

**Universität Duisburg-Essen**  
**Fak. 5 , IVG**  
**Fachgebiet Thermodynamik**  
**Laborleiter: Dr. Siddiqi**

**4. Semester**

## **Thermodynamisches Grundlagenpraktikum**

### **Versuche zur Feuchtemessung**

## Versuche zur Feuchtemessung

### Einleitung

Unter „Feuchtigkeit“ oder „Feuchte“ versteht man die in einem mit Luft, Gas oder Dampf gefüllten Volumen gelöste Wasserdampfmenge. Dabei ist unter Wasserdampf präzise der gasförmige Zustand des Wassers zu verstehen, im Gegensatz zu dem meist im täglichen Sprachgebrauch genutzten Begriff „Dampf“, der im physikalischen Sinne nicht den gasförmigen Zustand des Wassers charakterisiert, sondern eine Ansammlung von unzähligen kleinen Wassertropfen (Aerosole), also in der Luft enthaltenes flüssiges Wasser, darstellt.

Der Wasserdampfgehalt der Luft - trockene Luft kommt in der freien Atmosphäre nicht vor - ist von großer Bedeutung in der Wissenschaft (Meteorologie; Reproduzierbarkeit feuchteabhängiger Messergebnisse etc.), spielt aber auch in vielen Industriezweigen eine große Rolle. So kann es z. B. bei der Papierlagerung bei einer relativen Feuchte von über 60 % zu einem Verziehen des Papiers kommen, kann eine zu hohe Luftfeuchte in der Filmindustrie zu einem Verkleben der Gelatineschichten führen. Hygroskopische Stoffe ziehen aus ihrer Umgebung Wasser an und können, wenn sie leicht lösbar sind, darin zerfließen oder verkleben (z. B. Salz, Zucker in der Lebensmittelindustrie). Stark hygroskopische Stoffe werden direkt zur Trocknung von Gasen benutzt. Umgekehrt sind manche Substanzen, z. B. einige Kristalle, empfindlich gegen zu große Trockenheit. Aber auch das Wohlbefinden des Menschen und damit seine Leistungsfähigkeit werden durch zu große oder zu geringe Luftfeuchte beeinträchtigt, können gar zu Krankheiten (Schnupfen - Austrocknen der Nasenschleimhäute) führen. Die thermodynamischen Grundlagen feuchter Luft als dem technisch wichtigsten Beispiel der Gas-Dampf-Gemische werden in der Vorlesung Thermodynamik I abgehandelt.

Ein Maß für den Wasserdampfgehalt der Luft ist die **absolute Feuchtigkeit**. Sie gibt an, wie viel kg Wasserdampf in der Volumeneinheit des Gasgemisches enthalten sind. Je nachdem, auf welche Zustandsgröße des Gases (trocken oder feucht) die Masse des Wasserdampfes bezogen ist, erhält man die folgenden Definitionen:

a) bezogen auf die Volumeneinheit des feuchten Gasgemisches

$$f' = \frac{m_w}{V'} \frac{\text{kg } H_2O}{m^3 \text{ feuchte Luft}} \quad (1a)$$

$m_w$  = Masse des Wasserdampfes

$V'$  = Volumen des feuchten Gasgemisches

(Beistrich bedeutet hier und im Folgenden „Gasgemisch feucht“)

$f'$  = Dichte des Wasserdampfes in der feuchten Luft

b) bezogen auf die Volumeneinheit des trockenen Gases

$$f = \frac{m_w}{V} \frac{\text{kg } H_2O}{m^3 \text{ trockene Luft}} \quad (1b)$$

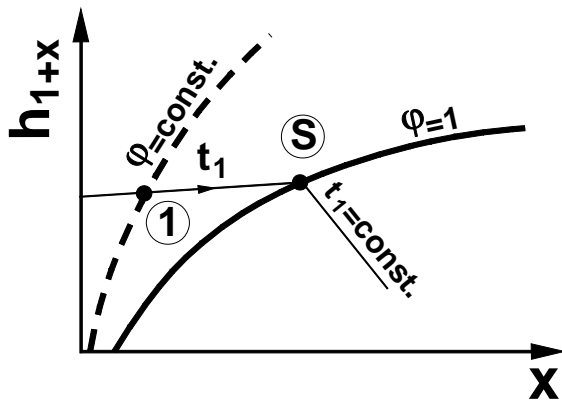
Diese beiden Feuchtemaße hängen über die Temperaturabhängigkeit des Volumens  $V$  bei vorgegebenem Luftdruck von der Temperatur ab. Bezieht man den Wasserdampfgehalt nicht auf die Volumeneinheit, sondern auf die Masse der trockenen Luft, so kommt man auf die temperaturunabhängige Größe **Wassergehalt**

$$x = \frac{m_w}{m_L} \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg trockene Luft}} \quad (2)$$

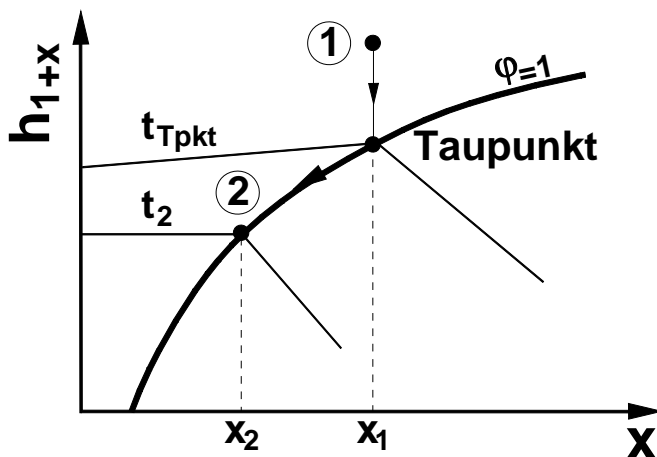
Trockene Luft kann bei einem bestimmten Zustand (Druck und Temperatur) Wasserdampf nur bis zu einer ganz bestimmten Menge aufnehmen. Die Aufnahmefähigkeit wächst mit steigender Temperatur. Ist bei einer bestimmten Temperatur die maximale Aufnahmefähigkeit erreicht, spricht man von „gesättigter Luft“.

Ein Maß für die Fähigkeit feuchter Luft eines bestimmten Zustandes  $(1)(p_1, T_1, x_1)$  weiteren Wasserdampf isotherm aufzunehmen, ist die relative Feuchtigkeit  $\varphi$ . Sie wird definiert als das Verhältnis der im Zustand (1) vorhandenen absoluten Feuchte  $f'$ , zu der bei der gleichen Temperatur  $t_1$  maximal möglichen Feuchte  $f'_s$ , also der absoluten Feuchte bei Sättigung:

$$\varphi = f'(t_1) / f'_s(t_1) \quad (3)$$

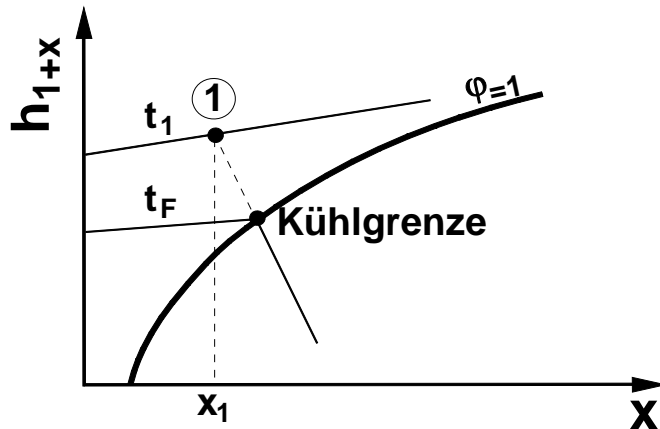


Eine weitere Möglichkeit, den Grad der Sättigung feuchter Luft zu beschreiben, besteht im Vergleich der tatsächlichen Lufttemperatur  $t_1$  und der so genannten Taupunkttemperatur  $t_{\text{Tpkt}}$ . Unter der Taupunkttemperatur versteht man die Temperatur, bei der erster Niederschlag ausfällt, wenn man Luft des Zustandes (1) bei konstantem Wassergehalt  $x_1$  abkühlt. Kühlt die Luft unter die Taupunkttemperatur auf  $t_2$  ab, magert die Luft an Wasserdampf ab. Die Masse des dabei ausfallenden Wassers ist  $m_w = m_L (x_1 - x_2)$ . Die Angabe der Taupunkttemperatur eignet sich besonders in der Klimatechnik sehr gut zur Kennzeichnung der Luftfeuchte, da die zugleich die Temperatur angibt, auf die man die Prüfraumtemperatur abkühlen kann, ohne dass die Sättigungslinie überschritten wird und Wasser kondensiert.



Die dritte Möglichkeit, den Zustand feuchter Luft bei einer bestimmten Temperatur  $t_1$  zu beschreiben, macht von der Kühlgrenztemperatur  $t_F$  Gebrauch. Die Kühlgrenze liegt im  $h, x$ -Diagramm auf dem Schnittpunkt der zum Zustandspunkt (1) der Luft verlängerten **Nebelisothermen** und der Linie  $\varphi = 1$ . Die Temperatur in diesem Punkt ist die Temperatur, die Wasser

von ursprünglich beliebiger Temperatur annimmt, wenn es mit ungesättigter Luft des Zustandes (1) in Kontakt gebracht wird.



Als Konzentrationsmaß für den Wasserdampf im Gasgemisch sind der Massenanteil  $\frac{m_w}{m}$ , der Molanteil  $\frac{n_w}{n}$  und insbesondere der Partialdruck  $p_D = \frac{n_w}{n} p$  gebräuchlich. Allgemein gilt für jedes Gas-Dampf-Gemisch  $p = p_G + p_D$ . Kann man auf ein spezielles Gas-Dampf-Gemisch das Gesetz für ideale Gase anwenden, so gilt

$$p_G = m_G R_G \frac{T}{V} \quad \text{und} \quad p_D = m_W R_W \frac{T}{V}, \quad (4)$$

das heißt, jede Komponente verhält sich so, als wäre sie allein im Volumen  $V$  (Dalton'sches Gesetz).  $R_G$  und  $R_W$  sind die spezifische Gaskonstante für Gas (Luft) und für Dampf (Wasser).

Der Partialdruck des Wasserdampfes bei Sättigung heißt  $p_{D_s}$ . Man kann zeigen, dass bei Gesamtdrücken  $p < 10$  bar der Sättigungspartialdruck  $p_{D_s}(t)$  in guter Näherung (besser als 1 %) durch den Dampfdruck  $p_{w_s}$  des reinen Wassers bei der Temperatur  $t$  ersetzt werden darf, der durch die so genannte Dampfdruckkurve als Temperaturfunktion gegeben ist (Tabelle 1). Der Wasserdampfdruck  $p_D$  in ungesättigter Luft ergibt sich mit dieser Überlegung aus  $p_D = p_{w_s}(t_{\text{pkt}})$ , da  $p_D = \frac{n_w}{n} p \neq f(t)$  bei der Abkühlung auf die Taupunktstemperatur konstant bleibt und im Taupunkt Sättigung herrscht.

Mit Gleichung (4) folgt für Gleichung (3)

$$\varphi = \frac{p_D}{p_{D_s}(t)} = \frac{p_{w_s}(t_{\text{pkt}})}{p_{w_s}(t)} \quad (5)$$

Die Differenz der beiden Drücke  $p_D$  und  $p_{D_s}$  wird als Sättigungsdefizit  $\Delta p$  bezeichnet.

## Versuch

Vergleichende Messungen der Feuchtigkeit in einer Feuchtekammer mit verschiedenen Messmethoden und Berechnung unterschiedlicher Feuchtegrößen. Es sind zwei verschiedene Klimata zu untersuchen.

### 1. Gegenstand des Versuches

Die bei der Versuchsdurchführung jeweils vorliegende Feuchtigkeit in einer Feuchtekammer soll mit verschiedenen Messgeräten gemessen werden. Dabei werden folgende Messgeräte, deren Wirkungsweise auf unterschiedlichen physikalischen Grundlagen beruht, mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt:

- Feuchte-Indikator
- Haarhygrometer als Polymer
- Assmannsches Aspirations-Psychrometer
- LiCl-Taupunkt-Messgerät
- Spiegeltaupunktmessgerät.

Durch geeignete Umrechnungen mittels Rechenscheibe, Tabellen und Diagrammen werden die verschiedenen Feuchtegrößen, wie sie in der Einleitung angegeben sind, nach den verschiedenen Messmethoden bestimmt und miteinander verglichen.

### 2. Physikalische Grundlagen

#### 2.1 Feuchte-Indikator

Bei dem Feuchte-Indikator handelt es sich um einen chemisch präparierten Papierstreifen, der ähnlich dem Lackmus-Papier für den pH-Wert bei einer Änderung der relativen Feuchte mit einem Farbumschlag reagiert. Mit zunehmender Feuchte werden die einzelnen Farbsegmente rosa, mit zunehmender Trockenheit blau. Dieser Vorgang kann sich unbegrenzt oft wiederholen, wobei der Feuchtwert in %-relative Feuchte auf einer aufgedruckten Skala abgelesen werden kann. Die beiden im Versuch benutzten Feuchtestreifen sind in Abb. 1 dargestellt.

Vorteile dieser Messstreifen sind in erster Linie im Preis und Platzbedarf zu sehen. Für

eine kontinuierliche Sichtkontrolle bei nur niedrigen Anforderungen an die Genauigkeit (5 - 10 %) können die Indikatoren selbst bei engen Raumverhältnissen eingesetzt werden (selbstklebende Grundauführung: 50 x 19 mm). Ihre Anwendung ist nicht möglich in ammoniakhaltiger Luft und beim Auftreten flüssigen Wassers an ihrer Oberfläche.

### Feuchtigkeit in % Ablesung im Grenzfeld rosa-blau

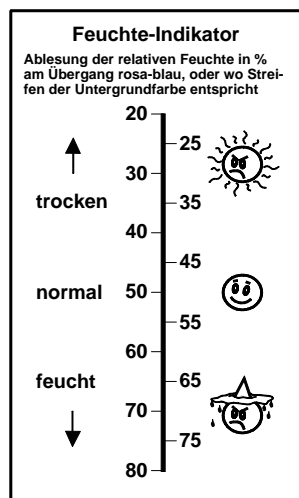
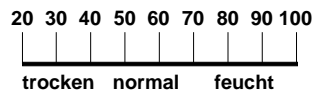


Abb. 1 Zwei Typen von Feuchte-Indikatoren mittels Farbumschlag

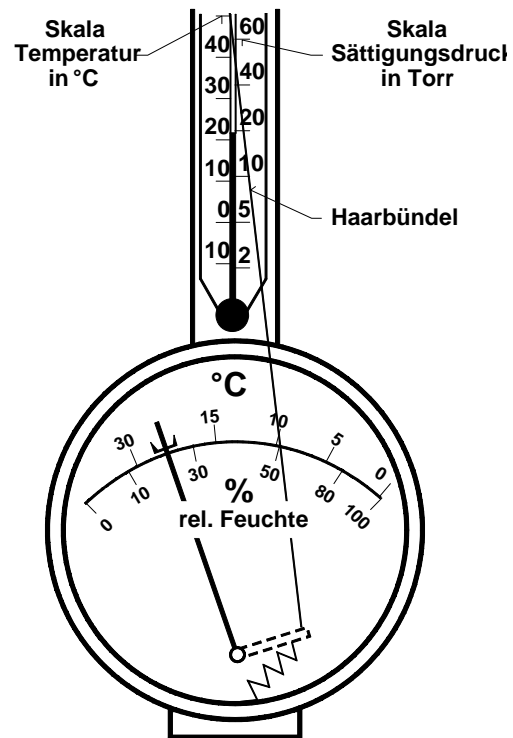


Abb. 2 Haarhygrometer in Polymerform

## 2.2 Haar-Polymer

Mit dem Haar-Polymer wird der einfachste und preiswerteste Vertreter der hygrometrischen Messgeräte vorgestellt. Bei den hygrometrischen Verfahren werden physikalische Stoffeigenschaften, die feuchtigkeitsabhängig sind, für die Messung ausgenutzt. Dies kann über mechanische (Längung + Verdrehung) und elektrische Eigenschaften (Oberflächenwiderstand, Leitfähigkeit, Kapazität) gehen, aber auch über die Wärmetönung, Diffusion, Infrarot-Absorption und die Elektrolyse.

Bei der Ausstattung mechanischer Stoffeigenschaften sind für die praktische Durchführung der Messung feste Materialien besonders geeignet, die ihre Länge mit der Feuchte ändern, da sich eine solche Längenänderung in einfacher Weise in eine Zeigeranzeige umwandeln lässt. Von dem Messelement wird verlangt, dass es die Feuchtegröße eindeutig,

reproduzierbar, mit geringer Anzeigeverzögerung und möglichst unabhängig von sonstigen Einflüssen, wie z. B. Temperatur, wiedergibt. Ein Gerät, das innerhalb gewisser Grenzen, auf die wir später noch genau eingehen, diesen Forderungen entspricht und deshalb große Verbreitung in der Messtechnik gefunden hat, ist das Haarhygrometer, das wir bei unseren Messungen in der Form des Polymeters benutzen (Abb. 2). Als Messelemente dienen entfettete und in besonderer Weise präparierte Haare. Ihre Längenänderung wird über eine Hebelanordnung auf ein Zeigerwerk übertragen. Die Anzeige ist bei einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Haare von  $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Grad}^{-1}$  nur wenig temperaturabhängig. Diese Temperaturunabhängigkeit ist neben der einfachen Bauweise und den damit verbundenen niedrigen Kosten der Hauptvorteil dieses Messgerätes. Oberhalb von  $50 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  leiden die Haare unter der zu großen Erwärmung.

Als Nachteile der Methode sind aufzuführen:

- Anzeigegenauigkeit nur ca. 3 - 5 % in der relativen Feuchte mit einem zusätzlichen Hystereseeffekt von 8 %.
- Begrenzte Anwendbarkeit nur im Bereich von 30 - 90 % relative Feuchte, wobei die Umgebungstemperaturen zum einem  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  nicht übersteigen darf, zum anderen die Anzeigetragheit bei niederen Temperaturen unter  $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sehr groß wird (normale Anzeigetragheit: ca. 2 - 5 Min.)
- Um Fehlmessungen zu vermeiden, muss das Haar jeweils im zweiwöchigen Turnus "regeneriert" werden, indem das Gerät etwa 1/2 Stunde lang in gesättigter Atmosphäre betrieben wird.

Das Haarhygrometer liegt uns zur Feuchtemessung in der Form eines Polymeters vor. Dabei ist es mit einem zusätzlichen Thermometer versehen, das neben der **Umgebungstemperatur** auch den **Sättigungsdruck** in Torr bei dieser Temperatur angibt. Direkt ablesbar sind weiterhin:

- die **relative Feuchte** auf der unteren Skala des runden Skalenblattes
- die Differenz  $\Delta t$  zwischen Raumtemperatur  $t_u$  und Taupunkttemperatur  $t_{\text{Tpkt}}$  auf der oberen Skala des runden Skalenblattes, wobei die linke Spitze des "Dreizackes" bei  $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur, die mittlere Spitze bei  $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und die rechte Spitze bei  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  maßgebend sind (bei anderen Temperaturen müssen die Werte entsprechend abgeschätzt werden)



- der Wasserdampf­­sättigungsdruck in Torr auf der rechten Seite des Thermometers neben der Raumtemperatur.

Daraus ergeben sich unmittelbar.

- die Taupunkttemperatur  $t_{\text{Tpkt}} = t_u - \Delta t$
- der Wasserdampf­­partialdruck  $p_D = \varphi \cdot p_{D_s}$  (Gleichung (5))
- die absolute Feuchte  $\approx$  Wasserdampf­­partialdruck / Torr. Dies ist eine grobe Vereinfachung für den Bereich von  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+45 \text{ }^\circ\text{C}$  (Siehe Abb. 3). Genauere Werte müssen aus Tabellen (Tab. 1) oder Diagrammen (Abb. 4 a und 4 b) entnommen werden.

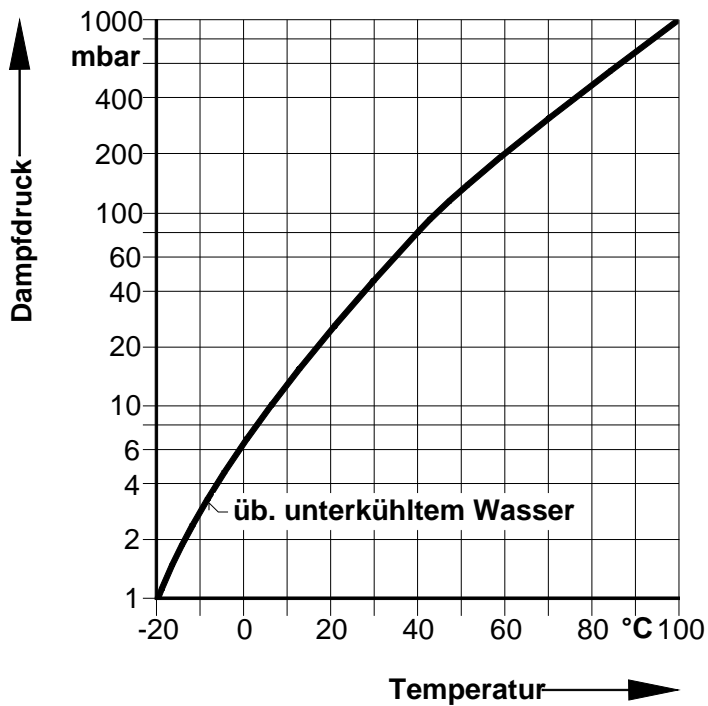


Abb. 3 Dampfdruckkurve des Wassers

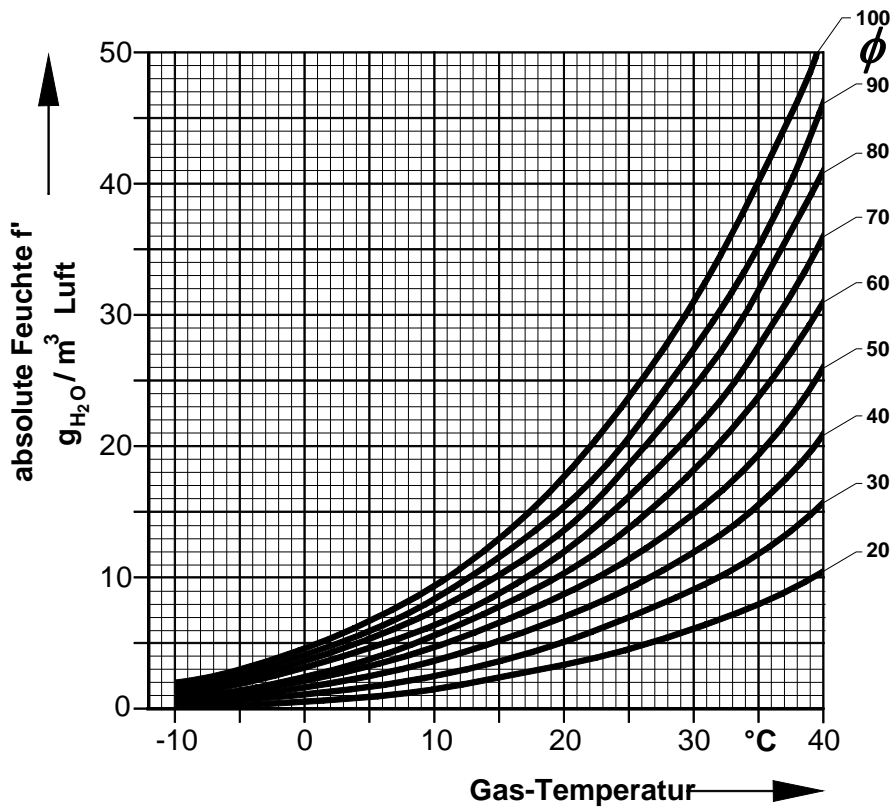
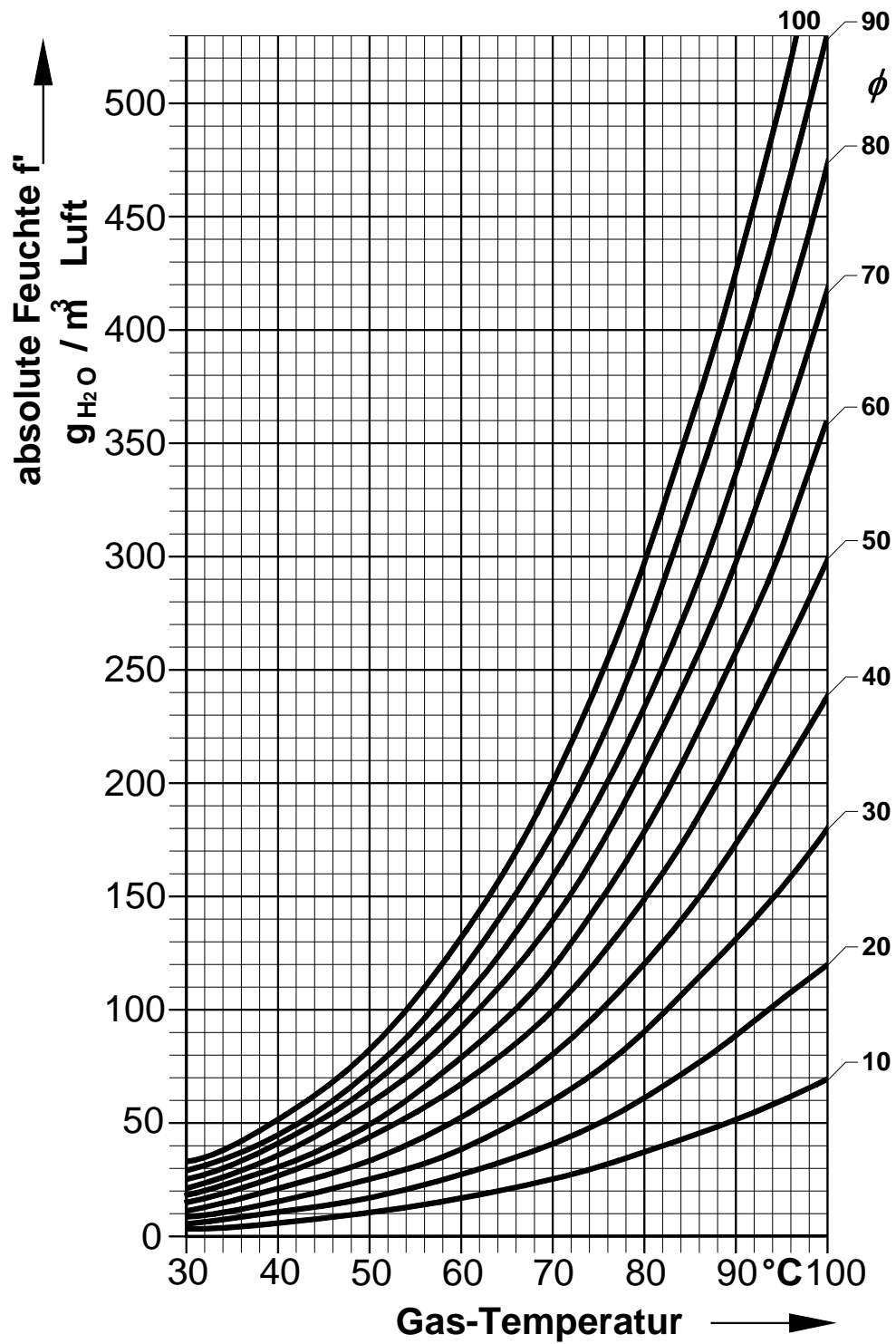


Abb. 4a Abhängigkeit von relativer, absoluter Feuchte un Temperatur im Bereich von -10  $^\circ\text{C}$  bis +40  $^\circ\text{C}$

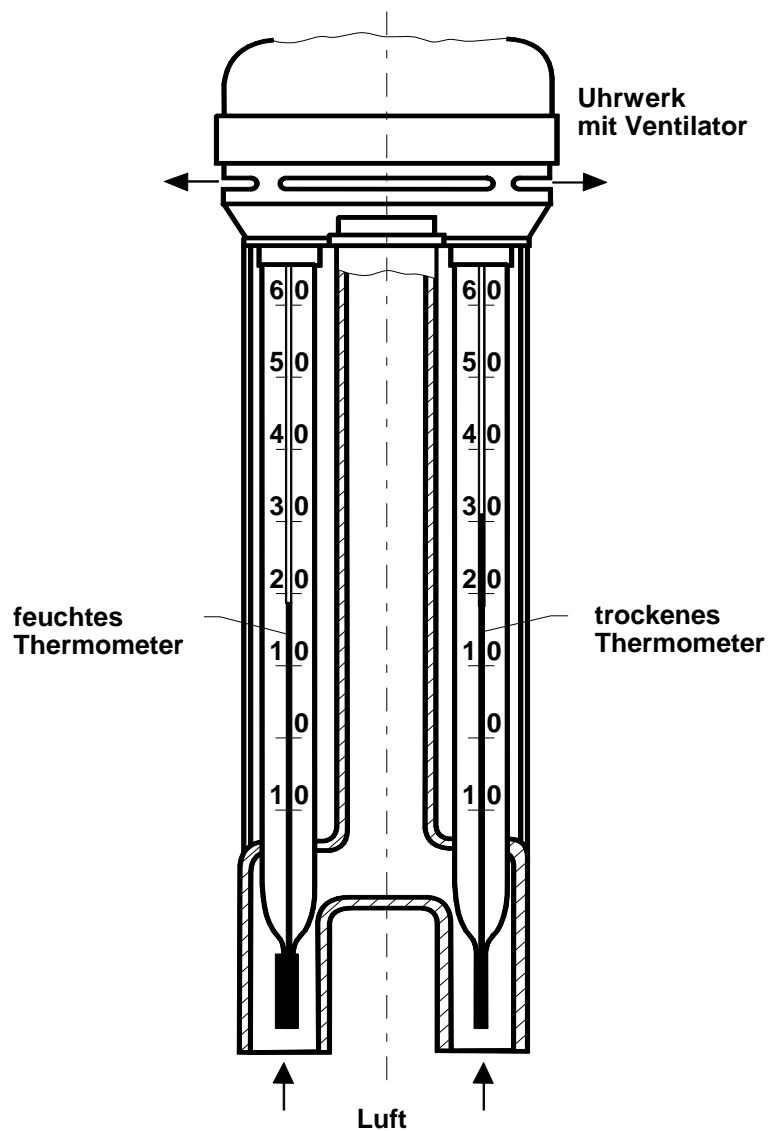


**Abb. 4b** Abhängigkeit von relativer, absolute Feuchtigkeit und Temperatur im Bereich von 30 - 100 °

### 2.3 Aspiration-Psychrometer nach Assmann

Das psychrometrische Messverfahren, auch “Trocken- und Feuchtthermometerverfahren” genannt, nutzt den Abkühlungseffekt aus, der beim Vorbeistreichen eines nicht wasserdampfgesättigten Gasstromes durch Verdunstung an einem befeuchteten Thermometer auftritt. Bei dem Vorgang handelt es sich also um einen kombinierten Wärme- und Stoffaustausch.

In Abb. 5 ist der prinzipielle Aufbau eines Aspiration-Psychrometers skizziert. Es besteht grundsätzlich aus zwei Thermometern. Die Kugel des einen Thermometers ist von einem mit Wasser angefeuchteten Strümpfchen umgeben und in dem zu messenden Gasstrom angeordnet. Das Messgas habe bei dem Eintritt in die Messvorrichtung den Wasserdampfpartialdruck  $p_D$  und die Temperatur  $t_u$ , welche mit Hilfe des trockenen Thermometers gemessen wird. Ist  $p_D$  kleiner als der Sättigungsdruck  $p_S$  bei dieser herrschenden Gastemperatur, verdampft Wasser aus dem Strumpf und sättigt den vorbeigehenden Gasstrom. Die zum Verdampfen des Wassers erforderliche Energie wird aus der inneren Energie des Gases, der Thermometerkugel und des befeuchteten Strumpfes gedeckt. Hierdurch sinkt die Temperatur des feuchten Thermometers unter diejenige des Gases bis auf einen charakteristischen Wert, die Kühlgrenztemperatur  $t_F$ . Dieser hängt vom Sättigungsdefizit des Gases ab. Nach dem Erreichen der Gleichgewichtstemperatur wird die zum fortlaufenden Verdampfen des Wassers nötige Wärmeenergie nur noch dem Gasstrom entzogen.



**Abb. 5** Prinzip-Aufbauskiuze eines Aspirations- Psychrometers nach Assmann

Wir setzen die Wärmemenge, die dem Gas durch Abkühlung entzogen wird, gleich der Wärmemenge, die zum Verdampfen nötig ist und erhalten für den Wasserdampfpartialdruck  $p_D$ :

$$p_D = p_F - \frac{p \cdot c_p \cdot \Delta t}{R^* \cdot h_v} \quad (6)$$

mit:  $p$  = Barometerdruck

$\Delta t$  =  $t_u - t_F$  psychrometrische Temperaturdifferenz

$t_u$  = Temperatur der umgebenden Messluft

$p_F$  = Wasserdampf-sättigungsdruck bei  $t_F$

$c_p$  = spez. isobare Wärmekapazität des Gases

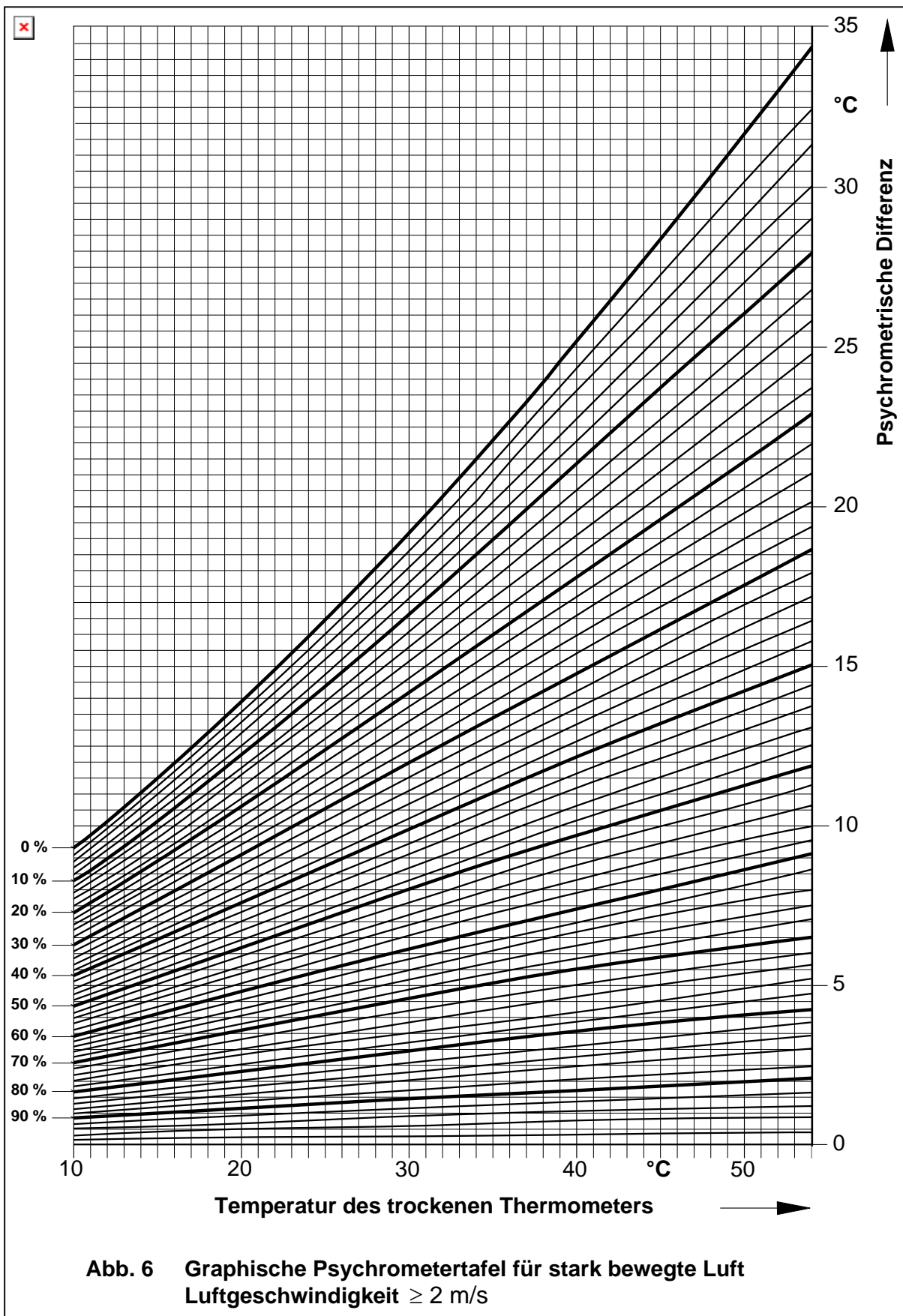
$R^*$  =  $R_L/R_W$

$h_v$  = spez. Verdampfungsenthalpie des Wassers

Für technische Messungen benutzt man meist die (in Anlehnung an die empirische Näherungsformel  $p_D = p_F - p \cdot A \cdot \Delta t$  mit  $A$  = Psychrometerkonstante) von SPRUNG (1888) für Messungen in Luft angegebene Formel, die sich bei Einsetzen der Stoffwerte aus den vorstehenden Gleichungen ergibt:

$$p_D = p_F - \frac{0,5}{1^\circ\text{C}} \cdot \frac{p}{755} \Delta t \quad , \quad (7)$$

wobei die Konstante 0,5 sich auf das Assmannsche Aspirationspsychrometer bei einer Luftgeschwindigkeit  $> 2,0$  m/s bezieht. Bei der praktischen Auswertung wird meist auf Tabellen, graphische Darstellungen oder Sonderrechenschieber bzw. -scheiben zurückgegriffen. So kann mittels Tabelle 1 anhand des Wasserdampfpartialdruckes die absolute Feuchte bestimmt werden, oder man erhält die relative Feuchte direkt aus der psychrometrischen Temperaturdifferenz ( $\Delta t$ ) mittels Abb. 6 (“Graphische Psychrometertafel”) bzw. mit Hilfe der Feuchte-Rechenscheibe. Am genauesten gibt die vom Hersteller mitgelieferte Psychrometertafel das Ergebnis an, da sie die Psychrometerkonstante, die von der jeweiligen Konstruktion, der Windgeschwindigkeit und der Gasart abhängt, sehr exakt mit berücksichtigt.



Das Aspirationspsychrometer stammt aus der Meteorologie, wo es auch heute noch wegen seiner großen Beweglichkeit schwerpunktmäßig eingesetzt wird. Die Genauigkeit in der Feuchtemessung wird begrenzt durch die Genauigkeit der Temperaturablesung auf den Thermometern. Bei den zu unserem Versuch zur Verfügung stehenden geeichten Präzisionsthermometern erreichen wir eine Genauigkeit in der psychrometrischen Temperaturdifferenz besser als 0,2 K; das entspricht bei einer Raumtemperatur von 25 °C einer Genauigkeit in der Feuchtemessung von 1 % relativer Feuchte. Zur genauen Messung müssen die Nebeneffekte, die auf den psychrometrischen Effekt Einfluss haben, betrachtet werden. In erster Linie ist hier eine definierte Windgeschwindigkeit zu nennen, da von ihrer richtigen Größe die einwandfreie Sättigung des Gases in starkem Maße abhängt.

Wie durch zahlreiche Versuche festgestellt wurde, liefern Geschwindigkeiten über 2 m/s brauchbare Werte. Auch für niedrigere Geschwindigkeiten sind Eichungen möglich, dann ist jedoch bei Geschwindigkeitsschwankungen mit größeren Messfehlern zu rechnen. Es ist auf jeden Fall günstig, durch eine künstliche Ventilation für die notwendige Gasgeschwindigkeit zu sorgen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Ventilator die Temperatur des Gases vor der Messung nicht erhöht, das Gas also möglichst vom Psychrometer abzusaugen ist.

Neben der notwendigen Mindestgasgeschwindigkeit von 2 m/s ist der Einsatz des Psychrometers weiterhin beschränkt durch die notwendige, während der Messung gleichbleibende Befeuchtung des Feuchtthermometerstrümpfchens und der extremen Empfindlichkeit gegen Luftverunreinigungen, die den Dampfdruck des Wassers herabsetzen können und somit den psychrometrischen Effekt beeinträchtigen. Aus diesen Gründen sind kontinuierliche Messungen mit dem Gerät nur sehr schwer möglich. Es gibt zwar Dauerbefeuchter für den Thermometerstrumpf, wegen der Dreckeffekte muss das Strümpfchen jedoch regelmäßig in kurzen Abständen ausgewechselt und gereinigt werden.

Eine Betrachtung der Psychrometerformel (6) oder (7) zeigt, dass sich bei niedrigen Temperaturen und Wassergehalten schon geringe Fehler in der Temperaturbestimmung wegen der Differenzbildung fast gleicher Größen zu sehr erheblichen Messfehlern auswachsen können. Hier liegt die natürliche Grenze für die Anwendung von Psychrometern. Eine obere Grenze tritt dort auf, wo die Kühlgrenztemperatur über der Siedetemperatur des Wassers liegt, weil dann Wasser nicht mehr in flüssigem Aggregatzustand existiert.

Die relative Feuchte  $\varphi$  lässt sich in einem h-x-Diagramm (Abb. 7) bequem im Schnittpunkt der Kühlgrenznebelisothermen mit der Raumtemperatur ablesen.



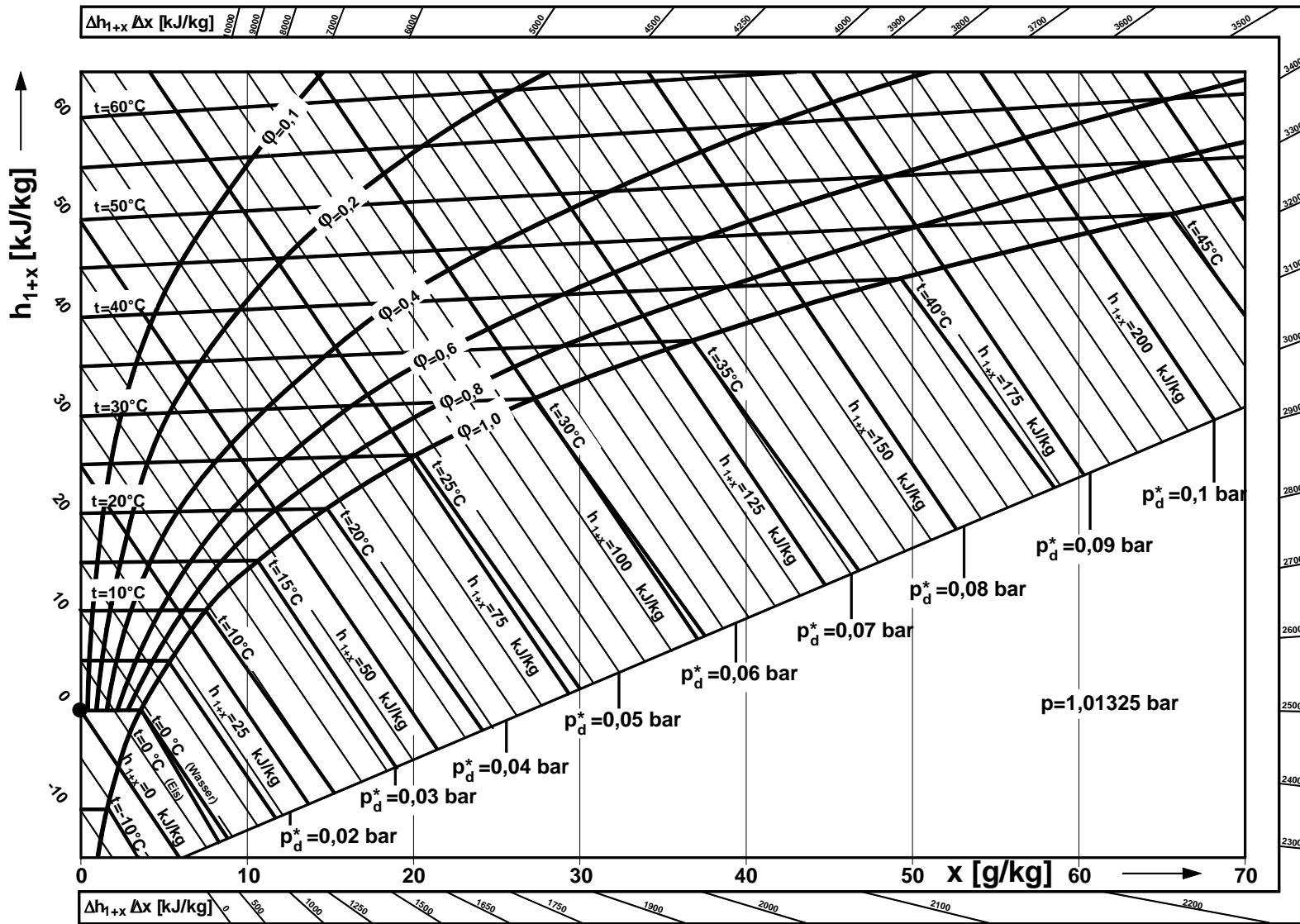
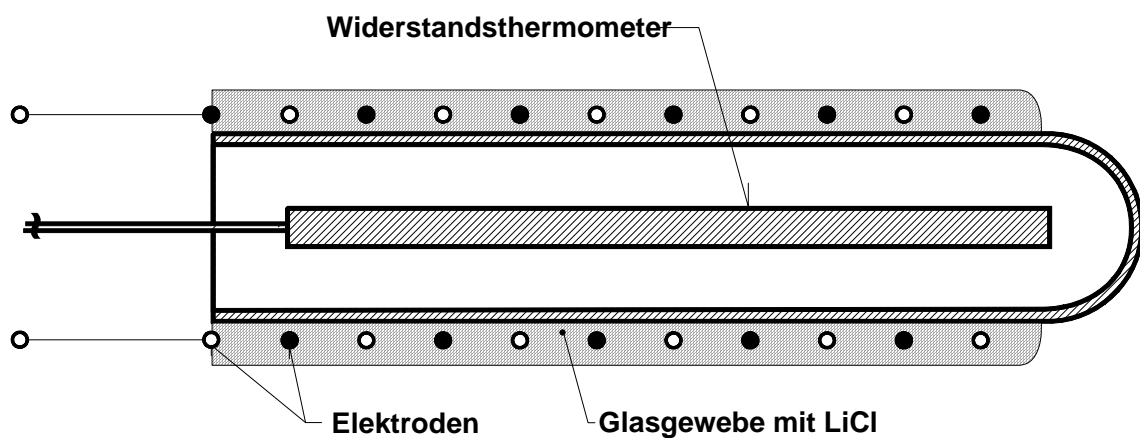


Abb. 7 Mollier-h,x-Diagramm für feuchte Luft

## 2.4 LiCl-Taupunkt Messgerät

Bei dieser Methode der Feuchtigkeitsmessung - speziell der Feuchtegröße "Taupunkt" - wird die hygroskopische Eigenschaft des LiCl, aus der Umgebung Luftfeuchtigkeit an sich zu binden, ausgenutzt zusammen mit der sehr starken Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der LiCl-Lösung von ihrem Wassergehalt.

Den prinzipiellen Aufbau einer LiCl-Taupunktzelle zeigt Abb. 8. Ein dünnes Metallrohr ist mit einer korrosions- und temperaturbeständigen Isolierschicht umgeben. Darüber befindet sich eine Glasseidenumspinnung, die mit einer LiCl-Lösung getränkt ist. Die Umspinnung wird durch Isolierstücke festgeklemmt, die gleichzeitig die beiden Stromzufuhrdrähte aus einem Edelmetall, welche in Form einer doppelgängigen Schraubenlinie über die Glasseide gewickelt sind, halten. Im Innern des Rohres ist ein in gutem Wärmekontakt mit ihm stehendes Thermometer angebracht. Dies kann ein Hg-Thermometer zur direkten Ablesung oder ein Widerstandsthermometer zur indirekten Ablesung über ein Anzeigergerät sein.



**Abb. 8** Ausführungsprinzip einer LiCl-Taupunktzelle

Legt man die Edelmetalldrähte der ausgeheizten Sonde (geringer Wasseranteil in der LiCl-Lösung) an eine Wechselspannung an, so fließt zunächst nur ein geringer Strom, der über den elektrischen Widerstand dem Wasseranteil der LiCl-Lösung proportional ist. Im Laufe der Zeit steigt durch die hygroskopische Wirkung des LiCl der Wasseranteil langsam an, was zu einer Verringerung des elektrischen Widerstandes und zu einem Anwachsen des fließenden Stromes

führt. Die dabei vermehrt freiwerdende Joulesche Wärme führt durch die Ausdampfung des Wassers zu einem immer stärker werdenden, der Hygroskopie gegenläufigen Effekt, einem Massenstrom von Wasser aus der LiCl-Lösung an die Umgebung. Hat sich nun die Sonde so weit aufgeheizt, dass der Massenstrom des ausdampfenden Wassers größer ist als der Diffusionsstrom, der aus der hygroskopischen Wirkung des LiCl resultiert, dann nimmt der Wasseranteil in der Lösung wieder ab, der Widerstand steigt und die elektrische Stromstärke sinkt. Die Sonde kühlt sich dabei soweit ab, bis sich die Verhältnisse der Massenströme gerade wieder umkehren, wenn also der hygroskopische Massenstrom gerade wieder größer ist als der ausdampfende Wasserstrom.

Die Apparatur regelt sich so auf einen Gleichgewichtszustand ein, bei dem sich die Temperatur und der Wassergehalt der LiCl-Lösung so einstellt, dass der Massenstrom des verdampfenden Wassers gleich dem Diffusionsstrom infolge der hygroskopischen Wirkung der LiCl-Lösung ist. In diesem Gleichgewichtszustand ist der Wasserdampfdruck über der LiCl-Lösung gleich dem zu bestimmenden Partialdruck des Wassers in der umgebenden Luft.

*Ein Anfahren des Messvorganges mit einer gesättigten Sonde (hoher Wasseranteil) würde durch den geringen elektrischen Widerstand der Lösung zu einer Beschädigung der Sonde durch Überhitzen führen.*

Durch das im Inneren des Fühlers angeordnete Thermometer kann die Temperatur der LiCl-Schicht bestimmt werden und mit ihr aus der Wasserdampfdruckkurve der gesättigten LiCl-Lösung der zu dieser Temperatur gehörige Wasserdampfdruck, der ja wegen der Bedingung des stofflichen Gleichgewichtes gleich dem Wasserdampfdruck der umgebenden Luft bei der herrschenden Raumtemperatur ist. Weiterhin ist er gleich dem Sättigungsdruck bei der Taupunkttemperatur, womit unter Zuhilfenahme der Dampfdruckkurve der Zusammenhang zwischen Fühlertemperatur und Taupunkttemperatur hergestellt ist. Das Anzeigergerät kann also direkt so geeicht werden, dass es die Taupunkttemperatur anzeigt, die sich, wie bereits in der Einleitung erwähnt, besonders zur Feuchtecharakterisierung eignet. Außerdem kann man über die Dampfdruckkurve (Abb 3) die relative Feuchte bestimmen.

Die großen Vorteile dieses Verfahrens der Feuchtemessung liegen in ihrem großen Einsatzbereich (extrem hohe und niedrige Temperaturen  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und in der Unempfindlichkeit des Fühlers gegen Verschmutzungen oder elektrolytisch reagierende Verunreinigungen (durch die starken hygroskopischen Eigenschaften des LiCl sind diese Verunreinigungen bei der Gleichgewichtstemperatur bereits trocken und tragen somit nicht zur elektrischen

Leitfähigkeit bei). Aus diesem Grunde ist die Messmethode sehr gut für kontinuierliche Messungen und automatische Überwachungsanlagen geeignet, wo auch in der Praxis ihr Haupteinsatzgebiet liegt. Die Messunsicherheit beträgt im Allgemeinen  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  Taupunkttemperatur, so dass sich für die relative Feuchte an den Bereichsgrenzen ein Fehler von ca. 3 % relative Feuchte ergeben kann. Als nachteilig ist die lange Einstellzeit des Gerätes zu nennen, die in der Größenordnung von 1 min je  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  Taupunkttemperatur liegt.

## 2.5 Das "Spiegeltaupunktmessgerät"

Mit dieser Messmethode lässt sich der Taupunkt der zu messenden Luft direkt bestimmen. Diese wird dabei auf die blanke Fläche eines Stabes geblasen, der auf die Temperatur gekühlt wird, bei der sich gerade Niederschlag bildet. Die Regelung der "Spiegel"-Temperatur geschieht durch mehr oder weniger tiefes Eintauchen des Stabes in ein Eiswasserbad. Mit der ermittelten Taupunkttemperatur lässt sich die relative Feuchte mit Hilfe eines h-x-Diagrammes oder einer Rechenscheibe ermitteln.

## 3. Versuchsdurchführung

Ziel des Versuches ist die Messung der Feuchtigkeit in einer Feuchtekammer mit Hilfe der in Kapitel 2 vorgestellten Messmethoden. Die Versuchsergebnisse sind in die beigegeführten Versuchsprotokolle aufzunehmen. Ein Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden lässt die Vor- und Nachteile, wie sie in Kapitel 2 angegeben sind, erkennen.

Die Versuchsgaräte sind in einer Kammer untergebracht. Die folgenden elf Punkte der Versuchsdurchführung werden insgesamt zweimal durchgegangen. Das heißt, dass der Versuch unter zwei Bedingungen durchgeführt wird (2 Versuchsprotokolle). Der erste Versuch wird unter Umgebungsbedingung durchgeführt (mit offenem Fenster) und die Werte werden in Protokoll 1 eingetragen. Der zweite Versuch wird unter geänderter Luftfeuchte durchgeführt und die Werte werden in Protokoll 2 eingetragen.

Bevor der zweite Durchgang vorgenommen wird, ist folgendes zu beachten:

- a) Vorsichtiges Schließen des Fensters.

- b) Einschalten des Luftbefeuchters: dazu werden die drei Kippschalter an der rechten Seite des Luftbefeuchters betätigt. (Den Thermostat nicht verstellen!)
- c) Warten, bis der Luftbefeuchter sich selbsttätig ausschaltet (ca. 10 Min). Dann Ausschalten des Luftbefeuchters mittels der drei Schalter an der rechten Seite des Gerätes. (Während der Wartezeit kann die Auswertung des ersten Versuchsprotokolls vorgenommen werden.)
- d) Ca. 30 Minuten warten bevor Sie mit dem zweiten Versuch beginnen.

Der Versuch soll in den folgenden Schritten durchgeführt werden:

1. Überprüfen, ob an dem “Dew-Point”-Messgerät (LiCl-Taupunktmessgerät) der Schalter auf Stellung “Standby” oder “Dew-Point” steht. Normalerweise wird das Gerät vorher eingeschaltet. Falls nicht, sofort den Betreuer informieren! (Es wird dann eine zusätzliche halbstündige Aufheizung der Sonde nötig.)
2. Schalter steht auf Stellung “Dew-Point”: Notieren Sie die momentane Uhrzeit als “Mess-Einschalt-Zeit”  $\tau_e$  unter 4. ins Protokoll aufnehmen. Ab jetzt werden bis zur Ablesung des Taupunktes ca. 30 Minuten Einstellzeit benötigt.
3. An den beiden am Arbeitsplatz hängenden **Farbumschlagindikatoren** die relative Feuchte entsprechend der aufgedruckten Anweisung ablesen und unter Punkt 1 ins Protokoll eintragen.
4. Von dem Haarpolymeter, das über dem Arbeitsplatz hängt, entsprechend den im Kapitel 2.2 angegebenen Vorschriften
  - die relative Feuchte in %
  - die Raumtemperatur in  $^{\circ}\text{C}$
  - die Taupunkttemperatur in  $^{\circ}\text{C}$
  - den Sättigungsdruck in Torr auf der rechten Seite des Thermometers neben dem Raumtemperaturwert
  - der Wasserdampfpartialdruck in Torr
  - die absolute Feuchte in  $\text{g}/\text{m}^3$

ablesen bzw. ermitteln und in das Protokoll unter Punkt 2 eintragen.

5. Vorbereitung der Psychrometermessung

Das mit dem "Strumpf" versehene Thermometer (grünes Band) muss benässt werden. Dazu wird mit einer kleinen Patrone mit Gummiballon Wasser aus dem bereitgestellten Glas von unten in das Röhrchen mit dem feuchten Thermometer gedrückt.

6. Psychrometermessung

Nach Befeuchten des "Strumpfes" wird der Ventilator mit Hilfe des Schlüssels ganz aufgezogen und das Psychrometer an der Messstelle aufgehängt. Während der Ablaufzeit des Ventilators (3 bis 4 Minuten) werden beide Thermometer beobachtet, ob sie einen konstanten Endwert - vor allem das feuchte Thermometer - erreichen. Diese Werte werden unter 3. ins Protokoll eingetragen. Wird während der Ablaufzeit kein konstanter Wert erreicht, muss der Ventilator nochmals aufgezogen werden. Bei der Ablesung ist darauf zu achten, dass die Temperaturwerte durch den Atem nicht verfälscht werden.

7. Den Barometerdruck  $p$  dem im Labor aufgehängten Quecksilberbarometer entnehmen.

8. Die relative Feuchte aus Abb. 6 bestimmen, den Wasserdampfpartialdruck an Gleichung 7 berechnen ( $p_F$  aus Tabelle 1) und die Werte eintragen. Mit  $p_D$  und  $p_{D_s}$  kann die relative Feuchte nach Gleichung 5 bestimmt werden und aus Abb. 4 die absolute Feuchte und die Taupunkttemperatur entnommen werden. Das Sättigungsdefizit ist wieder entsprechend der Definition in der Einleitung des Versuchs zu berechnen.

9. Vor dem Ablesen der Taupunkttemperatur am **LiCl-Taupunktmessgerät** ist die Uhrzeit unter 3. ins Protokoll einzutragen. Beträgt die Zeitdifferenz mehr als 30 Minuten, kann die Ablesung der Temperatur  $T_{Tpkt}$  erfolgen.

10. Mit der Feuchte-Rechenscheibe können aus der Raumtemperatur und der Taupunkttemperatur berechnet werden: die relative Feuchte und die absolute Feuchte in  $\text{g/m}^3$ . Mit

dem Sättigungsdruck aus Tabelle 1 und dem abgelesenen Wasserdampfpartialdruck kann das Sättigungsdefizit berechnet werden.

Statt mit der Rechenscheibe können die obigen gerichteten Größen aber auch mit Bildern und Gleichungen der vorliegenden Versuchsanleitung ausgewertet werden.

11. Am "Spiegeltau punktmessgerät" wird die Luftpumpe in Betrieb genommen. Dann wird mit der Spindel die Eintauchtiefe des Spiegelstabes in das Eiswasser so eingestellt, dass der Spiegel gerade beschlägt. Die dabei herrschende Spiegeltemperatur  $T_{\text{Tpkt}}$  wird am Thermometer abgelesen. Die relative Feuchte ist dann aus Abbildung 7 abzulesen. Zur Kontrolle kann die relative Feuchte über Gleichung 5 nachgerechnet werden.

**Tabelle 1 Sättigungsdruck des Wasserdampfes ( $p_s$ ), Wassergehalt gesättigter Luft ( $x_s$ ) und die absolute Feuchte gesättigter Luft, bezogen auf den feuchten Messzustand ( $f_s'$ ) in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich 0 bis 30 °C.**

<b>t</b>	<b>p<sub>s</sub></b>		<b>x<sub>s</sub></b>	<b>f<sub>s</sub>'</b>
<b>°C</b>	<b>mbar</b>	<b>Torr</b>	<b>g/kg trocken</b>	<b>g/m<sup>3</sup> feucht</b>
0	6,11	4,58	3,78	4,84
1	6,5	4,9	4,07	5,2
2	7,1	5,3	4,37	5,6
3	7,6	5,7	4,70	6,0
4	8,1	6,1	5,03	6,4
5	8,7	6,5	5,40	6,8
6	9,3	7,0	5,79	7,3
7	10,0	7,5	6,21	7,8
8	10,7	8,0	6,65	8,3
9	11,5	8,6	7,13	8,8
10	12,3	9,2	7,63	9,4
11	13,1	9,8	8,15	10,0
12	14,0	10,5	8,75	10,7
13	14,9	11,2	9,35	11,4
14	16,0	12,0	9,97	12,1
15	17,1	12,8	10,6	12,8
16	18,1	13,6	11,4	13,6
17	19,3	14,5	12,1	14,5
18	20,6	15,5	12,9	15,4
19	22,0	16,5	13,8	16,3
20	23,4	17,5	14,7	17,3
21	24,9	18,7	15,6	18,3
22	26,4	19,8	16,6	19,4
23	28,1	21,1	17,7	20,6
24	29,9	22,4	18,8	21,8
25	31,7	23,8	20,0	23,0
26	33,6	25,2	21,4	24,4
27	35,6	26,7	22,6	25,8
28	37,7	28,3	24,0	27,2
29	40,0	30,0	25,6	28,7
30	42,4	31,8	27,2	30,3

Tabelle 1 (Fortsetzung)

**Sättigungsdruck des Wasserdampfes (p<sub>s</sub>), Wassergehalt gesättigter Luft (x<sub>s</sub>) und die absolute Feuchte gesättigter Luft, bezogen auf den feuchten Messzustand (f<sub>s</sub>') in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich 31 bis 70 °C.**



t	p <sub>s</sub>		x <sub>s</sub>	f <sub>s</sub> '	
	°C	mbar			Torr
31		44,9	33,7	28,8	32
32		47,6	35,7	30,6	34
33		50,3	37,7	32,5	35
34		53,2	39,9	34,4	37
35		56,3	42,2	36,6	39
36		59,5	44,6	38,8	41
37		62,8	47,1	41,1	44
38		66,3	49,7	43,5	46
39		69,9	52,4	46,0	48
40		73,7	55,3	48,8	51
41		77,7	58,3	51,7	53
42		82,0	61,5	54,8	56
43		86,4	64,8	58,0	59
44		91,0	68,3	61,3	62
45		95,0	71,9	65,0	65
46		100,9	75,7	68,9	68
47		106,1	79,6	72,8	72
48		111,6	83,7	77,0	75
49		117,3	88,0	81,5	79
50		123,3	92,5	86,2	83
52		136,1	102,1	96,6	90
54		150	112,5	108	99
56		165	123,8	121	108
58		181,5	136,1	136	119
60		199,2	149,4	152	130
62		218,4	163,8	171	142
64		239,4	179,3	192	154
66		261,4	196,1	216	168
68		285,6	214,2	244	182
70		311,6	233,7	276	198

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Sättigungsdruck des Wasserdampfes (p<sub>s</sub>), Wassergehalt gesättigter Luft (x<sub>s</sub>) und die absolute Feuchte gesättigter Luft, bezogen auf den feuchten Messzustand (f<sub>s</sub>') in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich 72 bis 100 °C.

<b>t</b>	<b>p<sub>s</sub></b>		<b>x<sub>s</sub></b>	<b>f<sub>s</sub>'</b>
<b>°C</b>	<b>mbar</b>	<b>Torr</b>	<b>g/kg trocken</b>	<b>g/m<sup>3</sup> feucht</b>
72	339,4	254,6	313	214
74	369,6	277,2	357	232
76	401,8	301,4	409	251
78	436,4	327,4	471	271
80	473,4	355,1	546	293
82	513,2	384,9	638	316
84	555,7	416,8	755	340
86	601,2	450,9	907	367
88	649,4	487,1	1110	394
90	701,1	525,8	1396	423
92	755,9	567,0	1827	454
94	814,5	610,9	2549	487
96	876,7	657,6	3994	522
98	943,0	707,3	8348	559
100	1013,3	760,0	□	597

## Versuchsprotokoll 1

--	--	--

$t_u =$	$p =$	$p_{Ds} =$
---------	-------	------------

**1. Farbindikator**

	Farbindikator 1	Farbindikator
$\varphi$		

**2. Polymeter**

$\varphi =$	$\Delta t =$	$t_{Tpkt} =$
$f' =$	$p_D =$	$\Delta p =$

**3. Aspirations-Psychrometer**

$t_F =$	$\Delta t =$	$\varphi =$ (Abb. 6)
$p_F =$	$p_D =$ (Gl.7)	$\varphi =$ (Gl. 5)
	$f' =$	$\Delta p =$

**4. Li-Cl-Taupunkt-Messgerät**

$\tau_e =$	$\tau_m =$	$> \tau_e + 30 \text{ min}$
$t_{Tpkt} =$	$p_D =$	$\Delta p =$
$\varphi =$	$f' =$	

**5. Spiegeltaupunktmessgerät**

$t_{Tpkt} =$	$p_D =$	$\Delta p =$
$\varphi =$	$f' =$	

**Versuchsprotokoll 2**

--	--	--

$t_u =$	$p =$	$p_{Ds} =$
---------	-------	------------

**1. Farbindikator**

	Farbindikator 1	Farbindikator
$\varphi$		

**2. Polymeter**

$\varphi =$	$\Delta t =$	$t_{Tpkt} =$
$f' =$	$p_D =$	$\Delta p =$

**3. Aspirations-Psychrometer**

$t_F =$	$\Delta t =$	$\varphi =$ (Abb. 6)
$P_F =$	$p_D =$ (Gl.7)	$\varphi =$ (Gl. 5)
	$f' =$	$\Delta p =$

**4. Li-Cl-Taupunkt-Messgerät**

$\tau_e =$	$\tau_m =$	$> \tau_e + 30 \text{ min}$
$t_{Tpkt} =$	$p_D =$	$\Delta p =$
$\varphi =$	$f' =$	

**5. Spiegeltaupunktmessgerät**

$t_{Tpkt} =$	$p_D =$	$\Delta p =$
$\varphi =$	$f' =$	