

12. Temperatur und Feuchte

Temperaturmessungen und Feuchtebestimmungen sind in vielen elektrischen Kalibrierstellen von gewisser Bedeutung, da diese leicht mit vielen elektrischen Universalgeräten und zusätzlichem Fühler möglich sind. Außerdem werden in den Kalibrierlaboratorien mindestens die Temperatur und in vielen Fällen auch die Feuchte geregelt. Diese Klimaregelung muß natürlich mit den entsprechenden Meßgeräten registriert werden, die wiederum eine Kalibrierung benötigen. Als sehr einfache und doch wirksame Methode hat sich die Registrierung mit einem Thermo-Hydrographen, zum Beispiel von der Firma Lamprecht, herausgestellt. Diese Gerät zeichnet mit zwei Federstiften auf einer Rolle für eine Woche den Verlauf der Temperatur und Feuchte über der Zeit auf. Das Gerät läuft mit einem Federuhrantrieb und nach einer Woche wird ein neues Blatt für die Protokollierung eingelegt. Hierbei wird die Temperatur mit einem Bimetall- und die Feuchte mit einem Haarharfenfühler registriert.

12.1 Temperatur

Die Temperatur, üblicherweise in °C (Grad-Celsius) gemessen, gibt die Erwärmung beziehungsweise die ungeordnete Molekülbewegung eines Stoffes an. Der absolute Nullpunkt liegt bei $-273,15^{\circ}\text{C}$, dies entspricht 0 K (Kelvin). Nach oben hin gibt es eine geschätzte Grenze von $300 \text{ Mio}^{\circ}\text{C}$, die man im Weltall vermutet. So beträgt die Oberflächentemperatur der Sonne etwa 6000°C , die Koronatemperatur $1 \text{ Mio}^{\circ}\text{C}$ jedoch die Kerntemperatur (Fusionsplasmen) wird mit $100 \text{ Mio}^{\circ}\text{C}$ angegeben. Der für den Menschen interessante Temperaturbereich liegt zwischen -30°C und 100°C .

Zur Bestimmung der Temperatur gibt es einige Meßverfahren, die sich die Wärmeausdehnung eines Stoffes oder deren elektrische Veränderung zu Nutze machen. Diese Änderung der physikalischen Größe (y) dieser Stoffe wird dann mit dem Temperaturkoeffizient (a) beschreiben.

$$y = y_0 * (1 + a * (T - T_0)) \quad (12.1)$$

Die wichtigsten, wie Flüssigkeitsglasthermometer, Bimetallfühler, Thermoelemente, Widerstandsthermometer, Halbleitersensoren und Thermistoren (NTC/PTC) werden hier vorgestellt. Um diese jedoch zuverlässig betreiben zu können, ist eine Kalibrierung bei einem der physikalischen Fixpunkte nötig. Im Laufe der Geschichte haben sich zwei Temperaturskalen durchgesetzt, im Jahr 1743 die Grad-Celsius ($^{\circ}\text{C}$) und 1848 die Kelvin-Skala (K). Die erste wurde bei 0°C (Eispunkt) und 100°C (Dampfunkt-Wasser) und die zweite beim 0K (absoluter Nullpunkt) festgelegt. Die Einteilung von $1^{\circ}\text{C}=1\text{K}$ ergibt sich durch die Differenz zwischen 100°C und 0°C in 100 Teilen.

$$T_K = T_C + 273,15 \text{ [K]} \quad (12.2)$$

12.1.1 Temperaturkalibrierung

Die Temperaturkalibrierung kann durch den Vergleich eines Prüflings mit einem kalibrierten Normalthermometer oder gegen physikalische Fixpunkte erfolgen. Bevor auf die Fixpunkte eingegangen wird, sollen kurz die Temperaturmeßverfahren erläutert werden, die auf physikalische Methoden zurückgreifen und nur in einigen Labors Verwendung finden. Das Gas-thermometer zwischen 3K und 1400K nutzt die Zustandsänderung einer nahezu idealen Gasmasse zur Bestimmung der Temperatur. Bei konstantem Volumen wird mit einer Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-5}$ aus dem Druckverhältnis ein Temperaturverhältnis bestimmt. Das akustische

Thermometer macht sich die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in einem Gas zu nutze. Zwischen 5K und 20K liegen die Meßunsicherheiten im mK Bereich. Das Rauschthermometer beruht auf der Temperaturabhängigkeit der Brownschen Bewegung in einem Widerstand. Mit $u^2=4ktRdf$ kann über eine lange Mittelung die Temperatur über 100K mit Unsicherheiten ab 1mK bestimmt werden. Schließlich bietet das Planksche Strahlungsgesetz die Möglichkeit über 450°C mit strahlungsthemischen Messungen eine Temperatur zu bestimmen.

Die international 1990 definierten Fixpunkte (ITS-90) sind thermodynamische Gleichgewichtszustände zwischen den Phasen reiner Substanzen bei Normaldruck (760Torr). Die Messunsicherheiten gelten für die Darstellung mit Fixpunktstellen.

<u>Gleichgewichtszustand</u>	<u>T in K</u>	<u>dT mK</u>	<u>T in °C</u>
Tripelpunkt des Gleichgewichtswasserstoffs	13,800		-259,347
Tripelpunkt des Sauerstoffs	54,358		-218,762
Tripelpunkt des Argons	83,806		-189,344
Taupunkt des Sauerstoffs	90,188		-182,96
Tripelpunkt des Quecksilbers	234,316	± 1	-38,834
(100g Eis + 40g Kochsalz (Erstarrungspunkt des Wassers)	252,15		-21)
Tripelpunkt des Wasser	273,15		0,00
Schmelzpunkt des Galliums	273,16	± 1	0,01
(Siedepunkt des Azetons	302,9146	± 1	29,7646
(Siedepunkt des Wassers	329		56)
Erstarrungspunkt des Zinns	373,15		100
Erstarrungspunkt des Zinks	505,08	± 2	231,93
Erstarrungspunkt des Aluminiums	692,68	± 2	419,53
Erstarrungspunkt des Silbers	933,47	± 6	660,32
Erstarrungspunkt des Goldes	1234,9	± 30	961,78
Erstarrungspunkt des Kupfers	1337,3		1064,2
	1357,8		1084,6

Bei der Verwendung von genormten Labor-Platin-Widerstandsthermometern ist zwischen 14K und 900K mit einer Unsicherheit von etwa 4mK zu rechnen. Bei Thermopaaren beträgt sie 0,3K und Spektralpyrometer liege von 1340K bis 2600K zwischen 0,2K und 2K.

Der Tripelpunkt eines Stoffes ist in dem Druck-Temperatur-Diagramm, der Punkt, wo sich die Schmelz-, die Dampfdruck- und die Sublimationskurve treffen. Hier stehen die drei Phasen Gas, Flüssigkeit und Festkörper im thermodynamischen Gleichgewicht. Ein bekanntes Beispiel ist der Tripelpunkt von reinem Wasser, der sich auf etwa 0,1mK genau darstellen läßt. Die Erzeugung des Wasser-Tripelpunkt in einem speziellen Gefäß ist sehr aufwendig und daher nur in wenigen Kalibrierlaboratorien im Einsatz. Auch für andere Fixpunkte werden bei Präzisionsmessungen mit geringer Meßunsicherheit spezielle Vorrichtungen benötigt.

In der Praxis reicht es häufig für Thermometer, die zwischen -10°C und + 120°C betrieben werden, bei drei Temperaturpunkten eine Kalibrierung durchzuführen. Dies ist beim Eispunkt von destillierten (deionisierten-ohne Salze!) Wasser [0°C ± 0,1°C], beim Siedepunkt von destilliertem Wasser [100°C ± 0,5°C] und bei einer Temperatur von zum Beispiel 23°C ± 0,05°C, bei der ein genaues Einschluß-Glas-Thermometer vorhanden ist.

Beim Vergleich mit einem Normalthermometer sind Prüfling und Normal in geeigneter Weise auf gleiche Temperatur zu bringen. Dabei sind alle Zeitkonstanten besonders zu beachten, um

so im eingeschwungenen Zustand zu messen. Dies kann in gerührten Flüssigkeitsbädern (-100°C bis 600°C), Metallblocköfen (bis 800°C) oder Rohröfen geschehen. Diese Normalgeräte sind üblicherweise elektrisch beheizt beziehungsweise gekühlt. Für die Flüssigkeitsbäder sind die folgende Flüssigkeiten geeignet: Brennspritus (-100° bis 0°), Wasser (0 bis 100°), Öle (50° bis 250°) [Vorsicht: Flammpunkt beachten!] und Salzmischungen/Zinn (250° bis 600°).

Der Eispunkt wird erzeugt, indem man in ein Dewargefäß (Thermosflasche) fein gemahlenes Eis aus destilliertem Wasser, da Salze eine Temperaturniedrigung bewirken, gibt und dann mit kaltem Wasser so lange nachfüllt, bis dieses etwa 2cm an den oberen Füllrand herankommt. In diesem Eis-Wasser-Gemisch wird der Temperaturfühler oder das Glas-Thermometer so tief wie möglich eingetaucht. Es ist mittels leichten rührens darauf zu achten, daß das Eis nicht auf dem Wasser aufschwimmt und bei Bedarf muß das überschüssige Wasser abgeschüttet werden. Nach Einstellung des Temperaturgleichgewichts (5-15 Min) kann mit einer Meßunsicherheit von 0,1°C gerechnet werden. Die Erzeugung des Tripelpunkts bei 0,01°C ist erheblich aufwendiger und erfordert außer reinstem Wasser ein spezielles Gefäß. Diese Messung mit einer Unsicherheit von 0,1mK ist daher nur für Temperaturlabors von Bedeutung.

Der einfache Siedepunkt wird erzeugt, indem man destilliertes Wasser unter Beigabe von Siedesteinchen (Holzschrauben), die dafür sorgen, daß kein Siedeverzug auftritt, zum leicht sprudelnden Kochen bringt. Da Wasser nur bei einem absoluten Druck von 1014,2 mbar bei 100°C kocht, muß für andere Drücke eine Korrektur durchgeführt werden. Es gelten die folgende Zusammenhänge, die in einer Tabelle zusammengefaßt sind. Die Zwischenwerte werden mit einem Polynom berechnet.

Druck-Temperaturwerte für kochendes Wasser (Dampfdruckkurve-alt)

<u>(z) Torr/mm</u>	<u>(x) mbar</u>	<u>(y) C°</u>
682	909,4	97,00
707,3	943	98,00
712,5	950	98,195
720	960	98,490
727,5	970	98,775
732,8	977	99,00
735	980	99,065
742,5	990	99,347
750	1000	99,629
757,5	1010	99,909
760	1014,2	100,00 (neu!)
765	1020	100,186
772,5	1030	100,462
780	1040	100,730
787,5	1050	101,006
816	1088	102,00

$$y = 60,20184 + 0,050747 * x - 1,132 * 10^{-5} * x^2 \quad [C^\circ \pm 0,02^\circ] \quad (12.3)$$

$$y = 100 + 28,012 \left(\frac{z}{760} - 1\right) - 11,64 \left(\frac{z}{760} - 1\right)^2 + 7,1 \left(\frac{z}{760} - 1\right)^3 \quad [C^\circ \pm 0,02^\circ] \quad (12.4)$$

Außerdem gilt: Torr/ 10=cmHg ; $\text{mbar} \cdot 3/4 = 1\text{mm}$; $\text{mbar} = 3/4 \cdot \text{Torr}$; $1\text{mbar} = 1\text{hPa} = 100\text{Pa}$; $1\text{bar} = 1 \cdot 10^3 \text{mbar} = 1 \cdot 10^5 \text{Pa}$. Bei der Bestimmung des Luftdrucks am Meßobjekt muß zusätzlich zum allgemeinen Druckwert eine Korrektur aufgrund der Höhendifferenz und des Wasserdrucks durchgeführt werden.

Höhendruck: $1\text{Torr} = 11\text{m}$ bzw. $1\text{mbar} = 8\text{m}$ Wasserdruck: $1\text{m} = 100\text{mbar}$ bzw. $5\text{cm} = 5\text{mbar}$.

Beispiel: Luftdruck Parterre: 944mbar; Höhendifferenz zum 3.Stock $16\text{m} = 2\text{mbar}$; Eintauchtiefe $5\text{cm} = 5\text{mbar} \Rightarrow$ Meßdruck $= 944 - 2 + 5 = 947\text{mbar} \Rightarrow$ Richtiger Temperaturwert = $98,11^\circ\text{C}$.

In dem Präzisions-Wassersiedepunkt-Apparat ist mit einer Meßunsicherheit von 1mK zu rechnen, wobei die Meßunsicherheit des Drucks von $0,01\text{mbar}$ einen Temperaturfehler von $0,3\text{mK}$ zur Folge hat.

Unsere **Meßunsicherheiten** betragen: $0^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$; $23^\circ\text{C} \pm 0,05^\circ\text{C}$; $100^\circ\text{C} \pm 0,6^\circ\text{C}$.

12.1.2 Flüssigkeits-Glasthermometer

Flüssigkeits-Glasthermometer in der Bauform eines Einschlußthermometers, bei dem sich der Skalenträger mit der Meßkapillare in einem extra Umhüllungsrohr befindet, werden mit entsprechender Skalenauflösung oft als Normale eingesetzt. In einer Meßkapillare, die mit Quecksilber gefüllt ist, dehnt sich diese Flüssigkeit bei einer Temperaturerhöhung aus. Der daraus resultierende Anstieg der Quecksilbersäule vor einer kalibrierten Skala ist ein Maß für den Temperaturanstieg. Am unteren Ende der Meßkapillare befindet sich ein Vorratsbehälter, der mit so viel Quecksilber gefüllt ist, daß der unterste Temperaturmeßpunkt den richtigen Wert anzeigt. Zur Nullpunkt beziehungsweise Bereichsunterdrückung oder auch als Schutz vor Überhitzung können Kontraktions- oder Expansionserweiterungen der Meßkapillare gefertigt sein. Über der thermometrischen Flüssigkeit befindet sich in der Kapillare meist ein unter Druck stehendes Schutzgas (Stickstoff). Es ist darauf zu achten, daß im Meßfaden keine Gasblasen auftreten. Einfache Thermometer können auch mit Alkohol, Toluol oder anderen Meßflüssigkeiten gefüllt sein. Damit kein Parallaxen-Ablesefehler entsteht, ist das Auge senkrecht zur Thermometerachse zu positionieren. Präzisionsthermometer haben häufig einen stark eingeschränkten Meßbereich von ein paar Grad aber dafür eine Auflösung von $0,01$ Grad. Mit Quecksilber können theoretisch Messungen zwischen -35°C und 600°C durchgeführt werden. Präzisionsmessungen zwischen -10°C und 110°C sind mit einer Meßunsicherheit von 5mK möglich. Nachteilig bei dieser Bauform ist die relativ große Zeitkonstante von einigen Minuten in Luft. Da auch diese Thermometer einer geringen mechanischen Alterung unterliegen, sollten sie bei normalem Temperatureinsatz alle 5 bis 10 Jahre kalibriert werden. Zur Berichtigung der Thermometeranzeige können bei Bedarf die Anzeigekorrekturen $K = T - T_a$ ($T_a =$ angezeigter Wert) für Druck und für den Faden verwendet werden. Die Druckkorrektur ist notwendig, wenn das Thermometer statt in der geforderten senkrechten in einer horizontalen Lage eingesetzt wird. Kann man ein Thermometer mit seinem Meßfaden nicht ganz in die Flüssigkeit tauchen, so ist eine Fadenkorrektur angebracht.

12.1.3 Metallausdehnungsthermometer

Die bekannteste Bauform der Metallausdehnungsthermometer ist das Bimetallthermometer. Es kann in großer Bauform einen Dreiviertelkreis beschreiben oder in einfacher Art eine Spiralförmigkeit besitzen. Das äußere Ende der Spirale wird festgehalten und am inneren Ende ist der Zeiger, der sich bei Temperaturänderung um die Mittelachse bewegt, angebracht. Das Bimetall selber besteht aus zwei miteinander verbundenen Metallstreifen von unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Verbunden werden die beiden Metalle durch

nieten, schweißen oder kleben. Wird nun das Bimetall erwärmt, so krümmt es sich zu der Seite mit dem geringeren Ausdehnungskoeffizient. Geeignete Metalle sind hierfür zum Beispiel Zink-Eisen (1:3). Die kompakte und unempfindliche Spiralbauweise hat sich besonders in preiswerten Thermometern durchgesetzt. Der mögliche Temperaturbereich beträgt -70°C bis 600°C und die Meßunsicherheit liegt zwischen 1% und 3%.

12.1.4 Thermoelemente

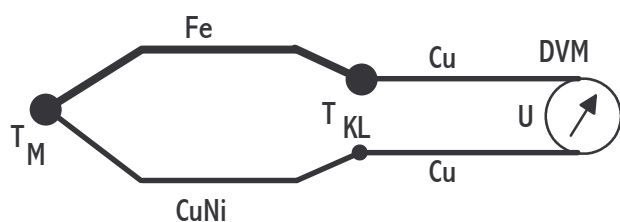
Wenn zwei verschiedene Metalle einander berühren, gehen einige Elektronen von dem einen in das andere über. Dieser Übertritt hört erst auf, wenn sich eine Kontaktspannung als Gegengewicht eingestellt hat, die abhängig von dem Metallpaar und der Temperatur ist. Diese Erscheinung wird mit dem Seebeck-Effekt bezeichnet und tritt meist unerwünscht an allen ungleichen Kontaktstellen auf. Schließt man nun die zwei Metalle zu einem Ring gleicher Temperatur, also mit zwei gleichen Kontaktstelle zusammen, so heben sich die zwei Spannungen entgegengesetzt auf. Beim Thermoelement wird nun aber eine Kontaktstelle auf eine definierte Vergleichstemperatur von zum Beispiel 0°C gebracht. Wenn die zweite Kontakt-Meßstelle nun eine andere Temperatur hat, entsteht im Stromkreis ein Thermostrom durch die nun unterschiedlichen Kontaktspannungen. Aus der thermoelektrische Spannungsreihe bezogen auf Blei (Pb), werden die Metalle so ausgewählt, daß sie eine möglichst große Thermospannung erzeugen. Mit der Zeit haben sich bestimmte Kombinationen bewährt, die man in ihrem Verhalten sehr gut bekannt sind. Sie werden in der IEC584-Norm als Grad-Spannungs-Tabellen bezogen auf 0°C Vergleichstemperatur beschrieben. Die gebräuchlichsten sind der J- und K-Typ.

Typ	Thermopaar	$S(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	Uns. $^{\circ}\text{C}$	Plus-Minus-Farbe
J	Eisen-Konst. (Fe-CuNi)	51 *	-210 bis 750	1 bis 3	schwarz weiß
T	Kupfer-Konst. (Cu-CuNi)	40 *	-270 bis 350	0,5 bis 2,5	braun weiß
K	NiCrom-Nickel (NiCr-Ni)	40 *	-240 bis 1200	1,5 bis 3	grün weiß
E	NiCrom-Konst. (NiCr-CuNi)	60 *	-240 bis 900	1,5 bis 6	violett weiß
N	Nicrosil-Nisil (NiCrSi-NiSi)	26 *	-270 bis 1200	2,5 bis 3	rot orange
S	Platinhod.-Platin(Pt10Rh-Pt)	10,3 *	-50 bis 1600	1 bis 4,5	orange weiß
R	Platinhod.-Platin(Pt13Rh-Pt)	11,5 *	-50 bis 1600	1 bis 4	orange weiß
B	Plat.hod.-Plat.(Pt30Rh-Pt6Rh)	6 *	0 bis 1700	1,5 bis 8	- -

*S,R,B bezogen auf 600°C sonst 0°C .

Uns. je nach Toleranzklasse und Temperatur

Die Seebeckkonstante (S) mit je nach Quelle unterschiedlichen Angaben, ist abhängig von der Bezugstemperatur, da die Steigungen der Temperatur-Spannungskurven nicht so linear sind. In der Praxis haben wir außer dem Thermoelement (J) Eisen-Konstantan noch die Übergänge von Eisen-Kupfer und Konstantan-Kupfer zum Voltmeter, mit dem die Thermospannung gemessen werden soll. Da die Vorzeichen der Übergänge umgekehrt sind, ist nur noch die Differenz zwischen Eisen und Konstantan von Bedeutung und kann in die



Meßstelle gedacht werden. Daher muß die Voltmeterklemmenspannung, die hier 20°C und nicht wie üblich 0°C beträgt, korrigiert werden. Ein großer Nachteil ist die Unsicherheit für die Temperaturbestimmung der Voltmeterklemmen.

$$U_0 = U_{DVM} + U_{KI} \quad (12.5)$$

Beispiel: Für die Klemmentemperatur des Voltmeters gilt: $T_{KI}=20^\circ\text{C}$ aus Tabelle $\Rightarrow U_{KI}=1,02\text{mV}$
 Gemessene Thermospannung: $U_{DVM}=9,75\text{mV}$ mit Gl. 12.5 $\Rightarrow 9,75\text{mV}+1,02\text{mV}=10,77\text{mV}$
 aus Tabelle $\Rightarrow 200^\circ\text{C}$ = Temperatur der Meßstelle

Allgemein lassen sich die Thermolemente im Temperaturbereich von 1K bis 3000K einsetzen, was ihren häufigen Einsatz erklärt. Das Problem mit der Vergleichstellentemperaturmessung und elektronischen Kompensation um auf einen linearen Spannungsfaktor von $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ zu kommen wird, wie später erläutert, heute einfach gelöst. Thermolemente sind einfach herzustellen, haben geringe Abmessungen und dadurch eine kleine Ansprechzeit. Für deren Auslesen können übliche hochohmige Voltmeter benutzt werden. Die beiden isolierten Einzeldrähte (0,4mm bis 5mm) des Thermopaars werden an ihrer Meßstelle verschweißt, verdrillt oder verlötet. Eine Alterung oberhalb der höchsten Einsatztemperatur ist zu empfehlen. Die Isolation der Drähte ist nach dem gewünschten Temperatureinsatzbereich zu wählen. Es bieten sich Lacke, Kunststoffe oder auch Schutzrohe aus Gläsern an. Die Fühlerspitze ist empfindlich gegen oxydierende Gase, Schwefel, Öle, Silikatdämpfe und wird daher meist zum Schutz in einen Meßfühler gebracht. Die Formen der Meßfühler, in dem sich das Thermopaar befindet um es zu schützen, können je nach Einsatzart vielfältig sein.

Anschluß: Ausgleichleitung.... messung uuunnnndddd!!....fehlt...

Besser Eis oder und Ausgleichsleitung ; elektronisch (Tietze- Schenk)...fehlt...

12.1.5 Widerstandsthermometer

Bei einem metallischen Leiter ändert sich der Widerstand etwa linear abhängig mit der Temperatur. Dieser positive Temperaturbeiwert wird bei bestimmten Metallen zum Aufbau eines Widerstandsthermometers ausgenutzt. Bevorzugt werden Metalle, deren Widerstandsänderungen groß und reproduzierbar sind. Äußere Einflüsse auf den Meßdraht ($30\mu\text{m}$ bis $250\mu\text{m}$), der auf einen Keramikträger bifilar und spannungsfrei gewickelt sein kann, sind zu vermeiden. Daher befindet sich der Fühler in einem Schutzrohr aus zB. Quarzglas. In der Präzisionsmeßtechnik haben sich das teure Platin und Nickel bewährt. Im Laborbereich wird reines Platin verwendet und der 0°C -Widerstand beträgt im allgemeinen 25 Ohm. Ein besonderes Merkmal der Platinthermometers ist seine hohe Meßstabilität nach vorheriger Alterung. Das Kupfer der Wicklungen wird oft zur Bestimmung von Temperaturen in Maschinen herangezogen. Die Polynome zur genauen Berechnung mit dem Referenzwert von $100\text{ Ohm}=0^\circ\text{C}$ sind nach DIN 43760 und IEC751 für legiertes Platin (PT100) festgelegt. Für das PT100 gelten zwei Temperaturbereiche für die beiden Polynome. R_{Ta} von -200°C bis 0°C und R_{Tb} von 0°C bis 850°C ; Gleichung 12.8.

$$R_{Ta} = 100 * (1 + 3,90802 * 10^{-3} * T - 0,580195 * 10^{-6} * T^2 - 4,27350 * 10^{-12} * (T - 100)T^3)$$

$$R_{Tb} = 100 * (1 + 3,90802 * 10^{-3} * T - 5,80195 * 10^{-7} * T^2 - 4,273 * 10^{-12} * T^4)$$

Nickel (Ni100) wird zwischen -60°C und 180°C mit dem Polynom von Gleichung 12.9 beschrieben.

$$R_T = 100 + 0,5485 * T + 0,665 * 10^{-3} * T^2 + 2,805 * 10^{-9} * T^4 \quad (12.9)$$

Wir die Temperatur gesucht, so kann man sie aus der DIN-Tabelle mit dem gemessenen Widerstand ablesen. Es ist auch eine Berechnung mit dem nach T umgewandelten Polynom möglich. Für das PT100-Element im Bereich über 0°C gilt Gleichung 12.10.

$$T = \frac{-100 \cdot 3,908 \cdot 10^{-3} + \sqrt{((100 \cdot 3,908 \cdot 10^{-3})^2 - 400 \cdot -5,8 \cdot 10^{-7} \cdot (100 - R))}}{200 \cdot -5,8 \cdot 10^{-7}} \quad (12.10)$$

In Verbindung mit Gleichung 12.11 hergeleitet aus 12.1 kann der Temperaturkoeffizient der Metalle zwischen 0°C und 100°C angewendet werden.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + a \cdot (T - T_0)) \quad (12.11a)$$

$$\Delta R = R_0 \cdot a \cdot (T - T_0) \quad (12.11b)$$

TK:	PT-rein	PT100	Ni100	Kupfer	Eisen	Gold	Constantan
1/°C	0,003925	0,00385	0,00618	0,00427	0,005?	0,0034?	40ppm

Beispiel: $R_0 = 100 \text{ Ohm}$; $T_0 = 0^\circ\text{C}$; PT100 $\Rightarrow a = 0,00385 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $T = 30^\circ\text{C} \Rightarrow$ mit Gl. 12.11: $R_T = 111,6 \text{ Ohm}$

Die Meßunsicherheiten in $\pm^\circ\text{C}$ für die Widerstandsthermometer nach DIN sind wie folgt festgelegt.

PT100	$0,15 + 0,002 \cdot T$	bzw.	$0,3 + 0,005 \cdot T$	Klasse A/B
Ni100	$0,4 + 0,007 \cdot T$	$> 0^\circ\text{C}$	$0,4 + 0,028 \cdot T$	$< 0^\circ\text{C}$

Beispiel: PT100 Klasse A bei $23^\circ\text{C} \Rightarrow \pm 0,155^\circ\text{C}$ Klasse B bei $200^\circ\text{C} \Rightarrow \pm 1,3^\circ\text{C}$

Da es sich bei der Temperaturbestimmung um eine niederohmige Widerstandsmessung handelt, sollte nur vierpolig an den das Thermometer angeschlossen werden, auch wenn spezielle zwei- und dreipolige Meßvarianten möglich sind. Entweder werden zur Widerstandsbestimmung Meßbrücken, wie zum Beispiel der Gleichstrom-Komparator nach Kuster (Guildline) oder ein Präzisionsmultimeter eingesetzt. Die Meßunsicherheit bei 0°C der Anzeigegeräte liegt dann zwischen $1\text{mK} = 0,4\text{mOhm}$ (4ppm) und $10\text{mK} = 3,9\text{mOhm}$ (40ppm). Um einen großen Meßfehler durch Eigenerwärmung auszuschalten, ist ein Meßstrom von maximal 1mA zu verwenden. Bei diesem Strom liegt der Erwärmungsfehler für die 25 Ohm-Version bei 0,5mK bis 5mK im Wassertripelpunkt (0°C). Der Widerstand bei Nullstrom ($I=0\text{A}$) läßt sich zum Beispiel bei 0°C durch eine Widerstandsmessung mit verschiedenen Meßströmen bestimmen.

$$R_0 = R_1 - I_1^2 \cdot \frac{R_2 - R_1}{I_1^2 \cdot I_2^2} \quad (12.12)$$

Wie hoch der Meßfehler ist hängt von dem Medium, in dem gemessen wird und dem Eigenerwärmungskoeffizienten (E) ab. Für die Wärmeleistung im Meßwiderstand gilt Gleichung 12.13).

$$P = R \cdot I^2 \quad (12.13)$$

In der Praxis ergibt dies: $100\text{Ohm} \cdot 1\text{mA}^2 = 0,1\text{mW}$. Für kleine Flachfühler (10mm*2mm) beträgt der Eigenerwärmungskoeffizient in Luft von 1m/s $0,2^\circ\text{C/mW}$. Bei einem Meßstrom von 1mA beträgt so die Temperaturerhöhung durch die Eigenerwärmung $0,02^\circ\text{C}$. In Flüssigkeiten, die eine größere Eigenwärme abführen können, ist dieser Effekt geringer und müßte im einzelnen bei verschiedenen Meßströmen ermittelt werden.

$$E = \frac{\Delta T}{P} \quad [^\circ\text{C/mW}] \quad (12.14)$$

Die Ansprechzeit (90%) ist nur bei den kleinen Flachplatinfühlern ohne Schutzgehäuse gering und liegt zwischen 20s bei Luft von 1m/s und 0,4s bei Wasser von 0,4m/s. Für die großen Laborthermometer sind besonders bei Präzisionsmessungen mehrerer Minuten (10 bis 30) zu veranschlagen. Die Eintauchtiefe in die Meßflüssigkeit sollte so groß wie möglich sein, ohne

den Fühler zu schädigen. Meßfehler können durch Thermospannungseffekte an den Metallübergängen entstehen. Durch die Widerstands-Meßtechnik der Multimeter, messen der Thermospannung oder Stromumpolung, können diese Einflüsse klein gehalten werden. Die Meßkabel selber sollten nicht zu lang, möglichst abgeschirmt und lose verlegt an den Meßfühler heranführen. Oft eigene Spezialkabel...

thermospannungen ua. fehler- in Ordner und elektr. Thermometer...fehlt....

bauarten (materialien) abhängig von verwendung und meßunsicherheit Guidline
Bsp...fehlt....

12.2 Feuchte

Die Feuchte ist ein Maß für die Wasser- oder Wasserdampfkonzentration in Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen. Man unterscheidet zwischen der absoluten Feuchte, der Masse Wasser oder Wasserdampf pro Volumen [g/m^3] und der relativen Feuchte, dem Verhältnis von absoluter Feuchte zur maximalen absoluten Feuchte, die meist in Prozent angegeben wird.

$$f_a = \frac{\text{Wassermasse} [\text{g}]}{\text{Volumen} [\text{m}^3]} \quad (12.30)$$

$$f_r = \frac{f_a}{f_{a \text{ max}}} \quad (12.31)$$

$$f_r = f_r * 100 \quad [\%] \quad (12.32)$$

Für Luft mit dem Wasserdampfdruck (p_w) und der Gaskonstante (R_w) für Wasserdampf kann man Gleichung 12.30 umbeschreiben. Hier zeigt sich, daß die Feuchte bei Luft abhängig von der Temperatur ist. Der Druck bei Sättigung (p_s).

..????..

$$f_a = \frac{p_w}{R_w * T} \quad (12.33)$$

$$f_{a \text{ max}} = \frac{p_s}{R_w * T} \quad (12.34)$$

$$R_w = 47.07 \quad [\text{m}^2/\text{C}] \quad ?? \quad (12.35)$$

$$f_r = \frac{p_w}{p_s} \quad (12.36)$$

Bei einer Temperatur von 100°C und einem Normaldruck von 760 Torr beträgt die relative Feuchte 100% und die absolute Feuchte $597.7 \text{ g}/\text{m}^3$.

Sättigungsdruck, partiladdruck ua... fehlt

Allgemein läßt sich sagen, daß warme Luft bei gleicher relativer Feuchte eine größere absolute Wassermenge enthält, wie kühlere Luft.

Für unsere Anwendungen interessiert nur die Luftfeuchtigkeit und deren Bestimmung. Für elektrische Kalibrierräume wird normalerweise eine relative Luftfeuchtigkeit von $50 \% \pm 10\%$ vorgeschrieben. Dieser Wert ist nicht nur für den Menschen sehr angenehm, sondern auch in der Meßtechnik von großem Nutzen. So verstärkt eine geringe Luftfeuchtigkeit die elektrostatischen Aufladungen, die zu Bauteildefekten führen können und große Feuchtigkeit bildet Rost, der in mechanischen Kalibrierstellen, die deswegen mit niedrigerer Luftfeuchte betrieben werden, mit den metallischen Normalen zu erheblichen Problemen beiträgt. Die weiteren Betrachtungen zur Feuchte behandeln nur noch die Kalibrierung zur Luftfeuchte.

12.2.1 Feuchtekalibrierung

Die logische Methode, die aber nur mit großem Aufwand zu realisieren ist, in absolut trockener Luft eine bestimmte Menge Wasser einzustäuben. So wird eine bestimmbar absolute Luftfeuchte erzeugt, die abhängig von der Lufttemperatur dann einer berechenbaren relativen

Luftfeuchte entspricht. In dieser Umgebung können dann Feuchtemesser mit einer Unsicherheit von kleiner 0.3% kalibriert werden.

Eine weitere Methode um eine bekannte Luftfeuchte zu erzeugen ist, in einer kleine geschlossene Klimakammer ein Gefäß mit einer bestimmten wäßrigen Lösung zu bringen. Die Luftfeuchte in der Klimakammer ist abhängig vom Wasserdampfdruck der Lösung, der niedriger als der über reinem Wasser ist. In der DIN 50008 gibt es hierzu Feuchtetabellen. Die folgenden Tabelle gibt mit einer eigenen Unsicherheit von 1% bis 2% die relative Luftfeuchte über wäßrigen gesättigten Salzlösungen bei verschiedenen Temperaturen an.

Name	Löslichkeit g/100g H ₂ O	10°	relative Luftfeuchte [%] bei Temperatur [°C]							
			15°	20°	23°	25°	30°	40°	60°	
Wasser	H ₂ O	0	100	100	100	100	100	100	100	100
Kaliumnitrat	KNO ₃	32	96	95	94	93	93	91	88	82
Kaliumchlorid	KCl	34	87	86	86	85	85	84	83	80
Natriumchlorid	NaCl	36	76	75,6	75,6	75,5	75,4	75	75	75
Kaliumkarbonat	KCO ₃	112	45	44	44	43	43	42	40	36
MgCl ₂			33	33	33	33	33	33	-	-
Kaliumacetat	CH ₃ COOK	228	24	24	23	22	22	22	20	-
Lithiumchlorid	LiCl	83	12,4	12,4	12	12	11,8	11	11	11
Silicagel (Blaugel)	-		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Natriumchlorid=Kochsalz										

Es ist auch möglich mit bestimmten Wasser-Schwefelsäure-Verhältnissen zwischen 5°C und 50°C relative Luftfeuchten von 4% [70%H₂SO₄] bis 98% [5%H₂SO₄] herzustellen.

12.2.2 Haar-Hygrometer

Ein gut entfettetes Haar hat die Eigenschaft, sich bei Wasseraufnahme zu verlängern und bei Wasserabgabe zu verkürzen. Diese mechanische Änderung macht man sich bei den Haarhygrometern zu Nutze. Sie gibt es als anzeigende und schreibende Meßgeräte zu kaufen. Die Meßunsicherheit für die relative Feuchte beträgt 3% bis 5%. Konstruktionsbedingt liegt die Zeitkonstante bei etwa 2 Minuten. Die Längenänderung für 100% Feuchte beträgt ca. 2%. Die Anzeige ist nahezu temperaturunabhängig und erlaubt Messungen zwischen +45°C und -35°C. Bei Feuchtwerten unter 40% verlängert sich das Haar auch ohne Feuchteerhöhung, was zu Meßfehlern führt. Dies kann durch eine Regeneration, alle 2 Wochen, bei nahezu gesättigter Luft (95%) verhindert werden. Dazu ist die Haarharfe mit destilliertem Wasser zu befeuchten, oder der Feuchtemesser mit einen nassen Lappen zu umwickeln. Neuerdings gibt es auch Haarhygrometer mit Kunststoffäden, die nicht regeneriert werden. Die Haarharfe ist empfindlich gegen jede Art von Luftpartikel, die sich auf der Oberfläche ablagern. So müssen, wenn sich Staubablagerungen nicht vermeiden lassen, die Haare regelmäßig gereinigt werden. Stark saure oder alkalisch niederschlagende Gasbestandteile zerstören mit der Zeit die Haare.

12.2.3 Taupunkt-Hygrometer

Wenn feuchte Luft an einem Metallspiegel vorbeiströmt und dieser soweit abgekühlt wird, bis sich an diesem Tau oder Reif absetzt, so ist die Metallspiegeltemperatur zu genau diesem Zeitpunkt ein Maß für die absolute Luftfeuchtigkeit. Die Taupunkttemperatur (Uns. ±0,1°C) wird mit einem präzisen Widerstandsthermometer bestimmt. Der meßtechnische Aufwand für

genaue Messungen ist zwar sehr hoch, jedoch können diese Geräte als Vergleichshygrometer verwendet werden. Für die absolute Feuchte f gilt mit dem Taupunkt (Temperatur) Gleichung 12.37.

$$f_a = 5 \left[\frac{g}{m^3} \right] * 10^{\frac{t[^\circ C]}{24^\circ C}} \quad (12.37)$$

Aus dieser Formel läßt sich die Meßunsicherheit für die relative Feuchte mit $dT \pm 0.1^\circ C$ bestimmen.

relative Feuchte [%]	5	10	20	30	50	75	100
Meßunsicherheit [%]	0,1	0,2	0,4	0,6	1	1,5	2

Es zeigt sich, dass die Meßunsicherheiten von dem Feuchtwert abhängig sind.

12.2.4 Psychrometer

Luft einer bestimmten Temperatur, die an einem feuchten Gegenstand mit konstanter Geschwindigkeit vorbeiströmt, kühlt diesen abhängig von dem Feuchtegehalt der Luft unterschiedlich stark ab. Hierbei ist bei trockener Luft die Verdunstung intensiver und damit die Abkühlung größer. Das Psychrometer, bestehend aus einem Raumthermometer und einem befeuchteten Thermometer, bestimmt die Temperaturdifferenz. Nur mit einem Diagramm läßt sich dann der Feuchtegrad bestimmen, da der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Temperaturdifferenz nicht linear ist. Es gilt allerdings, wenn beide Temperaturen gleich sind, beträgt die relative Feuchte 100%. Ein bekannte Bauform ist das Assmann-Aspirationspsychrometer, das aufgebaut ist aus zwei Normalglasthermometern mit hoher Auflösung, wobei unten an einem der Thermometer eine befeuchteter Gewebehülle angebracht ist und einem Motor mit Luftschaube, der für einen konstanten Luftstrom (2,4m/s) sorgt. Ein entsprechendes Gehäuse erreicht die richtige Luftführung. Bei der Messung muß das Gewebe immer wieder mit destilliertem Wasser nachbefeuchtet werden. Messungen können zwischen $-35^\circ C$ und $100^\circ C$ unter Verwendung von speziellen Auswertediagrammen vorgenommen werden, jedoch ist eine direkte Wärmebestrahlung zu vermeiden. Die Meßunsicherheit ist zwischen $+5^\circ C$ und $40^\circ C$ mit etwa 1,2% relative Feuchte am geringsten. Der Luftdruckeinfluß (Nennwert 755 ?760?? Torr) liegt bei ± 15 Torr unter 1%. Die Meßzeit hängt von der Zeitkonstante des befeuchteten Thermometers ab und liegt bei 2 bis 10 Minuten.

... Tabelle ?...dT => % ...fehlt...

12.2.5 Kapazitives-Hygrometer

Ein kapazitiver Meßwertaufnehmer, der mit einem feuchteabhängigen Dielektrikum aufgebaut ist, ändert in Abhängigkeit der Feuchte seine Kapazität. Befindet sich dieser Meßwertaufnehmer als frequenzbestimmendes Glied in einer Oszillatorschaltung, so ist die erzeugte Frequenzänderung ein Maß für die Kapazitätsänderung. Nach einer entsprechende Grundkalibrierung kann so die Feuchte bestimmt werden. Diese Meßwertaufnehmer neigen zur Alterung und können bei wasserdampfgesättigter Luft ($>95\%$) geschädigt werden. Für gebräuchliche Fühler gelten die in der Tabelle aufgeführten Werte.

Nennkapazität	Empfindlichkeit	Frequenzbereich	Meßbereich	Meßuns.
150pF - 500pF	(0,4pf bis 1,7pF)/%	10kHz - 800kHz	(0%)10% - 90%	2% - 7%

Die Ansprechzeit liegt je nach Bauform des Fühlers zwischen 5 Sekunden und 5 Minuten. Für die Arbeitstemperatur werden üblich zwischen $0^\circ C$ und $70^\circ C$ angegeben. Die

Meßwertaufnehmer lassen sich sehr gut in elektronische Schaltungen, auch zur Dauermessung, integrieren. Die hochwertigen, aber auch teuren Exemplare eignen sich für Präzisionsmessungen und mit den preiswerten Typen lassen sich einfache Meßgeräte, zum Beispiel für den "Hausgebrauch", herstellen.

12.2.6 Lithiumchlorid-Hygrometer

Wenn man ein Glasthermometer am unteren Ende mit einem LiCl getränktem Glasfasergebeude umgibt und dieses mit elektrisch getrenntem blanken Silberdraht umwickelt, durch den Wechselstrom fließt, so wird sich das Thermometer abhängig von der Luftfeuchte erwärmen. Trockenes LiCl hat die Eigenschaft aus der Luft die Feuchte aufzunehmen und dann elektrisch leitend zu werden. Die Anordnung mit dem Draht sorgt dafür, daß durch diesen und die feucht gewordene LiCl-Schicht so lange Strom fließt, bis das LiCl trocken und nicht leitend wird. Es stellt sich damit eine Gleichgewichtstemperatur ein, die sich der Taupunkttemperatur beziehungsweise dem Wasserdampfdruck zuordnen läßt. Es können auch andere Thermometer, zum Beispiel elektronische, eingesetzt werden, wobei mit steigender Temperaturunsicherheit auch die Feuchte ungenauer bestimmt wird.

Die Meßunsicherheit für die Temperatur beträgt bestenfalls $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 2\%$ relative Feuchte, die Zeitkonstante 1 Minute und die Alterung ist mit einem halben Jahr hoch, da gegebenenfalls dann wieder eine Regenerierung der LiCl-Flüssigkeit nötig wird. Der Feuchtemeßbereich liegt bei 15% bis 100% in einer Umgebungstemperatur von -35°C bis 100°C . Der Fühler ist gegen etliche Gase und leitende Stäube empfindlich.

Literatur:91/92/93/94/Din50008/VDE3511