

Versuch 3 FEUCHTEMESSUNG

1. Einführung

Neben der Temperatur ist die Feuchte, d.h. der Wasserdampfgehalt der Luft, eine meteorologisch wichtige Größe, da bei einer großen Zahl meteorologischer Erscheinungen das Wasser in seinen verschiedenen Formen beteiligt ist. Das gilt nicht nur bei Wolken, Nebel und Niederschlägen, bei deren Bildung ebenso wie bei der Verdunstung große Energiemengen umgesetzt werden, sondern auch für die Emission und Absorption langwelliger Strahlung, für die der Wasserdampfgehalt der Luft wesentlich ist.

2. Feuchtemeßgrößen

Entsprechend den vielen Problemstellungen, bei denen die Luftfeuchtigkeit eine Rolle spielt, gibt es eine Reihe von Feuchtemaßen:

Der **Dampfdruck** e ist der Partialdruck des Wasserdampfes. e wird üblicherweise in hPa angegeben und liegt zwischen $0 hPa$ (wasserdampffreie Luft) und einem von der Lufttemperatur (genauer: der Dampftemperatur) abhängigen maximalen Wert, dem **Sättigungsdampfdruck** ES , der in der Regel nicht überschritten wird. ES ist unabhängig vom Luftdruck P und eine reine Temperaturfunktion, die etwa durch die MAGNUS-Formel beschrieben werden kann:

$$ES = 6,10780 \cdot \exp\left[\frac{17,08085 \cdot \vartheta_L}{234,175 + \vartheta_L}\right] \quad (3.1)$$

(für Wasser von $0,0^\circ C$ bis $100,9^\circ C$).

In dieser empirische Gleichung ergibt sich ES in hPa , wenn die Lufttemperatur ϑ_L in $^\circ C$ eingesetzt wird. Die MAGNUS-Formel gibt den Sättigungsdampfdruck an, der im Gleichgewicht mit einer ebenen Oberfläche reinen Wassers steht. Über Eis ist der Sättigungsdampfdruck niedriger als über einer gleich temperierten Oberfläche unterkühlten Wassers (warum?). Einen Anhaltspunkt für $ES(\vartheta_L)$ soll folgende Tabelle bieten:

Tab. 1: Die Beziehung des Sättigungsdampfdruckes über Eis und über Wasser zur Wasserdampftemperatur.

ϑ_L	-30	-20	-10	0	10	20	30	$^\circ C$
ES Wasser	0,509	1,254	2,862	6,108	12,29	23,42	42,49	hPa
ES Eis	0,380	1,032	2,597	6,107	-	-	-	hPa

Der **Taupunkt** ϑ_D ist die Temperatur, deren Sättigungsdampfdruck über Wasser $ES(\vartheta_L)$ gerade gleich dem aktuellen Dampfdruck e ist. Beim Bezug auf Eis wird vom **Reifpunkt** gesprochen.

Die **absolute Luftfeuchtigkeit** ρ_w ist die Dichte des Wasserdampfes, d.h. die Masse des Wasserdampfes pro Volumeneinheit. Um handliche Werte zu erhalten, wird ρ_w meist in g/m^3 angegeben. Aus der Gasgleichung kann folgende Formel abgeleitet werden

$$\rho_w = \frac{0,793 \cdot e}{1 + \frac{\vartheta_L}{273,15}} \quad (3.2)$$

Sie ergibt ρ_w in g/m^3 , wenn e in hPa und ϑ_L in $^{\circ}C$ eingesetzt werden. Die Formel zeigt, daß die Zahlenwerte von ρ_w bei üblichen Lufttemperaturen etwa 75% der Zahlenwerte von e in hPa betragen.

Die **spezifische Feuchte** q ist das Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zur Gesamtmasse der feuchten Luft des gleichen Volumens. Aus dieser Definition folgt

$$q = \frac{0,622 \cdot e}{p - 0,377 \cdot e} \quad (3.3)$$

p und e können in beliebigen (gleichen) Einheiten angegeben werden. q ist eine reine Zahl, wird aber meist in g/kg angegeben. In sehr guter Näherung kann (3) daher umgeformt werden in

$$q = 622 \cdot \frac{e}{p} \frac{g}{kg} \quad (3.4)$$

Das **Mischungsverhältnis** r ist das Verhältnis der Masse des Wasserdampfes zur Masse der wasserdampffreien Luft des gleichen Volumens. Aus dieser Definition folgt

$$r = \frac{0,622 \cdot e}{p - e} \quad (3.5)$$

Bezüglich der Einheiten gilt das gleiche wie für q . Näherungsweise ist $r=q$, so daß für r auch Gleichung (3.4) verwendet werden kann. r und q sind typische meteorologische Größen. Als Verhältnisse von Massen im gleichen Volumen ändert sich ihr Wert bei Druck- und Temperaturänderungen der feuchten Luft nicht. Sie ändern sich also im Gegensatz zu anderen Feuchtegrößen insbesondere bei Vertikalverschiebungen nicht und sind daher bei vielen meteorologisch bedeutsamen Vorgängen (z.B. adiabatisches Aufsteigen) invariant.

Das **Sättigungsdefizit** $ES-e$ wird manchmal bei Überlegungen, die mit der Verdunstung zusammenhängen, mit Vorteil benutzt. Es ist aber kein Maß für den Wasserdampfgehalt der Luft, ebensowenig wie die **relative Luftfeuchtigkeit** RF . Diese gibt das Verhältnis des Dampfdruckes e zum Sättigungsdampfdruck über Wasser ES bei der Lufttemperatur ϑ_L an.

$$RF = \frac{e}{ES} \quad (3.6)$$

RF wird meist in % angegeben. Seine häufige Verwendung verdankt es wohl nicht zuletzt seiner einfachen Messung. Manchmal wird auch das **relative Sättigungsdefizit** $1-RF$ benutzt.

$$1 - RF = \frac{E - e}{E} \quad (3.7)$$

Schließlich sind hier noch zwei Größen wenigstens zu erwähnen, die als Feuchtegrößen gelten können, wenn sie auch keine direkten Angaben des Feuchtegehalts sind: die **Feuchttemperatur** ϑ_L' und die **Äquivalenttemperatur** $\vartheta_{eq.}$. Diese hängen eng mit der psychrometrischen Feuchtemeßmethode zusammen.

3. Feuchtemeßverfahren

Es bestehen viele Möglichkeiten, den Wasserdampfgehalt der Luft zu bestimmen. Trotzdem gibt es kein ideales und vollkommen universelles Feuchtemeßverfahren. Es gilt, unter den Möglichkeiten für den jeweiligen Zweck das günstigste Verfahren herauszusuchen.

3.1. Kondensationsverfahren

Wird eine nichthygroskopische Oberfläche langsam unter die Lufttemperatur abgekühlt, so wird nach Erreichen des Taupunktes ϑ_D ein Beschlag mit Kondenswasser auftreten, der bei Erwärmung wieder verschwindet. Die Genauigkeit, mit der der Taupunkt festgestellt werden kann, hängt von der Empfindlichkeit der Indikatoren und von der Genauigkeit ab, mit der die

Temperatur der Oberfläche bestimmt werden kann. Anhand von Gleichung (3.2) kann die Beziehung zwischen Taupunkt und absoluter Feuchte näherungsweise beschrieben werden als

$$\rho_w = 4,84 \cdot 10^{\vartheta_D/35K} \quad (3.8)$$

Wird von einer Genauigkeit der Temperaturmessung von $0,1 K$ ausgegangen, dann ist $10^{\Delta\vartheta_D/35K} = 10^{0,1/35} = 1,01$, d.h. die absolute Feuchte kann bis auf eine Genauigkeit von 1% bestimmt werden, während die relative Feuchte $RF = e / ES = \rho_w / \rho_w^*$ (ρ_w^* : maximale absolute Feuchte) auf 2% genau bestimmt werden kann. Der absolute Fehler der relativen Feuchte ist genau $\Delta RF = RF \rho_w / \Delta \rho_w^*$, d.h. hohe Meßgenauigkeit wird bei kleinen Werten von RF erreicht.

Je empfindlicher die Taubildung beobachtet werden kann, desto kleiner wird die Temperaturdifferenz sein, um die der wahre Taupunkt unterschritten werden muß, um die für die Erkennbarkeit des Beschlags notwendige Wassermenge zu kondensieren. Auf einem gekühlten Spiegel (polierte Metalloberfläche) muß etwa $0,05 \text{ mg/cm}^2$ kondensieren. Leider kann nicht unterschieden werden, ob sich Tau in Form von Eiskristallen oder in unterkühlten Wassertröpfchen abscheidet, wenn der Taupunkt zwischen 0°C und -12°C liegt. Die absolute Feuchte kann dadurch über 10% falsch gemessen werden.

Einfache **Taupunktspiegel** werden mit Äther gekühlt; die Temperaturen, bei denen der Beschlag auftritt und wieder verschwindet, werden mit einem Quecksilberthermometer gemessen. Bei einem Taupunkthygrometer wird die Luft bis zur Grenze der Tauausscheidung abgekühlt, indem versucht wird, durch wiederholtes Einpegeln die Kühlung einzustellen, bei der gerade Taubildung erkennbar ist (Messung mit Photodioden, Sperrzellen oder Phototransistoren). Für den Einbau in Taupunkthygrometer sind Peltier-Elemente geeignet. Dies sind Thermolemente aus zwei Halbleitermaterialien, die die Wärme schlechter als den elektrischen Strom leiten. Beim Durchfluß eines entsprechend gepolten Gleichstroms kühlt sich die Lötstelle, die unter dem Spiegel angebracht wird, ab. Durch Stromsteuerung ist die Kühltemperatur des Peltier-Elements relativ schnell einstellbar. Diese Instrumente werden aber - nicht zuletzt wegen der Kosten - nicht allgemein eingesetzt.

Ein weiteres Meßinstrument, das nach dem Kondensationsverfahren arbeitet, ist das **LiCl-Taupunkthygrometer**. Das Meßprinzip beruht darauf, daß LiCl hygroskopisch ist und durch Absorption Wasser aufnimmt, und darauf, daß LiCl-Lösung im Gegensatz zum trockenen LiCl den elektrischen Strom leitet.

Absorption von Wasser durch LiCl: Der Dampfdruck des von hygroskopischen Stoffen absorbierten Wassers ist niedriger als der über einer freien Wasseroberfläche bei gleicher Temperatur. Hygroskopisch gebundenes Wasser in LiCl verdunstet erst bei einer relativen Feuchte kleiner 10%. Wird die Temperatur der Lösung erhöht, wird das Verhältnis des aktuellen Dampfdruckes e zum Sättigungsdampfdruck ES verändert und somit erreicht, daß die Lösung Wasser abgibt. Die LiCl-Temperatur, bei der der Sättigungsdampfdruck gleich dem aktuellen Dampfdruck ist, ist die Umwandlungstemperatur ϑ_U . ϑ_U ist ein Maß für die absolute Feuchte der umgebenden Luft.

Leitung des elektrischen Stroms durch LiCl: Der Meßfühler besteht aus einem Widerstandsthermometer, das in einem mit LiCl-Lösung getränkten Strumpf aus Glasgewebe steckt. An zwei darum gewickelten Metalldrähten liegt eine elektrische Spannung an. Solange die Salzsicht feucht ist, fließt über die Lösung ein elektrischer Strom, der die Schicht erwärmt und trocknet. Unterbricht dann der Stromfluß, sinkt die Temperatur und das LiCl nimmt wieder Wasser auf. Zwischen Trocknung und Wasseraufnahme stellt sich eine Gleichgewichtstemperatur ein, die praktisch gleich ϑ_U ist.

Die Einstellung der Gleichgewichtstemperatur läuft wegen der Trägheit des Thermometers und der des Wärmeübergangs zwischen LiCl-Schicht und Thermometer verzögert der Schicht-

temperatur nach. Übliche LiCl-Hygrometer mit Pt100-Thermometern haben eine Zeitkonstante von etwa 1 Minute. Eine Belüftung beschleunigt die Gleichgewichtseinstellung, durch eine zu starke Strömung kann aber so viel Wärme abgeführt werden, daß unter ungünstigen Bedingungen die elektrische Leistung nicht mehr ausreicht, die Schicht bis zu ϑ_U zu erwärmen. In solchen Fällen wird eine zu niedrige Feuchte bestimmt. Nichtleitender Staub auf dem Fühler beeinträchtigt die Messung nicht; Niederschläge auf dem Fühler, die bereits in trockenem Zustand elektrisch leitend sind, machen den Fühler unbrauchbar. Zum Regenerieren wird der Fühler in Wasser ausgewaschen und getrocknet.

Zu Beginn der Messung wird die mit LiCl-Lösung benetzte Sonde in die Wirbelkammer eingeführt. Nach Einschalten der Stromzufuhr wird die Wirbelkammer durch eine Gruppe von Heizwiderständen geheizt; ein kleiner Ventilator sorgt für Durchmischung, so daß davon ausgegangen werden kann, daß an der Sonde stets die gleiche Temperatur herrscht wie am Pt100-Temperaturmeßfühler.

Ein großer Ventilator saugt ständig neue Umgebungsluft durch das ganze Gerät, einschließlich der Wirbelkammer, damit die aktuelle Feuchte innen immer der Feuchte außen entspricht. Der permanente Austausch der Wirbelkammer-Luft bewirkt, daß die Übersättigung über der hygroskopischen Oberfläche zunächst aufrechterhalten wird. Da aber gleichzeitig geheizt wird, erhöht sich der Sättigungsdampfdruck über der LiCl-Lösung stetig, bis er schließlich den aktuellen Dampfdruck erreicht und überschreitet. Ab diesem Zeitpunkt beginnt das LiCl-getränkte Textil auszutrocknen. Dadurch wird die Beweglichkeit der Ionen verringert, folglich die Leitfähigkeit herabgesetzt, und zwar in einer recht steilen Abhängigkeit. Dies wird mit einer elektronischen Schaltung ausgenutzt, die die Heizleistung proportional zu eben dieser Leitfähigkeit regelt.

Bei nun sinkender Heizleistung beginnt, bedingt durch die weitere Zufuhr kälterer Außenluft, die Temperatur in der Wirbelkammer zu sinken, mit ihr auch der Sättigungsdampfdruck, bis die Luft wieder übersättigt ist und die LiCl-Lösung erneut Wasser aus der Luft aufnimmt: jetzt kehrt sich der Prozeß ein weiteres Mal um, da mit der Leitfähigkeit auch die Heizleistung wieder steigt. Man erreicht so einen Einschwingvorgang auf eine Gleichgewichtstemperatur in der Wirbelkammer, der nach der Inbetriebnahme des Geräts erfahrungsgemäß 30 bis 50 Minuten dauert. Spätere Feuchteänderungen werden erheblich schneller, schon in wenigen Minuten, registriert.

Die Gleichgewichtstemperatur hängt nur vom Dampfdruck der Luft, oder, was ein äquivalentes Feuchtemaß darstellt, vom Taupunkt ab: je feuchter die Luft, desto höher muß die Wirbelkammer geheizt werden, damit Wasser aus der LiCl-Lösung zu verdunsten beginnt. Der Zusammenhang zwischen der Gleichgewichtstemperatur ϑ_U und der Taupunkttemperatur ϑ_D ist empirisch ermittelt worden, er ist für ϑ_D zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in brauchbarer Näherung linear.

Tab. 2: Einige Werte für den Zusammenhang zwischen der Gleichgewichtstemp. und der Taupunkttemp.

ϑ_U	in	-18	-5,3	8,0	21,7	35,55	49,2	63,6	79,5
$^{\circ}\text{C}$									
ϑ_D	in	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30
$^{\circ}\text{C}$									

In der Praxis unterliegt die Wirbelkammertemperatur den gleichen Schwankungen wie die Temperatur ϑ_L der Außenluft. Letztere wird daher mit einem zweiten Pt100-Fühler gleichzeitig gemessen. Wir lassen die beiden Meßgrößen ϑ_L und ϑ_D von einem ORION-

Datalogger abfragen und in Abständen von je 1 Minute ausdrucken, um den Einschwingvorgang verfolgen zu können.

3.2. Absorptionsverfahren

Mit Absorptionshygrometern kann die absolute Feuchte direkt gemessen werden. Die Luft wird durch Gefäße mit stark hygroskopischen Stoffen (H_2SO_4 an Bimsstein, $CaCl_2$, P_2O_5), die den Wasserdampf absorbieren, geleitet. Gemessen wird die Gewichtszunahme der Meßröhren und das durchgeleitete Luftvolumen. Das Verfahren ist sehr aufwendig und wird in der Praxis nicht verwendet.

3.3. Hygroskopische Verfahren

Das bekannteste und älteste noch verwendete Hygrometer ist das **Haarhygrometer** (de Saussure, 1783). Der Meßeffect beruht darauf, daß Menschenhaar bei Wasseraufnahme vorwiegend in Längsrichtung quillt. Bei der Wasseraufnahme wird der Dampfdruck erniedrigt. Nach dem RAOULT'schen Gesetz ist das Verhältnis der aufgenommenen Wassermoleküle zu den insgesamt vorhandenen gleich der relativen Dampfdruckerniedrigung.

$$\frac{n_1}{n_1 - n_0} = \frac{ES - e}{e} = 1 - RF \quad (3.9)$$

Hierbei ist n_1 die Molzahl des gelösten Stoffes und n_0 die Molzahl des Lösungsmittels.

Der Wassergehalt des Haares ist also ein Maß für die relative Luftfeuchtigkeit. Die Verlängerung über den Feuchtebereich $RF=0...100\%$ beträgt für gut entfettete Haare etwa 2.5% der Gesamtlänge. Der Zusammenhang zwischen relativer Längenänderung $\Delta l/l$ und relativer Luftfeuchtigkeit RF ist allerdings nicht linear, wie folgende Tabelle zeigt.

Tab.3: Zusammenhang zwischen der relativen Ausdehnung von entfetteten Haaren mit der relativen Feuchte

<i>RF</i> in %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$100 \cdot \Delta l/l$ in %	0	21	39	53	64	73	79	85	90	95	100

Gewalzte oder chemisch behandelte Haare sind besser linear. Bei kleinen Feuchten ($RF < 40\%$) verlängert sich das Haar auch ohne Feuchteerhöhung, wobei die mechanische Vorspannung eine Rolle spielt. Diese Verlängerung kann aber völlig beseitigt werden, indem das Haar kurze Zeit in gesättigter Luft ($RF \approx 100\%$) regeneriert wird. Beim Haarhygrometer ist die Hysteresebreite $\Delta RF \approx 8\%$, wenn die Schleife voll durchlaufen wird ($RF=0\% \rightarrow 100\% \rightarrow 0\%$). Die Anzeige des Haarhygrometers ist nahezu temperaturunabhängig. Die hygroskopische Eigenschaft der Haare wird bei Temperaturen über $50\text{ }^\circ\text{C}$ zerstört. Bei niedrigen Temperaturen ist wegen des geringen Wassergehaltes und der niedrigen Diffusionsgeschwindigkeit bei $-40\text{ }^\circ\text{C}$ die Anzeige schon unendlich träge.

Das ein Haar allein nur eine geringe Anzeigekraft hat, werden für Instrumente mehrere Haare gebündelt, z.B. beim Hygrographen bis zu 50 Haare.

Haarhygrometer sind sehr empfindlich gegen hygroskopischen Staub. Die Haare müssen oft gereinigt werden.

3.4. Spektrale Verfahren

Mit Infrarot-Spektrographen wird die Lage und Intensität der Wasserstoffabsorptionsbanden im infraroten Spektralbereich bestimmt. Aus der Intensität der Absorption kann auf die Wasserdampfkonzentration geschlossen werden.

3.5. Psychrometrische Feuchtemessung

3.5.1. Meßprinzip

Die psychrometrische Feuchtemessung beruht darauf, daß sich eine feuchte Fläche durch Verdunstung abkühlt. In einer trockenen Atmosphäre ist die Verdunstung intensiver als in einer feuchten. Die Intensität der Verdunstung ist aber als Meßgröße nicht geeignet, da sie in keinem definierbaren Verhältnis zur Luftfeuchte steht, weil Luftfeuchte und zur Verfügung stehende Wassermenge nicht konstant gehalten werden können. Zweckmäßig ist dagegen die Messung der Abkühlung der feuchten Fläche.

Bei der Verdunstung findet gleichzeitig ein Wärmeaustausch (Strom fühlbarer Wärme) durch die Temperaturdifferenz Wasseroberfläche - Luft und ein Stoffaustausch durch die Druckdifferenz Sättigungsdampfdruck an der Wasseroberfläche - Partialdruck des Wasserdampfes der umgebenden Luft statt. Besteht keine Wärmeleitung zu oder von der verdunstenden Fläche über das Gerät selbst oder durch Strahlung, wird die Verdunstungswärme ausschließlich der vorbeiströmenden Luft entzogen. Dabei kühlt sich die Luft adiabatisch ab. Im Sättigungszustand wird das Gleichgewicht der Temperaturen und der Dampfdrücke erreicht.

Die psychrometrische Differenz (Differenz der Temperaturen des trockenen und des feuchten Thermometers) wird bestimmt durch:

- Luftfeuchtigkeit,
- Lufttemperatur,
- Luftdruck,
- Wärmestrahlung der umgebenden Luft,
- Ventillation,
- Form und Größe des Thermometers,
- Beschaffenheit und Befestigung des Strumpfes und Befeuchtungsmethode,
- Aggregatzustand des Strumpfwassers.

3.5.2. Theorie des Psychrometers

Es sind im wesentlichen drei Psychrometertheorien entwickelt worden:

a) Konvektions- oder Mischungstheorie

Dabei wird angenommen, daß in der Luft am feuchten Thermometer Sättigung im Bezug auf Wasserdampf auftritt und alle Wärme, die zur Verdunstung benötigt wird, durch die gleiche Luft geliefert wird. Diese Theorie ist eigentlich nur für unendlich große Ventilationsgeschwindigkeiten anwendbar, wird aber in der Praxis am meisten verwendet.

b) Diffusionstheorie

Diese Theorie ist nur gültig für ruhende Luft am Psychrometer und berücksichtigt nur die Diffusion des Wasserdampfes am feuchten Thermometer.

c) Analogietheorie

Es wird vom Analogievergleich von Wärme- und Stoffaustausch ausgegangen, es werden Diffusion und Konvektion berücksichtigt. a) und b) sind Grenzfälle dieser Theorie.

3.5.2.1. Das ideale Psychrometer

Die Wärmehaushaltsgleichung für eine feuchte Oberfläche lautet

$$Q + B + L + V = 0 \quad (3.10)$$

Sind die Strahlungsbilanz Q und der Wärmestrom aus dem Fühler B klein und können gleich Null gesetzt werden, so ist die Wärmehaushaltsgleichung nur noch gleich der Summe der Flüsse der fühlbaren (L) und der latenten (V) Wärme

$$L + V = 0. \quad (3.11)$$

Werden für L die Temperatur- und für V die Dampfdruckdifferenzen eingesetzt mit

$$L = -\alpha_L \cdot (\vartheta'_L - \vartheta_L), \tag{3.12}$$

$$V = -\frac{0,622 \cdot \lambda_w}{p \cdot c_p} \cdot \alpha_L \cdot (ES(\vartheta'_L) - e), \tag{3.13}$$

so ergibt sich im stationären Zustand

$$-\alpha \cdot (\vartheta'_L - \vartheta_L) - \frac{1}{\gamma} \cdot \alpha_L \cdot (ES(\vartheta'_L) - e) = 0 \text{ mit } \gamma = \frac{P \cdot c_p}{0,622 \cdot \lambda_w} \tag{3.14}$$

und daraus

$$e = ES(\vartheta'_L) - \gamma \cdot (\vartheta_L - \vartheta'_L) \tag{3.15}$$

Die Wärmeübergangszahl α_L , die von der Ventilation abhängt, ist in der Gleichung (3.15) nicht mehr enthalten. Der Koeffizient γ ist über die Verdampfungswärme λ_w und die spezifische Wärme bei konstantem Druck c_p abhängig von der Temperatur und über c_p abhängig von der Feuchte. Da die Änderungen von γ mit Temperatur und Feuchte vernachlässigbar sind, kann Gleichung (3.15) näherungsweise geschrieben werden in der Form

$$e = ES(\vartheta'_L) - 0,66 \cdot \frac{p}{1000} \cdot (\vartheta_L - \vartheta'_L) \tag{3.16}$$

Werden $ES(\vartheta'_L)$ und p in hPa , ϑ'_L und ϑ_L in $^{\circ}C$ eingesetzt, so ergibt sich e in hPa .

Als ideale Feuchttemperatur wird die Temperatur bezeichnet, die eine von Strahlung und Wärmeleitung durch das Wasser freie Wasseroberfläche annimmt.

Bei 100% relativer Feuchte und Eis am Feuchtthermometer ist ϑ'_L höher als ϑ_L , da sich Wasserdampf am gefrorenen Strumpf niederschlägt. Die freiwerdende Wärme kann nur abgeführt werden, wenn das Feuchtthermometer wärmer ist als die Luft. Bei RF=0% wird die Psychrometerdifferenz bei den angegebenen Temperaturen niemals größer als 20 K. Bei tiefen Temperaturen wird diese Temperaturdifferenz immer kleiner, daher wird die psychrometrische Feuchtemessung bei abnehmenden Temperaturen immer ungenauer.

Ideale Feuchttemperatur ϑ'_L in $^{\circ}C$ in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ϑ_L in $^{\circ}C$ und relativer Feuchte RF in %:

Tab.4: Abhängigkeit der idealen Feuchttemperatur von der relativen Feuchte und der Lufttemperatur

RF \ ϑ	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %	
30 $^{\circ}C$	10,7	15,8	20,1	23,8	27,1	30,0	Wasser
20 $^{\circ}C$	6,1	9,4	12,4	15,2	17,7	20,0	
10 $^{\circ}C$	0,5	2,6	4,6	6,5	8,3	10,0	
0 $^{\circ}C$	-5,9	-4,7	-3,5	-2,3	-1,1	0,0	
-10 $^{\circ}C$	-13,3	-12,6	-11,9	-11,2	-10,6	-10,0	
-20 $^{\circ}C$	-21,6	-21,2	-20,9	-20,6	-20,3	-20,0	
0 $^{\circ}C$	-5,7	-4,5	-3,3	-2,2	-1,1	0,0	Eis
-10 $^{\circ}C$	-13,0	-12,4	-11,7	-11,0	-10,4	-9,7	
-20 $^{\circ}C$	-21,4	-21,0	-20,7	-20,4	-20,0	-19,7	
-30 $^{\circ}C$	-30,6	-30,4	-30,3	-30,1	-30,0	-29,8	

3.5.2.2. Das reale Psychrometer

Die Voraussetzungen $Q + B = 0$ ist nicht vollständig zu realisieren, es wird für die Gleichung des realen Psychrometers auf die vollständige Wärmehaushaltsgleichung zurückgegriffen. Bei

Abschirmung der kurzwelligen Strahlung ist die langwellige Strahlungsbilanz Q_{lw} - Schwarzkörperstrahlung vorausgesetzt - für das Feuchtthermometer

$$Q_{lw} = \sigma \cdot T_L^4 - \sigma \cdot T_L'^4 \approx -4\sigma \cdot T_L'^3 \cdot (T_L' - T_L) = -\alpha_s (\vartheta'_L - \vartheta_L) \quad (3.18)$$

σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(K^4 m^2)$), T_L und T_L' sind die Trocken- und die Feuchttemperatur in K , α_s ist die Strahlungsübergangszahl ($\alpha_s \approx 5,6 W/(K m^2)$). Für den Wärmestrom aus dem Meßfühler gilt

$$B = -\beta \cdot (\vartheta'_L - \vartheta_L) \quad (3.18)$$

Dabei ist β die Wärmedurchgangszahl. Nach Einsetzen von L und V ist im stationären Gleichgewicht ergibt sich

$$-\alpha_s \cdot (\vartheta'_L - \vartheta_L) - \beta \cdot (\vartheta'_L - \vartheta_L) - \alpha_L \cdot (\vartheta'_L - \vartheta_L) - \frac{1}{\gamma} \alpha_L \cdot (ES(\vartheta'_L) - e) = 0 \quad (3.19)$$

Die Gleichung für das reale Psychrometer ist dann

$$e = ES(\vartheta'_L) - \gamma \cdot \left(1 + \frac{\alpha_s + \beta}{\alpha_L}\right) \cdot (\vartheta_L - \vartheta'_L) \quad (3.20)$$

$$e = ES(\vartheta'_L) - \gamma \cdot K \cdot (\vartheta_L - \vartheta'_L) \quad (3.21)$$

Hierbei bleibt der Einfluß der Ventilation enthalten. Je stärker die Ventilation ist, desto mehr nähern sich die Eigenschaften des realen Psychrometers denen des idealen Psychrometers. Eine gute Übereinstimmung wird bei einer Ventilationsgeschwindigkeit $v = 2 m/s$ ($\alpha_L \approx 70 W/(K m^2)$ und $\beta = 0$) mit $K = 1,08$ erreicht. (Bei einer vollständigen Ableitung nach der Analogietheorie mit der Berücksichtigung der unterschiedlichen molekularen Transportkoeffizienten für Wärme und Wasserdampf wird K mit einem Faktor kleiner als eins multipliziert.)

Für $v > 2 m/s$ verwendet man die Gleichung für das ideale Psychrometer. Bei $v = 0,5$ bis $1 m/s$ ist $K \approx 1,2$, bei $v = 0 m/s$ ist $K \approx 1,8$.

3.5.2.3. Die Äquivalenttemperatur

Die Äquivalenttemperatur $\vartheta_{eq.}$ ist diejenige Temperatur, die die Luft annehmen würde, wenn man den ganzen in ihr enthaltenen Wasserdampf kondensiert und die freiwerdende Wärme der Luft zuführt. Faßt man L und V in der Wärmehaushaltsgleichung zusammen, erhält man bei $Q + B = 0$

$$\begin{aligned} L + V &= -\alpha_L (\vartheta'_L - \vartheta_L) - \frac{1}{\gamma} \alpha_L \cdot (ES(\vartheta'_L) - e) \\ &= -\alpha \cdot \left(\left(\vartheta'_L + \frac{1}{\gamma} ES(\vartheta'_L) \right) - \left(\vartheta_L + \frac{1}{\gamma} e \right) \right) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Die Form entspricht der Gleichung für L

$$L + V = -\alpha_L (\vartheta'_{eq.} - \vartheta_{eq.}) \quad (3.23)$$

mit

$$\vartheta'_{eq.} = \vartheta'_L + \frac{1}{\gamma} \cdot ES(\vartheta'_L) \quad (3.24)$$

und

$$\vartheta_{eq.} = \vartheta_L + \frac{1}{\gamma} \cdot e \quad (3.25)$$

Die Äquivalenttemperatur kennzeichnet den Inhalt der Luft an fühlbarer und latenter Wärme. Der Gehalt an fühlbarer Wärme pro Masseneinheit W_L ist

$$W_L = c_p \cdot \vartheta_L + W_0 \tag{3.26}$$

Der Gehalt an latenter Wärme pro Masseneinheit W_V ist

$$W_V = q \cdot \lambda_w + W_0 \approx \frac{0,622 \cdot e}{p} \cdot \lambda_w + W_0 \tag{3.27}$$

Der Gesamtwärmeinhalt ist dann

$$W = c_p \cdot \vartheta_L + \frac{c_p}{\gamma} \cdot e + W_0 = c_p \cdot \left(\vartheta_L + \frac{e}{\gamma}\right) + W_0 = c_p \cdot \vartheta_{eq.} + W_0 \tag{3.28}$$

Dies entspricht der Gleichung (3.23).

Beim idealen Psychrometer ist die Wärmehaushaltsgleichung geschlossen, also $L + V = 0$ und damit

$$\vartheta'_{eq.} - \vartheta_{eq.} = 0 \tag{3.29}$$

Bei konstantem Luftdruck ist $\vartheta'_{eq.}$ eine eindeutige Funktion von ϑ'_L .

Die empirisch gefundene Prött-Temperatur ϑ_{Pr} wird nach der Näherung

$$\vartheta_{Pr} = \vartheta_L + \frac{3}{2} \cdot e = \vartheta'_L + \frac{3}{2} \cdot ES(\vartheta'_L) \tag{3.30}$$

berechnet. ϑ_{Pr} erhält man in °C, wenn man ϑ_L und ϑ'_L in °C, e und $ES(\vartheta'_L)$ in hPa einsetzt.

Tab.5: Die Äquivalenttemperatur als Funktion der idealen Feuchttemperatur ($p = 1013.25 \text{ hPa}$)

ϑ'_L in °C	-10	0	10	20	30
$1/\gamma$ in K/hPa	1,54	1,53	1,51	1,5	1,48
$\vartheta_{eq.} = \vartheta'_{eq.}$ in °C	-5,6	9,3	28,5	54,7	91,4
ϑ_{Pr} in °C	-5,7	9,2	28,4	55,1	93,6

3.5.3. Die Psychrometerformen

Die einfachste und älteste Form des Psychrometers ist das Psychrometer nach August. Es besteht aus einem trockenen und einem feuchten Thermometer. Im Freien kann es daher nur bei genügendem Strahlungsschutz verwendet werden. Da es nur der natürlichen Ventilation ausgesetzt ist, gilt die Gleichung des realen Psychrometers. Eine Verbesserung ist das Hüttenpsychrometer, bei dem das Feuchtthermometer durch einen Aspirator künstlich belüftet wird. Künstlich belüftet ist auch das Schleuderpsychrometer nach Schubert, welches auch gegen die Strahlung geschützt ist und bei geringen Genauigkeitsansprüchen im Freien verwendet werden kann.

Die verlässlichsten Meßwerte liefert das Aspirationspsychrometer nach Abmann. Bei ihm werden beide Thermometer durch einen gemeinsamen Aspirator belüftet. Die schlanke Form der Thermometer setzt die Wärmeleitung aus dem Schaft stark herab. Auch α_G ist verkleinert, da jedes der beiden Thermometer durch zwei ineinandergesteckte Hüllen nicht nur weitgehend gegen direkte Strahlung von außen geschützt ist, sondern durch die Verchromung auch der langwellige Strahlungsaustausch stark reduziert ist. Der Strahlungsschutz zusammen mit der künstlichen Ventilation bewirkt, daß die an den beiden Thermometern abgelesenen Werte weitgehend frei von Fehlern sind. Neben der üblichen großen Ausführung des Abmann-Psychrometers gibt es noch eine kleinere, die aber störanfälliger und in der Ablesung ungenauer ist.

Bei dem Aspirationspsychrometer nach Frankenberger werden zur Messung elektrische Widerstandsthermometer verwendet. Wegen der großen Wärmeübergangszahlen und der

schlechten Wärmeleitung dünner Drähte genügen diese Instrumente fast hundertprozentig der Gleichung des idealen Psychrometers.

3.5.4. Die Psychrometertafeln

Um die Anwendung des Spung' schen Formel zu erleichtern, hat man die ihr entsprechenden Werte tabelliert. Für Lufttemperatur und Feuchttemperatur sind der Taupunkt und die relative Feuchte angegeben. Der Dampfdruck kann in Abhängigkeit vom Taupunkt abgelesen werden. Die Werte der Tafeln gelten für den Luftdruck $P_0 = 1013.25 \text{ hPa}$. Für einen davon abweichenden Luftdruck ist die Korrektur für den Dampfdruck

$$\Delta e = e - e_{\text{Tab.}} = \left(1 - \frac{P}{P_{\text{Tab.}}}\right) \cdot \gamma \cdot (\vartheta_L - \vartheta'_L). \quad (3.31)$$

Hierbei ist γ die Psychrometerkonstante. Man erhält e in hPa , wenn P in hPa und ϑ und ϑ' in $^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. Für den Luftdruck von 990 hPa erhält man für jedes Kelvin der Psychrometerdifferenz $\Delta e = +0.015 \text{ hPa}$. Wenn man e auf 0.1 hPa genau ermitteln will, wird man die Korrektur meist berücksichtigen müssen.

Sättigungsdampfdruck über Wasser in *hPa*
Temperatur in $^{\circ}C$

Sättigungsdampfdruck über Eis in *hPa*

Temperatur in °C

Literatur:

F. Möller (1975): Einführung in die Meteorologie, Bd. I; BI-Taschenbuch

G.Liljequist, K.Cehak (1984): Allgemeine Meteorologie. 3.Auflage. Braunschweig

Ch.Mortimer (1980): Chemie.3.Auflage. Stuttgart

Versuchsbeschreibung:

Gekennzeichnetes Zubehör: Hygrograph, Temperatur-Taupunkt-Geber mit Datalogger-Anschlußkarte, dazugehöriger LiCl-Sensor, LiCl-Lösung (1:10), großes Aßmann-Psychrometer mit Aspirator-Schlüssel, kleines Aßmann-Psychrometer mit Ballon-Pipette, Schleuderpsychrometer, Psychrometertafel, Diagrammpapier für den Hygrographen, Tuch (zum Einwickeln des Hygrographen), kleine Pipette, Ersatz-Psychrometerstrümpfe und Zwirn, destilliertes Wasser, kleine Wasserflasche (für die Profilmessung auf dem Turm)

In der Hütte vorhanden: Datalogger (gemeinsam mit Versuch 1), Wechselspannungsquelle 24 V, kleiner Schraubenzieher, Stative (zum Aufhängen der Psychrometer und des Taupunkt-Gebers), Zollstock, Psychrometertafel

Gang des Versuches:

- 1.a) Diagrammpapierwechsel beim Hygrographen wechseln: Schreibfeder von der Trommel abheben (arretieren). Uhrtrommel senkrecht herausnehmen, Uhr aufziehen (in Pfeilrichtung). Neuen Streifen auf die Trommel legen und mit dem Spannbügel festklemmen. Uhrtrommel so drehen, daß die Zeitskala möglichst richtig an die Schreibfeder kommt, und einsetzen. Zur genauen Zeiteinstellung Uhr entgegen dem Sinn ihres Umlaufs, d. h. von links nach rechts, drehen.
- b) Justieren des Hygrographen:
Hygrographen in ein gut befeuchtetes Tuch wickeln. Nach etwa 10 Minuten den Feuchteanzeiger vorsichtig auf 97% stellen. Nach einigen weiteren Minuten prüfen, ob der Zeiger bei 97% stehen geblieben ist. Notfalls nachjustieren und Prüfung wiederholen.
- 2.) Temperatur-Taupunkt-Geber:
Der LiCl-Sensor wird durch Ziehen aus seiner Federrasterung gelöst. An seinem Kopf befindet sich eine nutartige Vertiefung, in die zwei Goldelektroden hineinragen. In diese Vertiefung einen Tropfen LiCl-Lösung geben und den Sensor wieder in seiner Rohrhalterung befestigen. Dann kann die 24-V-Wechselspannung zur Versorgung des Gerätes eingeschaltet werden. In Abständen von 1 Minute sind nun die Lufttemperatur ϑ_L und die vom Taupunkt abhängige Wirbelkammertemperatur ϑ_K mit dem Datalogger aufzuzeichnen, bis sich ϑ_K auf einen Gleichgewichtswert eingestellt hat. Nach Abschluß der Messung ist der Sensor mit destilliertem Wasser auszuwaschen.
- 3.) Aßmann-Psychrometer:
Den Strumpf des Aßmann-Psychrometers befeuchten. Danach den Aspirator aufziehen und in 30-sec.-Abständen beide Thermometer ablesen. (Die Psychrometer müssen frei hängen, nicht hinbeugen.) Aus der tiefsten, einige Zeit konstanten Feuchttemperatur (Gleichgewicht der Energieströme am Thermometer) und der gleichzeitig gemessenen Lufttemperatur berechnen sich Feuchte und Dampfdruck.

Die gleichen Messungen werden mit dem kleinen Psychrometer und dem Schleuderpsychrometer durchgeführt (den Strumpf des Schleuderpsychrometers so anfeuchten, daß die Metallteile trocken bleiben).

- 4.) Bestimmung eines Feuchteprofils am Meßturm:
Auf den sieben Plattformen des Meßturms (6 m, 12 m, 18 m, 24 m, 30 m, 36 m und 42 m) und am Boden Feucht- und Trockentemperatur mit dem Abmann-Psychrometer bestimmen (Gleichgewichtseinstellung beachten, siehe 3.).
- 5.) Volumen der Hütte bestimmen.
- 6.) Relative Feuchte am Hygrographen ablesen.
- 7.) Vom Datalogger (oder im Institut am großen Barographen) den Luftdruck ablesen.

Auswertung und Fragen:

- 1.) Für die Psychrometermessungen in der Hütte den Dampfdruck e und die relative Feuchte RF der Psychrometertafel entnehmen. Außerdem die Druckkorrektur für den Dampfdruck berechnen aus. Gleichung (3.31).
- 2.) Für das Abmann-Psychrometer weiterhin den Sättigungsdampfdruck ES , den Taupunkt ϑ_D , die absolute Luftfeuchtigkeit ρ_W , die spezifische Luftfeuchtigkeit q , das Sättigungsdefizit $ES-e$, das relative Sättigungsdefizit $1-RF$ und die Äquivalenttemperatur ϑ_{eq} .
- 3.a) Den nach 2) bestimmten Wert der relativen Feuchte RF mit der Anzeige des Hygrographen vergleichen.
- b) Den nach 2) bestimmten Wert der Taupunkttemperatur ϑ_D mit dem vom Taupunktgeber gelieferten Wert vergleichen.
Welche Fehler sind jeweils zu berücksichtigen?
- 4.) Das Dampfdruck-Profil von 0 bis 42 m aufzeichnen und den Kurvenverlauf (qualitativ) erklären.
- 5.) Wieviel Wasserdampf enthält die Meßhütte?
- 6.) Feuchtemessung mit einem Taupunkt-Spiegel:
Welcher Fehler bei der Bestimmung des Dampfdruckes e wird gemacht, wenn bei einer Taupunkttemperatur von $\vartheta_D = -10\text{ °C}$ Reif am Spiegel angenommen wird, der Beschlag aber Tau war? Welches ϑ_D wäre bei gleichem Dampfdruck e und Reifbeschlag errechnet worden?
- 7.) Um wieviel Kelvin steigt die Äquivalenttemperatur ϑ_{eq} wenn einem Luftvolumen von 1 m^3 bei 10 °C 10^{-3} kg Wasserdampf zugeführt werden ($\rho_L = 1.25\text{ kg/m}^3$, $\lambda_W = 2,477 \cdot 10^6\text{ J/kg}$, $c_p = 1005\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)?
- 8.) Ein im Freien befindlicher Mensch atme Luft von 0 °C und 50% relativer Feuchte ein. In der Lunge wird diese auf $36,5\text{ °C}$ erwärmt und gesättigt. Welche Wärmemenge muß jedem Liter Atemluft zugeführt werden? Die die Rechnung mit Hilfe der Äquivalenttemperaturen (Prött-Temperaturen) durchführen. ($ES(0\text{ °C}) = 6,108\text{ hPa}$, $ES(36,5\text{ °C}) = 61,12\text{ hPa}$, $\rho_L = 1,293\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)