

DIREKTKALORIMETER FÜR RATTEN UND MÄUSE MIT GASGEFÜLLTER GRADIENTENSCHICHT UND MODIFIZIERTEM LiCl-CaCl₂-TAUPUNKTHYGROMETER*

FRANK MIRTSCH**

Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg, Hamburg (B.R.D.)

ABSTRACT

A direct calorimeter is described on the basis of the gradient principle. The calorimeter is made transparent by using polymethacrylate and is also applicable for the measurement of metabolic functions.

To achieve a low-cost thermostatisation of the calorimeter a gradient layer with an enclosed layer of air is used, yielding a higher sensibility and low thermal inertia. If the gradient layer is filled with hydrogen, the thermal inertia can even further be decreased for short-time experiments.

The evaporative heat loss is measured through the humidity of the air using a modified LiCl dew-point-hygrometer. The undesired long-time drifting of LiCl is examined. A modified LiCl-CaCl₂ dew-point-hygrometer is developed, which widely restricts the long-time drifting of LiCl and reduces the usual errors of a LiCl dew-point-hygrometer.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein nach dem Gradientenprinzip arbeitendes und aus Plexiglas gefertigtes Direktkalorimeter beschrieben, das lichtdurchlässig ist und gleichzeitig als Stoffwechselapparat dient.

Im Hinblick auf einen geringen Aufwand für die Thermostatisierung des Kalorimeters wird eine Gradientenschicht mit eingeschlossener Luftschicht verwendet, die einen relativ grossen Messeffekt bei geringer thermischer Trägheit besitzt. Wird die Gradientenschicht mit Wasserstoff gefüllt, so kann für Kurzzeitversuche die thermische Trägheit weiter verringert werden.

Die Messung der Enthalpie der Atemfeuchte erfolgt durch eine reine Luftfeuchtemessung mit einem modifizierten LiCl-Taupunkthygrometer. Es wurde das

* Vorgelesen auf den 2. Ulm Kalorimetriktagen an der Universität Ulm vom 24.-26. März 1977.

** Jetzt: Institut für Mechanik und Thermodynamik, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 2000 Hamburg 70, B.R.D.

bei Langzeitmessungen auftretende unerwünschte Wandern des LiCl untersucht. Hierauf aufbauend wird ein modifiziertes LiCl-CaCl₂-Taupunkthygrometer entwickelt, das das Wandern des LiCl stark einschränkt und die sonst üblichen Messfehler eines LiCl-Taupunkthygrometers reduziert.

EINLEITUNG

Auf dem Gebiet der Direktkalorimetrie für Versuchstiere oder Menschen hat sich das Direktkalorimeter nach dem Gradientenprinzip von Benzinger und Kitzinger^{1, 2} und Spinner³ bewährt. Es besitzt eine hohe Messgenauigkeit und eine geringe thermische Trägheit. Hierbei ist jedoch der apparative Aufwand für eine exakte Thermostatisierung des Kalorimeters und für die Messung der Enthalpie der Atemfeuchte mit Hilfe von Wärmeaustauschern sehr gross.

Ziel dieser Arbeit ist es, am Beispiel eines Direktkalorimeters für Ratten oder Mäuse die Wärmeflussmessung nach dem Gradientenprinzip und die Messung der Enthalpie der Atemfeuchte in der Weise zu modifizieren, dass bei hinreichender Messgenauigkeit der apparative Aufwand für ein Direkt-Kalorimeter beträchtlich verringert wird. Weiterhin sollen im Hinblick auf Langzeitversuche in stärkerem Masse die physiologischen Bedingungen der Versuchstiere berücksichtigt werden.

PRINZIPIELLER AUFBAU DES DIREKT-KALORIMETERS

Der prinzipielle Aufbau des Kalorimeters ist in Fig. 1 dargestellt. Damit das Versuchstier das gewohnte Licht erhält und allseitig beobachtet werden kann, ist das

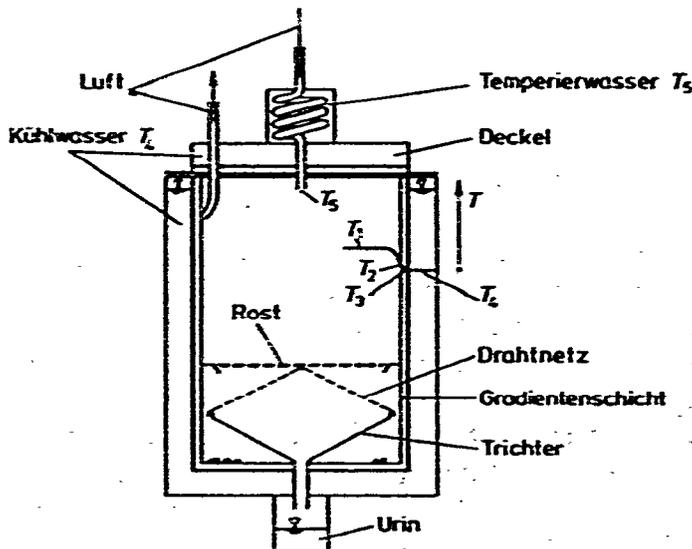


Fig. 1. Prinzipieller Aufbau des Kalorimeters. T_1 = Lufttemperatur im Kalorimeter; T_2 = Wandtemperatur der Innenseite der Gradientenschicht; T_3 = Wandtemperatur der Aussenseite der Gradientenschicht; T_4 = Temperatur des Kühlwassers des Kalorimeters; T_5 = Temperatur der Luft am Eingang.

Direkt-Kalorimeter aus Plexiglas gefertigt. Plexiglas eignet sich als Gradientenschicht, da es einerseits im sichtbaren Bereich durchlässig ist und andererseits im IR-Bereich fast vollständig die Wärmestrahlung absorbiert. Ausserdem dämpft Plexiglas, wie später gezeigt wird, hinreichend gut die Temperaturschwankungen des Kühlwassers.

Das Kalorimeter dient gleichzeitig als Stoffwechselapparat. Durch ein Drahtnetz wird der Urin vom Kot getrennt und fliesst durch einen Trichter aus dem Kalorimeter. Denn im Kalorimeter verbleibender Urin würde besonders bei Langzeitmessungen verdunsten und die Atemfeuchtemessung verfälschen. Die Versorgung des Versuchstieres mit Trinkwasser und Futter erfolgt kontinuierlich durch den Deckel des Kalorimeters.

Ein konstanter Luftstrom wird zunächst durch ein gekühltes Wasserbad geleitet und dabei mit Wasserdampf gesättigt. Die Luft nimmt im nachgeschalteten Wärmeaustauscher die Temperatur $T_5 \approx T_2$ an und tritt danach mit konstanter Luftfeuchte ($\phi \approx 42 \div 50\%$) in das Kalorimeter. Hier wird die Luft durch das Versuchstier angefeuchtet und geringfügig auf die Temperatur T_1 erwärmt. Die Luft wird in der Nähe der Innenseite der Gradientenschicht abgesaugt. Hierdurch wird erreicht, dass die Luft sich vor dem Verlassen des Kalorimeters praktisch auf die Eintrittstemperatur $T_2 \approx T_5$ abkühlt.

Auf diese Weise transportiert der Luftstrom nahezu nur Verdampfungsenthalpie aus dem Kalorimeter und die von Benzinger und Kitzinger^{1, 2} und Spinnler³ verwendete aufwendige Messmethode kann durch eine vergleichsweise einfache Luftfeuchtemessung ersetzt werden. Ein kleiner verbleibender Fehler kann durch Eichmessungen ausgeglichen werden.

GRADIENTENSCHICHT MIT GASSCHICHT

Die vom Versuchstier infolge Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung abgegebene Wärme \dot{Q} fliesst nach dem Gradientenprinzip¹⁻³ durch eine dünne homogene Isolierschicht (Fig. 2):

$$\Delta T = (T_2 - T_3) = \frac{d}{A \cdot \lambda} \dot{Q} \quad (1)$$

Blieben die geometrischen Grössen A und d sowie die Wärmeleitfähigkeit λ der Gradientenschicht konstant, ist der Wärmestrom \dot{Q} direkt proportional der sich einstellenden Temperaturdifferenz an den beiden Oberflächen der Gradientenschicht. Somit kann der Wärmefluss \dot{Q} exakt durch eine Temperaturdifferenzmessung mit Hilfe von in Reihe geschalteten Thermoelementen^{1, 2} oder Widerstandsdrähten³ gemessen werden. Werden die Thermoelemente oder Widerstandsdrähte gleichmässig über der Fläche verteilt, bleibt das Messsignal ΔT (bei kleinem ΔT) exakt proportional dem gesamten Wärmestrom \dot{Q} , unabhängig von der örtlichen Verteilung des Wärmeflusses.

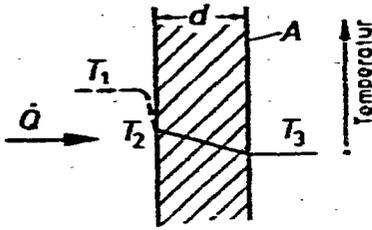


Fig. 2. Wärmefluss durch eine Gradientenschicht. \dot{Q} = Wärmefluss; d = Dicke der Gradientenschicht; A = Fläche der Gradientenschicht.

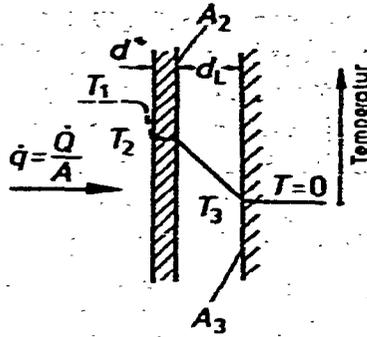


Fig. 3. Gradientenschicht mit eingeschlossener Luftschicht. d^* = Dicke der dünnen Plexiglasschicht; d_L = Dicke der Luftschicht.

Die Zeitkonstante τ als Mass für die thermische Trägheit der Gradientenschicht errechnet sich nach der Wärmeleitungsgleichung für eine homogene Platte^{4,5} zu

$$\tau = \frac{2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot d^2}{\pi^2 \cdot \lambda} = \frac{2}{\pi^2 \cdot a} \cdot d^2 \quad (2)$$

wobei ρ die Dichte, c_p die spezifische Wärme sind, $a = \lambda/c_p \cdot \rho$ die Temperaturleitzahl der Plexiglasschicht ist.

Durch Vergleich der Gln. (1) und (2) erkennt man, dass bei festliegenden Stoffwerten die Dicke d nur wenig variiert werden kann, um einen relativ grossen Messeffekt ΔT bei kleiner Zeitkonstante τ zu erzielen.

Um die Zeitkonstante τ klein zu halten, wird üblicherweise die Dicke d der homogenen Gradientenschicht gering ($d = 1-2,5$ mm) gewählt. Hierdurch wird jedoch wegen des geringen Messeffektes eine aufwendige, genaue Thermostatisierung des Kalorimeters erforderlich¹⁻³.

Ein günstigeres Verhältnis zwischen Messeffekt ΔT und Zeitkonstante τ wird erreicht, wenn in die Gradientenschicht eine Luftschicht eingeschlossen wird. In Fig. 3 ist der Temperaturverlauf einer solchen Gradientenschicht dargestellt. Werden die Temperaturen T_2 und T_3 an den inneren Oberflächen A_2 und A_3 der Gradientenschicht gemessen, so ist der Messeffekt ΔT^*

$$\Delta T^* = \frac{\dot{Q}}{A} \frac{d_L}{\lambda_L} = \dot{q} \frac{d_L}{\lambda_L} \quad (3)$$

Zur Berechnung der Zeitkonstanten τ^* kann näherungsweise die folgende Wärmebilanzgleichung (4) aufgestellt werden, wenn man berücksichtigt, dass die Wärmeleitfähigkeit von Plexiglas λ viel grösser als die von Luft λ_L ist und die Wärmekapazität der Luft gegenüber der des Plexiglases vernachlässigt wird.

$$\dot{q} \cdot dt = \rho \cdot c_p \cdot d^* \cdot dT_2 + \frac{\lambda_L}{d_L} \cdot T_2(t) \cdot dt \quad (4)$$

In Gl. (4) bedeuten: $\dot{q} \cdot dt$ die in die Gradientenschicht im Zeitintervall dt hineinfließende Wärme pro Fläche A , $\rho \cdot c_p \cdot d^x \cdot dT_2$ die in der Gradientenschicht gespeicherte Wärme pro Fläche A und $\lambda_L/d_L \cdot T_2(t) \cdot dt$ die im Zeitintervall dt aus der Gradientenschicht abfließende Wärme pro Fläche A .

Die Lösung der DGL (4) ist

$$T_2(t) = \frac{d_L}{\lambda_L} \cdot \dot{q} \cdot \left(1 - \exp \left[- \frac{\lambda_L}{\rho \cdot c_p \cdot d^x \cdot d_L} t \right] \right) \quad (5)$$

Für die Zeitkonstante τ^x einer Gradientenschicht mit eingeschlossener Luftschicht ergibt sich somit der einfache Ausdruck

$$\tau_{\frac{1}{2}}^x \approx \frac{\ln 2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot d^x \cdot d_L}{\lambda_L} \quad (6)$$

Wird gleichzeitig ein Strahlungsaustausch zwischen der inneren und äusseren Plexiglasschicht berücksichtigt, ergibt sich durch eine ähnliche Ableitung

$$\tau_{\frac{1}{2}}^x \approx \frac{\ln 2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot d^x \cdot d_L}{\lambda_L + d_L \cdot \alpha_s} \quad (7)$$

Hierbei ist α_s der Wärmeübergangskoeffizient für den Strahlungsaustausch. Für dünne Luftschichten gilt $\lambda_L \gg d_L \cdot \alpha_s$. Aus den Gln. (3) und (6) folgt, dass ein relativ grosser Messeffekt ΔT^x bei geringer Zeitkonstante τ^x durch ein relativ grosses d_L bei geringem d^x erreicht wird.

Die Luftschichtdicke d_L lässt sich jedoch nicht beliebig vergrössern, weil mit steigendem Messeffekt auch die Innentemperatur T_1 des Kalorimeters ansteigt, was die physiologischen Bedingungen des Versuchstieres beeinträchtigt. Die Dicke d^x der Plexiglasschicht lässt sich aus Gründen der Stabilität nicht beliebig verringern, aber auch deswegen nicht, weil in sehr dünnen Plexiglasschichten die Wärmestrahlung nicht vollkommen absorbiert wird.

Ein Zahlenbeispiel soll die beiden Konstruktionen in Fig. 2 und Fig. 3 vergleichen. Beide Gradientenschichten sollen dieselbe Zeitkonstante $\tau_{\frac{1}{2}} = \tau_{\frac{1}{2}}^x = 26,4$ sec besitzen. Die Konstruktion in Fig. 2 besteht aus einer homogenen Plexiglasschicht von $d = 3,8$ mm und besitzt einen Messeffekt von $\Delta T = 0,16^\circ\text{C}$. Die Konstruktion in Fig. 3 besteht aus einer dünnen Plexiglasschicht von $d^x = 0,5$ mm, einer Luftschicht der Dicke $d_L = 1,16$ mm und besitzt einen Messeffekt von $\Delta T^x = 0,34^\circ\text{C}$.

Speziell für Kurzzeitmessungen ist eine sehr geringe Zeitkonstante τ^x der Gradientenschicht erwünscht. Aus Gleichung (6) ergibt sich für die Gradientenschicht der Konstruktion in Fig. 3 eine kleinere Zeitkonstante τ^x , wenn statt Luft ein Gas mit grösserer Wärmeleitfähigkeit λ verwendet wird. Verwendet man deshalb in unserem Zahlenbeispiel eine Wasserstoffschicht $d_{\text{H}_2} = 1,16$ mm, so ergibt sich etwa eine Zeitkonstante $\tau_{\frac{1}{2}}^x < 6$ sec und ein Messeffekt von $\Delta T^x \approx 0,075^\circ\text{C}$.

Man kann somit die gleiche Gradientenschicht für Langzeitmessungen und Kurzzeitmessungen verwenden, indem man im ersten Fall Luft und im zweiten Fall Wasserstoff in die Gradientenschicht einströmen lässt.

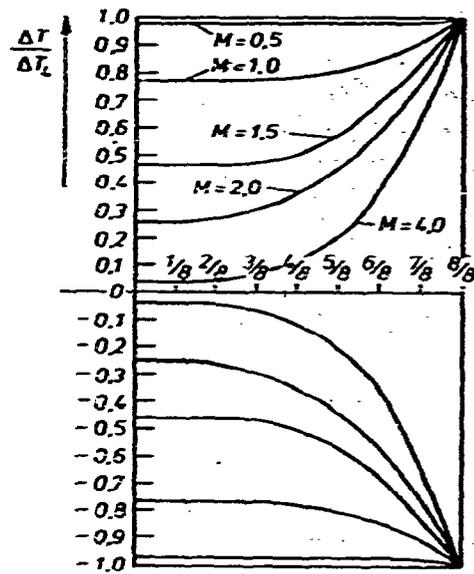
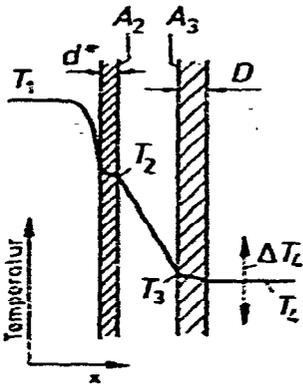


Fig. 4. Dämpfung der äusseren Temperaturwelle in der Gradientenschicht. D = Dicke der äusseren Plexiglasschicht.

Fig. 5. Amplitude der Temperaturwelle in einer ebenen Platte bei periodisch veränderlichen Oberflächentemperaturen. Abzisse x/D ; Ordinate $\Delta T/\Delta T_L$.

Wie eingangs schon erwähnt, hat diese Gradientenschicht wegen des grösseren Messeffektes den Vorteil, dass die unvermeidbaren Temperaturschwankungen des Kühlwassers nicht so stark ins Gewicht fallen. Den noch verbleibenden Messfehler durch Schwankungen der Kühlwassertemperatur kann man leicht noch weiter durch Dämpfung der Temperaturschwingung in der Plexiglasschicht verringern. Die Temperaturschwankungen des Kühlwassers ΔT_4 erzeugen eine in die äussere Plexiglasschicht (Fig. 4) eindringende Temperaturwelle, deren Amplitude mit zunehmender Eindringtiefe abnimmt. Die an der inneren Oberfläche A_3 auftretende verkleinerte Amplitude ΔT_3 kann als oberes Mass für den absoluten Messfehler der Gradientenschicht angesehen werden. Diese Amplitude kann durch eine Näherungsrechnung bestimmt werden. Hierbei kann wegen $\lambda_L \ll \lambda$ die äussere Plexiglasschicht an der Innenseite A_3 als vollkommen isoliert angesehen werden. Das Problem einer ebenen, einseitig isolierten Platte mit periodischer Oberflächentemperatur wurde bereits exakt analytisch gelöst⁴. Die Funktion der Maximalamplitude der in die Platte eindringenden Temperaturwelle hat die Form

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_4} = f_1(M, x) \quad (8)$$

wobei

$$M = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{a \cdot t_0}} \quad (9)$$

eine dimensionslose Kennzahl und t_0 die Periodendauer der Temperaturschwankung bedeuten. In Fig. 5 ist die Funktion Gl. (8) in dimensionsloser Form dargestellt. Hiernach nimmt die Dämpfung einer Temperaturwelle mit steigendem Wert von M zu, d.h. entsprechend Gl. (9) mit zunehmender Dicke D und mit abnehmender Temperaturleitzahl α und Periodendauer t_0 .

Ein Zahlenbeispiel soll die bei Verwendung eines üblichen Ultra-Thermostaten ($\Delta T_4 = 0,02^\circ\text{C}$) bei Langzeitmessungen erreichbare Genauigkeit demonstrieren. Bei einer äusseren Plexiglasschicht von 2 mm Dicke ergibt sich ein Wert von $M \approx 2$ und aus Fig. 5 eine Amplitude von $\Delta T_3 \approx 0,28 \cdot \Delta T_4$. Das bedeutet bei dem früher berechneten Messeffekt von $T_2 - T_3 = 0,34^\circ\text{C}$ einen max. relativen Fehler von 1,6%.

MODIFIZIERTES LiCl-CaCl₂-TAUPUNKTHYGROMETER

Die Luftfeuchtemessung mit einem LiCl-Taupunkthygrometer⁶⁻⁸ zeichnet sich durch einen einfachen technischen Aufbau, geringe thermische Trägheit und eine geringe Wartung aus. Da LiCl hygroskopisch ist, ist der Dampfdruck einer gesättigten LiCl-Lösung geringer als der Dampfdruck von ungebundenem Wasser gleicher Temperatur (Fig. 6). Erhöht man die Temperatur der LiCl-Lösung so weit, bis der Partialdruck des hygroskopischen Wassers gleich dem Partialdruck der umgebenden Luft ist, tritt ein Gleichgewichtszustand ein. Oberhalb dieser Umwandlungstemperatur T_u wird das LiCl trocken. Fig. 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines LiCl-Taupunkt-

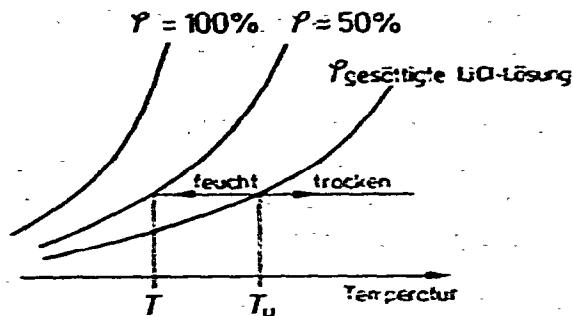


Fig. 6. Dampfdruckkurven von ungebundenem Wasser und von gesättigter LiCl-Lösung. T = Temperatur der Luft; T_u = Umwandlungstemperatur.

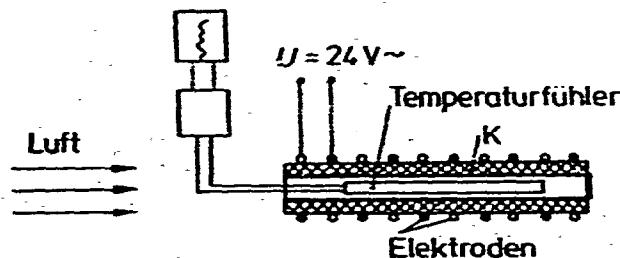


Fig. 7. Prinzipieller Aufbau eines LiCl-Taupunkthygrometers. K = Kunststoffaserschicht mit gesättigter LiCl-Lösung getränkt.

hygrometers. Da feuchtes LiCl den elektrischen Strom leitet, trockenes LiCl dagegen nicht, wird der Messfühler (Fig. 7) durch die Joule'sche Wärme des durch die mit LiCl-Lösung getränkte Kunstfaserschicht fließenden elektrischen Stromes selbstregelnd auf die Umwandlungstemperatur T_u erwärmt. Die mit dem Temperaturfühler gemessene Temperatur T_u ist somit ein Mass für den Dampfdruck und die Feuchte ϕ der umgebenden Luft.

Im Hinblick auf eine hohe Messgenauigkeit des LiCl-Taupunkthygrometers werden im Folgenden die Fehlerquellen und soweit möglich deren Beseitigung diskutiert.

Die Erfahrung zeigt, dass die Umwandlungstemperatur T_u nicht nur von der Luftfeuchte ϕ sondern auch von der Lufttemperatur T sowie deren Strömungsgeschwindigkeit abhängt⁶⁻⁸. Dies lässt sich wie folgt erklären. Aufgrund von Experimenten⁷ wurde festgestellt, dass entsprechend Fig. 8 die Umwandlungstemperatur T_u nicht nur von der Luftfeuchte ϕ sondern auch von dem Widerstand R der LiCl-Schicht abhängt. Dieser Widerstand R beeinflusst die erzeugte Joule'sche Wärme N_{el} , die an die Umgebung abgegeben werden muss.

$$N_{el} = \frac{U^2}{R} = \dot{Q}_{ab} \quad (10)$$

Die Wärmeabgabe \dot{Q}_{ab} ist wiederum von der Strömungsgeschwindigkeit und von der Umgebungstemperatur T abhängig. Für eine hohe Messgenauigkeit des LiCl-Taupunkthygrometers sollte also die Luft mit konstanter Temperatur T und konstanter Luftgeschwindigkeit den LiCl-Messfühler umströmen. Der LiCl-Taupunkthygrometer erreicht dadurch eine Messgenauigkeit von ϕ , die einem $\Delta T = 0,15^\circ\text{C}$ des Taupunktes entspricht⁷.

Ein weiterer Messfehler entsteht dadurch, dass bei Langzeitmessungen besonders an den Enden des LiCl-Fühlers ein Wandern des LiCl auftritt. Um die Ursache des unerwünschten Wanderns des LiCl zu untersuchen, wurde bei einem LiCl-Taupunkthygrometer, nachdem er drei Monate ständig im Einsatz war, der spezifische Widerstand ρ der LiCl-Schicht über der Länge des Messfühlers gemessen. Wie in

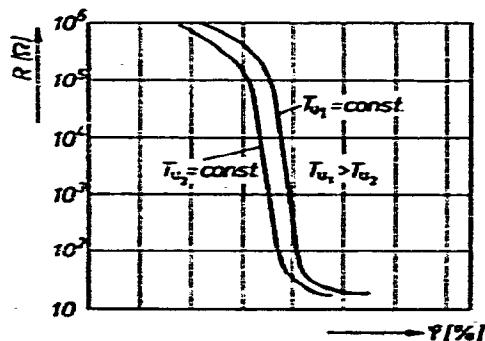


Fig. 8. Abhängigkeit der Luftfeuchte ϕ vom Widerstand R der LiCl-Schicht bei konstanten Umwandlungstemperaturen T_{u_1} bzw. T_{u_2} .

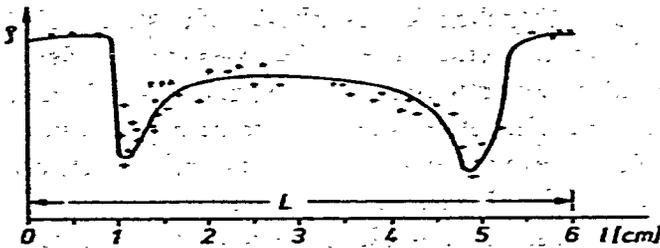


Fig. 9. Spez. Widerstand ρ der LiCl-Schicht über der Länge l des Messfühlers nach drei Monaten.

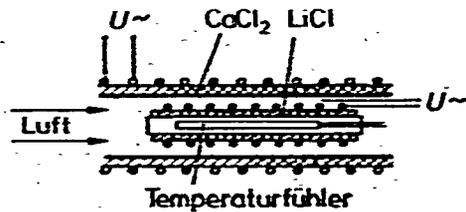
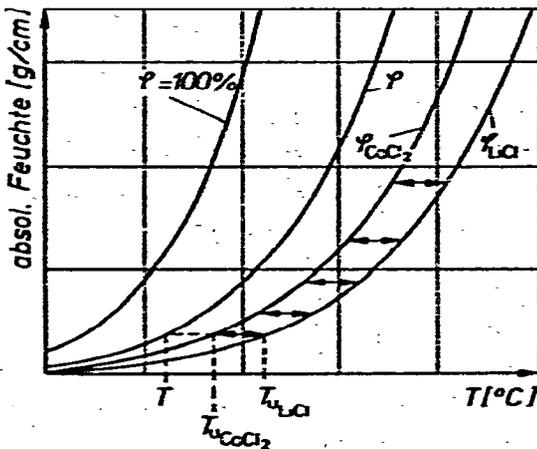


Fig. 10. Dampfdruckkurven von ungebundenem Wasser, gesättigter CaCl_2 -Lösung und gesättigter LiCl-Lösung. Prinzipieller Aufbau eines LiCl- CaCl_2 -Taupunkthygrometers.

Fig. 9 dargestellt, ist das LiCl von den Enden des Messfühlers (Fa. Siemens) ca. 12 mm nach innen gewandert, wo der spezifische Widerstand ρ ein Minimum und entsprechend Gl. (10) die örtliche Wärmeabgabe \dot{q}_{ab} ein Maximum aufweisen. Das Wandern des LiCl lässt sich möglicherweise folgendermassen erklären: Wegen der zusätzlichen Wärmeabgabe an den Stirnflächen ist wegen Gl. (10) der spez. Widerstand ρ an den Enden des Fühlers geringer als in der Mitte. Aus Fig. 8 ist ersichtlich, dass bei gleicher Luftfeuchte ϕ und kleinerem Widerstand R bzw. ρ die Umwandlungstemperatur T_u niedriger ist. Folglich tritt an den Enden des LiCl-Fühlers ein Temperaturgefälle auf. Durch Thermodiffusion wandert das LiCl in Richtung steigender Temperatur zur Mitte des Fühlers hin.

Das Temperaturgefälle an den Enden und damit die LiCl-Wanderung lässt sich dadurch verringern, dass man die Differenz zwischen Fühler- und Umgebungstemperatur klein hält. Bei dem modifizierten LiCl- CaCl_2 -Taupunkthygrometer wird die Temperaturdifferenz zur Umgebung dadurch verringert und sogar nahezu konstant gehalten, dass die Umgebungsluft durch ein zweites konzentrisches Röhrchen entsprechend Fig. 10 mit aufheizt wird. Die Aufheizung erfolgt nach dem gleichen Prinzip, welches beim LiCl-Fühler (Fig. 7) angewandt wird. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass man CaCl_2 anstelle von LiCl verwendet. Aus Fig. 10 geht hervor,

dass bei gleicher Luftfeuchte das äussere Röhrchen kälter als der Fühler ist und ausserdem die Temperaturdifferenz bei veränderlicher Feuchte annähernd gleich bleibt. Durch diese Konstruktion wird also zweierlei erreicht. Erstens wird der Fehler verringert, der dadurch entsteht, dass die Umgebungstemperatur beim herkömmlichen Fühler das Messergebnis beeinflusst; zweitens wird der Fehler verkleinert, der durch die Wanderung des LiCl verursacht wird. Letzteres konnte durch Experimente gut bestätigt werden. Hierbei wurde die Wanderung des LiCl auf ein Viertel reduziert. Der einzige Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die untere Grenze der messbaren Feuchte ϕ etwas höher liegt als beim üblichen LiCl-Taupunkthygrometer.

ERFAHRUNGEN MIT DEM KALORIMETER

Es wurde ein Direktkalorimeter für Albino-Ratten nach dem in Fig. 1 erläuterten Prinzip gebaut. Da nur Langzeitmessungen durchgeführt werden sollten, wurde die Luftschichtdicke der Gradientenschicht $d_L \approx 5$ mm gewählt. Soll das Kalorimeter sowohl für Kurzzeit- als auch Langzeitmessungen verwendet werden, ist eine Luftschichtdicke von $d_L = 1-2,5$ mm zu empfehlen.

Ein konstanter Luftstrom durch das Kalorimeter (Fig. 1) wurde durch eine Saugpumpe mit vorgeschaltetem Feindosierventil erreicht.

Für eine kontinuierliche Luftfeuchtemessung bis zu ca. 7 Tagen arbeitet ein normaler LiCl-Taupunkthygrometer, der in einem Strömungskanal gleichmässig von Luft mit konstanter Temperatur umströmt wird, hinreichend genau. Anschliessend muss der LiCl-Fühler jeweils wieder neu regeneriert werden. Soll der Messfühler längere Zeit ständig im Einsatz sein, ist ein modifiziertes LiCl-CaCl₂-Taupunkthygrometer zu empfehlen.

Mit dem gebauten Tierkalorimeter wurden zahlreiche Messungen der Umsatz-Zeit-Funktion an Albino-Ratten durchgeführt.

DANK

Der Autor dankt Herrn Prof. Dr. A. Knappwost für die Anregung zu dieser Arbeit, so wie für seine Unterstützung. Weiterhin dankt der Autor Herrn Prof. Dr. W. Roetzel für die fruchtbaren Diskussionen über spezielle Gebiete der Wärmeübertragung.

LITERATUR

- 1 T. H. Benzinger und C. Kitzinger, *Rev. Sci. Instr.*, 20 (1949) 849.
- 2 T. H. Benzinger, R. G. Huebscher, D. Minard und C. Kitzinger, *J. Appl. Physiol.*, 12 (1958) S1.
- 3 G. Spinnler, E. Jéquier, R. Favre, M. Dolivo und A. Vannotti, *J. Appl. Physiol.*, 35 (1973) 158.
- 4 W. Bothe, *J. Appl. Physiol.*, 12 (1958) 525.
- 5 Gröber, Erk und U. Grigull, *Wärmeübertragung*, Springer, Berlin, 1963.
- 6 C. B. Tanner und V. E. Suomi, *Trans. Am. Geophys. Union*, 37 (1956) 413.
- 7 D. E. Nelson, und E. J. Amdur, *Humidity and Moisture*, Vol. 1, Reinhold, New York, 1966, p. 617.
- 8 C. P. Hedlin und F. N. Trofimenkoff, *Humidity and Moisture*, Vol. 1, Reinhold, New York, 1966, p. 627.