

Das Diffusionshygrometer, ein neuer Feuchtigkeitsmesser

Von Prof. Dr. H. GREINACHER

Vorbemerkung

Die Hygrometer dienen in der Regel zur Messung der *relativen* Luftfeuchtigkeit. Diese kann entweder direkt gemessen oder aus der absoluten abgeleitet werden. Erstere gibt man in Prozenten an, letztere in g Wasserdampf, enthalten in 1 m³ Luft. Die relative Feuchtigkeit ergibt sich als Quotient aus der absoluten und der maxi-

malen in Prozenten. Bezeichnet man also mit m_o die absolute Feuchtigkeit, mit m_s die Menge Wasserdampf, die bei der betreffenden Temperatur maximal im Kubikmeter enthalten sein kann, so ist die relative Feuchtigkeit $f = 100 \frac{m_o}{m_s}$. Da die Wasserdampfmengen proportional dem jeweiligen Partialdruck des Wasser-

dampfes sind, so kann auch geschrieben werden $f = 100 \frac{p_o}{p_s}$, wobei p_o den in der Atmosphäre vorhandenen Partialdruck, p_s den maximalen, d. h. den Sättigungsdruck bedeutet. Es kommt also für die Bestimmung der relativen Feuchtigkeit auf dasselbe heraus, ob man die Wassermengen oder die Partialdrücke mißt. Gibt man die Drücke in Torr, d. h. mm Hg, an, so ist zahlenmäßig m_o und p_o beinahe gleich groß. Es ist nämlich $m_o = 1,05 \frac{p_o}{1 + at}$, wo t die Lufttemperatur bedeutet. Vielfach wird daher auch p_o als absolute Feuchtigkeit definiert, indem man den Partialdruck als primäre Größe und m_o als sekundäre, auch von der Temperatur abhängige Größe betrachtet.

Methoden der Hygrometrie

Bisherige

Die bisher am meisten verwendeten Methoden bzw. Hygrometertypen sind folgende:

1. *Das Kondensations- oder Taupunkthygrometer* (DANIELL). Im Prinzip kühlt man einen Gegenstand soweit ab, bis er sich mit Wasser beschlägt, und bestimmt die Kondensationstemperatur bzw. den Taupunkt. Aus einer Dampfdrucktabelle entnimmt man das zugehörige p_o und den der Lufttemperatur entsprechenden Sättigungswert p_s , hat dann allerdings noch eine Korrektur anzubringen, da man p_o für die am abgekühlten Gegenstand verdichtete Luft mißt. $100 \frac{p_o}{p_s}$ gibt dann die relative Feuchtigkeit.

2. *Das Psychrometer* (AUGUST). Man umgibt ein Thermometergefäß mit einem dünnen Lappchen, das mit Wasser getränkt ist, und bestimmt die Temperatur, bis zu welcher das Thermometer sich infolge der Wasserverdunstung abkühlt. Um definierte Verhältnisse zu erhalten, läßt man das befeuchtete Thermometer von einem konstanten Luftstrom bestreichen (Aspirationshygrometer nach ASSMANN). Aus der Temperatur des feuchten und eines trockenen Thermometers läßt sich, wieder unter Benützung der Dampfdrucktabelle und der Formel von SPRUNG, die relative Feuchtigkeit berechnen. Sie läßt sich aber auch schon berechneten Tabellen entnehmen. Bei genaueren Messungen ist dabei der Barometerdruck mit zu berücksichtigen.

3. *Das Haarhygrometer* (SAUSSURE). Während die Methoden nach 1 und 2 die Ausführung eines Versuches verlangen, gibt dieses direkt die relative Feuchtigkeit an. Entfettete Menschenhaare besitzen die Eigenschaft, sich nicht durch Wärme, wohl aber durch Feuchtigkeit auszudehnen. Der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitszunahme und Verlängerung ist empirisch zu bestimmen, d. h. die Instrumente müssen geeicht werden. Diese Hygrometer müssen öfters nachkontrolliert werden und werden gelegentlich infolge Verschmutzung und zu starker Austrocknung regenerationsbedürftig.

Neues Verfahren: Das Diffusionsprinzip

Dieses benützt, wie die Methode unter 3, ein selbsttätiges Prinzip. Es basiert aber im Gegensatz zu jener auf einer einfachen physikalischen Gesetzmäßigkeit. Dies führt zu einer größeren Zuverlässigkeit und gewährleistet auf die Dauer eine konstante Funktion. Es gründet sich auf der verschieden raschen Diffusion von Luft und Wasserdampf.

Ein Gefäß G (Abb. 1), in dem sich Wasser befindet, ist einerseits durch einen Deckel P von passender Porosi-

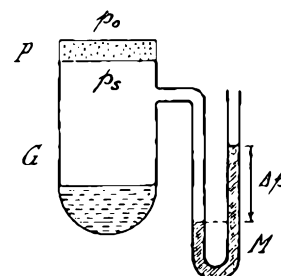


Abb. 1

tät verschlossen, andererseits mit einem empfindlichen Manometer M verbunden. Der sich einstellende Überdruck Δp stellt nun ein Maß für den Unterschied der Dampfsättigung im Gefäß und dem Partialdruck des Wasserdampfes in der Atmosphäre dar, d. h. je trockener diese, um so höher der Druck Δp . Erklärung: Man denke sich erst das Gefäß durch eine feine Öffnung mit der Außenluft verbunden. Dann ist der Druck innen und außen derselbe. Er setzt sich aber außen aus den Partialdrücken der Außenluft und des Wasserdampfes p_o , innen aus dem Partialdruck der Luft und dem Sättigungsdampfdruck des Wassers p_s zusammen. Der Luftanteil außen ist also größer als innen. Daher diffundiert nun durch die poröse Platte mehr Luft von außen nach innen als umgekehrt, so daß dauernd ein Gasstrom aus besagter Öffnung austreten würde. Ist das Gefäß aber geschlossen, so tritt an Stelle dessen eine Druckerhöhung ein, die soweit ansteigt, bis die Luftdiffusion in beiden Richtungen gleich groß geworden ist. Dieser «Diffusionsdruck» ist, wie in der Originalarbeit¹ experimentell nachgewiesen und theoretisch begründet worden ist, proportional der Druckdifferenz $p_s - p_o$. D. h. es ist

$$\Delta p = k (p_s - p_o). \quad (1)$$

Man hat daher nur die Apparatkonstante k zu bestimmen, um hieraus die relative Feuchtigkeit $\frac{p_o}{p_s}$ zu finden.

Zu diesem Zweck bringt man die Anordnung in vollständig getrocknete Luft ($p_o = 0$), mißt den sich bei irgendeiner Temperatur einstellenden Druck Δp_s und sieht das zugehörige p_s in einer Dampfdrucktabelle nach. k ergibt sich dann aus der Beziehung

$$\Delta p_s = k p_s. \quad (2)$$

¹ Helv. Physica Acta 17, 437 (1944).

Es läßt sich die Luftfeuchtigkeit aber auch ohne Kenntnis von k finden, wenn man zu der Anordnung (Abb. 1) noch eine zweite gleiche verwendet, mit dem Unterschied, daß man statt des Wassers ein Trockenmittel in das Gefäß hineinbringt. Bei dieser stellt sich dann ein Unterdruck Δp_0 ein, der proportional dem Partialdruck p_0 der Außenluft ist und somit gegeben ist durch

$$\Delta p_0 = k p_0. \quad (3)$$

Dividiert man (1) durch (3), so fällt k heraus, und man erhält

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{p_s}{p_0} - 1$$

und damit die relative Feuchtigkeit

$$f = 100 \frac{p_0}{p_s} = \frac{\Delta p_0}{\Delta p_0 + \Delta p} \quad (4)$$

Für die Praxis ist es aber bequemer, ohne Trockenmittel auszukommen und nur ein einziges mit Wasser beschicktes Instrument zu verwenden. In diesem Falle muß dann allerdings die individuelle Konstante k bekannt sein. Setzt man ihren Wert aus (2) in (1) ein, so ergibt sich folgender Ausdruck für die relative Feuchtigkeit

$$100 \frac{p_0}{p_s} = f = 100 - 100 \frac{\Delta p}{\Delta p_s} \quad (5)$$

Trägt man daher Δp als Abszisse und f als Ordinate auf, so erhält man eine Gerade, aus der man für jedes gemessene Δp die zugehörige Feuchtigkeit f entnehmen kann. Die Gerade geht durch die Punkte ($f=100$, $\Delta p=0$) und ($f=0$, $\Delta p=\Delta p_s$) hindurch. Jeder Temperatur entspricht nun eine andere Gerade, da Δp_s von der Temperatur abhängt, im besonderen mit dieser ansteigt. Da aber Δp_s stets proportional p_s , so muß diese Größe nur für eine einzige beliebige Temperatur experimentell bestimmt werden, für alle anderen ergibt sie sich mit Hilfe des Proportionalitätsfaktors nach (2). Indem man nun z. B. von Grad zu Grad die betreffenden Δp_s als Abszissen aufträgt, erhält man eine Kurvenschar (Abb. 2), aus der für jeden Temperaturwert die

Darauf sieht man auf der Tabelle nach, wo die Vertikale über dem Manometerwert die Temperaturgerade schneidet, und liest die Ordinate, d. h. die Feuchtigkeit, ab.

Das Diffusionshygrometer

Einrichtung

In Abb. 3 ist die Ausführungsform des neuen Hygrometers, wie es im *Physikalischen Institut der Universität Bern* entwickelt worden ist, wiedergegeben. Während ursprünglich Doppelinstrumente (s. o.) aus Glas hergestellt worden sind und gelegentlich empfindliche Metallmanometer Verwendung fanden, wurden schließlich

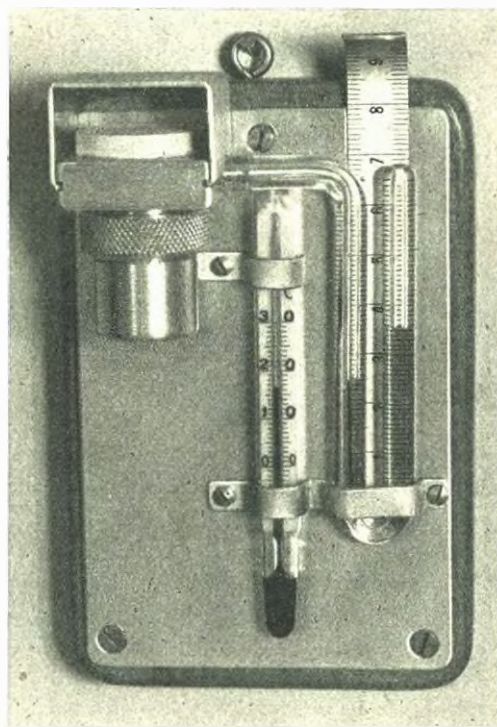


Abb. 3

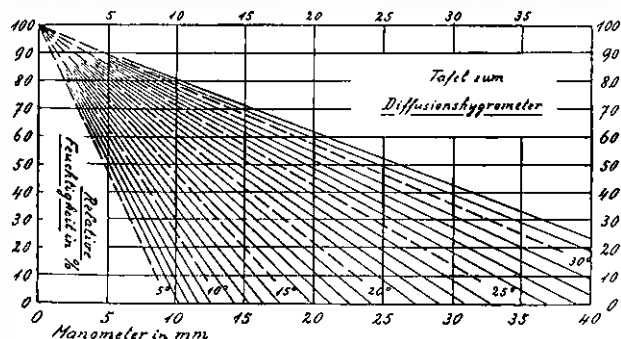


Abb. 2

Der Übersichtlichkeit halber sind nur die horizontalen und vertikalen Linien für die Zehner- bzw. Fünferwerte eingezeichnet

Feuchtigkeit entnommen werden kann. Man liest zunächst die Temperatur und den Manometerdruck ab.

möglichst kleine Metallgefäße und U-Rohr-Manometer als zweckmäßig befunden. So konnte einesteiis das Volumen möglichst klein gehalten werden, was eine rasche Einstellung des Diffusionsdruckes ermöglicht, anderenteils ein rascher Temperaturausgleich erzielt werden, um auch bei Temperaturänderungen eine prompte Einstellung des Instrumentes zu erhalten.

Das Instrument besteht so aus einem kleinen Metallzylinder, dessen unterer Teil abschraubbar ist, um das nötige Wasser (einige cm³) einfüllen zu können. Über der porösen Platte, die oben abschließt, ist noch ein Metallsteg zum Schutze gegen Verschmutzung angebracht. Als Manometerflüssigkeit dient Paraffinöl. Die Ablesung erfolgt an einer Millimeterskala, deren Nullpunkt an die Stelle des unteren Meniskus geschoben werden kann.

Die Ausführung des Diffusionshygrometers, wie es fabrikmäßig von der Firma Rueger in Lausanne unter der Markenbezeichnung «Hygrotherm» hergestellt wird, ist in Abb. 4 wiedergegeben. Hier wird das «Be-

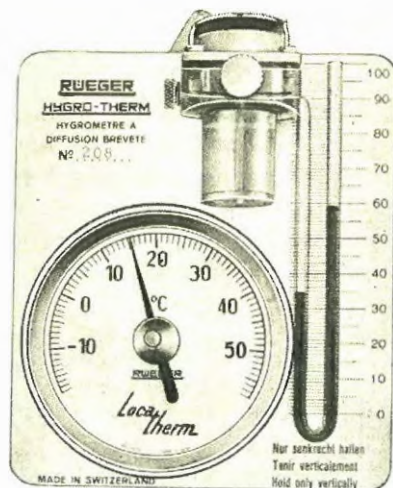


Abb. 4

triebswasser» durch eine seitliche Öffnung eines aus transparentem Material bestehenden Töpfchens eingespritzt, und ein Metallthermometer dient zur Temperaturanzeige.

Eigenschaften

Es liegt im Wesen der Diffusion, daß das Hygrometer eine gewisse Zeit gebraucht, um sich mit der Atmosphäre ins Gleichgewicht zu setzen. Dank dem kleinen Volumen und der geringen Maße des Hygrometergefäßes einerseits und passender Wahl der Porosität der Deckplatte andererseits ließ sich die *Einstelldauer* auf einige Minuten reduzieren. Die Porosität bestimmt weitgehend auch die Apparatkonstante, d. h. die Größenordnung der Manometerausschläge. So zeigt das Hygrometer nach Abb. 4 etwa doppelt so große Drucke an wie dasjenige nach Abb. 3. Die Ablesetabellen sind dementsprechend verschieden. Um für alle fabrizierten Instrumente stets dieselben Tabellen mitliefern zu können, muß für gleiche Porosität aller benützten Platten gesorgt werden. Da sich fabrikatorisch Platten genau gleicher Beschaffenheit kaum herstellen lassen, muß man diejenigen gleicher Eigenschaft aus einer größeren Serie auslesen. Das geschieht am einfachsten so, daß man die Diffusionsgeschwindigkeit der Luft durch diese Platten bestimmt und diejenigen mit gleichen Werten herausucht.

Für Präzisionsmessungen ist es wichtig zu wissen, wie man auch mit Hilfe einer Tabelle, die der Apparatkonstanten nicht völlig entspricht, genaue Werte erhalten kann, bzw. welche *Korrektion an der Ablesung* anzubringen ist. Wir denken uns zur ungenauen Tabelle eine genaue hinzu (Abb. 5) und kennzeichnen die Größen auf der ersteren mit '. Nun greifen wir auf beiden die Temperaturgerade für irgendeinen Wert t heraus. Die

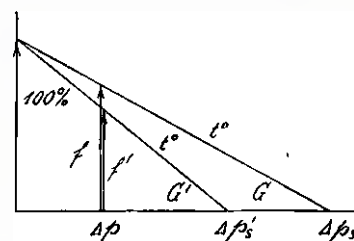


Abb. 5

richtige G zielt nach dem richtigen Δp_s , die ungenaue G' nach den unrichtigen $\Delta p_s'$. Für die gegebene Temperatur t lesen wir beim Diffusionsdruck Δp statt des richtigen Wertes f den abweichenden f' ab. Die Korrektur beträgt $\Delta f = f - f'$. Diese berechnet sich nun aus den Proportionen

$$\frac{f'}{100} = \frac{\Delta p_s' - \Delta p}{\Delta p_s'} \quad (6a)$$

$$\text{und} \quad \frac{f}{100} = \frac{\Delta p_s - \Delta p}{\Delta p_s} \quad (6b)$$

Hieraus folgt zunächst

$$f - f' = 100 \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_s'} - \frac{\Delta p}{\Delta p_s} \right) \quad (7)$$

$$\text{oder} \quad f - f' = 100 \frac{\Delta p}{\Delta p_s'} \left(1 - \frac{\Delta p_s'}{\Delta p_s} \right).$$

Setzt man gemäß (6a) $100 \frac{\Delta p}{\Delta p_s'} = 100 - f'$, so erhält man die einfache Beziehung

$$\Delta f = f - f' = (100 - f') \left(1 - \frac{\Delta p_s'}{\Delta p_s} \right). \quad (8)$$

Hiernach hat man die Ablesung f' von 100 zu subtrahieren und mit dem ein für allemal zu bestimmenden Faktor $1 - \frac{\Delta p_s'}{\Delta p_s}$ zu multiplizieren. Je nachdem $\Delta p_s' < \Delta p_s$, fällt die Korrektur Δf negativ oder positiv aus. Sie ist um so größer, je kleiner die Feuchtigkeit f' , und beträgt maximal so viele Prozente, als in Prozenten $\Delta p_s'$ von Δp_s abweicht.

Die Frage, ob die *Höhe des Luftdruckes* (Barometerstand) einen Einfluß auf die Anzeige des Instrumentes ausübt, wurde seinerzeit (l.c.) offengelassen. Doch war schon aus theoretischen Gründen anzunehmen, daß dieser nur gering sein könne und in vielen Fällen nicht zu berücksichtigen sei. Inzwischen ausgeführte Messungen haben nun ergeben, daß Δp_s bei *Abnahme* des Luftdruckes um 10 mm Hg etwa 1% *zunimmt*. Der Einfluß ist also, wenn nicht außerordentliche Barometerschwankungen vorliegen, sehr gering. Bei starker Luftverdünnung nimmt dann allerdings Δp_s in steigendem Maße zu und wird bei völliger Luftleere schließlich den Betrag des Sättigungsdruckes p_s selber erreichen. Dies muß bei der Luftdruckabnahme in größeren Höhen über Meer dadurch berücksichtigt werden, daß man dem Instrument eine Tafel mit entsprechend flacheren Temperaturgeraden heigibt.

Für die kleinen Abweichungen, die durch die örtlichen Barometerschwankungen entstehen, die indessen auch nur bei Präzisionsmessungen in Frage kommen, läßt

sich die Korrektur leicht angeben. Da in diesem Bereich Δp_s linear mit der Änderung des Barometerdruckes zusammenhängt, kann geschrieben werden

$$\Delta p_s = \Delta p_{so}(1 - \mu \Delta b), \quad (9)$$

wo Δp_{so} den Diffusionsdruck bei Sättigung für irgendeinen gewählten Normalstand des Barometers b_0 (z. B. den mittleren örtlichen Barometerstand) und Δb die Änderung $b - b_0$ bedeutet. μ ist von der Größenordnung 10^{-3} Torr $^{-1}$. Bei dem Ausdruck (8) ist keine Voraussetzung über die Höhe des Luftdruckes gemacht. Er gelte für den beliebigen Barometerstand b . D. h. Δp_s wäre der Sättigungsdiffusionsdruck beim Luftdruck b . Setzen wir den Wert von Δp_s aus (9) in (8) ein, so erhalten wir als Korrektur

$$\Delta f = (100 - f') \left(1 - \frac{\Delta p_s'}{\Delta p_{so}(1 - \mu \Delta b)} \right). \quad (10)$$

$\Delta p_s'$ bedeutet also den auf der unkorrekten Tabelle aufgetragenen Sättigungswert (für irgendeine Temperatur), Δp_{so} den richtigen Sättigungswert, wie er für den Bezugsbarometerstand b_0 stimmt. $\frac{\Delta p_s'}{\Delta p_{so}}$ ist demnach eine Instrumentalkonstante. Wenn man sie mit λ bezeichnet, so schreibt sich für Δf

$$\Delta f = (100 - f') \left(1 - \frac{\lambda}{1 - \mu \Delta b} \right). \quad (11)$$

Die Korrektur ist offenbar null, wenn der Barometerdruck gerade die Bedingung erfüllt

$$\lambda = 1 - \mu \Delta b,$$

ließe sich also für den in Abb. 5 dargestellten Fall durch entsprechende Luftdruckerhöhung realisieren.

Die Meßgenauigkeit des Hygrometers hängt im übrigen von der Ablesegenauigkeit ab. Bei einer mittleren Temperatur von 20° und einem Ablesefehler von $\pm 0,5$ mm beträgt die Ungenauigkeit ca. $\pm 1\%$ relative Feuchtigkeit. Je niedriger die Temperatur, d. h. je steiler die Isothermen verlaufen, um so ungenauer das Resultat, so daß das Hygrometer bei niedrigen Temperaturen (unterhalb 5°), solange nicht noch empfindlichere Manometer zur Verfügung stehen, schließlich nicht mehr verwendbar ist. Hingegen nimmt mit steigenden Temperaturen, d. h. mit größer werdendem Δp_s die Genauigkeit noch zu. Das Betriebswasser muß dann allerdings wegen der stärkeren Verdampfung häufiger erneuert werden, während dies für gewöhnlich nur alle zwei bis drei Monate nötig ist. Auch muß, soll das Instrument für einen größeren Temperaturbereich verwendbar sein, die Frage abgeklärt sein, ob die Apparatkonstante k bzw. die Wirkung der porösen Platte temperaturunabhängig ist. Wie sich feststellen ließ, ist dies für die Ausführung nach Abb. 3 im Bereich von 20 bis 50° Grad der Fall. Ferner muß an die Ausdehnung der Manometerflüssigkeit mit der Temperatur gedacht werden. Da die Dichte abnimmt, werden bei gleichen Drucken die Ausschläge größer. Der Volumenausdehnungskoeffizient des verwendeten Paraffinöls wurde für mittlere Temperatur zu $0,75 \cdot 10^{-3}$ be-

stimmt. Dies ergibt für 10° Temperaturerhöhung eine Verlängerung der Manometersäule um $0,75\%$. Die Korrektur ist also, sofern es sich nicht um größere Drucke und Temperaturdifferenzen handelt, praktisch zu vernachlässigen.

Um allgemein zuverlässige Angaben zu erhalten, ist das Instrument vor der Bestrahlung durch die Sonne oder Heizkörper zu schützen. Auch wird man nicht während rascher Änderung der Temperatur oder des Luftdruckes (starke Windströmung) messen. Im übrigen bleibt die Anzeigegenauigkeit dauernd erhalten, sofern die poröse Platte nicht durch Fett oder Öl verdorben wird. Staubablagerung stört indessen kaum.

Weiterentwicklung

Zwecks Vereinfachung der Handhabung und Vermeidung der Zweiteiligkeit des Instrumentes wird man versuchen, die Ablesetabelle dem Hygrometer selbst einzuverleiben und, wenn möglich, eine direkte Ablesbarkeit der Feuchtigkeit herbeizuführen. Über ein Modell unter Verwendung eines Hg-Thermometers und eines Metallmanometers ist seinerzeit schon berichtet worden². Im folgenden soll das Prinzip angegeben werden, nach dem mit Hilfe eines Metallthermometers und eines Flüssigkeitsmanometers ein direktzeigendes Instrument hergestellt werden kann.

Es ist zu beachten, daß die Feuchtigkeit f sich aus den beiden Größen Δp und t ableitet. Es ist $f = \varphi(\Delta p, t)$. Tragen wir daher t als Abszisse und Δp als Ordinate auf (Abb. 6), so entspricht dem Punkt P eine ganz bestimmte

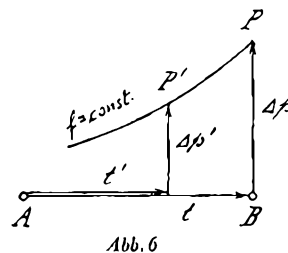


Abb. 6

Feuchtigkeit f . Trägt man nun alle einer bestimmten Feuchtigkeit f zugehörigen t - und Δp -Werte auf, so erhält man eine Punktfolge oder Kurve $f = \text{const.}$. Sinkt z. B. die Temperatur bei gleichbleibender Feuchtigkeit von t auf t' , so fällt Δp auf $\Delta p'$. Man kann nun von Prozent zu Prozent ansteigend alle Kurven gleicher Feuchtigkeit (die Isohygren zwischen 0 und 100% aufzeichnen und mit Hilfe dieser Kurvenschar die relative Feuchtigkeit finden. Zu diesem Zwecke hat man die Manometersäule ein für allemal an die Stelle B zu bringen und das Kurvenblatt mit dem Anfangspunkt A so weit seitlich zu verschieben, daß die Strecke AB der vorhandenen Temperatur entspricht. Jetzt hat man nachzusehen, auf welcher Isohygren der Punkt P (der Manometermeniskus!) liegt. Die seitliche Verschiebung des

² Schweiz. Techn. Z. 44, Nr. 13, 189 (1947).

Kurvenblattes braucht nicht von Hand vorgenommen zu werden. Sie erfolgt selbsttätig, wenn man das Kurvenblatt in passender Weise mit der Bewegung eines Metallthermometers koppelt. Natürlich kann ebensogut das Kurvenblatt fest stehen und das Manometer durch das Metallthermometer seitlich verschoben werden. Da die Metallthermometer nicht geradlinige, sondern drehende Bewegungen ausführen, wird die Anordnung zweckmäßigerweise zylindrisch ausgestaltet.

So handlich und für den allgemeinen Gebrauch geeignet auch die Diffusionshygrometer mit direkter Ablesung sind, so ist die Ablesegenauigkeit infolge der Breite des Manometermeniskus und der Schräge der Isohygren doch etwas beeinträchtigt. Auch sind Korrekturen bei unvollständiger Übereinstimmung der Kurvenschar schwer anzubringen. Wenn es auf genaue Messungen ankommt, dürfte daher das Instrument mit separater Tabelle vorzuziehen sein.