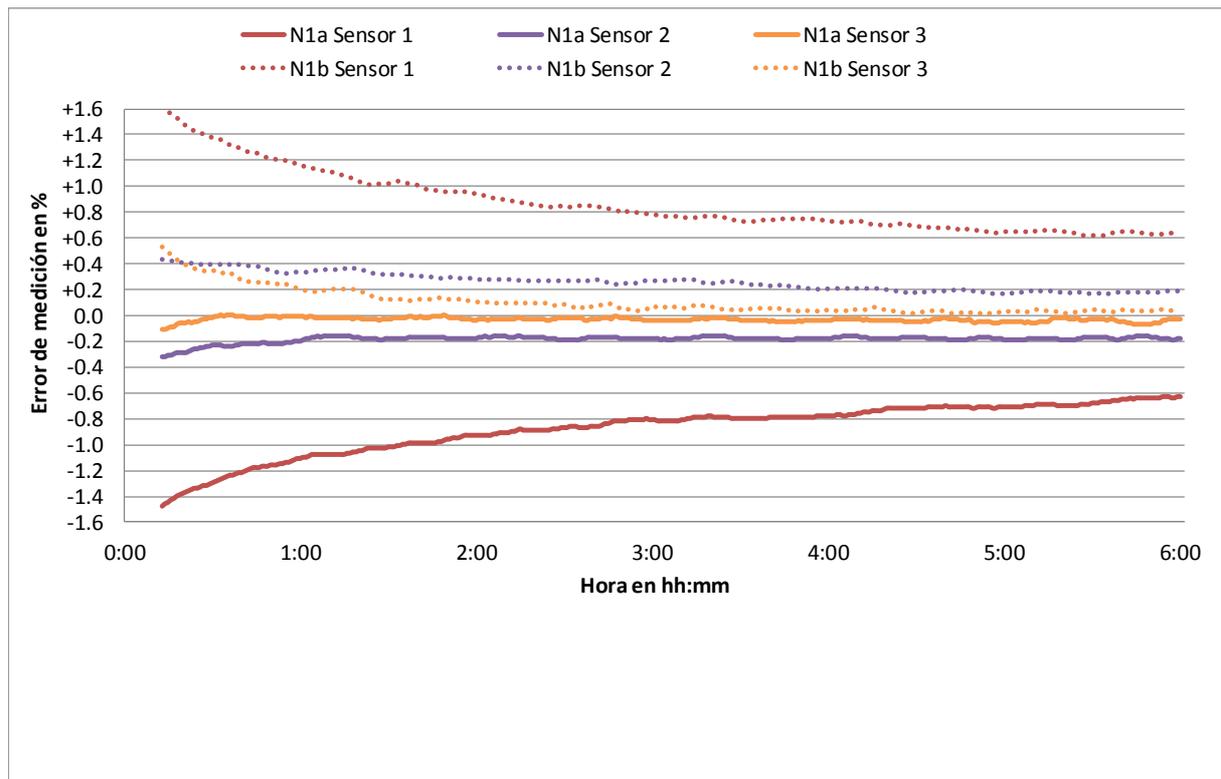


Figura 16: Errores de medición de la humedad relativa de 3 sensores de humedad en función del tiempo en los puntos N1a y N1b

Resultado

Los tres sensores de humedad muestran un comportamiento de ajuste diferente, por ejemplo, los sensores 1 y 2 se adaptan más rápido que el sensor 3. El sensor 3 también muestra un comportamiento de histéresis más pronunciado que los sensores 1 y 2. Además, la histéresis es asimétrica con tiempos de ajuste cortos (la histéresis ascendente es menor que la histéresis descendente).

Resultados de calibración N2

A continuación, se muestran los errores de medición de los sensores de humedad en el punto de calibración N2 (hacia arriba). Para una mejor comparabilidad, las desviaciones se pusieron a cero después de 6 horas para así representar solamente el curso temporal del comportamiento de ajuste:

$$\Delta U_{N2}(6:00) \triangleq 0 \% \quad (26)$$

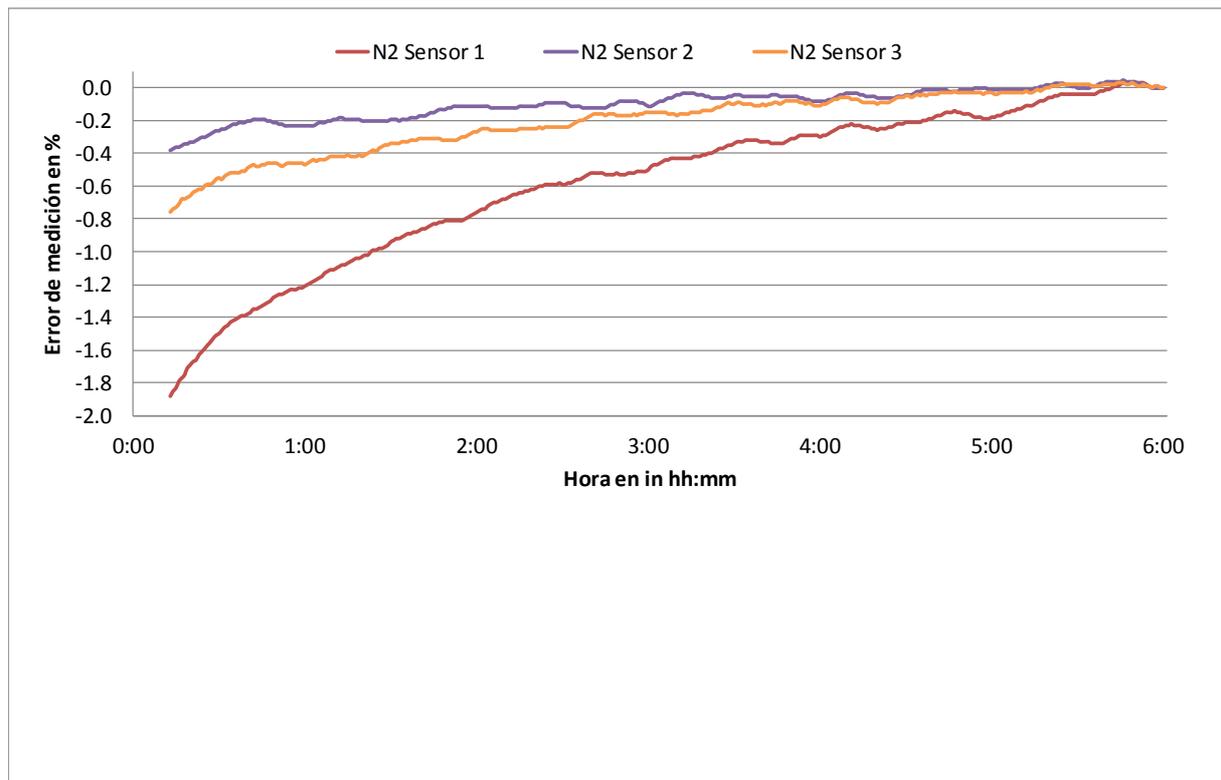


Figura 17: Errores de medición de la humedad relativa de 3 sensores de humedad en función del tiempo en el punto de calibración N2

Resultado

Los sensores de humedad muestran un comportamiento de ajuste diferente. Especialmente con una humedad relativa alta (más del 80 %), el valor medido puede aumentar continuamente.

Resumen

El comportamiento en cuanto a la histéresis y el comportamiento de ajuste depende de varios factores. Estos incluyen: configuración del instrumento de medición de humedad (instalación del elemento sensor en el instrumento de medición), filtro o tapa protectora, tiempo de ajuste, velocidad de flujo, correcciones electrónicas o matemáticas, fabricante, así como temperatura y humedad.

Si las exigencias en cuanto a la tarea de medición y la precisión son elevadas, se recomienda una investigación de la histéresis y del comportamiento de ajuste.



Publicado por:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de