

Messgrößen der Gebäude- und Energietechnik

Wie misst man

- Temperatur
- Druck und Differenzdruck
- Strömungsgeschwindigkeit
- Luftfeuchte

Inhalt

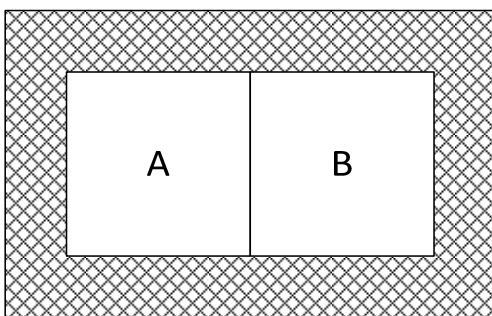
Messgrößen der Gebäude- und Energietechnik	1
Temperaturmessung.....	2
Thermometer	3
Thermografie	6
Druck- und Differenzdruckmessung.....	7
Geschwindigkeitsmessung	9
Feuchte Luft	10
Enthalpie (Energieinhalt) der feuchten Luft.....	13
Feuchtmessgeräte.....	14

Temperaturmessung

Maß für die ungeordnete Bewegung von Molekülen
(Brownsche Molekularbewegung)

Wärmeleitung durch Impulsübertragung zwischen den Molekülen

Thermisches Gleichgewicht



A und B stehen in thermischem Gleichgewicht, wenn der Impulsaustausch - die Wärmeleitung - dazu geführt hat, dass ihre Temperaturen gleich sind.

Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

als allgemeines Prinzip der Temperaturmessung:

Seien einerseits A und C und andererseits B und C in thermischem Gleichgewicht \Rightarrow A und B sind in thermischem Gleichgewicht

Beispiel in der Messtechnik:

Thermometer C wird in einem Eisbad A geeicht $\Rightarrow 0^\circ\text{C}$ in A und C
Eichinformation wird in C als Skalenstrich 0°C hinterlegt

Thermometer misst an einem Messobjekt B ebenfalls 0°C
 \Rightarrow B hat tatsächlich die gleiche Temperatur wie A, nämlich 0°C

Thermometer

Flüssigkeitsthermometer

Elementares Messprinzip: Ausdehnung von Flüssigkeiten

Bei Temperaturunterschiede zwischen Fühler und Flüssigkeitsfaden in der Skala systematischer Messfehler → Fadenkorrektur

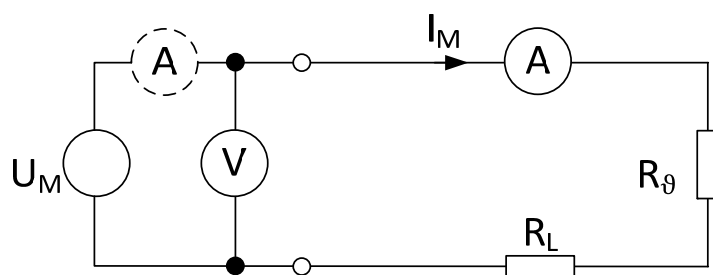
Platin-Widerstandsthermometer

größerer Widerstand bei höherer Temperatur durch vermehrte Kollisionen wandernder Elektronen mit Atomrümpfen aufgrund der verstärkten Brownschen Molekularbewegung

Pt100 als Referenzthermometer im Bereich von (ca.) $-260..960\text{ °C}$

$100\ \Omega$ bei 0 °C , $138,5\ \Omega$ bei 100 °C , in guter Näherung linear

Zweileiterschaltung:



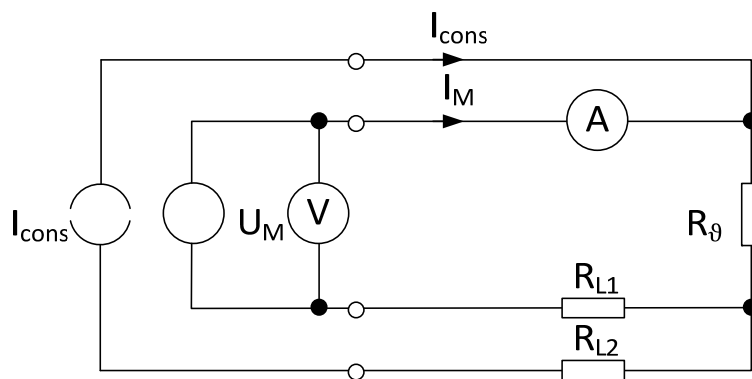
U_M : Messspannung, V : Voltmeter, A : Amperemeter,
 R_θ : Messwiderstand Pt100, R_L : Leitungswiderstand

Verfälschung des Messwerts durch Leitungswiderstand und Amperemeter möglich. Verfälschung wird geringer bei höherem Widerstand, z. B. Pt1000: $1000\ \Omega$ bei 0 °C , $1385\ \Omega$ bei 100 °C

Amperemeter zwischen Voltmeter und Messwiderstand: Spannungsfehler, Voltmeter misst auch Spannung des Amperemeters.

Amperemeter zwischen Messspannung und Voltmeter: Stromfehler, Amperemeter misst auch Strom des Voltmeters

Vierleiterschaltung:



I_{cons} : Konstanter Strom

Seien z. B. $R_g = 100 \Omega$ und $I_{cons} = 1 \text{ mA}$:

\Rightarrow An R_g fallen 0,1 V ab.

U_M wird verändert, bis I_M null ist \Rightarrow auch U_M ist 0,1 V.

$\Rightarrow R_g = 0,1 \text{ V} / 1 \text{ mA} = 100 \Omega$

R_{L1} und das Amperemeter spielen keine Rolle, weil durch beide kein Strom fließt und folglich keine Spannung an ihnen abfällt. Die Spannung, die das Voltmeter misst, ist einzig und allein die Spannung des Messwiderstands.

R_{L2} spielt keine Rolle, weil die Konstantstromquelle, den Strom unabhängig von R_{L2} konstant hält.

NTC-Halbleiter-Sensoren

NTC: Negative Temperature Coefficient (Fe_2O_3 , ZnTiO_4 , MgCr_2O_4 ...)

mehr Valenzelektronen bei höheren Temperaturen

⇒ bessere Leitung (Heißleiter) ⇒ niedrigerer Widerstand

typische Werte: 0°C : 15 k Ω , 100°C : 500 Ω

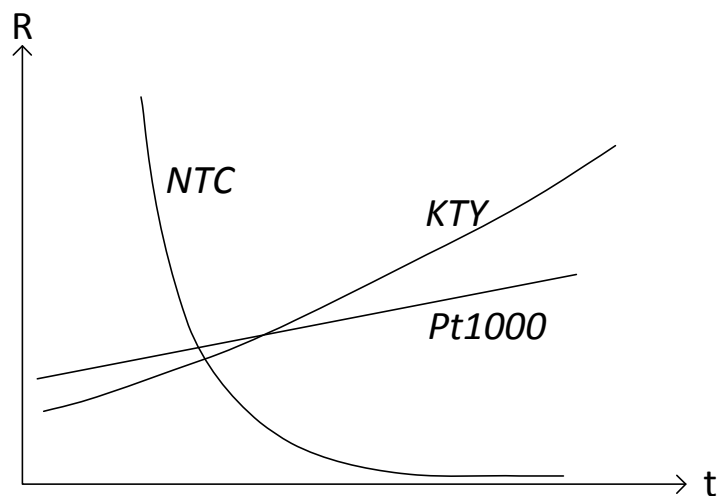
KTY-Halbleiter-Sensoren

PTC-Verhalten: Positive Temperature Coefficient (z. B. Silizium)

typische Werte: 0°C : 400 Ω , 100°C : 1000 Ω

Vergleich

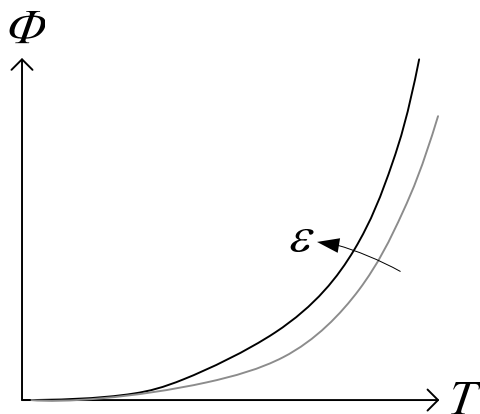
- NTC mit höchster Empfindlichkeit im Bereich 0 - 300°C
- KTY mit besserer Langzeitstabilität
- Pt1000 fast linear, beste Langzeitstabilität



Thermografie

Temperaturmessung mit Infrarotkamera

Körper geben bei einer bestimmten absoluten Temperatur T eine bestimmte Strahlungsleistung ϕ ab.



$$\text{Stephan-Boltzmann-Gesetz: } \phi = \epsilon \sigma T^4$$

ϵ : Emissionskoeffizient, maximal 1 (schwarzer Körper)

σ : Stephan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Infrarotkamera zeichnet Wärmestrahlung auf.

Schwierigkeiten:

1. Unterschiedliche Emissionskoeffizienten führen bei gleicher Temperatur zu unterschiedlichen Wärmestrahlungen
2. Auch der Messsensor sendet Wärmestrahlung aus und misst daher nur eine Differenz, Sensortemperatur muss geregelt bzw. berücksichtigt werden
3. Glas hat einen geringen Durchlasskoeffizienten für Wärmestrahlung (Treibauseffekt), Linsen daher aus Silizium, Germanium u.ä.

Druck- und Differenzdruckmessung

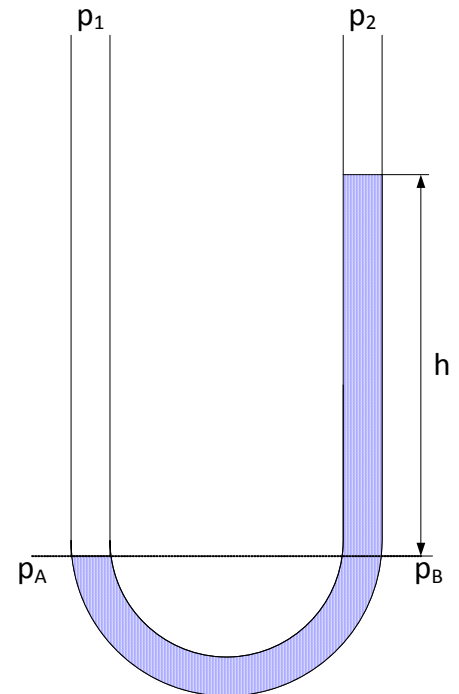
U-Rohr zur Differenzdruckmessung

Differenzdruckmessung in Gasen und Flüssigkeiten (bei Flüssigkeiten mit schwererer Messflüssigkeit)

Gesetz der kommunizierenden Gefäße:

$$p_A = p_B \Leftrightarrow p_1 = p_2 + h \rho g \Leftrightarrow$$

$$p_1 - p_2 = h \rho g$$



Barometer

eine Seite geschlossen

$$p_A = p_B \Leftrightarrow p_1 = 0 + h \rho g \Leftrightarrow$$

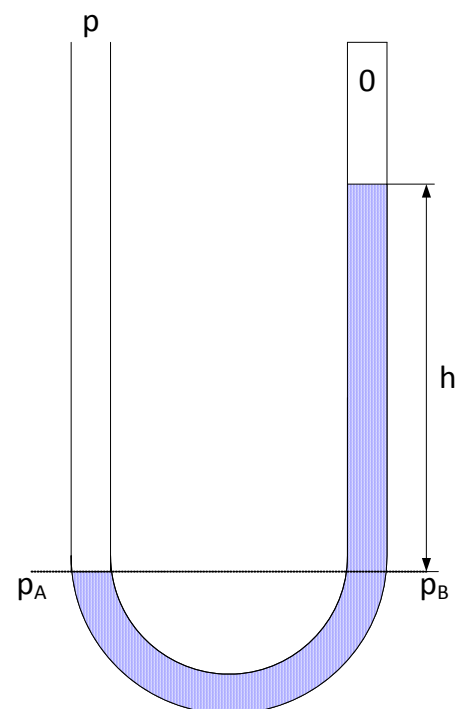
$$p = h \rho g$$

Wassersäule bei Umgebungsdruck $\approx 10\text{m}$
 \Rightarrow Messflüssigkeit: Quecksilber (Hg)

1 mm Hg = 1 Torr = 101325 Pa/760

Korrekturen des Messwerts:

- Kapillarität \rightarrow Kuppenhöhe
- Temperaturendeckung
- Breitengrad, Höhe über NN \rightarrow Erdbeschleunigung



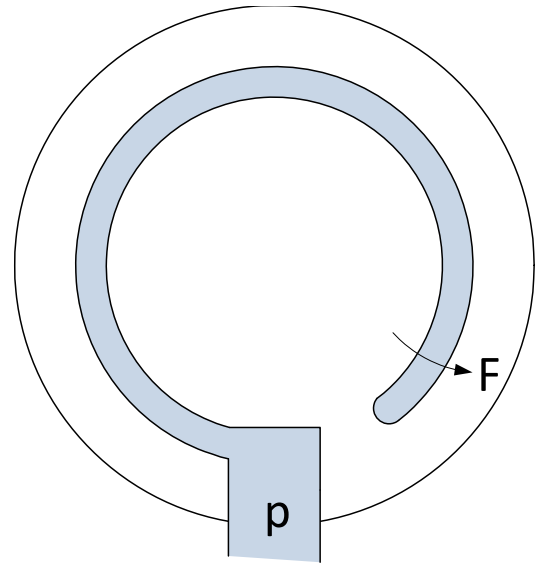
Mechanische Manometer

Wegveränderliches Messelement als
Rohrfeder, Kapsel oder Membran.

z. B. Rohrfedermanometer:

Außenfläche > Innenfläche \Rightarrow
resultierende Kraft F nach außen

Erfassung der Auslenkung
mechanisch \rightarrow Zeigerausschlag
elektrisch über Potentiometerschleifer



Rohrfedermanometer

Kraftmessung mit Dehnungsmessstreifen

Widerstand eines Leiters: $R_L = \frac{l}{q \kappa}$

κ : Leitwert in $\text{m}/(\text{mm}^2 \Omega)$

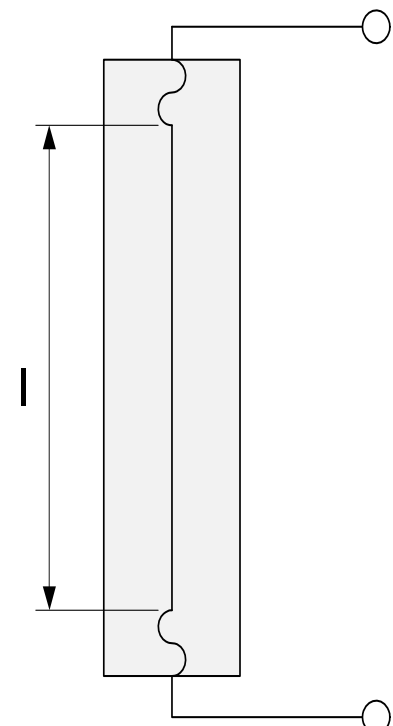
q : Querschnitt

l : Länge

Bei Dehnung steigt l und q nimmt ab \Rightarrow
 R_L wird größer

Dehnung geht auf Kraft zurück \Rightarrow
 R_L ist Maß für Kraft, so auch für eine
Druckkraft \rightarrow Druckmessdose

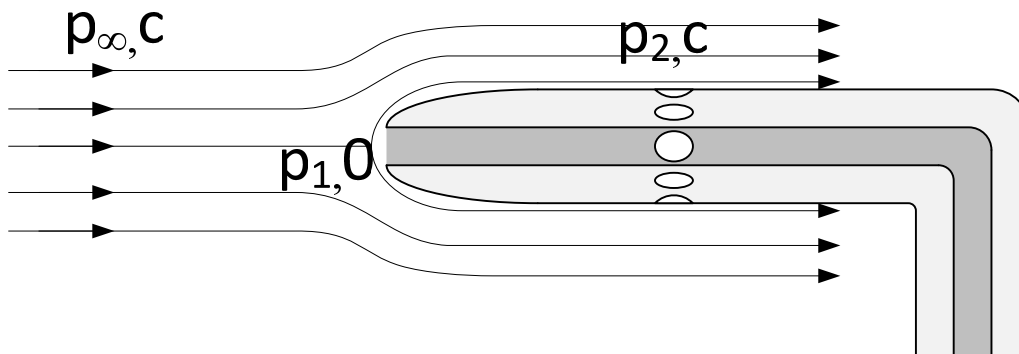
Differenzdruckmessung entweder mit zwei Druckmessdosen oder als
echte Differenzdruckmessung mit zweiseitig beaufschlagtem Mess-
element, Abgriff z. B. induktiv oder auch kapazitiv.



Dehnung eines
einzelnen Leiters

Geschwindigkeitsmessung

Prandtlrohr

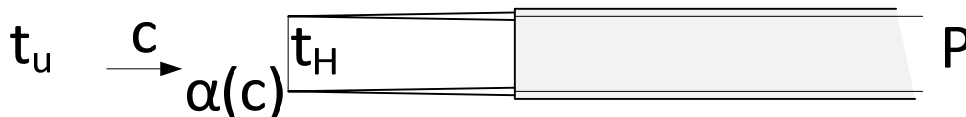


Ort 1 ist Staupunkt, Geschwindigkeit ist null.

Am Ort 2 wird Geschwindigkeit gemessen.

$$\text{Bernoulligleichung: } \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{c^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c^2}{2} \Rightarrow c = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

Hitzdrahtanemometer



Älteres Prinzip: Konstanter Strom

Neueres Prinzip: Konstante Temperatur

Hitzdraht wird auf konstante Temperatur t geregelt. Es gilt:

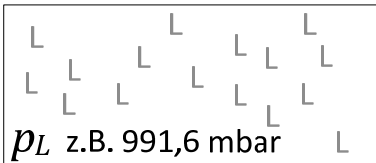
$$P = A \alpha(c) A (t_H - t_u) \Rightarrow P = f(c)$$

P : Leistung, A : Hitzdrahtoberfläche, t_H : Hitzdrahttemperatur,
 t_u : Umgebungstemperatur, α : Wärmeübergangskoeffizient

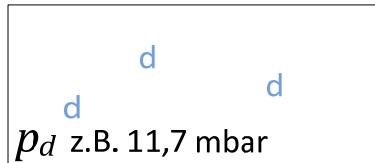
Feuchte Luft

Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf

trockene Luft 20°C



Wasserdampf 20°C



feuchte Luft 20°C

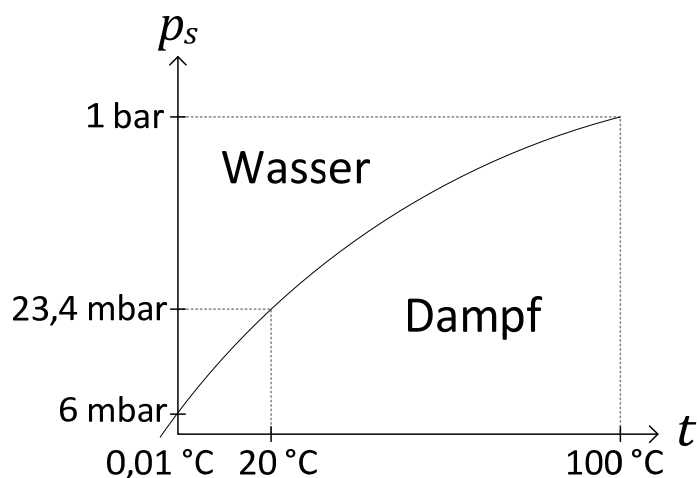


Gesamtdruck p setzt sich zusammen gemäß $p = p_L + p_d$

p_L : Partialdruck trockene Luft, p_d : Partialdruck Wasserdampf

Partialdruck: Druck, wenn nur ein Teil des Gemischs den Raum füllt

Dampfdruckkurve: Sättigungsdruck p_s abhängig von Temperatur t :



$p_d = p_s$: Luft hat maximalen Wasserdampfgehalt (sie ist gesättigt mit Wasserdampf).

Überschüssiger Wasserdampf kondensiert zu Wasser \Rightarrow
 p_d kann nicht größer als p_s werden.

Relative Luftfeuchte

$$\text{Relative Luftfeuchte: } \varphi = \frac{p_d}{p_s}$$

Beispiel:

$$t = 20 \text{ °C}, p_d = 11,7 \text{ mbar}$$

Dampfdruckkurve liefert $p_s = 23,4 \text{ mbar}$ (siehe Diagramm oben)

$$\varphi = 11,7 \text{ mbar} / 23,4 \text{ mbar} = 50\%$$

Feuchte Luft und ihre Bestandteile als ideales Gas

$$\text{Ideales Gasgesetz: } p v = R T$$

v : spezifisches Volumen $v = V/m$, Kehrwert der Dichte $\rho = m/V$

R : spezifische Gaskonstante

trockene Luft: $R_L = 287,2 \text{ J}/(\text{kg K})$, Wasserdampf: $R_d = 462,1 \text{ J}/(\text{kg K})$

T : absolute Temperatur

$$\text{Masse trockene Luft: } m_L = \frac{p_L}{V R_L T}$$

$$\text{Masse Wasserdampf: } m_d = \frac{p_d}{V R_d T}$$

Absolute Luftfeuchte

$$\text{Absolute Luftfeuchte: } x = \frac{m_d}{m_L} = \frac{R_L}{R_d} \frac{p_d}{p_L} = 0,622 \frac{p_d}{p_L}$$

als kg Wasser/kg trockene Luft (dimensionslos)

oder als g Wasser/kg trockene Luft (g/kg)

Beziehung zwischen absoluter und relativer Feuchte

$$x = 0,622 \frac{p_d}{p_L} = 0,622 \frac{p_d}{p - p_d} = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}$$

Beispiel:

$$\varphi = 50\%, p_s = 23,4 \text{ mbar}, p = 1 \text{ bar}$$

$$x = 0,622 (0,5 \cdot 23,4 \text{ mbar}) / (1000 \text{ mbar} - 0,5 \cdot 23,4 \text{ mbar}) = 0,0074$$

bzw. $x = 7,4 \text{ g/kg}$

Relevanz von absoluter und relativer Feuchte

Absolute Luftfeuchte physikalisch relevant und von der Jahreszeit abhängig, typische Werte:

Winter: 2 g/kg (niedrige Sonneneinstrahlung geringe Verdunstung)

Sommer: 12 g/kg (hohe Verdunstung aus Gewässern)

Relative Luftfeuchte physiologisch (für Gesundheit und Behaglichkeit) relevant:

Behaglichkeitsbereich: etwa 30-65% (temperaturabhängig)

niedrigere Luftfeuchte: Schleimhäute trocknen aus, Keime können besser in den Körper eindringen

zu hohe Luftfeuchte: Verdunstungswärmeabgabe über Schweißdrüsen wird behindert, Überhitzung des Körpers (Schwülegefühl)

Enthalpie (Energieinhalt) der feuchten Luft

Für $x \leq x_s$ (Sättigungsfeuchte):

$$\text{Enthalpie: } h = c_{pL} t + c_{pd} x t + r x$$

h : spezifische Enthalpie als Enthalpie in J pro kg trockene Luft

c_{pL} : isobare Wärmekapazität der trockenen Luft; 1,005 kJ/(kg K)

c_{pd} : isobare Wärmekapazität des Wasserdampfs; 1,86 kJ/(kg K)

r : spezifische Verdampfungswärme; 2500 kJ/(kg K)

t : Celsiusstemperatur, $h(0^\circ\text{C}) = 0 \text{ J}/(\text{kg K})$

Beispiel:

$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$, $p = 1 \text{ bar} \Rightarrow x = 7,4 \text{ g}/\text{kg}$ (vorheriges Beispiel)

$h = (1,005 \cdot 20 + 1,86 \cdot 0,0074 \cdot 20 + 2500 \cdot 0,0074) \text{ kJ}/\text{kg} = 38,8 \text{ kJ}/\text{kg}$

Enthalpie der übersättigten Luft

$x > x_s$: Wasseranteil x übersteigt Sättigungsfeuchte $x_s \Rightarrow$

Der Teil $x - x_s$ scheidet aus der Luft als Wasser aus.

Ohne Eisbildung gilt:

$$h = c_{pL} t + c_{pd} x_s t + r x_s + c_w (x - x_s) t$$

x_s : Sättigungsfeuchte als größtmögliche absolute Feuchte bei t

c_w : Wärmekapazität Wasser; 4,19 kJ/(kg K) bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Feuchtmessgeräte

Haarhygrometer

Haar dehnt sich aus bei Feuchteaufnahme \Rightarrow

Längenänderung ist Maß für die Feuchte

Kapazitiver Feuchtemesser

Dielektrikum eines Kondensators nimmt Feuchte auf und ändert aufgrund der Feuchte seine Dielektrizitätszahl \Rightarrow

Kapazität ist Maß für die Feuchte

Taupunktspiegel

Spiegel wird gekühlt, bis Luft den Sättigungszustand erreicht, erkenntlich an drastisch vermindertem Reflexionsgrad \Rightarrow
Messwerte t_{tr} (trockene Luft) und t_p (Taupunkt)

Aus t_p folgt p_s über die Dampfdruckkurve.

Aus p_s folgt $x = x_s$ gemäß $x = 0,622 \varphi p_s / (p - \varphi p_s)$ mit $\varphi = 1$.

Aus x und t_{tr} folgt p_d gemäß $p_d = \rho_d(t_{tr}) R_d (t_{tr} + 273,15)$

Aus p_d und p_s folgt φ .

Bestimmung im hx-Diagramm:

Punkt $(t_p, \varphi = 100\%)$ wird hochgelotet ($x = \text{const.}$)

Schnittpunkt mit Isotherme t_{tr} ist der Luftzustand

Assmann-Aspirationspsychrometer

Zwei Thermometer, an denen Luft mit $\leq 2 \text{ m/s}$ vorbeistreich.

Ein Thermometer bleibt trocken und misst t_{tr} , das andere ist mit feuchtem Strumpf umhüllt und misst Feuchtkugeltemperatur t_f .

Sprungische Formel (Psychrometerformel):

$$p_d = p_f - 0,66 (t_{tr} - t_f) \frac{p}{1007}$$

p_d : Partialdruck der trocknen Luft

p_f : Partialdruck der feuchten Luft = Sättigungsdruck bei t_f

p : Luftdruck

Mit dem Sättigungsdruck der trockenen Luft p_s ergibt sich die relative Feuchte wie immer als $\varphi = p_d - p_s$

