



Teil 3

# Temperatur- und Feuchtemessung

Im dritten Teil der Reihe über Temperatur- und Feuchtemesstechnik beschäftigen wir uns mit dem Begriff der Feuchte und den wichtigsten Verfahren zu ihrer Messung.

## Was ist Feuchte?

Ganz allgemein lässt sich Feuchte als das Vorhandensein von Wasser in einem Gas oder Feststoff definieren. Bei Gasen stellt die Feuchte nur eine Komponente des Gasgemischs dar, in festen Materialien hingegen ist dies mit vielerlei Auswirkungen auf ihren Träger verbunden (Schrumpfen, Quellen, Leitfähigkeit, Reibungskoeffizient ...). Deshalb wird Feuchte in Gasen und Festkörpern unterschiedlich definiert.

### Materialfeuchte

Die Materialfeuchte soll in diesem Artikel nur gestreift werden. Sie wird auch als volumetrischer oder gravimetrischer Wassergehalt bezeichnet. Beim volumetrischen Wassergehalt wird das Volumen des Wassers zum Gesamtvolumen des nassen Wirtsstoffs ins Verhältnis gesetzt, beim gravimetrischen Wassergehalt die Masse des Wassers zur Masse des trockenen Wirtsstoffs (Formel 5).

$$F_{\text{vol}} = \frac{\text{Volumen}_{\text{Wasser}}}{\text{Volumen}_{\text{gesamt}}} \quad \text{Definition volumetrischer Wassergehalt} \quad (5)$$

$$F_{\text{grav}} = \frac{\text{Masse}_{\text{Wasser}}}{\text{Masse}_{\text{trocken}}} \quad \text{Definition gravimetrischer Wassergehalt}$$

Nach der ersten Definition des volumetrischen Wassergehalts als Quotient von Wasservolumen zum Gesamtvolumen ist dieser natürlich stets  $<1$ . Anders bei der zweiten Definition des gravimetrischen Wassergehalts, bei dem auch Quotienten  $>1$  möglich sind (man denke an einen nassen Schwamm, der ein Vielfaches seiner Trockenmasse auf-

weist). Über Dichte (Masse/Volumen) lassen sich die beiden Wassergehaltsarten ineinander umrechnen.

Wir wollen es bei einer stichwortartigen Übersicht der Messverfahren für den Wassergehalt in Stoffen (Materialfeuchte) belassen.

**Gravimetrische Messung.** Sie beruht auf der Definition des gravimetrischen Wassergehalts. Zuerst wird eine Probe des feuchten Materials gewogen, anschließend wird diese vollständig getrocknet (darrtrocken) und erneut gewogen. Der gravimetrische Wassergehalt ist nun das Verhältnis aus dem Unterschied beider Gewichte (absoluter Wassergehalt) dividiert durch das Trockengewicht. Die Messung ist hoch genau, aber langwierig und durch die Probenentnahme nicht zerstörungsfrei.

**Tensiometrische Messung.** Hier macht man sich die Kapillarwirkung zunutze, auf der auch die Wasseraufnahme von Pflanzen aus dem feuchten Erdreich beruht. Tensiometer bestehen aus einer wassergefüllten Tonzelle mit einem angeschlossenen, druckdichten Messrohr. Setzt oder steckt man die Zelle z. B. in das Erdreich ein, diffundiert Wasser durch die Kapillarwirkung von innen nach außen und es entsteht so lange eine Saugspannung, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Mit dem Herausdiffundieren ist eine Druckabnahme im Messrohr verbunden. Der Unterdruck ist ein Maß für den Wassergehalt des die Tonzelle umgebenden Materials und wird in der Einheit Pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ Newton/m}^2$ ) gemessen. Um ein Gefühl für diese Größe zu bekommen: Im Erdreich ist bei einer Saugspannung von weniger als 50 hPa das Erdreich mit Wasser gesättigt, über 200 hPa ist je nach Bewuchs Bewässerung angeraten.



**Bild 18:** Über eine Widerstandsmessung zwischen zwei Einstechelektroden lassen sich mit diesem Messgerät Aussagen über den Feuchtegrad von Holz machen.

**Dielektrische Messung.** Gemessen wird der Einfluss des Wassers im Material auf das elektromagnetische Feld einer Sonde. Beim Eintritt in die Substanz ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feldes. Diese Wechselwirkung erlaubt die Berechnung der dielektrischen Verluste des Prüflings, was wiederum zur Bestimmung seiner Feuchte oder anderer Materialeigenschaften benutzt werden kann. Man benötigt zu diesem Verfahren materialspezifische Referenzmessungen. Ein Nachteil des Verfahrens ist seine begrenzte Genauigkeit, Vorteile sind Geschwindigkeit, Möglichkeit zum Langzeiteinsatz und Zerstörungsfreiheit. Sehr häufig wird es in der Bauphysik, z. B. zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Putzen oder Mauerwerk, verwendet.

**Leitwertmessung.** Man macht sich die Tatsache zunutze, dass die elektrische Leitfähigkeit eines Stoffes mit seinem Wassergehalt zunimmt. Zur Messung werden Sonden auf die Oberfläche des Materials gesetzt oder in es hineingestoßen und der elektrische Widerstand zwischen ihnen wird ermittelt. So einfach, schnell und kostengünstig die Methode ist, hat sie doch mit einer Reihe von Fehlerquellen zu kämpfen, besonders dem Salzgehalt des Wassers, aber auch mit anderen Faktoren. Bei Langzeitmessungen verfälschen zudem elektrolytische Effekte das Mess-Ergebnis. Für die schnelle Abschätzung z. B. des Wassergehalts von Holz ist das Verfahren ausreichend genau (Abbildung 18). Damit ist die Vielfalt der Methoden bei Weitem nicht abgeschlossen. Im Einsatz sind noch chemische Verfahren (Calcium-Karbid-Methode, Karl-Fischer-Titration) und Verfahren, die auf der Veränderung physikalischer Eigenschaften durch eingelagertes Wasser beruhen (Mikrowellenmessverfahren, Laufzeitmessverfahren, Infrarotmessverfahren, reflexions- und absorptionsphotometrische Verfahren usw.).

## Luftfeuchte

Für das tiefere Verständnis des Luftfeuchtebegriffs muss man die Bedeutung des Partialdrucks kennen. Er bezieht sich auf ein Gasgemisch, dessen Komponenten nicht miteinander reagieren, d. h. ein festes Mengenverhältnis zueinander haben. Luft z. B. ist ein solches Gemisch, das aus den Volumenanteilen von etwa 78,1 % Stickstoff ( $N_2$ ), 20,9 % Sauerstoff ( $O_2$ ), 0,93 % Argon (Ar), 0,032 % Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), weiteren Spurenbestandteilen und einem Restanteil von Wasserdampf besteht. Nach dem Dalton'schen Gesetz (John Dal-

ton, britischer Naturforscher, 1766–1844) ergibt sich nun der Gesamtdruck des Gasgemischs in einem bestimmten Volumen als Summe der Einzeldrücke, die jedes Teilgas (Partialgas) erzeugen würde (Partialdruck), wenn es das gleiche Volumen wie das Gemisch ausfüllen würde (Gleichung 6).

$$p_{\text{ges}} = \sum_{v=1}^n p_v = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (6)$$

**Dalton'sches Gesetz**  
über den Druck eines Gasgemischs  
 $p_v$ : Partialdruck der  $v$ -ten Gemischkomponente

Der Gesamtdruck ist also gleich der Summe der Partialdrücke der Gasgemischkomponenten. Deshalb kann man den Anteil einer Komponente am Gemisch durch ihren Partialdruck charakterisieren. Das Beispiel in Gleichung 7 erläutert das:

### Beispiel zum Dalton'schen Gesetz:

(7)

1 Liter Stickstoff habe einen Druck von  $p_{\text{Stickstoff}} = 0,2 \text{ bar}$  (Partialdruck von Teilgas 1)  
1 Liter Sauerstoff habe den Druck von  $p_{\text{Sauerstoff}} = 0,4 \text{ bar}$  (Partialdruck von Teilgas 2)

Werden die Teilgase zu einem Liter Mischgas zusammengefügt, ist dessen Gesamtdruck gleich der Summe der Teilgas-Partialdrücke.

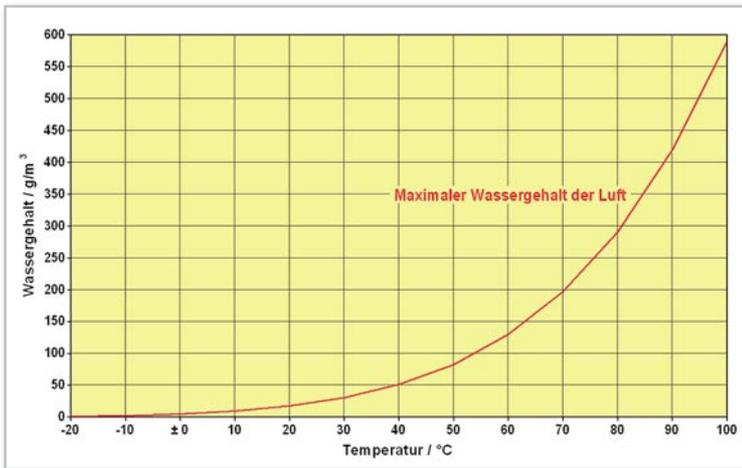
$$p_{\text{Mischung}} = p_{\text{Stickstoff}} + p_{\text{Sauerstoff}} = 0,2 \text{ bar} + 0,4 \text{ bar} = 0,6 \text{ bar}$$

1 Liter Mischgas hat daher einen Druck von  $p_{\text{Mischung}} = 0,6 \text{ bar}$

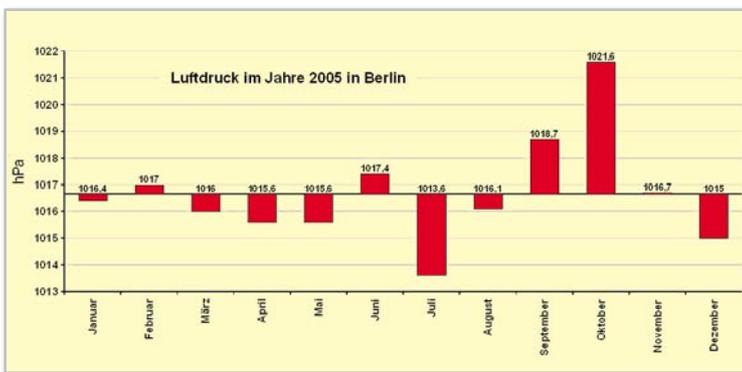
Weil 0,2 bar 33,3 % und 0,4 bar 66,6 % von 0,6 bar sind,  
enthält das Gemisch 33,3 % Stickstoff und 66,6 % Sauerstoff.

**Absolute Luftfeuchtigkeit.** Unter absoluter Luftfeuchtigkeit (Luftfeuchte) versteht man den Wasseranteil in einem bestimmten Volumen Luft mit der Einheit  $\text{gm}^{-3}$  (Gramm/Kubikmeter). Die absolute Luftfeuchtigkeit schwankt zwischen null und einer gewissen Sättigungsfeuchte, bei der das Aufnahmevermögen der Luft erschöpft ist. Der maximale Wasserdampfgehalt hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: dem Druck, unter dem der Wasserdampf steht (Luftdruck), und seiner Temperatur. Je höher beide sind, desto höher ist das absolute Aufnahmevermögen für Wasser in dampfförmiger Gestalt. Die Angabe einer absoluten Wassermenge im betrachteten Volumen ohne die gleichzeitige Angabe von Druck und Temperatur ist daher nicht besonders aussagekräftig.

Bei Norm-Atmosphärendruck (101.325 Pa im Jahresmittel bei 0 °C auf Meeressniveau) lässt sich Abbildung 19 der maximale Wassergehalt (=maximale absolute Luftfeuchtigkeit) pro  $\text{m}^3$  Luft entnehmen. Würde man jetzt noch den Luftdruck variieren, hätte man es mit einer Kurvenschar zu tun. Der Luftdruck schwankt im Verlauf eines Jahres nur um wenige Prozent. Der niedrigste jemals gemessene Luftdruck wurde mit 856 hPa (-15,5 %) im Jahre 1958 in einem Taifun in Okinawa (Japan) gemessen, der höchste mit 1085,7 hPa (+7,2 %) in Tosontsengel in der Mongolei im Dezember 2001 (Quelle: Wikipedia). In Deutschland sind die Schwankungen im Jahresmittel erheblich moderater. Abbildung 20 (Quelle: Statis-



**Bild 19:** Bei konstantem Druck hängt die maximale absolute Luftfeuchtigkeit stark nichtlinear von der Temperatur ab.



**Bild 20:** In Deutschland kann man von einem recht konstanten Luftdruck ausgehen, der nur wenige Prozent vom Jahresmittel abweicht.

tisches Landesamt Berlin) zeigt die Schwankungen des Luftdrucks in Berlin im Jahr 2005 um den Jahresmittelwert von 1016,64 hPa. Damals lag die maximale positive Abweichung im Oktober 0,49 % über dem Jahresmittel und die maximale negative im Juli 0,3 % darunter.

**Relative Luftfeuchtigkeit.** Wegen des Einflusses von Druck und Temperatur auf den absoluten Wassergehalt wird meist die relative Luftfeuchte als das prozentuale Verhältnis aus dem aktuellen Wasserdampfdruck zum Sättigungswasserdampfdruck bzw. aus absoluter zu maximal möglicher absoluter Feuchte (Sättigungsfeuchte) bei den jeweils gegebenen Verhältnissen angegeben (Gleichung 8).

$$F_{rel} = \frac{p_{\text{Wasserdampfdruck}}}{p_{\text{Sättigungswasserdampfdruck}}} \cdot 100\% = \frac{\text{absolute Luftfeuchtigkeit}}{\text{Sättigungsluftfeuchtigkeit}} \cdot 100\% \quad (8)$$

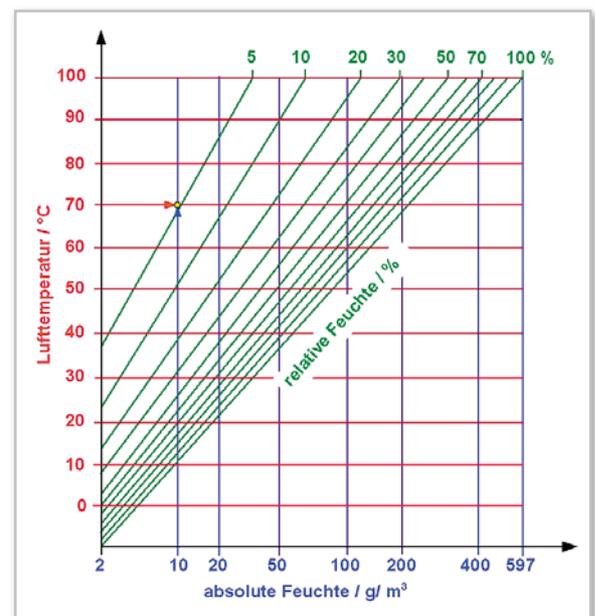
**Tabelle 1:** Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Temperatur

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

Die absolute Feuchte ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) wird durch Bezug auf die maximal aufnehmbare Wassermenge (Sättigungsfeuchte in  $\text{g}/\text{m}^3$ ) bei den vorliegenden Druck- und Temperaturverhältnissen zur relativen Feuchte ( $F_{rel}$ ). Sie kann zwischen 0 % (trocken) und 100 % (gesättigt) liegen. Unterhalb des sogenannten Wasserdampf-Sättigungsdrucks ist die relative Feuchte proportional zum barometrischen Luftdruck. Die Zusammenhänge zwischen relativer Feuchte und Temperatur sind schwieriger. Allgemein gilt: Mit steigender Temperatur nimmt die relative Luftfeuchtigkeit ab und umgekehrt. Zudem führen bei niedrigen Temperaturen und hohen relativen Feuchtwerten, geringe Temperaturänderungen zu höheren Änderungen der relativen Feuchte als bei hohen Temperaturen und niedrigen Feuchtwerten (vgl. Tabelle 1).

Das Nomogramm in Abbildung 21 zeigt den quantitativen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur, absoluter und relativer Feuchte. Betrachten wir zum Beispiel anhand von Abbildung 21 einen geschlossenen Lagerraum. Fällt seine Innentemperatur um 20 °C von 70 °C auf 50 °C, nimmt die relative Feuchte nur um 5 % von 5 % (gelber Punkt) auf 10 % zu. Die gleiche Temperaturabnahme um 20 °C von 50 °C auf 30 °C bewirkt bereits einen Zuwachs der relativen Feuchte um 20 % von 10 % auf 30 %. Beim weiteren Fallen der Temperatur um 20 °C von 30 °C auf 10 °C steigt die relative Feuchte sogar um 70 %, nämlich von 30 % auf 100 %. Ab 100 % relativer Luftfeuchtigkeit tritt eine Betauung des Lagerguts auf, d. h., es wird von außen nass. Das kann negative Folgen wie Schimmelbildung und Aufweichen des gelagerten Produkts und/oder seine Verpackung nach sich ziehen und ist deshalb unbedingt zu vermeiden.

**Verfahren zur Messung der Luftfeuchtigkeit.** Ganz allgemein werden Messverfahren und Messgeräte zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte als Hygrometer bezeichnet. Sie werten mechanische, elektrische, chemische oder optische Effekte aus.



**Bild 21:** Dieses wichtige Diagramm stellt die Beziehungen zwischen Temperatur, absoluter und relativer Luftfeuchtigkeit bei Normalluftdruck her.

**Psychrometer.** Das psychrometrische Messverfahren (griech.: psychros=kalt) ist bei exakter Durchführung sehr genau ( $\pm 0,5\%$ ). Abbildung 22 zeigt das nach dem deutschen Meteorologen Richard Aßmann (1845–1918) benannte Aßmann-Aspirationspsychrometer (lat. aspirieren=einatmen). Es besteht aus zwei gleichen Thermometern, die durch einen Steg voneinander getrennt sind. Ein Ventilator erzeugt einen Luftstrom, der die Messgefäße beider Thermometer umströmt. Das Messgefäß des rechten, sogenannten feuchten Thermometers wird in dünnen, wassergetränkten Stoff gehüllt. Je niedriger nun die relative Feuchte der an der Unterseite einströmenden Luft der Umgebung ist, umso mehr Wasser verdunstet am Gewebestrumpf und kühlt das Messgefäß entsprechend stark ab. Die Messdifferenz zwischen den Anzeigewerten des „trockenen“ und des „feuchten“ Thermometers nennt man psychrometrische Temperaturdifferenz. Aus ihr lassen sich mit Hilfe von Psychrometertafeln (die auf der psychrometrischen Formel nach Gleichung 9 beruhen), die relative Luftfeuchtigkeit sowie weitere Parameter ermitteln.

**Taupunktspiegel.** Eine spiegelnde, nicht hygroskopische, polierte Metalloberfläche wird langsam durch ein rückseitiges thermoelektrisches Kühlsystem (Peltier-Element) unter die Temperatur des Messluftstroms abgekühlt (Abbildung 23). Beim Erreichen der Taupunkttemperatur beginnt sich Kondensat auf dem Spiegel abzusetzen – er beschlägt. Dies wird durch eine Anordnung aus einer auf die Spiegeloberfläche strahlenden Lichtquelle und einer Fozelle zum Empfang des reflektierten Lichts detektiert. Eine Regelelektronik steuert das Peltier-Element und die Temperatur des Spiegels derart, dass immer nur ein dünner Kondensatfilm auf ihm vorhanden ist. Die Temperatur der Spiegeloberfläche wird mit einem integrierten Pt100-Temperaturfühler als Taupunkttemperatur gemessen und von einer Auswerteelektronik in die entsprechende relative Feuchte umgerechnet. Die Taupunktspiegelanordnung erfüllt damit die Funktion eines Hygrometers zur Messung relativer Luftfeuchten.

**Haarhygrometer.** Eine sehr weit verbreitete Hygrometerform verwendet Haare als Messgeber. Sie nehmen wie alle organischen Stoffe mehr oder weniger Wasser aus der Umgebung auf und ändern dabei ihr Volumen. Zwischen 0 und 100 % relativer Luftfeuchte verlängert sich ein entfettetes Haar nichtlinear um ca. 2,5 %. Diese Längenänderung kann über einen Hebel in die Drehung eines Zeigers vor einer Skala umgesetzt werden (Abbildung 24). Eine Anwendung dieses Prinzips findet man auch in der Natur beim Kiefernzapfen, der sich proportional zur Umgebungsluftfeuchtigkeit immer mehr schließt und damit eine Art natürliches Hygrometer darstellt. Die Liste weiterer Messverfahren ist noch lang: Absorptionshygrometer, Lithium-Chlorid-Taupunkthygrometer, Widerstandshygrometer usw. In den letzten Jahren hat der kapazitive Feuchtesensor große Bedeutung erlangt, weil er sich hervorragend in elektronische Mess-Systeme integrieren lässt.

Im vierten Teil des Artikels geht es um die Vorteile des polymeren Feuchtesensors und die Feuchtemessung in der industriellen Praxis.

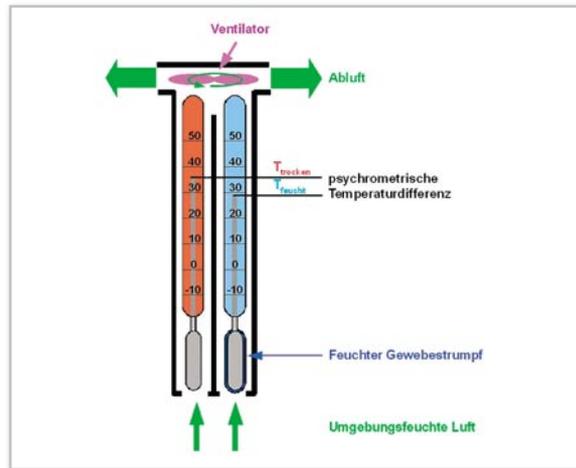


Bild 22: Im Aßmann-Psychrometer wird aus der Temperaturdifferenz zwischen einem trockenen und einem feuchten Thermometer auf die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft geschlossen.

$$p_{\text{Umgebung}} = p_{\text{Sättigungsdampfdruck}}(T') - k \cdot p \cdot (T - T') \quad \text{Psychrometerformel} \quad (9)$$

mit  $T'$  = Temperaturanzeige des feuchten Thermometers  
 $T$  = Temperaturanzeige des trockenen Thermometers (Umgebungstemperatur)  
 $p$  = Luftdruck  
 $k$  = Psychrometerkonstante

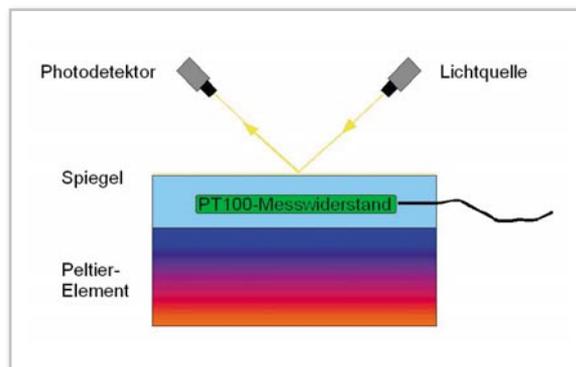


Bild 23: Wenn die Betauung des Spiegels beginnt, ist seine Oberfläche auf der Taupunkttemperatur.

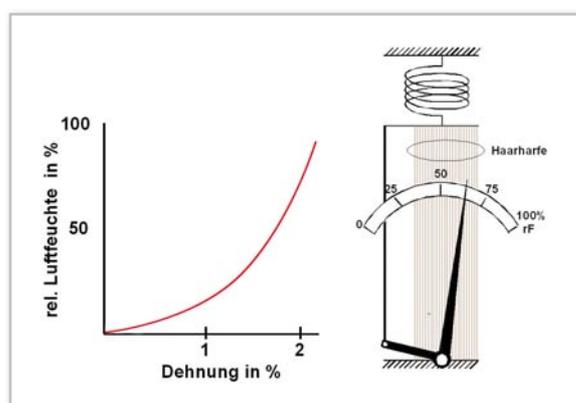


Bild 24: Im Haarhygrometer wird die feuchtigkeitsabhängige Länge einer Vielzahl parallel eingespannter Haare in eine Skalenzeigerbewegung umgesetzt.