



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

18

Die Thermodynamik der Taubildung

von
Gustav Hofmann



Zitationsvorschlag:

Hofmann, Gustav: Die Thermodynamik der Taubildung. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1955.

(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 18)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Herausgeber und Verlag: _____ :

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: www.dwd.de

Mail: bibliothek@dwd.de

Inhalt :

	Seite		Seite
Vorwort	3	III. Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Arbeiten	19
Liste der verwendeten Zeichen und Einheiten ..	4	1. Der Tau als negative Verdunstung (Robitzsch)	19
Zusammenfassung	5	2. Die energetische Seite der Taubildung (Leick, Seemann u. Löw, Zunker, Yamamoto)	19
I. Das Tauproblem	5	3. Messungen des Taus über den Wärmehaushalt und den Austausch (Halstead, Krügler, Thornthwaite u. Holzman)	20
1. Definition und Beschreibung des Taus und verwandter Niederschlagsformen	5	4. Die Untersuchungen von T. Homén und E. Wollny	20
2. Häufigkeit und zeitliche Verteilung	6	5. Der Pflanzenfaktor (Kerner, Hiltner, Bernick)	21
3. Maximalwerte einer Nacht	6	6. Zur Verwendung von Quotienten u. ä. bei der Taumessung (Leick, Stephan, Lehmann u. Schanderl)	24
4. Summenwerte größerer Zeitabschnitte Der Tau als Glied des Wasserhaushalts	7	7. Lysimeter und innerer Tau (Wollny, Lehmann u. Schanderl, Bernick u. a.) ..	25
5. Die biologische Bedeutung des Taus	7	8. Der Einfluß der Witterungsfaktoren (Wells, Leick, Hiltner, Zattler u. a.)	26
6. Die Taumeßtechnik	7	9. Der Einfluß des Mikroklimas (Leick, Steiner u. Fleischmann, Steubing u. a.) ..	28
7. Kleinräumige Verteilung, Einfluß der Witterung	8	10. Zur Weiterentwicklung der derzeitigen Taumess- technik (Leick, Gelbke)	30
8. Die Herkunft des Taus	8	IV. Der thermoelektrische Taumesser	32
II. Die Thermodynamik der Taubildung	8	1. Das Meßprinzip	32
1. Der Tau als Teil des nächtlichen Energiehaushaltes	8	2. Die Entwicklung des Meßgerätes	32
2. Die Energiebilanzgleichung	9	3. Die Beschreibung der Meßanordnung	33
3. Der Energie- und Stofftransport durch Austausch und an einer Grenzfläche	9	4. Die theoretischen Grundlagen	35
4. Herleitung und Diskussion der einfachen Tauformel	10	5. Die Bestimmung der Koeffizienten und anderer charakteristischer Größen	36
5. Herleitung der von der Oberflächentemperatur freien Tauformel, Darstellung der Koeffizienten	10	6. Die Messungen und deren Auswertung	37
6. Zur Methodik der Taumessung	11	7. Die Meßergebnisse	39
7. Das Maximum des Taufalles	14	8. Die weitere Arbeit	42
8. Zur Thermodynamik der Rauhreifbildung ..	15	Literatur	43
9. Abschätzungen des Einflusses bisher vernachlässigter Faktoren (örtliche Variabilität der Wärmeübergangszahlen, Emissionskoeffizient, Hygroskopizität)	16		
10. Die Analogie zwischen der Taubildung und der elektrolytischen Abscheidung	18		

Die vorliegende Arbeit wurde als Habilitationsschrift zur Erlangung der
venia legendi für das Fach Meteorologie der Hohen Naturwissenschaft-
lichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität zu München
vorgelegt.

Anschrift des Verfassers:

Dr. G. Hofmann, München 13, Amalienstr. 52/III,
Meteorologisches Institut.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit möge als Beitrag zur Frage des Energie- und Wasserhaushaltes des Bodens und der bodennahen Luftschicht gewertet werden, der ein großer Teil der Arbeit des Meteorologischen Instituts in München gilt. Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr. Rudolf Geiger, bin ich für stetes Interesse, viele Hinweise und Ratschläge zu besonderem Dank verpflichtet. Er stellte mir die Einrichtungen und Mittel des Instituts in so weitem Maße zur Verfügung, als es die heutigen vor allem in finanzieller Hinsicht begrenzten Möglichkeiten erlaubten. Mein Dank muß aber auch dem nunmehr verstorbenen früheren Leiter des Institutes, Herrn Geheimrat Prof. Dr. August Schmauß gelten, dessen vielfache Beobachtungen zur Tau- und Reifbildung eine Quelle steter Anregung bildeten. Beim Bau des im letzten Teil der Arbeit beschriebenen thermoelektrischen Taumessers hatte ich die Hilfe des Herrn Werkmeisters G. Weinberger, der auch den Platz für die Durchführung der Freilandversuche zur Verfügung stellte und das Gerät betreute. Bei den umfangreichen Auswertearbeiten unterstützte mich Frau A. Pazzeller. Ihnen darf ich an dieser Stelle ebenso danken wie meinen Kollegen am Institut, die ihre Zeit für manche Diskussion opferten.

Liste der verwendeten Zeichen und Einheiten

In der folgenden Liste sind Formelzeichen, die an verschiedenen Stellen der Arbeit verschiedene Bedeutung haben, durch die Angabe der Stelle gekennzeichnet. Formelzeichen, die nur an einer Stelle auftreten und deren Bedeutung dort hinreichend klar ist, wurden weggelassen.

- A (II, 3) Austauschkoeffizient ($g\ cm^{-1}\ sec^{-1}$)
- A_{eff} (II, 5) Ausstrahlung nach [19] ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- a Temperaturleitzahl ($cm^2\ sec^{-1}$)
- B aus dem Körperinneren zur Oberfläche strömende Wärme ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- b Luftdruck, in [41] mit B bezeichnet (Torr)
- c_p spezifische Wärme der feuchten Luft bei konstantem Druck, siehe Tab. 3 ($cal\ g^{-1}\ grad^{-1}$)
- D Diffusionskoeffizient des Wasserdampfes gegen Luft ($cm^2\ sec^{-1}$)
- E Dampfdruck einer ebenen Oberfläche reinen Wassers der Temperatur ϑ (Torr)
- E_L wie E, bei der Temperatur ϑ_L ; Sättigungsdampfdruck der Luft, in [41] mit E_w bezeichnet (Torr)
- e_L Dampfdruck der Luft, in [41] mit e_1 bezeichnet (Torr)
- G Gegenstrahlung ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- H (III, 5) Höhe des äquivalenten Zylinders (cm)
- H (IV) Heizleistung je Flächeneinheit ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- h Stoffübergangszahl für Wasserdampf; Ventilationsfaktor ($g\ cm^{-2}\ sec^{-1}$ o. ä.)
- L aus der Luft zur Oberfläche kommender Wärmestrom ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- R (III, 5) Radius des äquivalenten Zylinders (cm)
- r Verdampfungsenthalpie des Wassers (Eises); Verdunstungswärme, Sublimationswärme, siehe Tab. 3 ($cal\ g^{-1}$)
- S Strahlungsbilanz einer Oberfläche der Temperatur ϑ ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- S_B Strahlungsbilanz des Bodens ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- S_L Strahlungsbilanz einer Fläche der Temperatur ϑ_L (S_{L1} für die Oberseite, S_{L2} für die Unterseite der Platte) ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- S_H S_v , S_z Strahlungsbilanz einer horizontalen ($= S_L$), einer vertikalen Fläche, eines Zylinders bezogen auf die Deckfläche ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- s_L spezifische Feuchte der Luft

- s_M maximale spezifische Feuchte bei der Temperatur ϑ
- T absolute Temperatur ($^{\circ}K$)
- T_L absolute Lufttemperatur ($^{\circ}K$)
- t Zeit (z. B. sec.)
- V bei der Phasenumwandlung freiwerdende Wärme; mit dem Wasserdampf transportierter latenter Wärmestrom; Tauwärme ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}$)
- v Windgeschwindigkeit ($m\ sec^{-1}$)
- W je Zeit- und Flächeneinheit kondensierender (sublimierender) Wasserdampf; zeitlicher Tauzuwachs usw. (W_1 für die Oberseite, W_2 für die Unterseite einer Platte) ($\mu g\ cm^{-2}\ min^{-1}$, $mm\ h^{-1}$ o. ä.)
- x Länge des Überströmungsweges von der luvseitigen Kante gerechnet, siehe II, 9 (mm)
- z vertikale Koordinate (m)
- α_L Wärmeübergangszahl, Mittelwert über die ganze Fläche ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-1}$)
- α_s Strahlungsübergangszahl gem. [23], s. Tab. 3 ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-1}$)
- α_v Wärmeübergangszahl des latenten Wärmestromes nach [25] ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-1}$)
- α (II, III) Summe der 3 Wärmeübergangszahlen α_L , α_s und α_v nach [26] ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-1}$)
- α (IV) Summe der 2 Wärmeübergangszahlen α_L und α_s nach [61] ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-1}$)
- β Wärmedurchgangszahl ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-1}$)
- γ Wärmekapazität der Flächeneinheit einer Platte ($mcal\ cm^{-2}\ grad^{-1}$)
- δ ebenso δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 Temperaturdifferenzen nach [61 a...d] ($^{\circ}C$) bzw. Anzeige dieser Größen (mV).
- ϵ Absorptionskoeffizient
- ϑ Temperatur ($^{\circ}C$)
- ϑ_L Lufttemperatur ($^{\circ}C$)
- λ Wärmeleitzahl der Luft ($cal\ cm^{-1}\ sec^{-1}\ grad^{-1}$)
- ν kinematische Zähigkeit ($cm^2\ sec^{-1}$)
- σ Stefan-Boltzmannsche Konstante ($mcal\ cm^{-2}\ min^{-1}\ grad^{-4}$)
- τ Thermospannung je $^{\circ}C$ (mV $grad^{-1}$)
- τ_{so} , τ_{vo} bzw. τ_s , τ_v Koeffizienten nach [13] bzw. [28]
- φ relative Luftfeuchtigkeit
- ω_{so} , ω_{vo} bzw. ω_s , ω_v Koeffizienten nach [17] bzw. [30]

Für die Umrechnung in andere Einheiten gilt
 $1\ kcal\ cm^{-2}\ min^{-1} = 69,8\ \mu W\ cm^{-2}$
 $= 0,60\ kcal\ m^{-2}\ h^{-1}$

Zusammenfassung

Einleitend wird an Hand der Literatur der derzeitige Stand der Taufrage aufgezeigt. Angaben über die Häufigkeit und die zeitliche Verteilung des Taufalles, die maximalen Mengen einer Nacht und Summenwerte größerer Zeitabschnitte sollen die Rolle des Taus im Wasserhaushalt kennzeichnen. Sodann wird die Taubildung als Teil des nächtlichen Energiehaushaltes betrachtet. Aus der Energiebilanzgleichung läßt sich mit Hilfe der Gesetze des Wärme- und Stoffübergangs eine Tauformel ableiten. Sie ergibt den zeitlichen Tauzuwachs als Differenz zweier Terme, von denen im wesentlichen der eine der effektiven Ausstrahlung, der andere dem Produkt aus dem Sättigungsdefizit und einer die Ventilation kennzeichnenden Größe proportional ist. Da bei günstigsten Verhältnissen für die Taubildung bestenfalls der zweite Term verschwinden kann, findet man so aus dem ersten eine energetische Grenze für die Taumenge. Sie liegt für mitteleuropäische Verhältnisse etwa bei 0,7 mm Tau für einen zehnstündigen Taufall, erreicht aber auch unter günstigsten Umständen 1 mm/Nacht nicht. Zusammen mit den bekannten Gesetzen des Wärmeüberganges bietet die Tauformel eine qualitativ und quantitativ ausreichende Basis für eine zwanglose Deutung der Bevorzugung von Kanten und Spitzen bei der Bildung des Rauhreifs.

Der Vergleich der Ergebnisse des theoretischen Teiles der Arbeit mit der Tauliteratur betrifft zunächst die Veröffentlichungen zur Physik der Taubildung (M. Robitzsch, F. Zunker, G. Yamamoto u. a.). Eingehend werden die Arbeiten von T. Homén und E.

Wollny besprochen. Eine physikalisch-meteorologische Analyse der Versuche von E. Hiltner, die dem in der botanischen Tauliteratur viel gebrauchten „Pflanzenfaktor“ zugrunde liegen, zeigt, daß sein Wert ($\sim 5,5$) auf einem Trugschluß beruht. Als unzulässig erweist sich auch die Verwendung von Quotienten u. ä. beim Vergleich von Einzelmessung des Taufalles und insbesondere die Berechnung von Tauwerten mit Hilfe der wahren Pflanzenoberflächen. Die Notwendigkeit klarer Begriffe wird an Hand der Lysimeterversuche gezeigt, die auch auf eine Überschätzung der Bedeutung des inneren Taus in vielen Arbeiten hinweisen. Ein Vergleich der Aussagen der Tauformel über die Abhängigkeit des Taus von den Witterungsfaktoren mit entsprechenden Angaben der Literatur ergibt eine gute Übereinstimmung. Ebenso erlaubt die Tauformel eine zwanglose Deutung der bisher gefundenen Einflüsse des Mikroklimas. Schließlich werden aus den gefundenen Gesetzmäßigkeiten Folgerungen für die Weiterentwicklung der besonders von E. Leick und W. Gelbke geförderten Taumeßtechnik gezogen.

Im letzten Teil der Arbeit wird ein Taumesser auf kalorischer Basis beschrieben, der zunächst die Messung aller Komponenten des Wärmehaushaltes eines künstlichen Taufängers erlaubt. Einige für bestimmte Kombinationen der meteorologischen Elemente charakteristische Registrierungen zeigen die Bedeutung der energetischen Voraussetzungen für den Taufall. Weitere Aufklärungen wird aber nur eine möglichst vollständige Erfassung aller mikrometeorologischen Parameter bringen können, der die weitere Arbeit gelten muß.

I. Das Tauprobem

1. Definition und Beschreibung des Taus und verwandter Niederschlagsformen

Unter den atmosphärischen Niederschlagsformen nehmen Tau, Reif, Rauhreif und Beschlag insofern eine Sonderstellung ein, als sie an festen Körpern in der Nähe der Erdoberfläche direkt aus der Gasphase gebildet werden. Soweit es das Aussehen des Niederschlages betrifft, sind die Grenzen vielfach fließend, so daß nur eine genaue Beschreibung, die auch den Bildungsmechanismus umfaßt, eine Trennung ermöglicht.

Tau: Wassertröpfchen, die sich als Folge der direkten Kondensation aus der anliegenden klaren Luftschicht auf den durch nächtliche Ausstrahlung abgekühlten, wesentlich horizontalen Flächen ablagern (12).

Reif: Leichte schuppen-, nadel-, feder- oder fächerähnliche Eiskristalle, die in analoger Weise wie der Tau durch Sublimation abgelagert werden (12).

Rauhreif: Feine Nadeln oder blattförmige Bildungen von deutlich kristallinischer Struktur. Zuweilen sechszackige Kristalle. Ablagerung im Luv aufragender Gegenstände. Unmittelbare Ausscheidung des Wasserdampfes in fester Form (Sublimation) aus unterkühltem Nebel oder Dunst bei Sättigung oder Übersättigung der Luft über Eis. Nebel gewöhnlich vorhanden, aber nicht erforderlich (39).

Beschlag: (in flüssiger Form) Kondensation,

(in fester Form) Sublimation an wesentlich vertikalen Flächen (12).

Sieht man vom Aggregatzustand ab, so unterscheiden sich die genannten Niederschlagsformen vor allem durch die Art des Abtransports der bei ihrer Bildung freiwerdenden Wärme. Bei Tau und Reif wird die Bildungswärme durch die Ausstrahlung kompensiert. Beim Beschlag (Frostbeschlag) nimmt sie der Körper auf, an dessen Oberfläche der Niederschlag auftritt. Beim Rauhreif schließlich spielt der Abtransport in die (kältere) Luft eine entscheidende Rolle.

Nachträgliche Temperaturänderungen führen zum gefrorenen Tau (28) (59) und geschmolzenen Reif. Manchmal kann man auch bei Temperaturen unterhalb 0°C unterkühlten Tau beobachten (37). Auf die wohl ergiebigste Art direkter Kondensation hat neuerdings H. G. Müller (71) hingewiesen. Sie entsteht, wenn feuchte, warme Luft mit einem Taupunkt von mehr als 0°C über eine Schneedecke streicht. Die dabei freiwerdende Kondensationswärme vermag etwa das 8-fache der Kondensatmenge an Schnee zu schmelzen und so zum raschen Abbau der Schneedecke beizutragen.

In seiner äußeren Erscheinung und wegen des vielfach gleichzeitigen Auftretens auch meßtechnisch meist nicht zu trennen vom echten Tau ist der Nebeltau. Man versteht darunter eine echte Nebelablagerung, wobei der dünne flache Bodennebel nicht zu erkennen ist. Bei

ihm wird wie bei den übrigen Nebelniederschlägen die Kondensationswärme schon in der Luft frei. Ähnliche Verhältnisse liegen bei Rauheis vor, während bei Rauhfrost noch ein wenn auch untergeordneter Sublimationsanteil vorhanden ist.

Die später abgeleiteten Beziehungen gelten zwar für alle Formen direkter Niederschlagsbildungen aus der Gasphase also auch für den Beschlag, den Rauhref und die Sublimationsanteile des Rauhfrostes, sie sollen aber vor allem auf den echten Tau und den echten Reif angewandt werden.

2. Häufigkeit und zeitliche Verteilung

Die in der Literatur bekannt gewordenen Ergebnisse von Beobachtungen und Messungen des Taus und des Reifs sind vielfach durch gleichzeitig aufgetretene Ne-

belniederschläge verfälscht. Das Endprodukt ist eben in beiden Fällen gleich: ein Wasserfilm auf den Pflanzenoberflächen, dem Boden oder dem künstlichen Taufänger. Für eine ganze Reihe von Bearbeitern — so insbesondere für die in der Taufrage sehr regen Botaniker — bestand auch auf Grund ihrer Fragestellung kein Anlaß, eine scharfe Trennung der Niederschlagsprodukte nach ihrem Bildungsmechanismus zu treffen. E. Leick (63) sieht es sogar als einen Vorzug seiner Taufplatten an, daß sie neben dem Tau ebenso gut Nebelniederschläge oder leichte Regenfälle zu erfassen vermögen.

Über die Häufigkeit des Taufalles liegen für verschiedene Orte Angaben vor (20), (42), (116). Für mitteleuropäische Verhältnisse können wohl die Potsdamer Beobachtungen (4) als charakteristisch angesehen werden.

Tab. 1 Mittlere Zahl der Tau-(Reif-)tage in Potsdam nach B. Antonik
(Mittel der Jahre 1901—1948, ohne 1945)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Tau	1,7	1,8	4,9	10,4	15,1	13,7	16,8	19,3	22,9	18,7	11,3	3,3
Reif	6,7	7,0	7,3	3,3	0,6	—	—	—	0,6	4,3	7,5	7,8
Summe*)	8,4	8,8	12,2	13,7	15,7	13,7	16,8	19,3	23,5	23,0	18,8	11,1

Mit durchschnittlich 185 Tagen im Jahr ist also jeder zweite Tag in Potsdam ein Tag mit Tau oder Reif. Im September sind es sogar fast 80% aller Tage. Für München liegen die Verhältnisse ähnlich. So fiel 1953 nach den Beobachtungen der Klimastation München-Bogenhausen (125) an 144 Tagen Tau oder Reif, d. h. an 40% aller Tage.

Beobachtungen am Kew-Observatorium in England (26), (114) in den Jahren 1940—1944 ergaben im Mittel bei jährlich 104 Tau- und 45 Reiftagen die größte Tauhäufigkeit im September, die geringste im Februar und März, wo wiederum der Reif am häufigsten auftrat. Ältere Arbeiten (52), (105) zeigen allerdings manchmal so stark von den üblichen heutigen Angaben abweichende Werte, daß die offensichtlich vorhandenen methodischen Unterschiede keine Vergleiche mehr zulassen.

Für Palästina, aus dem ein erheblicher Teil der neueren Tauliteratur stammt, gibt S. Duvdevani (27) für 1937—1944 als mittleren Jahreswert 210 Tautage (58%) mit einem Maximum im Juli (90%) und dem Minimum im Dezember—Januar (25%) an, während N. Shalem (89) als die Zeit des häufigsten Taufalles den Spätf Frühling und als den Monat mit der geringsten Zahl der Taunächte den Oktober angibt. Von Palästina existiert sogar eine Isoplethenkarte (6) der Tauhäufigkeit und der Taumenge. Für das Gebiet um Moskau gibt S. J. Nebolsin (72) an, daß Tau nahezu jede Nacht während des Sommers beobachtet werden kann. H. v. Ficker (31) berichtet aus dem Pamirgebiet (in 3000 m Seehöhe) von 130 Tautagen in der Zeit vom 15. 5. bis 15. 10. 1913 (85%). Aus zweijährigen Beobachtungen findet L. B. Leopold (66) bei Honolulu 198 Tage (54%) mit Tau. Das Maximum trat im Januar, das Minimum im Juli auf.

Von der Namibwüste in SW-Afrika berichtet H. Walter (109), daß bis zu 200 Tage im Jahr (52%) mit Tau oder Nebel vorkommen, und aus dem Gebiet nördlich der Lüderitzbucht sogar von 295 Tagen (81%), an denen aber meist Nebel dabei war. Vom Mai 1912 bis April 1913 traten nach W. H. Pickering (76) in Jamaika 297 Taunächte (81%) auf.

*) Die Summe entspricht nicht genau der Zahl der Tage mit Tau oder Reif, da die Tage mit Tau und Reif doppelt gezählt sind. Die Fehler sind aber nicht groß.

3. Maximalwerte einer Nacht

Neben der Häufigkeit des Taufalles interessiert vor allem seine Menge. Allgemein kann gesagt werden, daß ein schwacher Tau weniger als 0,1 mm Niederschlag, ein starker Tau 0,3 mm und darüber entspricht. Sieht man von einer Angabe K. Wegeners (111) ab, der in Argentinien eine Tagesmenge von 5 mm schätzen zu können glaubte, bleiben die maximalen Werte meist zwischen 0,3 und 0,5 mm für eine Taunacht.

E. Wollny (115) findet bei München auf gefaltetem Filterpapier maximale Taumengen von 0,43 mm, auf Baumwolle 0,36 mm. Messungen des Meteorologischen Institutes München (8) in der Nähe Münchens ergaben maximal etwa 0,3 mm für Bodennähe. Starke Reifniederschläge auf den Brettern der Beobachtungsplattform des gleichen Instituts entsprachen 0,32 mm, während als Höchstwerte bei den zum Schluß dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen mit frei aufgestellten Leickschen Taufplatten über Rasen in 5 cm Höhe 0,37 mm, in 1 m Höhe 0,33 mm (vermutlich mit Nebeltau) gemessen wurden. Als höchsten Meßwert mit Leickschen Platten gibt W. Gelbke (36) 0,54 mm an; den Höchstwert 0,50 mm kann man einem Auszug aus Taumessungen in Ostpreußen von J. Stephan (96) entnehmen. In den dort mitgeteilten taureichen Monaten Mai und Juni der Jahre 1936 bis 1939 fiel am 197 Tagen Tau (82%), und zwar an 123 Tagen (51%) weniger als 0,1 mm, an 57 (24%) zwischen 0,1 und 0,3 mm und an 17 (7%) über 0,3 mm. Eine ähnliche Verteilung der Taumesswerte (77, 50, 20, 8%) fand G. Breitsprecher (15) im ungewöhnlich warmen und trockenen August 1932 auf Hiddensee bei 0,37 mm als Taumaximum. F. v. Kerner (58) gibt 0,54 mm als gemessenen Höchstwert an. In Südmähren fand V. Novák (73) maximale Taumengen von 0,25 mm, I. U. Sokhotskii (92) bei Leningrad und P. Adrianoff (1) bei Moskau 0,22 mm, S. Skinner (91) gibt für Südengland 0,43 mm an. In Palästina fand S. Duvdevani (27) bei Eichmessungen mit Leickschen Platten zu seinem optischen Taumesser kaum Werte über 0,35 mm. H. Walter (109) konnte in der Namib mit Leickschen Platten nie mehr als 0,7 mm messen und meint, daß ein erheblicher Teil dieses „Taus“ auf Nebelniederschläge zurückgeht. Für Batavia gibt S. W. Visser (106) bei E-Monsum 0,27 mm, bei W-Monsum 0,33 mm als höchste Werte an und W. H. Pickering 0,43 mm für Jamaika.

Da man annehmen muß, daß in einigen der angegebenen Höchstwerte Nebelniederschläge enthalten sind, halten sich die Unterschiede in erträglichen Grenzen. Dies gilt vor allem, wenn man bedenkt, daß die dabei verwendeten Meßmethoden zwar im Prinzip auf dem freien Aufstellen von Platten o. ä. beruhen, voneinander aber doch so stark abweichen, daß sich auch erheblich erscheinende Unterschiede im Meßergebnis zwanglos erklären lassen (50). Es gilt aber nicht mehr bei der Verwendung anderer Meßmethoden wie beispielsweise dem von V. P archinger (74) angegebenen Anpressen von Filterpapier an den taufeuchten Boden, das mehrfach angewandt wurde und verständlicherweise zu wesentlich niedrigeren Werten führen muß. Dagegen muß, wie später noch gezeigt werden soll (III, 4), die von E. Wollny (115) zumeist verwendete Methode zu hohe Werte liefern.

4. Summenwerte größerer Zeitabschnitte Der Tau als Glied des Wasserhaushaltes

Bei den in der Tauliteratur vielfach angeführten Summenwerten des Taus über größere Zeitabschnitte also insbesondere über Monate oder Jahre dürfte der relative Anteil der mitgemessenen Nebelniederschläge geringer sein als bei den maximalen Tauwerten, da nur die Witterungsbedingungen für starken Tau denen für Strahlungsnebel entsprechen. Dagegen muß man erwarten, daß sich die Unterschiede in der Form und der Aufstellung der Taufänger hier noch viel stärker bemerkbar machen. Die manchmal angegebenen Mittelwerte des Taufalles je Tag wurden sowohl als Mittelwerte für einen Tag überhaupt als auch als Mittelwert für einen Tag mit Tau oder auch für den regenfreien Tag gebildet, was natürlich allein schon wegen der Bezugsgröße zu Unterschieden bis zum Faktor 2 führen kann. Aber auch beim Mittelwert je Tautag muß bedacht werden, daß die Angabe, ob Tau fiel oder nicht, keineswegs die Sicherheit hat, die beispielsweise der Angabe „Sommertag“ o. ä. zukommt. Ebenso wie bei den Maximalwerten des Taus können einige ältere Angaben wegen der stark abweichenden Meßmethodik nicht zu einem Vergleich herangezogen werden.

Das gilt auch für die sehr umfangreichen Messungen von E. Wollny (115), die in der Nähe Münchens für 1881 28,8 mm und für 1882 31,8 mm Tau/Jahr ergaben, und für die Angaben E. Hiltners (44), der vom Mai bis September 1928 für München 38 mm errechnete. Nach Messungen von W. Bernick (13) auf Hiddensee wurden in den Monaten Juni mit September 1936 je etwa 3 mm Tau gefunden, durch V. Novák (73) in Südmähren im August 1936 3,6%, im September 7%, im Oktober 4% des im Regenmesser gemessenen Niederschlags. Für Antibes gibt L. E. Chaptal 43 mm, für Montpellier 36 mm als maximale Jahresbeträge an, für Florenz 8,2 mm. Nach Messungen von W. F. Badgley (7) wurden bei Tenbury 30 mm Tau im Jahr festgestellt und bei London 34 mm von G. Dines (24), der ältere Angaben mit 130 mm für frei erfunden ansieht. Einer Tafel der Zahl der Tautage und der Taumengen je Monat in Israel von S. Duvdevani (27) kann man als Jahresmittel für 1937 mit 1944 29,6 mm entnehmen, neuere Messungen (124) ergaben an 24 Stationen Jahresmengen zwischen 1,4 und 38 mm. In Transvaal fand H. Keller (57) über Gras 0,08 mm/Nacht, was 29 mm Tau im Jahr entspricht, und in der Namib H. Walter (109) 35—45 mm. Die Jahrestaumenge bei Honolulu schätzt L. B. Leopold (66) auf 20 mm. Für Jamaika gibt W. H. Pickering (76) 43 mm an.

5. Die biologische Bedeutung des Taus

Verglichen mit den Gesamtniederschlägen des Jahres sind die Taumengen im allgemeinen also gering. H.

Walter (110) hält daher auch die Wirkung des Taus auf die Pflanzen für gering. Noch so häufige Tau- (und Nebel-)bildung kann nach seiner Ansicht ein arides Klima nicht wesentlich humider machen. Durch Tau und Nebel wird der Wassergehalt des Bodens im allgemeinen nicht so gesteigert, daß es für die Pflanzen von Bedeutung ist. Auch die Wasseraufnahme durch oberirdische Pflanzenteile ist gering. Dagegen kann der Tau eine merkliche Transpirationseinschränkung in den Morgenstunden bewirken und die Wirkung kleiner Trockenperioden abschwächen. H. Walter weist auch darauf hin, daß der augenscheinlich große Taufall auf triefend nassen Wiesen gar kein echter Tau zu sein braucht, sondern eine Folge der Guttation sein kann.

Dagegen messen andere Botaniker wie E. Hiltner (44), (45), (46), F. Zattler (118), (119), (120), J. Stephan (94), (95), (96) und E. Leick (62), (63), (64) und dessen Schule (13), (15), (32), (98) dem Tau eine erheblich größere Bedeutung bei. Der Tau ist in den Trockenzeiten unserer Klimate und besonders in den Trockengebieten der Erde ein wichtiger, wenn nicht entscheidender Faktor. Wenn die Taumenge an sich auch gering ist, so fällt sie doch in Zeiten, in denen die Wasserversorgung der Pflanzen bedroht ist (96). Nach E. Hiltner (44) soll das salzfreie Tauwasser in seiner physiologischen Wirkung durch anderes Wasser nicht ersetzbar sein. Vor allem aber erhält die Pflanze auch nach Sonnenaufgang so lange eine Transpirationspause, bis der nachts gebildete Tau verdunstet ist. In diesem Zusammenhang sei auf eine neue Arbeit von J. M. Hirst (47) hingewiesen. Er findet, daß die an einer Pflanze hängenbleibende Wassermenge bei Regen kaum größer ist als bei mäßigem bis starkem Tau.

Die oben zitierten Arbeiten behandeln die Frage der biologischen Bedeutung des Taus sehr eingehend. Mehrfach wird auch der Einfluß des Taus auf die Entstehung von Pflanzenkrankheiten behandelt. Besonders sei auf die zusammenfassende Darstellung „Zum Tauproblem“ von J. Stephan (95) hingewiesen.

6. Die Taumeßtechnik

In ähnlich umfassender Weise wird in einer neueren Arbeit von E. Leick (64) die meßtechnische Seite des Tauproblems dargestellt. Durch die Entwicklung und unermüdliche Propagierung seines Standard-Taufängers hat es E. Leick erreicht, daß ein großer Teil der neueren Taumessungen mit der Leickschen Tauplatte durchgeführt oder zumindest an sie angeschlossen (27) wurde und somit schon ein sehr umfangreiches und viel homogeneres Beobachtungsmaterial vorliegt, als es die Fülle der fast unzählbaren verschiedenen früheren Meßmethoden zuließ. Sieht man von den schon erwähnten Methoden V. P archingers (74) und E. Wollnys (115) ab, so wird bei fast allen übrigen Taumeßmethoden eine Oberfläche in der Nacht den Einflüssen ihrer Umgebung ausgesetzt und der sich bildende Tau entweder durch Wägung (bzw. volumetrisch), aus dem Aussehen der betauten Fläche (27), (112) oder auch mit Hilfe anderer vom Tau beeinflusster Größen (34) bestimmt. Da die auf einer Fläche gebildete Taumenge in hohem Maße von der Energiebilanz dieser Fläche und damit von den Eigenschaften des Taufängers und seiner Umgebung abhängt, ist es verständlich, daß die in ihrer Form und der Art der Aufstellung sehr unterschiedlichen Taumesser auch erhebliche Unterschiede in den Meßwerten ergaben. Eine kritische Gegenüberstellung der gebräuchlichsten Taumeßmethoden verdanken wir W. Gelbke (36). In der vorliegenden Arbeit kann nur auf einige wenige eingegangen werden (III, 4; III, 5; III, 7; III, 10), da eine eingehende Besprechung aller in der Literatur angegebenen Methoden weit über den Rahmen der Arbeit hinausgehen würde.

7. Kleinräumige Verteilung, Einfluß der Witterung

Das gleiche gilt für die Frage der kleinräumigen Verteilung des Taus und der Abhängigkeit des Taus von den Witterungsbedingungen. Hier liegen eine ganze Reihe von Meßergebnissen vor, die sich mit Hilfe thermodynamischer Überlegungen deuten lassen. Leider fehlen in der Regel die für eine quantitative Verarbeitung nötigen Daten, so daß meist nur Abschätzungen oder qualitative Aussagen möglich sind. In Teil III, 8 und III, 9 wird näher auf diese Frage eingegangen.

8. Die Herkunft des Taus

Die auch heute noch viel erörterte Frage der Herkunft des Taus darf man wohl nicht nur vom Standpunkt des Naturwissenschaftlers aus sehen. Die besondere Bedeutung, die dem Tau in der Mythologie und im Brauchtum zukommt, die er in vielen Märgen als Lebenselixier und Wundermittel spielt, ist wohl nur aus der zunächst geheimnisvollen Art seines Auftretens zu verstehen. Daß ein Körper, der kein Wasser enthält, wie ein Stein, ein Stück Stoff, eine Holzbohle o. ä. in der scheinbar völlig wasserfreien Luft im Laufe der Nacht naß wird, ja so naß wird, daß das Wasser abläuft oder ausgedrückt werden kann, läßt zunächst ohne naturwissenschaftliche Kenntnisse keine einfache Erklärung zu. So ist es auch verständlich, daß bis ins Mittelalter (48) eine extraterrestrische Herkunft des Taus („oberhimmlische Wasser“) durchaus als plausibel galt. Als Ursprung des Taus wurde auch der Mond angesehen, der bis heute in der Volksmeinung als Ursache der starken Abkühlung in klaren Nächten gilt.

Aristoteles (5), (38) meint, daß das, „was tagsüber verdampft, aber wegen des zu geringen Wärmeeuftriebs nicht nach oben schweben kann, durch die nächtliche Abkühlung in . . . Wasser zurückverwandelt wird und dann Tau oder Reif*) heißt“. Über die Ansichten der Araber des 10. Jahrhunderts schreibt F. Dieterici (23): „Geschieht das Aufsteigen dieses frischen Dunstes in der Nacht, während die Luft sehr kalt ist, so hindert

dieselbe jene Dünste, in die Luft aufzusteigen und läßt sie allmählich nahe der Erdoberfläche gerinnen.“

Die Anschauungen im späten Mittelalter charakterisiert H. W. Dove (25): „Die Alchymisten hielten den Tau in hohen Ehren, da sie glaubten, daß er siderischen Ursprungs sei, weil er in sternhellen Nächten vorzüglich häufig sich findet. Die Sterne mögen aber an seiner Bildung ebenso unschuldig sein, als das Licht am Hagel, wenn dieser auch vorzugsweise am Tage fällt.“

Schon vor Dove hat W. Ch. Wells (113) im Jahre 1815 die auch heute noch gültige Ansicht ausgesprochen, daß „der Tau das Ergebnis einer vorhergehenden Abkühlung in den Körpern ist, auf denen er erscheint“. Wells vermag so eine ganze Reihe von Erscheinungen zu deuten, die mit dem Tau zusammenhängen. Er wird vielfach der Vater der klassischen Tautheorie genannt.

Trotz der anerkannten Deutung der Taubildung durch Wells ist in den folgenden über hundert Jahren die Diskussion über die Herkunft des Taus nicht zur Ruhe gekommen. Es handelt sich jetzt um die Frage, ob das Wasser, welches als Tau niedergeschlagen wird, vorwiegend aus dem Wasserdampfgehalt der Luft, der Verdunstung des Bodens oder der Transpiration der Pflanzen stammt. Nun erfaßt man wohl mit Lysimetern nur eine Differenz zwischen der Taubildung und der gleichzeitigen Verdunstung, scheidet also den kleinsten Wasserkreislauf (82) aus, physikalisch gesehen ist die Frage aber sinnlos, da der Tau in jedem Fall der umgebenden Luft entstammt und die Molekel natürlich keinerlei Herkunftsmerkmale tragen*). Sehr klar hat E. Leick (64) in neuester Zeit diese Scheinfrage der Herkunft des Taus beantwortet, wenn er schreibt: „Jeder Tau entstammt der Atmosphäre, ohne Rücksicht darauf, woher diese ihren Wasserdampf hat.“ E. Leick führt auch eine Reihe von Arbeiten zu dieser Frage an und setzt sich mit ihnen auseinander. Auf die Untersuchungen von E. Wollny (115) und T. H. Homén (51) zur Frage der Herkunft des Taus soll später noch eingegangen werden (III, 4), da hierfür energetische Gesichtspunkte wesentlich sind.

II. Die Thermodynamik der Taubildung

1. Der Tau als Teil des nächtlichen Energiehaushaltes

Wie schon mehrfach betont wurde, spielt bei der Taubildung die energetische Seite eine entscheidende Rolle. Da bei der Bildung von 1 g Tau aus der Dampfphase etwa 600 cal und bei der Bildung von Reif etwa 680 cal frei werden, ist es verständlich, daß der Abtransport bzw. die Kompensation dieser Phasenumwandlungswärme einen erheblichen Einfluß auf den Vorgang selbst hat.

Diese Wärmetönung stellt manchmal einen gewichtigen, manchmal aber auch einen durchaus unbedeutenden Teil des nächtlichen Energiehaushalts dar. Daß dabei Wasser abgeschieden wird, ist — energetisch gesehen — ein Nebeneffekt, in dem allerdings der am Wasserhaushalt Interessierte die wichtigste Erscheinung sieht.

Setzt man in einem anschaulichen Vergleich, der — wie später gezeigt werden soll (II, 10) — zu einem vollkommen analogen Bau der die Verhältnisse beschreibenden Formeln führt, an die Stelle des Energie-

stromes einen elektrischen Strom, so würde der nur am Wärmehaushalt Interessierte dem Benutzer eines Akkumulators gleichen, dem nur an der Kenntnis der Strom- und allenfalls der Spannungswerte gelegen ist, während er den mit dem Stromfluß verbundenen Materietransport im Inneren des Akkumulators nicht beachtet. Der nur am Wasserhaushalt Interessierte würde dagegen bei diesem Vergleich einen Galvaniseur entsprechen, dem nur an den abgeschiedenen Metallmengen gelegen ist, während er den Strom als nebensächlich ansieht. Aus diesem Vergleich dürfte es klar werden, daß eigentlich nur die gemeinsame Betrachtung beider Erscheinungen tieferen Einblick in das Wesen der betreffenden Vorgänge vermitteln kann. Sieht man aber die derzeit veröffentlichten knapp 300 Arbeiten, die sich eingehender mit dem Tauproblem befassen und von denen ein erheblicher Teil auch Fragen der Taubildung behandelt, daraufhin an, welche Rolle in ihnen die energetische Seite der Taubildung spielt, so muß man feststellen, daß sie — wenn

*) Der Begriff „Reif“ umfaßt bei Aristoteles offensichtlich auch den Rauheis und den Raufrost.

*) Ähnliches gilt für die Energie, die ebenfalls keine Herkunftsmerkmale hat. Im Rahmen der Energiebilanz sind alle Glieder gleichwertig und gegenseitig nicht unterschiedlich kompensationsfähig.

überhaupt — meist nur qualitativ betrachtet wird. Soweit quantitative Ansätze in der erreichbaren Literatur vorkommen, soll später (III, 2) noch auf sie eingegangen werden. Um den obigen Vergleich fortzusetzen, kann man sagen, daß wir uns in bezug auf die Untersuchung der physikalisch-meteorologischen Gesetzmäßigkeiten der Taubildung in der Lage eines Mannes befinden, der mit einer Glühlampe als Stromanzeiger (Bewölkung) durch seltene Spannungsmessungen (Temperaturdifferenzen, Feuchte) an manchmal wenig charakteristischen Stellen und häufiges Einführen von Elektroden (Taufänger), die sich in Form und Material erheblich voneinander unterscheiden und die vor und nach dem Versuch gewogen werden, bei dauernd wechselnden Badkonzentrationen (Lufttemperatur) die Gesetzmäßigkeiten der elektrolytischen Stromleitung untersuchen will. Zur Vervollständigung des Vergleichs und zur Kennzeichnung der Schwierigkeiten auch bei zweckmäßig angelegten Untersuchungen muß man noch bemerken, daß diese Gesetzmäßigkeiten bei dauernd schwankenden und ohne Störung der zu untersuchenden Verhältnisse nicht beeinflussbaren Meßwerten gefunden bzw. überprüft werden müssen.

2. Die Energiebilanzgleichung

Betrachtet man die Energiebilanz einer frei den atmosphärischen Einflüssen ausgesetzten feuchten Oberfläche, so kann man diese — wenn man von einigen meist untergeordneten Formen der Energiezufuhr (z. B. Regen) absieht — durch die Energiebilanzgleichung in der Form

$$S + B + L + V = 0 \quad [1]$$

beschreiben. Die einzelnen Glieder der Energiebilanzgleichung [1] werden positiv gerechnet, wenn die Energie zur Oberfläche fließt. Ihre Dimension ist Energie/Fläche·Zeit. In der Meteorologie werden sie meist in cal cm⁻² min⁻¹ angegeben. Da die Energiebilanzgleichung für die Oberfläche als mathematische Fläche gilt, ist die aus der Änderung des Wärmehalts des von der Oberfläche begrenzten Körpers herrührende Wärmetönung in B enthalten. Die Energiebilanzgleichung muß daher zu jedem Zeitpunkt und über jeden Zeitraum erfüllt sein.

3. Der Energie- und Stofftransport durch Austausch und an einer Grenzfläche

Zunächst seien die Werte von S und B als bekannt vorausgesetzt. Bei einer Betrachtung in der üblichen mikrometeorologischen Größenordnung kann man die beiden anderen Größen mit Hilfe der Austauschformeln für den Wärmestrom

$$L = A c_p \frac{d\theta_L}{dz} \quad [2]$$

bzw. für die im Wasserdampfstrom enthaltene latente Wärme

$$V = A r \frac{ds_L}{dz} = \frac{0,623r}{b} A \frac{de_L}{dz} \quad [3]$$

darstellen. Für die folgenden Überlegungen genügt es, die beiden Austauschkoeffizienten A in [2] und [3] als gleich anzusehen. Nach H. Lettau (67) können in 5 m Höhe Austauschkoeffizienten zwischen 1 und 20 g cm⁻¹ sec⁻¹ erwartet werden. Sieht man für eine wind-schwache Nacht 3 g cm⁻¹ sec⁻¹ und für einen 10stündigen starken Taufall 0,3 mm als charakteristisch an, so ergibt aus [3] bei b = 720 Torr und mit

$$W = \frac{V}{r} \quad [4]$$

$$\frac{de_L}{dz} = \frac{Wb}{0,623A} = 0,3 \text{ Torr}/10 \text{ m}$$

Wenn auch die Verhältnisse in extremen Fällen günstiger liegen können, so zeigt das obige Zahlenbeispiel

doch, daß eine einigermaßen befriedigende Erfassung des Taus über Feuchtegefälle und Austausch meist gar nicht so einfach sein wird (11). Dies gilt auch, wenn man die schwierige Bestimmung des Austauschkoeffizienten mit Hilfe der von F. Albrecht (3) angegebenen Wärmehaushaltsmethode zu umgehen versucht. Die Unsicherheiten, die z. Z. noch allen mit dem Austausch zusammenhängenden Methoden anhaften, sind auch durch die Wärmehaushaltsmethode natürlich nur zum Teil beseitigt. Insbesondere darf nicht übersehen werden, daß die erfolgreiche Verwendung der Austauschgleichung die Möglichkeit einer rigorosen Vereinfachung der wahren Verhältnisse auf ein lineares Problem voraussetzt (große möglichst ebene Flächen mit gleichförmiger Bodendecke, hinreichende Entfernung vom Rand).

Nun weist aber gerade beim Tau die starke räumliche Variation der beobachteten Mengen und die Tatsache, daß er sich auf den Oberflächen von Körpern bildet, auf die Zweckmäßigkeit einer stärkeren Berücksichtigung der Vorgänge in unmittelbarer Nähe der Körperoberfläche hin. Hinzu kommt, daß die Gesetze des Energie- und Stoffübergangs an Grenzflächen wegen ihrer technischen Bedeutung (technische Verdunstung und Verdampfung, Heizung, Kühlung, chemische Technologie der Grenzflächenreaktionen, Meßtechnik) vielfach und eingehend untersucht wurden. Die auch in der Meteorologie z. B. bei der Theorie des Psychrometers verwendeten Gleichungen des Energie- und Stoffübergangs an Grenzflächen lauten für den Wärmeübergang

$$L = -\alpha_L (\theta - \theta_L) \quad [5]$$

und für den Wasserdampfübergang

$$W = -h (s_m - s_L) = -\frac{0,623}{b} h (E - e_L) \quad [6]$$

Der Koeffizient h, welcher den Transporteffekt für Wasserdampf kennzeichnet, ist mit der Wärmeübergangszahl α_L durch

$$h = \left(\frac{D}{a}\right)^{2/3} \frac{\alpha_L}{c_p} \quad [7]$$

verbunden. Der etwas von 1 verschiedene Faktor $(D/a)^{2/3}$ rührt vom molekular transportierenden Teil der Körpergrenzschicht her (29). Mit hinreichender Genauigkeit kann

$$\left(\frac{D}{a}\right)^{2/3} = 1,11 \quad [8]$$

gesetzt werden, so daß sich aus [4], [6], [7] und [8]

$$V = -\frac{0,690r}{bc_p} \alpha_L (E - e_L) \quad [9]$$

ergibt.

Die Wärmeübergangszahl α_L ist außer von der Windgeschwindigkeit v vor allem auch von der Körperform abhängig. Für eine ebene oder schwach gekrümmte glatte Oberfläche von Abmessungen in der Größenordnung 1—10 cm sind ungefähre Werte des α_L in Tab. 2 aufgeführt. Der genaue Wert muß im Einzelfall experimentell bzw. rechnerisch bestimmt werden.

Tab. 2 Richtwerte der Wärmeübergangszahl für verschiedene Windgeschwindigkeiten

v m sec ⁻¹	α_L mcal cm ⁻² min ⁻¹ grad ⁻¹
0,1	10
0,5	20
2	50
10	100

Der thermische Widerstand einer turbulenten Schicht mit einem mittleren Austauschkoeffizienten A und der Höhe z ist durch z/A_c_p gegeben, der der Körpergrenz-

schicht durch $1/\alpha_L$. Die Höhe einer der Körpergrenzschicht bezüglich des Transportwiderstands für Wärme (und näherungsweise auch für Wasserdampf) äquivalenten turbulenten Luftschicht ist daher

$$z = A c_p / \alpha_L \quad [10]$$

Aus dem oben schon angeführten Austauschkoeffizienten $A = 3 \text{ g cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ und dem unter gleichen Verhältnissen etwa zu erwartenden $\alpha_L = 20 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ findet man $z \approx 22 \text{ m}$. Man sieht aus dieser Gegenüberstellung, daß nur eine ziemlich hohe Luftschicht der Körpergrenzschicht in bezug auf den Widerstand beim Energie- und Stofftransport gleichwertig ist. Wenn daher im folgenden fast ausschließlich die Wirkung der einige Millimeter starken Körpergrenzschicht auf den Wärme- und Wasserdampftransport in die Überlegungen einbezogen wird, so ist dies nicht bloß dadurch begründet, daß hier die Verhältnisse besser bekannt und daher mit größerer Sicherheit erfassbar sind, sondern auch durch die vorstehenden Überlegungen.

4. Herleitung und Diskussion der einfachen Tauformel

Führt man die Gleichungen des Wärme- und Wasserdampfüberganges [5] und [9] in die Energiebilanzgleichung [1] ein und setzt in erster Näherung

$$E - e_L = (E - E_L) + (E_L - e_L) = \frac{dE}{d\vartheta} (\vartheta - \vartheta_L) + E (1 - \varphi), \quad [11]$$

so kann man sie nach $(\vartheta - \vartheta_L)$ auflösen.

$$\vartheta - \vartheta_L = \frac{1}{\alpha_L} \frac{1}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} (S+B) - \frac{\frac{0,690r}{bc_p} E_L}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} (1 - \varphi) \quad [12]$$

Mit den Koeffizienten

$$\tau_{so} = \frac{1}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} \quad \tau_{vo} = \frac{\frac{0,690r}{bc_p} E_L}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} \quad [13a, b]$$

die reine Funktionen der Lufttemperatur ϑ_L sind und mit Hilfe der Angaben von Tabellenwerken (10), (21) leicht berechnet werden können, wird

$$\vartheta - \vartheta_L = \frac{\tau_{so}}{\alpha_L} (S+B) - \tau_{vo} (1 - \varphi) \quad [14]$$

Die Temperaturdifferenz Oberfläche-Luft setzt sich somit gleichsam aus zwei Termen zusammen, die beide temperaturabhängige Koeffizienten enthalten und von denen der eine außerdem nur noch von der Energiezufuhr durch Strahlung und aus dem Körper sowie von der Ventilation abhängt, während der zweite nur noch die relative Luftfeuchtigkeit enthält und unabhängig von der Ventilation ist. Sieht man S und B als vernachlässigbar klein an, so stellt der Rest von [14] nichts anderes als eine etwas ungewohnte Näherung der Gleichung des idealen Psychrometers dar, die sich leicht in eine der Sprungformel entsprechende Form bringen ließe.

Setzt man [14] in die durch [9] und [11] ergänzte Gleichung [4] ein, so erhält man nach einigen Umformungen

$$W = \frac{\frac{0,690}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} (S+B) - \frac{\frac{0,690}{bc_p} E_L}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} \alpha_L (1 - \varphi) \quad [15]$$

Mit

$$\omega_{so} = \frac{\frac{0,690}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} \quad \omega_{vo} = \frac{\frac{0,690}{bc_p} E_L}{1 + \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta}} \quad [16a, b]$$

erhält [15] die einfache Form

$$W = -\omega_{so} (S+B) - \omega_{vo} \alpha_L (1 - \varphi) \quad [17]$$

Die Tauformel [17] gibt den zeitlichen Tauzuwachs

auf einer Fläche als Differenz zweier Terme wieder, von denen der erste neben der Lufttemperatur nur die Strahlungsbilanz und den Energiestrom aus dem Körperinneren, der zweite neben der Lufttemperatur nur die durch die Wärmeübergangszahl charakterisierte Ventilation und das relative Sättigungsdefizit der Luft enthält.

Das zweite Glied der Tauformel — im folgenden oft einfach Verdunstungsglied genannt — hat den Charakter einer Verdunstung. Es entspricht der Verdunstung der Oberfläche bei fehlender Energiezu- bzw. -abfuhr durch die Strahlung und aus dem Körper ($S + B = 0$). Sieht man von der praktisch nur unter 0°C möglichen Übersättigung der Luft ab, so sind alle Faktoren des Verdunstungsgliedes positiv. Dieses selbst kann daher nur negative Werte annehmen oder bei Sättigung der Luft verschwinden.

Das erste Glied der Tauformel — im folgenden oft einfach Strahlungsglied genannt — muß bei Taubildung immer größer als der Absolutbetrag des Verdunstungsgliedes sein, es muß also insbesondere immer positiv sein. Dies ist nur möglich, wenn entsprechend der eingangs angeführten Definition des Taus die Strahlungsbilanz negativ ist. Der Niederschlag bei negativem B , d. h. bei der Aufnahme der Kondensationswärme durch den Körper, ist der Beschlag. Der Koeffizient ω_{so} oder — genauer gesagt —

$$\eta = r \cdot \omega_{so} \quad [18]$$

hat den Charakter eines Wirkungsgrades der nächtlichen Strahlungsbilanz ($B = 0$ gesetzt) für die Taubildung. Dieser Wirkungsgrad liegt beispielsweise für -30°C bei 7%, für 0°C bei 43%, für 30° bei 80% (Näheres Tab. 3). Mit zunehmender Temperatur steigt also dieser Wirkungsgrad an, wie es dem wachsenden Anteil des latenten Wärmetransportes am Gesamtenergiestrom entspricht.

Da bei echtem Tau B nur positiv (einschließlich null) sein kann, also tauvermindernd wirkt und auch das Verdunstungsglied nur die Taubildung herabsetzen kann, ist der maximal mögliche zeitliche Tauzuwachs durch den Wert der Strahlungsbilanz begrenzt. Legt man einer Abschätzung des maximal möglichen Taus bei mitteleuropäischen Verhältnissen eine Temperatur 10°C und eine mittlere maximale Strahlungsbilanz von $-0,12 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ zugrunde, so ergibt sich 0,07 mm Tau je Stunde oder 0,7 mm Tau während einer zehnstündigen Nacht. Wie die oben gegebene Übersicht über die wirklich gemessenen maximalen Tauwerte zeigt, wird diese Taumenge in nebelfreien Taunächten nicht erreicht. Dies ist vor allem eine Auswirkung des Verdunstungsgliedes der Tauformel. Dieses vermindert beispielsweise bei mäßiger Ventilation ($\alpha_L = 50 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$) und 10°C den Tau je Prozent Sättigungsdefizit um 0,0044 mm/h. Unter den angenommenen Verhältnissen würde also bei 86% relativer Feuchtigkeit der Taufall aufhören und bei weiterer Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit sogar Verdunstung einsetzen.

5. Herleitung der von der Oberflächentemperatur freien Tauformel, Darstellung der Koeffizienten

In der Tauformel [17] ist die — meist unbekannte — Temperatur der Körperoberfläche explizit nicht mehr enthalten. Ihre Eliminierung wurde durch die Verwendung der Energiebilanzgleichung [1] ermöglicht. Die Anwendung der Tauformel [17] setzt die Kenntnis der wahren Strahlungsbilanz S und der wahren Wärmezufuhr aus dem Körperinneren B voraus. Diese beiden Größen sind aber von der Oberflächentemperatur des Körpers abhängig. Während bei B die Eliminierung der Oberflächentemperatur nur in einfachen Fällen möglich erscheint und vielfach wegen der vernachlässigbaren Wärmezufuhr aus dem Körper-

inneren (schlechte Wärmeleiter) auch unnötig ist, spielt sie bei der Strahlungsbilanz eine erhebliche Rolle und kann dort auch relativ einfach eliminiert werden. Dazu entwickelt man den Ausdruck für die Ausstrahlung

$$A = \varepsilon \sigma T^4 \quad [19]$$

in eine Reihe nach

$$T - T_L = \vartheta - \vartheta_L$$

und bricht diese nach dem linearen Glied ab

$$A = \varepsilon \sigma T_L^4 + 4 \varepsilon \sigma T_L^3 (\vartheta - \vartheta_L) \quad [20]$$

Der durch den Abbruch der Reihe verursachte Fehler ist angesichts der beim Taufall maximal einige Grade betragenden Temperaturdifferenz Oberfläche — Luft erträglich. Setzt man [20] in die Gleichung für die nächtliche Strahlungsbilanz

$$S = \varepsilon G - \varepsilon \sigma T^4 = (\varepsilon G - \varepsilon \sigma T_L^4) - 4 \varepsilon \sigma T_L^3 (\vartheta - \vartheta_L) \quad [21]$$

ein und schreibt für

$$\varepsilon G - \varepsilon \sigma T_L^4 = S_L \quad [22]$$

$$4 \varepsilon \sigma T_L^3 = \alpha_s, \quad [23]$$

so findet man schließlich

$$S = S_L - \alpha_s (\vartheta - \vartheta_L) \quad [24]$$

Die Größe S_L ist unabhängig von der Temperatur der Körperoberfläche. Sie würde der Strahlungsbilanz der taubildenden Oberfläche entsprechen, wenn diese Lufttemperatur hätte, und ist abgesehen von dem nur wenig von 1 verschiedenen Absorptionskoeffizienten ε gleich dem Meßwert eines Pyrgeometers. Die Größe α_s hat die Funktion einer Wärmeübergangszahl und kann Strahlungsübergangszahl genannt werden.

Führt man nun für den Energietransport durch die latente Verdunstungswärme eine analoge Wärmeübergangszahl

$$\alpha_v = \frac{0,690r}{bc_p} \frac{dE}{d\vartheta} \cdot \alpha_L \quad [25]$$

ein und bezeichnet die Summe der drei Wärmeübergangszahlen mit

$$\alpha = \alpha_L + \alpha_v + \alpha_s, \quad [26]$$

so kann man nach dem Einsetzen der Größe L aus [5], V aus [9], [11] und [25] und S aus [21] in die Energiebilanzgleichung [1] wiederum $\vartheta - \vartheta_L$ berechnen. Die äußere Form der Gleichung

$$\vartheta - \vartheta_L = \frac{\tau_s}{\alpha_L} (S_L + B) - \tau_v (1 - \varphi) \quad [27]$$

unterscheidet sich kaum von [14].

Die Koeffizienten

$$\tau_s = \frac{\alpha_L}{\alpha} \quad \tau_v = \frac{\alpha_v}{\alpha} \frac{E_L}{dE/d\vartheta} \quad [28a, b]$$

sind jetzt jedoch nicht mehr von der durch α_L gekennzeichneten Ventilation unabhängig (Abb. 1a u. 1b).

Führt man analog zum Vorgang bei der Herleitung der Taufformel [17] [27] in die durch [9] und [11] ergänzte Gleichung [4] ein, so ergibt sich eine Taufformel

$$W = -\omega_s (S_L + B) - \omega_v \alpha_L (1 - \varphi) \quad [29]$$

die sich wiederum kaum von [17] unterscheidet. Auch hier sind jetzt die Koeffizienten

$$\omega_s = \frac{1}{r} \frac{\alpha_v}{\alpha} \quad \omega_v = \frac{1}{r} \frac{\alpha_v (\alpha - \alpha_v)}{\alpha \alpha_L} \frac{E_L}{dE/d\vartheta} \quad [30a, b]$$

nicht mehr von der Ventilation unabhängig (Abb. 1c und 1d).

Die in Abb. 1a—d als Funktionen der Wärmeübergangszahl und der Lufttemperatur dargestellten Koeffizienten τ_s , τ_v , ω_s und ω_v sind nach [28a, b] und [30a, b] für $b = 760$ Torr und $\varepsilon = 0,95$ berechnet, α_v und α_s wurden nach [25] und [23] ermittelt. Alle wesentlichen in obige Ausdrücke eingehenden temperaturabhängigen Größen sind in Tab. 3 aufgeführt. Der Abszissenbereich der Schaubilder umfaßt alle prak-

tisch vorkommenden Werte der Wärmeübergangszahl, da $\alpha_L = 5$ mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ für die angegebenen Körperabmessungen fast der Lufruhe, $\alpha_L = 100$ mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ einer Windgeschwindigkeit von mehr als 10 m sec⁻¹ entspricht. Für Tau (glatte Kurven) und Reif (punktierte Kurven) ergeben sich verschiedene Werte der Koeffizienten. Die in der rechten Spalte der Abb. 1a—d als waagrechte Striche aufgetragenen Werte entsprechen $\alpha_L = \infty$ bzw. $\alpha_s = 0$ und stimmen mit den Werten τ_{s0} , τ_{v0} , ω_{s0} , ω_{v0} nach Tab. 3 überein.

Für den Fall, daß B vernachlässigbar klein ist, enthält die Taufformel [29] keine Glieder, die die Oberflächentemperatur enthalten. Bei nichtmetallischen Stoffen unterscheidet sich der Absorptionskoeffizient ε der Oberfläche nur wenig von dem des Wassers und er wird nach dem Einsetzen der Taubildung (sofern der Tau nicht eingesaugt wird) sogar diesem gleich. Sieht man von den in II, 9 besprochenen Einflüssen ab, die allenfalls geringfügige Abweichungen bewirken können, so enthält die Taufformel praktisch keine Glieder mehr, die von den Eigenschaften des Taufängers abhängen.

Die meisten Fälle der Kondensation an einer Oberfläche, bei denen B eine wesentliche Rolle spielt, müssen zum Beschlag gerechnet werden, der hier nicht betrachtet werden soll. Als Sonderfall wurde oben bereits die schmelzende Eisoberfläche erwähnt, bei der die Oberflächentemperatur konstant ist.

6. Zur Methodik der Taumessung

Der für die Taumeßtechnik wichtige Fall eines plattenförmigen, horizontal und nach allen Seiten frei aufgestellten Taufängers wurde schon früher vom Verfasser (50) behandelt. Bezeichnet man mit β die Wärmedurchgangszahl der Platte, so ergeben sich Obertau W_1 und Untertau W_2 zu

$$W_1 = -\omega_s [S_{L1} - \frac{\beta}{\alpha + 2\beta} (S_{L1} - S_{L2})] - \omega_v \alpha_L (1 - \varphi) \quad [31]$$

$$W_2 = -\omega_s [S_{L2} + \frac{\beta}{\alpha + 2\beta} (S_{L1} - S_{L2})] - \omega_v \alpha_L (1 - \varphi) \quad [32]$$

Die Summe aus den beiden Taumengen

$$W = -\omega_s [S_{L1} + S_{L2}] - 2\omega_v \alpha_L (1 - \varphi) \quad [33]$$

ist unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Taufängermaterials. Eine horizontal und frei aufgestellte Platte würde also Meßwerte liefern, die nur von den Eigenschaften der Umgebung abhängen, sofern man von dem geringen Einfluß des nur wenig variablen Absorptionskoeffizienten ε absieht. Nun ist es bei schlechtem Wärmedurchgang zwischen den beiden Plattenseiten möglich, daß zwar das für die Oberseite gültige W_1 positiv ist (Tau), das für die Unterseite gültige W_2 jedoch negativ (Verdunstung) und diese Seite trocken ist (trockene Leick-Platte beim Beginn des Taufalles am Abend). In diesem Fall gelten die Voraussetzungen nicht mehr, die der Ableitung der Formeln [31] bis [33] zugrunde liegen und der Gesamtau würde mit abnehmender Wärmedurchgangszahl der Platte zunehmen. Wie weit auf diese Weise auch bei frei aufgestellter Platte doch wieder eine Platteneigenschaft in den Taumeßwert eingeht, hängt so stark von den Verhältnissen des Einzelfalles ab, daß eine allgemeine quantitative Aussage darüber schwer möglich ist. Sicher wird aber eine gemeinsame Messung von Obertau und Untertau geringere Einflüsse der vom Wassergehalt und damit von der Vorgeschichte abhängigen Wärmedurchgangszahl des Plattenmaterials ergeben als die alleinige Messung des Obertaus bei merklicher Wärmeleitfähigkeit des Plattenmaterials.

Eine völlige Unabhängigkeit des Taumeßwertes von den Eigenschaften des Taufängers erhält man, wenn man durch zusätzliches thermisch isolierendes Material

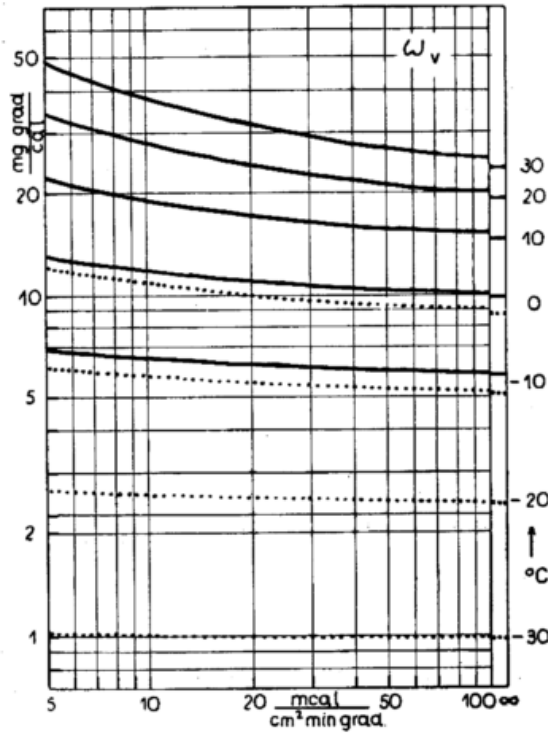
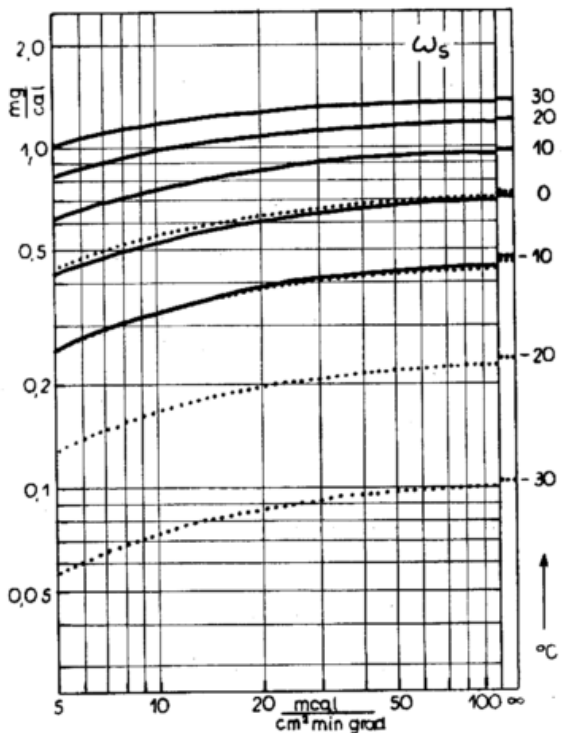
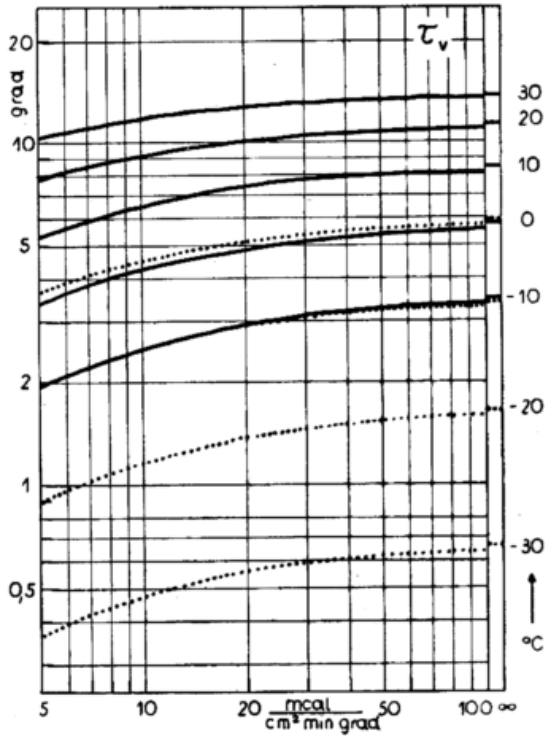
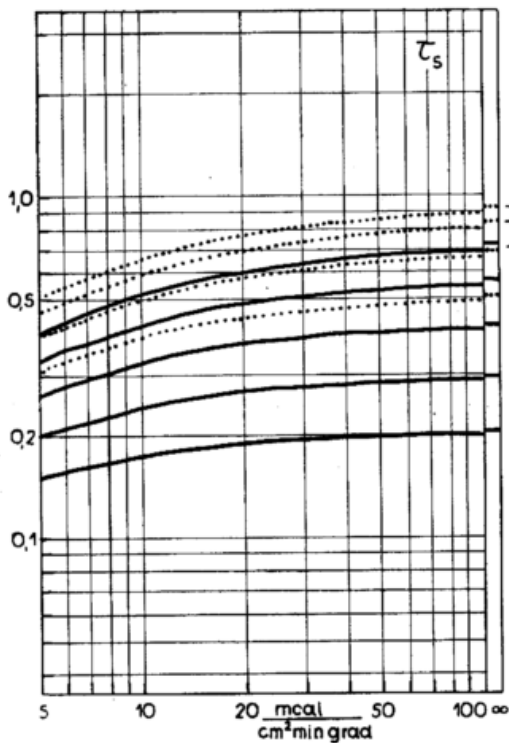


Abb. 1a - d
Die Koeffizienten τ_s , τ_v , ω_s und ω_v als Funktionen der Wärmeübergangszahl α_L und der Lufttemperatur ϑ_L .

jeden Wärmefluß von außen zur Unterseite unterbindet und dann den allein auftretenden Obertau

$$W_1 = -\omega_s S_{L1} - \omega_s \alpha_L (1-\varphi) \quad [34]$$

mißt. Natürlich unterscheidet sich der sogefundene Meßwert [34] von dem bei freier Aufstellung [33] zu erwartenden. Der oben angegebene Effekt läßt sogar alle Zwischenwerte möglich erscheinen.

7. Das Maximum des Taufalles

Die Tauformel [29] ermöglicht nun eine wesentlich bessere Abschätzung der maximalen Taumengen. Die Größe S_L in [29] entspricht, worauf schon früher hingewiesen wurde (II, 5), der Strahlungsbilanz der Oberseite einer Platte von Lufttemperatur. Ihr negativer Wert wird — die Bezeichnungswiese ist hier noch nicht ganz klar — vielfach „effektive nächtliche Ausstrahlung“ genannt und ist von R. Geiger (33) nach der Angströmschen Formel mit den Konstanten von F. Baur und H. Philipps (9) für wolkenfreien Himmel zu

$$A_{eff} = -S_L = \epsilon \sigma T_L^4 (0,406 - 0,048 \sqrt{e_L}) \quad [35]$$

angegeben worden, wobei e_L den Zahlenwert des Dampfdruckes der Luft in Torr bedeutet. Bewölkung

bedeutet immer eine Herabsetzung der effektiven nächtlichen Ausstrahlung und damit eine Verminderung des Taus. Setzt man die nach [35] berechneten Werte in die Tauformel [29] ein, so erhält man Tauwerte, die in bezug auf die Ausstrahlung optimalen Verhältnissen entsprechen. Freilich darf man die Bedeutung der gefundenen Werte des maximalen zeitlichen Tauzuwachses ebenso wie der effektiven nächtlichen Ausstrahlung — worauf R. Geiger hinweist — nicht so bewerten, als ob nicht in seltenen Einzelfällen etwas höhere Werte möglich sind. Den so ermittelten Tauwerten dürfte also der Charakter mittlerer Maximalwerte im Hinblick auf die energetische Begrenzung der Taumenge zukommen. Die neuerdings (14) geäußerte Ansicht, daß die nach [35] berechneten Werte der effektiven Ausstrahlung zu hoch sind, vermag den Charakter der mit Hilfe von [53] berechneten Taubeträge als Höchstwerte nur zu unterstreichen.

Läßt man in der Tauformel wieder B weg, da es bei echtem Tau allenfalls taumindernd wirken kann und hier die Höchstmengen interessieren, so verringert sich die Zahl der in [29] eingehenden Parameter auf drei: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Ventilation. In Abb. 2 sind der Tau und die Temperaturdifferenz zwi-

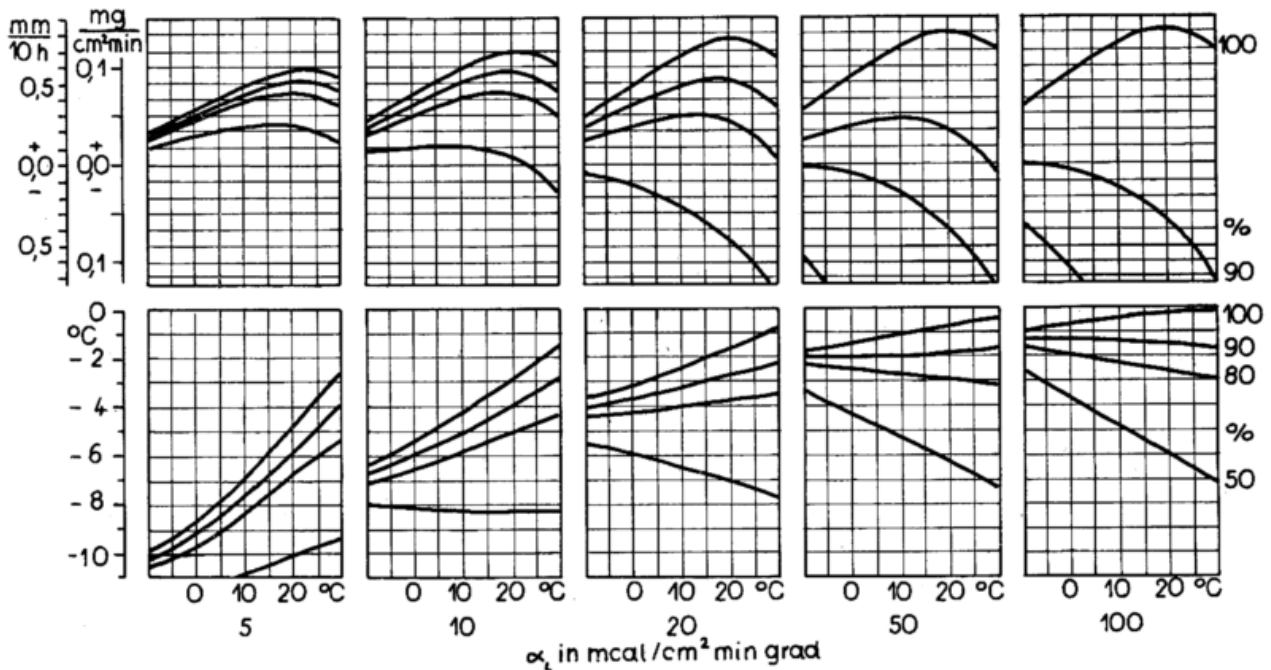


Abb. 2
Taubildung und Temperaturdifferenz zur Luft bei einer waagrechteten Fläche und effektiver Ausstrahlung gemäß der Angströmschen Formel.

schen Taufänger Oberfläche und Luft als Funktionen dieser drei Größen dargestellt. Die einzelnen Schaubilder gelten für 5, 10, 20, 50 und 100 mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹, umfassen also den ganzen Bereich der praktisch möglichen Wärmeübergangszahlen bei den angegebenen Körperabmessungen (siehe auch Tab. 2), wobei die Werte 5 und 100 mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ äußerst selten sein werden. Als Scharparameter in den einzelnen Schaubildern dient die relative Luftfeuchtigkeit mit den Werten 100, 90, 80 und 50% entsprechend relativen Sättigungsdefiziten von 0, 10, 20 und 50%. Sie umfaßt also ebenso wie die Lufttemperatur (Abszisse —10 bis +30°C) den ganzen für die Taubildung praktisch in Frage kommenden Bereich.

Die Unterkühlung der taubildenden Oberfläche unter die Lufttemperatur nimmt mit zunehmender Ventila-

tion ab, ebenso bei Sättigung mit steigender Temperatur wegen des mit der Temperatur wachsenden Transports latenter Wärme. Mit abnehmender Luftfeuchtigkeit und steigender Ventilation kehrt sich dieser Effekt wegen der dann einsetzenden Verdunstung allerdings um.

Ebenso wie die effektive Ausstrahlung nehmen auch die Höchstwerte des zeitlichen Tauzuwachses für gesättigte Luft nach Überschreiten eines Maximums (bei etwa 20°C) mit zunehmender Temperatur wieder ab, da die Zunahme der mit der Temperatur wachsenden Ausstrahlung schließlich durch die Zunahme der Gegenstrahlung infolge des ebenfalls mit der Temperatur wachsenden Dampfdruckes übertroffen wird. Die Abnahme der Luftfeuchtigkeit bei wachsendem relativen Sättigungsdefizit wirkt sich über (1-φ) auf das Verdunstungsglied stärker aus als über S_L auf das Strahlungs-

glied der Tauformel [29], so daß die höchsten Tauwerte bei Sättigung der Luft auftreten. Sehr anschaulich zeigen die Schaubilder die mit der Stärke der Ventilation zunehmende Wirksamkeit eines Sättigungsdefizits, da bei $\alpha_L = 5 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ auch bei Luftfechtigkeiten unter 50% noch Taubildung auftritt, während bei $\alpha_L = 100 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ schon bei 90% durchwegs Verdunstung herrscht.

Der absolute Höchstwert der Taumenge liegt bei $0,14 \text{ mg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, d. h. bei etwa $0,8 \text{ mm}$ Tau für eine 10-stündige Nacht. Diese energetische Grenze des Taubetrages kann — abgesehen von sehr seltenen Sonderfällen; in denen merkbare Abweichung von der Ångströmschen Formel vorkommen — nicht überschritten werden.

Dies gilt auch dann noch, wenn man den sogenannten inneren Tau und die Niederschläge aus Strahlungsnebeln am Ort ihrer Bildung mit zum Tau rechnet. Beim Auftreten inneren Taus wird ein Teil der nächtlichen Strahlungsbilanz des Bodens durch die Kondensationswärme des inneren Taus kompensiert. Der energetische Nutzeffekt der Bildung inneren Taus unterscheidet sich kaum vom Nutzeffekt der normalen Taubildung, so daß auch bei der Verwertung eines Teiles der negativen nächtlichen Strahlungsbilanz für diese Form keine größeren Gesamtmengen an Kondensationsprodukten gebildet werden. Das gleiche gilt für Nebeltau aus Strahlungsnebeln. Auch hier unterscheidet sich der Nutzeffekt der Bildung von Kondensationsprodukten kaum von dem der normalen Taubildung. Die dabei freiwerdende Energie wirkt als zusätzliche Gegenstrahlung, die die negative Strahlungsbilanz der normalen Taufänger vermindert, so daß die Gesamtmenge der Kondensationsprodukte einschließlich des Nebeltaus die beim Fehlen des Strahlungsnebels auftretende Menge nicht übersteigt. Von einem merklichen horizontalen Transport des Nebels, der sich dann an höheren Pflanzen o. ä. absetzt und dort örtlich eng begrenzt höhere Niederschlagswerte verursachen kann, ist hier natürlich abgesehen.

Die bisherigen Abschätzungen der Maximalwerte des Taufalles betrafen die energetischen Grenzen für den Tauzuwachs je Zeiteinheit bzw. deren Umrechnung auf einen 10-stündigen Taufall. Für den Taufall einer Nacht spielt aber neben den meteorologischen Faktoren auch die Andauer der Taubildung eine wesentliche Rolle. Während eines Jahres ändert sich neben der Länge der Nacht vor allem die Lufttemperatur. Der gleichzeitige Einfluß dieser Faktoren soll im folgenden untersucht werden. Dazu ist es natürlich notwendig, die Annahmen radikal zu vereinfachen, um zahlenmäßige Anhaltspunkte für die wesentlichen Faktoren zu bekommen.

1. Als Charakteristikum für die Andauer des Taufalles wird die Dauer der astronomischen Nacht für eine geographische Breite von 48° genommen, und zwar für den 16. des Monats (10). Daß der Taufall bei klarem Himmel schon vor Sonnenuntergang einsetzt und auch noch nach Sonnenaufgang andauern kann, dürfte den charakteristischen jahreszeitlichen Verlauf nur unwesentlich beeinflussen und soll daher vernachlässigt werden.
2. Als Charakteristikum für die Lufttemperatur wird das langjährige Mittel des täglichen Minimums der Lufttemperatur für München genommen (123). Dieser Wert enthält auch die Minima bedeckter Nächte, dürfte also dem Mittelwert klarer Nächte einigermaßen entsprechen. Die Wahl eines anderen Mittelwertes der Temperatur (z. B. Tagesmittel) und auch die Wahl einer anderen mitteleuropäischen Station in vergleichbarer Höhenlage ändert in den berechneten Taumengen nur geringfügig die Absolutwerte, hat aber keinen merklichen Einfluß auf den jahreszeitlichen Gang.

3. Da für die Mittelwerte der Luftfeuchtigkeit in der Nacht keine geeigneten Anhaltspunkte vorhanden sind (123), die jahreszeitlichen Veränderungen in Mitteleuropa gering sind und die Ergebnisse den Charakter von Maximalwerten haben sollen, wird Sättigung der Luft vorausgesetzt.
4. Die Ventilation hat dann nur mehr geringen Einfluß. Sie soll konstant angenommen werden entsprechend $\alpha_L = 10 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$.
5. Mit den Annahmen 3. und 4. und der Lufttemperatur nach 2. kann man der Abb. 2 die Maximalwerte des Taufalles für 10 Stunden entnehmen. Bezieht man diese Werte auf die Dauer der Nacht nach 1., so erhält man den in Abb. 3 dargestellten jahreszeitlichen Verlauf der so berechneten Maximalwerte des Taufalles.

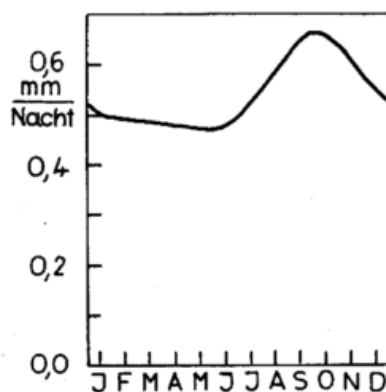


Abb. 3

Berechnete Maximalwerte des Taufalles je Nacht für mitteleuropäische Verhältnisse.

Wie Abb. 3 zeigt, ist der jahreszeitliche Verlauf ausgesprochen unsymmetrisch. Die beiden gegenläufigen Einflüsse von Lufttemperatur und Tageslänge kompensieren vielfach einander, so daß weder die Zeiten hoher Temperaturen noch die langer Nächte die günstigsten Bedingungen für die Bildung von Tau oder Reif bieten, sondern für mitteleuropäische Verhältnisse die Herbstmonate September und Oktober. Diese Folge der Phasenverschiebung zwischen dem jahreszeitlichen Verlauf der Sonnenscheindauer und der Lufttemperatur zeigen auch die Monatssummen des Taus, wie sie W. G e l b k e (36) für Greifswald gemessen hat, und die Häufigkeit von Tau und Reif, wie sie in Tab. 1 für Potsdam dargestellt ist. Dies erscheint nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, daß günstigere Verhältnisse für die Maximalwerte auch günstigere Verhältnisse für jeden Taufall und für sein Auftreten überhaupt darstellen. Vorausgesetzt muß für die Richtigkeit dieser Überlegung allerdings werden, daß die bei der Abschätzung der Maximalwerte vernachlässigten Faktoren — Bewölkung, Feuchte und Wind — keinen so starken jahreszeitlichen Gang aufweisen, daß ihr Einfluß nicht übergangen werden darf.

8. Zur Thermodynamik der Rauhrefbildung

Bei Temperaturen über 0°C kommen Übersättigungen in der bodennahen Luftschicht praktisch nicht vor. Dies gilt auch noch bei Temperaturen unter 0°C , wenn man die Luftfeuchtigkeit auf den Dampfdruck über (unterkühltem) Wasser bezieht. Bezogen auf den Dampfdruck über Eis ist dagegen Übersättigung der Luft gar nicht so selten. Freilich tritt in diesen Fällen vielfach Nebel oder zumindest feuchter Dunst auf. Bei Übersättigung der Luft in bezug auf Eis wird das Verdunstungsglied der Tauformel positiv, d. h. es können sich unter diesen Verhältnissen Sublimationsprodukte an Körpern ab-

setzen, ohne daß die Strahlungsbilanz der Oberfläche negativ sein muß. Für diese Niederschlagsformen — den Rauhref und die Sublimationsanteile des Rauhfrostes — gilt daher auch die oben besprochene energetische Grenze für die Menge der Niederschlagsprodukte nicht mehr. Wie schon eingangs betont wurde, ist bei Rauhref die Oberfläche wärmer als die Luft, so daß die freiwerdende Kondensationswärme an die Luft abgegeben werden kann. Zur Berechnung der unter vorgegebenen Verhältnissen zu erwartenden Mengen von Sublimationsprodukten kann die Tauformel [29] dienen. Die aus dem Strahlungsglied zu erwartenden Mengen liegen bei maximal 0,03—0,05 mm/h bei horizontalen Flächen. Als Anhaltspunkt kann Abb. 2 dienen. Bei vertikalen Flächen und Kanten, die für die Rauhrefbildung wichtiger sind, sind die aus dem Strahlungsglied herrührenden Mengen merklich geringer und gegenüber den durch das Verdunstungsglied erklärbaren oft vernachlässigbar. Im folgenden soll daher nur dieses

$$W = -\omega \cdot \alpha_L (1-\varphi) \quad [36]$$

betrachtet werden. Auf den ersten Blick scheint auch dieses Glied keine Anhaltspunkte für größere Mengen von Kondensationsprodukten zu bieten. Für -10°C ergibt der in Tab. 3 aufgeführte Wert $\omega_{v_0} = 5,12 \text{ mg grad cal}^{-1}$, der für ebene Flächen (Tab. 2) sehr hohe Wert $\alpha_L = 100 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ und die Annahme einer in bezug auf Wasser gesättigten Luft ($\varphi = 110\%$) erst 0,03 mm/h.

Nun erreicht aber an Kanten und Spitzen die Wärmeübergangszahl schon bei wesentlich kleineren Windgeschwindigkeiten als den im obigen Beispiel angenommenen 10 m sec^{-1} ein Vielfaches des dort angegebenen Wertes. Entsprechend steigt die Menge der abgelagerten Sublimationsprodukte.

Sieht man näherungsweise eine Kante als Teil eines Kreiszyllinders an, so gilt für die Wärmeübergangszahl am Staupunkt die Zahlenwertgleichung

$$\alpha_L = 296 \sqrt{\frac{v}{d}}, \quad [37]$$

wobei sich α_L in $\text{mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ ergibt, wenn man v in m sec^{-1} und den Durchmesser des äquivalenten Zylinders d in mm angibt. Wie Tab. 4 zeigt, sind die an Kanten auftretenden Wärmeübergangszahlen erheblich größer als die im Mittel für ebene Flächen (Tab. 2 und 5) geltenden

Tab. 4 Wärmeübergangszahlen in $\text{mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ beim Anströmen einer Kante

v	0,5	2	10	m sec ⁻¹
d : 1 μ	8620	13240	29600	
10 μ	2100	4190	9360	
100 μ	662	1324	2960	
1 mm	210	419	936	

Zur Abschätzung der unter den verschiedenen meteorologischen Bedingungen zu erwartenden Mengen, soll — da andere Anhaltspunkte fehlen — von Luft ausgegangen werden, die in bezug auf Wasser gesättigt ist. Setzt man $\alpha_L = 1000 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$, so ist W nur mehr eine Funktion der Temperatur, die in Abb. 4 dargestellt ist.

Aus Abb. 4 sieht man, daß W ein Maximum bei etwa -15°C hat. Bei niedrigeren Temperaturen bewirkt die Abnahme des ω_v , bei höheren die der relativen Übersättigung $1-\varphi$ ein Absinken der W -Werte. Auch wenn die Übersättigung nur die Hälfte der hier angenommenen beträgt, so findet man beispielsweise für leichten Wind ($v = 2 \text{ m sec}^{-1}$) und einen äquivalenten Kantendurchmesser von 0,1 mm bei -10°C ein Anwachsen der Sublimationsprodukte um 0,2 mm je Stunde. Je schmä-

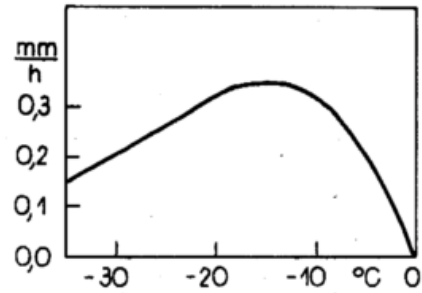


Abb. 4

Die Sublimation an Eis bei Sättigung der Luft in bezug auf Wasser und $\alpha_L = 1000 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$.

ler eine Kante ist, um so stärker wird sie an ihrem Staupunkt weitere Eisteile ansetzen, die die Kante immer scharfkantiger machen, da schon in der Entfernung von wenigen Millimetern (siehe Tab. 5) die Wärmeübergangszahlen Werte erreichen, die denen von Tab. 2 entsprechen. Die hier wiedergegebenen Gesetze des Wärmeübergangs erlauben also zusammen mit energetischen Überlegungen eine zwanglose Deutung der Tatsache, daß bei Übersättigung der Luft in bezug auf Eis die Sublimationsprodukte als scharfkantige Fahnen gegen den Wind wachsen.

Wie weit der hier besprochene Effekt der verstärkten Bildung von Sublimationsprodukten an Kanten und Spitzen auch bei der Bildung reichverzweigter Schneekristalle eine Rolle spielt, müßte noch näher untersucht werden. Besonders bei starker Eisübersättigung und stürmischer Kondensation dürfte der Abtransport der freiwerdenden Sublimationswärme direkt in die Luft von Bedeutung sein.

Während beim Rauhref die unmittelbare Sublimation aus der Gasphase die entscheidende Rolle spielt, übertrifft beim Rauhfrost das Festfrieren unterkühlten Nebels die Sublimation. Für den Abtransport der freiwerdenden Gefrierwärme gelten ähnliche Gesetze, die auch zu ähnlichen Folgerungen bezüglich der thermodynamischen Begründung der beobachteten Formen führen. Darauf soll aber hier nicht eingegangen werden, da dies über eine bloße Anwendung der Tauformel hinausführen würde.

9. Abschätzungen des Einflusses bisher vernachlässigter Faktoren

Die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl α_L von der Form des ventilerten Körpers, die bei der Frage der Rauhrefbildung eine wesentliche Rolle spielt, wurde bisher in der vorliegenden Arbeit kaum erwähnt. Nun ist es aber keineswegs so, daß α_L bloß eine Funktion der Windgeschwindigkeit ist, vielmehr hat die Stellung des ventilerten Flächenelementes zur Windrichtung, die Form des Körpers und der Ort des Flächenelementes auf dem Körper einen merklichen Einfluß. Wenn trotzdem dieser Einfluß bei der Herleitung und der Diskussion der Tauformel stillschweigend übergangen wurde, so hat das mehrere Gründe. Einmal hätte die Berücksichtigung des Formfaktors die Darstellung erheblich kompliziert, ohne daß der tatsächliche Gewinn dem zusätzlichen Aufwand auch nur einigermaßen entsprochen hätte. Sodann sind diese Gesetzmäßigkeiten in der Form von Gleichungen nur für einige einfache geometrische Formen abgeleitet worden, so daß für die weitaus überwiegende Zahl der natürlichen Taufänger eine Beschreibung durch Gleichungen gar nicht möglich wäre. Schließlich begrenzen die natürlichen dauernden Schwankungen der Werte der maßgeblichen meteorologischen Elemente die wirklich erreichbare Genauigkeit aller aus derartigen theoretischen Ansätzen ableitbaren Folgerun-

gen. Gerade im Hinblick auf diese begrenzte erreichbare Genauigkeit kann man sagen, daß die Gesetze des Wärme- und Stoffüberganges an Körpergrenzflächen von seiten der Technik so weitgehend geklärt sind, daß die Aufgabe des Meteorologen*) nicht so sehr in einer weiteren Verfeinerung der heute gültigen Vorstellungen gesehen werden kann, sondern vielmehr in der Anwendung der bereits von anderer Seite erarbeiteten Erkenntnisse auf meteorologische Fragestellungen. Dabei sind bewußt vorgenommene Vereinfachungen für die Aufklärung der wesentlichen Zusammenhänge oft viel zweckmäßiger als eine scheinbar präzisere Formulierung, der man die Übersichtlichkeit der Darstellung opfern muß.

Für den Fall einer ebenen, tangential angeströmten Platte ist bei laminarer Strömung die örtliche Wärmeübergangszahl in der Entfernung x von der angeströmten Kante der Platte durch (29)

$$\alpha_{Lx} = 0,295 \lambda \sqrt{\frac{v}{\nu x}} \quad [38]$$

gegeben. Die Wärmeübergangszahl nimmt daher mit zunehmender Entfernung von der angeströmten Kante ab. Einige charakteristische Werte sind in Tab. 5 aufgeführt.

Tab. 5 **Örtliche Wärmeübergangszahlen** α_{Lx} für verschiedene Stellen einer tangential angeströmten Platte in $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{grad}^{-1}$

v	0,5	2	10	m sec^{-1}
$x: 1 \text{ mm}$	62	124	277	
1 cm	20	39	87	
1 dm	6,2	12,4	27,7	
1 m	2,0	3,9	8,7	

Die mittlere Wärmeübergangszahl für eine Platte ist das Doppelte des Wertes für den leeseitigen Plattenrand (29). Für Plattenabmessungen von einigen Zentimetern ergeben sich dann die in Tab. 2 aufgeführten Richtzahlen.

Die Gültigkeit der obigen Werte setzt streng genommen eine örtlich konstante Plattentemperatur voraus. Sieht man davon bei der Berechnung der Wärmeübergangszahlen ab, so kann man näherungsweise die Taufformel [29] mit einem nach [38] örtlich variablen α_{Lx} -Wert als hinreichend genaue Berechnungsgrundlage für einen Taufänger aus thermisch schlecht leitendem Material ansehen. Das Strahlungsglied der Taufformel hängt nur wenig von α_L ab (siehe Abb. 1c), es ist daher auf der ganzen Platte etwa gleich. Anders ist es mit dem Verdunstungsglied, welches seinen größten Wert am Luvrand des Taufängers hat. Dort muß also die abgesetzte Taumenge am niedrigsten sein, sie nimmt zum Leerand hin zu. W. Gelbke (36) hat diesen Effekt in einem eindrucksvollen Lichtbild festgehalten. Die Temperaturdifferenz zwischen Platte und Luft ist durch [27] gegeben. Hier ist das Verdunstungsglied kaum von α_L abhängig, dagegen muß das Strahlungsglied unter den obigen Voraussetzungen mit wachsender Entfernung von Luvrand des Taufängers zunehmen, d. h. die Oberfläche des Taufängers von Luv nach Lee immer kälter werden. Auch diesen Effekt hat W. Gelbke (36) experimentell gefunden.

Ist dagegen der Körper ein sehr guter Wärmeleiter (geschwärzte Metallplatte o. ä.), so sorgt die Wärmeleitung für einen Ausgleich der Temperaturdifferenzen. Die im Körper von Luv nach Lee fließenden Wärmeströme lassen sich in der Taufformel durch die Einführung entsprechender zusätzlicher B-Werte ausdrücken, die im Mittel über den ganzen Taufänger

verschwinden. Auch hier ist die Tauverteilung nicht gleichmäßig, doch sind bei einem sehr guten Leiter in Luv die höheren, im Lee die niedrigeren Taubeträge.

Die Mittelwerte der Oberflächentemperatur und des Taufalles stimmen bei einem sehr guten Leiter mit den Werten überein, die nach [27] bzw. [29] mit Hilfe der mittleren Wärmeübergangszahl berechnet werden. Bei einem sehr schlechten Leiter weichen sie dagegen ab. $\vartheta - \vartheta_L$ wird in der Regel größer, W in der Regel kleiner sein als die mit den Mittelwerten berechneten Werte, doch betragen die Abweichungen auch bei einem sehr schlechten Leiter in den einzelnen Gliedern nur Prozente. Die natürlichen und auch die bei Messungen verwendeten Taufänger entsprechen keinem der beiden Extreme, so daß bei ihnen die mittlere Oberflächentemperatur und der mittlere Taufall nur so wenig von den nach [27] bzw. [29] mit Hilfe der mittleren Wärmeübergangszahlen berechneten Werten abweichen können, daß man diese Fehler angesichts der überhaupt sinnvollen Genauigkeitsansprüche vernachlässigen kann. Dies gilt vor allem, wenn man bedenkt, daß nur für Körper mit einfachen Formen eine genauere Berechnung möglich ist, während für die meisten Körperformen Abschätzungen oder experimentelle Untersuchungen (Modellversuche) meist nur Werte geringerer Genauigkeit zu liefern vermögen.

Bei der Abschätzung der energetischen Grenzen des Taufalles bestimmen die Gesetze des Wärme- und Stoffüberganges gleichsam nur die Verteilung der Energie auf die verschiedenen Energieströme. Die geringe Erniedrigung des Strahlungsgliedes der Taufformel bei Berücksichtigung der örtlichen Variabilität der Wärmeübergangszahl unterstreicht den Charakter der mit den Mittelwerten berechneten Maximalwerte (II, 7) als echte energetische Begrenzungen des Taufalles.

Neben dem Wärmeübergang spielt bei der energetischen Seite der Taubildung das Emissionsvermögen des Taufängers für Wärmestrahlung eine Rolle. Bei den numerischen Berechnungen in dieser Arbeit wird mit $\varepsilon = 0,95$ gerechnet. Das liegt zwischen den Emissionskoeffizienten des Taus und des Reifs für das langwellige Ultrarot bei Ausstrahlung in den Halbraum. Der Emissionskoeffizient des Materials der Taufängeroberfläche wird nur bei fehlender oder sehr dünner Bedeckung mit Wasser oder Eis eine Rolle spielen. Schon bei Wasserschichten von 0,1 mm Dicke kann man selbst bei polierten Metallflächen, bei denen ε meist nur wenige Prozente beträgt, praktisch wie mit einer Wasseroberfläche rechnen (83). Da auch die meisten natürlichen und künstlichen Taufänger Emissionskoeffizienten um 90% haben (Tab. 6), wird hier der ε -Wert des Taus (Reifs)

Tab. 6 **Emissionskoeffizient ε verschiedener Oberflächen bei Ausstrahlung in den Halbraum** nach E. Schmidt und E. Eckert (29) (1. Spalte), bzw. G. Falckenberg (30) und K. Büttner (16) (2. Spalte).

Wasser	0,92	0,92
Eis, Reif	0,97	0,99
schwarzer Lack (matt)	0,95	—
Holz	0,91	—
Papier	0,89	—
Glas	0,87	—
Porzellan	0,91	—
heller Sand	—	0,89
Tannennadeln	—	0,96
menschliche Haut	—	0,95

schon bei noch geringeren Beschlägen hinreichend genau erreicht werden. Die Fehler, die durch das Arbeiten mit nur einem Wert bei den numerischen Berechnungen gemacht werden, sind also gering und durch die Verein-

*) Gilt nicht für die höheren Ansprüche der meteorologischen Meßtechnik (z. B. Psychrometertheorie).

fachung in Anwendung vollauf gerechtfertigt. Im übrigen gelten hier auch die Überlegungen bezüglich der sinnvollen Genauigkeitsansprüche.

In mehreren Tuarbeiten (36), (98) wird die Farbe des Taufängers im sichtbaren Bereich als Hinweis auf das Absorptionsvermögen des Körpers im Wärmestrahlungsgebiet gewertet. Es dürfte aber klar sein, daß zwischen den beiden Absorptionskoeffizienten keine Beziehung besteht. Die Farbe bzw. das Absorptionsvermögen im sichtbaren Bereich (0,4—0,8 μ) läßt keine Schlüsse auf das Absorptionsvermögen für Wärmestrahlen (5—20 μ) zu. Das weiße Porzellan der Leickplatte ist im langwelligen Ultrarot ein besserer Strahler als Rußschwärzungen (77). Das höchste gemessene Absorptionsvermögen im Wärmestrahlungsgebiet hat der Schnee!

Eine weitere Fehlerquelle würde sich aus der Möglichkeit ergeben, daß der Dampfdruck der taubildenden Oberfläche nicht gleich dem angenommenen Wert des Dampfdruckes über reinem Wasser von der Temperatur der Oberfläche ist. Um diesen Einfluß einer Hygroskopizität (54) der taubildenden Oberfläche zu berücksichtigen, genügt es näherungsweise einfach im Verdunstungsglied der Taufformel an Stelle von $1 - \varphi$ $\varphi' - \varphi$ zu schreiben.

$$W = -\omega_s S_L - \omega_v a_L (\varphi' - \varphi) \quad (39)$$

Dabei ist φ' der auf dem Dampfdruck über reinem Wasser bezogene Dampfdruck über der hygroskopischen Fläche. Da $\varphi' < 1$ ist, wird das Verdunstungsglied der Taufformel kleiner und der Taufall höher. Eine erhebliche Erhöhung des Taufalles kann man nicht erwarten, da einem relativen Sättigungsdefizit von 1% etwa eine Saugkraft von 13 at entspricht. Nach B. H u b e r (53) liegen die osmotischen Werte unserer Pflanzen zwischen 10 und 20 at und können bei Trockenheit auf 30—50 at steigen. Dies würde φ' -Werten von 0,99—0,96 entsprechen. Selbst unter günstigen Verhältnissen wird die aus der Hygroskopizität resultierende Zunahme des Taus nur wenige Prozente der Mengen bei starkem Tau ausmachen können. Dagegen ist es durchaus denkbar, daß eine hygroskopische Fläche Taubildung aufweist, während eine nicht-hygroskopische frei von Tau bleibt. Absolut gesehen können aber auch diese Taumengen nur gering sein. Natürlich ist auch der Fall $\varphi' < \varphi$ möglich, doch bleiben die Kondensatmengen, wie oben schon gezeigt wurde, dabei gering. Bei stark hygroskopischen Stoffen wird man diese Erscheinung, die dem Feuchtwerden von Salzen entspricht, dann aber kaum mehr als Tau im meteorologischen Sinne ansprechen können.

10. Die Analogie zwischen der Taubildung und der elektrolytischen Abscheidung

Die zu Beginn dieses Teiles (II, 1) der vorliegenden Arbeit aufgezeigte Analogie zwischen dem Wärmestrom und dem Tau einerseits, dem elektrischen Strom und einer elektrolytischen Abscheidung andererseits kann jetzt nach der Ableitung der Taufformel näher betrachtet werden: Schickt man durch die in Abb. 5 dargestellte Leiteranordnung einen Strom J , so ist die an der Anode des Elektrolysegefäßes abgeschiedene Metallmenge M durch

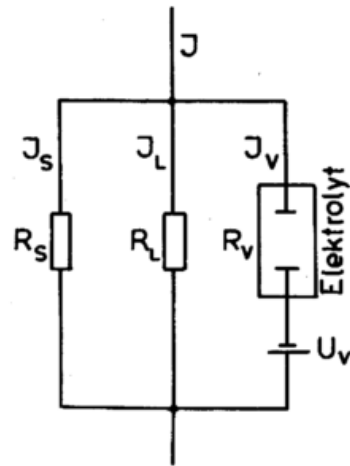


Abb. 5
Elektrisches Analogieschaltbild zur Verteilung der Wärmeströme bei der Taubildung.

$$M = \frac{1}{\mu} \frac{\frac{1}{R_v}}{\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s}} J - \frac{1}{\mu} \frac{\frac{1}{R_v} \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_s} \right)}{\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s}} U_v \quad [40]$$

gegeben, wenn man unter μ die je Ladungseinheit abgesetzene Metallmenge versteht. Ersetzt man in [40]

M	durch W	R_L	durch $\frac{1}{a_L}$
μ	durch r	R_v	durch $\frac{1}{a_v}$
J	durch $-(S_L + B)$	R_s	durch $\frac{1}{a_s}$
U_v	durch $\frac{E_L}{dE} (1 - \varphi)$		

so erhält man die Taufformel [29] mit den in [30a, b] angegebenen Koeffizienten. Auch die der Formel [27] entsprechende Gleichung für die Spannung zwischen den beiden Verzweigungspunkten ist analog gebaut. Die elektrischen Ströme J_L , J_v und J_s entsprechen den Wärmeströmen L , V und $-a_s (\vartheta - \vartheta_L)$.

In einer klaren Nacht wird die Ausstrahlung einer waagrechtan liegenden Oberfläche, die etwa $0,5 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ beträgt, zum größten Teil (etwa $0,4 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) durch die Gegenstrahlung gedeckt. Der Rest von etwa $0,1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ muß durch andere Wärmeströme kompensiert werden. Ein Teil kann dabei aus dem Körper kommen, der sich dadurch abkühlt. Den größeren Teil wird aber in der Regel die Wärmezufuhr aus der Luft liefern. Sofern die Temperatur der Oberfläche den Taupunkt der umgebenden Luft unterschreitet, ist ein Teil dieses Wärmestromes aus der Luft mit der Abscheidung von Wasser verbunden. Der Anteil dieses latenten Wärmestromes am Gesamtärmestrom aus der Luft wird dabei vor allem durch das Sättigungsdefizit der Luft, ihre Temperatur und die Stärke der Windbewegung bestimmt. Daß die Oberflächen naß werden, ist vom energetischen Standpunkt also nicht mehr als ein Nebeneffekt.

III. Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Arbeiten

Die wissenschaftliche Literatur umfaßt zur Zeit knapp 300 Arbeiten (95), (121), die sich eingehender mit dem Tau und den mit ihm zusammenhängenden Fragen befassen. Verständlicherweise hat ein merklicher Teil bloß referierenden Charakter (Literaturberichte, Lehr- und Handbücher, allgemein gehaltene Übersichten u. ä.), ein weiterer großer Teil befaßt sich überwiegend mit klimatologischen, agrarmeteorologischen oder botanischen Fragen bzw. gibt nur Meß- und Beobachtungsergebnisse und eventuell eine Beschreibung der verwendeten Meßmethode wieder. Auf die mit dem Vorgang der Taubildung zusammenhängenden Fragen wird zwar in vielen Arbeiten sozusagen am Rande hingewiesen, eingehender beschäftigt sich mit der Physik und den meteorologischen Bedingungen der Taubildung, der Verteilung der meteorologischen Elemente und ihrem Einfluß auf die Taumenge nur ein relativ kleiner Teil der genannten Arbeiten. Auch auf die energetische Seite der Taubildung wird mehrfach hingewiesen, doch gehen die Hinweise meist nicht über eine Interpretation des schon in der Definition des Taus zum Ausdruck kommenden Zusammenhangs zwischen dem Tau und der effektiven nächtlichen Ausstrahlung hinaus. Quantitative Ansätze über die Beziehung der Taubildung zu den nächtlichen Energieumsätzen sind dagegen nur in einigen wenigen Arbeiten zu finden. Sofern diese Arbeiten dem Verfasser zugänglich waren, soll im folgenden auf sie eingegangen werden. Außerdem sollen Folgerungen aus dem Teil II der vorliegenden Arbeit mit den Ergebnissen anderer theoretischer und experimenteller Untersuchungen zum Tauprobem verglichen werden.

1. Der Tau als negative Verdunstung

Als Umkehrung der Verdunstung faßt M. Robitzsch (79) die Tau- und Reifbildung auf. Für beide Vorgänge gilt daher die gleiche Formel

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot \frac{0,622}{B} (e_1 - E_w), \quad [41]$$

die im wesentlichen der Formel

$$W = -h \frac{0,623}{b} (E - e_1) \quad [6]$$

entspricht. Aus ihr würde nach Robitzsch wegen der Druckabnahme mit der Höhe eine Zunahme des Taus (1,4% je 100 m) mit der Seehöhe folgen. Eine Nachprüfung an Hand der Tauformel zeigt, daß dieser Effekt durch die Abnahme der mittleren Temperatur mit der Höhe etwa kompensiert wird. Dagegen würde die Zunahme der effektiven Ausstrahlung bei guten Tauverhältnissen eine Zunahme des Taus mit der Seehöhe ($\approx 3\%$ je 100 m) bewirken, wenn man die übrigen Faktoren (α_L, φ) als etwa konstant ansehen kann.

Aus der Proportionalität zwischen $\frac{dW}{dt}$ (W) und $\frac{dm}{dt}$ (h) folgert Robitzsch ferner, daß die „Menge des wässerigen und festen Niederschlages bei Tau- und Reifbildung um so größer wird, je größer die Ventilation ist“. Dieser den Beobachtungstatsachen widersprechende Schluß erklärt sich aus der Nichtberücksichtigung der energetischen Zusammenhänge. Wenn die Ventilation zunimmt, nimmt — wie [27] zeigt — die Temperaturdifferenz zwischen Taufänger und Luft ab. Daraus folgt bei fehlender Sättigung der Luft, was in der Regel zutrifft, eine Abnahme des Taufalls bei sonst gleichbleibenden übrigen Faktoren.

2. Die energetische Seite der Taubildung

E. Leick (62) hat die Tauformel Robitzschs übernommen. Wohl im Hinblick auf die Beobachtungsergebnisse zieht er aus ihr nicht die gleiche Folgerung. Dagegen weist er auf die energetische Seite der Taubildung hin und betont, daß die bei der Bildung von 1 g Tau freiwerdenden etwa 600 cal einen Einfluß auf den Taufall selbst haben müssen. Die Verbindung dieser Wärmetönung mit der Wärmekapazität der Luft führt dann zwar zu der eindrucksvollen Abschätzung, daß die Kondensationswärme von 1 g Wasser zur Erwärmung von 2,5 kg Luft um 1° C ausreicht, stellt aber einen falschen Weg dar. Die Ansicht, daß die freiwerdende Tauwärme zu einer Erwärmung der Luft führt*, kann man auch in einigen anderen Arbeiten (31), (119) mehr oder minder klar ausgesprochen finden. Das ist natürlich nicht möglich, da bei der Taubildung die taubildende Oberfläche kälter sein muß als die umgebende Luft. Die Wärmezufuhr aus der Kondensation kann nie dazu führen, daß eine taubildende Oberfläche Lufttemperatur erreicht, da dann selbst bei Sättigung der Luft keine Taubildung mehr möglich ist, bei der meist fehlenden Sättigung aber sogar Verdunstung eintreten müßte. Um Wärme an die Luft abgeben zu können, muß aber die Oberfläche wärmer als die Luft sein. In diesem Falle müßte sie aber selbst bei Sättigung verdunsten.

Wenn J. Seemann und K. Löw (88) glauben, aus einem Ansteigen der Lufttemperatur an 4 Meßstellen in 0,1, 0,2, 0,5 und 2,0 m Höhe und dem gleichzeitigen steileren Anstieg der Registrierkurve eines Tauschreibers Keßler-Fueß darauf schließen zu können, daß die freiwerdende Tauwärme den Temperaturanstieg bewirkt hat, so halten sie eine mit der wahren Ursache**) der verstärkten Taubildung gekoppelte Erscheinung für eine Folge der Taubildung. Daß in ruhigen Nächten durch eine kleine Luftbewegung die Temperaturschichtung in den untersten Metern plötzlich vom Ausstrahlungstyp mit starker Inversion in den Austauschtyp mit weitgehender Isothermie wechseln kann, zeigen viele Beobachtungen (90). Dabei wird die kältere und bei Taubildung — dem Dampfdruck nach — trockenere Bodenschicht durch wärmere und feuchtere Luft aus der Höhe ersetzt. Der Taufänger behält aber zunächst wegen seiner thermischen Trägheit die niedrigere Temperatur bei, wie sie den vorhergehenden Verhältnissen entsprach. Dies hat eine größere Dampfdruckdifferenz zwischen Taufängeroberfläche und Luft und damit eine verstärkte Kondensation zur Folge, bis der gleichsam durch die Umschichtung entstandene Kältevorrat des Taufängers verbraucht ist. Die verstärkte Taubildung dauert also nur kurze Zeit an, während welcher sich aber meist auch schon wieder eine Inversion in der bodennahen Luftschicht bildet.

Die bei der Taubildung freiwerdende Kondensationswärme geht natürlich in den nächtlichen Energiehaushalt ein. Die der Luft und dem Boden entzogene Wärme ist geringer als ohne Tau, wenn man die effektive Ausstrahlung einmal als von der Taubildung unbeeinflusste Größe ansieht. Daher ist auch bei Tau die Oberflächentemperatur in der bodennahen Schicht

*) Der Urheber dieser Meinung scheint J. C. Jamain (55) zu sein.

**) Schwer deutbar ist in der Einleitung zur Arbeit (S. 156) der Satz: „... Ferner wird als Ursache der freiwerdenden Kondensationswärme eine geringe Aufwärmung der bodennahen Luft und dadurch eine Verzögerung im nächtlichen Temperaturfall angenommen.“

— wieder gleiche sonstige Verhältnisse vorausgesetzt — höher bzw. sinken diese Temperaturen langsamer ab.

Eine ausführliche Betrachtung des Zusammenhanges zwischen der Taubildung und der effektiven Ausstrahlung verdanken wir F. Zunker (122). Bei ihm wird jedoch der Anteil des Transportes latenter Wärme am Gesamtwärmestrom aus der Luft überschätzt, da er die Kondensationswärme allein schon für ausreichend zur Kompensation des nächtlichen Ausstrahlungsverlustes ansieht. Unter dieser Annahme errechnet er mit dem (zu großen) Wert $S = -0,16 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ und einer 7stündigen Andauer des Taufalles eine maximale Taumenge von 1,1 mm. Er weist darauf hin, daß gerade auch vom energetischen Standpunkt die Taubildung für die Pflanzen bedeutungsvoll ist, da sie dadurch vor zu tiefen Temperaturen bewahrt werden. Für die Unterschiede in der Stärke der Betauung von Pflanzen macht er neben dem Emissionskoeffizienten die Eigenwärmeerzeugung der Pflanzen verantwortlich. Abschließend weist er auf die großen Mengen von Kondensationsprodukten hin, die beim Überströmen von Schnee- oder Eisflächen durch warme, feuchte Luft entstehen und das gemeinsame Stammwort von Tau und Auftauen berechtigt erscheinen lassen.

Energetische Gesichtspunkte spielen auch bei G. Yamamoto (117) die entscheidende Rolle. Er geht von einer Energiebilanzgleichung aus, die — unter Berücksichtigung der anderen Bezeichnungswiese — mit der Gleichung [1] identisch ist. Auch die weitere Entwicklung entspricht zunächst der der vorliegenden Arbeit, wenn man von unwesentlichen Unterschieden (D wird gleich a gesetzt, $B = 0$ angenommen) absieht. Dann allerdings vernachlässigt Yamamoto ein Glied, welches seiner Funktion nach etwa dem α_v entspricht, gegenüber einem, welches etwa α_L entspricht. Dies muß natürlich zu erheblichen Fehlern führen, da α_v größenordnungsmäßig gleich α_L ist, ja dieses oberhalb 5°C sogar übertrifft. Sodann ersetzt Yamamoto die Augenblickswerte der Temperatur von Luft und Taufänger durch die nächtlichen Minima der Luft und eines frei ausgelegten Thermometers, die Dampfdrucke von Luft und Taufänger durch die Sättigungsdampfdrucke für die beiden obigen Temperaturen und zunächst die effektive Ausstrahlung durch ihren Wert nach der Formel von Brunt mit obigen Temperatur- und Dampfdruckwerten. Der Vergleich der so berechneten Werte mit den Meßwerten (101 Fälle) ergibt einen Korrekturfaktor, der in der Formel berücksichtigt wird. Sodann wird die variable effektive Ausstrahlung durch einen Mittelwert $0,148 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ersetzt, so daß Yamamoto schließlich auf eine Taufformel kommt, die in der Schreibweise der vorliegenden Arbeit

$$W = 0,308 \frac{E_{L,\min} - E_{\min}}{\vartheta_{L,\min} - \vartheta_{\min}} \quad [42]$$

(W in mm/Nacht, E in Torr, ϑ in $^\circ\text{C}$) lauten würde. Aus dieser Taufformel sind fast alle Faktoren eliminiert, die maßgebend für die Unterschiede im Taufall sind: effektive Ausstrahlung, Ventilation und Feuchte. Der verbleibende Bruch enthält zwar noch Dampfdruckwerte, doch sind diese von der wahren Feuchte unabhängige reine Funktionen der beiden Temperaturen. Den obigen Differenzenquotienten kann man mit weitaus hinreichender Genauigkeit durch den Differentialquotienten ersetzen und würde dann mit

$$W = 0,308 \left(\frac{dE}{d\vartheta} \right)_{L,\min} \quad [43]$$

den Taufall als reine Temperaturfunktion erhalten. Für die Berechnung genügt jetzt schon das Minimum der Lufttemperatur. Für $\vartheta_{L,\min} = 10^\circ\text{C}$ erhält man (Tab. 3)

$$W = 0,19 \text{ mm/Nacht,}$$

einen Wert, dessen ungefähre Übereinstimmung mit dem Mittelwert des Taufalles einer klaren Nacht angesichts der Korrektur der theoretischen Formel an Hand von Meßwerten nicht verwunderlich ist. Eine Aussage über die Abhängigkeit der Taumenge von den entscheidenden meteorologischen Faktoren vermag aber die Taufformel G. Yamamoto's nicht zu machen.

3. Messungen des Taus über den Wärmehaushalt und den Austausch

Trotz der Schwierigkeiten, die einer Bestimmung des Taufalles auf größeren Arealen im Wege stehen und die schon früher (II, 3) besprochen wurden, sind einige Versuche hierzu gemacht worden.

Als Restglied der Energiebilanz findet M. H. Halstead (40) am 11. 9. 1951 bei Shirley, New Jersey, von $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{2}$ 7 Uhr 0,22 mm Tau. Das entspricht auf die Zeiteinheit umgerechnet etwa 66% der damaligen Strahlungsbilanz von $-64 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Nach einer Formel von A. Ångström hat F. Krügler (60) bei Untersuchungen über den nächtlichen Wärmehaushalt der Erdoberfläche die bei der Tau- bzw. Reifbildung freiwerdende Wärme berechnet. Er findet Werte bis zu $22 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, was etwa $0,02 \text{ mm h}^{-1}$ gebildetem Kondensat entspricht. Die Formel selbst entspricht der Gleichung [9], wobei anstatt $0,690\alpha_L/bc_p$ der Faktor $0,0197 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}/\text{Torr}$ zu schreiben ist. Der Vergleich der beiden Faktoren führt zwar für α_L zu dem plausiblen Wert $\alpha_L = 5 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$, enthält aber keine Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, die nicht ohne Einfluß auf die Transportvorgänge sein kann.

Mit Hilfe der Austauschgleichung [3] haben C. W. Thornthwaite und B. Holzman (103) den Tau ermittelt. Energetische Gesichtspunkte wurden nicht verwendet. Die Arbeit ist primär der Bestimmung der Verdunstung größerer Areale gewidmet, der Tau erscheint nur in einigen Nachtstunden als negativer Verdunstungswert. Der Austauschkoeffizient wird aus zwei Windmessungen in 0,6 und 8,7 m bestimmt, er hat nachts Werte um $1-2 \text{ g cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$. Die Bestimmung der Dampfdruckdifferenz zwischen den gleichen Meßhöhen ergibt etwa 0,1 Torr und ist relativ ungenau, so daß auch die errechneten Taumengen von $0,002-0,008 \text{ mm h}^{-1}$ nur etwas mehr als die Größenordnung anzugeben vermögen. Auf die prinzipiellen Schwierigkeiten dieser Art der Taumessung wurde schon oben hingewiesen (II, 3).

4. Die Untersuchungen von T. Homén und E. Wollny

Die Bedeutung der energetischen Voraussetzungen für die Taubildung hebt T. Homén (51) hervor. Die auch heute noch lesenswerte Arbeit vermittelt nicht nur einen Einblick in die Situation des Tauproblems vor nunmehr 60 Jahren, sondern gibt in den Folgerungen, die Homén aus eigenen und fremden Beobachtungen zieht, Hinweise, die leider in vielen neueren Arbeiten scheinbar unbeachtet blieben. Aus der Gewichtszunahme von $\frac{1}{16}$ bis 1 qm großen Tüchern, die über das Gras gelegt und am Abend und am Morgen gewogen wurden, findet Homén in überwiegend klaren Sommernächten Taumengen von $0,1 \dots 0,2 \text{ mm}$. An Gummitüchern kann er Ober- und Untertau getrennt bestimmen. Gleichzeitige Messungen anderer Größen ermöglichen eine nachträgliche Abschätzung fast aller für den Taufall wichtigen Parameter. Als Mittelwerte aus zwei Nächten (25. 7. und 6. 8. 1892) kann man nach den Angaben Homén's berechnen: Obertau 73μ , Untertau 63μ , Lufttemperatur in 2 m $11,0^\circ\text{C}$, Taupunkt in 2 m $8,9^\circ\text{C}$, Temperatur des Gum-

mituches 6,5°C, Temperatur der Bodenoberfläche (gemessen mit einem Thermometer unter dem Tuch am Boden) 9,2°C. Unter der Annahme, daß der Vorgang 8 Stunden bei den mittleren Verhältnissen andauert, daß der Dampfdruck des Bodens gleich dem reinen Wassers gleicher Temperatur ist und daß das auf dem Grase liegende Tuch 1—2 cm vom Boden entfernt war, findet man, daß die reine Diffusion zum Transport des beobachteten Untertaus vom Boden zum Tuch ausreicht, wie es Homén vermutet hat. Der durch den Untertau bewirkte Wärmestrom von $8 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, der aus der molekularen Wärmeleitung resultierende von $6 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, und der aus der Wärmestrahlung folgende von $19 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ergeben zusammen für das Tuch das Glied $B = 33 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, wenn man die Wärmeleitung durch die Grashalme o. ä. als vernachlässigbar ansieht. Der Obertaumeßwert und die Mittelwerte des Dampfdruckes des Tuches und der Luft in 2 m Höhe lassen mit Hilfe von [9] ein $\alpha_L = 3 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$ errechnen, was etwa einer mittleren Windgeschwindigkeit von $0,2 \text{ m sec}^{-1}$ entspricht. Aus diesen Daten wiederum ergibt sich $L = 14 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Zusammen mit dem aus dem Obertau errechneten $V = 9 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ und B erlaubt es die Berechnung von $S = -56 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Die offensichtlich niedrige Strahlungsbilanz erklärt sich leicht aus der merklichen Unterkühlung (4,5°C) des Tuches unter die Hüttentemperatur, für welche sich nach [24] eine effektive Ausstrahlung $S_L = -89 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ergibt. Wenn diese Schätzwerte der Wärmeströme für mittlere Verhältnisse zweier ziemlich klarer, windstiller Sommernächte auch nicht durch Messungen zu belegen sind, so zeigen sie doch, daß die in Teil II dieser Arbeit aufgezeigten Gesetzmäßigkeiten aus wenigen geeigneten Daten zu recht plausiblen Werten der energetischen Größen führen.

Aus der ungefähren Gleichheit von Ober- und Untertau auf den Gummitüchern schließt Homén, daß etwa die Hälfte des auf den Gräsern niedergeschlagenen Taus aus dem Boden stammt. Dieser Schluß ist aber insofern unzulässig, als bei der Abdeckung des Bodens durch die Tücher diese eine künstliche ausstrahlende Oberfläche bilden, die sich merklich stärker abkühlt als die Gräser. Das zeigen auch die Messungen Homén's. Außerdem schließen die Tücher den Boden in viel höherem Maße von der freien Luft ab als ein Rasen, so daß sich so stark von den natürlichen abweichende Verhältnisse ausbilden, daß man von den dabei gewonnenen Meßwerten nicht auf natürliche Verhältnisse schließen darf. Das gleiche gilt für eine ähnliche Beobachtung von E. Wollny (115), der aus dem allein auftretenden Untertau an einer auf den Boden gelegten Glasplatte schloß, daß der Tau fast ausschließlich dem Boden entstammt. Eine Reihe weiterer Beobachtungen, aus denen Wollny auf die überwiegende Herkunft des Taus aus dem Boden schloß, lassen sich zwanglos ohne diese Annahme aus der Thermodynamik der Taubildung erklären.

Das Schwergewicht der Untersuchungen E. Wollny's lag jedoch bei einer anderen Versuchsanordnung, deren Ergebnisse heute vielfach noch als einwandfreie Taumeßwerte zitiert werden. Wollny hatte gefunden, daß eine direkte Messung des Taufalls auf Pflanzen durch Wiegen von Pflanzentöpfen zu dem paradox erscheinenden Resultat führte, daß „die mit betauten Pflanzen bestandenen Flächen eine Gewichtsabnahme während der Taubildung erfahren“. Dies erscheint nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, daß nur der nach außen freie Teil der Pflanzenoberfläche effektiv ausstrahlen kann, während die weiter innen liegenden Teile infolge der Gegenstrahlung anderer Pflanzenteile etwa im Strahlungsgleichgewicht sind. Daher wird auch nur bei einem Teil der Blätter die Verdunstung in die Taubildung übergehen, so daß auf die ganze Pflanze bezogen die Verdunstung sogar über-

wiegen kann. Wollny glaubte nun, den wahren Taufall durch eine Differenzmethode erfassen zu können. Blumentöpfe mit Grasbewuchs wurden so in einen Rasen eingesetzt, daß sie diesem gleich waren. Die eine Hälfte der Töpfe war vollkommen frei, über die andere wurden in 1 m Höhe eine 5 qm große Leinwand gespannt. Als Taumeßwert wurde die Differenz der Gewichtsänderungen je Einheit der Bodenoberfläche genommen.

Man kann nun zunächst annehmen, daß durch die Überdachung zwar die effektive Ausstrahlung verhindert wurde, die übrigen Faktoren aber gleich blieben. Dann ist, wenn man von den Pflanzenteilen abieht, deren Energiehaushalt durch die Abdeckung nicht geändert wird,

$$W_D = -\omega_s B - \omega_v \alpha_L (1 - \varphi) \quad [44]$$

Für die freistehenden Töpfe gilt

$$W_F = -\omega_s (S_L + B) - \omega_v \alpha_L (1 - \varphi) \quad [45]$$

Die von Wollny als Taumeßwert verwendete Differenz

$$\Delta W = W_F - W_D = -\omega_s S_L \quad [46]$$

ist also gar nicht der wahre Taufall, sondern das vom Wärmestrom aus dem Boden befreite Strahlungsglied. Das zeigen auch die Meßwerte Wollny's, die maximal knapp 0,9 mm/Nacht erreichen, wie es etwa der früher berechneten energetischen Grenze des Taufalles, d. h. also dem Maximum von $-\omega_s S_L$ entspricht. Im Mittel aus 15 derartigen Versuchen ergab sich 0,54 mm, also erheblich mehr, als man als Taumenge im Mittel über mehrere Nächte erwarten kann, von denen ein Teil sogar leicht bewölkt war. Nun hatte Wollny alle Versuche gleichzeitig mit Böden mit 75, 50 und 25% ihrer Wasserkapazität durchgeführt und gefunden, daß mit abnehmendem Wassergehalt des Bodens seine Meßwerte abnehmen. Auch dies kann man sehr einfach erklären. Das Verdunstungsglied der obigen Formeln [44] und [45] gilt für eine freie Wasserfläche. Es ist daher erklärlich, daß mit immer geringer werdendem Wassergehalt des Bodens bei wirklicher Verdunstung der theoretische Wert nur zu einem immer kleineren Teil erreicht wird, während bei Taubildung ein derartiger Einfluß natürlich nicht vorhanden ist. Dies wirkt sich so aus, daß bei der Differenzbildung in [46] ein Teil des Verdunstungsgliedes von [45] stehen bleibt, dessen Betrag mit abnehmender Bodenfeuchte zunimmt und so ΔW vermindert. Diesen Sachverhalt könnte man also nur als eine Abhängigkeit der Verdunstung vom Wassergehalt des Bodens deuten — was nie bezweifelt wurde — keinesfalls aber als eine Abhängigkeit des Taufalles oder gar als Hinweis auf die Herkunft des Taus.

5. Der Pflanzenfaktor von E. Hiltner

Schon 1892 hat F. v. Kerner (58) darauf hingewiesen, daß die im Vergleich zu den ebenen künstlichen Taufängern „viel größere ausstrahlende Oberfläche der Pflanzen im natürlichen Bestand“ einen höheren Taufall zur Folge haben müsse. 1930 schreibt E. Hiltner (44): „Bei keinem der bisher angeführten, unter Verwendung von Cellon, Filterpapier und dergleichen als Taufänger gewonnenen Werte ergeben sich Taumengen, die einen Niederschlag von 0,2 mm übersteigen. Dabei war es aber unverkennbar, daß den Gräsern, die unterhalb der Taufängerflächen wuchsen, ebenfalls Taumengen anhafteten, die weit höher sein mußten als die erhaltenen Vergleichsgewichte. Will man aus den letzteren daher Rückschlüsse auf die tatsächlich auf Boden und Pflanzen niedergeschlagenen Taumengen ziehen, so ist es notwendig zu wissen, in welchem Verhältnis die Taumengen auf einer Wiese bestimmter Höhe, auf einem Getreidefeld,

Tab. 7 Angaben zur Reduktion des Pflanzenfaktors von E. Hiltner.

Pflanze	nähere Beschreibung	gesamtes Tau-gewicht	Auf die Bodenfl. bezog. Tau	Tau-messerwert	Pflanzenfaktor	Aussehen, Höhe, Form der Pflanze (rohe Schätzung)	Projek-tions-fläche	äqui-valenter Radius	äqui-valente Höhe	$\frac{H}{2R}$	Ausstrahlungs-faktor	reduz. Pflanzen-faktor
		g	mm	mm	—		cm ²	cm	cm	—	—	—
1. Erle	1320 Blätter	231	0,289	0,130	2,22	lockerer Busch 2-3 m hoch	8000	50	200	8,0	4,2	0,5
2. Luzerne	0,45 m hoch	29	0,387	0,129	3,00	hoch gebunden (Zylinder)	750	15	45	6,0	3,4	0,9
3. Geranie		14	0,568	0,139	4,10	30 cm hoch (Zylinder)	250	9	25	5,6	3,2	1,3
4. Levkoje		100	0,708	0,151	4,69	10 cm hohe Rosette 30 cm hoher Blüten-schaft m. wenig Blättern	1416	21	25	2,4	2,0	2,4
5. Kugelbux		192	0,499	0,100	4,99	dichte Kugel am Boden	3860	35	60	3,4	2,4	2,1
6. Zuckerrübe		122	0,763	0,125	6,10	40 cm hoch nach unten konisch	1600	22	35	3,2	2,3	2,7
7. Pferde-bohnen	125 cm hoch	64	0,853	0,129	6,61	dicht (Zylinder)	750	15	125	16,6	7,7	0,9
8. Kartoffel	hochge-bunden	106	0,707	0,100	7,07	60 cm (Zylinder)	1500	22	50	4,5	2,8	2,5
9. Ulme	4086 Blätter	1537	~0,700	0,129	~5,4	fast kugelig ~1 m Stamm	21600	83	200	4,8	2,9	1,9
10. Ahorn	784 Blätter 3 m hoch	483	~0,600	0,107	~5,6	Krone etwa 1,5 m Stamm etwa 1,5 m	8200	51	100	3,9	2,6	2,2

Nach den Angaben von E. Hiltner geschätzte bzw. berechnete Werte

in einem Busch oder Baumbestand, auf unbewachsenen Bodenarten und dergleichen zu den auf einem Meßinstrument niedergeschlagenen stehen.“ Hiltner glaubte also, daß zwischen der Taumenge je Flächeneinheit des natürlichen Pflanzenbestandes und der Taumenge je Flächeneinheit des künstlichen Taufängers ein im wesentlichen konstanter Quotient besteht, der praktisch nur von der Pflanzenart abhängt. Diesen „Pflanzenfaktor“ bestimmte er dann dadurch, daß er eingetopfte oder abgeschnittene Einzelpflanzen in ihren natürlichen Wuchshöhen der Betauung aussetzte und ihre durch Wägung bestimmte Gewichtszunahme auf die Projektionsfläche der Pflanze auf dem Boden bezog. Die so gewonnenen Pflanzenfaktoren sind mit den übrigen Angaben Hiltners in Tab. 7 dargestellt. Sie liegen zwischen 2,2 und 7,1. Hiltner schließt daraus, daß im Mittel Pflanzenbestände mindestens das fünffache der Taumenge empfangen, die man mit den von ihm verwendeten Haarsieben mißt.

Nun ist aber der Gesamtenergieverlust freistehender Pflanzen infolge der negativen nächtlichen Strahlungsbilanz erheblich größer als der der gleichen Pflanze im geschlossenen Bestand. Dies erklärt sich dadurch, daß die freistehenden Pflanzen auch nach den Seiten effektiv abstrahlen können, während dies im Bestand wegen der Gegenstrahlung der im wesentlichen gleichtemperierten Nachbarpflanzen nicht möglich ist. Sieht man für eine Abschätzung dieses zusätzlichen Energieverlustes der Pflanze diese in roher Näherung als senkrecht stehenden zylindrischen Körper an, so läßt sich die auf die waagrechte Querschnittsfläche bezogene effektive Ausstrahlung des Zylinders durch

$$S_z = S_H \left(1 + \frac{2H S_v}{R S_H}\right) \quad [47]$$

darstellen. Die effektive nächtliche Ausstrahlung kann man nach F. Linke (68) als Funktion der Zenitdistanz θ^* proportional zu $\cos^r \theta^*$ setzen, wobei für den als Mittelwert angenommenen Dampfdruck von 9 Torr $r = 0,40$ wird. Dann ergibt sich aus der Näherungsformel

$$\frac{S_v}{S_H} = \frac{1}{\pi} \frac{(2+r)(4+r)}{(1+r)(3+r)} \sqrt{\frac{\pi}{9+2r}} \quad [48]$$

dieses zu 0,40.

Um nun mit Hilfe von [47] berechnen zu können, um wieviel der Strahlungsverlust der von Hiltner verwendeten Pflanzen größer war als der einer entsprechenden waagrechten Vergleichsfläche, müßte man das den Pflanzen entsprechende H kennen. Das ist heute, 25 Jahre nach den Untersuchungen Hiltners natürlich nur mehr auf Grund von Schätzungen möglich. Als Unterlage diene neben den Angaben Hiltners und den aus ihnen berechenbaren Querschnittsflächen bzw. äquivalenten Radien Vergleiche mit Pflanzen der gleichen Art und Größe im Botanischen Garten München*). Die genannten Größen sind zusammen mit dem daraus nach [47] berechneten S_z/S_H in Tab. 7 angegeben.

Man sieht daraus, daß die von Hiltner angegebenen Pflanzen im Mittel etwa die dreifache Energie durch die Ausstrahlung verlieren wie eine in der Projektion auf den Boden gleiche ebene waagrechte Fläche. Nun erlauben leider die in der Taufformel [29] zum Ausdruck kommenden Gesetzmäßigkeiten nicht, allein aus der ungefähren Kenntnis der Strahlungsverhältnisse die entsprechende Korrektur der Tauwerte vorzunehmen. Auch bei genauer Kenntnis der Versuchspflanzen wäre dies wegen der fehlenden übrigen Faktoren nicht möglich. Hinzu kommt, daß

vor allem die höheren Pflanzen schon in ihren einzelnen Teilen wegen der gerade in Bodennähe stark veränderlichen Temperatur, Feuchte und Ventilation sehr unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt waren. Bezieht man trotz dieser Bedenken die Pflanzenfaktoren Hiltners auf den „Ausstrahlungsfaktor“ S_z/S_H , so erhält man einen mittleren reduzierten Pflanzenfaktor von knapp 2. Dieser Wert erscheint vor allem im Hinblick darauf plausibel, daß der Hiltnersche Taufänger ein Haarsieb war, das sowohl wegen der unvollständigen Flächenbedeckung und geringen Schichtdicke (verringertes Strahlungsglied) als auch wegen der besseren Durchlüftung (vergrößertes Verdunstungsglied der Taufformel) weniger Tau empfängt als die meisten übrigen Taufänger. W. Gelbke (36) hat vor kurzem mehrere Vergleichsmessungen zwischen einem Original-Taufänger von E. Hiltner und Leickschen Platten durchgeführt. Im Mittel aus 11 Vergleichsmessungen findet er, daß der Hiltnersche Roßhaartaufänger nur 47% des gleichzeitigen Meßwertes einer vom Boden thermisch isolierten, in einer Decelithkassette ausgelegten Leickschen Tauplatte ergibt, die wiederum etwas höhere Werte anzeigt als eine beidseitig frei aufgestellte Leick-Platte. Sieht man die zuletzt genannte Aufstellung als vergleichbar mit Pflanzenteilen an, so kann man sagen, daß der von E. Hiltner im Mittel mit 5 angegebene Pflanzenfaktor ziemlich genau zu 1 wird, wenn man den von Hiltner fälschlicherweise außer acht gelassenen Einfluß der seitlichen effektiven Ausstrahlung und den Unterschied im Taugenuß des Roßhaartaufängers und einer Leick-Platte (Blatt) berücksichtigt. Die von Hiltner untersuchten Pflanzen würden im einigermaßen geschlossenen Bestand etwa den gleichen Tau empfangen wie frei aufgestellte Leicksche Platten in vergleichbarer Lage.

Einzelne freistehende Bäume o. ä. können jedoch, wie die obigen Überlegungen zeigen, wegen der seitlichen effektiven Abstrahlung merklich mehr Tau erhalten, als ihrer Querschnittsfläche im geschlossenen Bestand entspricht. So ergibt eine einfache Abschätzung, daß der auf den horizontalen Kronenquerschnitt bezogene Taugenuß einer 3 m hohen Baumkrone von 2 m Durchmesser bei Sättigung, 10°C und $S_L = -100$ $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ für 10 Stunden 1,5 mm entspricht. Der Wassergehalt der die Krone durchsetzenden Luft bleibt praktisch unverändert (Änderung etwa 1‰). Auf geschlossene Bestände darf man diese Werte aber nicht übertragen.

Auf die Richtigkeit der obigen Überlegungen weisen auch die Untersuchungen von W. Bernick (13) hin, der ebenfalls für eine Reihe von Pflanzen Pflanzenfaktoren nach der Hiltnerschen Methodik berechnete und dabei im Vergleich zur Leickschen Tauplatte auf Werte zwischen 2,8 und 0,2 kam. Für die auch von E. Hiltner untersuchten Kartoffeln findet er Pflanzenfaktoren um 0,3. Ihm erscheint auf Grund seiner experimentellen Untersuchungen „die Ermittlung eines Durchschnittsfaktors selbst für ein und denselben Acker kaum möglich“ und er schreibt zusammenfassend: „Bei der großen Verschiedenheit der Blattgestalt, der Oberflächenbeschaffenheit und der Wuchsform der Pflanzen kann ein ‚allgemein gültiger‘ Pflanzenfaktor niemals eine auch nur annähernde Zuverlässigkeit beanspruchen. Durch seine Benutzung läuft man Gefahr, den gesicherten experimentellen Boden unter den Füßen zu verlieren.“

Trotz dieser klaren Darstellung ist aber der Gedanke an einen „Taufaktor“ seit E. Hiltner nicht mehr aus der botanischen Tauliteratur verschwunden. Wieweit hier das unbewußte Bestreben eine Rolle spielte, den im Vergleich zu den übrigen Niederschlägen nur wenige Prozente betragenden Taumengen ein größeres Gewicht zu verleihen, muß freilich offen bleiben. Auch E. Leick (64) scheint den von ihm ge-

*) Herrn Prof. Dr. B. Huber vom Forstbotanischen Institut und Frh. H. Ernst vom Botanischen Institut der Universität München bin ich für die Beratung zu Dank verpflichtet.

prägen Ausdruck „relative Taumessung“ so verstanden zu haben, daß man die Meßwerte „im Hinblick auf die viel größere tätige Oberfläche der Pflanze mit einem Pflanzenfaktor multiplizieren“ muß.

Diesen Gedanken, daß die reichgegliederte und ein Vielfaches der Bodenfläche betragende Pflanzenoberfläche allein schon etwa wie bei Adsorptionerscheinungen auch bei Tau eine größere Anlagerung bewirken muß, findet man mehr oder minder klar ausgesprochen in vielen Arbeiten. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten weisen hier aber gerade in die entgegengesetzte Richtung. Wie oben gezeigt wurde, ergibt sich der Taugenuß einer Oberfläche als Differenz eines der Strahlungsbilanz und eines dem Verdunstungsanspruch der Luft proportionalen Gliedes. Nun liegt der Emissionskoeffizient von Pflanzenblättern (33) und auch der des Wassers (83), der nach dem Beginn merklichen Taufalles gilt, etwa bei 95%, Aufrauh der Oberfläche erhöht zwar diesen Wert, aber mehr als 100% — was einem schwarzen Körper entspricht — kann er nicht werden. Also wird durch eine noch so starke Aufgliederung der ausstrahlenden Schicht keine mit ihrem Absolutwert ins Gewicht fallende Vergrößerung der negativen Strahlungsbilanz und damit des Strahlungstermes beim Tau zu erwarten sein. Dies ist aber ganz anders beim Verdunstungsterm. Hier bewirkt die Aufgliederung eine Vergrößerung der „verdunstenden“ Oberfläche oder — wenn man auf die Bodenfläche bezieht — eine scheinbare Vergrößerung der Wärmeübergangszahl α_L . Dies muß — alle übrigen Größen wie bei jedem derartigen Gedankenversuch als gleichbleibend angesehen — eine Vergrößerung des Verdunstungstermes zur Folge haben und damit eine Verringerung des Taufalles.

Damit soll nun nicht gesagt werden, daß der Taufall auf einen Pflanzenbestand kleiner als der auf einen darüber angebrachten Taumesser sein muß. Gerade in Bodennähe ändern sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit schon auf kurze Entfernungen sehr stark (III, 9). Vor allem gilt dies für die Ventilation, da durch einen reich gegliederten Pflanzenbestand gleichsam ein weitgehend ruhendes Luftpolster festgehalten wird. Dadurch wird innerhalb und am oberen Rand des Pflanzenbestandes der in der Taufformel in der Wärmeübergangszahl α_L zum Ausdruck kommende Transporteffekt herabgesetzt. Für eine frei der Luft ausgesetzte Fläche oberhalb des Pflanzenbestandes fehlt diese Behinderung der Luftbewegung weitgehend. Es ist daher durchaus möglich, daß ein Pflanzenbestand mehr Tau erhält als ein über ihm angebrachter Taufänger, es kann bei anderer Verteilung der meteorologischen Faktoren aber auch umgekehrt sein. Eine allgemeine Aussage hierüber ist ohne Kenntnis der maßgebenden Faktoren nicht möglich. Es besteht aber kein Grund zur Annahme, daß lebende Pflanzen in irgendeiner Weise gegenüber in der Form ähnlichen „toten“ Körpern im Taugenuß bevorzugt seien.

6. Zur Verwendung von Quotienten u. ä. bei der Taumessung

Die Taufformel [29] zeigt aber noch etwas anderes. Wie schon mehrfach betont, treten die den Taufall bestimmenden Faktoren: Temperatur ϑ_L , effektive Ausstrahlung S_L , Energiezufuhr durch Leitung B, Ventilation ausgedrückt durch die Wärmeübergangszahl α_L und relative Luftfeuchtigkeit φ in der Form einer Differenz zweier Terme auf. Von diesen hängt der eine, wenn man einmal von dem in beide Term — ganz roh gesehen — gleich eingehenden ϑ_L absieht, nur von S_L und B, der andere nur von α_L und φ ab. Ändert sich nun eine dieser Größen z. B. um 20%, so kann sich der Tauwert um praktisch jeden beliebigen

%-Wert ändern. Zwei willkürlich gewählte Zahlenbeispiele sollen dies zeigen:

Beispiel	1	2	
$\vartheta_L =$	10,0	10,0	°C
$S_L =$	-60	-110	mcal cm ⁻² min ⁻¹
B =	20	20	mcal cm ⁻² min ⁻¹
$\alpha_L =$	15,0	15,0	mcalcm ⁻² min ⁻¹ grad ⁻¹
$\varphi =$	91	91	%

Aus diesen Angaben folgt

$\omega_s =$	0,80	0,80	mg cal ⁻¹
$\omega_v =$	18,1	18,1	mg grad cal ⁻¹
$-\omega_s(S+B) =$	32	72	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$
$-\omega_v\alpha_L(1-\varphi) =$	-24	-24	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$
W =	8	48	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$

Wird nun in beiden Fällen B um 50% größer und bleiben alle übrigen Parameter unverändert, so folgt

B =	30	30	mcal cm ⁻² min ⁻¹
$-\omega_s(S+B) =$	24	64	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$
$-\omega_v\alpha_L(1-\varphi) =$	-24	-24	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$
W =	0	40	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$

Wie man sieht, hat sich der Tauwert in dem einen Teil um -100%, im anderen Fall um -17% geändert, obwohl sich in beiden Fällen nur B um 50% vergrößert hat. Es wäre natürlich einfach, ähnliche Beispiele mit der Veränderung anderer oder auch mehrerer Faktoren wiederzugeben. Sieht man die Werte des obigen Beispiels etwa als charakteristisch für die Verhältnisse an zwei Taufängern (natürlich oder künstlich) an und den Fall 1 für eine Nacht mit bewölktem Himmel, den Fall 2 für eine mit wolkenlosem Himmel und ordnet man den 50%igen Unterschied in B den örtlichen Abweichungen (z. B. lockerer und fester Boden) zu, so wäre der Quotient der beiden Tauwerte im Falle 1 ∞ und im Falle 2 1,2. Es dürfte aus diesen einfachen Beispielen klar werden, daß das Beziehen zweier Taumesswerte aufeinander in der Form eines „Faktors“, eines Prozentwertes oder von etwas ähnlichem zu vollkommen unbrauchbaren Resultaten führen muß, wenn man aus den Ergebnissen einer Messung oder auch einer Meßreihe in dieser Form und aus einer weiteren Messung an einem Ort den Meßwert des anderen berechnen wollte. Dabei wurde in den obigen Beispielen nur ein Parameter geändert, während in Wirklichkeit wohl alle Parameter nicht nur von Nacht zu Nacht, sondern auch während derselben Nacht dauernden Veränderungen unterliegen. Tatsächlich haben auch alle Versuche in dieser Richtung bisher zu keinen brauchbaren Ergebnissen geführt, im Gegenteil können entsprechende Angaben von E. Leick (63) direkt als experimentelle Bestätigung angesehen werden.

Das obige einfache Beispiel könnte vielleicht zu der Ansicht verleiten, daß eine additive Relation den Verhältnissen besser gerecht wird. Aber schon die gleichzeitige Änderung zweier Parameter würde zeigen, daß dies auch nicht stimmt. Ganz allgemein kann man aber sagen, daß große Quotienten nur bei kleinen Meßwerten zu erwarten sind. Nur in diesem Fall bewirken an sich kleine Veränderungen des Meßwertes große Verhältniszahlen, während bei großen Meßwerten die energetische Begrenzung des Taufalles nur Verhältniszahlen um 1 zuläßt.

Zu welchen Ergebnissen das Operieren mit den wahren Pflanzenoberflächen ohne Berücksichtigung der energetischen Seite des Taufalles führen kann, zeigt eine neuere Arbeit von J. Stephan (96), der vermutlich aus dem Tauwert besonders begünstigter

Blätter der *Serradella**) mit 0,4 mm durch Multiplikation mit dem Verhältnis

$$\frac{\text{Bodenoberfläche}}{\text{Pflanzenoberfläche}} = 6$$

einen Tauwert von 2,4 mm berechnet. Das ist über das 3-fache des energetisch möglichen Tauhöchstwertes und wahrscheinlich das 6—10-fache des wahren Taufalls. Der offensichtlich doch hoch erscheinende Wert, der etwa dem durchschnittlichen Niederschlag eines Tages entspricht, wird dann gleichsam gestützt durch eine Angabe von P. Lehmann und H. Schanderl (61), die mit Hilfe einer ähnlichen Argumentation zwischen dem so berechneten Taufall auf einem Rapunzelbeet (0,55 mm) und dem auf der Tauwaage Keßler-Fueß (0,018 mm) die Verhältniszahl 30 fanden. Dabei können, wie der obige Gedankenversuch und auch viele Beobachtungen zeigen, selbst bei sonst einwandfreien Messungen schon relativ geringe Unterschiede in einzelnen Faktoren bewirken, daß neben betauten Körpern völlig unbetaute sind. Das würde der Verhältniszahl ∞ entsprechen!

Eine vom physikalisch-meteorologischen Standpunkt völlig unbrauchbare Größe, die auch für botanische Zwecke kaum weiterführen dürfte, erhält man, wenn man das Taugewicht auf das Frischgewicht der Pflanze bezieht (80). Dadurch werden die wahren Gesetzmäßigkeiten eher verschleiert als aufgedeckt. Die so gefundenen Zahlenwerte haben für die Kennzeichnung des Taugenusses ebensoviel Sinn wie beispielsweise der auf das Körpergewicht des Bauern bezogene Ernteertrag für die Kennzeichnung der landwirtschaftlichen Erträge.

7. Lysimeter und innerer Tau

In die gleiche Richtung wie die Feststellung E. Wollny's (115), daß pflanzenbestandene Gefäße auch bei offensichtlichem Taufall eine Gewichtsabnahme zeigen können, weisen Untersuchungen von P. Lehmann und H. Schanderl (61). Diese fanden bei einem empfindlichen Lysimeter, daß erst ab 21 Uhr Gewichtszunahme eintrat, obwohl das Gras „schon vor Sonnenuntergang tauig anzufühlen war“. Lysimeter geben also, wie auch andere Beobachtungen zeigen (56), nicht den Taufall im meteorologischen Sinne an. Es wäre aber ebenso verfehlt anzunehmen, daß man auf diese Weise den „aus der Luft stammenden“ Tau erfaßt, da sicher nur ein Teil des an einer verdunsteten Stelle in die Luft übergehenden Wassers an den taubildenden Stellen verflüssigt wird. Lysimeter können wohl die Wasserbilanz einer Oberfläche messen, über die Größe der einzelnen Glieder dieser Wasserbilanz können sie aber ebensowenig Aufschluß geben wie beispielsweise ein Strahlungsbilanzmesser über die Werte der einzelnen Glieder der Strahlungsbilanz.

Wenn man Aussagen über den echten Tau, seine Menge, die Bedingungen für seine Bildung — kurz über die physikalisch-meteorologische Seite des Tauproblems — gewinnen will, ist es nötig, sich an die eingangs gegebene Definition zu halten. Man muß dann entweder die Meßvorrichtungen so gestalten, daß sie nur den echten Tau erfassen, oder alle Meßergebnisse ausscheiden, die von anderen Faktoren in unbekannter Weise beeinflusst sind. Dies gilt sowohl für die Lysimeter, zu denen man im weiteren Sinne auch die Versuchsanordnungen von E. Wollny (115) und E. Hiltner (44) rechnen kann, als auch für die üblichen Taufänger.

Damit soll nun keineswegs gesagt werden, daß mit den genannten Meßmethoden nicht durchaus sinnvolle Werte für Fragestellungen hydrologischer oder botanischer Art gewonnen werden können. Nur darf man

*) Die Meßmethodik ist in genannter Arbeit nicht beschrieben und konnte auch durch eine briefliche Anfrage nicht geklärt werden.

diese Meßwerte nicht als Taumeßwerte bezeichnen, wenn man nicht den klaren Begriff der Meteorologie verfälschen will.

Die Feststellung von P. Lehmann und H. Schanderl (61), daß der sogenannte innere Tau keineswegs die Beträge erreicht, die ihm vielfach (102), (107) zugeschrieben werden, deckt sich mit dem Ergebnis der obigen Abschätzung (II, 7), daß der Tau einschließlich des inneren Taus die berechneten Maximalwerte nicht zu überschreiten vermag. Auch hier wird durch die Art der Darstellung oft ein größerer Effekt vorgetäuscht. Wenn W. Bernick (13) schreibt, daß der Wassergehalt einer 5 mm tiefen Schicht in der Nacht von 0,2 auf 2,1% zunahm, so läßt dies fürs erste eine erhebliche Bildung von innerem Tau vermuten. Eine einfache Rechnung zeigt aber, daß schon 0,2 mm genügen, um die angegebene Zunahme der Bodenfeuchte zu bewirken. Das entspricht einem mäßigen Taufall, wenn man andere Transporteffekte für das Wasser im Boden (kapillarer Transport) vernachlässigt. Die Messung mit einer Leickplatte hatte 0,14 mm Tau ergeben.

Wenn nun in den verschiedensten Arbeiten immer wieder auf die erhebliche Bedeutung des unterirdischen Taus hingewiesen wird, wenn z. B. R. Caillière (18) behauptet, daß die normalen Feuchtequellen, d. h. die normalen Niederschläge, nicht ausreichen, um den Bedarf für die Verdunstung und Transpiration zu decken, und man vielmehr gezwungen ist, ein starkes Mitwirken des Nebelwassers, des Taus, der inneren Kondensation des Bodens und der Wasserdampfabsorption aus der Luft anzunehmen, so liegt dies vor allem wohl daran, daß man mit gefühlsmäßigen Argumenten arbeitet. Dort wo man mit quantitativen Abschätzungen oder gar experimentell der Frage des inneren Taus näher zu kommen sucht, lassen die bekannten bzw. gefundenen Gesetzmäßigkeiten nur geringe Mengen unterirdischen Taus zu, wenn man darunter die aus der Dampfphase des Wassers im Boden gebildeten Mengen flüssigen Wassers versteht.

So zeigt eine einfache Abschätzung, daß der Wasserdampfgehalt einer 10 m hohen wasserdampfgesättigten Bodenschicht von 10°C bei Annahme des sehr hohen Luftgehaltes von 50% nur einer Wasserschicht von 0,07 mm entspricht. Davon kann nur ein kleiner Teil (einige Prozente) kondensiert werden, da sich nur die oberste Schicht merklich abkühlt. Aus dem Wasserdampfvorrat des Bodens kann also eine ins Gewicht fallende Bildung inneren Taus nicht erwartet werden. Eine weitere Möglichkeit bietet der Transport des Wassers von wärmeren verdunstenden Stellen im Boden zu kälteren kondensierenden. Die Diffusion des Wasserdampfes vermag selbst bei einem Dampfdruckgradienten von 10 Torr/m (entspricht bei 10°C und Sättigung 16°C/m) und den oben angenommenen Werten der Temperatur und des Luftgehaltes nur $0,4 \cdot 10^{-3}$ mm/h zu transportieren. F. Zunker (122) hat aus den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen für das Temperaturgefälle von 10°C/m (entspricht bei der Versuchstemperatur Zunkers von 20°C und Sättigung etwa 9 Torr/m) und Grobsand 10^{-4} g cm⁻² h⁻¹, d. i. 10^{-3} mm h⁻¹ gefunden. Andere Bodenarten ergeben noch kleinere Werte. Nun vermag auch die sogenannte Bodenatmung, d. h. das durch Temperatur und Luftdruckschwankungen bewirkte Aus- und Einströmen der Luft Anlaß zur Bildung inneren Taus zu geben. M. Diem (22) hat errechnet, daß die den Boden in beiden Richtungen durchströmende Luft im Tag einer Schichthöhe von 21 m entspricht. Nimmt man nun an, daß diese Luft 50% ihres Wassergehaltes bei 10°C in der obersten Bodenschicht absetzt, so ergibt dies 0,01 mm h⁻¹. Nur wesentlich geringere Mengen folgen aus der Hygroskopizität, die vielfach als Quelle des inneren Taus genannt wird. Selbst bei der Annahme eines Gradienten der relativen Feuchte

der Bodenluft von 10%/m (entspricht einem Saugkraftgradienten von 130 at/m) ergeben sich unter den obigen Annahmen für die Diffusion nur $0,03 \cdot 10^{-3}$ mm/h. Auf einen sehr anschaulichen Versuch von O. Stocker und W. Kausch (100) sei in diesem Zusammenhang verwiesen. Sie fanden, daß der Wassergehalt eines von einer Pflanze durchwurzelten Bodens auf 9% absank, während trotz unbehinderter Diffusionsmöglichkeiten eine unmittelbar anschließende nicht durchwurzelte Bodensäule bei 29% blieb.

Aus diesen Abschätzungen sieht man, daß die Transportvorgänge im Boden nur geringfügige Verlagerungen des Wassers über die Dampfphase zulassen. Die angenommenen Gradienten lassen sich allenfalls in den obersten Bodenschichten erwarten, so daß nur kleinräumige Umlagerungen über Entfernungen von mm oder cm denkbar erscheinen. Die Mengen müssen aber auch hier gering*) bleiben, gering vor allem im Vergleich zu dem Wassergehalt des Bodens selbst, der für die oben angeführte Schicht von 10 m auch bei nur 1% Wassergehalt des Bodens einer Wasserschicht von 100 mm entspricht. Das ist mehr als das 1000-fache des Wasserdampfgehaltes gleicher Bodenvolumina.

Aber selbst wenn es für den Wasserdampf im Boden einen Transportmechanismus gäbe, der um mehrere Größenordnungen größere Mengen als die eben abgeschätzten bewältigen könnte, würde die energetische Begrenzung dem Anwachsen des Transports bald ein Ende setzen. Bei der Bildung von echtem und von innerem Tau stellt die Bodenoberfläche eine Stelle tiefster Temperatur dar, von der aus die Temperatur sowohl in die Luft als auch in den Boden hinein zunimmt. Es ist daher nicht möglich, daß die bei der Bildung des Kondensats freiwerdende Wärme durch thermische Leitung (Festkörperwärmeleitung, Wärmeleitung in Gasen, Austausch) abtransportiert werden kann. Vielmehr liefern diese Formen der Wärmeleitung weitere Wärmeströme, die alle zusammen von der Strahlungsbilanz der Bodenoberfläche kompensiert werden müssen. Berücksichtigt man nur die Wärmeleitung in Gasen einschließlich des Austauschs, so ergeben sich für Sättigung der Luft die schon früher angeführten Werte des Nutzeffektes der Strahlungsbilanz für die Taubildung (II, 4 und Tab. 3) und des maximalen zeitlichen Tauzuwachses (II, 7). Da im allgemeinen in der Luft keine Sättigung herrscht und auch die Wärmeleitung des Bodens Energie zur Oberfläche transportiert, liegt die Summe des äußeren und inneren Taus in der Regel unter den errechneten Maximalwerten. Ähnliche Überlegungen über den Wasserdampftransport im Boden und seine energetischen Auswirkungen haben W. Schmidt und P. Lehmann (84) angestellt. Sie ziehen auch die energetische Seite der Verdunstung im Boden in ihre Betrachtungen ein und kommen ebenfalls zu der Ansicht, daß sowohl aus Transportgründen als auch aus energetischen Gründen die Wasserdampfumsätze im Boden gering sein müssen.

8. Der Einfluß der Witterungsfaktoren

Erst jetzt nach der Ableitung der Tauformel erscheint es zweckmäßig, die Einflüsse der Witterung und des Mikroklimas auf den Taufall zu besprechen, die in I, 7 nur kurz berührt wurden.

Sieht man von den praktisch vielfach vernachlässigbaren Einflüssen der Eigenschaften des Taufängers auf die einzelnen in die Tauformel [29] eingehenden Größen ab (II, 9), so wird der zeitliche Tauzuwachs durch folgende meteorologische Faktoren bestimmt:

- a) die Lufttemperatur,
- b) die effektive Ausstrahlung,

*) „gering“ soll hier heißen, daß die Beträge maximal in der Größenordnung 0,1 mm/Nacht liegen können.

- c) die Wärmezufuhr aus dem Untergrund,
- d) die Windgeschwindigkeit,
- e) die relative Luftfeuchtigkeit.

Für die Taumenge einer Nacht tritt zu diesen fünf meteorologischen Parametern noch

- f) die Andauer des Taufalls

und zwar als Faktor, sofern man mit den Mittelwerten der fünf genannten Größen rechnet. Im allgemeinen wird die laufende Veränderung dieser Größen eine Integration über die Augenblickswerte notwendig machen.

Sieht man nun die Tauliteratur daraufhin an, wie weit bei Taumessungen die genannten Größen mitgemessen wurden, so findet man nicht eine Arbeit, die Unterlagen für einen quantitativen Vergleich zwischen den aus den meteorologischen Parametern berechneten Taufall und den Taumeßwerten bieten würde (II, 1). Zwar werden vielfach Angaben über die Witterungsverhältnisse bei den Taumessungen gemacht, häufig findet man auch Mittelwertsangaben oder Einzelmeßwerte der obigen Größen, für einen quantitativen Vergleich reichen sie aber durchwegs nicht aus. Dies erscheint insofern nicht verwunderlich, als Messungen des Wärmehaushaltes, zu denen man Untersuchungen zur Thermodynamik des Taufalles rechnen muß, den gleichzeitigen Einsatz vieler Meßgeräte erfordern, wie sie nur wenigen Forschungsstellen zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, daß die meteorologische Meßtechnik vielfach erst in den beiden letzten Jahrzehnten die nötigen Meßeinrichtungen geschaffen hat und die Entwicklung z. Z. noch lange nicht zu einem Abschluß gekommen ist. Leider bieten auch die umfangreichen in - extenso - Publikationen gleichzeitiger Messungen der maßgebenden meteorologischen Elemente am Laboratory of Climatology in Seabrook N. J. (104), die guter Näherung die Berechnung aller oben genannten Größen erlauben würden, keine Vergleichsmöglichkeiten, da dort Taumessungen völlig fehlen.

Immerhin geben die häufigen Angaben und Bemerkungen in einer großen Anzahl von Arbeiten zur Taufrage reichliche Hinweise, um wenigstens qualitativ und im Hinblick auf die Art des Einflusses der meteorologischen Elemente auf den Taufall Vergleiche anzustellen. Eine Eigenheit der meteorologischen Elemente muß man allerdings berücksichtigen: ihre Werte sind nicht unabhängig voneinander, d. h. die Veränderungen eines Elementes sind vielfach mit immer den gleichen Veränderungen an anderen verbunden. Dies bewirkt, daß bestimmte Kombinationen von Wertebereichen sehr häufig sind, andere sehr selten oder nie vorkommen. Eine dieser häufigen Kombinationen ist die Hochdrucklage mit geringer oder fehlender Bewölkung, geringem Wind, großen zeitlichen und räumlichen Temperaturgegensätzen, also gleichsam eine Kombination günstiger Taubedingungen. Dagegen bietet der meist mit Niederschlägen, starker Bewölkung, starkem Wind und geringen zeitlichen und räumlichen Temperaturgegensätzen verbundene Durchzug einer Störung ungünstige Bedingungen für die Taubildung. Es ist daher nicht verwunderlich, daß bei der starken Koppelung mehrerer Parameter Fehlschlüsse in bezug auf die Wirkung einzelner Faktoren auf den Taufall vorgekommen sind.

Wenn im folgenden der aus der Tauformel resultierende Einfluß von jeweils einer der oben angeführten Größen auf die Taumenge mit entsprechenden Angaben der Literatur verglichen wird, so wird der Einfluß dieses Elementes bei angenommener Konstanz der übrigen betrachtet. Dies ist schon deswegen notwendig, weil die meteorologische Koppelung keineswegs so starr ist, daß die feste Verbindung zweier Größen zu einer neuen möglich wäre.

Es muß noch bemerkt werden, daß natürlich nur ein Teil der umfangreichen Tauliteratur (aber der wesent-

liche) zur Verfügung stand. Von den Hinweisen, die mit der Taufformel übereinstimmen, kann wegen ihrer Fülle nur ein Teil zitiert werden.

a) Die Lufttemperatur

In der Taufformel [29] geht die Lufttemperatur in die beiden Koeffizienten ω_s und ω_v ein. Diese sind außerdem noch etwas von der durch α_L gekennzeichneten Ventilation abhängig und wachsen beide mit steigender Lufttemperatur; wobei ω_v (bei 10° C 3,3%/° C) etwas stärker als ω_s (2,5%/° C) wächst. Bei starkem Taufall, d. h. kleinem Verdunstungsglied, nimmt die Taumenge also mit steigender Temperatur zu, bei schwachem Taufall, d. h. etwa dem Strahlungsglied gleichem Verdunstungsglied, ist der Einfluß gering.

Dieser nicht sehr markante Einfluß, der zudem im Jahresgang von der entgegengesetzt wirkenden Dauer der Nacht (II, 7) überdeckt wird, wird daher auch nur von W. C. H. Wells (113) erwähnt, der meint, daß „hohe Luftwärme... Gelegenheit zu reichlicher Taubildung gibt“. Andere Arbeiten nehmen scheinbar den entgegengesetzten Standpunkt ein. So findet E. Leick (63), daß die Taukurve spiegelbildlich zur Kurve der Temperaturminima verläuft. Die Bemerkung, daß „der stärksten Abkühlung auch der höchste Tauwert... entspricht“, zeigt aber, daß nicht die Lufttemperatur sondern die Temperaturabnahme als Ursache hoher relativer Feuchte gemeint ist. Dies gilt auch für entsprechende Hinweise in anderen Arbeiten (98), (119).

b) Die effektive Ausstrahlung

Die effektive Abgabe von Strahlungsenergie durch die taubildende Oberfläche ist eine notwendige Voraussetzung für den Taufall. Die Taumenge steigt mit der effektiven Ausstrahlung an. Dabei spielt die Gegenstrahlung der Bewölkung und benachbarter Körper — fälschlicherweise oft Abschirmung genannt — eine wichtige Rolle. Der Einfluß der Lufttemperatur und der relativen Feuchte, die nach [35] in die effektive Ausstrahlung eingehen, wird durch die sonstigen Wirkungen dieser Elemente auf den Taufall überdeckt. Der Bewölkungsgrad und die Horizonteneinengungen gelten daher als Hinweis auf die effektive Ausstrahlung selbst. Gleichzeitige Messungen des Taufalles und der effektiven Ausstrahlung bzw. der Strahlungsbilanz konnte der Verfasser in der ihm zugänglichen Literatur nicht finden.

Schon Aristoteles (5) stellte fest, daß „sich Tau eher bei klarem Wetter... bildet“. Auch W. C. Wells (113) meint „Tau ist immer sehr reichlich in... klaren und ruhigen Nächten“ und später „Eine allgemeine Tatsache gilt, das, was auch immer den Himmelsblick behindert, gesehen von dem ausgesetzten Körper, beeinflußt die Menge des hierauf abgesetzten Taus, sie wird geringer, als sie erzeugt worden wäre, wenn die Lage zum Himmel unbehindert gewesen wäre“. G. Fritzsche (32) bemerkt, daß sich „... in Nächten mit starker Ausstrahlung und relativ trockener Luft große Unterschiede zwischen dem „Rasenwert“ und den übrigen, überdachten Standorten ergeben“. F. Zattler (119) schreibt, „daß die klaren Nächte... die besten Taunächte sind“ und stellt für fünf Witterungstypen die mittleren Taumeßwerte (mit Roßhaartaufängern nach Hiltner) gegenüber:

klar und windstill	(11 Nächte)	0,14 mm
bewölkt und windstill	(3 Nächte)	0,08 mm
nebelig und windstill	(5 Nächte)	0,18 mm
klar und windig	(6 Nächte)	0,11 mm
bewölkt und windig	(12 Nächte)	0,04 mm

Diese Angaben Zattlers weisen nicht nur auf die schon oben erwähnte Koppelung hin, sie zeigen auch, daß klare Nächte bewölkte bei sonst gleichen Verhält-

nissen im Taufall übertreffen. Der dritte Fall (nebelig und windstill) scheidet aus dem Vergleich aus, da der Niederschlag kein echter Tau war (III, 7). J. Stephan (96) findet die stärksten Taufälle im zweiten Drittel einer Schönwetterperiode und W. Bernick (13) ein Umschlagen von der Taubildung zur Verdunstung beim Aufkommen von Bewölkung. L. Steiner und R. Fleischmann (93) konnten zahlenmäßig keinen Zusammenhang zwischen dem Tau und der Bewölkung nachweisen, J. R. Sutton (101) findet Taubildung auch bei Bewölkung. In einem Juncus-Gebüsch betrug nach E. Leick (62) der Taufall nur die Hälfte von dem des Freilandes und nach L. Steubing (99) in der Waldmitte nur 1%.

Außer der Gegenstrahlung der Wolken und benachbarter Körper kann bei schiefstehenden Flächen die Gegenstrahlung des Bodens tauvermindernd wirken. Nach E. Wollny (115) zeigten Graskästen umso weniger Tau, je steiler sie aufgestellt waren, nach G. Fritzsche (32) waagrecht aufgestellte Tauplatten 8× soviel Tau als senkrechte. Nach G. Bujorean (17) ist dieses Verhältnis 5:1.

c) Die Wärmezufuhr aus dem Untergrund

Der Wärmenachschub aus dem Boden vermindert den Taufall, da er einen Teil der Strahlungsverluste kompensiert. Allerdings ist im Boden dieser Wärmetransport vielfach mit der Bildung inneren Taus (III, 7) verbunden. Auch in niedrigen Pflanzenbeständen kann das Temperaturgefälle zwischen der effektiv ausstrahlenden oberen Schicht und dem Boden zur Bildung von Tau führen.

E. Wollny (115) fand, daß Gras keinen Tau zeigte, während eine auf dem Boden liegende Strohschicht (geringe Wärmeleitung) dicht mit Tautropfen bedeckt war. Auch war die Taumenge auf nacktem, feuchtem Boden bedeutend geringer als auf Pflanzen. Die Verhältnisse waren umgekehrt bei trockenem Boden. Ähnliche Hinweise geben L. Steiner und R. Fleischmann (93), P. Lehmann und H. Schanderl (61), E. Leick (62), L. Steubing (98) u. v. a.

Über eindrucksvolle Beobachtungen von A. Schmauß berichtet R. Geiger (33): „Aus einer Allee im Münchener Hofgarten waren im Herbst einige Bäume mit ihren Wurzelballen entfernt worden. Die gleichmäßige Bodenpflege hatte bald die Spuren der zugeschütteten Gruben beseitigt. Im kommenden Frühjahr jedoch beobachtete A. Schmauß nach kalten Nächten, daß die ganze Fläche der ehemaligen Gruben weiß von Reif war. Das noch lockere Erdreich in den Gruben hatte eine geringere Wärmeleitfähigkeit als der umliegende ältere Boden; daher war nachts der Wärmenachschub aus den tieferen Bodenschichten geringer, die Oberfläche erkaltete stärker.“ Einige Zeilen weiter weist Geiger darauf hin, daß sich sogar vorgeschichtliche Anlagen durch den Reif in Luftbildaufnahmen (43) herausheben können.

d) Die Windgeschwindigkeit

In der Taufformel vergrößert sich mit der Windgeschwindigkeit das Verdunstungsglied, soferne die Luft nicht gesättigt ist. Mit wachsender Windgeschwindigkeit nimmt der zeitliche Tauzuwachs also ab.

In den meisten Arbeiten (32), (44), (58), (97), (119) wird auch bemerkt, daß windstille Nächte höhere Tauerträge bringen als windige. In der gleichen Richtung weisen die bei der Besprechung des Bewölkungseinflusses zitierten Meßwerte von F. Zattler (119). E. Leick (63) meint: „Wind... ist der Taubildung... hinderlich. Trotz starker nächtlicher Ausstrahlung kann bei nicht zu feuchter Luft der Wind die Bildung von Tauniederschlag völlig unterbinden.“ Die taufördernde Wirkung

des Windschutzes betonen u. a. E. Hiltner (44), P. Lehmann und H. Schanderl (61), F. Zattler (119), A. Mäde (69) und vor allem L. Steubing (98).

Scheinbar entgegengesetzt sind die Äußerungen in einer Reihe anderer Arbeiten. Wenn E. G. Jennings u. J. L. Monteith (56) schreiben, „the rate of this dewfall is greater the higher the wind speed“, so meinen sie damit nicht, daß der Taufall als Ganzes größer wird, sondern daß sich der Anteil des aus der Luft stammenden Taus am Gesamtaufall beim Anwachsen der Ventilation vergrößert. Auf die Unstimmigkeiten, die bei der Deutung von Lysimetermeßwerten als Tau entstehen, wurde schon oben (III, 7) hingewiesen. Eine taufördernde Wirkung des Windes glauben W. Bernick (13) und W. Gelbke (35*) zu finden. In beiden Fällen handelt es sich aber um feuchten Seewind, also eine örtlich zwar charakteristische, in der Verallgemeinerung jedoch unzulässige Koppelung zwischen Wind und Feuchtigkeit. Auf einer Koppelung zwischen Wind und Feuchtigkeit beruht auch die von C. F. Vollney (108) festgestellte Erscheinung, daß in den Randgebieten der Sahara der Tau stark durch die Windrichtung beeinflusst wurde.

e) Die relative Luftfeuchtigkeit

In der Taufformel ist das Verdunstungsglied dem relativen Sättigungsdefizit proportional. Mit abnehmender Luftfeuchtigkeit nimmt also der Taufall ab.

Aus Messungen mit den Aßmannschen Aspirationspsychrometer in 1,5 m Höhe findet J. Schubert (87), daß bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit schwacher Tau, bei 95% mittlerer Tau und bei 99% Nebel auftritt. Auf eine enge Korrelation gleicher Art zwischen dem Tau und der relativen Feuchte weisen die Versuchsergebnisse von L. Steiner und R. Fleischmann (93) (Korrelationskoeffizient Tau: relative Feuchte $\approx 0,74$), W. Bernick (13) und F. Zattler (119) hin. Letzterer hatte als charakteristische Größe den „Temperaturabstand“, d. h. die Differenz zwischen Lufttemperatur und Taupunkttemperatur eingeführt. Es läßt sich leicht zeigen, daß diese Größe — abgesehen von einem geringfügigen Einfluß der Lufttemperatur — dem relativen Sättigungsdefizit gleichwertig ist. Die Feststellung von J. Stephan (96), daß in einem Gebiet mit viel freien Wasseroberflächen (Masuren) der Tau reichlicher ist als anderswo, und die von W. Gelbke (36) gefundene Relation zwischen den Tausummen Hiddensee : Greifswald : Potsdam = 1,47 : 1,33 : 1,00 sind gleichsam nur ein anderer Ausdruck für die lagenmäßig bedingte taufördernde Wirkung hoher Luftfeuchtigkeit. Wenn W. Gelbke angibt, daß bei schwachem Tau die Insel Hiddensee der Küstenstadt Greifswald mehr überlegen ist als bei starkem Tau, so läßt sich dies einfach aus der Taufformel deuten und zeigt gleichzeitig die ausgleichende Wirkung der energetischen Begrenzung des Taufalles. Daß H. v. Ficker (31) und J. R. Sutton (101) Taufall auch bei relativ geringen Feuchten (letzterer in 1,2 m 66%) fanden, ist kein Widerspruch zur Taufformel, da bei geringen Windgeschwindigkeiten (siehe Abb. 2) auch bei diesen Feuchten Taubildung durchaus möglich ist.

f) Die Andauer des Taufalles

Die nächtliche gebildete Taumenge wäre bei gleichbleibenden Verhältnissen der Dauer des Taufalles proportional.

Diesen für die Gesamttaumenge sehr wesentlichen Faktor hat eigentlich erst in jüngster Zeit W. Gelbke (36) richtig gewürdigt. Er setzt näherungsweise die

*) Die Feststellung von W. Gelbke, daß der Verfasser in einer früheren Arbeit (30) die tausteigernde Wirkung der Ventilation „theoretisch gefordert habe“, trifft nicht zu. Das Gegenteil ist der Fall.

Dauer des Taufalles gleich der Nachtdauer. Wenn das auch sicher im Einzelfall nicht zutrifft, so dürfte der charakteristische Verlauf während des Jahres doch hinreichend gut erfaßt werden. Durch die Reduktion seiner Monatsmittel auf 10 Stunden kann er zeigen, daß der zeitliche Tauzuwachs sein Maximum nicht im Herbst, sondern im Juli hat. An schönen Sommertagen setzt, wie auch E. Hiltner (44) bemerkt, der Taufall etwa 1 Stunde vor Sonnenuntergang ein und dauert bis etwa $\frac{1}{2}$ Stunde nach Sonnenaufgang an. In der zweiten Nachthälfte soll nach W. C. Wells (113) und P. Lehmann und H. Schanderl (61) (Lysimeter!), siehe III, 7) der Taufall stärker sein als in der ersten. Eine Überschätzung der Bedeutung der Andauer des Taufalles liegt bei H. Schrödter (86) vor, der die Benetzungsdauer als Maß für den Tau vorschlägt. Auf die Erwiderung durch E. Leick (64) wird verwiesen.

Zu den Beziehungen zwischen dem Tau und der Witterung gehört auch der Tau als Hinweis auf das kommende Wetter. In einer großen Zahl von Wetter- und Bauernregeln wird aus der Taubildung auf das zukünftige Wetter geschlossen. Eine Zusammenstellung solcher Regeln von E. Pastor (75) enthält etwa hundert, die vom Auftreten des Taus ausgehen. Auch in einer Reihe von Tauarbeiten (13), (44), (119) werden solche Verbindungen gesucht. Meist lassen sie sich wie viele der genannten Bauernregeln auf zwei Fälle reduzieren, nämlich daß das Auftreten von Tau einen sonnigen Tag erwarten und daß das Ausbleiben des Taus nach einem schönen Tag auf einen kommenden Witterungsumschwung schließen läßt. Natürlich kann auch der Tau nicht mehr über das kommende Wetter verurteilen, als in den einzelnen Parametern an Hinweisen enthalten ist. So stellt die erste Regel nur eine andere Formulierung der Erhaltungstendenz des Wetters dar, die zweite einen anderen Ausdruck für das Anwachsen des Windes und die aufkommende Bewölkung vor der neuen Störung, wobei allerdings der Tau ein billiges und augenfälliges „Registriergerät“ für die Witterung der vorhergehenden Nacht ist.

9. Der Einfluß des Mikroklimas

Obwohl im vorgehenden Abschnitt auch einige Einflüsse des Mikroklimas auf den Tau (Gegenstrahlung von Körpern, Windschutz, kleinräumige Unterschiede in der Wärmezufuhr aus dem Boden) erwähnt wurden, ist er doch vor allem auf die Beziehungen des Taus zum großräumigen Wettergeschehen abgestimmt. Nun ist es aber so, daß alle in die Taufformel eingehenden Größen in der bodennahen Luftschicht und gerade in ihr starken räumlichen Veränderungen unterliegen. Es ist daher verständlich, daß auch der Tau starke Unterschiede in der horizontalen und der vertikalen Verteilung aufweist.

So findet E. Leick (63) an benachbarten Standorten Unterschiede bis zum Faktor 2. Nach G. Fritzsche (32) machen die starken horizontalen Variationen auch in scheinbar homogenem Gelände die Gewinnung von Taufaktoren unmöglich. L. Steubing (98) findet bei einer größeren Anzahl lose nebeneinander ausgelegter Tauplatten auf einem Stoppelfeld Differenzen bis zu 150%.

Unmittelbar hinter Hecken ist die Taumenge trotz des Windschutzes wegen der Gegenstrahlung der Hecke gering, sie steigt mit wachsender Entfernung an und erreicht in einer Entfernung, die etwa der doppelten Heckenhöhe entspricht, das Maximum. Dort ist die Strahlungswirkung der Hecke schon so weit abgeklungen, daß von da ab die Wirkung der Windzunahme überwiegt.

Häufigere Angaben findet man über die vertikale Verteilung des Taus. Zwar ist der Taumeßwert für

verschiedene Höhen in einem freien Gelände insofern eine Fiktion, als sich dort im allgemeinen ja gar keine natürlichen Taufänger befinden, aber sie ist für die Frage einer großräumigen Repräsentativität der Taumeßwerte wichtig und gibt auch Hinweise auf den unterschiedlichen Taugenuß einzelner Teile freistehender größerer Pflanzen.

So erklärt H. C. Wells (113) das Fehlen des Taus auf einzelnen Bäumen und auf Hügeln durch die stärkere Ventilation. L. Steubing (99) berichtet über die Taumengen auf verschiedenen Teilen eines Baumes und bemerkt, daß die Randzonen stärker befallen sind (III, 5). Die auch in anderen Arbeiten zu findende Formulierung, daß manche Pflanzen anderen „den Tau wegfangen“, ist zwar anschaulich, verdeckt aber den wahren Grund, nämlich die Wirkung der Gegenstrahlung der Pflanzen untereinander. E. Hiltner (44) schließt aus einer kleinen Meßreihe, daß die Taubildung mit wachsender Entfernung vom Boden erst zu-, dann abnimmt. E. Leick (62) findet sowohl Zunahme als auch Abnahme. Die vertikale Verteilung der Tauspende ist je nach dem Witterungstyp verschieden (63). Das Tauprofil ist ausgeprägt bei Windruhe; bei Wind und hoher Feuchte ist es ausgeglichen. F. Zattler (119) findet in einem Hopfengarten das Maximum des Taufalles am häufigsten in 3–4 m. Nach dem Abernten sinkt es mit einem deutlichen Sprung auf 0,5–2 m. Auch W. Bernick (13) findet über Rasen ein Maximum in 0,5 m Höhe, bei anderen Messungen jedoch auch am Boden und in 4 m Höhe. Nach G. Fritzsche (32) ist ein Minimum in 0,5 bis 1,4 m Höhe, das Hauptmaximum bald am Boden, bald in 2,5–3 m. Eingehende Untersuchungen des Tauprofils verdanken wir L. Steiner und R. Fleischmann (93). Daß sie aus Messungen mit Hiltnerschen Roßhaartaufängern in drei Höhen (15, 100, 200 cm) für 9 verschiedene Typen des Tauprofils und für mehrere Jahre eine Häufigkeitsverteilung angeben können, zeigt, was auch die gemeinsame Betrachtung der schon erwähnten anderen Arbeiten nahelegt, daß es keine allgemein-gültige Form des Tauprofils gibt. Aus der laufenden Verfolgung der Tauverteilung finden sie, daß sich im Laufe einer starken Taunacht das Profil in den untersten beiden Metern vom alleinigen Auftreten des Taus in 15 cm über eine nach oben abnehmende Tauverteilung schließlich in eine mit einem Minimum in 1 m Höhe übergeht. Verteilungen mit nach oben zunehmendem Tau, d. h. also mit dem Maximum an der mittleren oder der oberen der drei Meßstellen, sind selten (8% aller Fälle) und ähneln dem Verteilungstyp bei Nebel. Über den Verlauf des Tauprofils oberhalb 2 m können die Messungen nichts aussagen, da dort nicht gemessen wurde. Über Messungen des Tauprofils bis zu 16 m über einer Kahlfläche während einer sommerlichen Schönwetterperiode berichtet A. Baumgartner (8). Das Ergebnis der Messungen, die mit beidseitig freien Bisquitporzellantauplatten nach Leick durchgeführt wurden, ist in Abb. 6 dargestellt, und zwar für jede Nacht durch die Verbindungskurve der Meßwerte. Man sieht, daß das Maximum meist zwischen 2 und 3 m Höhe lag. Die in das gleiche Bild eingetragenen Taumeßwerte in einem jungen Waldbestand zeigen sehr anschaulich, daß die „äußere tätige Oberfläche“ (33) am oberen Bestandsrand liegt. Dort wird effektiv Strahlungsenergie abgegeben, dort schafft die Abkühlung der Luft eine hohe relative Feuchte und dort hält die Windbremsung durch den Bestand das Verdunstungsglied noch genügend klein. Wie die gleichzeitigen Messungen der meteorologischen Elemente zeigen fehlt im Kronen- und Stammraum die zur Taubildung erforderliche effektive Ausstrahlung und erreicht oberhalb des Bestandes das Verdunstungsglied durch die Windzunahme schließlich den Wert des Strahlungsgliedes.

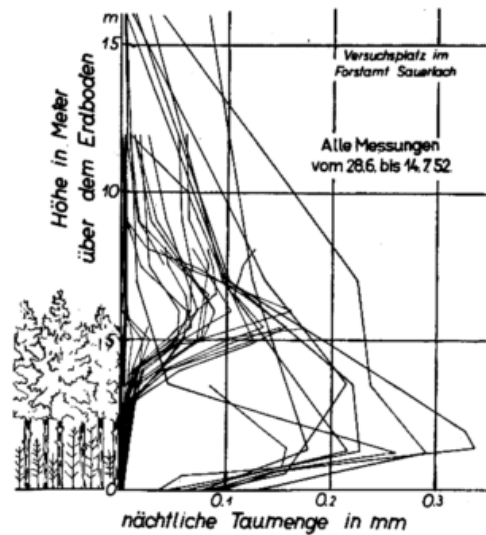


Abb. 6

Tauspende auf einer Kahlfläche (rechte Kurvenschar) und in einer Fichtendickung (linke Kurvenschar) nach A. Baumgartner.

Die oben erwähnte zeitliche Veränderung des Typs der vertikalen Verteilung bei den Messungen von L. Steiner und R. Fleischmann deutet auf zeitliche Änderungen der für die Taubildung wichtigen Parameter hin. Dies trifft vor allem für die Änderungen in der Verteilung der Temperatur und der Feuchte zu. Sowohl der Wärmeinhalt als auch der Wasserdampfgehalt der Luft werden in einer Taunacht vom Boden ausgehend vermindert, so daß der Rückgang des zeitlichen Tauzuwachses in Bodennähe plausibel erscheint. Dieses Austrocknen der bodennahen Luftschicht zeigen schon Messungen von H. E. Hamberg (41), der in Taunächten ein Höherwandern des absoluten Feuchtemaximums vom Boden bis über 3 m fand. Eine zusammenfassende Darstellung unserer derzeitigen Kenntnisse der nächtlichen Verteilung der meteorologischen Elemente in der bodennahen Luftschicht gibt R. Geiger (33). Das Austrocknen muß, wie schon H. v. Ficker (31) bemerkte, eine ziemlich hohe Luftschicht erfassen. Nun sind für einen mittleren Taufall von 0,2 mm 200 g m⁻² Wasser erforderlich. Nimmt man an, daß sich der Taupunkt der beteiligten Luftschicht im Mittel um 2° C erniedrigt (z. B. Änderung am Boden 4° C, linear abnehmend), so findet man, daß bei 10° C mittlerer Lufttemperatur eine Luftschicht von rund 160 m an der Taubildung beteiligt sein muß.

Die starke zeitliche und räumliche Variabilität der für die Taubildung wichtigen meteorologischen Elemente und die daraus resultierende Variabilität des zeitlichen Tauzuwachses zeigt, daß Taumeßmethoden, die Summenwerte für die ganze Nacht liefern, zwar für klimatologische und botanische Fragestellungen brauchbare Werte geben werden, für die weitere Aufklärung der physikalisch-meteorologischen Zusammenhänge aber nur unzureichende Aussagen machen können. Der durch die Tauformel gegebene Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Tauzuwachs und den meteorologischen Elementen ist zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort mit anderen Parametern erfüllt. Neben registrierenden Taumessern, deren Funktionsweise vor allem in thermodynamischer Hinsicht gut geklärt sein muß, sind Registriergeräte für die Augenblicks- bzw. kurzzeitigen Mittelwerte von Temperatur, Feuchte, Wind und Strahlung (Strahlungsbilanzmesser bzw. Pyrogeometer) erforderlich. Nur ein ziemlich umfangreiches und gut betreutes Instrumentarium wird zusammen mit erheblichen Auswertarbeiten weiterführen können.

10. Zur Weiterentwicklung der derzeitigen Taumeß-technik

Wenn auch für mikrometeorologische Untersuchungen zum Tauprobem registrierende Taumeßmethoden im Vordergrund stehen müssen, so dürften für die Mehrzahl der Tauuntersuchungen allein schon aus finanziellen Gründen praktisch nur Tausummenmesser in Frage kommen. Wie schon betont wurde (I, 6), haben in jüngster Zeit E. Leick (64) und W. Gelbke (36) einen Großteil der neueren und älteren Taumeßverfahren einer eingehenden Kritik unterzogen und ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt. Obwohl in den beiden genannten Arbeiten thermodynamische Gesichtspunkte in dem eigentlich wünschenswerten Umfang nicht verwendet wurden, soll auf die älteren Verfahren nicht näher eingegangen werden. Dagegen bieten die eingehenden Untersuchungen verschiedener Aufstellungsarten der Leick-Platten zusammen mit den Messungen der thermischen Eigenschaften durch W. Gelbke *) einige Unterlagen zur Beurteilung der in der heutigen Taumesung führenden Leickschen Tauplatten. Insbesondere soll auf die verschiedenen möglichen Expositionsarten näher eingegangen werden, da sich hieraus Anhaltspunkte für die weitere Entwicklung ergeben dürften.

Ähnlich wie bei anderen Meßaufgaben, deren Bedeutung an der Grenze zwischen Meteorologie und Biologie liegt (Verdunstung, Abkühlung) ist auch hier eine Entscheidung zwischen zwei Entwicklungszielen nötig:

A) ein Meßgerät, dessen Anzeige möglichst wenig von den Eigenschaften des Meßfühlers abhängt, das also gleichsam eine objektive Abgabe zu liefern vermag. Die Funktionsweise dieses Gerätes, d. h. die Abhängigkeit seiner Anzeige von den meteorologischen Parametern und auch von den verbleibenden Resteinflüssen des Meßorgans soll möglichst gut bekannt und in durchschaubarer Weise angebar sein. Soweit das Meßergebnis auch den Charakter eines Klimaelementes haben soll, muß durch eine zweckmäßige Standardisierung der Eigenschaften des Meßorgans und seiner Exposition eine hinreichende Vergleichbarkeit gewährleistet werden,

B) ein Meßgerät, dessen Funktionsweise jener der interessierenden natürlichen Objekte weitgehend nachgebildet ist. Unter Umständen werden diese selbst in einer meßtechnisch brauchbaren Form als Meßfühler verwendet. Die Funktionsweise wird — physikalisch gesehen — meist kompliziert und schwer durchschaubar sein.

Als Beispiele können für die Verdunstung einige wenige Typen der Atmometer, so der Verdunstungsmesser Leistner-Robitzsch (65), für den Typ A dienen. Beim Typ B kann das Lysimeter genannt werden, während die Evapotranspirometer (70) eine bessere Durchschaubarkeit ihrer Funktionsweise durch Abweichungen von den natürlichen Verhältnissen erkaufen. In einem gegebenen Fall wird es immer von der Problemstellung abhängen, welchem Typ sich ein Meßgerät nähert. Streng wird sich weder der eine noch der andere Typ realisieren lassen, da einerseits selbst bei einfachen Meßgrößen Einflüsse anderer Größen nicht völlig ausgeschaltet werden können (Strahlungsfehler der Temperaturmessung), andererseits auch bei Verwendung der natürlichen Objekte diese durch die Meßeinrichtungen gestört sind (Unterbrechung der kapillaren Leitung bei Lysimetern). Gerade die meteorologische Meßtechnik bietet hier eine Fülle von Beispielen. Dabei darf nicht

*) Herrn Dipl. Ing. W. Gelbke, Leiter des Meteorologischen Observatoriums Greifswald, bin ich sehr zu Dank verpflichtet, da er mir vor der Publikation eine Abschrift des Manuskripts seiner Tauarbeit zur Verfügung stellte. Die in der vorliegenden Arbeit in der häufigen Bezugnahme auf die Arbeit von W. Gelbke zum Ausdruck kommenden vielen Anknüpfungsmöglichkeiten bieten ein Beispiel für die Fruchtbarkeit einer Verbindung zwischen der mehr experimentell und der mehr theoretisch ausgerichteten Arbeitsweise.

verschwiegen werden, daß es leider eine große Zahl von Meßgeräten gibt, deren Funktionsweise weder mit erträglichem Aufwand durchschaubar noch natürlichen Objekten angepaßt ist.

Da man vom Typ B streng genommen so viele Arten haben müßte, als es wesentlich verschiedene natürliche Objekte gibt, bedarf es wohl keiner weiteren Begründung, daß eine sinnvolle Entwicklung zunächst auf den Typ A ausgerichtet sein muß. Dabei zeigt es sich, daß gerade bei der Taumesung manche wesentliche vom Taufänger abhängige Faktoren für die üblichen künstlichen und viele natürliche Taufänger beinahe gleich sind. So liegen beispielsweise die Absorptionskoeffizienten für Wärmestrahlung in beiden Fällen bei 90—95% (beim Auftreten eines Taubeschlages sind sie sogar gleich, Tab. 6), die Dampfdrucke sind schon bei geringen Beschlägen praktisch gleich denen reinen Wassers und auch die Wärmeübergangszahlen werden bei gleicher Windgeschwindigkeit nicht allzusehr voneinander abweichen. Die größten Abweichungen werden zumeist vom Wärmenachschub aus dem Körperinneren herühren. Hier läßt sich eine Festlegung nicht umgehen.

Wie in II, 6 gezeigt wurde, gibt es zwei — sich in den zu erwartenden Meßwerten allerdings unterscheidende — Möglichkeiten, den Einfluß der thermischen Eigenschaften des Taufängers möglichst auszuschalten:

a) Messung des Obertaus allein bei thermischer Isolierung der Oberfläche. Dann ist im Idealfall der zeitliche Tauzuwachs durch

$$W = -\omega_s S_L - \omega_v \alpha_L (1-\varphi) \quad [34]$$

gegeben.

b) Gemeinsame Messung von Obertau und Untertau mit einer beidseitig freien Platte. Dann ist im Idealfall der zeitliche Tauzuwachs durch

$$W = -\omega_s (S_{L1} + S_{L2}) - 2 \omega_v \alpha_L (1-\varphi) \quad [33]$$

gegeben.

Die unter a) genannte Methode läßt sich besonders gut in Bodennähe realisieren. Ihre Meßwerte entsprechen den Taumengen auf thermisch schlecht leitenden Körpern (trockener Boden, Stroh, Holzbohlen, Dächer u. ä.). Die unter b) genannte Methode eignet sich eher für Messungen in einiger Entfernung vom Boden. In unmittelbarer Bodennähe wird die zur Gewinnung von [33] nötige Voraussetzung beidseitig gleicher Ventilation nicht mehr gut erfüllt. Ihre Meßwerte entsprechen den Taumengen auf beidseitig ventilierten Körpern (Blätter). Es soll nochmals darauf hingewiesen werden, daß Meßwerte der einen Methode im Einzelfall ohne Kenntnis der meteorologischen Faktoren nicht auf die andere Methode umgerechnet werden können (II, 6; III, 6).

Die 22 verschiedenen Taumeßanordnungen, die W. Gelbke (36) verglich, kann man je zur Hälfte als Näherung an Typ a) bzw. b) ansehen, einige vielleicht aus als Näherungen an natürliche Taufänger (Typ B). Hier sollen nur näher betrachtet werden:

1 R Meßanordnung nach E. Leick: Porzellan-Tauplatte in Kassette aus Kunstharzpappe (Boden 5 mm dick), direkt auf den Rasen gestellt.

4 P Meßanordnung nach W. Gelbke: Porzellan-Tauplatte auf 1 mm hohen Stiftchen in Kassette aus Decelith (Boden 4 mm dick). Die Kassette steht auf 3 mm hohen Stiftchen auf einer 4 mm starken Hartgummiplatte, die auf dem Rasen ruht.

15 R beidseitig freie Tauplatte auf 3 Spitzen als Halterung. Die Aufstellungsarten 7 P, 8 R, 9 P sind ähnlich.

Die Wärmedurchgangszahlen β bzw. ihre Kehrwerte $1/\beta$, die man vielleicht als thermische Widerstände be-

zeichnen kann, errechnen sich für die 5 mm starke Tauplatte und die anderen Schichten auf Grund der Meßergebnisse von W. Gelbke (36) oder der Angabe von Tabellenwerken (21) zu

		β	$1/\beta$
		mcal cm ⁻² min ⁻¹ grad	cal cm ⁻² min ⁻¹ grad
Tauplatte*) trocken		180	5,6
befeuchtet	0,2 mm	310	3,2
	0,4 mm	440	2,3
	0,6 mm	580	1,7
Kunstharzpappe	5 mm	96	10,4
Decelithschicht	4 mm	60	16,7
Hartgummiplatte	4 mm	58	17,2
Luftschicht**)	1 mm	43	23,4
	3 mm	19	52,6
Korkschrot	10 mm	5	200

Setzt man als runden Mittelwert für eine etwas feuchte Tauplatte (entsprechend 0,1 mm Tau) $\beta = 250$ kcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ an, so wird für die beiden Meßanordnungen

$$1 R \quad \beta = 69 \text{ kcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$$

$$4 P \quad \beta = 9 \text{ kcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$$

Im Hinblick auf die anzustrebende Verminderung des Einflusses der Taufängereigenschaften auf das Meßergebnis stellt die Anordnung 4 P einen erheblichen Fortschritt gegenüber der Leickschen Anordnung 1 R dar. Bedenkt man, daß der Wärmenachschub aus dem Boden auch über die thermisch schlecht leitende Rasenschicht ($\beta \approx 10 \dots 20$ kcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹) geht, so erscheint die Feststellung W. Gelbkes, daß die Aufstellung 1 R im Mittel über 50 Vergleichsmessungen nur die Hälfte der Tauwerte von 4 P ergab, durchaus plausibel. Freilich entspricht auch die Aufstellung 4 P noch nicht dem Typ a), da die verbleibende Wärmeleitfähigkeit immerhin je Grad Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite der Meßanordnung einen Wärmestrom von 9 kcal cm⁻² min⁻¹ zur taubildenden Oberfläche bringt. Das entspricht aber etwa 10% des Strahlungsverlustes bei klarem Himmel. Eine weitere Verminderung dieses Wärmestromes ließe sich durch zusätzliche Isolierschichten erreichen.

Dieser Einfluß der Wärmeleitfähigkeit des Taufängers auf das Meßergebnis fällt weg bei frei aufgestellten Tauplatten mit gleicher Belüftung auf beiden Seiten und gemeinsamer Messung von Ober- und Untertau, sofern Ober- und Unterseite als feuchte Oberflächen angesehen werden können (II, 6). Dies ist bei Leickschen Tauplatten nur der Fall, wenn sich oben und unten Tau bildet ($W_1 > 0, W_2 > 0$). Vom Fall $W_1 < 0, W_2 < 0$ kann zunächst abgesehen werden, da nur die Taubildung interessiert. Die Auswirkungen des übrig bleibenden Falles $W_1 > 0, W_2 < 0$ (oben Taubildung, unten Verdunstung) lassen sich aus

*) Die Werte gelten für die in der DDR gefertigten Platten. Für die in Seib/Bayern gefertigten Platten liegt die Wärmedurchgangszahl für trockene Platten um etwa 25% höher.

***) einschließlich der Strahlungsübergangszahl für 10°C.

den gefundenen Beziehungen mit Hilfe der obigen Daten abschätzen. Man findet, daß die Abweichung des zeitlichen Tauzuwachses von dem nach [33] geforderten Wert im Mittel kleiner ist als

$$\Delta W = -\omega_s \frac{\alpha}{2(\alpha + 2\beta)} (S_{L1} - S_{L2}) \quad [49]$$

Mit $\theta_L = 10^\circ\text{C}$, $\alpha_L = 20$ kcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹, $\beta = 250$ kcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹, $S_{L1} - S_{L2} = -100$ kcal cm⁻² min⁻¹ (\approx Strahlungsbilanz des Bodens) findet man für jede Stunde der Andauer dieser unsymmetrischen Verhältnisse einen Fehler von etwa 1 μ Tau. Man sieht daraus, daß wegen der im Vergleich zu den Wärmeübergangszahlen großen Wärmedurchgangszahl der Effekt sehr klein bleibt. Dies gilt vor allem, wenn man bedenkt, daß die für das Auftreten des Fehlers nötigen Voraussetzungen in der Regel nur am Abend einige Zeit gegeben sind und während der Nacht nur bei sehr wechselnden Verhältnissen.

In diesem Fall, wo Taubildungs- und Verdunstungsphasen einander abwechseln, werden aber durch das Einsaugen des Taus in die Leickschen Platten wesentlich größere Abweichungen gegenüber nicht einsaugenden Taufängern auftreten. Aus entsprechenden Versuchen von W. Gelbke (36) kann man folgern, daß die Verdunstung der Leick-Platten bei einem Wassergehalt von 1 g (entsprechend 0,1 mm Tau) nur etwa den dritten Teil der Verdunstung bei halber Wassersättigung (10 g) beträgt, wo sie fast wie freie Wasserflächen verdunsten. In Verdunstungsphasen geben die Tauplatten also weniger Wasser ab als nicht einsaugende Taufänger. Ob dieser der Gewinnung objektiver Taumessungen sehr hinderliche Umstand angesichts der aus dem Einsaugen resultierenden leichten Handhabung und der Verhinderung von Abtropfverlusten tragbar ist, muß dahingestellt bleiben. In Nächten mit Taubildungs- und Verdunstungsphasen wird jedenfalls die Leicksche Platte zu hohe Werte liefern, wenn man als wahren Tauwert den einer feuchten Oberfläche ansieht. Die Unterschiede im Taufall auf verschiedenen feuchten Platten, die W. Gelbke gefunden hat, dürften meist auf dieser „Ventilwirkung“ beruhen.

Die Auswirkungen der Wärmekapazität der Tauplatten auf den Taumeßwert sind relativ gering. Die Wärmekapazität der Flächeneinheit der trockenen Tauplatte gibt W. Gelbke zu $\gamma = 130$ kcal cm⁻² grad⁻¹ an. Der Wert erhöht sich für jede 0,1 mm Wassergehalt um 10 kcal cm⁻² grad⁻¹. Für eine beidseitig freie Platte ergibt sich daraus mit $\alpha_L = 20$ kcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ eine Halbwertszeit von 2,2 Min. W. Gelbke findet bei Luftruhe 2,0 min. Setzt man die Abkühlung der Tauplatte von Beginn des Taufalls bis zu dessen Ende mit 5°C an, so gibt die Platte während der Nacht 650 kcal cm⁻² ab. Dies entspricht etwa einer Tauhöhe von 10 μ bzw. der effektiven Ausstrahlung von rund 6 Minuten während einer klaren Nacht. Der Einfluß der Wärmekapazität übersteigt also kaum die üblichen Fehler der Taumessung, bei Vergleichsmessung fällt er zudem weitgehend weg.

IV. Der thermoelektrische Taumesser

Die Bedeutung, welche der thermodynamischen Seite der Taubildung zukommt, legt es nahe, eine Messung der bei der Taubildung freiwerdenden Wärme zu versuchen. Darüber hinaus muß diese Wärmetönung eine Möglichkeit bieten, den zeitlichen Tauzuwachs selbst zu messen, da die je Zeit- und Flächeneinheit freiwerdende Kondensationswärme V dem zeitlichen Tauzuwachs W proportional ist [4]. Die Messung des Taufalles über die Tauwärme ist an sich der Messung über andere Wirkungen des Taus auf den Taufänger (Änderung des Gewichts, der elektrischen Leitfähigkeit, der dielektrischen Konstanten usw.) gleichwertig. Trotzdem war das im folgenden beschriebene Gerät nie als Taumesser im üblichen Sinne gedacht. Es soll vielmehr als Teil einer größeren Meßanordnung für mikrometeorologische Untersuchungen einen Einblick in die tatsächlichen Energieumsetzungen an einem künstlichen Taufänger bieten. Das Gerät stellt eine Kombination mehrerer „Versuchskörper“ im Sinne von R. Geiger (33) dar. Für übliche Taumessungen mit biologischer oder auch klimatologischer Zielsetzung wird sowohl der meßtechnische Aufwand als auch die Auswertbarkeit im Vergleich zu den Tausummenmessern aber auch zu einfachen Tauregistriergeräten auf Wägebasis in der Regel zu groß sein. Außerdem besteht für die meisten aus der Anzeige des Gerätes ableitbaren Größen dort keine Verwendungsmöglichkeit. Seine Funktionsweise setzt in keiner Weise die Gültigkeit der oben abgeleiteten Taufarmeln voraus. Seine Verwendung als Meßgerät für den zeitlichen Tauzuwachs beruht allein auf der Tatsache, daß je ccm abgeschiedenen Taus etwa 600 cal frei werden.

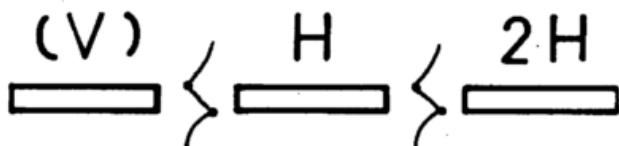


Abb. 7

Prinzipielle Anordnung beim thermoelektrischen Taumesser.

1. Das Meßprinzip

Das Meßprinzip läßt sich an Hand der Abb. 7 wie folgt erklären: Die drei Rechtecke sollen drei geschwärzte Metallplatten darstellen. Sie sollen nebeneinander aufgestellt sein, so daß sie gleichen Umwelteinflüssen unterworfen sind. Die linke Platte soll unbeheizt sein, die mittlere von innen heraus die Heizung H und die rechte die Heizung $2H$ erhalten. Wählt man H so groß, daß auf der mittleren Platte die Taubildung verhindert wird, dann fehlt diese auch auf der rechten Platte. Bildet sich nun auf der linken Platte Tau, so wirkt die freiwerdende Tauwärme wie eine Heizung. Man kann die Temperaturdifferenz thermoelektrisch messen und erhält zwischen der linken und der mittleren Platte

$$U_1 = \frac{\tau}{\alpha} (H - V) \quad [50]$$

Analog findet man zwischen der mittleren und der rechten Platte

$$U_2 = \frac{\tau}{\alpha} (2H - H) = \frac{\tau}{\alpha} H \quad [51]$$

Die Thermospannungen U_2 und U_1 lassen sich leicht elektrisch subtrahieren

$$U = U_2 - U_1 = \frac{\tau}{\alpha} H - \frac{\tau}{\alpha} (H - V) = \frac{\tau}{\alpha} V \quad [52]$$

Durch Quotientenbildung kann man den von Wind und Temperatur abhängigen Faktor τ/α eliminieren.

$$\frac{U}{U_2} = \frac{V}{H} \quad [53]$$

Daraus ergibt sich schließlich in einfacher Weise mit Hilfe von [4]

$$W = \frac{H}{\tau} \frac{U}{U_2} \quad [54]$$

Von den vier Bestimmungsstücken für den zeitlichen Tauzuwachs W kann τ Tabellenwerken entnommen werden. H kann man aus den elektrischen Daten der Heizung und der Oberfläche berechnen, U und U_2 können gemessen oder auch registriert werden. Damit ist W bekannt.

Fügt man diesen drei Platten gleicher Oberflächenbeschaffenheit eine vierte mit anderer Oberflächenbeschaffenheit (kleineres ε) hinzu und heizt diese auch mit $2H$, so wird sich wegen der unterschiedlichen Strahlungsbilanz der dritten und der vierten Platte zwischen diesen beiden ebenfalls eine Temperaturdifferenz bilden. Etwa analog zur eben wiedergegebenen Gewinnung des V bzw. W kann man dann die Strahlungsbilanz S der (linken) Tauplatte berechnen. Aus den Temperaturdifferenzen und der Wärmedurchgangszahl zwischen den Platten läßt sich die Wärmezufuhr durch Leitung B berechnen, so daß schließlich mit Hilfe der Energiebilanzgleichung [1] die Größe L ermittelt werden kann. Damit sind alle Glieder der Energiebilanz der Taufängerplatte bekannt.

2. Die Entwicklung des Meßgerätes

Jedem, der selbst einmal meßtechnische Entwicklungen durchgeführt hat, dürfte es klar sein, daß die Ermittlung bzw. die Beseitigung der bei der Darstellung eines Meßprinzips vernachlässigten Störeinflüsse den Hauptteil der Entwicklungsarbeit ausmacht. Hinzu kommen bei der Entwicklung meteorologischer Meßgeräte, die wie dieses allen Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, erhebliche zusätzliche Schwierigkeiten (Temperaturschwankungen führen zu mechanischen Veränderungen, Niederschläge zu Isolierschwierigkeiten und zu Korrosionserscheinungen usw.). Vor allem aber muß jeder Entwicklungsphase eine Erprobungszeit folgen. Gerade diese Notwendigkeit verursacht einen erheblichen Zeitaufwand, da immer wieder mit Geduld jene Witterung abgewartet werden muß, die eine zur Erprobung des Gerätes brauchbare Kombination der meteorologischen Elemente bietet. Nicht zuletzt zwang die finanzielle Lage des Institutes oft zur Verwendung billiger und von anderen Stellen in gerade noch brauchbarem Zustand abgegebener Teile, was bei der Durchführung der Versuche zu technischen Störungen und zeitraubenden Reparaturarbeiten führte.

Da nicht damit gerechnet werden konnte, daß dem Meteorologischen Institut der Universität München bis zum Ende des Jahres 1954 alle Meßeinrichtungen zur Erfassung der in die Taufarmeln eingehenden Größen zur Verfügung stehen, mußte die Aufgabe des Gerätes zunächst auf die oben angegebene Erfassung der einzelnen Komponenten des Energiehaushaltes eines künstlichen Taufängers beschränkt werden. An Hand der Meßergebnisse bei verschiedenen Wetterlagen sollte die Abhängigkeit der einzelnen Komponenten voneinander

und — soweit die Messung möglich war — von anderen Parametern aufgezeigt werden. Da wie bei allen Wärmehaushaltsuntersuchungen erhebliche Auswertarbeiten zu erwarten waren, mußte das Gerät mit einem Minimum an personellem Aufwand möglichst alle für die Auswertung nötigen Größen aus einer großen Zahl von Meßreihen liefern. Aus diesen mußten sich ohne erhebliche Vorarbeiten jene auswählen lassen, die für eine Wetterlage charakteristische Wertekombinationen enthalten und nicht gestört sind (Nebel, Regen usw.). Dies ist natürlich nur mit einem registrierenden Gerät möglich.

Als Registriergerät stand am Institut ein Drehspulfallbügelschreiber für 6 Meßstellen für 5 mV bei 60 Ω Innenwiderstand zur Verfügung. Auf dieses Gerät mußte die Entwicklungsarbeit abgestimmt werden. Insbesondere mußte durch Verwendung vielgliedriger Thermobatterien für eine trotz der kleinen Temperaturdifferenzen hinreichend große Meßspannung gesorgt werden. Auf diese äußeren Umstände soll hier vor allem deswegen hingewiesen werden, weil die hier beschriebene Realisierung des eingangs aufgezeigten Meßprinzips keineswegs die einzige Möglichkeit darstellt. Sie mag unter den derzeit vorliegenden Bedingungen vielleicht eine optimale Lösung sein, eine Änderung der meßtechnischen Voraussetzungen kann aber andere Wege frei machen.

Ein erstes dem Meßprinzip entsprechendes Gerät mit 3 einen Kreis bildenden Sektoren und Thermoelementbatterien zwischen den Sektoren war im Frühjahr 1953 fertig. Es hat das Labor nie verlassen, da schon Messungen vor einem Tischventilator zeigten, daß die Anzeige von der Windrichtung abhing. Dies erscheint insofern verständlich, als es natürlich für die Temperaturdifferenzen zwischen den Sektoren nicht gleich ist, ob die einen Sektor überstreichende Luft vorher einen wärmeren oder einen kälteren Sektor berührt. Der Einfluß war zwar nicht sehr groß, da aber zum Aussteuern des Registriergerätes auch größere Thermobatterien erwünscht waren, wurde ein aus 9 Sektoren bestehendes Gerät gebaut. Bei diesem hatten je 3 Sektoren, die einander unter 120° gegenüberstanden, die gleiche Funktion. Je drei 20-gliedrige Thermobatterien lieferten die Meßspannung. Ein merklicher Windrichtungseinfluß konnte nicht mehr festgestellt werden, so daß das Gerät im Herbst 1953 erstmalig im Freilandversuch eingesetzt werden konnte. Anfangs auftretende Isolationsfehler konnten zwar bald behoben werden, doch ließ die Witterung im Oktober/November 1953 nur wenig brauchbare und ungestörte Registrierungen zustande kommen. Die Auswertung einer dieser Registrierungen ist in Abb. 13a wiedergegeben. Die im Spätherbst 1953 in München einsetzenden dichten Nebel machten weitere Messungen unmöglich. Die vorliegenden Ergebnisse hatten aber gezeigt, daß eine Miterfassung der Strahlungsbilanz sehr erwünscht war. Dies führte im Winter 1953/54 zur Entwicklung eines Gerätes mit 12 Sektoren, welches in IV,3 beschrieben ist. Der schon von Anfang an vorgesehene Einbau von Halbleiterthermometern in die Tausektoren konnte wegen der langen Lieferzeiten erst im Frühsommer 1954 erfolgen. Leider wurden an Stelle der in der Schaltung bereits vorgesehenen NTC-Widerstände mit etwa 2—3 k Ω solche mit dem zehnfachen Werte geliefert, was wegen der im Freilandeinsatz bei feuchtem Wetter nur sehr schlecht erreichbaren, aber an sich erforderlichen hohen Isolationswiderstände (mehrere M Ω) und der verringerten Anzeigeempfindlichkeit nur wesentlich ungenauere Absolutwerte der Temperatur des Taufängersektors zuläßt. Ein Austausch hat sich wegen der Umstellung in der Fertigung bei der Lieferfirma bis heute nicht ermöglichen lassen. Die oben begründete Notwendigkeit der Verwendung gebrauchter Relais zur Abwicklung des Meßprogramms führte trotz zeitraubender Justierarbeiten zu nachträglich oft schwer

erkennbaren unregelmäßigen Veränderungen in den Kontakten und damit den Meßkreiswiderständen. Ähnliches gilt für die Verbindungsstecker, für die erst seit kurzem wieder wetterfeste Ausführungen auf dem Markte sind. Obwohl es in ähnlichen Publikationen meist nicht üblich ist, wird auf diese an sich unnötigen technischen Schwierigkeiten und Mängel hier deswegen näher eingegangen, weil der zu ihrer Behebung oder Verminderung nötige Arbeitsaufwand die eigentliche Entwicklungs- und Erprobungsarbeit einschließlich der umfangreiche Laborversuche erheblich übertraf und doch zu keinem restlos befriedigenden Ergebnissen führen konnte.

3. Die Beschreibung der Meßanordnung

Die ganze Meßanordnung umfaßt drei durch mehradrige Kabel verbundene Teile

- A) den Meßteil
mit den 12 Sektoren, den Heizwicklungen, den Thermobatterien und den Thermistoren
- B) den Schaltteil,
der das Meßprogramm abwickelt, mit den Relais, den Abgleichwiderständen für die Heizungen und die Meßkreise, den Kontrollvorrichtungen und der Stromversorgung
- C) den Registrierteil
mit dem Sechsfarben-Fallbügelschreiber mit Uhr und Zeitkontaktgeber.

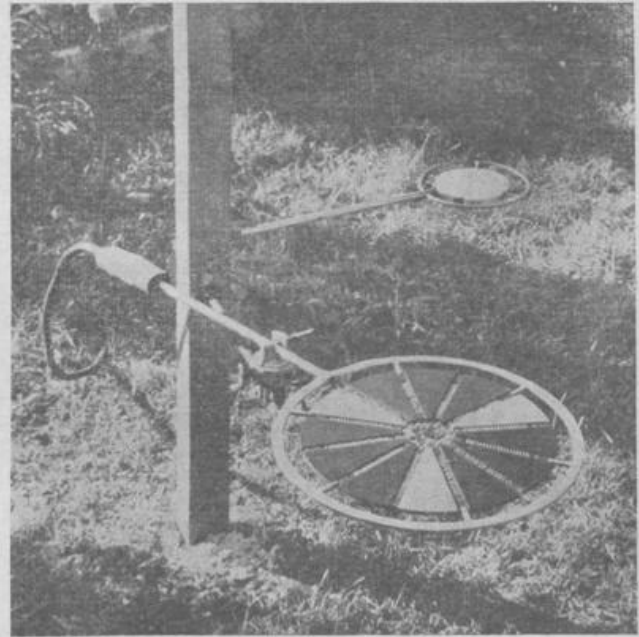


Abb. 8

Der thermoelektrische Taumesser bei Freilandmessungen.

A) Der Meßteil

Eine Gesamtansicht des Meßteiles in der beim Freilandeinsatz verwendeten Aufstellung ist in Abb. 8 wiedergegeben. Als Träger (Abb. 9) dient eine ringförmige ($\phi_1 = 66$ mm, $\phi_a = 292$ mm), 3 mm starke Pertinaxscheibe, die die notwendigen Aussparungen, Bohrungen und Nuten enthält. An den gegenüberliegenden Rändern der einzelnen Sektoren sind je 20 zylindrische Messingröllchen eingesetzt, in welche die Enden der mit Isolierschlauch überzogenen Thermoelementdrähte (0,2 mm Konstantan bzw. Manganin) eingelötet sind. An den Enden der Thermobatterien sind Kupferlitzen eingelötet, die über Nuten auf dem Rand des Trägeringes so verbunden sind, daß jeweils drei Thermo-

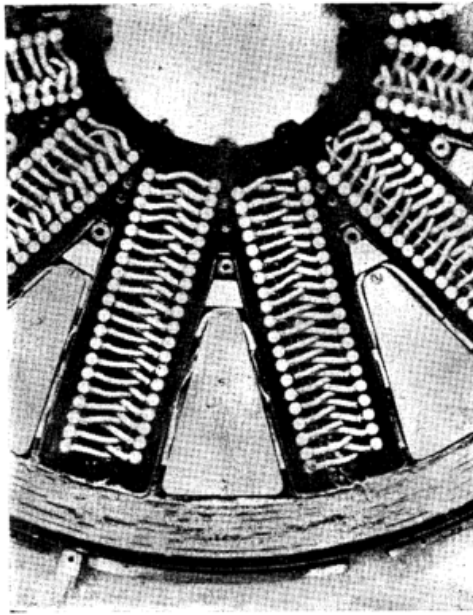


Abb. 9
Innenansicht des thermoelektrischen Taumessers.

batterien gleicher Funktion eine Thermospannung liefern. In der Mitte der Sektoren liegen dreieckige Heizungen, bestehend aus zwei Kupferdeckblechen und einer dazwischenliegenden Kupferscheibe, die eine ebenfalls dreieckige Aussparung in der Mitte zur Aufnahme der auf eine dünne Pertinaxscheibe gewickelten Heizdrähte (0,2 mm Manganin) hat. Durch diese bügeleisartige Heizung wird eine gleichmäßige Verteilung der Heizleistung erreicht. Die Heizungen aller Sektoren außer den Tausektoren sind in Serie geschaltet und bilden einen Heizkreis. Die nötigen Unterschiede in den Heizleistungen werden durch unterschiedliche Heizwiderstände (je 4 Ω bzw. 8 Ω) bewirkt. Einen zweiten Heizkreis bilden die Heizungen der Tausektoren (je 8 Ω), die bei Freilandmessungen natürlich stromlos sind, bei Laborversuchen jedoch die Wärmeentwicklung des Taus nachbilden können (IV,5). In der schmalen Spitze der dreieckigen Aussparung liegt ein trapezförmiges Messingklötzchen, in welches bei den Tausektoren je ein NTC-Widerstand (Type 0,5 x 2 x 5 mm, Fabrikat Philips, Sollwiderstand bei 20° C 2,8 k Ω , wegen Fehllieferung siehe oben) eingelegt ist. Diese drei in Serie geschalteten Thermistore sollen die Absoluttemperatur des Taufängersektors messen. Auf die Ober- und die Unterseite jedes Sektors ist je eine 1 mm starke Kupferscheibe geschraubt, die mit der anderen durch Verbindungsstege und den Heizkörper in gutem thermischem Kontakt steht, so daß jeder Sektor für sich als homogen temperiert angesehen werden kann. Der ganze Ring mit den zwölf Sektoren ist über Finger in einem verchromten Eisenring mit Halteröhre gelagert, durch die die Kabelenden zu einem Zehnpolstecker geführt sind. Über diesen Stecker und ein zehnadriges Kabel sind die Meßteile (geplant 4, z. Zt. fertig 1) mit dem Schaltteil verbunden.

Das bisher zur Schwärzung der Strahlungsbilanzmesser (49), (77), (126) verwendete Albrecht-Schwarz (2) erwies sich als wenig witterungsbeständig. Nach vielen Versuchen wurde schließlich eine zweischichtige Schwärzung als geeignet gefunden. Die Unterschicht besteht aus einem Härtinglacks*) mit geringem Zusatz

*) Härtinglack Klingelit der Fa. Hemmelrath & Co., Klingenberg/Main. Die genaue Mischungsvorschrift muß wegen ihrer Kompliziertheit hier weggelassen werden. Herrn Dr. R. Mittag vom Consortium für elektrochemische Industrie, München, bin ich für die Beratung zu Dank verpflichtet.

von Gasruß und Verdünnungsmittel, die Oberschicht enthält viel Gasruß. Durch dünnes Spritzen wird eine wegen der beständigen Unterschicht wetterfeste und wegen der rußreichen Oberschicht doch ziemlich matte Schwärzung erreicht, die sich auch nach monatelangem Freiland Einsatz — abgesehen von einem geringen Matteredwerden nach den ersten Niederschlägen — nicht veränderte. Die Kupferplatte der drei schon mehrfach genannten Sektoren mit anderen Oberflächen-eigenschaften wurden poliert und mit einer 5 μ starken Goldauflage versehen.

Jeweils 3 um 120° versetzte Sektoren haben die gleiche Funktion. Insgesamt werden mit je 60 Thermoelementen 4 Thermospannungen durch die vier verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen den 4 x 3 Sektoren erzeugt. Entsprechend dem Meßprinzip (IV,1) wird die zwischen dem Tripel der Tausektoren (I) und dem Tripel der einfach geheizten Sektoren (II) erzeugte Thermospannung von der zwischen dem Tripel der einfach geheizten Sektoren (II) und dem Tripel der doppelt geheizten Sektoren (III) erzeugten subtrahiert. Die vier Thermospannungen (II/III — I/II, II/III, III/IV, IV/I) werden über 5 Kabel (1 gemeinsames + je 1 weiteres für jede Thermospannung) zum Stecker geführt. Weitere 3 Kabel benötigen die beiden Heizkreise (1 gemeinsames + je 1 weiteres für jeden Heizkreis) und 2 Kabel die Thermistore.

B. Der Schaltteil

Der Schaltteil ist zum Anschluß von 4 Meßteilen und 2 Strahlungsbilanzmessern (77), (126) eingerichtet, außerdem sind zunächst freibleibende Anschlüsse für Meßelemente anderer Art (Lufttemperatur u. ä.) vorgesehen. Das Meßprogramm wird über einen von einem Zeitkontakt im Fallbügelschreiber gesteuerten Drehwähler und einen Satz von 20 Relais abgewickelt. In einem Turnus von 36 Minuten werden registriert

- δ die etwa der Tauwärme V entsprechende Temperaturdifferenz (für jeden Meßteil 1 x in 12 min)
- δ_2 die etwa der Heizung H entsprechende Temperaturdifferenz (für jeden Meßteil 1 x in 12 min)
- δ_3 die von der Strahlungsbilanz S abhängige Temperaturdifferenz (für jeden Meßteil 1 x in 12 min)
- δ_4 die Temperaturdifferenz zwischen den Sektortripeln IV und I. Diese Größe wird für die Auswertung nicht benötigt. Sie bietet aber eine Kontrollmöglichkeit. (Siehe Gl. [61d] und in Tab. 8 die Spalte 2 — $\delta/\delta_2 + \delta_3/\delta_2 + \delta_4/\delta_2$). Die Beziehung [61d] war außer bei starken Temperaturänderungen in der Regel bis auf (\pm) einige Prozente erfüllt (für jeden Meßteil 1 x in 36 min)
- ϑ_1 die Temperatur der Taufängersektoren (für jeden Meßteil 1 x in 36 min)
- U_H die durch Eisenwasserstoffröhren weitgehend konstant gehaltene Heizspannung (insgesamt 1 x in 36 min)
- U_A die Akkumulatorspannung (1 x in 36 min)
- 0 der Nullpunkt des Registriergerätes (1 x in 36 min)
- ϑ_G die Temperatur des Registriergerätes (1 x in 36 min)
- SB die der vom Strahlungsbilanzmesser angezeigten Strahlungsbilanz entsprechende Thermospannung (je Strahlungsbilanzmesser 1 x in 12 min)
- SH die der Heizung des Strahlungsbilanzmessers entsprechende Thermospannung (je Strahlungsbilanzmesser 1 x in 12 min).

Zu diesen 28 Meßgrößen, die in 5 verschiedenen Farben registriert werden können, kommen für die sechste Farbe des Registriergerätes weitere 6 Größen, die erst nach Beendigung der Entwicklung der entsprechenden Meßfühler angeschlossen werden sollen. Abgesehen von

den schon erwähnten Störungen an dem als gebraucht übernommenen Relaisatz und einigen bei Dauerregistrierungen mit zweimaliger Kontrolle am Tag anscheinend nicht vermeidbaren Ausfällen (durch Stromversorgung, Schaltung, Registrierpapier u. ä.) sowie Abschaltungen während längerer Schlechtwetterperioden wickelte das Schaltgerät teils ganztägig, teils während der Nacht das Meßprogramm ab. Wegen der noch fehlenden Meßteile waren unter den rund 400 000 Registrierpunkten nur etwa 100 000 Meßwerte, von denen natürlich nur ein kleiner Teil (etwas über 3000; IV, 6) zur vollen Auswertung herangezogen werden konnte.

Auf Einzelheiten der technischen Ausführung (Schaltung der Relais, Abgleich der Meß- und Heizkreise, Stabilisierung von Heiz- und Meßspannungen, Aufbau der Brückenschaltung für die Thermistore, Anzeige- und Kontrollvorrichtungen u. ä.) soll hier nicht eingegangen werden. Die Stromversorgung erfolgte über einen Pufferakkumulator (24 V, 40 Ah) aus einem Gleichrichter, der an das Lichtnetz angeschlossen ist. Der Schaltteil ist durch ein 10-adriges Kabel mit dem Registrierteil verbunden.

C. Der Registrierteil

Als Registriergerät wurde — wie schon erwähnt — ein Sechsfarben-Fallbügelschreiber mit Drehspulmeßwerk (Type TH6CH der Fa. Hartmann & Braun, Frankfurt a. M.; 5 mV, 60 Ω) verwendet. Dieses Gerät registriert nacheinander im Abstand von 30 sec mit 6 Farben. Durch einen Kontaktgeber, der beim Beginn eines neuen Zyklus schaltete, wurden vom Schaltteil aus die verschiedenen Meßspannungen an das Registriergerät gelegt. Durch die Verwendung der gleichen Farbe für mehrere Meßgrößen traten bei der Auswertung keine Schwierigkeiten auf, da sich diese leicht identifizieren ließen.

4. Die theoretischen Grundlagen

Wie bei den meisten meteorologischen Meßgeräten auf thermodynamischer Basis (thermische Windmesser, Psychrometer, viele kalorische Strahlungsmeßgeräte) werden auch von dem hier beschriebenen thermoelektrischen Taumesser primär Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen angezeigt, aus denen die gewünschten Größen berechnet werden müssen. Um die zur Berechnung nötigen Beziehungen in Form von Gleichungen gewinnen zu können, lassen sich Vereinfachungen und Näherungen nicht vermeiden, wenn man überschaubare und mit erträglichem Aufwand anwendbare Formeln erhalten will.

So legt es die gefundene Unabhängigkeit der Anzeige von der Windrichtung nahe, im Mittel die Verhältnisse an allen Flächenelementen von Sektoren gleicher Funktion als gleich anzusehen. Dann kann man entsprechend den vier verschiedenen Arten von Sektoren (I, II, III, IV) für die verschiedenen Typen von Flächenelementen je eine Energiebilanzgleichung

$$H_i + V_i + S_i + L_i + B_i = 0 \quad [55]$$

$i = 1, 2, 3, 4$

aufstellen. [55] entspricht abgesehen von der neu hinzugekommenen Heizung der Energiebilanzgleichung [1], doch sollen hier die Energieströme auf die Einheit der Projektionsfläche bezogen werden. Dies heißt, daß bei allen Energieströmen, die von beiden Seiten kommen, die Summe dieser beiden Energieströme genommen wird. Nun ist

beim Sektorentripel	I	II	III	IV
$H_i =$	0	H	2H	H
$V_i =$	2V	0	0	0

wenn man $V_i = 2V$ setzt, da Tau nur im Tausektorentripel vorkommt und auf beiden Seiten der Sektoren ge-

bildet wird. Abweichend von der Angabe in IV, 1 wurde $H_4 = H$ genommen (Begründung in IV, 5). Für S kann man

$$S_i = 2\epsilon_i (\bar{G} - \sigma T_i^4) \quad [56]$$

schreiben, wo \bar{G} einen Mittelwert aus der Gegenstrahlung des Bodens (einschließlich Reflexstrahlung) und der Atmosphäre darstellt und für

die Sektorentripel	I	II	III	IV
$\epsilon_i =$	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ'

gesetzt wird. Angesichts der geringen und durch Messungen z. Zt. noch nicht belegbaren (siehe aber Tab. 6) Veränderungen des ϵ_1 beim Auftreten von Tau, wird diese Veränderung vernachlässigt. ϵ' entspricht nicht den Laborwerten für Gold (0,02), sondern muß wegen des Einflusses nicht vergoldeter, thermisch aber wirksamer Sektorenteile aus Vergleichen (IV, 5) gewonnen werden.

Wegen der Rotationssymmetrie werden im Mittel die Wärmeübergangszahlen für die Flächenelemente aller Sektoren als gleich angesehen.

$$L_i = 2\alpha_L (\vartheta_L - \vartheta_i) \quad [57]$$

Der von der Luft bewirkte Wärmetransport zwischen verschiedenen temperierten Sektoren wird mit der unvermeidbaren Leitung durch die Verbindungsstege zu

$$B_{ik} = -B_{ki} = \beta (\vartheta_i - \vartheta_k) \quad [58]$$

zusammengefaßt. Die Wärmedurchgangszahl β muß aus Versuchen ermittelt werden (IV, 5). Als zwar geringe, doch nicht vernachlässigbare Wärmetönung kommt zum Glied B noch die aus der Wärmekapazität und den Temperaturänderungen stammende Wärme

$$B_{ci} = -\gamma \frac{d\vartheta_i}{dt} = -\gamma \dot{\vartheta}_i \quad [59]$$

γ wird aus Laborversuchen ermittelt (IV, 5).

Nunmehr kann man die Energiebilanzgleichungen der vier Typen von Flächenelementen aufstellen. Sie lauten

- I. $2V + 2\epsilon\bar{G} - 2\epsilon\sigma T_1^4 + 2\alpha_L (\vartheta_L - \vartheta_1) + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1) + \beta(\vartheta_4 - \vartheta_1) - \gamma\dot{\vartheta}_1 = 0$
- II. $H + 2\epsilon\bar{G} - 2\epsilon\sigma T_2^4 + 2\alpha_L (\vartheta_L - \vartheta_2) + \beta(\vartheta_3 - \vartheta_2) + \beta(\vartheta_1 - \vartheta_2) - \gamma\dot{\vartheta}_2 = 0 \quad [60a \dots d]$
- III. $2H + 2\epsilon\bar{G} - 2\epsilon\sigma T_3^4 + 2\alpha_L (\vartheta_L - \vartheta_3) + \beta(\vartheta_4 - \vartheta_3) + \beta(\vartheta_2 - \vartheta_3) - \gamma\dot{\vartheta}_3 = 0$
- IV. $H + 2\epsilon'\bar{G} - 2\epsilon'\sigma T_4^4 + 2\alpha_L (\vartheta_L - \vartheta_4) + \beta(\vartheta_1 - \vartheta_4) + \beta(\vartheta_3 - \vartheta_4) - \gamma\dot{\vartheta}_4 = 0$

Subtrahiert man je zwei aufeinanderfolgende Gleichungen voneinander (II — I, III — II, IV — III) und setzt

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \delta_1 = \delta_2 - \delta \quad \vartheta_2 - \vartheta_3 = \delta_2 \quad [61a \dots d]$$

$$\vartheta_3 - \vartheta_4 = \delta_3 \quad \vartheta_4 - \vartheta_1 = \delta_4 = \delta - 2\delta_2 - \delta_3$$

$$\epsilon(G - \sigma T_i^4) = S_i \quad S = \epsilon(G - \sigma T_1^4) = S_1 \quad \alpha_s \delta_4 \quad [61e \dots h]$$

$$\alpha = \alpha_L + \alpha_s \quad K = \frac{\epsilon - \epsilon'}{\epsilon} = 1 - \frac{\epsilon'}{\epsilon}$$

dann lassen sich aus den drei so gefundenen Beziehungen und [58], [59] und [55] Formeln für die gesuchten Größen finden

$$2\alpha = -\frac{H}{\delta_2} - \beta \left(1 + \frac{\delta}{\delta_2} - \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) + \gamma \frac{\dot{\delta}_2}{\delta_2} \quad [62]$$

$$2V = H \frac{\delta}{\delta_2} + \beta \delta_2 \left[\left(1 - \frac{\delta}{\delta_2}\right) \left(2 - \frac{\delta}{\delta_2} + \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) + \frac{\delta_3}{\delta_2} \right] - \gamma \delta_2 \frac{\dot{\delta}_2}{\delta_2} \quad [63]$$

$$2S = \frac{1}{K} \left\{ -H \left(1 + \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) + \beta \delta_2 \left[\left(1 - \frac{\delta}{\delta_2}\right) + \frac{\delta_3}{\delta_2} \left(2 - \frac{\delta}{\delta_2} + \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) \right] - \gamma \delta_2 \frac{\dot{\delta}_3}{\delta_2} \right\} - 2\alpha_s \delta_2 \left(2 - \frac{\delta}{\delta_2} + \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) \quad [64]$$

$$B = -\beta \delta_2 \left(3 - 2\frac{\delta}{\delta_2} + \frac{\delta_3}{\delta_2}\right) - \gamma \dot{\vartheta}_1 \quad [65]$$

$$2L = -2V - 2S - B \quad [66]$$

Die Wärmeströme 2V, 2S, B und 2L gelten für das Tripel der Tausektoren. Die Indizes sind, da eine Verwechslung nicht möglich ist, weggelassen. Für $\beta = 0$ und $\gamma = 0$ würde [63] im Prinzip in [53] übergehen. Abgesehen von den zunächst noch unbekanntem Koeffizienten β , γ und K enthalten die Gleichungen [62] bis [66] lauter von der Registrierung (IV, 3) erfaßte (δ , δ_2 , δ_3 , δ_4) bzw. aus registrierten Größen und Gerätedaten (H , α_s) berechenbare Werte. Allerdings sind die Beziehungen erheblich komplizierter, als es das einfache Meßprinzip erwarten läßt. Entsprechend groß ist auch die Auswertearbeit.

5. Die Bestimmung der Koeffizienten und anderer charakteristischer Größen

Zur Überprüfung einiger in IV, 4 abgeleiteter Beziehungen und zur Ermittlung von γ wurde der thermoelektrische Taumesser vor dem Freilandeinsatz in einem kleinen Saugwindkanal untersucht. Leider ist im Labor eine befriedigende Nachbildung der Freilandverhältnisse insofern kaum möglich, als man nur mit erheblichem technischen Aufwand die nächtlichen Strahlungsverhältnisse (effektive Ausstrahlung) reproduzieren kann. Dazu fehlten die Mittel. Dagegen kann die bei der Taubildung freiwerdende Wärme im Laborversuch durch eine elektrische Heizung der Tausektoren ersetzt werden. Entsprechende Versuche mit verschiedenen Heizleistungen auf den Tausektoren zeigten nur Differenzen von (\pm) wenigen Prozenten zwischen den mit Hilfe von [63] berechneten V-Werten und den aus der elektrischen Heizleistung ermittelten.

Die bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten gefundenen Werte von α sind in Abb. 10 dargestellt. Wie

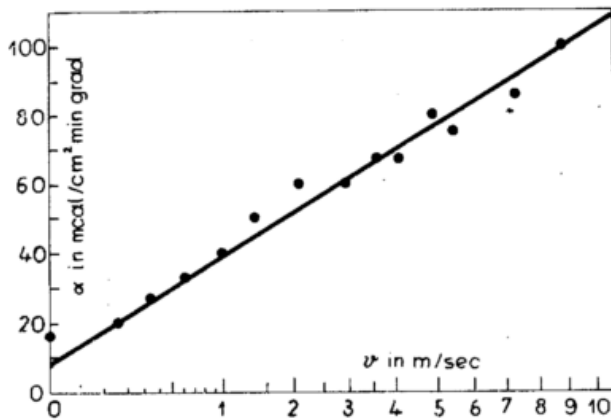


Abb. 10 Die mittlere Wärmeübergangszahl α in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v .

Abb. 10 zeigt, lassen sie sich bei einer zu \sqrt{v} proportionalen Abszisseneinteilung durch eine Gerade ausgleichen. Diese entspricht der Zahlenwertgleichung

$$\alpha = 8 + 31 \sqrt{v} \quad [67]$$

wobei sich α in mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ ergibt, wenn man v in m sec⁻¹ einsetzt. Daß der Meßwert bei Windruhe merklich vom extrapolierten Wert abweicht, erklärt sich sehr einfach durch die thermische Konvektion. Ihr Einfluß macht sich vor allem bei Windruhe und sehr kleinen Windgeschwindigkeiten bemerkbar. Bei Freilanduntersuchungen wird sie wegen der dauernden, wenn auch mitunter kleinen Luftbewegungen meist nur eine untergeordnete Rolle spielen. Da der Einfluß der thermischen Konvektion auf den gesamten Wärmeübergang mit steigender Temperaturdifferenz zwischen dem wärmeabgebenden Körper und der Luft anwächst (29), soll diese Temperaturdifferenz möglichst klein sein.

Daher wurde auch die Heizleistung auf dem Sektorentripel IV von 2H auf H reduziert. Dann ist nämlich die im Mittel auf jedes Flächenelement der Sektoren entfallende Heizleistung gleich H. Macht man H gleich der effektiven Ausstrahlung klarer Nächte, so kann man erwarten, daß dann im Mittel der Meßteil Lufttemperatur hat und der Einfluß der thermischen Konvektion unberücksichtigt bleiben kann. Im Laborversuch lassen sich — wie schon erwähnt — diese Freilandverhältnisse leider nicht nachbilden. In dem obigen Ausdruck [67] für α ist nach [61g] auch noch die Strahlungsübergangszahl α_s enthalten, die nach Tab. 3 für die Lufttemperatur bei den Laborversuchen (15–25°C) etwa der gefundenen Konstanten 8 mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ entspricht. Die für den thermoelektrischen Taumesser aus den Laborversuchen folgende Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl α_L von der Windgeschwindigkeit paßt sich also sehr gut den vielfach erprobten Gesetzen des Wärmeüberganges ein, wie sie beispielsweise in [38] oder Tab. 2 und Tab. 5 zum Ausdruck kommen.

Die Wärmekapazität der Flächeneinheit der Sektoren wurde aus Aufheiz- und Abkühlungsversuchen bei drei Windgeschwindigkeiten ermittelt. Sie ergab sich bei

$$\begin{aligned} v &= 0 & 1 & 5 \text{ m sec}^{-1} \text{ zu} \\ \gamma &= 124 & 163 & 167 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ grad}^{-1}. \end{aligned}$$

Natürlich ist γ in Wirklichkeit von der Ventilation unabhängig. Der Wert für Windruhe ist wieder durch die besonderen Verhältnisse bei freier Konvektion verfälscht. Aus den beiden anderen Werten ergibt sich

$$\gamma = 165 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ grad}^{-1}.$$

Dieser Wert wird der Auswertung zugrunde gelegt. Wenn die aus den Temperaturänderungen herrührende Wärmetönung auch nicht einfach vernachlässigt werden darf, so erreicht sie doch meist nur Werte, die unterhalb der Meßgenauigkeit liegen.

Da bei den Laborversuchen ohne Heizung der Tausektoren $V = 0$ ist, erlaubt [63] eine Berechnung des β aus den übrigen Meßwerten. Es ergab sich bei kleinen Windgeschwindigkeiten zu 6–8 mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹. Bei höheren Windgeschwindigkeiten schienen die Werte abzunehmen. Doch war hier eine zuverlässige Aussage nicht möglich, da der gleichsam durch β bewirkte Wärmestrom mit wachsender Ventilation immer mehr hinter dem gleichsam durch α_L bewirkten zurücktritt und dadurch auch die Genauigkeit zurückgeht, mit der der Wert von β aus den Meßergebnissen bestimmt werden kann. Da außerdem die Laborverhältnisse wegen der fehlenden effektiven Ausstrahlung nicht den Freilandverhältnissen entsprechen, wurde β auch aus einer größeren Zahl von Meßwerten in taufreien Nächten bestimmt. Die Werte lagen im Mittel bei 8–9 mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹. Im Hinblick auf die etwas niedrigeren Laborwerte wird den Auswertungen

$$\beta = 8 \text{ mcal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ grad}^{-1}$$

zugrunde gelegt. β hat also etwa den Wert, der sich auch für die z. Z. beste Aufstellung kassettierter Tauplatten III, 10, Typ 4P) ergibt. Trotzdem muß er im Hinblick auf die wünschenswerte möglichst weitgehende Unabhängigkeit des Taumeßwertes von den Eigenschaften des Taufängers (III, 10) noch als zu groß angesehen werden. Die naheliegende Abhilfemöglichkeit einer stärkeren räumlichen Trennung der verschiedenen Sektoren müßte entweder mit einer Verkleinerung der Sektoren, d. h. einer Vergrößerung der hier nicht berücksichtigten Randeinflüsse, oder einer Vergrößerung des Meßteils, d. h. einer größeren Störung der natürlichen Verhältnisse am Meßort, erkauf werden. Das Haupthindernis bildete aber die Notwendigkeit, den Meßteil dem nun einmal vorhandenen Registriergerät anzupassen. Eine ausreichende Vergrößerung der Abstände zwischen den Sektoren hätte aber zu einer für die Anzeigeempfindlichkeit untragbaren Vergröße-

rung der Meßkreiswiderstände geführt. Vielleicht bieten die derzeit in der meteorologischen Temperaturmeßtechnik immer größere Bedeutung erlangenden Thermistoren (126) hier eine bessere Basis. Für die oben (IV, 1) geschilderte Aufgabe der Erfassung der verschiedenen Komponenten der Energiebilanz eines künstlichen Taufängers ist der Wert von β selbstverständlich ohne Belang, da der durch β gekennzeichnete Wärmestrom eben auch ein Teil des Gesamtwärmehaushaltes des Taufängers ist.

Die größten Schwierigkeiten bot die Ermittlung des Koeffizienten K , der sich nach [61h] aus den Absorptionskoeffizienten der geschwärzten und der vergoldeten Sektoren ergibt. Schon die ersten Auswertungen hatten gezeigt, daß eine Berechnung des K aus den Labormesswerten für ε und ε' zu falschen Werten führen muß. Dies überrascht angesichts der besonderen Vorsichtsmaßnahmen bezüglich der Reinheit und der Konstanz der Oberflächen bei den Laboruntersuchungen, aus denen die in Tabellenwerken (21) genannten ε -Werte gewonnen wurden, nicht. Die rauen Verhältnisse meteorologischer Freilandversuche können solche ideale Bedingungen natürlich nicht bieten. Hinzu kommt, daß bei den vergoldeten Sektoren auch andere Teile mit hoher Absorptionszahl für die Temperaturstrahlung (Halterung, Thermoelementumhüllungen) u. a.) zwar thermisch wirksam, in den obigen Formeln (IV, 4) aber nicht gesondert berücksichtigt sind.

Nun gehen die Änderungen der Gegenstrahlung etwa in gleichem Maße in die Strahlungsbilanz des Bodens (Grasdecke) wie der Taufängersektoren ein. Trägt man daher die nach [64] berechneten Werte des Ausdruckes in $\{ \}$ und die mit einem Strahlungsbilanzmesser gemessenen Werte der Strahlungsbilanz des Bodens S_B in ein Diagramm ein, so kann man der Neigung der Ausgleichsgeraden den Wert K entnehmen. Eine solche Gegenüberstellung zeigt Abb. 11. Aus ihr ergibt sich

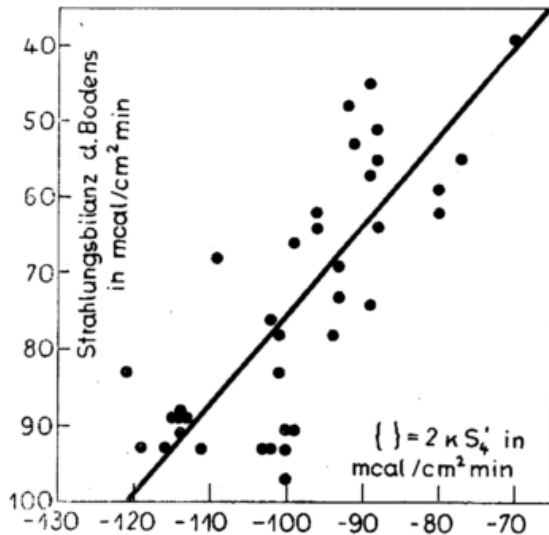


Abb. 11
Ermittlung des K .

$1/K = 1,30$ bzw. $K = 0,77$. Dieser Wert wird den Auswertungen zugrunde gelegt. Aus einem $\varepsilon = 0,95$ würde somit nach [61h] ein $\varepsilon' = 0,22$ folgen.

Nun deutet die starke Streuung der Punkte der Abb. 11, die im Mittel etwa ± 10 mcal cm⁻² min⁻¹ entspricht, auf eine erhebliche Unsicherheit der aus den Angaben des Meßgerätes berechneten Werte der Strahlungsbilanz hin. Von gleicher Größe muß die Unsicherheit der Werte von L sein, die aus der Energiebilanzgleichung als Restglied mit Hilfe von S , B und V berechnet werden. Unbeeinflusst bleiben dagegen V und

B , da K in [63] bzw. [65] nicht enthalten ist. Man darf jedoch bei der Betrachtung der hier aufgezeigten Fehler nicht vergessen, daß die in Abb. 11 auftretenden Streufehler schon an der Grenze der derzeit überhaupt erreichbaren Meßgenauigkeit liegen. Die nächtliche Strahlungsbilanz einer Oberfläche ist im wesentlichen die Differenz zweier Strahlungsströme, deren Werte bei etwa dem 40—50fachen der mittleren Streuung der Punkte von Abb. 11 liegen (II, 10). Es genügen also schon relativ geringe Schwankungen der in die Strahlungsbilanz eingehenden Faktoren, um Streuungen von 10 mcal cm⁻² min⁻¹ in den Strahlungswerten zu bewirken. Anlaß zu derartigen Schwankungen bieten aber gerade die meteorologischen Elemente, sei es nun in Form der Temperaturunruhe, der Windböigkeit oder der kurzzeitigen Schwankungen anderer Elemente, mehr als genug. Hinzu kommen die unvermeidbaren Fehler aus den Meßgenauigkeiten der übrigen in die obigen Auswertformeln eingehenden Größen. Selbst wenn man für das Registriergerät nur eine Anzeigegenauigkeit von $\pm 1\%$ des vollen Meßbereiches annimmt, entspricht dies einer Ungenauigkeit in der Angabe der Heizspannung von $\pm 2\%$ und der Heizleistung H von $\pm 4\%$. Es würde zu weit führen, wollte man auf diese Weise hier die Einflüsse aller Faktoren diskutieren. Zusammenfassend läßt sich jedoch sagen, daß man für die einzelnen aus den Angaben des Gerätes gewonnenen Teilbeträge der Energiebilanz folgende mittlere Fehler erwarten muß:

2V	$\pm 2-3$ mcal cm ⁻² min ⁻¹
B	$\pm 4-6$ mcal cm ⁻² min ⁻¹
2S	$\pm 10-15$ mcal cm ⁻² min ⁻¹
2L	$\pm 10-15$ mcal cm ⁻² min ⁻¹ .

Dabei stellen die niedrigen Fehlerwerte die aus den Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Konstanten resultierenden dar, während bei den höheren auch die Streufehler der primären Meßwerte berücksichtigt sind. Die Genauigkeit der Koeffizienten γ , β und K läßt sich etwa mit $\pm 10\%$ angeben. Die Fehler in der Bestimmung von β und K gehen in gleicher Weise in alle berechneten Werte ein und gleichen sich daher im Mittel nicht aus. Der Fehler von γ ist belanglos, da die von γ abhängigen Terme nur als kleine Korrekturen wirken.

Aus der Wärmekapazität der Flächeneinheit $\gamma = 165$ mcal cm⁻² grad⁻¹ und einem als rohen Anhaltspunkt zu wertenden $2\alpha = 50$ mcal cm⁻² min⁻¹ grad⁻¹ findet man als Halbwertszeit etwa 2 min. Das Gerät folgt also Änderungen der Außenbedingungen genügend rasch.

6. Die Messungen und deren Auswertung

Das im Frühjahr 1954 mit einem Meßteil fertige Gerät wurde im Mai erstmalig im Freiland eingesetzt. Der Aufbau der Meßanordnung erfolgte in einem Hausgarten am südwestlichen Stadtrand von München. Für die Wahl dieses Versuchsplatzes war vor allem der Umstand entscheidend, daß dadurch täglich eine zweimalige Kontrolle des Gerätes, die wettergeschützte Unterbringung des Schalt- und des Registrierteiles und die Stromversorgung ohne erhebliche zusätzliche Kosten gewährleistet war. Der Meßteil wurde anfangs in 5 cm Höhe über einer kurzgeschnittenen Rasendecke an einer Stange (siehe Abb. 8) angebracht. Später wurden auch Messungen in anderen Höhen durchgeführt. An das gleiche Registriergerät war ein Strahlungsbilanzmesser (IV, 3) angeschlossen, der in 1,50 m Höhe über dem Rasen in der Nähe des thermoelektrischen Taumessers aufgestellt war. Die Betreuungsarbeit mußte möglichst klein gehalten werden. Abends und morgens wurden bei niederschlagsfreier Witterung als Unterlage für eine rohe Kontrolle der Anzeige des Thermistortripels die Temperaturen an einem ungeschützten Hüttenthermometer und einem Aßmann-Psychrometer in der Höhe des thermoelektrischen Taumessers abgelesen. Hinzu

Tab. 8 Auszug aus einer Auswertetafel (18. 6. 1954).

1	Zeit		δ	δ_2	δ_3	δ_4	δ_1	U_H	SB	SH	δ_1	$H - \frac{\delta}{\delta_2}$	$-\beta(1 + \frac{\delta}{\delta_2} - \frac{\delta_3}{\delta_2})$	$\gamma \frac{\delta_2}{\delta_2}$	2α	$2\alpha_4$	$2\alpha_L$
	h	min	mV							°C	mcal/cm ² min grad						
3	21	01	+0.89	2.19	-0.12	-1.45	+0.60	-2.0	+0.25	-0.78	15.7	41	-11	0	30	15	15
4		13	+0.82	2.13	-0.27	-1.41	+0.59	-2.01	+0.23	-0.77	15.5	42	-11	0	31	15	16
5		25	+0.67	2.08	-0.30	-1.36	+0.59	-2.01	+0.22	-0.77	15.5	43	-11	0	32	15	17
6		37	+0.63	2.09	-0.32	-1.32	+0.59	-2.01	+0.22	-0.77	15.5	43	-11	0	32	15	17
7		49	+0.60	2.05	-0.45	-1.32	+0.60	-2.01	+0.20	-0.77	15.7	44	-11	0	33	15	18

1	$q = SB/SH$		$\frac{\delta}{\delta_2}$	$\frac{\delta_3}{\delta_2}$	$\frac{\delta_4}{\delta_2}$	$1 + \frac{\delta}{\delta_2} - \frac{\delta_3}{\delta_2}$	$1 - \frac{\delta}{\delta_2}$	$2 - \frac{\delta}{\delta_2} + \frac{\delta_3}{\delta_2}$	$(1 - \dots)(2 - \dots)$	$()_v$	$\frac{\delta_3}{\delta_2}(2 - \dots)$	$()_s$	$3 - 2 \frac{\delta_3}{\delta_2} + \frac{\delta_4}{\delta_2}$	$2 - \frac{\delta}{\delta_2} + \frac{\delta_3}{\delta_2} + \frac{\delta_4}{\delta_2}$	H	S _B	$\beta \delta_2$	$2\alpha_4 \delta_2$
															mcal/m ² min			
3	-0.32	0.29	-0.06	-1.66	1.35	0.71	1.65	1.17	1.11	-0.10	0.61	2.36	-0.01	98	-67	-19.0	-32.9	
4	-0.30	0.27	-0.13	-1.65	1.40	0.73	1.60	1.12	0.99	-0.21	0.52	2.33	-0.05	98	-62	-18.5	-32.0	
5	-0.29	0.21	-0.14	-1.63	1.35	0.79	1.65	1.30	1.16	-0.23	0.56	2.44	+0.02	98	-60	-18.1	-31.3	
6	-0.29	0.21	-0.15	-1.58	1.36	0.79	1.64	1.29	1.14	-0.25	0.54	2.43	+0.06	98	-60	-18.2	-31.4	
7	-0.26	0.21	-0.22	-1.61	1.43	0.79	1.57	1.24	1.02	-0.35	0.44	2.36	+0.04	98	-54	-17.8	-30.8	

1	$H \frac{\delta}{\delta_2}$	$\beta \delta_2 ()_v$	$-\gamma \delta_2 (\frac{\delta}{\delta_2})'$	$2V$	$-H(1 + \frac{\delta_3}{\delta_2})$	$\beta \delta_2 ()_s$	$-\gamma \delta_2 (\frac{\delta_2}{\delta_2})'$	$2KS_1'$	$2S_4'$	$-2\alpha_4 \delta_2 (2 - \dots)$	$2S$	$-\beta \delta_2 (3 - \dots)$	$-\gamma \delta_1$	B	$2S+B$	$2L$	$\Sigma 2V$
	mcal/cm ² min																
3	28	-21	0	+7	-92	-12	-2	-106	-138	54	-84	45	+4	49	35	28	33
4	26	-18	-1	+7	-85	-10	-2	-97	-126	51	-75	43	+1	44	31	24	40
5	21	-21	-1	-1	-84	-10	0	-94	-122	52	-70	44	0	44	26	27	39
6	21	-21	0	0	-83	-10	-2	-95	-123	51	-72	44	-1	43	29	29	39
7	21	-18	0	+3	-76	-8	-2	-86	-112	48	-64	42	-4	38	26	23	42

kamen Notizen über die Bewölkung, die Witterung und neben Angaben über Niederschläge (einschließlich Taufall) auf dem Meßteil, den Halterungen und dem Rasen solche über die Spannungen am Schaltteil und besondere Beobachtungen. Weitere Daten über den Taufall sollten zwei frei aufgestellte Leickplatten in 5 cm und 1 m geben (Abb. 7), die abends aufgehängt und morgens abgenommen wurden. Die Wägung erfolgte in Aluminiumkassetten (126). Der Meßteil war tagsüber zur Vermeidung unnötiger Störungen durch Regen oft abgedeckt. Da die Meßanlage erst am Abend nach Dienstschluß betreut werden konnte, fehlen vielfach Meßwerte aus den späten Nachmittags- und den frühen Abendstunden. Auf die vorhandenen Meßwerte selbst hat dies — abgesehen von Fehlen dieser Stunden — natürlich keinen Einfluß.

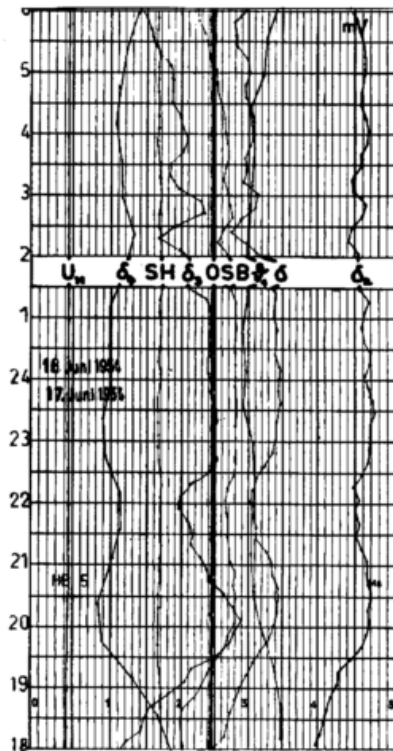


Abb. 12

Reproduktion eines Registrierstreifens des thermoelektrischen Taumessers (Breite des Originalstreifens 134 mm).

Eine Registrierung ist in Abb. 12 reproduziert. Die bei 2^h eingetragenen Zeichen entsprechen den Angaben in IV, 3 und zeigen die Bedeutung der einzelnen Punktzeilen.

Aus neun derartigen Registrierstreifen wurden für die Zeitpunkte der Registrierung der δ -Werte die übrigen Werte entnommen und daraus mit Hilfe der Auswertformeln die gesuchten Glieder der Energiebilanz der Taufängersektoren berechnet.

Tab. 8 gibt einen Ausschnitt aus einer derartigen Auswertliste wieder. Man sieht daraus, daß die Auswertarbeit ziemlich erheblich ist, da bei der Auswertung einer 12-stündigen Registrierung aus 480 abgelesenen Werten 2520 Zwischenwerte bzw. Ergebnisse berechnet werden müssen.

7. Die Meßergebnisse

Einige charakteristische Ergebnisse der Messungen mit dem thermoelektrischen Taumesser sind in den Abb. 13a—h zusammen mit Witterungsangaben dargestellt. Die jeweils die Meßwerte aus einer Nacht umfassenden Darstellungen enthalten zunächst das Datum

und die Meßhöhe, d. h. den Abstand der Sektorenfläche vom festen Boden. Die in den nächsten drei Zeilen folgenden Angaben sind den halbstündlichen Aufzeichnungen der Flugwetterwarte München-Riem entnommen. Diese liegt im ENE etwa 15 km vom Versuchsplatz München-Großhadern entfernt. Trotz dieser Entfernung dürften die Angaben den Wetterablauf am Versuchsort gut charakterisieren. Die zeitliche Übereinstimmung in den Schwankungen der Strahlungsbilanz in München-Großhadern und der Bewölkung in München-Riem kann man als gut bezeichnen, wenn man die aus der räumlichen Entfernung resultierenden zeitlichen Verschiebungen im Bewölkungsbild berücksichtigt. An den Kreisen, die den Bewölkungsgrad N (in Achteln) kennzeichnen, sind die Windrichtungen als kurze Striche eingetragen. Die Windgeschwindigkeit ist entsprechend der üblichen Verschlüsselung in Knoten ($= 1,8 \text{ km/h} = 0,5 \text{ m/sec}$) angegeben, da so eine feinere Aufgliederung möglich war. Sie entspricht einem Mittel aus etwa 10 Min. in 7 m Höhe an der Startbahn des Flughafens. Der relativen Luftfeuchtigkeit liegen die Messungen in der Hütte (Psychrometer mit ventilertem Feuchtthermometer) zugrunde. Als Zeiten des Sonnenuntergangs bzw. -aufgangs sind die astronomischen Daten eingetragen. Infolge der Horizonteinengungen (Häuser, Bäume u. ä.) lagen sie für den Meßplatz weiter auseinander.

Das obere Diagramm zeigt den Verlauf der Strahlungsbilanz des Rasens, wie er aus den Angaben des Strahlungsbilanzmessers berechnet wurde. Das mittlere Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der einzelnen Glieder der Energiebilanz der Tausektoren. Die untere Kurve der Strahlungsbilanz 2S gibt gleichsam den zur Kompensation zur Verfügung stehenden (negativen) Energiestrom wieder. Addiert man zu 2S den Wärmestrom B aus den Nachbarsektoren, so gibt $2S + B = -2L - 2V$ den negativen Wert des aus der Luft stammenden Wärmestromes wieder. Von diesem ist in der Regel nur der kleinere Teil mit der Tauabscheidung verbunden, welcher durch die in der Nähe der Nulllinie liegende Kurve $-2V$ (Vorzeichen!) dargestellt wird. Das untere Diagramm schließlich zeigt die Tausumme, d. h. den aus der Summation der 2V-Werte mit Hilfe von [4] berechneten Taubeschlag. Die Kurven sind — soweit Meßwerte vorlagen — für den Zeitraum von 18 Uhr bis 6 Uhr MEZ gezeichnet worden.

Abb. 13a: 16. 11. — 17. 11. 1953

Dier hier dargestellten Meßwerte wurden mit dem oben (IV, 2) kurz beschriebenen 9-teiligen Meßgerät gewonnen. Dieses erlaubte nur die Berechnung von $-2V$. Die übrigen Glieder der Energiebilanz fehlen. Ebenso war am Meßort noch kein Strahlungsbilanzmesser aufgestellt. Die Werte der Strahlungsbilanz sind einer Registrierung oberhalb des Daches des Institutsgebäudes entnommen. Sie geben also nicht die Strahlungsbilanz des Rasens, sondern die eines Hausdaches wieder. Da die zur Taubildung führende Wolkenlücke mit dem Durchzug einer aus NE kommenden Kaltfront verbunden war, konnten die Bewölkungsangaben von München-Riem und die Werte der Strahlungsbilanz aus dem Stadtinneren von München zeitlich auf den Meßplatz umgerechnet werden. Man sieht, daß die jetzt gleichsam für den Meßplatz geltenden Daten sehr gut auf den Verlauf des Taufalles passen. Sogar der kurzzeitige Rückgang der Strahlungsbilanz um 0040 Uhr erscheint in einem Rückgang des Taufalles wieder. Man sieht aus der Registrierung, daß weder Angaben über die Bewölkung am Abend und am Morgen noch Messungen mit Tausummenmessern irgendeinen Hinweis auf diesen Taufall von immerhin 0,03 mm in etwa 2 Stunden hätten geben können. Derartige extreme Fälle scheinen auch selten zu sein, da bei den Messungen des Jahres 1954 kein gleicher Fall auftrat. Ziemlich ähnlich ist jedoch der in

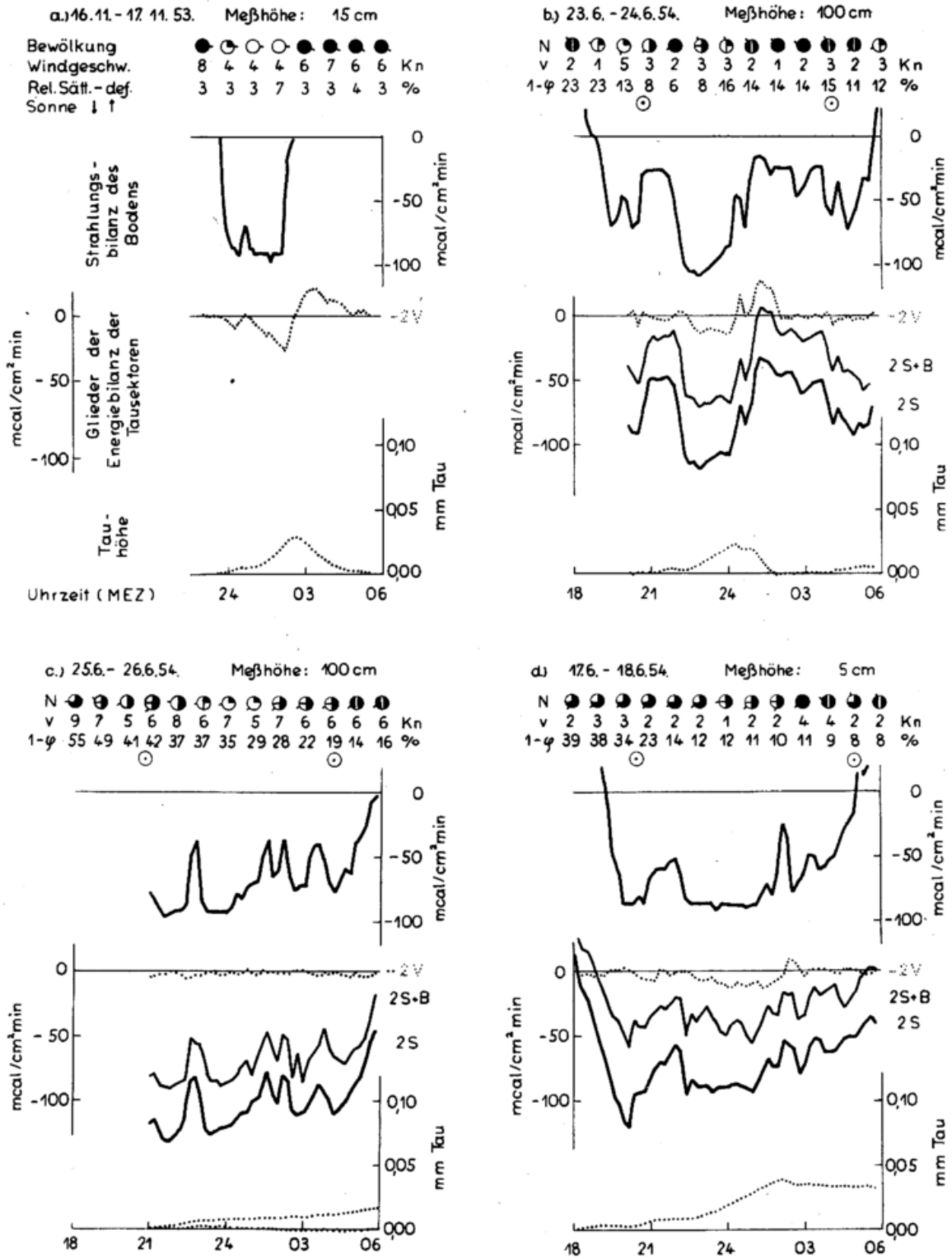


Abb. 13 a — d
Darstellung der Meßergebnisse des thermoelektrischen Tau-messers (Beschreibung im Text).

Abb. 13b: 23. 6. — 24. 6. 1954

gezeigte Verlauf. Auch hier ist der nachts gebildete Tau am Morgen praktisch wieder verdunstet. Man sieht auch hier wie bei den meisten Messungen die enge Korrelation zwischen den Schwankungen der Taubildung und der Strahlungsbilanz. Die Wiese zeigte mäßigen Taufall, die Leickplatte in Bodennähe 0,11 mm, die in Höhe des thermoelektrischen Taumessers 0,07 mm. Die Unterschiede zur Anzeige des thermoelektrischen Taumessers erklären sich zwanglos aus den anders gearteten energetischen Verhältnissen (B!). Dies gilt auch für die folgenden Darstellungen.

Abb. 13c: 25. 6. — 26. 6. 1954

In dieser Nacht zeigte die Tauplatte in 1 m Höhe keine Gewichtszunahme, die in Bodennähe 0,06 mm. Auch der Rasen war taufrei. Dies erscheint angesichts der vergleichsweise hohen Ventilation und des hohen Sättigungsdefizites plausibel. Trotzdem scheint die Tausumme am Morgen knapp 0,02 mm zu sein. Bedenkt man aber, daß die mittlere Meßgenauigkeit von gleicher Größe ist, so liegt die Deutung dieses Ergebnisses als Meßfehler nahe. Tatsächlich führt eine Vergrößerung des nur mit etwa 10% Genauigkeit bekannten β -Wertes von 8 auf 9 $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{grad}^{-1}$ (IV, 5) zu $-2V$ -Werten, die etwa um 2 $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ größer sind, und zu einer Tausummenkurve, die sich kaum von der Nulllinie wegbewegt. Ob diese Abweichungen rein zufälliger Natur sind oder etwa aus der im Vergleich zu den übrigen Messungen höheren Ventilation (Werte des α_L etwa 16—20 $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{grad}^{-1}$ gegenüber 7—12 $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{grad}^{-1}$ bei den meisten Messungen) herühren, kann vorerst nicht entschieden werden. Der Fehler wird übrigens überhaupt erst durch die Summierung augenfällig. Die gleiche Erscheinung kann man häufig in der freien Natur beobachten, wo geringe, meßtechnisch oft kaum mehr erfaßbare Unterschiede im Energiehaushalt zweier Oberflächenstücke bei geeigneter Witterung deutliche Unterschiede im Tau- oder Reifbefall aufweisen, die nur wegen der Summierung kleiner und kleinster Differenzen über längere Zeiträume sichtbar werden. A. Schmauß (81) beschreibt eine Fülle derartiger Beobachtungen und folgert: „Wenn ein Sprichwort sagt: Die Sonne bringt es an den Tag, könnte man in Abwandlung anfügen: Tau und Reif lassen es erkennen.“

Abb. 13d: 17. 6. — 18. 6. 1954

Diese Nacht brachte einen schwachen Taufall auf dem thermoelektrischen Taumesser. Die hohen Bewölkungsgrade scheinen zunächst den Strahlungsbilanzwerten zu widersprechen, doch zeigen die Aufzeichnungen in München-Riem, daß es sich um Ac-Bewölkung handelt, zu der erst zwischen 01 und 04 Uhr Sc kommt. Der mit dem Aufkommen unterer Bewölkung verbundene Rückgang der Strahlungsbilanz führt auch nach 02 Uhr zum Vorherrschen der Verdunstung. Die Registrierung dieser Nacht ist in Abb. 12 reproduziert, einen Auszug aus der Auswertung zeigt Tab. 8.

Abb. 13e: 1. 8. — 2. 8. 1954

In dieser Nacht wurde bei geringer Bewölkung auf dem thermoelektrischen Taumesser eine Tausumme von 0,07 mm erreicht. Die Tauplatte in der Höhe des Meßgerätes zeigte 0,16 mm, die in 1 m 0,12 mm. Der Rasen war stark betaut. Die drei Tausektoren waren ungleich stark betaut, und zwar am stärksten der im NE liegende. Im Hinblick auf die Windrichtung entspricht dies etwa dem in II, 9 besprochenen Effekt.

Abb. 13f: 24. 6. — 25. 6. 1954

Zwar wurde in dieser Nacht etwa die gleiche maximale Tausumme erreicht wie vom 1. 8. — 2. 8., doch ist sie durch einen ruhigeren Verlauf der Strahlungsbilanz gekennzeichnet. Das Anwachsen des zeitlichen Tausu-

wachses ist hier mit der Abnahme des relativen Sättigungsdefizits verbunden, das in seiner Wirkung auf die Taubildung sogar die Abnahme der Strahlungsbilanz übertrifft. Nach den Beobachtungsnotizen war der Taufall auf den Tausektoren schon nach 21 Uhr erkennbar, um 23.30 Uhr wird leichter Tau verzeichnet. Die optische Feststellung des Taubeschlags ist also sehr empfindlich.

Abb. 13g: 20. 7. — 21. 7. 1954

Die völlig wolkenfreie Nacht führte bei starker Ausstrahlung zu einem kräftigen Taufall, der vom thermoelektrischen Taumesser mit maximal 0,13 mm angegeben wird. Die beiden Tauplatten zeigten 0,24 mm für Bodennähe und 0,25 mm für 1 m Höhe. Bei merklicher Ventilation und einem Sättigungsdefizit, das kaum unter 10% fiel, hielt die Taubildung etwa konstant mit 0,02 mm/h an. Erst nach Sonnenaufgang setzt bei rasch zunehmender Strahlungsbilanz die Verdunstung ein.

Abb. 13h: 31. 7. — 1. 8. 1954

Einen noch kräftigeren Taufall, der auf dem thermoelektrischen Taumesser knapp 0,20 mm erreichte und auf den Leickplatten in Bodennähe zu 0,37 mm, in 1 m Höhe zu 0,33 mm führte, scheint diese Darstellung zu zeigen. Auch die Zunahme des zeitlichen Tausuwachses, gekennzeichnet durch die Kurve $-2V$, würde gut zur Abnahme des Sättigungsdefizits passen. Doch zeigen die übrigen Glieder der Energiebilanz, die hier nicht eingezeichnet wurden, Werte, die nicht stimmen können. So ist beispielsweise 2L vielfach kleiner als 2V, bei starkem zeitlichen Tausuwachs hier und da sogar null oder negativ. Hier zeigen sich mehrere Grenzen für eine Brauchbarkeit des Geräts. Zunächst sieht man aus den Riemer Beobachtungen, daß dort zwischen 20 und 21 Uhr ein Schauer war. Auch wenn für den Meßplatz keine derartige Notiz vorliegt, so kann er bei der notwendigerweise geringen Betreuung der Beobachtung entgangen sein. Die ihrem Betrag nach sehr hohen Werte der Strahlungsbilanz des Bodens können auch von der Verdunstung eines geringen Niederschlags auf den Platten des Strahlungsbilanzmessers von 21 bis etwa 24 Uhr herühren, die sich in der Registrierung direkt nicht erkennen läßt. Außerdem trat in der Nacht Dunst bzw. leichter Nebel auf (siehe Beobachtung Riem 05 Uhr), so daß alle Sektoren des thermoelektrischen Taumessers benetzt wurden. Tatsächlich wurde auch am Morgen auf den einfach geheizten Sektoren ein leichter Beschlag festgestellt. Da die Benetzung auch die vergoldeten Platten traf, war ϵ' größer als bei einwandfreier Oberfläche, d. h. die mit dem üblichen K -Wert berechnete Strahlungsbilanz 2S und daher auch der Wert 2L sind zu klein. Von ihrer Wiedergabe wurde daher abgesehen. Aber auch ohne Nebel kann bei der Heizung mit $H = 100 \text{ mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ und starker effektiver Ausstrahlung einmal die Temperatur der einfach geheizten Platten unter den Taupunkt der Luft sinken und auch dort Tau gebildet werden. Diese Fehlerquelle kann jedoch leicht durch eine etwas stärkere Heizung beseitigt werden. Nicht ausgeschaltet werden können dagegen wie bei den meisten anderen ungeschützt aufgestellten Meßgeräten auf thermodynamischer Basis (Hitzdrahtwindmesser, Strahlungsbilanzmesser) Fehler durch Regen und Nebel. In diesem Fall zeigen aber auch die Taumesser auf Wägebasis Werte, die man nicht dem echten Taufall gleichsetzen darf (III, 7). Die witterungsbedingten Grenzen der Verwendbarkeit des thermoelektrischen Taumessers liegen also gerade dort, wo das Auftreten anderer Niederschlagsformen die gesonderte Feststellung des echten Taus (I, 1) erschwert oder unmöglich macht.

8. Die weitere Arbeit

Betrachtet man zusammenfassend die eben gezeigten Ergebnisse der Messungen mit dem thermoelektrischen Taumesser, so findet man viele Beziehungen, die quali-

tativ dem entsprechen, was auch die Taufformel über die Verknüpfung des Taufalles mit den meteorologischen Elementen aussagt. Zu einer quantitativen Prüfung der Taufformel reichen aber die aus den Angaben des thermoelektrischen Taufängers berechenbaren Größen auch dann nicht aus, wenn die Meßgenauigkeiten weiter reduziert werden können. Dazu wäre die laufende Messung von einer Reihe anderer Größen, insbesondere der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, aber auch des Windes erforderlich. Passende Meßgeräte genügender Genauigkeit fehlen am Meteorologischen Institut der Universität München noch. Ihre Entwicklung dürfte aber in absehbarer Zeit wenigstens soweit abgeschlossen sein, daß sie bei mikrometeorologischen Messungen eingesetzt werden können (126). Es darf dabei nicht verschwiegen werden, daß die finanzielle Seite und das Fehlen technischer Hilfskräfte vielfach das größte Hindernis für ein rascheres Fortschreiten der Arbeiten ist (IV, 2).

Freilich darf man als Ziel dieser Arbeit nicht etwa eine Prüfung der Zuverlässigkeit der Taufformel ansehen. Hierzu wäre der notwendige Aufwand nicht gerechtfertigt. Zudem sind die zur Taufformel führenden Gesetze des Wärme- und Stoffüberganges keineswegs unbewiesene Annahmen. Sie sind im Gegenteil durch eine Fülle eingehender Untersuchungen (29) so gut bestätigt, daß sie die Genauigkeitsanforderungen bei der Tauffrage übertreffen. Ihre erfolgreiche Anwendung auf die viel anspruchsvolleren Probleme der Meßtechnik (in der Meteorologie: thermische Windmesser, Psychrometer, Verdunstungsmesser, kalorische Strahlungsmeßgeräte u. v. a.) dürfte dies hinreichend beweisen. Ihre Prüfung im Freilandversuch an Hand der Gesetzmäßigkeiten des Taufalles wäre etwa vergleichbar mit dem Versuch, die Gesetze der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Drähten durch Strom- und Spannungsmessungen bei den kleinsten eben noch erfassbaren Werten dieser Größen und der Aufstellung der Probekörper im Freiland zu untersuchen.

Das Ziel muß vielmehr für die Tauffrage sein, die wirklich vorkommenden Werte aller für den Taufall wichtigen Parameter in ihrer gegenseitigen Verbindung kennenzulernen. Dann aber ist der Tau nur ein Teil der energetischen Umsetzungen, die in der Nacht in der Atmosphäre vor sich gehen. Diese enge Verknüpfung des Taus mit den übrigen meteorologischen Vorgängen darf man nicht außer acht lassen. Nicht isolierte Betrachtungen einzelner Phänomene dürfen das Ziel sein, sondern möglichst vollständige quantitative Kenntnisse über die Glieder des Energiehaushaltes, der wie ein Band die Vielfalt der Einzelercheinungen umfaßt.

Literatur

- (1) Adrianoff, P.: Tauregistrier-Aräometer. Meteor. Z. 44, 425—429 (1927).
- (2) Albrecht, F.: Ein Strahlungsbilanzmesser zur Messung des Strahlungshaushaltes von Oberflächen. Meteor. Z. 50, 62—65 (1933).
- (3) Albrecht, F.: Die Meßgeräte des Wärmeumsatzes der pflanzenbestandenen Erdoberfläche unter besonderer Berücksichtigung von Messungen im Walde. Z. angew. Meteor. 54, 105—115 (1937).
- (4) Antonik, B.: Die Häufigkeit des Vorkommens von Tau und Reif nach den Potsdamer Beobachtungen. Z. Meteor. 5, 52—55 (1951).
- (5) Aristoteles: Meteorologica, Buch 1, Kap. 10 (Deutsche Übersetzung im Auszug bei K. Schneider-Carius (85)).
- (6) Ashbel, D.: Bioclimatic atlas of Israel. Meteor. Dep. Jerusalem, o. J., 51—55.
- (7) Badgley, W.: Some remarks on dew. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 17, 80—86 (1891).
- (8) Baumgartner, A.: Der Wärmehaushalt eines jungen Waldes. München, 1955 (Manuskript), erscheint voraussichtl. in Forstwiss. Cbl.
- (9) Baur, F. u. Philipps, H.: Der Wärmehaushalt der Lufthülle der Nordhalbkugel im Januar und Juli. Gerlands Beitr. Geophys. 42, 160—207 (1934) u. 45, 82—132 (1935).
- (10) Baur, F.: Linkes Meteorologisches Taschenbuch, Neue Ausg. II. Leipzig, 1953.
- (11) Berger-Landefeld, U.: Über den Wasserverbrauch von Pflanzenverbänden. Planta 37, 6—11 (1949).
- (12) Bergeron, T.: Hydrometeor — Beschreibungen (1937). Com. Météor. Internat. Procès-verbaux Sess. Salzbourg 1937, Nr. 40, 232—245 (1938).
- (13) Bernick, W.: Untersuchungen über den Taufall auf der Insel Hiddensee und seine Bedeutung als Pflanzenfaktor. Diss. Univ. Greifswald, 1938.
- (14) Bolz, H. M. u. Falckenberg, G.: Neubestimmung der Konstanten der Angströmschen Strahlungsformel. Z. Meteor. 3, 97—100 (1949).
- (15) Breitsprecher, G.: Vergleichende Transpirationmessungen an Pflanzen der Hiddenseer Dünenheide. Diss. Univ. Greifswald, 1935. (Zitiert nach (63)).
- (16) Büttner, K.: Die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion, Verdunstung und Strahlung in Bioklimatologie und Meteorologie. Abh. Preuß. Meteor. Inst. 10, Nr. 5 (1934).
- (17) Bujorean, G.: Beiträge zur Methodik der Taumessung. Ber. Geobot. Forsch.-Inst. Rübel in Zürich Jahr 1932, 52—57 (1933).
- (18) Caillère, R.: Das Feuchtigkeitsbedürfnis der Ackererde. (Ref.: Z. Pflanzenernährung, Düngung u. Bodenkd. 32, 376 (1936)), Courier del' I. M. C. 7 (9), 2 (1935).
- (19) Chaptal, L. E.: Contribution à l'étude de la rosée et des sources secondaires de l'humidité du sol. Ann. Sci. Agron. Nancy 45, 134—154 (1928).
- (20) Conrad, V.: Die klimatologischen Elemente und ihre Abhängigkeit von terrestrischen Einflüssen. Köppen-Geiger, Handbuch der Klimatologie I B. Berlin, 1936.
- (21) D'Ans, J. u. Lax, E.: Taschenbuch für Chemiker und Physiker. 2. Aufl. Berlin, 1949.
- (22) Diem, M.: Bodenatmung, Meßtechnik und Ergebnisse. Gerlands Beitr. Geophys. 51, 146—166 (1937).
- (23) Dieterici, F.: Die Naturanschauungen und Naturphilosophie der Araber im 10. Jahrhundert. 2. Ausg. Leipzig, 1876. (Zitiert nach K. Schneider-Carius (85)).
- (24) Dines, G.: Dew, mist and fog. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 5, 157—164 (1879).
- (25) Dove, H. W.: Meteorologische Untersuchungen. Berlin, 1837. (Zitiert nach K. Schneider-Carius (85)).
- (26) Drummond, A. J.: The persistence of dew. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 69, 234—235 (1943), 70, 90—91 (1944), 71, 415—417 (1945).
- (27) Duvdevani, S.: An optical method of dew estimation. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 73, 282—296 (1947).
- (28) Eckardt, B.: Eistau. Meteor. Z. 48, 106 (1913).
- (29) Eckert, E.: Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch. Berlin, 1949.

- (30) Falckenberg, G.: Absorptionskonstanten einiger meteorologisch wichtiger Körper für infrarote Wellen. *Meteor. Z.* **45**, 334 — 337 (1928).
- (31) Ficker, H. v.: Untersuchungen über die meteorologischen Verhältnisse der Pamirgebiete. *Denkschr. Akad. Wiss. Wien* **97** (1919).
- (32) Fritzsche, G.: Vergleichende Messungen mit Leickschen Tauplatten. Ein Beitrag zur Frage der Taupendung an verschiedenen Standorten. *Biokl. Beibl.* **1**, 66 — 73 (1934).
- (33) Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 3. Aufl. Braunschweig, 1950.
- (34) Gelbke, W.: Untersuchungen zur Entwicklung elektrischer Tauregistrierverfahren. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* Nr. 35, 306 — 311 (1952).
- (35) Gelbke, W.: Ergebnisse dreijähriger Taumessungen. *Phys. Verh.* **9**, 195 (1954).
- (36) Gelbke, W.: Untersuchungen zur Methodik der Taumessungen im Zusammenhang mit dreijährigen Taumeßreihen in Greifswald. *Meteor. Obs. Greifswald*, 1954 (Manuskript).
- (37) Gerson, N. C.: Super-cooled water (drops on the earth's surface). *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **28**, 421 — 422 (1947).
- (38) Gilbert, O.: Die meteorologischen Theorien des griechischen Altertums. Leipzig, 1907.
- (39) Grunow, J.: Kritische Nebelfroststudien. *Arch. Meteor. Geophys. Biokl. B* **4**, 389 — 419 (1953).
- (40) Halstead, M. H.: Experimental verification of the equations for turbulent transfer. *Interim Rep. Johns Hopkins Univ. Lab. Climat. Seabrook N. J.* No 15, 31 — 36 (1951).
- (41) Hamberg, H. E.: La temp. et l'humid. de l'air à diff. hauteurs, observées à Upsal pendant l'été de 1875. Upsala, 1876. (Zitiert nach R. Geiger (33)).
- (42) Hellmann, G.: Über die Häufigkeit des Vorkommens von Tau und Reif. *Meteor. Z.* **42**, 257 — 260 (1925).
- (43) Herdmenger, J.: Flugzeug und Vorgeschichte. *Orion* **4**, 474 — 475 (1949).
- (44) Hiltner, E.: Der Tau und seine Bedeutung für den Pflanzenbau. *Wiss. Arch. Landw. A* **3**, 1—70 (1930).
- (45) Hiltner, E.: Der Tau und seine Bedeutung für den Wasserhaushalt der Kulturpflanzen. *Prakt. Bl. Pflanzenbau* **8**, 223 — 233 (1931).
- (46) Hiltner, E.: Der Tau, ein vernachlässigter Lebensfaktor der Pflanzen. *Mitt. Dt. Landw.-Ges.* **46**, 1 — 3 (1932).
- (47) Hirst, J. M.: A method for recording the formation and persistence of water deposits on plant shoots. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **80**, 227 — 231 (1954).
- (48) Hoffmann, I.: Die Anschauung der Kirchenväter über die Meteorologie. *Münchener Geogr. Stud.* **27**, (1907).
- (49) Hofmann, G.: Untersuchungen zum Wärme- und Wasserhaushalt junger Fichtenbestände. II. Ein Strahlungsbilanzmesser für forstmeteorologische Untersuchungen. *Forstwiss. Cbl.* **71**, 330 — 337 (1952).
- (50) Hofmann, G.: Zur Methodik der Taumessung. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* Nr. 38, 360 — 364 (1952).
- (51) Homén, Th.: Bodenphysikalische und meteorologische Beobachtungen mit besonderer Berücksichtigung des Nachtfrostphänomens. Berlin, 1894.
- (52) Houdaille, F.: Taumessungen zu Montpellier. *Bull. Météor. Dep. de l'Herault* 1892 — 1898. *Ref. in Meteor. Z.* **10**, 433 (1893), **15**, 72 (1898).
- (53) Huber, B.: Pflanzenphysiologie. Heidelberg, 1949.
- (54) Huber, B.: Wasserumsatz und Stoffbewegung. *Fortschr. d. Bot.* **15**, 262 — 263 (1954).
- (55) Jamin, J. C.: Compléments à la théorie de la rosée. *J. Phys. Radium* **8**, 41 — 48 (1879). (Zitiert nach E. Hiltner (44)).
- (56) Jennings, E. G. u. Monteith, J. L.: A sensitive recording dew balance. *J. Roy. Meteor. Soc.* **80**, 222 — 226 (1954).
- (57) Keller, H.: Über Taumessungen im ariden Hochland Transvaals. *Meteor. Z.* **50**, 321—324 (1933).
- (58) Kerner, F. v.: Ein Instrument zur Messung des Tauniederschlages. *Meteor. Z.* **9**, 106 — 108 (1892).
- (59) Knoche, W.: Glatteisbildung. *Meteor. Z.* **38**, 93 (1911).
- (60) Krügler, F.: Über den Anteil des Massenaustausches am nächtlichen Wärmehaushalt der Erdoberfläche. *Meteor. Z.* **49**, 372 — 376 (1932).
- (61) Lehmann, P. u. Schanderl, H.: Tau und Reif. Pflanzenwetterkundliche Untersuchungen. *Wiss. Abh. Reichsamt f. Wetterd. Berlin* **9**, Nr. 4 (1942).
- (62) Leick, E.: Zur Methodik der relativen Taumessung. *Beih. Bot. Zbl.* **49** (Erg. Bd.) 160 — 189 (1932).
- (63) Leick, E.: Der Tau als Standortsfaktor. *Ber. Bot. Ges.* **51**, 409 — 442 (1934).
- (64) Leick, E.: Grundsätzliches zur Taumessungsfrage. *Die Kulturpflanze* **1**, 53 — 78 (1953).
- (65) Leistner, W.: Die physikalische Analyse des Ventilationsfaktors. *Diss. Univ. Berlin*, 1934.
- (66) Leopold, L. B.: Dew as a source of plant moisture. *Pacific Sci. Honolulu* **6**, 259 — 261 (1952).
- (67) Lettau, H.: Atmosphärische Turbulenz. Leipzig 1939.
- (68) Linke, F.: Die nächtliche effektive Ausstrahlung unter verschiedenen Zenitdistanzen. *Meteor. Z.* **48**, 25 — 31 (1931).
- (69) Mäde, A.: Diskussionsbemerkung zum Vortrag von L. Steubing. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* Nr. 32 56 (1952).
- (70) Mather, J. R.: The measurement of potential evapotranspiration. *Publ. in Climat. Johns Hopkins Univ. Lab. Climat. Seabrook N. J.* **7**, No. 1 (1954).
- (71) Müller, H. G.: Zur Wärmebilanz der Schneedecke. *Meteor. Rdsch.* **6**, 140 — 143 (1953).
- (72) Nebolsin, S. J.: Rosa, *Izv. Akad. Nauk. SSSR Ser. geogr. i geofiz.* **9**, 461 — 476 (1945).
- (73) Novák, V.: Prubeh tvorby rosy v jihomoravském klimatu. *Sborník čsl. akad. zemed* **13**, 350 — 360 (1938). Referat in *Bioklim. Beibl.* **6**, 46 (1939).
- (74) Parchinger, V.: Eine neue Taumessungsmethode. *Meteor. Z.* **35**, 47 — 48 (1918).
- (75) Pastor, E.: Deutsche Volksweisheit in Wetterregeln und Bauernsprüchen. Berlin, 1934.
- (76) Pickering, W. H.: A years record with a dew recorder at Mandeville, Jamaica. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **39**, 326 — 327 (1913).
- (77) Pohl, W.: Untersuchungen an einem Strahlungsbilanzmesser. *Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München* Nr. 2 (1954).
- (78) Puishe, E. P.: Kogda otlageatia bolshe vsego rosy. *Meteor. Vestnik* **35**, 204 — 205 (1925).

- (79) Robitzsch, M.: Über Tau-, Reif- und Raureifbildung. *Ann. Hydrogr.* **59**, 171 — 174 (1931).
- (80) Sachs, J.: *Experimentalphysiologie der Pflanzen. Handbuch d. Physiologie* **4**, Leipzig, 1865. (Zitiert nach E. Leick (64)).
- (81) Schmauß, A.: Kleinklimabeobachtungen ohne Instrumente. *Wetter und Klima* **1**, 27 — 36 (1948).
- (82) Schmauß A.; Randbemerkungen VIII. Die Pflanze als Taulieferant. *Z. Meteor.* **5**, 183 — 184 (1951).
- (83) Schmidt, E.: Die Wärmestrahlung von Wasser und Eis, von bereiften und benetzten Oberflächen. *Forsch. Ing.-Wes.* **5**, 1 — 5 (1934).
- (84) Schmidt, W. u. Lehmann, P.: Versuche zur Bodenatmung. *S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa* **138**, 823 — 852 (1929).
- (85) Schneider-Carius, K.: *Wetterkunde — Wetterforschung.* Freiburg — München, 1955.
- (86) Schrödter, H.: Taumenge und Benetzungsdauer. *Biol. Zbl.* **69**, 72 — 73 (1950). Zitiert nach E. Leick (64).
- (87) Schubert, J.: Über Niederschlagsformen an der Erdoberfläche. *Z. Forst- und Jagdwes.* **49**, 389 — 393 (1917).
- (88) Seemann, J. u. Löw, K.: Die Auswirkung der Taubildung auf den Temperaturverlauf in der bodennahen Luftschicht. *Meteor. Z.* **61**, 158 — 161 (1944).
- (89) Shalem, N.: La rosée in Palestine. *Météorologie* **19**, 182 — 186 (1950).
- (90) Siegel, S.: Messungen des nächtlichen thermischen Gefüges in der bodennahen Luftschicht. *Gerlands Beitr. Geophys.* **47**, 369 — 399 (1936).
- (91) Skinner, S.: The drosometer or measurer of dew. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **38**, 131 — 136 (1912).
- (92) Sokhotskii, I. U.: Nabliudeniia nad rosoi na meteorologicheskoi stantsii 2-go razriada "Zapolje". *Meteor. Vestnik* **5**, 277 — 282 (1895).
- (93) Steiner, L. u. Fleischmann, R.: Taumessungen in Kompolt am nördlichen Rande der großen ungarischen Tiefebene. *Amtl. Veröff. Kgl. Ung. Reichsanst. f. Meteor. u. Erdmagnet.* **12** (1936).
- (94) Stephan, J.: Das Tauprobblem. *Biokl. Beibl.* **5**, 75 — 81 (1938).
- (95) Stephan, J.: Zum Tauprobblem. *Biologia Generalis* **7**, 204 — 229 (1943).
- (96) Stephan, J.: Bio- und mikroklimatische Untersuchungen an *Ornithopus sativus*. *Beitr. Biol. Pflanzen* **30**, 275 — 325 (1954).
- (97) Steubing, L.: Tauspendung und ihr Einfluß auf die Vegetation. *Ber. Dt. Bot. Ges.* **64**, 27 — 28 (1951).
- (98) Steubing, L.: Der Tau und seine Beeinflussung durch Windschutzanlagen. *Biol. Zbl.* **71**, 282 — 313 (1952).
- (99) Steubing, L.: Der Tau und seine Bedeutung für die Pflanze. *Umschau* **53**, 456 — 457 (1953).
- (100) Stocker, O. u. Kausch, W.: Bodenfeuchte und Tensiometermessungen. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* Nr. 32, 15 — 18 (1952).
- (101) Sutton, J. R.: Some observations of dew at Kimberley. *Roy. Dublin Soc. Sci. Proc. New Ser.* **12**, 206 — 274 (1910).
- (102) Szabados, A.: Subterrean dew formation and its significance. *Időjaras* **53**, 219 (1949).
- (103) Thornthwaite, C. W. u. Holzmann, B.: The determination of evaporation from land and water surfaces. *Monthly Weather Rev.* **67**, 4 — 12 (1939).
- (104) Thornthwaite, C. W.: *Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere.* Johns Hopkins Univ. Lab. Climat. Seabrook N. J.
- (105) Topolansky, M.: Der Reif und Tau in Österreich bis 1100 m Seehöhe. *Jb. Österr. Zentr.-Anst. f. Meteor.* **49**, 1 — 18 (1914).
- (106) Visser, S. W.: Daumetingen te Batavia. *Natuurk. Tijdschr. v. Nederl. Indie* **88**, 229 — 251 (1928). Referat in *Meteor. Z.* **47**, 195 — 196 (1930).
- (107) Volk, O. H.: Beiträge zur Ökologie der Sandvegetation der Oberrheinischen Tiefebene. *Z. Bot.* **24**, 81 — 185 (1931).
- (108) Vollney, C. F.: C. F. Vollneys Reise nach Syrien und Ägypten in den Jahren 1783, 1784 und 1785. Aus dem Franz. übersetzt. Jena, 1788. (Zitiert nach E. Leick (64)).
- (109) Walter, H.: Die ökologischen Verhältnisse in der Namib-Nebelwüste (SW-Afrika). *Jb. wiss. Bot.* **84**, 58 — 222 (1936).
- (110) Walter, H.: Einführung in die Phytologie, III/1: Standortlehre. Ludwigsburg, 1950, 121 — 128.
- (111) Wegener, K.: Bemerkung über Frühlings- und Herbsttau. *Meteor. Z.* **44**, 188 (1927).
- (112) Weise, R.: Über ein einfaches Mittel zum Taunachweis und seine praktischen Anwendungsmöglichkeiten. *Ann. Meteor.* **5**, 378 — 381 (1952).
- (113) Wells, W. C.: An essay on dew and several appearances connected with it. 2. Ausg. London, 1815. (Auszug bei K. Schneider-Carius (85)).
- (114) Whipple, F. J. W.: The persistence of dew. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **67**, 192 (1941), **68**, 278 (1942).
- (115) Wollny, E.: Untersuchungen über die Bildung und die Menge des Taus. *Forsch. a. d. Gebiet d. Agrikulturphys.* **15**, 111 (1892).
- (116) Würfel, H.: Die Häufigkeit des Auftretens von Tau und Reif in Eisleben. *Angew. Meteor.* **1**, 119 — 120 (1952).
- (117) Yamamoto, G.: On the rate of condensation of dew. *Geophys. Mag., Tokio* **11**, 91 — 96 (1937).
- (118) Zattler, F.: Über die Bildung des Taus und seine physiologische Wirkung auf die Pflanze. *Prakt. Bl. Pflanzenbau und -schutz* **10**, 73 — 89 (1932).
- (119) Zattler, F.: Agrarmeteorologische Beiträge zum Tauprobblem auf Grund von Messungen im Hopfengarten. *Arch. Pflanzenbau* **8**, 371 — 404 (1932).
- (120) Zattler, F.: Tau und Pflanzenbau. *Dt. Landw. Presse* **62**, Nr. 13, 14, 15 (1935).
- (121) Zikeev, N. T.: Annotated bibliography on dew. *Meteor. abstr. and bibl.* **3**, 360 — 391 (1952).
- (122) Zunker, F.: Das Verhalten des Bodens zum Wasser. In: Blanck, E.: *Handbuch der Bodenlehre* **6**, Berlin, 1930, 66 — 220.
- (123) *Klimakunde des Deutschen Reiches.* **II**, Berlin, 1939.
- (124) Annual dew summary, according to Duvdevanis method of observation, 1952. *Meteor. Serv. Israel*, Nr. 5 (1953).
- (125) Nach den Aufzeichnungen der Klimastation München-Bogenhausen des Deutschen Wetterdienstes.
- (126) Eine Publikation über die meßtechnischen Entwicklungsarbeiten am Meteorologischen Institut der Universität München ist beabsichtigt. Sie wird als Wissenschaftliche Mitteilung des Meteorologischen Instituts erscheinen.

