

Theorie Feuchtemessung

Das Gesetz von Dalton

Luft ist ein Gemisch aus verschiedenen Gasen. Bei normalen Umgebungsbedingungen verhalten sich die Gase ideal, das heißt die Gasmoleküle stehen in keiner Wechselwirkung und das Gesetz von Dalton ist anwendbar:

Der Gesamtdruck eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Partialdrücke

$$p \text{ [mbar, hPa]} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots$$

Der Partialdruck ist definiert als jener Druck, den das Gas annehmen würde, wenn es allein das gesamte Volumen ausfüllen würde. Wasser im gasförmigen Zustand (Dampf) ist eine zusätzliche Komponente in der Gasmischung. Bei Normalbedingungen verhält es sich wie ein ideales Gas. Mit dem Gesetz von Dalton ergibt sich für p:

$$p \text{ [mbar, hPa]} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots + e$$

oder

$$p \text{ [mbar, hPa]} = p_{da} + e$$

e Partialdruck von (Wasser) Dampf
p_{da} Partialdruck der trockenen Luft

Dampfdruck über Flüssigkeit

Die Konzentration von Wasserdampf in Luft ist limitiert. Wobei der maximale Partialdruck von Wasserdampf eine Funktion der Temperatur ist. Luft mit hoher Temperatur kann mehr Wasserdampf aufnehmen als Luft mit niedriger Temperatur.

Dieses Verhalten kann wie folgt erklärt werden: Die Moleküle in einer Flüssigkeit bewegen sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten (oder Energien), wobei der Mittelwert dieser Energie proportional zur Temperatur der Flüssigkeit ist. (Abb.1)

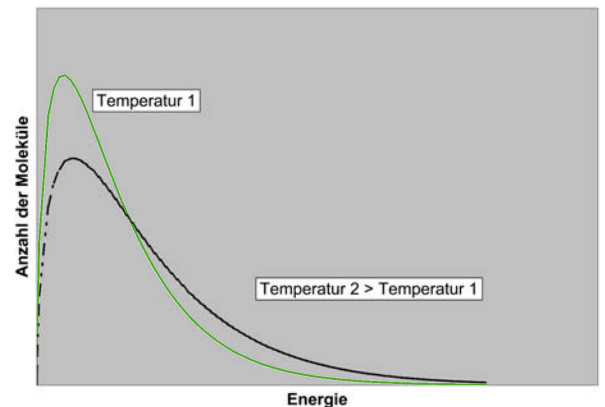


Abb.1: Statistische Verteilung der Moleküle in einer Flüssigkeit

In einem teilweise mit Wasser gefüllten geschlossenen Behälter mit einer Temperatur T (Abb.2) stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Verdampfung und Kondensation ein.

Diese Balance zwischen Verdampfung und Kondensation führt zu einem Wasserdampfpartialdruck (bzw. einer Konzentration von Wassermolekülen) welcher ausschließlich von der Temperatur abhängt. Je höher die Temperatur desto größer ist die Energie der Wassermoleküle, d.h. bei einer Temperaturerhöhung verschiebt sich das Gleichgewicht zu einem höherem Wasserdampfpartialdruck.

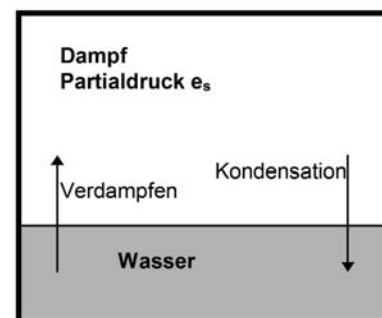


Abb. 2 : Gleichgewichtszustand bei Temperatur T

Die höchst mögliche Gleichgewichtskonzentration bei einer Temperatur T ist der Gleichgewichtsdampfdruck (oder auch ausgedrückt als Wasserdampfpartialdruck e oder als Anzahl der Wassermoleküle/m³) Dieser Wert kann bei dieser Temperatur nicht überschritten werden. Eine höhere Konzentration würde unmittelbar zu Kondensation führen und somit wiederum zu einer Einstellung des Gleichgewichtes.

Dieser max. mögliche Dampfkonzentration bei einer Temperatur T wird Sättigungskonzentration oder ausgedrückt als Partialdruck

Sättigungsdampfdruck über Wasser e_{ws}

genannt.

Der Sättigungsdampfdruck über Wasser e_{ws} hat eine exponentielle Abhängigkeit von der Temperatur T - siehe Tab.1.

Er ist (von kleinen Korrekturen abgesehen) unabhängig vom Luftdruck an der Wasseroberfläche.

Dampfdruck über Eis

Bei Temperaturen unterhalb von 0,01 °C (Tripelpunkt von Wasser) kann Wasser sowohl als Flüssigkeit als auch in fester Form (Eis) existieren, wobei die flüssige Form nicht stabil ist.

Für Temperaturen kleiner als 0,01 °C gibt es zusätzlich zum Dampfdruck über Wasser einen Dampfdruck über Eis. (Tab 2.)

T [°C]	e_{ws} [mbar]	T [°C]	e_{ws} [mbar]
100	1014,19	0	6,112
90	701,82	-10	2,8652
80	474,16	-20	1,2559
70	312,02	-30	0,5103
60	199,48	-40	0,1903
50	123,53	-50	0,0644
40	73,853	-60	0,0195
30	42,470	-70	5,187E-03
20	23,392	-80	1,190E-03
10	12,281	-90	2,298E-04
0,01	6,117	-100	3,622E-05

T [°C]	e_{is} [mbar]
0.01	6,117
0	6,112
-10	2,5989
-20	1,0324
-30	0,3800
-40	0,1284
-50	0,0394
-60	0,0108
-70	2,615E-03
-80	5,472E-04
-90	9,670E-05
-100	1,402E-05

Tab.1: Sättigungsdampfdruck e_{ws} über Wasser

Tab.2: Sättigungsdampfdruck e_{is} über Eis.

Somit ergeben sich unter 0,01 °C zwei Kurven für den Sättigungsdampfdruck, welche in Abb. 3 in einer logarithmischen Skala aufgetragen sind. Von -100 °C bis 100 °C wechselt der Sättigungsdampfdruck über 8 Größeneinheiten.

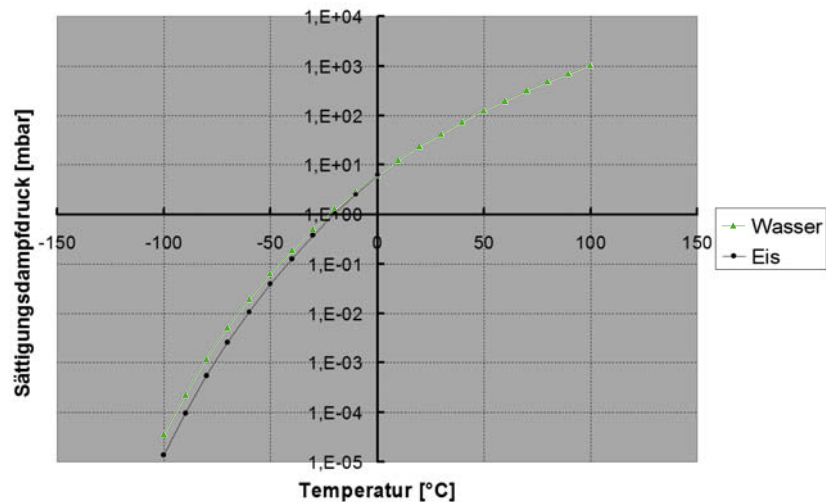


Abb. 3 : Sättigungsdruck über Eis und Wasser. Unter dem Tripelpunkt (0,01 °C) teilt sich die Kurve in zwei Graphen.

Real Gas Korrektur

Bis jetzt wurde Wasser als ideales Gas betrachtet, das heißt die Wassermoleküle agieren unabhängig voneinander im Gasgemisch.

In Wirklichkeit besteht eine geringe Interaktion zwischen den Molekülen, welche zu einem Anstieg des Sättigungsdruckes in Luft führt. Dies wird durch einen Vergrößerungsfaktor beschrieben $f(p,T)$.

Bei Normaldruck ist der Vergrößerungsfaktor nahe 1 und kann somit vernachlässigt werden. In diesem Fall kann Wasserdampf als ideales Gas betrachtet werden.

Feuchtfunktionen

Relative Feuchte r.F. [% rF]

Die in den Tabellen 1 und 2 angegebenen Werte geben den Sättigungsdampfdruck e_{ws} von Wasser als Funktion der Temperatur an. Diese Maximalwerte können nicht überschritten werden. Normalerweise ist der Wasserdampfpartialdruck e allerdings geringer.

Die relative Feuchte ist definiert als das Verhältnis zwischen dem aktuellem Wasserdampfpartialdruck e und dem Sättigungsdampfdruck e_{ws} :

$$\text{Relative Feuchte r.F.} = (e / e_{ws}) * 100 \quad [\% \text{ rF}]$$

Absolute Feuchte (Wasserdampfgehalt) dv [g/m³]

Die absolute Feuchte ist die in einem abgeschlossenen Volumen von 1m³ befindliche Wassermenge, die als Dampf vorliegt, unabhängig von der Temperatur des Gases.

$$\text{Absolute Feuchte } dv = mv / v \quad [\text{g/m}^3]$$

Taupunkt T_d [°C]

Wird ungesättigte Luft abgekühlt, so bleiben der Feuchtigkeitsgehalt und der Teildruck des Wasserdampfes zunächst konstant. Die relative Feuchte steigt jedoch an, da die kältere Luft weniger Feuchte aufnehmen kann.

$$\text{r.F.} = (e / e_{ws}) * 100 \quad e_{ws} = e_{ws}(T) \quad T \text{ nimmt ab} \implies e_{ws} \text{ nimmt ab} \implies \text{r.F. nimmt zu}$$

Bei 100% rF entspricht der Dampfdruck e in der Luft dem Sättigungsdampfdruck über Wasser $e_{ws}(T)$:

$$e = e_{ws}(T)$$

Wenn die Temperatur weiter abnimmt setzt Kondensation ein.

Die Taupunktstemperatur T_d ist jene Temperatur wo Kondensation beginnt.

Mischungsverhältnis oder Feuchtegrad r [g/kg]

r stellt das Verhältnis von in der Luft befindlichem Wasser in Gramm zur Masse der trockenen Luft dar.

$$r = \frac{\text{Masse Wasserdampf}}{\text{Masse Luft (trocken)}} \quad [\text{g/kg}]$$

Der Feuchtegrad bei 100% rF entspricht dem Sättigungsfeuchtegehalt. Dieser gibt die maximale Feuchtemenge an, die bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Luftdruck in gasförmigem Zustand in der Luft vorhanden sein kann.

Spezifische Enthalpie h [kJ/kg]

Die Enthalpie von 1 kg feuchter Luft mit relativer Feuchte $r.F.$ und entsprechendem Mischungsverhältnis r bei einer Temperatur T ist die jene Energie die benötigt wird um

- trockene Luft von 0°C auf T aufzuwärmen
- den Feuchteanteil zu verdampfen
- den Dampf von 0°C auf T aufzuwärmen

Die Enthalpie der ungesättigten Luft ist also die Summe aus der Enthalpie, um den enthaltenen Wasseranteil zu verdampfen, zuzüglich der Enthalpie, um das Wasser-Dampfgemisch auf die entsprechende Temperatur zu erwärmen. Die spezifische Enthalpie ist eine relative Größe, das heißt nur die Änderungen sind von Interesse, jedoch nicht der Absolutbetrag.

Beispiel 1 :

Um Luft von 20 °C auf 25 °C aufzuwärmen und von 40% rF auf 60% rF zu befeuchten wird eine spezifische Enthalpie von 20,2 kJ/kg benötigt.

	T [°C]	r.F. [%]	h [kJ/kg]
Status 1	20	40	34,6
Status 2	25	60	54,8
		Unterschied	20,2

Beispiel 2 :

Eine Aufwärmung von 20 auf 25 °C bei konstanter relativer Feuchte von 40% bedarf nur 10,3 kJ/kg.

	T [°C]	r.F. [%]	h [kJ/kg]
Status 1	20	40	34,6
Status 2	25	40	44,9
		Unterschied	10,3

Beispiel 3 :

Eine Aufwärmung von 20 auf 25 °C bei konstantem Partialdampfdruck (z.B. $e = \text{konst}$, $r = \text{konst}$, $T_d = \text{konst}$), die relative Feuchte nimmt von 40% auf 29.5% rF ab. Man benötigt nur 5,1 kJ/kg Energie.

	T [°C]	r.F. [%]	h [kJ/kg]
Status 1	20	40	34,6
Status 2	25	29,5	39,7
		Unterschied	5,1

Mollier Diagramm

Mit Hilfe des Mollierdiagramms können viele thermodynamische Vorgänge der Klimatechnik grafisch gelöst werden. Sämtliche Feuchtfunktionen wurden in einem Diagramm vereinigt.

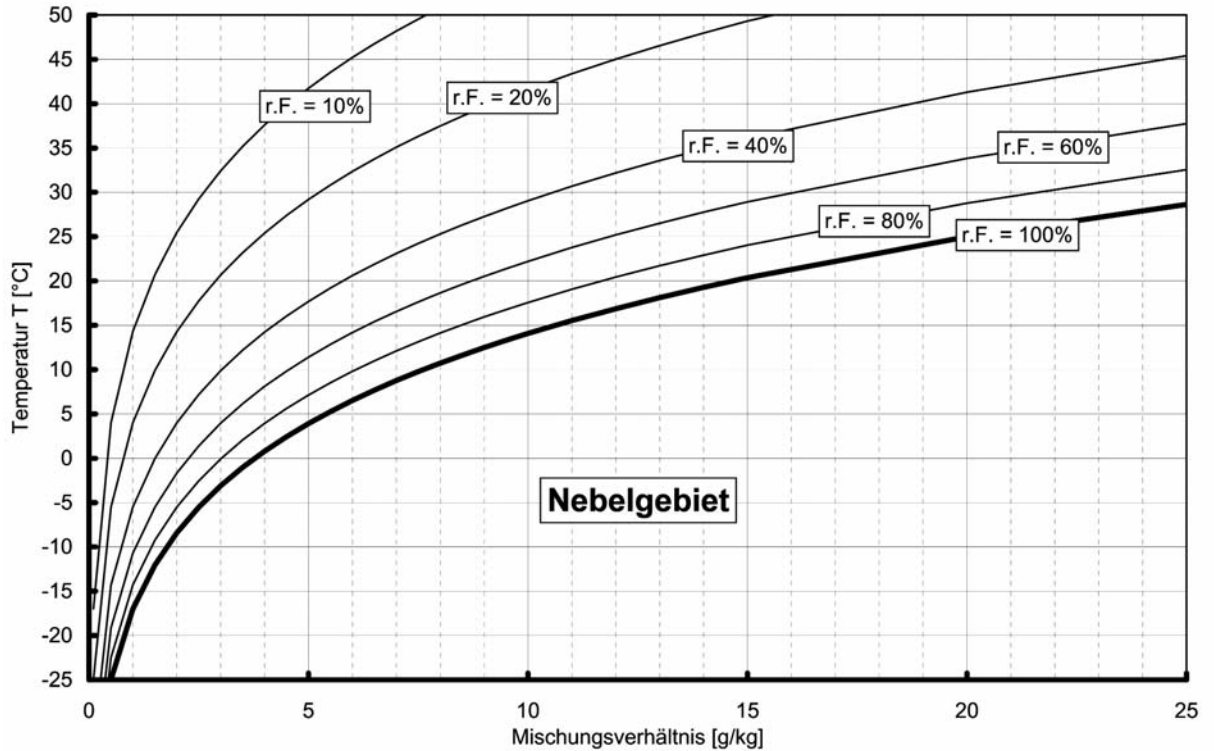


Bild 4a : Mollier Diagramm: Kurven für konstante relative Feuchte. Der Bereich unterhalb der 100% Kurve (Nebelgebiet) ist nicht gültig - Kondensation.

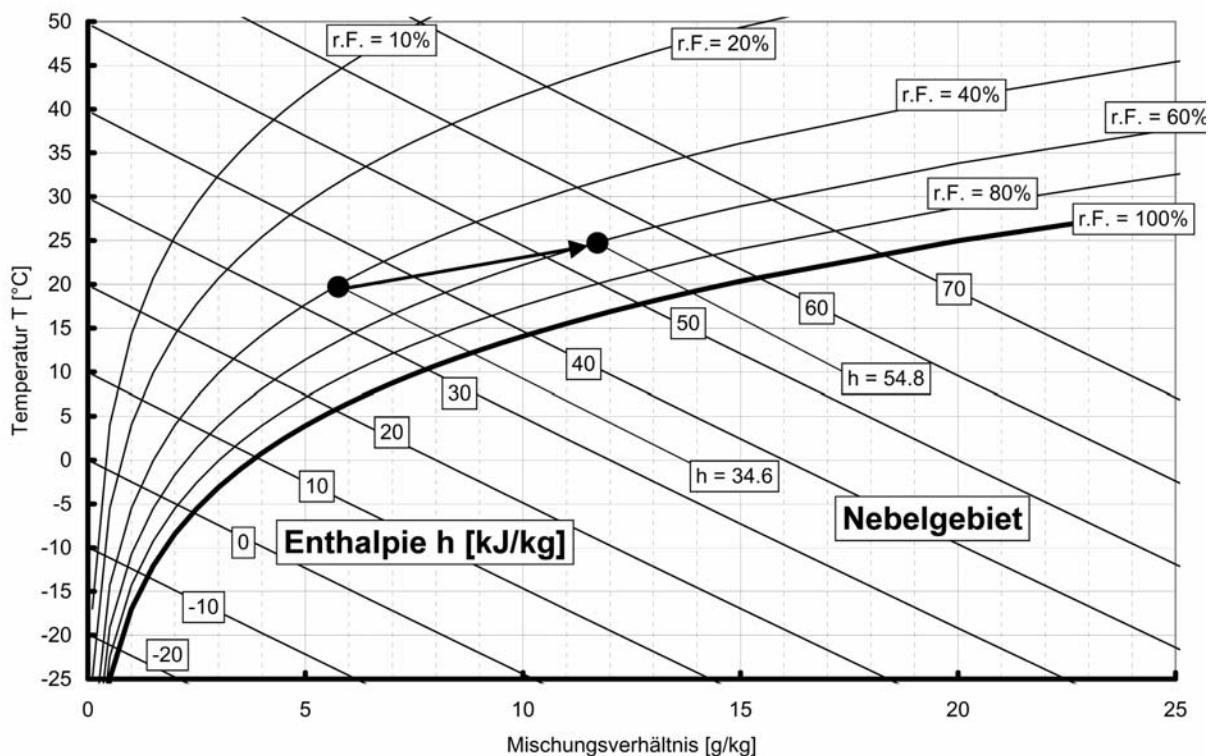
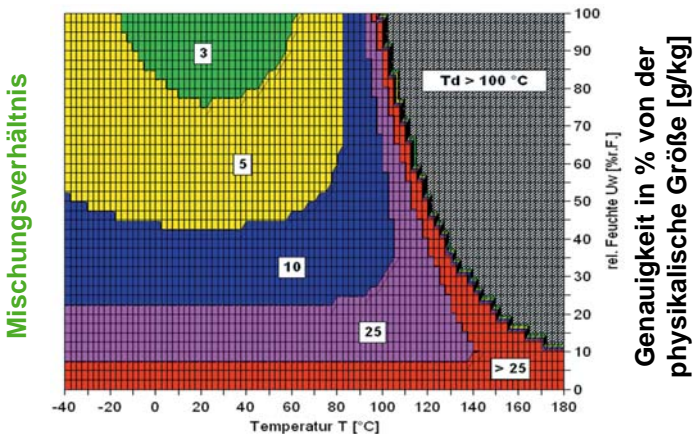
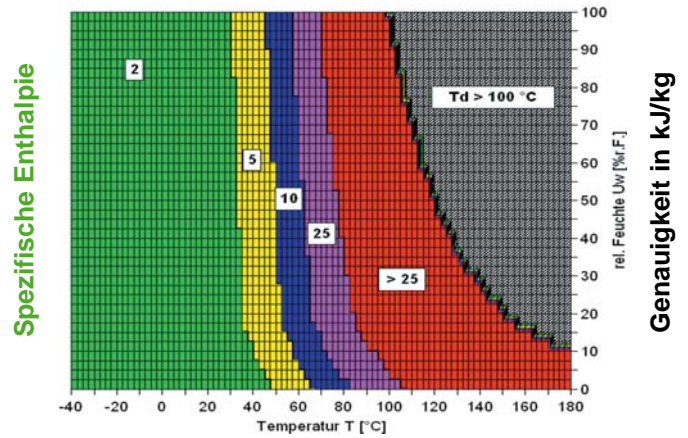
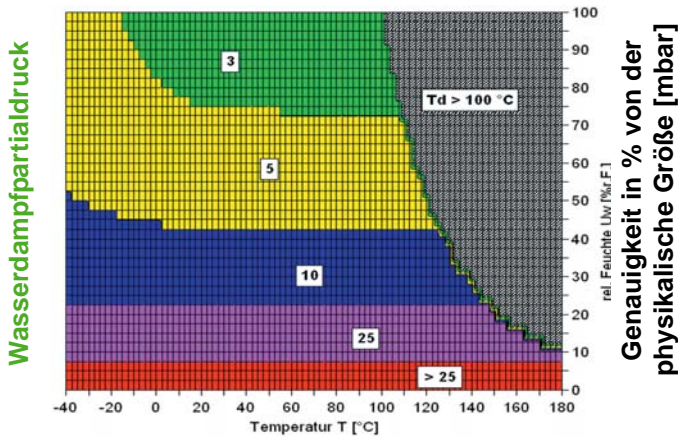
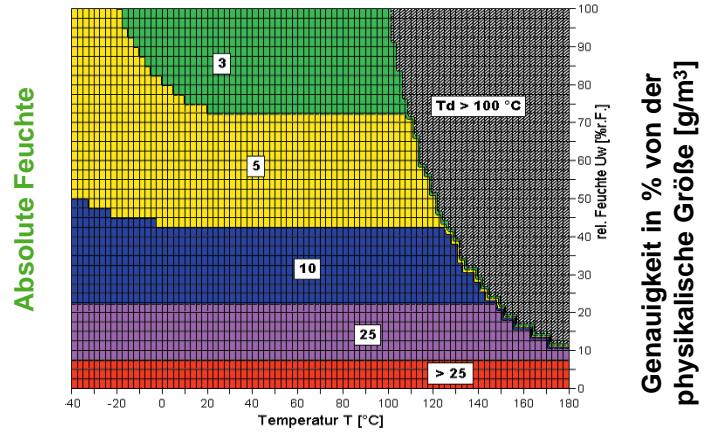
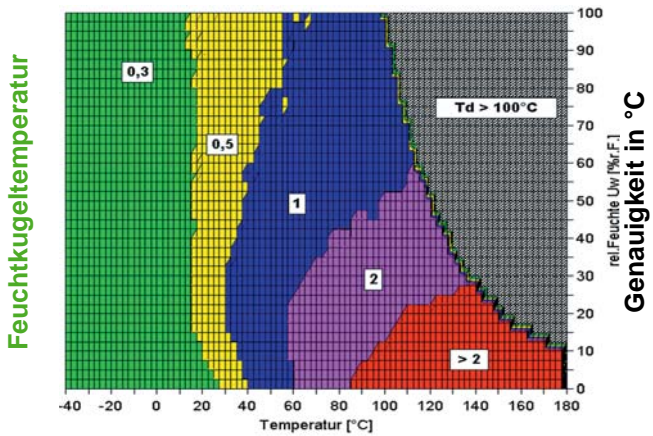
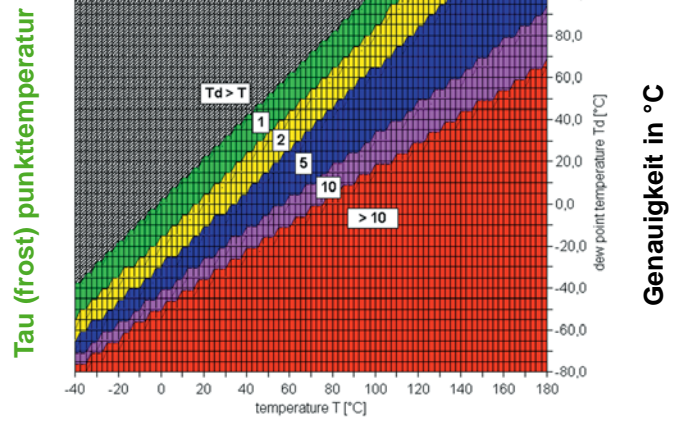
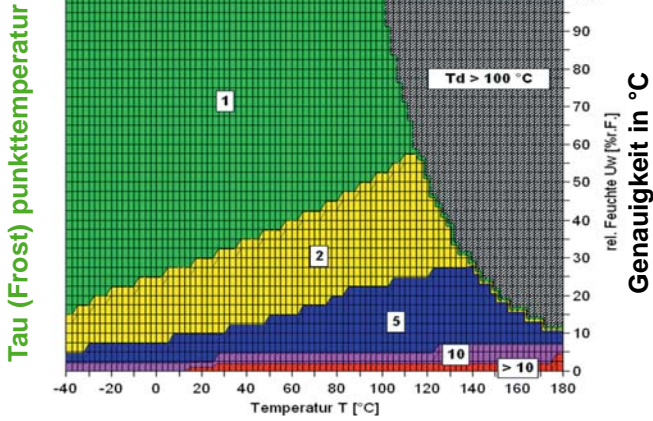


Bild 4b : Kurven gleicher Enthalpie hinzugefügt zu Bild 4a . Auch Beispiel 1 wurde aufgetragen.

Genauigkeiten der Rechenfunktionen



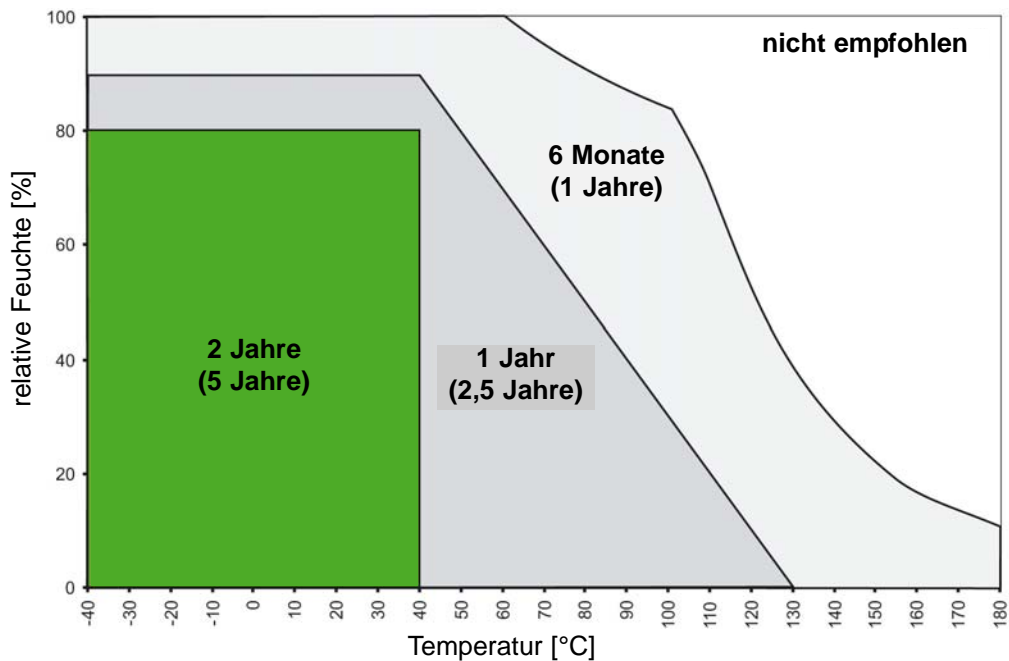
Die Genauigkeit der verschiedenen Rechenfunktionen hängt von der Messgenauigkeit der Feuchte- und der Temperatur ab. Die angegebenen Werte gelten für $\pm 2\%$ rF und $\pm 0,2$ °C. Durch eine spezielle Feuchte- und Temperaturkalibration können höhere Genauigkeiten erzielt werden.

Wartung von Feuchtemessumformern

Auf Grund ihrer ausgezeichneten Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit, ist bei E+E Feuchte/Temperatur Messumformern unter normalen Bedingungen keine Wartung nötig. Bei Anwendungen in stark verschmutzter Umgebung sollte die Filterkappe in regelmäßigen Abständen erneuert werden.

Für hohe Genauigkeitsanforderungen unter extremen Feuchte- und Temperaturbedingungen muss der Messumformer periodisch rejustiert werden. Das Intervall kann durch eine spezielle E+E Nieder- oder Hochfeuchtejustage verlängert werden.

Die folgende Abbildung sollte als Richtwert für die Rejustageintervalle verwendet werden.



Erster Wert für eine Messgenauigkeit im Bereich $\pm 2\%$ rF
Zweiter Wert für eine Messgenauigkeit im Bereich $\pm 5\%$ rF