

Technische Information zur

Feuchte-Messtechnik

Stand: März 01

Inhalt

Inhalt	Seite
1 Einführung in die Feuchtemesstechnik	1-1
1.1 Was ist Luftfeuchte?	1-1
1.2 Wie entsteht Luftfeuchtigkeit?	1-1
1.3 Zusammensetzung der Luft	1-2
2 Grundlagen der Feuchtemesstechnik	2-1
2.1 Konstanten und Begriffe	2-1
2.2 Der Sättigungsdampfdruck SVP	2-2
2.3 Sättigungsfeuchte SAH	2-3
2.4 Der Wasserdampfpartialdruck VP	2-4
2.5 Das Sättigungsdefizit DVP	2-4
2.6 Die relative Feuchte RH	2-5
2.7 Die Taupunkttemperatur DT	2-6
2.8 Das Mischungsverhältnis MH	2-7
2.9 Die spezifische Feuchte SH	2-7
2.10 Die Feuchte in Vol%	2-8
2.11 Der Frostpunkt FT	2-8
2.12 Enthalpie H	2-8
2.13 Beispiel	2-9
3 Messverfahren	3-1
3.1 Verdunstungsverfahren	3-1
3.1.1 Psychrometer	3-1
3.2 Sättigungsverfahren	3-1
3.3 Hygroskopische Verfahren	3-1
3.4 Spektrale Verfahren	3-1
3.5 Absorptionsverfahren	3-1
3.6 Sauerstoff-Komplementär Verfahren	3-1

1 Einführung in die Feuchtemesstechnik

Die Luft, so lehrt uns die Physik und Chemie, ist ein homogenes Gemenge verschiedener Gase, die atomar oder molekular auftreten. Trotz unterschiedlicher spezifischer Gewichte der beteiligten Gasarten findet keine Schichtbildung statt, da Sonneneinstrahlung und Winde für eine gleichmäßige Durchmischung sorgen. Des weiteren ist es naturwissenschaftlich erwiesen, dass sich die Luft aus 78 % (genauer: Vol%) Stickstoff, 21 % Sauerstoff (Verhältnis immer 3,71 : 1) sowie 1 % Edelgasen zusammensetzt. Dabei übersieht man meist, dass sich in eben dieser Luft noch etwas befindet, das einen nicht unerheblichen Anteil am Wohlbefinden des menschlichen Körpers hervorruft, nämlich der Wasserdampf.

Der Mensch, der sich in dieser Atmosphäre bewegt, ist dank der Temperaturempfindlichkeit seiner Haut, in der Lage, zu fühlen, ob die Luft die er atmet oder den Gegenstand den er berührt „feucht“ oder „trocken“ ist. Die Natur bedient sich dabei eines Verfahrens, das in der Physik als das „psychrometrische Feuchtemessprinzip“ bekannt ist.

Die „Temperatursensoren“, z.B. auf der Haut, im Mund oder an den Lippen, erfassen eine, durch die vorbeiströmende Luft entstehende Verdunstungskälte, die dem Menschen subjektiv einen Eindruck über die vorhandene Feuchtigkeit vermittelt. Vor allem der Mund- und Rachenraum (der trocken wird), die Augen (die in trockener Atmosphäre zu brennen beginnen, da die Tränenflüssigkeit verdunstet) oder die Haut selbst, können durch die entstehende Verdunstung feststellen, ob das Klima trocken oder feucht ist.

Die Feuchtigkeit bestimmt nicht nur das Wohlbefinden des Menschen, sondern in Produktionsprozessen auch die Qualität vieler Produkte.

1.1 Was ist Luftfeuchte?

Das Wort bezeichnet die Anwesenheit von Wasserdampf in Luft oder einem Gasgemisch. Wasserdampf ist der gasförmige Aggregatzustand von Wasser.

Wasserdampf ist immer unsichtbar (nicht zu verwechseln mit Nebel)!

Wasserdampf kann man sich als Gas vorstellen wie jedes andere Gas auch.

Wo immer Wasser oder Eis auftritt, findet Verdunstung oder das Gegenteil davon – Kondensation statt.

1.2 Wie entsteht Luftfeuchtigkeit?

Auf einer Wasser- oder auch Eisoberfläche werden aufgrund einer temperaturabhängigen Molekularbewegung Wassermoleküle in die umgebende Luft abgegeben. Würde diese Luft ruhen, so käme es nach einer gewissen Zeit zu einem Gleichgewichtszustand, in dem pro Zeiteinheit genau so viele Wassermoleküle vom Wasser in die Luft abgegeben werden, als auch umgekehrt. Physikalisch ausgedrückt bedeutet dies: der Sättigungsdruck der Luft ist gleich dem Verdunstungsdruck des Wassers.

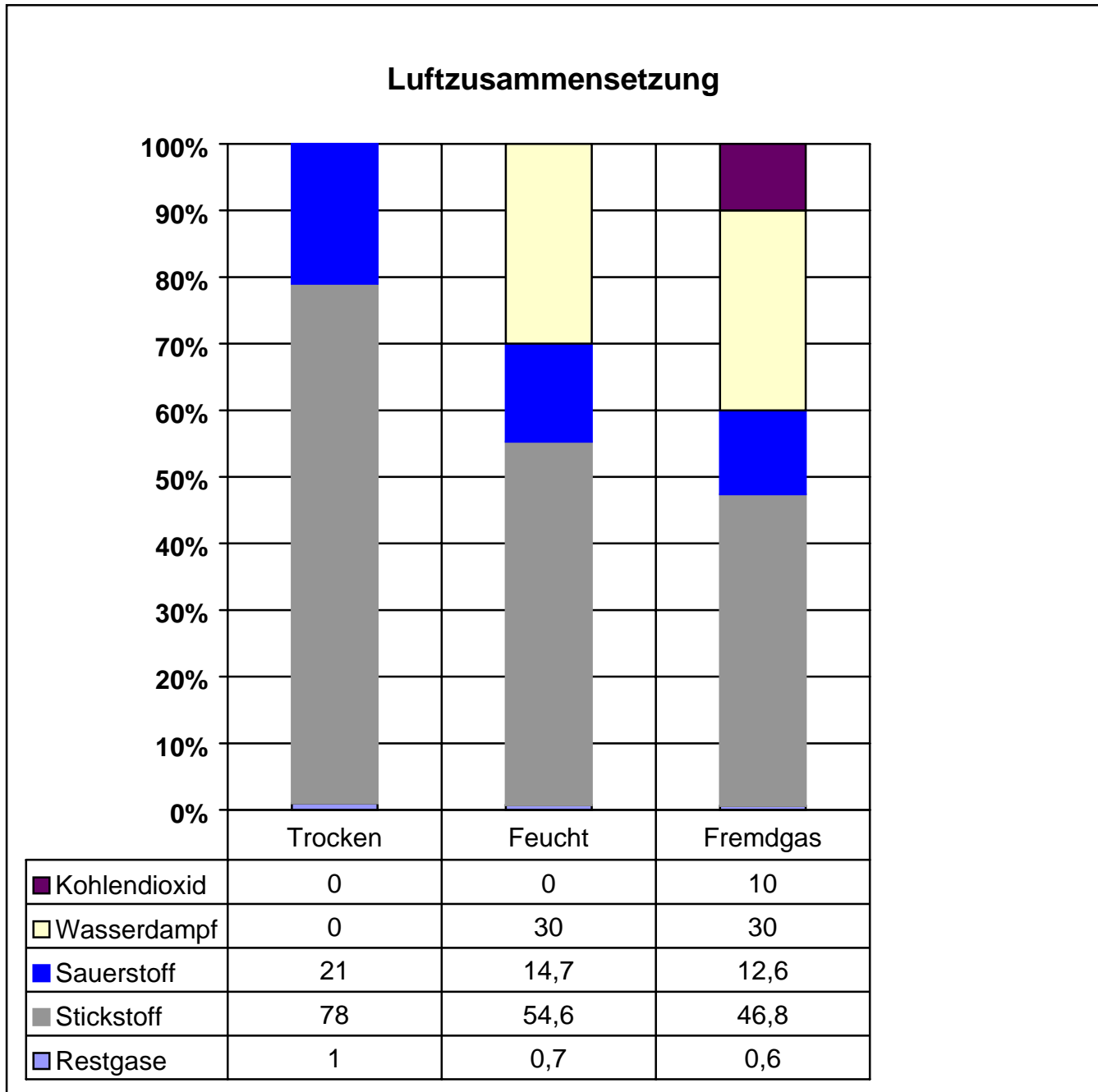
Da in der Natur jedoch die Luft permanent bewegt wird, kommt es nur zu einer teilweisen Sättigung und somit zur „relativen Luftfeuchtigkeit“ (RH).

Bei physiologisch angenehmer Atmosphäre (25°C, 1013 hPa) enthält die Luft etwa 1 Vol% Wasserdampf, eine relative Luftfeuchtigkeit von 30 – 35% und eine Taupunkttemperatur von 6 – 9°C.

Ein Kubikmeter Luft wiegt bei Raumtemperatur (25°C, 298K) etwa 1,1 kg

1.3 Zusammensetzung der Luft

Die Luft setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen und der prozentuale Anteil ist im besonderen von der Luftfeuchtigkeit abhängig.



Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß Wasserdampf oder Fremdgas die Anteile von Sauerstoff und Stickstoff prozentual mindert.

2 Grundlagen der Feuchtemesstechnik

2.1 Konstanten und Begriffe

Die folgenden Konstanten und Zusammenhänge wurden von der „Weltorganisation für Meteorologie“ (WMO) in Zusammenarbeit mit angesehenen Forschern und Wissenschaftlern entwickelt und werden auch ständig nachgebessert. Sie werden von der „Commission for Instruments and Methods of Observation“ zur Anwendung empfohlen und vom Deutschen Wetterdienst (DWD) sowohl für meteorologische als auch physikalische Berechnungen verwendet. Die Herleitung obliegt der WMO.

Symbol	Größe	Einheit	Zahlenwert
Messgrößen			
TT	Lufttemperatur (Trockentemperatur)	°C	
HT	Feuchttemperatur (befeuchteter Fühler)	°C	
SP	Luftdruck auf Stationshöhe	hPa	
Rechengrößen			
SVP	Sättigungsdampfdruck	hPa	
SAH	Max. absolute Luftfeuchtigkeit, Sättigungsfeuchte	g/m ³	
VP	Wasserdampfpartialdruck	hPa	
DT	Taupunkttemperatur	°C	
RH	Relative Feuchte	%	
MH	Mischungsverhältnis	g/kg	
SH	Spezifische Feuchte	g/kg	
ET	Äquivalenttemperatur	°C	
DVP	Sättigungsfeuchte	hPa	
C	Psychrometerkoeffizient	°C ⁻¹	
	$C=0,00066*(1+0,00115*HT)$		
Konstante			
C ₁	(für Temperaturbereich von 0 ... 100,9 °C)	hPa	6,10780
C ₂	(für Temperaturbereich von 0 ... 100,9 °C)		17,08085
C ₃	(für Temperaturbereich von 0 ... 100,9 °C)	°C	234,175
ρ _{DRY}	Dichte trockener Luft	kg/m ³	
ρ _{VAP}	Dichte des Wasserdampfes	kg/m ³	
ρ _{WET}	Dichte feuchter Luft	kg/m ³	
R _{DRY}	Gaskonstante für trockene Luft	Nm/kg °C	287,05
R _{VAP}	Gaskonstante für Wasserdampf	Nm/kg °C	461,51
C _{PL}	Spezifische Wärme trockener Luft	J/kg °C	1004,82
C _W	Spezifische Wärme des Wassers	J/kg °C	4186,74
LH	Verdampfungswärme des Wassers bei 0°C	J/kg	2500,78

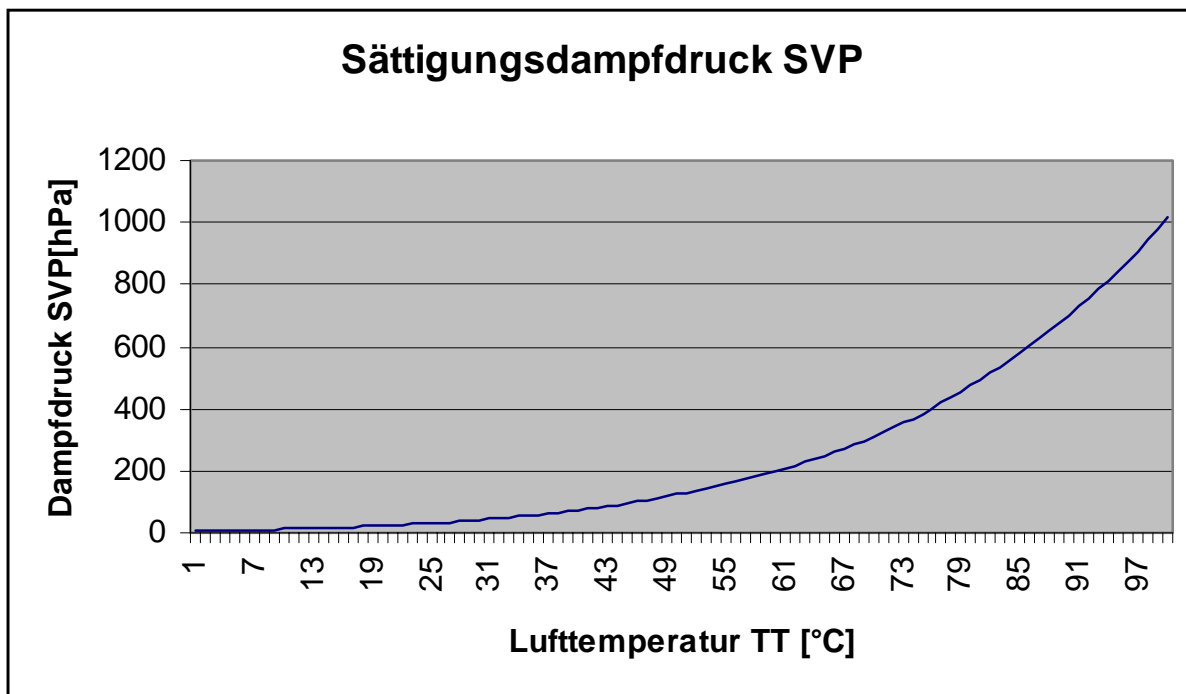
2.2 Der Sättigungsdampfdruck SVP

Die Luft ist in der Lage, bei einer bestimmten Temperatur, eine gewisse Menge an Wasser aufzunehmen. Ist das Maximum der Aufnahmefähigkeit erreicht, spricht man von Sättigung, der dabei resultierende Druck wird als **Sättigungsdampfdruck SVP** bezeichnet.

$$SVP(TT) = C1 * e^{\frac{C2 * TT}{C3 + TT}} \text{ [hPa]}$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, dass der Sättigungsdampfdruck SVP, für ideale Gase, nur temperaturabhängig ist.

Abbildung 1



2.3 Sättigungsfeuchte SAH

Die Sättigungsfeuchte oder auch „maximale absolute Luftfeuchtigkeit“ genannt wird in g / m^3 angegeben.

Die Luft ist in der Lage, abhängig von ihrer Temperatur, eine bestimmte Wassermenge aufzunehmen, bis sie mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Fügt man gesättigter Luft weiterhin Wasserdampf zu, oder senkt man die Temperatur der Luft, dann fällt das überschüssige Wasser in Form von Nebel, Tau, Regen oder Kondenswasser an den kältesten Stellen aus. Der gesättigte Zustand bleibt dennoch erhalten.

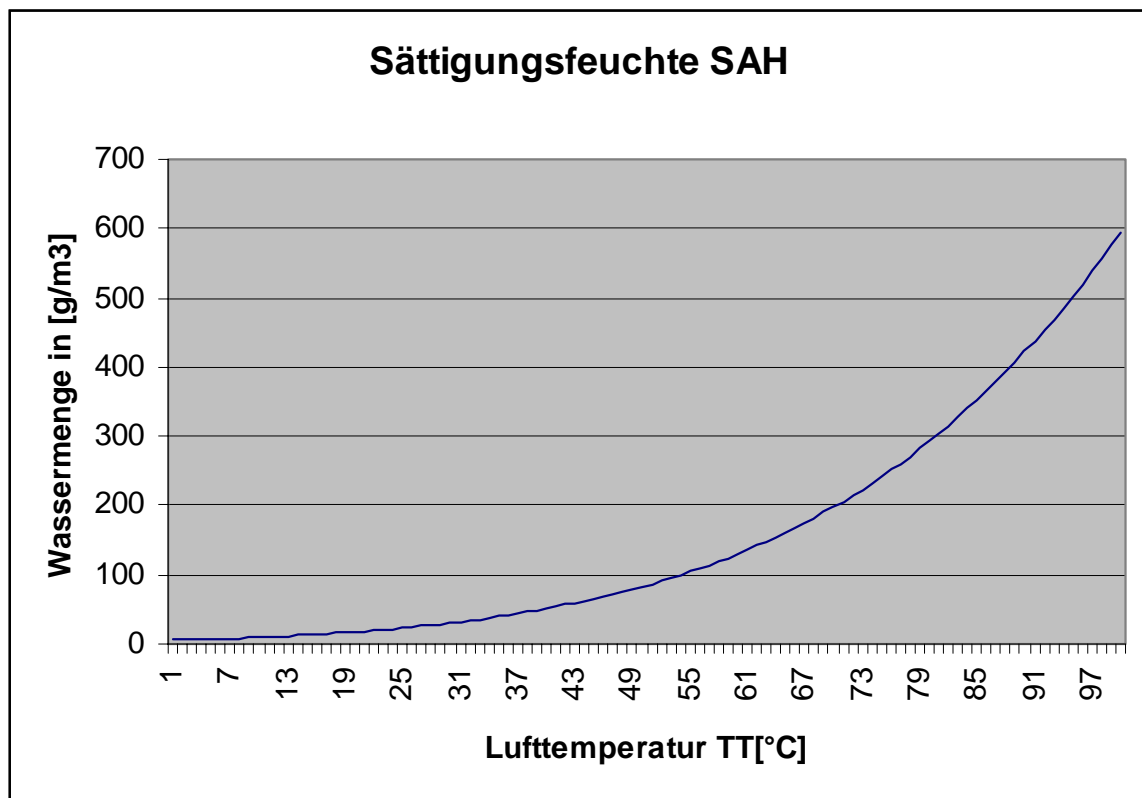
Je höher die Temperatur, desto mehr Wasser kann die Luft aufnehmen.

$$SAH(TT) = 10^5 * \frac{SVP(TT)}{CV * R_{VAP} * (TT + 273,15)} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

CV: Kompressibilitätsfaktor für Wasserdampf für TT von 0 ... 100,9°C

$$CV(TT) = 1 - 10^{-4} * ((1 + 0,1 * TT)^2 + 4)$$

Abbildung 2



2.4 Der Wasserdampfpartialdruck VP

Feuchte Luft ist eine Mischung aus Wasserdampf und trockener Luft, die seinerseits wieder aus Stickstoff, Sauerstoff und Spuren von Edelgasen besteht. Wenn mehrere Gase in einem Raum vorhanden sind, so breiten sie sich nach dem **DALTON'schen Gesetz** gleichmäßig aus und nehmen dabei einen entsprechenden Teildruck an.

Der Gesamtdruck im Raum (z.B. 1013 hPa) ist die Summe aus den einzelnen Teildrücken der Gas-Komponenten.

$$P = p(\text{H}_2\text{O}) + p(\text{O}_2) + p(\text{N}_2) + \dots + \dots$$

Dieser Druck, den allein der Wasserdampf bildet, heißt **Wasserdampfpartialdruck VP** oder aktueller Dampfdruck.

$$VP(TT, HT) = SVP(HT) - C * SP * (TT - HT) \text{ [hPa]}$$

Mit SVP(HT)

$$SVP(HT) = C_1 * e^{\frac{C_2 * HT}{C_3 + HT}} \text{ [hPa]}$$

Die Taupunkttemperatur ist die Temperatur bei der der aktuelle Dampfdruck gleich dem Sättigungsdampfdruck ist.

$$SVP(DT) = VP(TT) \text{ [hPa]}$$

mit

$$VP(DT) = C_1 * e^{\frac{C_2 * DT}{C_3 + DT}} \text{ [hPa]}$$

2.5 Das Sättigungsdefizit DVP

Das Sättigungsdefizit ist die Differenz zwischen dem maximalen und dem aktuellem Dampfdruck.

$$DVP(TT, HT) = SVP(TT) - VP(TT, HT) \text{ [hPa]}$$

2.6 Die relative Feuchte RH

Die **relative Luftfeuchte RH** ist wohl die bekannteste Feuchtegröße, da sie meist tagtäglich im Radio oder Fernsehen zitiert wird. Aber wissen wir auch was es bedeutet, wenn der Sprecher sagt: „Die Luftfeuchtigkeit liegt heute bei circa 40 %“ ?

Rein formell berechnet sich die relative Luftfeuchte aus dem Quotienten von Wasserdampfpartialdruck und Sättigungsdampfdruck (bei einer bestimmten Temperatur):

$$RH(TT, HT) = 100 * \frac{VP(TT, HT)}{SVP(TT)} \quad [\%]$$

Da der Normalbürger auch mit dieser Formulierung wenig anzufangen weiß, kann man in einfachen Worten sagen: Die Luft ist, bei einer gegebenen Temperatur, zu 40 % gesättigt. D.h. jedes mal, wenn man von Sättigung spricht, ist $VP = SVP$, was bedeutet: $RH = 100 \%$

Wie der Name schon sagt, handelt es sich bei RH um eine „relative“ Feuchtegröße, die von der Temperatur abhängig ist. Aus diesem Grund ist sie zur Regelung von technischen Prozessen weniger gut geeignet, da eine geringe Temperaturänderung bei 30 °C (z.B. um 0,2°C) bereits eine erhebliche Abweichung von RH verursachen kann (bis 2 %). „Absolute“ Größen, wie z.B. MH, DT oder Vol%, sind dafür bedeutend besser geeignet.

$$RH(TT, DT) = 100 * \frac{SVP(DT)}{SVP(TT)} \quad [\%]$$

2.7 Die Taupunkttemperatur DT

Die noch am ehesten verständliche Feuchtegröße ist die **Taupunkttemperatur DT**, kurz Taupunkt, da jeder sie bereits schon unbewusst wahrgenommen hat. Wenn Fenster beschlagen, Tau, Kondensat oder Nebel sich bilden, dann spielt der Taupunkt eine große Rolle.

Taupunkt, oder Taupunkt-Temperatur DT ist die Temperatur, bei der sich, bei konstantem Druck, Tau oder Kondensation (flüssiges Wasser) bildet.

Es ist die gleiche Temperatur, bei der in Luft die Sättigung eintritt, d.h. die relative Feuchte 100% erreicht.

⇒ Taupunkt-Temperatur = Kondensationstemperatur

Die Taupunkttemperatur hängt zusammen mit dem Wasserdampfgehalt einer Luft. Je mehr Wasserdampf in der Luft enthalten ist, desto höher ist der DT.

An Oberflächen kann man das Ausfallen von Wasser beobachten, wenn deren Temperatur gleich oder unterhalb der Taupunkt-Temperatur liegt.

Diese „Übersättigung“ (die es nicht geben kann) zeigt sich an Oberflächen als Tau, Reif oder Kondensat; in Luft bildet sich dementsprechend Nebel.

$$DT(TT, HT) = C_3 * \frac{\ln \frac{VP(TT, HT)}{C_1}}{C_2 - \ln \frac{VP(TT, HT)}{C_1}} \quad [^{\circ}C]$$

In einfachen Worten ausgedrückt: Kühlt man eine gegebene Luft (best. Temperatur, best. Feuchte) ab, bis sich die ersten mikroskopisch-kleinen Wassertröpfchen bilden, dann ist die Taupunkttemperatur erreicht.

Gleichzeitig mit dem Sinken von TT steigt natürlich RH an, bis es dann zum Kondensationspunkt kommt, an dem gilt:

$$TT = DT \quad RH = 100 \%$$

Der Taupunkt kann nie über der Temperatur der vorhandenen Luft liegen (sonst wäre RH > 100 %).

Bei normalem Luftdruck (Umgebungsdruck, ca. 1013 hPa) kann die Taupunkttemperatur nie über 100°C (= Siedepunkt des Wassers) liegen.

$$DT(TT, RH) = C_3 * \frac{\ln(0,01 * RH * \frac{SVP(TT)}{C_1})}{C_2 - \ln(0,01 * RH * \frac{SVP(TT)}{C_1})} \quad [^{\circ}C]$$

2.8 Das Mischungsverhältnis MH

Das **Mischungsverhältnis MH** (auch manchmal Wassergehalt x genannt) sagt aus, wie viel Gramm Wasserdampf in einem Kilogramm **trockener Luft** enthalten sind.

$$MH(VP, SP) = 1000 * \frac{R_{DRY}}{R_{VAP}} * \frac{VP}{SP - VP} \quad [g / kg]$$

$$MH(DT, SP) = C_1 * \exp \frac{C_2 * DT}{C_3 + DT} \quad [g / kg]$$

$$MH(Vol\%) = 1000 * \frac{R_{DRY}}{R_{VAP}} * \frac{Vol\%}{100 - Vol\%} \quad [g / kg]$$

2.9 Die spezifische Feuchte SH

(Früher war auch noch der Begriff **Spezifische Feuchte SH** gebräuchlich, der angab, wie viel Wasserdampf in einem Kilogramm **feuchter Luft** enthalten sind).

BEISPIEL: Bei einer Temperatur von 80°C kann die Luft maximal 545 g/ „kg trockene Luft“ aufnehmen, bei TT von 40°C in etwa 49 g/kg (nicht linear !).

Die Kurve in Abbildung 1 gibt die maximal mögliche Wassermenge an, die die Luft bei bestimmten Temperaturen höchstens aufnehmen kann.

$$SH = 1000 * \frac{\rho_{VAP}}{\rho_{WET}}$$

Mit $\rho_{WET} = \rho_{VAP} + \rho_{DRY}$

$$SH(MH) = 1000 * \frac{MH}{1000 + MH} \quad [g / kg]$$

2.10 Die Feuchte in Vol%

Volumenprozent Wasser Vol% gibt an, welchen Prozentsatz der Wasserdampf in einem Gasgemisch einnimmt, bezogen auf ein konstantes Volumen.

Beispielsweise kann die Luft in einem Trockner aus 30 Vol% Wasser, 55 Vol% Stickstoff und 15 Vol% Sauerstoff (Verhältnis ca. 3,7:1 → s. Einleitung) bestehen.

$$\text{Vol\%}(VP, SP) = \frac{VP}{SP} * 100$$

2.11 Der Frostpunkt FT

Der **Frostpunkt FT** (Reifbildung) entspricht dem Taupunkt bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt.

2.12 Enthalpie H

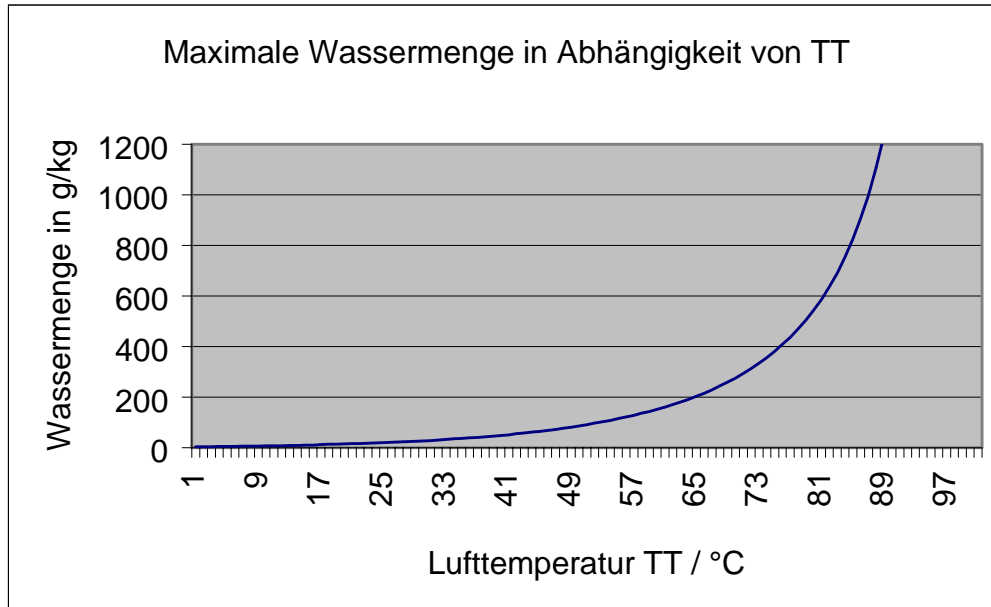
Die **Enthalpie H** ist der Wärmehalt den die Feuchte Luft gespeichert hat. Diese berechnet sich aus dem Anteil der trockenen Luft und dem Anteil der feuchten Luft inklusive der Verdunstungswärme des Wassers multipliziert mit dem Mischungsverhältnis.

$$H(TT, MH) = c_{P_L} * TT + (c_w * TT + LH) * MH \quad [J / kg]$$

Bei Kühl- und Erwärmungsprozessen ist diese Größe erforderlich. Diese Größe kann zur Optimierung der Energieausnutzung von Fertigungsprozessen verwendet werden.

2.13 Beispiel

Abbildung 3:



Annahme A: Wir haben eine Luft von $TT = 80\text{ °C}$

- ⇒ Abbildung 3: Die Luft kann maximal 545 g Wasser aufnehmen → MH
- ⇒ Abbildung 1: Der Sättigungsdampfdruck SVP liegt bei 473 hPa

Annahme B: Wir haben in dieser Luft $MH = 150\text{ g Wasser (pro kg trockener Luft)}$

- ⇒ die Luft ist nicht gesättigt !
- ⇒ RH liegt bei ca. 42 % (in Formel einsetzen)
- ⇒ DT liegt bei ca. 60 °C : geht man in Abbildung 3 bei 150g/kg waagrecht bis zum Schnittpunkt mit der Kurve, kann man die Temperatur 60 °C ablesen.

Kühlt man nun diese Luft von 80 °C auf z.B. 65 °C ab, steigt die Relative Feuchte (auf 79 %), da eine Luft dieser Temperatur nicht mehr fähig ist 545g, sondern nur mehr 204g Wasser aufzunehmen.

Sinkt TT weiter bis auf 60 °C (=DT) kann die Luft genau diese 150g noch halten, es tritt der Zustand der Sättigung ein. RH liegt bei 100 %.

Bei erneuter Abkühlung fällt das überschüssige Wasser in Form von Tau, Kondensat aus.

3 Messverfahren

3.1 Verdunstungsverfahren

Die Verdunstungsverfahren basieren auf dem Prinzip, daß bei trockener Umgebungsluft mehr Wasser verdunstet als bei feuchter Umgebungsluft.

3.1.1 Psychrometer

Bei einem Psychrometer macht man sich diese Eigenschaft zu Nutze und misst einmal die Lufttemperatur direkt und einmal die Temperatur eines befeuchteten Temperaturfühlers.

Psychrometer

HYGROPHIL porty - HYGROPHIL-h

3.2 Sättigungsverfahren

Kühlt man feuchte Luft bis zu der Temperatur ab, bei der Kondensation eintritt und misst diese Temperatur so hat man direkt die Taupunkttemperatur und damit die absolute Feuchte der Luft ermittelt.

Taupunktspiegel

genau, verschmutzungsempfindlich

Kondensationshygrometer

3.3 Hygroskopische Verfahren

Diese Verfahren beruhen alle darauf, das ein Körper (Sensor) bei steigender Feuchtigkeit Wasser aufnimmt und bei fallender Feuchtigkeit diese wieder abgibt und dabei seine Eigenschaften verändert.

Mechanische Änderung

Haarhygrometer

Widerstands Änderung

Keramik-Plättchen, beschichtet

Kapazitive Änderung

günstig, aber starke Drift

usw.

3.4 Spektrale Verfahren

Spektrale Verfahren machen sich die Dämpfungseigenschaften der Wassermoleküle bei bestimmten Spektralbereichen zu Nutze. Diese Dämpfung ist Abhängig von der Dichte der Wassermoleküle.

Die Absorptionsbande liegen im Bereich von von 0,7-6,2µm.

3.5 Absorptionsverfahren

Bei den Absorptionsverfahren wird mit mit Absorptionsmittel einem bestimmten Volumen die Feuchtigkeit entzogen. Diese entzogene Feuchtigkeit wird dann bestimmt.

Gravimetrische

Silika - Gel, diskontinuierlich

Elektrolytisch

Phosphor-Pentoxid

3.6 Sauerstoff-Komplementär Verfahren

Mittels eines Zirkonoxid-Festelektrolyt-Sensors wird über Sauerstoffverdrängung durch Wasserdampf direkt der Feuchtegehalt der Luft in Vol% bestimmt.

HYGROPHIL-Z