



Physikalische Grundlagen

Allgemeines

Wasser ist ein Stoff, der in großen Mengen auf der Erde vorkommt, rund 71% der Erdoberfläche sind damit bedeckt. Ein Wassermolekül setzt sich aus 2 Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom zusammen, der Chemiker schreibt hierfür die Formel H_2O .

Wasser ist in vieler Hinsicht einzigartig. Beispielsweise ist es der einzige Stoff auf der



Erde, der in der Natur in allen 3 Aggregatzuständen vorkommt: Im festen Zustand als Eis, im flüssigen Zustand als das was allgemein Wasser genannt wird und im gasförmigen Zustand als Wasserdampf.

Oder betrachten wir die temperaturabhängige Dichte des Wassers die, im Gegensatz zu den meisten Stoffen, nicht kontinuierlich mit sinkender Temperatur abnimmt. Wasser erreicht bei $4^{\circ}C$ ein Dichtemaximum und verliert bei weiterer Abkühlung an Dichte. Das ist auch der Grund weshalb im Winter das Eis an der Wasseroberfläche schwimmt und das kalte Wasser nach oben steigt. So wird ein vollständiges

Einfrieren der Flüsse und Seen verhindert und Pflanzen und Wassertiere können unter der Eisschicht überleben.

Der Mensch besteht zu ca. 60% der Körpermasse aus Wasser, fühlt sich zwischen 40% und 60% relativer Feuchte wohl und trägt mit ca. 2 Litern Wasser (Schwitzen) pro Tag zur Befeuchtung der Umwelt bei.

Wasser ist also auf der einen Seite wichtig, hat aber andererseits auch unerwünschte Eigenschaften. Da wäre beispielsweise die Volumenänderung des Wassers beim Verdampfen, sie beträgt fast das 1700-fache. Aus einem kleinen Wassertropfen mit einem Volumen von 0.05ml werden knapp 84ml Wasserdampf, was in etwa dem Inhalt eines Trinkglases entspricht. Deshalb führt eine zu hohe Feuchte in Kunststoffen zu Bläschen oder Schlieren bei der Verarbeitung.

Maximale Feuchte

Wie viel Wasserdampf Luft aufnehmen kann, bzw. wann die Luft mit Wasser gesättigt ist, hängt von der Temperatur ab. Eine Sättigung der Luft ist dann erreicht, wenn die Verdunstungsrate oberhalb einer Wasseroberfläche genau so groß ist wie die Kondensationsrate. Dieser Wert ist gleichbedeutend mit der maximal möglichen Feuchte.

Zu erwähnen wäre, dass es auch zur Übersättigung oder Teilsättigung kommen kann und diese Zustände der Luft in der Meteorologie eine wichtige Rolle spielen. Aber das würde den Rahmen sprengen und ist für die grundlegenden Zusammenhänge zunächst nicht wichtig.

Die maximal mögliche Feuchte (in g/m³) berechnet sich zu:

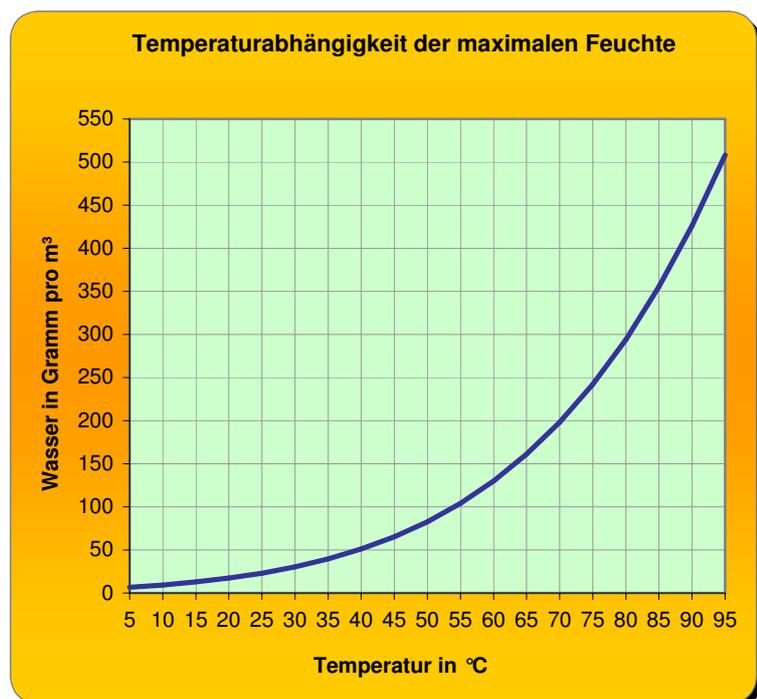
$$\frac{\text{Sättigungsdampfdruck}}{R_W * T_K}$$

Wobei R_W die Individuelle Gaskonstante des Wassers mit 461,52 J/(kgK) ist und T_K die Temperatur in Kelvin angibt. ($T_K = T_C + 273.15$).

Der Sättigungsdampfdruck kann annähernd über die so genannte Magnus-Formel berechnet werden. Über einer Wasseroberfläche lautet die Formel:

$$6,112 * e^{\left(\frac{17,62 * T_c}{243,12 + T_c} \right)}$$

Bem.: Zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks über einer Eisfläche ist der Zahlenwert 17,62t durch den Zahlenwert 22,46 zu ersetzen und der Zahlenwert 243,12 gegen den Wert 272,62.



Die Tabelle zeigt deutlich die exponentielle Temperaturabhängigkeit der maximalen Feuchte. Bei 5°C kann die Luft 6,8 Gramm Wasser pro Kubikmeter aufnehmen. Bei einer Temperatur von 20°C sind es 17 Gramm/m³, bei 40°C sind es 51 Gramm/m³ und bei 60°C sind es schon 130 Gramm/m³.

Relative Feuchte



Die relative Feuchte gibt an, wie viel Prozent der maximal möglichen Feuchte tatsächlich vorhanden ist. Bei 100% relativer Feuchte ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt, der bei einem weiteren Anstieg der Feuchte auskondensiert. In der Luft bildet sich dann Nebel und auf kalten Flächen bildet sich Kondenswasser.

Ein Rechenbeispiel:

Eine angenehme Raumtemperatur liegt bei 21 °Celsius und eine angenehme relative Feuchte liegt bei 50%. Nach der Magnus-Formel (siehe oben) errechnet sich die maximale Feuchte bei 21 °C mit 18,3 Gramm Wasser pro Kubikmeter Luft. Eine relative Feuchte von 50% würde also bedeuten, dass sich 9,15 Gramm Wasser in einem Kubikmeter Raumluft befinden.

Um beispielsweise einen Liter Wasser bei 50% Luftfeuchte und 21 °C in Ihrem Büro unterzubringen müsste dieses bei einer Raumhöhe von 250 cm eine Fläche von ca. 44m² aufweisen. Allerdings dürfen Sie sich bei dieser Rechnung nicht im Büro aufhalten und Möbel gibt es auch keine. Unter realen Bedingungen brauchen Sie entweder ein größeres Büro oder Sie drehen die Heizung etwas höher (aber das rechnen Sie bitte selbst aus).

Absolute Feuchte

Die absolute Feuchte wird in Gramm Wasser pro Kubikmeter Luft angegeben und ist somit ein direktes Maß für die, in der Luft enthaltene, Wassermenge. Man spricht hierbei auch von Dampfdichte.

Wie man sich leicht überlegen kann verändert sich die absolute Feuchte bei einer Volumenänderung. Wenn 1 m³ Luft mit, darin enthaltenen, 20 Gramm Wasser komprimiert wird, dann geht ja das Wasser nicht verloren, sondern es ändert sich nur das Volumen. Eine Volumenänderung der Luft findet auch bei Änderung der Temperatur und/oder des Luftdrucks statt. Somit ist die absolute Feuchte von diesen Faktoren abhängig.

Taupunkt

Die Taupunkttemperatur oder kurz der Taupunkt gibt die Temperatur an, bei der Luft mit einer gegebenen Wassermenge eine relative Feuchte von 100% erreichen würde. An diesem Punkt ist nämlich die relative Feuchte (siehe oben) identisch mit der maximalen Feuchte (siehe oben). Bei einer Erniedrigung der Temperatur würde Betauung bzw. Kondensation einsetzen.

Betrachten wir noch einmal das Beispiel unter „relative Feuchte“ Dort wurde berechnet, dass bei 21 °C und einer relativen Feuchte von 50% ca. 9,15 Gramm Wasser in einem Kubikmeter Luft enthalten sind. Die Frage des Taupunktes würde lauten bei welcher Temperatur die maximale Feuchte 9,15 Gramm Wasser pro Kubikmeter beträgt. Nach Umstellung der oben genannten Formeln erhält man eine Temperatur von ca. 10° Celsius. (Einen Taupunktrechner finden Sie auf der LANCO Internetseite <http://www.lanco.de> unter Lexikon / Rechenhilfen.)

Die Taupunkttemperatur ist, wie man leicht sehen kann, nicht von der Lufttemperatur abhängig. Sie stellt ein Maß für den Wassergehalt (absolute Feuchte) der Luft dar und wird gerne als Qualitätsmerkmal von Trocknungsanlagen herangezogen. Allerdings sollte man bei der Beurteilung irgendwelcher Leistungsdaten vorsichtig sein, denn vieles hört sich gut an hat aber nur wenig mit der Praxis zu tun.

Das ist wie beim Weg zur Arbeit mit dem Auto. Mutmaßlich ist man mit einem Rennwagen mit 222kW (300PS) und 250 km/h Spitzengeschwindigkeit schneller zur Arbeit gefahren als mit 30kW (40PS) und 130 km/h Spitzengeschwindigkeit. Theoretisch ja, praktisch nein. Im morgendlichen Stau ist der Rennwagen auch nicht schneller und, vorausgesetzt man beachtet die Verkehrsregeln, die Spitzengeschwindigkeit ist schwer zu erreichen. Innerhalb einer Ortschaft wohl nicht und auf der Autobahn eher selten. Selbst ohne Geschwindigkeitsbegrenzung scheitert das ganze am Heck des voranfahrenden Lasters. (So viel zum Thema – „nice to have“ aber ohne praktischen Nutzen!)

Doch zurück zum Taupunkt. Er wird im Allgemeinen im Luftstrom zwischen Trockner und dem Trockentrichter gemessen. Auf welchen Wert sich die Restfeuchte des Kunststoffgranulats im Trockentrichter einstellt und wie lange das dauert ist eine schwierige Frage.

Der Vorgang der Adsorption (Wasseraufnahme) und der Resorption (Wasserabgabe) ist prinzipiell abhängig vom Konzentrationsgefälle. Je nach dem ob der Wassergehalt im Kunststoff oder in der Luft höher ist erfolgt eine Trocknung oder Befeuchtung des Materials.

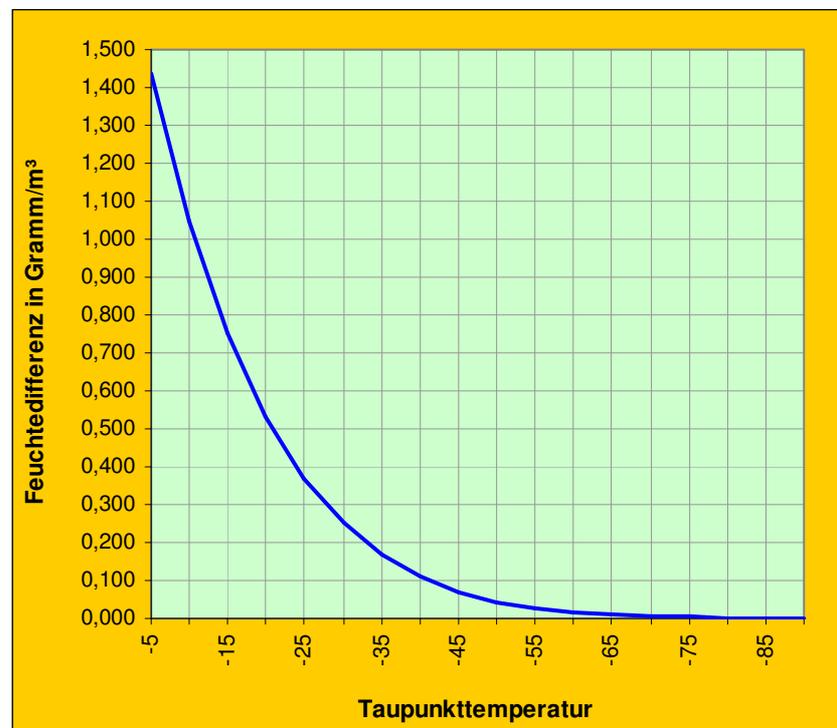
Da der Taupunkt ein Maß für die Wasserkonzentration in der Luft ist, entsteht ganz leicht die pauschale Aussage „Je niedriger der Taupunkt, desto besser“ und es wird oft mit unsinnigen Werten geworben.

Wie oben gezeigt besteht ein exponentieller Zusammenhang zwischen der maximalen Feuchte und der Temperatur. Am Taupunkt ist, wie oben erwähnt, die maximale Feuchte erreicht. Wenn man die Taupunkttemperatur in die Magnus-Formel einsetzt erhält man die zugehörige Feuchte in Gramm/m³.

In der nachfolgenden Tabelle ist in der Spalte [Td] die Taupunkttemperatur in 5° Schritten eingetragen. In der Spalte [g/m³] sehen Sie die zugehörige Wasserkonzentration und in der Spalte [Diff.] die Differenz zum vorherigen Wert. An der Kurve ist deutlich zu sehen, dass irgendwann eine weitere Erniedrigung des Taupunktes um 5° nur noch ein sehr geringer Unterschied in der Wasserkonzentration bedeutet.

Rein rechnerisch ist ein Taupunkt von -80 besser als ein Taupunkt von -60. Real gesehen handelt es sich aber um einen Konzentrationsunterschied von 14 Milligramm Wasser pro Kubikmeter Luft.

Td	g/m ³	Diff
0	4,848324	
-5	3,411411	1,436912
-10	2,363388	1,048024
-15	1,610448	0,752939
-20	1,078157	0,532292
-25	0,708284	0,369872
-30	0,455975	0,252309
-35	0,287239	0,168736
-40	0,176771	0,110468
-45	0,106090	0,070682
-50	0,061969	0,044121
-55	0,035154	0,026815
-60	0,019320	0,015833
-65	0,010260	0,009061
-70	0,005248	0,005011
-75	0,002578	0,002671
-80	0,001211	0,001367
-85	0,000542	0,000669
-90	0,000230	0,000312



Gemessen wird meistens die relative Feuchte und der Taupunkt wird aus diesem Wert und der Messgastemperatur errechnet. Bei einer Messgastemperatur von 20°C bedeutet ein Taupunkt von -60 eine relative Feuchte von 0.07% und ein Taupunkt von -80 eine relative Feuchte von 0.0035%. Das ist ein Unterschied von 0.035% oder 0.35 Promille!!

Ohne „sündhaft teure“ Messgeräte sind erstens Werteangaben unterhalb von -45° wenig glaubhaft, zweitens müssen solche Werte „teuer erkaufte“ werden (Regenerationsenergie!) und drittens werden Sie nicht wirklich benötigt.

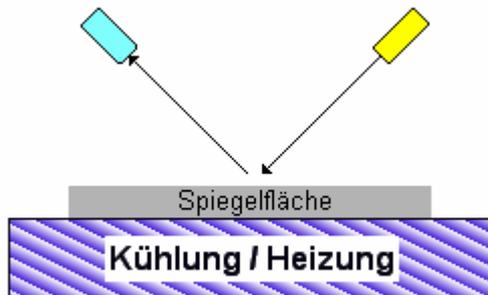
Messtechnische Grundlagen

Allgemeines

Der Taupunkt kann auf direktem oder indirektem Weg gemessen werden. Mit direkt ist gemeint, dass die absolute Feuchte in Gramm/m³ gemessen wird bzw. die Temperatur bei welcher eine Betauung einsetzt.

Die indirekte Messung erfolgt dadurch, dass die relative Feuchte und die Temperatur gemessen werden und daraus der Taupunkt berechnet wird.

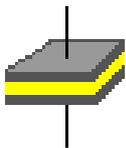
Direkte Messung



Der „heilige Gral“ der Taupunktmessung ist der so genannte Taupunktspiegel. Er besteht aus einer temperaturgeregelten, verspiegelten Fläche in einer geschlossenen Kammer. Über einen Sender (gelb) wird ein Lichtstrahl auf die Spiegelfläche gerichtet und dessen Reflektion über einen Sensor (türkis) erfasst.

Die Kammer wird mit dem zu messenden Gas gespült und die Spiegelfläche so lange gekühlt bis Betauung einsetzt. Der Effekt ist wie in Ihrem Badezimmer – der Spiegel beschlägt und Sie sehen sich nicht mehr richtig darin. Durch die Bildung von Wassertropfen wird der Lichtstrahl gestreut, was sich an der, vom Sensor gemessenen, Helligkeit feststellen lässt. Die Temperatur der Spiegelfläche bei der die Betauung eintritt ist die Taupunkttemperatur.

Hört sich einfach an, ist es aber nicht. Das beginnt schon damit den Spiegel (mittels eines Peltier-Elements) abzukühlen. Bis -20°C ist das kein Problem, ab -50°C hört der Spaß auf. Dann kondensiert Wasserdampf nicht verzögerungsfrei aus, sondern es muss sich zunächst das Dampfdruck-Gleichgewicht verschieben und der Vorgang benötigt Zeit. Der Spiegel muss also langsam seine Temperatur verändern. Von Undichtigkeiten der Messkammer über Restfeuchte aus vorangegangenen Messungen, Verunreinigungen des Messgases, Reinigungsmöglichkeit der Spiegelfläche bis zur Genauigkeit der Temperaturmessung gibt es viele „Stolperfallen“, was sich im Preis solcher Messgeräte niederschlägt.



Neben dem Taupunktspiegel gibt es noch verschiedene Sensoren. Die meisten davon basieren auf einem kapazitiven Messprinzip. Ein Kondensator besteht aus 2 Metallflächen mit einem Zwischenraum, der ein Dielektrikum enthält. Seine Kapazität hängt, unter anderem, von der Dielektrizitätskonstante ab.

Ein Feuchtesensor macht sich zu Nutzen, dass Wasser eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante hat und sich bei der Adsorption von Wasser die Kapazität im Sensor verändert.

Der **Aluminiumoxid-Sensor** gibt, im Gegensatz zu den anderen kapazitiven Feuchtesensoren, die absolute Feuchte an. Er besteht aus einer Aluminiumelektrode mit einer Oxidschicht von wenigen Mikrometern Dicke, auf die eine Goldschicht aufgebracht wurde. Die Alu-Elektrode und die Goldschicht dienen als Kondensatorplatten und die Oxidschicht als Dielektrikum. Durch die poröse Goldschicht lagert sich Wasser im Inneren der Alu-Oxidschicht an. Die eingelagerte Wassermenge ist abhängig vom Wasserdampf-Partialdruck und damit von der absoluten Feuchte.

Indirekte Messung

Die meisten Sensoren messen kapazitiv. Wie bereits ausgeführt wurde, bestehen Sie aus einem Kondensator mit einem hygroskopischen Dielektrikum. Wie viel Wasser im Dielektrikum eingelagert wird, hängt von der relativen Feuchte ab. Ist die relative Feuchte im Sensor höher als im Messgas gibt der Sensor Feuchte ab, umgekehrt nimmt er Feuchte auf. Die Kapazität des Sensors hängt, mehr oder (eher) weniger linear, von der relativen Feuchte im Messgas ab. Direkt neben dem Feuchtesensor ist ein Temperatursensor angebracht. Der Taupunkt wird in der Auswerteeinheit aus beiden Werten berechnet.

Zu erwähnen wäre hier, dass die Kapazität eines solchen Sensors bei ca. 300 pF (1 picoFarad = 10^{-12} Farad) liegt und die Änderung bei ca. 0,5pF pro %rF (relative Feuchte). Wie sich leicht berechnen lässt, liegt der interessante Feuchtebereich bei Werten unterhalb 1%rF. Im Kapitel „Taupunkt“ wurde bereits erwähnt, dass ein Taupunkt von -60 (bei 20°C) eine relative Feuchte von 0.07% bedeutet. Bei einer Kapazitätsänderung von 0.5pF pro %rF sprechen wir hier über eine Messgenauigkeit von 0.035pF (**35 Femtofarad!!**).

Ein halbwegs gutes (und teureres) Kapazitätsmessgerät für den Elektroniker hat eine Auflösung von 0,1pF und alleine schon die Messleitungen verursachen Abweichungen von mehreren pF, wenn Sie diese berühren oder deren Lage auf dem Tisch verändern. Sie können sich bestimmt vorstellen wie leistungsfähig die Elektronik eines guten Sensors dann erst sein muss und dass mit einer „Sparversion“ wenig anzufangen ist.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch der coulometrische Feuchtesensor erwähnt. Er ist auch unter dem Namen Keidelmesszelle bekannt. Es handelt sich hierbei um einen Restfeuchtesenor, der den Wasserdampfgehalt der Luft mittels der elektrochemischen Zerlegung von Diphosphorpentoxid bestimmt.

Anwendungen

Die Kenntnis des Taupunktes ist für viele Dinge des täglichen Lebens wichtig. So kann der Meteorologe vorhersagen ob es ratsam ist einen Regenschirm mitzunehmen oder am nächsten morgen besser früher aufzustehen, wenn Sie mit dem Auto im Nebel rechtzeitig Ihren Arbeitsplatz erreichen wollen.

Bei der Trocknung von Kunststoffen ist der Taupunkt eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Luftqualität. Warum Kunststoffe getrocknet werden müssen ist hinreichend bekannt und soll nur noch kurz erwähnt werden:

Beim Schmelzen eines Kunststoffes verdampft darin enthaltene Feuchte. Der entstehende Wasserdampf nimmt ein größeres Volumen ein als Wasser. Dadurch entstehen Gaseinschlüsse im Kunststoff die sich nicht nur optisch störend auswirken, sondern auch einen Einfluss auf die Stabilität des Teils haben können (Mikrorisse im Material).

Ziel der Ausführungen war, dass Sie sich selbst eine Meinung bilden können. Es ist eben nicht immer alles so wie es auf den ersten Blick erscheint und bei genauerer Betrachtung erweist sich so manches als wenig sinnvoll. Wenn Sie, nach dieser Lektüre, die Gegebenheiten besser einschätzen können, dann hat sich ihre Geduld beim Lesen gelohnt.