



# Die Messung der Luftfeuchte

## Einführung

Neben der Temperatur ist die Feuchte eine sehr wichtige Prozeßgröße. Die relative Luftfeuchte der Umgebung beeinflusst beispielsweise weitgehend unser Wohlbefinden und den Gesundheitszustand.

Bei industriellen Prozessen ist die richtige Einstellung der Feuchte oft entscheidend über Wettbewerbsfähigkeit und Qualität der Erzeugnisse. Ebenfalls kann eine korrekte Einstellung des Feuchtigkeitsniveaus zu deutlichen Einsparungen im Energieverbrauch beitragen.

Die Liste der Anwendungsgebiete, in denen die Messung der Luftfeuchte wichtig erscheint, läßt sich beliebig lang fortsetzen. Überall dort, wo durch den Wasserdampfgehalt der Luft chemische, physikalische oder biologische Prozesse hervorgerufen oder beeinflusst werden, ist die ständige Überwachung der Luftfeuchte von hoher Bedeutung.

## Begriffe und physikalische Gesetze

### Die Zusammensetzung der Luft

In reiner, trockener Luft befinden sich folgende Bestandteile:

- 78,10 Vol.-% Stickstoff
- 20,93 Vol.-% Sauerstoff
- 0,93 Vol.-% Argon
- 0,03 Vol.-% Kohlendioxid
- 0,01 Vol.-% Wasserstoff

sowie kleinere Mengen Neon, Helium, Krypton und Xenon.

Neben diesen Bestandteilen ist in unserer Raum- und Außenluft noch eine Anzahl gasförmiger und fester Stoffe, sowie eine gewisse Feuchtigkeitsmenge in Form von Wasserdampf vorhanden. Die Luft ist also ein homogenes Gemisch verschiedener Gase und kann als „ideales Gas“ angesehen werden. Sonneneinstrahlung und Winde sorgen für eine gleichmäßige Vermischung der beteiligten Gasarten, so daß trotz unterschiedlicher spezifischer Gewichte keine Schichtenbildung stattfindet.

### Dalton's Gesetz $P = P_1 + P_2 + \dots$

Der Gesamtdruck eines Gasgemisches besteht aus der Summe der Teildrücke und seiner Bestandteile. Einfach ausgedrückt besteht also die Luft aus trockener Luft und Wasserdampf,

$$P = P_w + P_{\text{trocken}}$$

wobei ( $P_w$ ) den durch Wasserdampf erzeugten Teildruck und ( $P_{\text{trocken}}$ ) die Summe der Teildrücke aller anderen Gase darstellt.

### Wasserdampf-Sättigungsdruck

Die Luft ist in der Lage, eine bestimmte Wasserdampfmenge in Abhängigkeit von ihrer Temperatur aufzunehmen und zu speichern. Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Aufnahmemenge.

Der dadurch erzeugte Wasserdampfdruck kann bei einer bestimmten Temperatur nur bis zur Sättigungsgrenze ansteigen und wird als Wasserdampf-Sättigungsdruck ( $P_s$ ) bezeichnet.

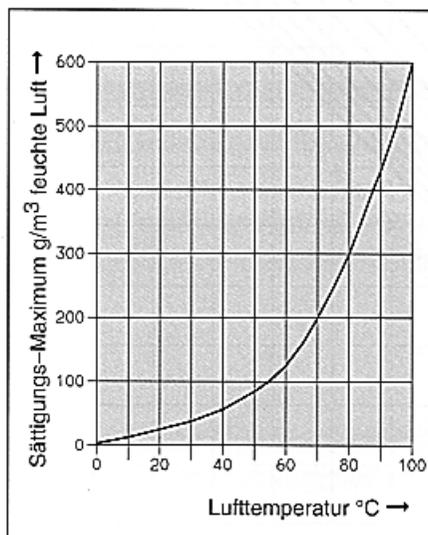


Abb. 1: Die Wasserdampfdruck-Kurve kennzeichnet das Sättigungsmaximum des Wasserdampfgehaltes der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur

Der Umgebungsdruck oder die Anwesenheit anderer Gase bzw. Verunreinigungen üben keinen Einfluß auf das dargestellte Verhalten aus.

### Taupunkt

Die Taupunkttemperatur ( $T_d$ ) ist die Temperatur, bei der die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist und durch weitere Zufuhr von Wasserdampf oder Abkühlung der Lufttemperatur eine Kondensation eintritt. Die überschüssige Wasserdampfmenge taut als Regen, Nebel oder Kondenswasser ab. Der gesättigte Zustand bleibt dabei erhalten. Die Taupunkttemperatur ist der Wasserdampf-Sättigungstemperatur gleichzusetzen und kann bei Normaldruck maximal 100 °C betragen.

### Meßgrößen

Zur Kennzeichnung des Feuchtigkeitsgehaltes in der Luft stehen zwei Meßgrößen zur Verfügung. Man unterscheidet zwischen der relativen Feuchte und der absoluten Feuchte.

### Relative Feuchte

Als relative Luftfeuchte wird das Verhältnis zwischen dem in einem Gas vorhandenen Wasserdampfdruck ( $P_w$ ) und dem maximal möglichen Wasserdampfdruck, also dem Wasserdampf-Sättigungsdruck ( $P_s$ ) bei der betreffenden Temperatur bezeichnet.

$$rF = 100 \cdot \frac{P_w}{P_s(t)} \quad [\%]$$

Die relative Luftfeuchte stellt eine dimensionslose Größe dar. Sie ist eine Verhältniszahl und wird in % angegeben.

Da der Sättigungsdruck nur von der Lufttemperatur abhängt, ist damit auch die relative Luftfeuchte temperaturabhängig. Die relative Luftfeuchte nimmt ab, wenn die Temperatur steigt und umgekehrt. Der Einfluß von Temperaturschwankungen auf die relative Luftfeuchte kann erheblich sein.

	10°C	20°C	30°C	50°C	70°C
10% rF	±0,7%	±0,6%	±0,6%	±0,5%	±0,5%
50% rF	±3,5%	±3,2%	±3,0%	±2,6%	±2,3%
90% rF	±6,3%	±5,7%	±5,4%	±4,6%	±4,1%

Tab. 1: Einfluß einer Temperaturschwankung von ± 1 K bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten

### Absolute Feuchte

Die absolute Luftfeuchte ( $a$ ) gibt diejenige Wasserdampfmenge an, die in einem bestimmten Luftvolumen enthalten ist.

$$a = \frac{\text{Masse des Wasserdampfes}}{\text{Luftvolumen}}$$

Die Maßeinheit für die absolute Feuchte ist  $g/m^3$ . Die Messung der absoluten Feuchte hat den großen Vorteil, daß sie die tatsächlich vorhandene Wassermenge z. B. in einem Gas unabhängig von der Temperatur widerspiegelt.

### Mischungsverhältnis oder Wassergehalt (x)

Hierbei wird das Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zu der Masse des trockenen Gases dargestellt. Meistens werden als Einheiten  $g/kg_{\text{trockene Luft}}$  und % verwendet. Es besagt also, wieviel Gramm Wasserdampf in einem  $kg$  trockener Luft enthalten sind. In der Verfahrenstechnik spielt die Ermittlung des Wassergehaltes eine wichtige Rolle, da hierdurch viel aussagekräftigere Daten gegenüber der relativen Feuchte zur Verfügung stehen.



Die Dimensionen der absoluten und relativen Luftfeuchte stehen in fester Beziehung zueinander, siehe Abb. 2.  
 Die Einheiten der absoluten Feuchte können entsprechend den jeweiligen Erfordernissen gewählt werden.

- Die gebräuchlichsten Einheiten sind:
- Taupunkt(-temperatur)..... °C
  - Mischungsverhältnis.... g/kg trockene Luft
  - Absolute Feuchte.....g/m<sup>3</sup>

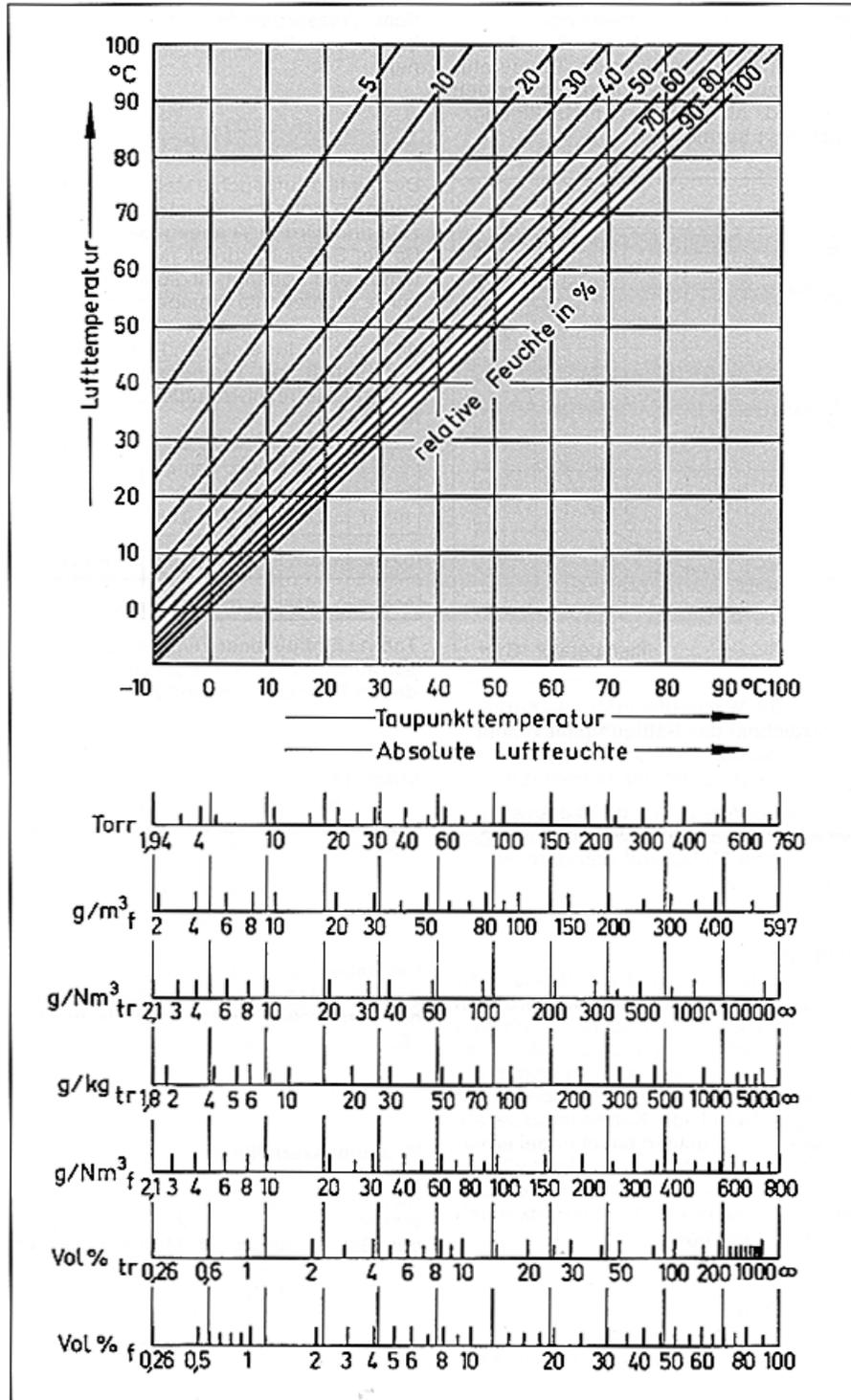


Abb. 2: Einheiten der absoluten Feuchte in Beziehung zur relativen Feuchte



**Zusammenhang zwischen Temperatur, Feuchtegehalt und relativer Feuchte**  
 Die entsprechenden Zusammenhänge sind im i-x-Diagramm (Molliersches Diagramm, siehe Abb. 3) dargestellt.

**Beispiel zur Benutzung des Diagramms:**  
 a) Ermittlung des Wassergehaltes X und des Wasserdampfdruckes e  
 Gemessen: Lufttemperatur 28 °C  
 Luftfeuchte 60 % rF

Gemessene Werte im Diagramm aufsuchen und Schnittpunkt A ermitteln. Auf dem Schnittpunkt eine Senkrechte fallen und bis zum oberen und unteren Diagrammrand durchzeichnen. Der Schnittpunkt am oberen Rand ergibt den Wasserdampfdruck e = 17 mm QS, der am unteren Rand den Wassergehalt X = 14 g/kg.

b) Ermittlung der Taupunkttemperatur  
 Gemessen: Lufttemperatur 28 °C  
 Luftfeuchte 60 % rF

Wie unter a) Schnittpunkt A ermitteln. Von Schnittpunkt A aus senkrecht auf die maximale Luftfeuchte 100 % gehen und von diesem Punkt aus eine Linie auf die Achse (links) mit der Temperaturteilung ziehen. Der neue Schnittpunkt ergibt die gesuchte Taupunkttemperatur von 19,4 °C.

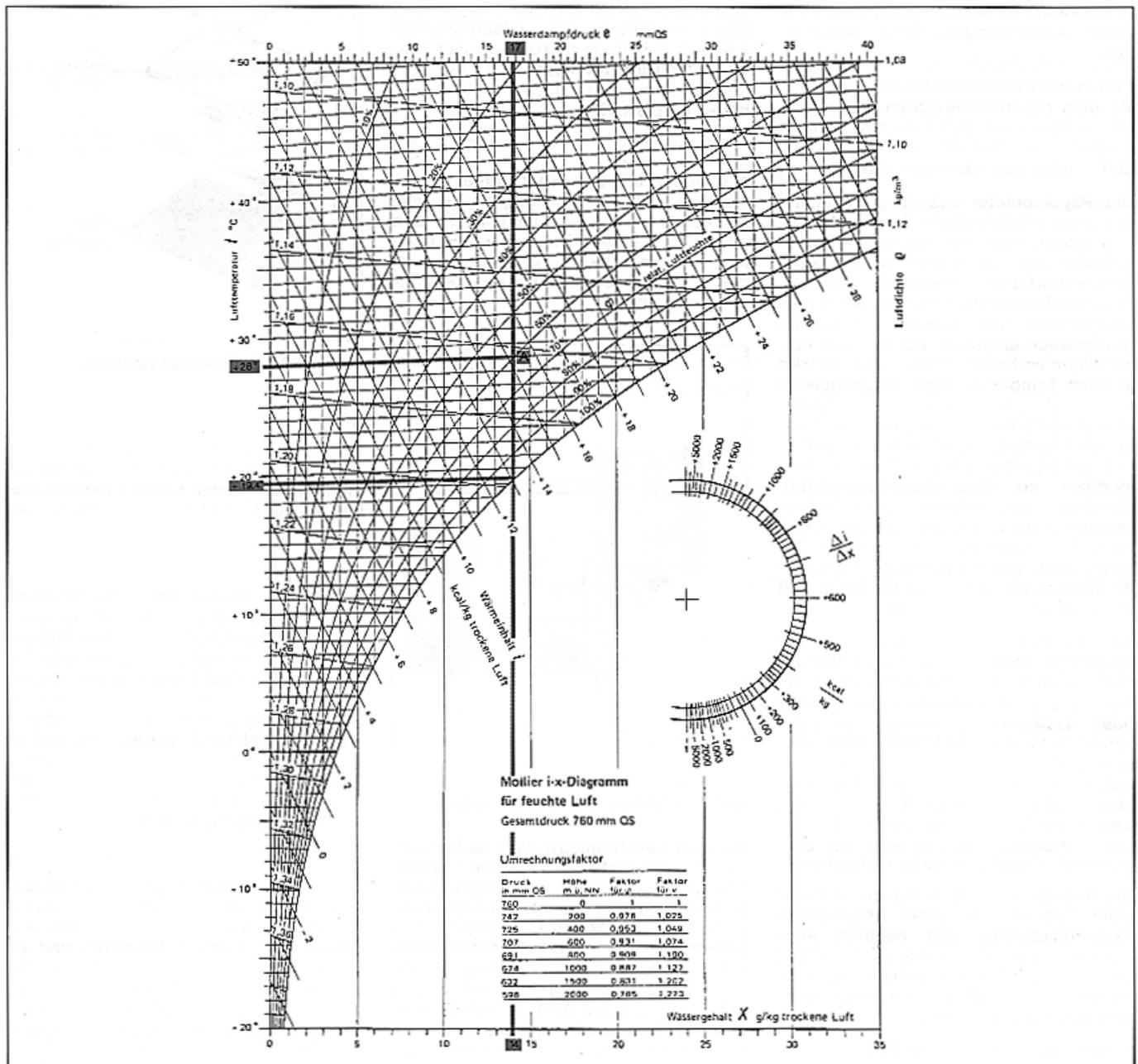


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Temperatur, Feuchtegehalt und relativer Feuchte

**Feuchtemeßverfahren und ihre Anwendungsbereiche**

Zur Ermittlung der Luftfeuchte können verschiedene Meßverfahren angewendet werden. Die Auswahl des am besten geeigneten Meßverfahrens ist meist durch den Anwender im Zusammenhang mit dem Meßobjekt zu treffen. Oft ist es möglich, durch eine einfach aber richtig angeordnete Feuchtemeßeinrichtung eine höhere Meßgenauigkeit zu erzielen bzw. den gewünschten Anforderungen gerecht zu werden.

Zur allgemeinen Hilfestellung sind nachfolgend einige der bekanntesten und häufig verwandten Feuchtemeßverfahren und deren Anwendungsbereiche beschrieben.

**Psychrometrisches Meßverfahren**

Mit dem psychrometrischen Meßverfahren ermittelt man direkt die relative Luftfeuchte. Das Meßverfahren beruht auf dem Prinzip des Wärmeaustausches.

Das Psychrometer besteht grundlegend aus zwei unabhängigen Temperaturfühler, wovon einer als Feuchte-Temperaturfühler und der andere als Trocken-Temperaturfühler verwendet wird. Der Feuchte-Temperaturfühler ist von einem saugfähigen, mit Wasser getränktem Stoffgewebe umgeben. Durch einen notwendigen vorbeigeführten Luftstrom wird je nach Temperatur bzw. Feuchtegehalt der Umluft eine gewisse Wasserdampfmenge durch Verdunstung an diese abgegeben. Hierdurch kühlt sich die Oberfläche des feuchtgehaltenen Thermometers merklich ab (Feuchtkugeltemperatur). Gleichzeitig wird mit dem zweiten Temperaturfühler die Lufttemperatur der Umgebung (Trockentemperatur) gemessen. Die so ermittelte psychrometrische Temperaturdifferenz ist ein Maß für die in der Luft vorhandene relative Feuchte.

Mit dem Psychrometer lassen sich bei sorgfältiger Handhabung präzise Bestimmungen der Luftfeuchte durchführen. So werden z. B. *Aspirations-Psychrometer nach Assmann* als international anerkannte Referenz- und Kontrollgeräte eingesetzt. Ein integrierter Lüfter mit Federzug sorgt hierbei für eine im Mittel konstante Luftgeschwindigkeit von ca. 3 m/s, welche die Thermometer umströmt.

Die Temperaturdifferenz wird an zwei geeichten Glasthermometern abgelesen.

Die Auswertung erfolgt manuell anhand einer Tabelle oder einer graphischen Psychrometertafel. Zur höheren Auswertegenauigkeit können auch die in 10tel Grad eingeteilten Aspirations-Psychrometertafeln des Deutschen Wetterdienstes herangezogen werden.

Neben dem Aspirations-Psychrometer sind noch eine Vielzahl verschiedener Bauformen erhältlich.

Das Anwendungsgebiet der meisten mechanischen Psychrometer mit Glasthermometern begrenzt sich auf den Klimabereich für Messungen bei Temperaturen  $\leq 60^\circ\text{C}$ . Der Vorteil dieser Bauformen liegt darin, daß keine Spannungsversorgung benötigt wird.

Ein erweitertes Einsatzgebiet ermöglichen die elektrischen Psychrometer. Hierbei werden die Feuchtkugel- und Trockentemperatur durch Pt 100-Widerstandsthermometer gemessen. Dadurch kann die nach der „Sprungsche Formel“ ermittelte relative Feuchte bei mikroprozessorgesteuerten Anzeige-, Regel- und Registriergeräten mit entsprechender Eingangsschaltung direkt angezeigt bzw. weiterverarbeitet werden. Der Temperaturbereich erstreckt sich von nahezu 0 bis  $100^\circ\text{C}$ .

Das psychrometrische Meßverfahren erlaubt durch den unempfindlichen Aufbau gegenüber anderen Feuchtemeßverfahren weitgehend Messungen in verschmutzten, lösungsmittelhaltigen und aggressiven Gasen. So werden z. B. elektrische Psychrometer für Dauermessungen in der Fleischerei- und Käsereibranche eingesetzt.

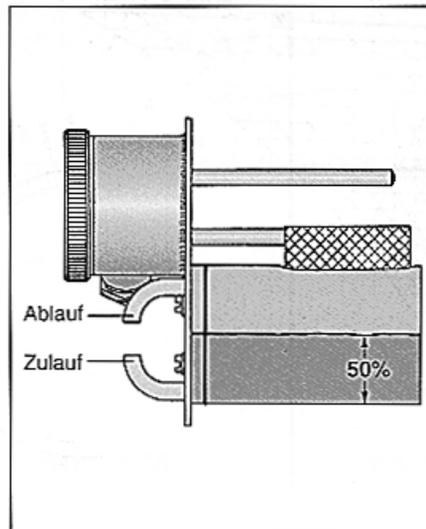


Abb. 4: Elektrisches Psychrometer

Mit dem psychrometrischen Meßverfahren, das seit mehr als einhundert Jahren bekannt ist, wurde ein einfaches und kostengünstiges Feuchte-Meßverfahren realisiert. Zuverlässige Dauermessungen erfordern jedoch anwendungsspezifische Kriterien, die erfüllt werden müssen. So z. B. eine ausreichende Ventilation und Befuchtung sowie Wartung der Meßeinrichtung. Einzelheiten hierüber können der Betriebs- bzw. Verfahrensanweisung des jeweiligen Gerätes entnommen werden.

**Kapazitives Meßverfahren**

Bei dem kapazitiven Meßverfahren wird grundlegend das Kondensationsprinzip angewendet. Die Funktion des Feuchtesensors basiert auf Änderungen der Kapazität eines dünnen Polymerfilms bei Aufnahme bzw. Abgabe von Wassermolekülen.

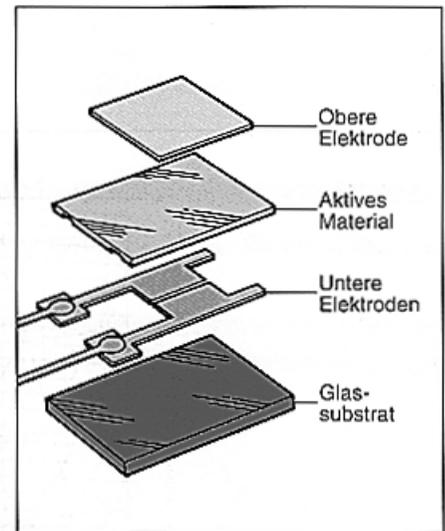


Abb. 5: Der Aufbau des Sensors

Die in Abhängigkeit von der Temperatur enthaltene Feuchtigkeitsmenge der Umgebungsluft durchdringt als Wasserdampf die hygroskopische obere Elektrode des Feuchtesensors und erreicht den aktiven Polymerfilm.

Die in dem Polymerfilm aufgenommene Wasserdampfmenge verändert die elektrischen Eigenschaften des Feuchtesensors und wirkt sich als Kapazitätsänderung aus. Die Kapazitätsänderung ist proportional zur Änderung der relativen Feuchte und wird durch eine nachgeschaltete Elektronik ausgewertet und in ein normiertes Ausgangssignal umgeformt. Die Auswerteelektronik muß der Grundkapazität des jeweiligen Feuchtesensors angepaßt werden.

Durch den speziellen Aufbau und die geringe Eigenmasse der kapazitiven Feuchtesensoren werden sehr schnelle Ansprechzeiten erreicht. Weiterhin sind sie weitgehend unempfindlich gegen leichte Verschmutzungen und Staub. Als Schutz vor Berührungen der Oberfläche sind die Sensoren in einem Kunststoffgehäuse eingefaßt. Für Anwendungen im Hochfeuchtebereich sind betauungssichere Ausführungen erhältlich.

Kapazitive Meßverfahren finden Anwendung z.B. im Klimabereich und in Industrieprozessen, bei denen keine hohe Konzentrationen von korrosiven Gasen oder Lösungen auftreten.

Der Standardmeßbereich für kapazitive Feuchtesensoren beträgt überwiegend 10...90 % rF. Bei hochwertigeren Ausführungen sind Messungen im Bereich zwischen 0 und 100 % rF möglich.

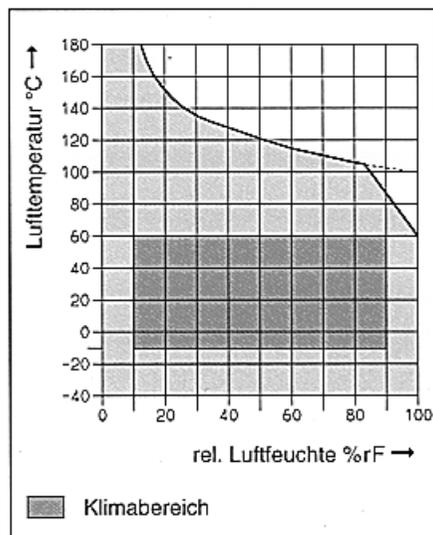


Abb. 6: Arbeitsbereich eines kapazitiven Feuchtegebers für industrielle Anwendungen

Einer der Hauptvorteile des kapazitiven Meßverfahrens ist der realisierbare Temperaturbereich, in dem die Feuchtemessungen durchgeführt werden können. So erlauben z. B. moderne Feuchtegeber für industrielle Anwendungen Messungen zwischen -40...+180 °C, wobei die Temperatur gleichzeitig erfaßt wird und ebenfalls als normiertes Ausgangssignal zur Verfügung steht.

Je nach Geräteausführung sind Abweichungen des dargestellten Arbeitsbereiches möglich.

Bedingt durch die rein elektrische Messung bietet das kapazitive Meßverfahren einen weiteren Vorteil. So können z. B. hochwertige und mit modernster Mikroprozessortechnik ausgestattete Feuchtegeber mit einer Vielfalt möglicher Optionen und Funktionen versehen werden. Da unterschiedlich auftretende Gasdrücke und Luftgeschwindigkeiten kaum einen Einfluß auf den kapazitiven Feuchtesensor ausüben, sind Geräteausführungen erhältlich, die Messungen in druckbelasteten Systemen zwischen 0...100 bar erlauben.

Die Meßgenauigkeit liegt je nach Geräteausführung zwischen  $\pm 2$  und  $\pm 5$  % rF. Unter bestimmten Voraussetzungen können sogar Meßgenauigkeiten von  $\pm 1$  % rF erreicht werden.

#### Hygrometrisches Meßverfahren

Beim hygrometrischen Meßverfahren werden die besonderen Eigenschaften hygroskopischer Faserstoffe zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit genutzt. Setzt man diese Faserstoffe der Umgebungsluft aus, treten nach einer Ausgleichszeit meßbare Längenänderungen in Abhängigkeit von dem Feuchtegehalt der Luft auf.

Der jeweilige Zustand des Faserstoffes ermöglicht nun einen direkten Rückschluß auf die vorhandene Luftfeuchtigkeit. In hygrometrischen Meßelementen finden überwiegend speziell präparierte Kunststoffäden und menschliche Haare Anwendung.

#### Haarmeßelement

Die Wirkungsweise des Meßelementes beruht darauf, daß die verwendeten Haare in der Lage sind, Feuchtigkeit zu absorbieren. Durch Feuchtigkeitsaufnahme entsteht am Haar ein quellender Effekt, der sich vorwiegend als Längenänderung bemerkbar macht.

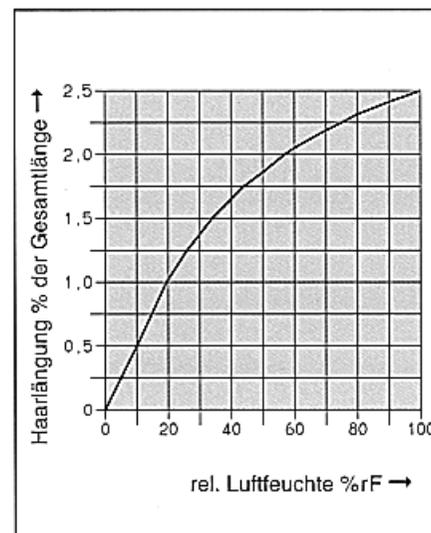


Abb. 7: Längenänderung des Haares in Abhängigkeit der relativen Feuchte

Bei zunehmender Luftfeuchte verlängert sich das Haar. Die Längenänderung beträgt ca. 2,5 % bezogen auf die Haarlänge bei einer Feuchteänderung von 0 auf 100 %. Das Haar weist jedoch bei hoher Luftfeuchte nur noch eine relativ geringe Verlängerung auf (siehe Abb. 7).

Haarmeßelemente werden vorzugsweise in Zeigerinstrumenten für den Klimabereich eingesetzt. Die Längenänderung des Haares wird durch eine spezielle feinmechanische Übersetzung auf einen Zeiger oder Schreibstift übertragen. Aus Gründen der mechanischen Stabilität faßt man mehrere Haare zu einem Haarbündel oder zu einer Haarharfe zusammen.

Das Meßverfahren gewährleistet eine Genauigkeit von  $\pm 3$  % im Meßbereich von 0...90 (100) % rF. Es sind Umgebungstemperaturen von -35...+50 °C möglich. Bei längerer Anwendung im niedrigen Feuchtebereich unterhalb 40 % rF muß das Haarelement regeneriert werden. Hierzu setzt man das Haar-Hygrometer ca. 60 Minuten lang einer nahezu gesättigten Luft (etwa 94...98 %) aus. Eine eventuelle Korrektur der Zeigerstellung kann anschließend mit einer Justierschraube vorgenommen werden.

Haar-Hygrometer reagieren empfindlich gegen hygroskopischen Staub und sind daher zu schützen bzw. müssen in bestimmten Zeitabständen gereinigt werden.

#### Kunststoffmeßelement

Beim Kunststoffmeßelement werden anstatt der menschlichen Haare Kunststoffäden verwendet. Durch ein spezielles Verfahren erhalten diese Fasern ebenfalls hygroskopische Eigenschaften. Änderungen der relativen Feuchte bewirken eine proportionale Längenänderung des Meßelementes. Die Längendehnung wird auch über eine feinmechanische Übersetzung übertragen.

Das Kunststoffelement bietet den Vorteil, daß man es bei höheren Temperaturen (bis zu 110 °C) und auch über längere Zeit bei niedriger relativer Feuchte verwenden kann. Ein von den Haarmeßelementen bekanntes Regenerieren ist hierbei nicht erforderlich.

Das Kunststoffmeßelement ist wasserbeständig und unempfindlich gegen trockenen Schmutz, Staub, Flusen und ähnlichen Verschmutzungen. Der Meß-/Arbeitsbereich liegt bei (0)30...100 % rF., ist aber von der Umgebungstemperatur abhängig (siehe Abb. 8). Dabei beträgt die Meßgenauigkeit  $\pm 2 - 3$  %.

Hygrometrische Meßwertgeber mit Kunststoffelement werden wegen ihrer weitgehenden Unempfindlichkeit und der höheren Temperaturverträglichkeit für Dauermessungen in der industriellen Verfahrenstechnik und im Klimabereich eingesetzt. Entsprechend der jeweiligen Anwendung sind die verschiedensten Geräteausführungen erhältlich.

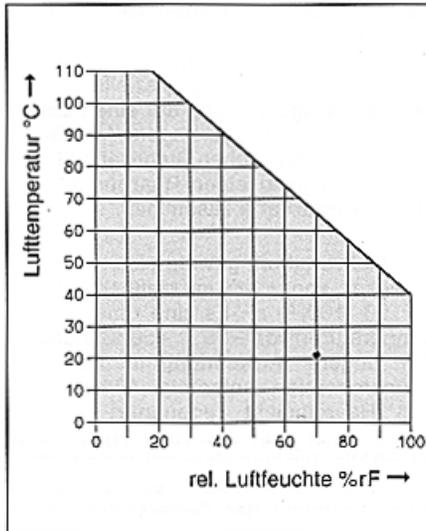


Abb. 8: Maximale Temperatur und Feuchte bei einem Kunststoff-Meßelement

Hierzu zählen unter anderem:

#### Hygrogeber

Die auftretende Längenänderung des Kunststoffelementes wird bei diesen Geräten über ein geeignetes System abgetastet und meist in ein lineares Widerstandssignal umgewandelt. Ebenfalls sind Ausführungen mit eingebautem Zweidraht-Meßumformer erhältlich, wobei normierte Strom- und Spannungssignale am Ausgang zur Verfügung stehen. Geräte mit einem zusätzlichen Temperaturmeßbereich werden als Hygrothermogeber bezeichnet.

#### Hygrostate

Bei dieser Variante wird die Längenänderung des Meßelementes zur Betätigung eines Schaltkontaktes genutzt. Die Hygrostate dienen zur Steuerung von Be- und Entfeuchtungsanlagen.

#### Hygrograph

Der Hygrograph ist ein registrierender Feuchteschreiber mit hygrometrischen Haar- oder auch Kunststoffmeßelementen. Eine zusätzliche Temperaturerfassung ist ebenfalls möglich (Hygrothermograph). Anwendungsgebiete sind z.B. Wetterstationen.

Mit dem hygrometrischen Meßverfahren sind allgemein Feuchtemessungen in druckloser und nicht aggressiver Luft möglich. Messungen in lösungsmittelhaltigen und aggressiven Medien sollten vermieden werden, da sie ja nach Art und Konzentration Fehlmessungen verursachen bzw. es zur Zerstörung des Meßelementes führen kann.

#### Schlußbetrachtung

Der Abschnitt Feuchtemeßverfahren und ihre Anwendungsbereiche behandelt Grundlagen. Beschriebene Geräteausführungen und technische Angaben können daher herstellbezogene Abweichungen aufweisen. Genauere Hinweise sind daher den Betriebsanleitungen oder Datenblättern der einzelnen Geräte zu entnehmen.