

Deutsches Reich
Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe)

Wissenschaftliche Abhandlungen
Band IX

Nr. 4

Tau und Reif
Pflanzenwetterkundliche Untersuchungen

von

Paul Lehmann und Hugo Schanderl

Mit 1 Tafel

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01733-3 ISBN 978-3-662-02028-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-02028-9

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	
1. Vorbemerkungen	3
Meteorologischer Teil	
2. Bodenlysimeter und Taumesser	3
3. Boden, Atmosphäre und Tau	5
4. Grenzschichtmeteorologie der Tau- und Reifbildung	9
5. Einflüsse beim Abtauen	12
Botanischer Teil	
6. Vergleiche zwischen Tauschreiberwerten und tatsächlichem Taugenuß einzelner Blattoberflächen	13
7. Blattmodellversuche hinsichtlich Form und Stellung im Raum	15
8. Taubeschlagsstudien im Auflichtmikroskop	15
9. Tauaufsaugvermögen der Blätter verschiedener Pflanzen	16
10. Betrachtungen über die pflanzenphysiologische Wirkung des Taus	17
Schluß	
11. Zusammenstellung der neuen Gesichtspunkte	19

1. Vorbemerkungen.

Seit jeher mißt die landwirtschaftliche Praxis dem Tau eine große Bedeutung für den Wasserhaushalt der Pflanzen, besonders in Trockenzeiten, bei. Die wissenschaftliche Forschung konnte sich lange nicht entschließen, sich mit dieser Frage eingehender zu befassen, zumal verschiedene Messungen immer wieder nur ganz unscheinbare Taumengen (1—4% des Jahresniederschlages) ergaben. Erst seit E. Hiltner (1) auf Grund genauerer Untersuchungen energisch auf die mehrfache Bedeutung des Taues für das Pflanzenleben hingewiesen hatte, schenkte man auch in der Wissenschaft der Taufrage mehr Aufmerksamkeit. Manche Messungen mit weniger tauglichen Apparaturen haben dann allerdings das Vorstellungsbild, das schon ein Th. Homén (2) in sachlich richtiger, wenn auch noch roh umrissener Form vermittelte, kaum weiter klären können. Dies hat erst wieder F. Zunker (3) in seiner Arbeit über das Verhalten des Bodens zum Wasser besorgt.

Unsere Absicht, eine kritische Sammlung des Gedankengutes über das Tau- und Reifproblem zu bringen, konnte infolge kriegsmäßiger Abkommandierung des einen von uns derzeit nicht ausgeführt werden. Da aber die Gewähr für die spätere Aufnahme der Untersuchungen, mit denen wir selbst zum Tauprobem beitragen wollten, nicht gegeben erscheint, wollen wir sie jetzt schon, wenn auch gekürzt und zum Teil nicht völlig abgeschlossen, veröffentlichen. Das Tauprobem interessiert nämlich nicht nur vom rein wissenschaftlichen Standpunkt aus (Meteorologie, Botanik, Zoologie, Bodenkunde usw.), sondern es hängt damit auch eine Reihe von Fragen zusammen, die heute von der Praxis immer dringender gestellt werden und deren Beantwortung man sich von der Agrarmeteorologie erhofft (z. B. künstliche Beregnung und Betauung, Frostschutz, Wind- und Dürreschutz, Schädlingsbekämpfung, künstliche Düngung und Bodenbearbeitung).

2. Bodenlysimeter und Taumesser.

Mitten im Weingartengelände, am äußersten Rande des rheinischen Städtchens Geisenheim, wo die Agrarmeteorologische Forschungsstelle Trier eine Zeitlang arbeitete, befindet sich das Meßfeld einer Klimastation I. Ordnung. Dieser Platz erschien geeignet zum Einsatz einer ortsbeweglichen Lysimeter- (Bodenwaage-)anlage (Abb. 1: Tafel) zur Verfolgung der Wasserbewegung (Niederschlag, Tau, Bodenkondensation, Verdunstung, Versickerung) im dortigen sandigen Lehm. Da sich die Neueinrichtung, die nicht sehr teuer ist, bewährt hat, sei sie hier kurz beschrieben.

An zwei möglichst ebenen Stellen wurden im Abstand von 1,80 m zylindrische Gruben ausgehoben und sodann deren Bodenschichtung (Krume, Mittelschicht, Untergrund) sorgfältig getrennt in zwei Gefäße (s. Abb. 2, *A* und *A'*) aus starkem verzinkten Eisenblech wieder eingefügt. Je ein zweites, noch größeres Blechgefäß *B* mit zylindrischer Vertiefung zur Aufnahme einer regenmesserartigen Auffangvorrichtung *C* für Sickerwasser wurde in den Boden eingelassen und ihm angepaßt. Die ungefähren Ausmaße sind aus der Skizze ersichtlich. Um das Miteindringen von Regenwasser und das Absinken kalter Luft bei Nacht zu verhindern, wurde der schräge Blechkragen *D* halb in den Außenboden eingegraben und ein passender, leicht abhebbarer Ringdeckel *E* über ihm und den Rand des Gefäßes *A* gelegt. Mit einer weit ausladenden (1,60 m) Balkenwaage *F* (Firma Prümm-Köln), deren Tragfähigkeit 250 kg bei einer Wägegenauigkeit von 1 g (!) beträgt, wurden von Zeit zu Zeit Wägungen in der Weise getätigt, daß der Bodenbehälter an die eine Waagschale gehängt und durch das aufgelegte Gegengewicht der anderen Schale emporgehoben wurde. Zur Erleichterung der Aufstellung der Waage stand diese auf einem Betonsockel, der in Richtung zu den beiden Lysimetern (mit bewachsenem und unbewachsenem Boden) in Feldbahnschienen auslief, auf denen die Waage horizontal verschoben werden konnte. So war schon nach einigen Minuten die Wägung des zweiten Lysimeters möglich. Zur Aufstellung der Waage genügten 2, zur Wägung ein kräftiger Mann. Gewogen wurde nur bei Windstille oder sehr schwachem Wind, so daß sich ein Wellblechwindschutz erübrigte.

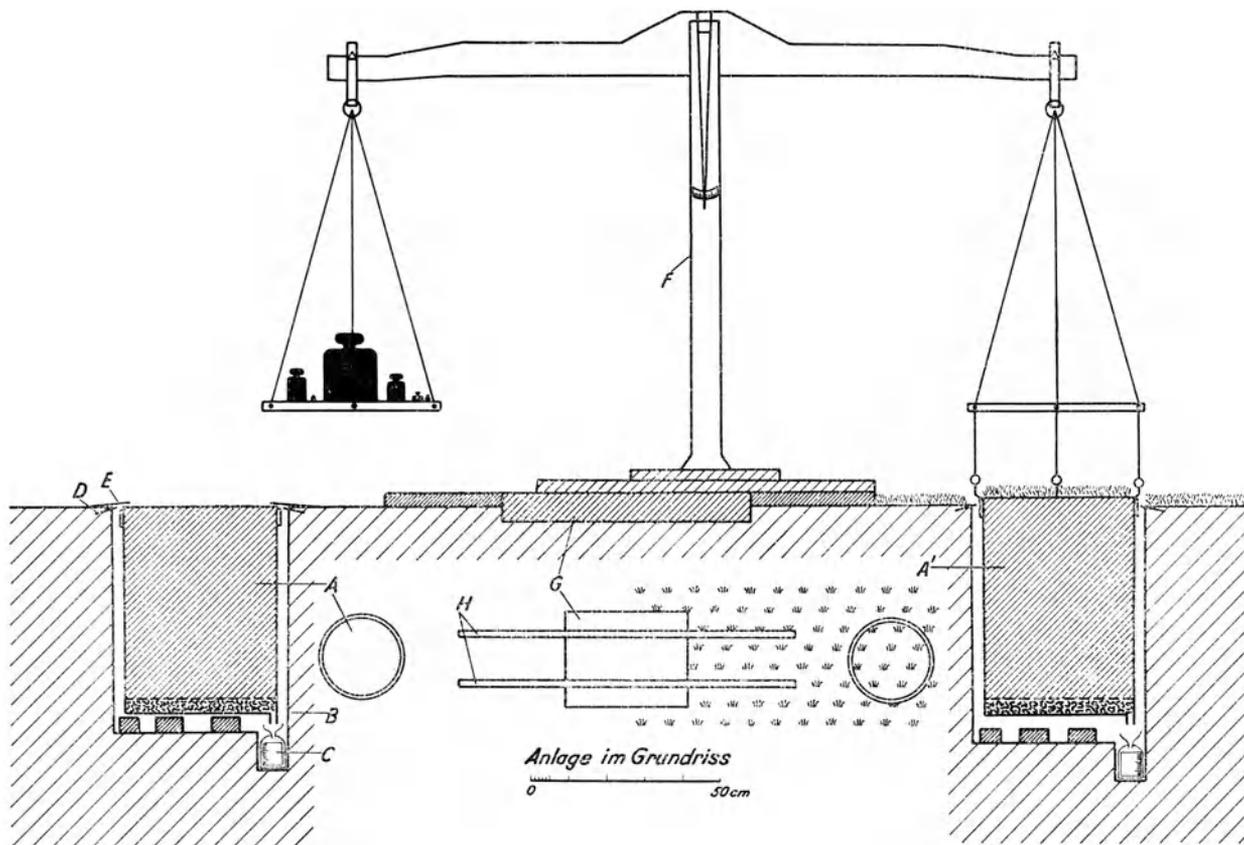


Abb. 2. Grundriß und Seitenriß der Lysimeteranlage (Erläuterung im Text).

Die wirksame Oberfläche eines solchen Bodengefäßes (Lysimeters) betrug 1220 cm^2 , also gut $\frac{1}{8} \text{ m}^2$; 1 mm Niederschlagsmenge entspricht also einem Gewicht von 122 g oder 1 g dem Betrage von nur 0,0082 mm. Es mußte also möglich sein, auch sehr schwachen Tau oder Reif ohne weiteres zu erfassen. Da der Keßler-Fueßsche Tauschreiber (4) Niederschlagswerte etwa derselben Größenordnung aufzeichnet (1 mm Registrierhöhe = 0,0095 mm Niederschlag) konnten bei fehlerloser Wägung exakte Vergleiche gezogen werden, zumal der Tauschreiber in nur etwa 1 m Entfernung Aufstellung fand.

Nach stärkeren Regengüssen sickerte das Wasser, das im Naturboden in etwa 50 cm Tiefe das Grundwasser erreicht haben würde, nachdem es in der mit groben Steinen und Faschinen belegten untersten Schichte filtriert wurde, in ein gegen Verdunstung geschütztes Sammelgefäß. Die abgetropfte Sickerwassermenge, die nur nach starken Regengüssen auftrat, konnte nach Abheben des Bodengefäßes im Meßglas bestimmt werden.

Wir sind uns wohl bewußt, daß eine Übertragung der mit diesen Lysimetern gewonnenen Ergebnisse auf die Verhältnisse im gewachsenen Boden nicht ohne weiteres zugänglich ist. Immerhin dürfte gerade bezüglich der Kondensationen an der Oberfläche kein allzugroßer Unterschied sein, wie schon die Tatsache zeigt, daß sich, je nach dem Grad der Betauung, die Farbe der Bodenoberfläche in und außerhalb der Lysimeter in gleicher Weise änderte. Oft blieb der nackte Boden graubraun, der bewachsene hingegen wurde schwärzlich, so wie dies auch außerhalb der Lysimeter der Fall war; dies ist immerhin ein makroskopisch ziemlich scharfer Vergleich. Temperaturvergleiche, allerdings bloß in 10 cm Tiefe angestellt, ergaben nur Unterschiede innerhalb der Fehlergrenzen, ein Zeichen, daß neben anderen Bodeneigenschaften wie Qualität, Lagerung und Durchlüftung auch die Feuchtigkeit weitgehend dieselbe war wie im gewachsenen Boden (in 2 m Entfernung).

Was den Tauschreiber Keßler-Fueß betrifft, sei noch hervorgehoben, daß er derzeit das beste Instrument seiner Art darstellt. Um die unerwünschte Kondensation am Waagehebel, die sich leider nicht ganz vermeiden läßt, noch mehr herabzumindern, wurde er mit Glysantin eingefettet, wodurch besonders der Reifansatz gehemmt zu werden schien. In die kleine Vertiefung der Auffangfläche, die als Tausammler dient, pflügten wir schon nachmittags bei Aufstellung des Tauschreibers einige Tropfen destillierten Wassers zu geben, so daß zunächst die Verdunstung registriert wurde. Das besorgte der Keßler-Fueß in ungleich feinerer Weise als die Wildsche Verdunstungswaage. So erschien es uns möglich, genau den Zeitpunkt, in dem die Kondensationserscheinungen die Verdunstungsvorgänge überwogen, festzustellen, um dann mit der Wägung

der Lysimetergefäße zu beginnen. Als störend empfanden wir die Notwendigkeit, alle 3 bis 4 Monate den Schwärzungsbelag des Auffangkörpers erneuern zu müssen. Da er außerdem auch etwas hygroskopisch ist, könnte er vielleicht in Zukunft ganz wegfallen. Bemerkt sei nur noch, daß die Frage nicht endgültig geklärt ist, wie man den Taubeschlag der Unterseite des aufnehmenden Teils rechnerisch erfassen soll. Wir richteten uns nach dem Keßlerschen (4) Vorschlag. Durch Auswechseln des Hebelarmes mit der Taufangschale durch einen solchen, an dem sich ein Gläschen mit einer ganzen Pflanze oder einem Pflanzenteil (im Wasser steckend) befindet, läßt sich der Keßler-Fueßsche Taumesser zugleich als registrierender Transpirationsmesser verwenden. Der nächtliche Taugenuß kann dadurch direkt in Beziehung zur Größe der Wasserdampfabgabe des folgenden Tages gesetzt werden.

Um noch genauer Einblick in das Wechselspiel zwischen Verdunstung und Kondensation zu gewinnen, verwendeten wir, wie Gallenkamp und auch Mröse, eine feuchte Filtrierpapierscheibe auf gleich großer, in der Mitte durchlochter Glasplatte (s. Abb. 3) und zwar so, daß damit sowohl der Beginn der Ver-

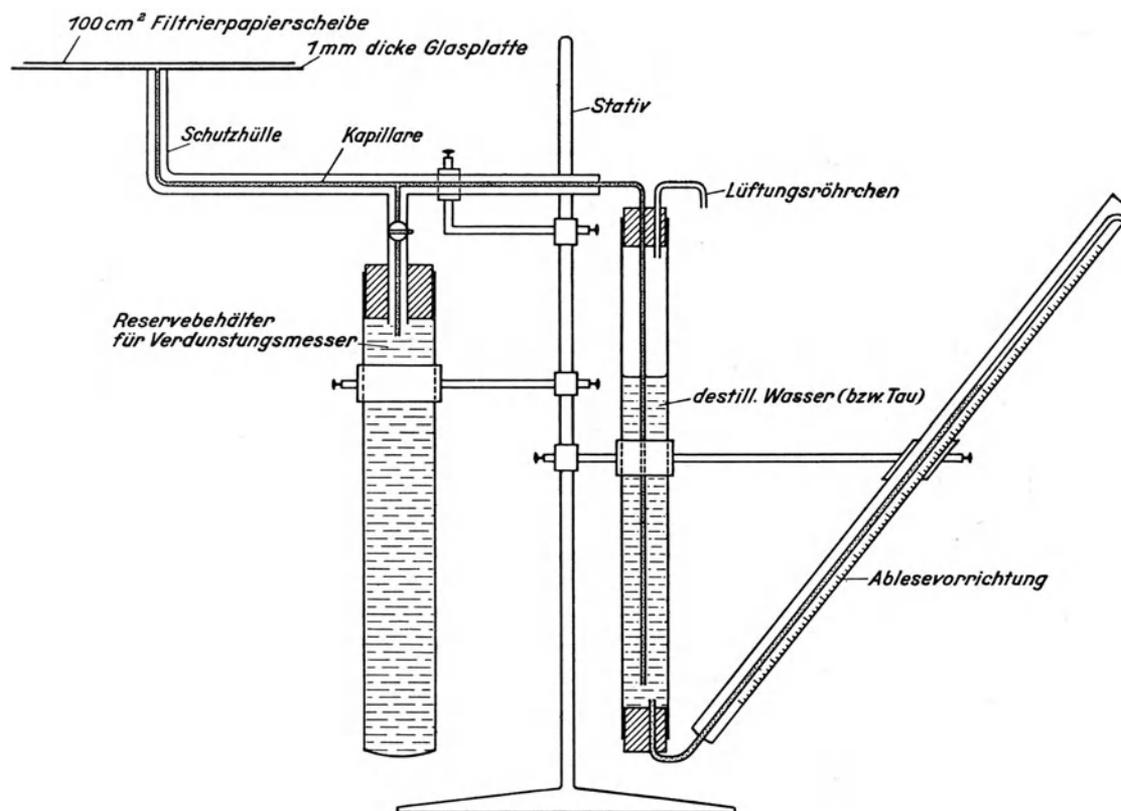


Abb. 3. Übergangsanzeiger Verdunstung — Tau.

dunstung als auch der Kondensation gut erfaßt werden konnte. Dies war sofort am Fallen bzw. am Steigen des Wasserstandes im schräg gestellten Glasrohr zu sehen. Zur Weiterbildung der Vorrichtung als exakter Verdunstungs-Tau-Bilanzschreiber war keine Gelegenheit mehr. Ebenso befanden sich die Vorrichtungen zum Nachweis des Einwirkens der Luftdruckschwankungen auf die Vorgänge der Wasserdampfbildung erst in den Anfängen. Sie werden im Punkt 4 der Arbeit kurz beschrieben.

3. Boden, Atmosphäre und Tau.

Wiederholt wurde schon der Versuch gemacht, eine Bodenprobe oder auch ein in den Mutterboden eingelassenes Gefäß mit demselben Boden vor und nach der Betauung zu wägen. Die Ergebnisse waren recht widerspruchsvoll; in der Mehrzahl der Fälle machte man die Beobachtung, daß die Probe gewichtsmäßig abgenommen hatte.

Um hier einmal Klarheit zu schaffen, wurde zunächst die Vergleichbarkeit der Lysimeterwägungen mit anderen Messungen geprüft. Es war allerdings vorauszusehen, daß Unterschiede der Ergebnisse auftreten müssen, die auf die ganz anders beschaffene Apparatur zurückzuführen sind. So reagierte der Wildsche Verdunstungsschreiber kaum auf Tau oder Reif und auch viel schwächer auf Verdunstung als der Tauschreiber. Der Hellmannsche Regenmesser zeigte ganz feine Niederschläge naturgemäß gar nicht an, wies

aber bei gut meßbarem Regen geringere Werte auf als ein Lysimetergefäß (z. B. 6,4 gegen 7,66 mm am 19. 8. 1940). Am besten war die Übereinstimmung noch bei Nieselwetter, z. B. 21.—22. 10.: Regenmesser 0,5 mm, Tauschreiber 0,524, Lysimeter mit Grasboden 0,582, Petrischale mit nacktem Boden 0,474 und im Grasschutz 0,594 mm. In der Nacht vom 4.—5. 12. fiel bei Wind 0,8 mm (Regenmesser), der Tauschreiber zeigte 0,723, das unbewachsene Lysimetergefäß 1,378, die Petrischale über Boden 1,15, der Verdunstungsschreiber im luftigen, aber überdachten Gartenhaus — 1,5 mm an.

Aus den sorgfältig durchgeführten Versuchen geht schon hervor, welch' große Bedeutung für derartige Messungen hauptsächlich der Faktor Verdunstung haben muß, der ganz von den mikrometeorologischen Bedingungen der jeweiligen Oberfläche abhängt. Ihm mußte also bei der Taumessung ein besonderes Augenmerk gewidmet werden. Im Sommer findet auch in kühler Nacht noch reichliche Verdunstung aus dem normalfeuchten Boden statt. Der Boden entbindet (exhaliert) Wasserdampf durch Wasserverdunstung der Oberfläche, solange sie durch Kapillarwasserbewegung Nachschub erhält, dann aber auch durch den in Richtung des Gefälles, also meist aufwärts strebenden Dampfstrom. Dieser Diffusionsstrom wird noch wesentlich verstärkt durch die Wasserdampfmengen, für die Temperatur- und Druckschwankungen den Bewegungsimpuls liefern.

Es ist also nicht verwunderlich, wenn, wie auch aus unseren zahlreichen Wägungen zwischen Sonnenunter- und Aufgang hervorgeht, die Exhalation fast stets die Kondensation übertrifft. Ein charakteristisches Beispiel dafür ist die Taunacht vom 18.—19. 10. 1940, bei der im Boden ohne Grasdecke 0,524, im Grasboden trotz guter Betauung 0,197 mm Verdampfungsüberschuß gemessen wurden, während der Tauschreiber 0,011 mm Tau registrierte. Im August erreichte dieses Plus beim graslosen Boden 0,8, beim Grasboden 0,4 mm Verdunstungshöhe. Erst um Mitternacht herum hört die Verdunstung auf, besser gesagt, stehen Exhalation und Kondensation im Gleichgewicht.

Im Winter (3.—4. 12.) wurde folgender Versuch gemacht: 6 flache, etwa 6 cm hohe Töpfe (Kasserollen) wurden gleichmäßig hoch mit feinem Sand (I—III) bzw. Ton (Kaolin) (IV—VI) gefüllt. Je eine Gefäßprobe wurde lufttrocken (I, IV) belassen, eine mit Wasser halb (II, V), eine voll gesättigt (III, VI). Nachstehende Tabelle gibt die Wägungsergebnisse sowie die daraus hervorgehenden Werte der Verdunstung und Verdichtung an:

Zeit	I g	II g	III g	IV g	V g	VI g
09,30	3428,5	3783,7	4069,0	2910,7	3224,2	3666,5
16,30	3428,5	3781,0	4066,0	2910,7	3222,5	3664,5
09,40	3431,7	3781,0	4061,5	2914,0	3222,0	3659,0
tags	±0,0	—2,7	—3,0	±0,0	—1,7	—2,0
nachts	+3,2	±0,0	—4,5	+3,3	—0,5	—5,5
in mm	+0,071	±0,0	—0,10	+0,074	—0,01	—0,12

Bei den mit Wasser vollgesättigten Bodenproben war also die Verdunstung nachts größer als bei Tag (wahrscheinlich infolge des gegen 22 Uhr mit der Eintrübung aufkommenden Windes; in der zweiten Nachthälfte war es völlig windstill, die Wolken verschwanden und schwacher Reif setzte sich an). In den halbfeuchten Böden hielten sich Verdunstung und Kondensation ungefähr die Waage und nur die lufttrockenen Proben zeigten auch gewichtsmäßig den überall sichtbaren Reifbeschlag an. So waren auch am unbewachsenen Lysimeterboden die feinen Reifkriställchen sichtbar. Trotzdem ergab die Wägung einen Gewichtsverlust, der einer Verdunstungshöhe von 0,049 mm entspricht! Der Wildsche Verdunstungsschreiber registrierte etwa 0,1 mm Verlust, der Keßlersche Tauschreiber ergab 0,074 mm Reif. Nach dem Parallelversuch mit den Petrischalenproben müssen wir das Ergebnis der Lysimeterwägung (0,05 mm) als Differenz zwischen Verdunstungsbetrag (0,12 mm) und Kondensat (0,07 mm) auffassen. Damit ist F. Zunkers Ansicht, daß in solchen Fällen die erste Wägung stets zu früh bei noch überwiegender Bodenverdunstung vorgenommen wurde, vollauf bestätigt.

Die Annahme, daß der am Boden aufgestellte Tauschreiber oder sonst ein Verdunstungs-Kondensations-Bilanzmesser den Zeitpunkt des beginnenden Taufalles anzeigen würde, hat sich als durchaus trügerisch erwiesen. Der Wärmenachschub und die sonstigen mikrometeorologischen Bedingungen sind zu verschieden, als daß gerade diese diffizilen Vorgänge gleichzeitig und gleichartig an beiden Meßvorrichtungen verlaufen könnten. Hat man keine selbstregistrierende Lysimeterwaage, so muß man, so umständlich das auch bei Nacht ist, öfter wägen. Abb. 4 zeigt, wie lange es bei einem Grasboden (strichliert), der schon vor Sonnenuntergang leicht tauig anzufühlen war, dauert, bis beim ganzen System Boden-Pflanzenwuchs die Kondensationsvorgänge obsiegen. Die Wägungen des unbewachsenen Lysimeters (ausgezogen) wurden in einer

späteren Taunacht durchgeführt, um nicht durch Hin- und Herschieben der Waage bei Nacht (Kriegsverdunklung) Meßfehler zu verursachen.

Den ersten Tau liefert mitunter die Pflanze selbst aus ihrem Innern, der Boden exhaliert lange noch weiter Wasserdampf, der sich zum Teil an den erkaltenden Gräsern kondensiert; schließlich, hauptsächlich gegen Morgen zu, beteiligt sich auch die Luftfeuchtigkeit etwas höherer Schichten in erfaßbarem Ausmaße an der Oberflächenkondensation. Der vegetationslose Boden wird zuletzt betaut. Besser noch beobachtet man diese Aufeinanderfolge beim Auftreten von Reif, der selten vor Mitternacht am Boden in Erscheinung tritt. Petrischalenversuche erhärten dies ebenfalls. Bemerkenswert dabei ist, daß die Verdunstung aus Bodenproben in Petriflachschen (243 cm² Oberfläche), die in den Mutterboden eingebettet werden, regelmäßig größer ist als aus solchen, die am Boden einfach aufgestellt sind, trotzdem bei diesen ein besserer Luftaustausch und schon geringere Luftfeuchte zu erwarten ist. Aber auch ins Gras gelegte Petriproben weisen mehr Verdunstung und weniger Tau auf als solche auf unbewachsenen Boden gestellte.

Nicht selten tritt der Fall ein, daß sich das an der ausstrahlenden Oberfläche bildende Kondensat infolge Auftretens einer Luftbewegung oder Aufhörens des Temperaturabfalles verflüchtigt und zwar teilweise bis gänzlich. Während Pflanzen, wie wir noch sehen werden, auch ganz winzige Taubeschläge zu imbibieren imstande sind, trifft dies beim Boden nur insofern zu, als er hygroskopisch noch nicht gesättigt ist und seine Adhäsionskraft der Verdunstung entgegenwirkt. Auch bei sonst trockenem Boden, dessen Verdunstung praktisch gleich Null ist, muß deshalb eine Wägung vor und nach den Nachtstunden nicht unbedingt

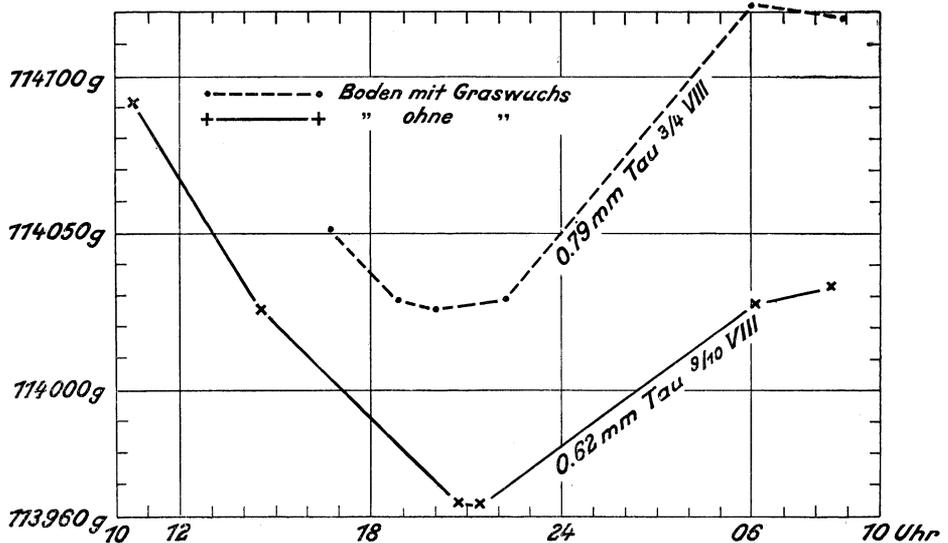


Abb. 4. Lysimeterwägungen in Taunächten mit bewachsenem und unbewachsenem Boden.

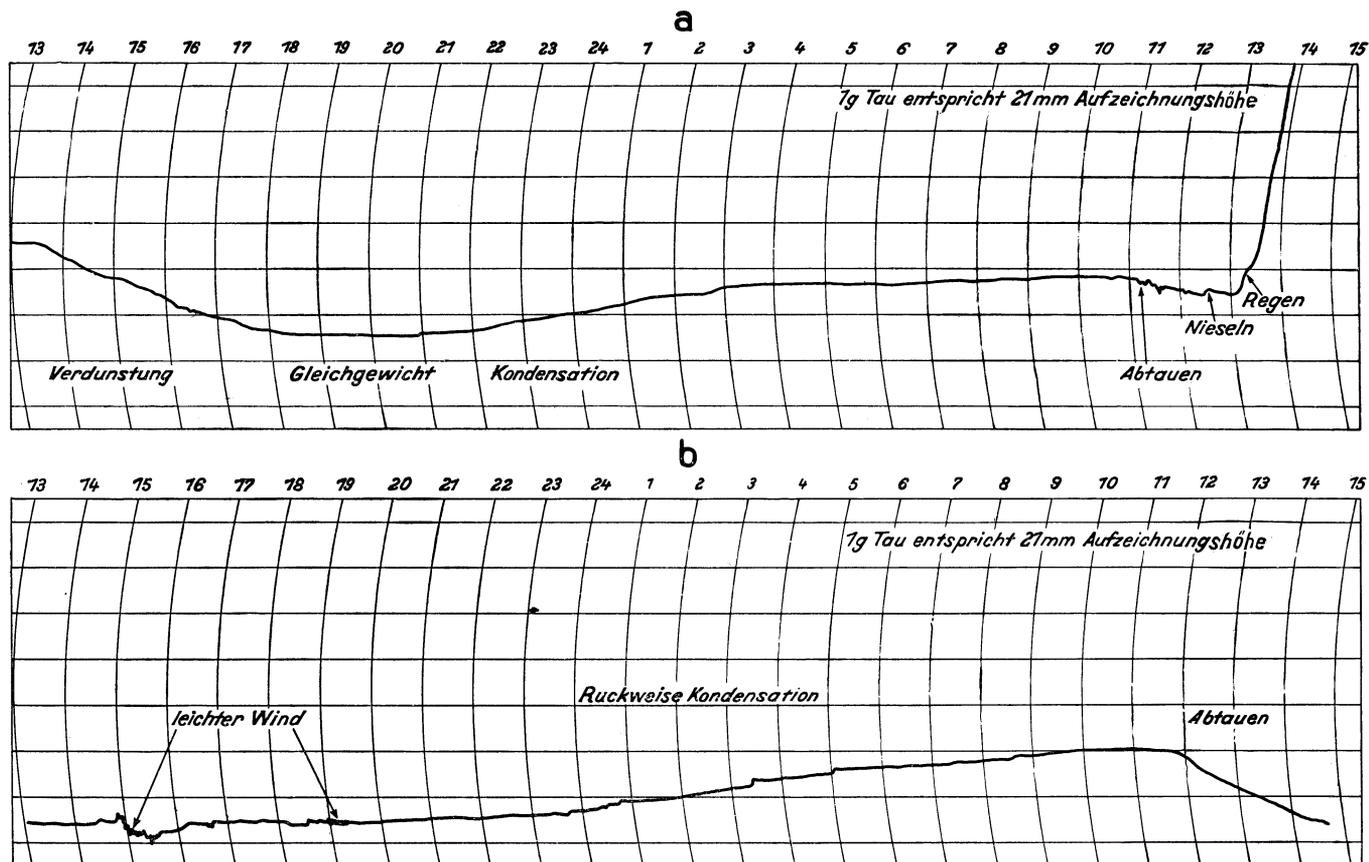


Abb. 5. Kopien der Tauschreiberstreifen. a) vom 8./9. 10. 1940; b) vom 14./15. 2. 1941.

Endgültiges darüber aussagen, ob und in welchem Maße Betauung stattgefunden hat. Bei Taumessern, die nur Summenwerte angeben, ist dies ganz besonders zu berücksichtigen, besonders wenn sie hygroskopisch sind, ganz abgesehen davon, daß Regen- oder Nieselwetter alle Angaben verwischen.

In diesem Zusammenhang sei auch gleich erwähnt, daß die Taubildung nicht immer so schön gleichmäßig ansteigend vor sich geht, wie es die meisten Tauschreiberregistrierungen zu beweisen scheinen (Abb. 5a). Wie Abb. 5b zeigt, tritt manchmal ganz sprunghaft Kondensation ein, um dann für eine Weile auszusetzen, bis wieder eine neue Welle kommt. Wir nehmen an, daß bei einer vielfach verfeinerten Registrierung (z. B. rascher Trommelumlauf) auch die scheinbar glatten Kurven ähnliche Schwankungen aufweisen würden, da sich Unregelmäßigkeiten der Ausstrahlung und Erkaltung, Verdunstungssteigerungen durch freiwerdende Wärmemengen und auftretende Austauschströmungen auch in der Taubildungskurve bemerkbar machen müßten. Mit unserer Vorrichtung (s. Abb. 3), die auf den Zeitpunkt des Überganges von dem Verdunstungs- zum Verdichtungsvorgang noch empfindlicher reagiert als der Tauschreiber, konnte diese intermittierende Taubildung auch dann beobachtet werden, wenn die Taukurve keine Besonderheiten aufwies.

Die Vermutung, daß die Taukurve mit der Ausstrahlungskurve weitgehende Parallelismen zeigt, konnte durch einige Tulipanmessungen wahrscheinlich gemacht werden. Die Lysimeterwägungen zeigen jedoch ein ganz anderes Bild. Danach wird die Kondensation erst prävalent, nachdem die Ausstrahlungssummenkurve sich bereits ihrem Höhepunkt genähert hat. Auch zeigen die starken Ausstrahlungsnächte im Frühjahr weniger Tau und Reif als nach ihren Minimumtemperaturen zu erwarten wäre. Es ist also leider nicht möglich, auf Grund von Strahlungsmessungen auf die Menge kondensierter Feuchtigkeit in der Natur zu schließen.

Vielfach besteht noch die Ansicht, daß die Kondensationen nicht nur an und in der Bodenoberfläche, sondern auch noch in tieferen Bodenschichten stattfinden. Der aus der Tiefe aufsteigende Wasserdampf kondensiert sich an den nach oben zu kühleren Bodenteilen und durchfeuchte sie mitunter so sehr, daß die Pflanzenwurzeln davon ausgiebigen Nutzen hätten. W. Schmidt u. P. Lehmann (5) haben seinerzeit gezeigt, daß eine solche Umlagerung von Wasser im Boden rein rechnerisch nur ganz unzureichende Mengen ergeben könnte, selbst unter den günstigsten Bedingungen. Ein solcher Umsatz müßte schon durch die dabei freiwerdenden Kalorien eine deutliche Erwärmung dieser Schichten verursachen, die tatsächlich auch in Taunächten nie beobachtet wurde. Man kann im Gegenteil immer wieder sehen, besonders bei Reif, wie sehr gerade die hervorstehendsten und kältesten Teile der Bodenoberfläche, also nicht einmal die ganze Oberfläche gleichmäßig, Ansatz und Fortbildungsmöglichkeiten für die Wasserdampfverdichtung bieten, während strahlungsgeschütztere und infolge besserer Wärmeleitung (dichtgefügtete Bodenteile) etwas höher temperierte Stellen unbenetzt bleiben.

Immerhin muß zugegeben werden, daß dort, wo der innige Zusammenhang der oberflächlichen Schichte mit dem Bodeninnern wesentlich gestört ist (aufliegende Steine, Bretter usw.), gerade an der Unterseite Kondensationen auftreten können und zwar in beträchtlichem Ausmaß. Tatsache ist, daß ein mit Schotter überdeckter, undurchlässiger Untergrund ein guter Wasserspeicher sein kann, der den einmal eingedrungenen Niederschlag nur sparsam verdunstend abgibt, bei Nacht aber auch aus der Atmosphäre Wasserdampf kondensiert (Phänomen der „Taubrunnen“).

Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß man bisweilen in flachen Mulden und Bodennischen oft mehr Tau oder Reif antrifft als an exponierten Oberflächen. An letzteren ist eben die Verdunstung größer und daher beginnt das Abtauen zuerst an den belüfteten, bzw. besonnten Stellen. In den Mulden aber, die an und für sich infolge Ausstrahlungsbeschränkung und Wärmeleitung aus dem Boden weniger leicht unter den Taupunkt abkühlen, sammelt sich gern schwere Kältestluft, die unter Umständen bis in die groben Höhlungen der Oberfläche vordringt und dann die Feuchtigkeit der aus dem Boden exhalieren Warmluft kondensiert. Aus all dem ersieht man, wie sehr es neben der Bodenstruktur auch auf die Form und Beschaffenheit der Bodenoberfläche ankommt.

Der Anteil des Bodens (und der Wasserflächen) an der Taubildung wurde bisher im allgemeinen unterschätzt. Im gewachsenen Naturboden muß, insbesondere bei höherem Grundwasserstand, die nächtliche Verdunstung aus dem Boden, zumal im Sommer, noch größere Werte erreichen als die angegebenen Lysimeterzahlen. Das heißt also, daß der Wasserdampfnachschub aus dem normalfeuchten Boden auch in kühlen Taunächten vollkommen ausreichen würde, um das gesamte für die Betauung von Boden und Pflanzen notwendige Kondenswasser zu liefern. Die schon erwähnte Gewichtsabnahme der Böden mit und ohne Pflanzenwuchs, die sich zwischen Abend und Morgenwägung zeigt, weist schon darauf hin.

Damit ist nun aber nicht gesagt, daß der Tau tatsächlich kondensierte Feuchtigkeit aus der Bodenluft darstellt und daß die atmosphärische Feuchtigkeit nicht in Betracht kommt. Aber die Wasserdampfzufuhr aus dem feuchten Boden ermöglicht oft erst die Taubildung und zwar um so mehr, je größer der Wärmeverrat im Boden ist. Daher haben wir im Frühjahr, wo der Boden noch zu kalt ist, trotz hoher Feuchtigkeit

und kühler Nachtluft weit weniger Tau als im Spätsommer oder Herbst, wo der Boden genügend Wärme gespeichert hat, um die Verdunstung auf großer Höhe zu halten. Diese ist aber auch abhängig vom Sättigungsdefizit der bodennahen Luftschicht. Bei sonst günstigen Bedingungen ist wenig oder kein Tau zu erwarten, wenn die Luft, wie in den Steppen, zu trocken ist und der dem Boden entbundene Wasserdampf nirgends ausreicht, um die Luft in der Umgebung der Pflanzen und Gegenstände zu sättigen.

Dies wäre nur möglich bei alleiniger Wirksamkeit der Diffusion, doch herrscht auch in den windstillsten Nächten immer noch so viel Luftunruhe durch Massenaustausch, daß es praktisch eher zu einer allmählichen Erhöhung der Feuchtigkeit in der bodennahen Luftschicht kommt als zur Kondensation der Bodenluftfeuchtigkeit bei relativ trockener Luft unmittelbar über der mehr oder weniger bewachsenen Oberfläche. Trotzdem kann, und zwar bei Eintritt völliger Luftruhe (selten) eine solche Oberflächenkondensation auch bei sehr trockener Außenluft erfolgen. Doch tritt dann bei geringster Luftunruhe rasch wieder Verdunstung ein.

Ein gewisses Maß von Luftfeuchtigkeit muß also jedenfalls schon vorhanden sein, um die Taubildung zu ermöglichen; die Bodenverdunstung kann diese nur verstärken und zwar in doppelter Hinsicht, vor allem durch zusätzliche Wasserdampfanreicherung der bodennahen Luftschicht und durch Oberflächenabkühlung infolge Verdunstungskälte. Dasselbe gilt *ceteris paribus* auch für die transpirierende Pflanze. Infolge der verwickelten Austauschverhältnisse kann man also nie apodiktisch behaupten, so und so groß ist der Anteil der Atmosphäre, so groß der aus der Bodenluft, der zur Taubildung verwendet wurde. Auch die Erfassung des Tauanteils der Ober- und Unterseite von Glasplatten, Gummitüchern usw. kann niemals die wahren Verhältnisse in der Natur darlegen, weil durch diese Vorrichtungen die natürlichen Bedingungen verändert werden.

Für praktische Zwecke genügt es auch zu wissen, daß die Bodenfeuchtigkeit, deren Regelung weitgehend in unserer Hand liegt, ein maßgebender Faktor der Taubildung ist, insbesondere, wenn die Luftfeuchtigkeit, wie so oft, dazu nicht ausreicht. Wir erhöhen also außer durch Windschutz durch richtige Bodenbearbeitung oder durch Bewässerung nicht nur die Boden- und Luftfeuchte der Vegetationsschicht, sondern wir fördern damit ebenso die in Trockenzeiten so lebenswichtige Taubildung an den Kulturpflanzen. Und umgekehrt können wir den Tau, etwa zur Schädlingsbekämpfung (*Peronospora*), weitgehend von den Pflanzen abhalten, wenn wir imstande sind, durch Bodenbedeckung größerer Flächen die Verdunstung zu hemmen!

4. Grenzschichtmeteorologie der Tau- und Reifbildung.

R. Geiger (6) zeigt schon auf, daß volle Sättigung der Luft zur Taubildung nicht nötig ist. Es kommt vielmehr auf die Erreichung bzw. Unterschreitung des Taupunktes unmittelbar an der Oberfläche an. Die Feuchtigkeit der bodennahen Luft beträgt oft nur 80 bis 90% und doch kommt es zur Kondensation an den Punkten der Oberfläche, die sich gegenüber der Lufttemperatur so weit abkühlen, daß dieselbe Luft in bezug auf die Oberflächentemperatur nunmehr übersättigt ist. Der hierbei entstehende Dampfdruckgradient von der grenzflächennächsten Luftschicht zur Außenluft verhindert eine gleichzeitige Nebelbildung. Daß es Pflanzen gibt, die in besonderem Maße geeignet sind, treibenden Nebel aufzufangen, sei hier nur erwähnt.

Tau entsteht oft schon lange vor Sonnenuntergang an feuchtschattigen, windgeschützten Stellen, sobald die Wärmeausstrahlung weit genug vorgeschritten ist, besonders an Pflanzen, Holz usw. während der nackte Boden äußerlich noch trocken bleibt, obwohl er nachweislich je Flächeneinheit stärker ausstrahlt als die vegetationsbedeckte Oberfläche. Sein Wärmegehalt und Wärmenachschub läßt eben die Oberflächentemperatur nicht so rasch absinken als die schlechter wärmeleitenden Pflanzenteile mit oft nur recht geringer Wärmefassungskraft. Da die Spannung gesättigten Wasserdampfes bei gleicher Temperatur über Wasser größer ist als über Eis, erfolgt die Reifbildung bei etwas höherer Temperatur als dem Taupunkt entspricht. J. Schubert (7) nennt sie den Reifpunkt und bestimmt diesen durch Multiplikation des Taupunktwertes mit dem Faktor 0,89. Auch ist die durch Kondensation bzw. Sublimation entbundene „Tau“- bzw. „Reifwärme“ etwas verschieden. Wo sich einmal Reif angesetzt hat, dort wird die weitere Reifbildung erleichtert, da nach A. Schmauß Reif hygroskopisch ist.

Der Beginn der Kondensation erfolgt also durchaus ungleichzeitig und ist recht schwierig zu verfolgen. Der noch lebhaft transpirierende Grashalm zeigt plötzlich an einer Stelle (wir sehen hier von der Erscheinung der Guttation ab, obwohl sie bisweilen beträchtliche Mengen „hydathodischen“ Tauess liefert) einen matten Glanz als die Umgebung, er fühlt sich dort auch feuchter an: Der erste Beschlag ist erfolgt. Darunter verstehen wir also den lokalentstehenden, nicht advektiven Tau. Er verschwindet oft wieder beim nächsten Luftzug, in der Regel aber vergrößert sich die beschlagene Oberfläche, an der sich, wie nur im Mikroskop bei künstlicher Betauung (s. Punkt 8) zu sehen ist, einzelne größere Tröpfchen auf Kosten der kleineren bilden. Bekanntlich ist ja die Dampfspannung über konvexen Oberflächen geringer als über mehr

ebenen, so daß diese eine größere Anziehungskraft auf die Wasserdampfmoleküle ausüben als jene. Es ist, als ob kleine Tröpfchen explodierten und sich im nächsten Moment an die größeren anschlossen, die nun wie Seifenblasen anwachsen. Es sind komplizierte Vorgänge, die sich da abspielen, denn außer Oberflächenspannung, Dampfdruck, Kondensation und Verdunstung sind hier der Wärmeaustausch innerhalb der Grenzschicht und die Luftdruckschwankungen noch wenig bekannte Faktoren.

Die freiwerdenden Wärmemengen bei der Taubildung sind ganz bedeutende, denn für je 1 g Wasser wandern fast 600 cal teils in die Luft, teils in das Innere des betauten Gegenstandes ab. Das Verhältnis der in die Luft und in das Medium übergehenden Energien ist bei Kulturboden etwa 3 : 2, Gestein 4 : 1, Schnee 1 : 4 der auftretenden Wärmemengen. Ein fernelektrisch registrierendes Blatthermometer aus grünbestrichenem Pertinax in Blattgröße (8) zeigte stets bei Beginn stärkerer Betauung diesen Anteil der Erwärmung an. Der Temperatursprung von einigen Zehntel Graden, der sich im Laufe einer Taunacht öfter zu wiederholen pflegte, ließ uns frühmorgens, noch bevor wir draußen Nachschau gehalten hatten, erkennen, ob und wann solche Wellen verstärkter Kondensation eingetreten sind.

Nicht unerwähnt bleibe der wenig beachtete verwitterungsfördernde Effekt besonders des vereisenden Taus und des Reifes. (Die Aufschließung und Unschädlichmachung von Kopfdüngergaben wird durch Taufall ebenfalls beschleunigt.) Doch der Hauptvorteil der freiwerdenden Kondensationswärme liegt im Frostschutz der Kulturen, die, sobald Tau eingetreten ist, sich eine Zeitlang nicht weiter abkühlen. Unausgesetzt bis zum Morgen anhaltender Taufall verhütet ein gefährliches Absinken der Temperatur. Doch reicht gerade in strengeren Frostnächten dieser Schutz nicht mehr aus, auch wenn der Tau gefriert und hierdurch abermals Wärme frei wird (Erstarrungswärme, etwa 80 cal pro g). Es müßte denn für stets neu erfolgende Betauung gesorgt werden, wie es bei der künstlichen Beregnung zwecks Frostbekämpfung tatsächlich schon mit Erfolg versucht wurde (Keßler u. Kaempfert (8)). Eine rentable Zufuhr von Dampf in geeigneter Form zwecks künstlicher Betauung gibt es derzeit noch nicht, wurde aber bereits des öfteren geplant und versucht. Betauung oder besser gesagt Besprühung in fein verteilter Form erscheint nach wie vor am aussichtsreichsten, jedoch unter der Bedingung, daß sie bis zum Ende der Frostgefahr fortgesetzt wird, so daß sich immer neu freiwerdende Erstarrungswärme bilden kann. Hierbei ist allerdings noch darauf zu achten, daß die Sublimation nicht schon in der Luft erfolgt, was bei feiner Zerstäubung in Frostnächten leicht möglich ist.

Um den Einfluß der Luftdruckschwankungen bei der Taubildung hat sich offenbar noch niemand gekümmert. Die Tatsache, daß Kondensation bei höherem Luftdruck leichter erfolgt, bei tieferem wieder die Verdampfungsmöglichkeit besser ist, schien auch höchstens für die Tauprognose, sofern eine solche überhaupt schon angewendet wurde, einigen Wert zu haben. Für die Erklärung der oft sprunghaft einsetzenden Taubildung dürfte dies aber ebenfalls herangezogen werden können und zwar vor allem dann, wenn keine Strahlungs- oder Temperaturänderungen usw. nachweisbar sind. Dabei denken wir mehr an die kurzfristigen, am Barographen meist kaum nachweisbaren Schwankungen, die auch in sonst ruhigen Taunächten in fast regelmäßigen Abständen immer wieder vorkommen. Da die Größenordnung dieser Mikroschwankungen nur Bruchteile eines mm Hg innerhalb einiger Sekunden bis Minuten ausmacht, rechnen wir weniger mit einer Wirkung der absoluten Luftdruckhöhe als mit der Austauschströmung, die damit verknüpft sein muß.

Für die mit der Atmosphäre in Verbindung stehende bewegliche Bodenluft ist es bereits als erwiesen zu betrachten, daß die erwähnten kleinen Luftdruckschwankungen neben den Temperaturänderungen den Motor der Bodenatmung darstellen und im Laufe weniger Stunden verhältnismäßig große Mengen von Luft mitsamt ihrem Gehalt an Wasserdampf, Kohlensäure, Sauerstoff usw. hin und hertransportieren. Der Gasaustausch zwischen Bodenluft und Atmosphäre, den man sich früher nur auf dem Wege der Diffusion vor sich gehend vorstellte, erhält damit tatsächlich das Gepräge einer Atmung, die in gut bearbeiteten Böden eine ausreichende Durchlüftung automatisch bewirkt. Sollte nicht auch bei der Pflanze derselbe Vorgang wirksam sein? Wir haben dafür noch keine beweiskräftigen Versuche anstellen können und sprechen daher vorerst nur die Vermutung aus, daß auch beim Gasaustausch Pflanzeninneres—Atmosphäre, also bei der Atmung, Assimilation, Transpiration und Taubildung die kleinen Luftdruckschwankungen mit beteiligt sind. Wir stellen uns vor, daß beim Anstieg des Luftdruckes die in Verbindung mit dem luftgefüllten Innern z. B. eines Interzellularraumes befindliche Außenluft nach innen strebt, bis Druckgleichheit außen und innen herrscht, bei Druckabfall umgekehrt. Bei den Bodenhohlräumen dauert diese Angleichung immerhin oft eine Reihe von Sekunden, bei den kurzen (aber meist doch engeren) Verbindungskanälen der Pflanze wird dies wohl viel rascher erfolgen. Mag auch rechnerisch nachzuweisen sein, daß die Diffusion allein imstande ist, den pflanzlichen Gasaustausch zu bewältigen, so ist dies noch kein ausreichender Beweis dafür, daß sie auch allein wirksam ist.

Es eröffnet sich hier ein Gebiet der Mikrometeorologie, das immer dringender nach Methoden ruft, um da vorwärtszukommen, das Neuland der Grenzflächenmeteorologie. Unter Grenzfläche ist sowohl die

äußere als auch die innere, unsichtbare Oberfläche verstanden, soweit sie irgendwie mit der Atmosphäre in Berührung steht. Die Oberflächen der Hohlräume in Boden, Pflanzen und Gegenständen, die mit der Außenluft durch Spalten, Poren und Kanäle in Verbindung sind, zählen also dazu. Denn die Atmosphärologie (alter, aber richtiger Ausdruck für Meteorologie) umfaßt nicht nur die Physik des Luftraumes „über den Bergen“ (*τὰ μετέωρα*) sondern dringt forschend überall soweit in das Gefüge der festen Materie, als dort noch Luft anzutreffen ist.

Hier interessiert uns aber nur das Verhalten des Wasserdampfes an diesen Grenzflächen. Nach G. Hager (9) zählen zu den auffälligsten Erscheinungen an den Grenzflächen Konzentrationsänderungen der ihnen angrenzenden Gase. Leichter noch als Luft ist Wasserdampf absorbierbar, er wird infolge der Anziehungskräfte (Oberflächenspannung) verdichtet, es bildet sich unter Wärmeentwicklung (Benetzungswärme) eine feine Wasserhaut aus, die nur sehr schwer wieder zu entfernen ist. Chemische Eigenschaften, elektrische Kräfte (Aufladungen, Spitzenwirkung) und Temperaturschwankungen sind geeignet, die Stärke der Bindung dieses Wassers (das praktisch nie gefriert) zu variieren. Vor allem aber tritt die Hygroskopizität um so mehr auf, je feuchter die Außenluft und je poröser (grenzflächenreicher) das Material ist. Sobald die Grenzfläche hygroskopisch gesättigt ist, die Anziehungskräfte also im Gleichgewicht sind mit der Evaporationskraft, beginnt das Wechselspiel zwischen Kondensation und Verdunstung. In unmittelbarer Grenzflächen-nähe herrscht also normalerweise stets 100% Feuchtigkeit, sobald hygroskopische Sättigung vorliegt, auch wenn die Außenluft keine 80% aufweist. Da nun infolge des Wasserdampfstromes (bzw. Transpiration) aus tieferen Schichten des Bodens (bzw. des Pflanzeninneren) die Grenzflächen von gesättigt feuchter Luft umspült werden, kommt es bei geringster Abkühlung zur Mikrotaubildung und weiterem Ansatz von Wassermolekülen um die Adsorptionshaut. Erwärmung oder trockenere Außenluft läßt diesen zusätzlichen Ansatz jedoch wieder verflüchtigen.

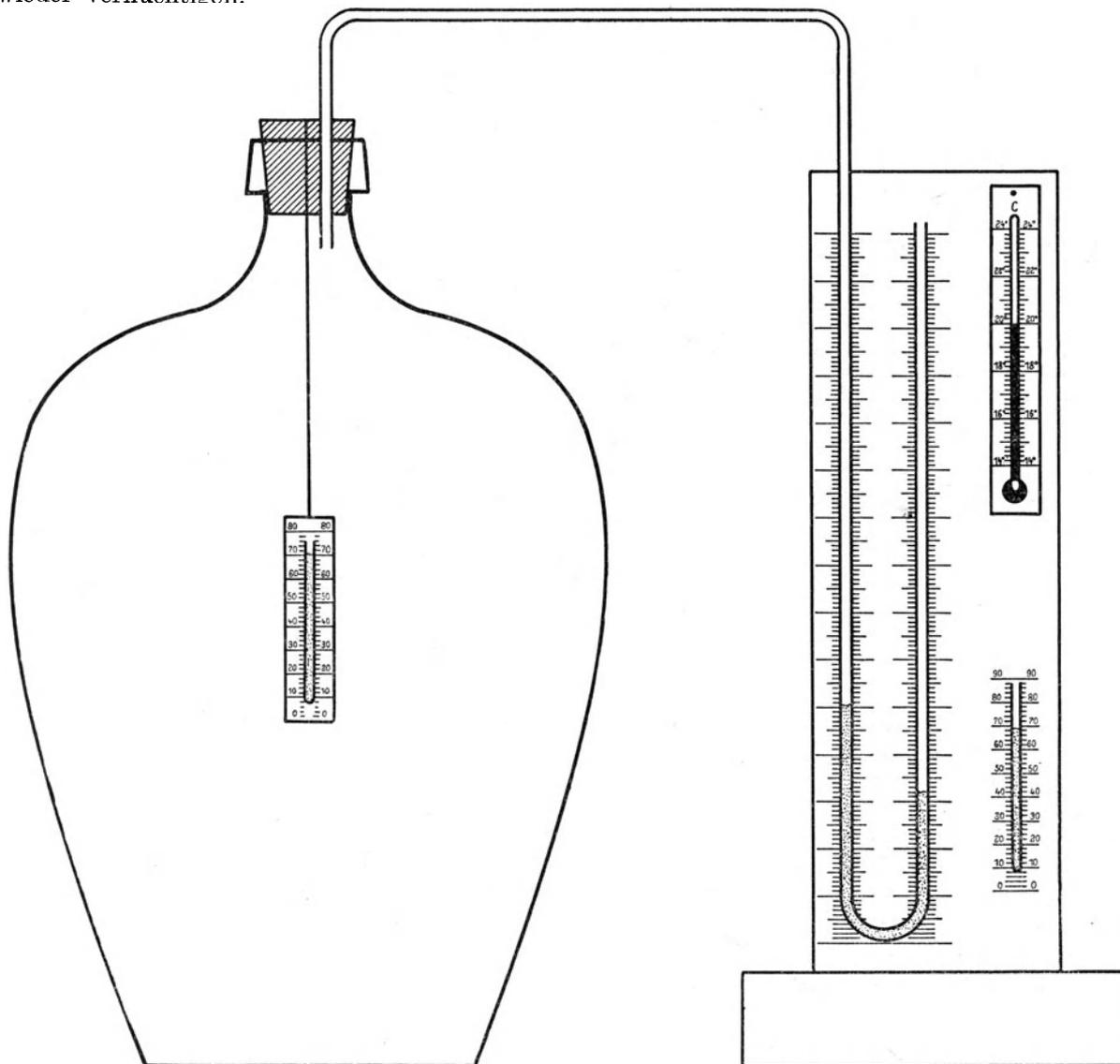


Abb. 6. Vorrichtung zur Sichtbarmachung von Luftdruckschwankungen und zur Messung ihres Einflusses auf die Verdunstung.

Sieht man von Temperatur- und Feuchteschwankungen ab, so müssen auch Luftdruckschwankungen für sich allein einen Einfluß auf das Wechselspiel Verdunstung—Verdichtung ausüben. In einer ungesättigten Atmosphäre muß dann dadurch die Verdunstung, in einer gesättigten die Kondensation gefördert werden. Wir ließen einige mm³ Wasser in einer großen Glasflasche unter völligem Luftabschluß allmählich verdunsten (Abb. 6). In einer gleich großen Flasche (Aufstellung beider unter möglichster Temperaturkonstanz) verdunstete dieselbe Wassermenge etwas rascher, trotzdem sie mit der Außenluft nicht in Verbindung stand, sondern nur die äußeren Druckschwankungen durch ein nach außen führendes Manometer abgeschwächt mitmachte.

In der Tabelle seien die Aufzeichnungen des zweimal wiederholten Versuches gegeben.

Datum der Ablesung	1. ÷ 7. 10.
Normalverdunstung in mm ³	80,76
Verdunstung bei Druckschwankungen	57,15
Verdunstung ohne Druckschwankungen	49,27
Differenz in %	13,8

Die mit Manometer versehene Ballonflasche stellt eine Art Variometer dar; durch das Auf- und Abwandern der Anzeigeflüssigkeit (Petroleum) wird der Gefäßinnendruck dem Außenluftdruck angeglichen. Auch bei scheinbar gleichbleibendem Barometerstand bewegten sich die Verdunstungsgeschwindigkeiten in demselben Verhältnis weiter.

Die raschen Luftdruckschwankungen, durch Windbewegung und Luftmassenverlagerungen in höheren Atmosphärenschichten hervorgerufen, dürften also auch bei der Taubildung mitwirken, natürlich in weit geringerem Ausmaß als die bisher bekannten Faktoren. Daß daneben die Diffusion voll zur Wirkung kommt, bedarf nur noch des einen Hinweises, daß sie um so ausschließlicher den Gastransport regelt, je enger die Kapillaren und je weiter entfernt die in Frage kommenden inneren Grenzflächen von der äußeren Oberfläche abliegen. An dieser selbst aber tritt sie in ihrer Leistungsfähigkeit völlig zurück gegenüber dem Massentransport durch Schwankungen der Temperatur, des Luftdruckes oder gar des Windes.

Was nun, im Groben nachgewiesen, in feineren Ausmaßen noch zu wenig erforscht ist, nämlich die häufig auftretende Unregelmäßigkeit bei der Taubildung (beim Reif auch in seiner Struktur erkenntlich), ist praktisch deshalb bedeutungsvoll, weil dadurch der Taugenuß der Pflanze in einem neuen Lichte erscheint. Anwelkende Blätter, die auch die geringsten Kondensationen aufnehmen, haben also Gelegenheit, ihre Turgeszenz wieder herbeizuführen, noch bevor eine Verdampfungswelle den kostbaren Beschlag entführt. Ihr Taugenuß ist dann größer als die auf definierter Oberfläche ermittelte Taubilanz.

5. Einflüsse beim Abtauen.

Unter An- bzw. Abtauen verstehen wir nicht einfach die Verdichtung zu Tau bzw. seine Verflüchtigung, sondern das Überwiegen des einen oder anderen. Das Abtauen erfolgt vor Sonnenaufgang meist nur bei Einsetzen des Windes, sonst erst bei, im Winter oft lange nach Sonnenaufgang und auch dann bisweilen so unvollständig, daß das Kondensat (Reif) tagelang sichtbar bleibt. Im allgemeinen geht aber das Abtauen innerhalb weit kürzerer Zeit vor sich als die Betauung (daher Bestäubung des Hederichs nur in den frühen Morgenstunden).

Windschutz ist das beste Mittel, das Abtauen möglichst lange hinauszuzögern. Doch auch bei völliger Windruhe trocknet der Tau ab, sobald die Oberflächentemperatur entsprechend steigt oder die oberflächen-nahe Luftfeuchte relativ geringer ist. Auch wenn wir nun von dem ausführlich besprochenen dynamischen Austausch durch Luftdruckschwankungen absehen, der natürlich auch beim Abtauen voll zur Wirkung kommt, bleiben noch die thermisch bedingten Austauschströme zu betrachten, die ebenfalls hier wirksam sind. Sowie jede Kondensation im Momente ihres Auftretens Temperaturerhöhungen der Umgebung erzeugt, ruft die Verdampfung Abkühlung und damit kleine Luftmassenverschiebungen hervor, besonders bei geneigter Fläche. Warmluft strömt aus der Umgebung nach und läßt die Verdunstung weiterschreiten, da sie meist nicht gesättigt ist. Käme die Diffusion allein in Betracht, so würde bald eine Verdunstungshemmung eintreten, weil die Oberfläche stets weithin von gesättigt feuchter Luft umgeben wäre (vgl. unendlich langsame Verdunstung aus Kapillaren). Wir wollen damit auf die Tatsache hinweisen, daß auch bei völliger Windruhe, bei der die Massenaustauschgröße in Bodennähe für unmaßgeblich klein angenommen wird, noch immer kleine Massenverschiebungen vor sich gehen können, die bei der Betrachtung der Grenzflächenvorgänge nicht übersehen werden dürfen.

Je rauer die Oberfläche, um so später greift der große Massenaustausch endgültig tauverzehrend ein. Zur Herabsetzung der Bodenverdunstung wendet der Landwirt schon längst die immer wiederholte Auflockerung der Krume durch Schälern, Eggen und Behacken an. Neben der Vernichtung wasserzehrender Unkräuter zerstört er dadurch nicht nur die kapillare Wasserleitungsverbindung mit dem Untergrund, er ruft auch, meist unbewußt, stärkere Taubildung hervor und verlängert die Abtauzeit wesentlich, alles Momente, die der Erhaltung der hochwichtigen Bodengare in Trockenzeiten förderlich sind. So erklärt es sich, daß Gartenbeete, die immer wieder oberflächlich behackt werden, feuchter bleiben als nicht behackte trotz öfteren Gießens, deren Oberfläche mehr und mehr verkrustet. Auch durch Bodenbedeckung mit Laub oder Stroh wird neben der Herabsetzung der Bodenverkrustung durch die stärkere Betauung die Vegetationsluft länger feucht erhalten.

Im Pflanzenbau wird die Abtauzeit dazu benützt, durch Bestreuen mit verschiedenen Staubmitteln Gifte (Kainit) zur Unkrautbekämpfung, Arsenstaub gegen Forstschädlinge oder Spurenelemente wie Bor und andere Salze gegen Mangelkrankheiten, mittels des Tauwassers der Pflanze einzuverleiben. Man spart dadurch ein Vielfaches an Stoff, den man oft auch deshalb nicht durch Düngung der Wurzel zuführen kann, weil er im Boden absorbiert und chemisch verändert wird.

Solche Staubteilchen sind übrigens sehr hygroskopisch und nehmen schon am Wege durch die Luft zur Pflanze Luftfeuchtigkeit auf. Laut brieflicher Mitteilung von Prof. Schimitschek, Wien, fiel gelegentlich einer vom Flugzeug aus über großen Wäldern der Slowakei betriebenen Giftbestäubung an einem Tau-morgen nicht die gewohnte Streuwolke, sondern ein förmlicher Giftregen, so daß der Streuflug eingestellt werden mußte. Ansonsten aber ist eine gewisse hygroskopische Sättigung des Staubes vor Pflanzenberührung erwünscht, weil so die Haftfähigkeit an bereits abgetauten Oberflächen besser gewährleistet ist. Der heute technisch schon durchführbare Versuch, indifferente, insektizide oder düngende Kondensationskerne (benetzbare Staubteilchen) aus feuchteren Luftschichten einer zu trockenen Vegetation nutzbar zu machen, ist jedenfalls wert, weiter ausgebaut zu werden.

Die Bereicherung der Vegetationsluft durch den verdunsteten Tau erfolgt nicht immer direkt von seiner Entstehungsstätte; wenn der Tau etwas reichlicher auftritt, so tropft er auf weiter unten gelegene Pflanzenteile oder auf den Boden hinab, von wo aus die Verdampfung noch später stattfindet. Den Wurzeln dürfte das Tauwasser, auch wenn sie sehr oberflächlich liegen, nur bei stärkster Taubildung zugute kommen, z. B. in den Tropen, in denen ein richtiger Tauregen durchaus keine Seltenheit ist. Der Name „Tauwurzeln“ bei unseren Reben ist aber sicher eine Übertreibung.

So begünstigt der Tau bei trockener Witterung noch in der Verflüchtigung das Vegetationsklima, aber auch die Entwicklung von Parasiten und Schädlingen, die bei längeren Trockenperioden ohne Tau nicht auftreten würden. Hier sei auch noch angedeutet, daß sich die Assimilationsleistung bei in der Sonne glitzernenden und Licht nach allen Seiten reflektierenden, aber auch Kohlensäure absorbierenden Tautropfen gegen unbetaut ändern muß, ferner nimmt die Erwärmung der betauten Pflanzenteile und des Bodens einen weit langsameren Verlauf.

6. Vergleiche zwischen Tauschreiberwerten und tatsächlichem Taugenuß einzelner Blattoberflächen.

Intakte Blätter wurden am Morgen des 8. Oktober 1940 erschütterungsfrei von den Pflanzen getrennt und mittels einer Spezialaufhängevorrichtung an einer Torsionswaage (Hartmann und Braun) gewogen. Nach der ersten Wägung wurde der Taubeschlag mit Filtrierpapier und Watte abgetrocknet und das Blatt erneut gewogen. Der Keßler-Fueßsche Tauschreiber zeigte 0,018 mm Niederschlag. Der Taubeschlag auf Blättern wog je dm² einfache Blattfläche bei

Haselnuß	(1 m über Boden)	= 310 mg = 0,031 mm Niederschlag
Süßkirsche	(15 m „ „)	= 110 mg = 0,011 mm „
Kohldistel (Sonchus oleraceus)	(10 cm „ „)	= 800 mg = 0,080 mm „
Gurke	(10 cm „ „)	= 960 mg = 0,096 mm „
Löwenzahn	(1 cm „ „)	= 1300 mg = 0,130 mm „
Rapunzel	(1 cm „ „)	= 1460 mg = 0,146 mm „
Rapunzel (untere Blätter auf Boden aufliegend)		= 1860 mg = 0,186 mm „
Sauerkirsche (totes Blatt am Boden liegend)		= 666 mg = 0,066 mm „

Die Werte dieses ersten Versuches zeigen, daß die Blätter, welche sich ungefähr in derselben Höhe wie das Taufanggefäß des Keßler-Fueßschen Tauschreibers befanden, das 5 bis 7fache an Taumenge aufwiesen

als der Tauschreiber. Das kommt daher, daß die aktive Oberfläche der Blätter durch Borsten, Haare, Wachs-körnchen, Papillen usw. größer ist als die des Tauschreibers und sich auf ihnen in der bodennahen Zone auf beiden Seiten (oben und unten) Taubeschlag bildet. Noch krasser wird der Unterschied zwischen Pflanzen- und Tauschreiberwerten, wenn man die Tauspendung nicht auf dm^2 Blattoberfläche, sondern dm^2 Pflanzenbestand (d. h. mit Pflanzen bestandene Bodenoberfläche) berechnet.

1 dm^2 eines mit normaler Dichte mit Rapunzel bepflanzten Beetes hatte in Wirklichkeit (bestimmt durch Zählen, Wiegen und Ausplanimetrieren) $329,8 \text{ cm}^2$. 1 dm^2 Rapunzelbeet hatte in der Nacht vom 7./8. 10., als der Tauschreiber 0,018 mm Niederschlag registrierte, in Wirklichkeit 0,547 mm Niederschlag, d. i. rund das Dreißigfache der Tauschreiberregistrierung, erhalten.

Weitere Beobachtungen ergaben im Prinzip immer wieder dasselbe Bild wie der erste Versuch. Z. B. Taunacht vom 8./9. 10. 1940: Der Tauschreiber Keßler-Fueß registrierte in der gleichen Zeit 0,014 mm. Zum Vergleich seien nur Blätter herangezogen, welche in ungefähr gleicher Höhe wie die Fangschale (12 bis 13 cm über Boden) exponiert waren.

Fliederblatt	918 $\text{mg}/\text{dm}^2 = 0,091 \text{ mm}$ Niederschlag
Rettichblatt	300 $\text{mg}/\text{dm}^2 = 0,030 \text{ mm}$ „
Potentilla reptans	600 $\text{mg}/\text{dm}^2 = 0,060 \text{ mm}$ „

Taunacht vom 18./19. 10. 1940: Keßler-Fueß = 0,0105 mm Niederschlag, auf den Blättern (15 cm über Erdboden):

Gurke	0,119 mm Niederschlag
Totenblume	0,160 mm „
Flieder	0,155 mm „
Chrysantheme	0,140 mm „
Gartenmohn	0,098 mm „

Taunacht vom 19./20. 10. 1940: Keßler-Fueß = 0,015 mm Niederschlag auf Blättern in 5 cm über Erdboden:

Flieder	0,136 mm Niederschlag
Rapunzel	0,105 mm „
Totenblume	0,120 mm „
Löwenzahn	0,086 mm „
Chrysantheme	0,087 mm „
Rettich	0,060 mm „
Himbeere	0,079 mm „
Veilchen	0,073 mm „
Gurke	0,060 mm „

Nacht vom 20./21. 10. 1940: Zuerst Tau, dann nässender Nebel, dann feines Nieseln.

Gewöhnlicher Regenschirm	0,0 mm Niederschlag
Taumesser Keßler-Fueß	0,03 mm „
Tabak	0,236 mm „
Eiskraut	0,145 mm „
Tomate	0,145 mm „
Verbena (Mittel)	0,110 mm „
Boretsch	0,100 mm „
Vogelmiere	0,085 mm „
Alpenveilchen	0,038 mm „
Gänsefuß	0,030 mm „

Zu den letzten Versuchen ist zu bemerken, daß hier die mitgeteilten Tauwerte den Gesamttau (d. h. imbibierter + nicht imbibierter Tau) darstellen. Es besteht, wie später noch genauer gezeigt wird, auch in der Hinsicht ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Taufänger des Tauschreibers und dem Laubblatt, indem letztere unter Umständen erhebliche Taumengen schon während der Nacht in sich einsaugen.

Es ist unmöglich, etwa einen Korrektionsfaktor für den Tauschreiber zu ermitteln, mit dem evtl. der tatsächliche Tauniederschlag auf Pflanzenorganen errechnet werden könnte; denn letzterer ist von

Pflanze zu Pflanze, von Standort zu Standort verschieden. In den fünf mitgeteilten Versuchsreihen war der „Pflanzentau“ rund 4–13mal höher als die Tauschreiberregistrierung. Im Mittel der 5 Versuchsreihen war der „Pflanzentau“ rund sechsmal so hoch.

Es bestätigt sich also immer wieder, daß die wirkliche, den Pflanzen nutzbare Tauspendung wesentlich höher zu veranschlagen ist als die Tauschreiberregistrierungen angeben. Bezogen auf eine mit niedrigen Pflanzen bestandene Erdoberfläche ist, wie das Beispiel Rapunzelbeet lehrt, die wirkliche Tauspendung nochmals größer als die auf die einfache Blattoberfläche bezogene zu veranschlagen.

7. Blattmodellversuche hinsichtlich Form und Stellung im Raum.

Daß der Abstand eines Objektes vom Erdboden für die Größe des Taubefalles von ausschlaggebender Bedeutung ist, wurde schon wiederholt von anderen Autoren festgestellt und trat auch in unseren Versuchen mit lebenden Blättern und Filtrierpapiermodellen immer ganz eklatant in Erscheinung. Zahlenbelege ersparen sich aus eben genanntem Grunde, weil sie nur Bekanntes bestätigen.

Aus unseren Versuchen geht aber auch hervor, daß die Orientierung im Raum für die Größe des Taubeschlages eines Blattes ebenfalls eine große Rolle spielt. Blattmodelle sowohl wie lebende Blätter wiesen in vertikaler Aufstellung nur $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ so starken Taubeschlag auf wie in horizontaler Aufstellung. Schon eine Neigung um 45° bedeutet eine Beschlagsverminderung um 40–50%. Das weist darauf hin, daß zur Versuchszeit die Ausstrahlung eine stärkere Rolle bei der Taubildung gespielt hat als die Luftfeuchtigkeit. Bei geringerer Ausstrahlung und höherer Luftfeuchte dürfte der Unterschied weit geringer sein, ja es könnte unter Umständen — bei leichter Luftmassenverschiebung in horizontaler Richtung — das Vertikalmodell einen größeren Beschlag aufweisen (G. Fritsche (10)). Auch die Form des Papierausschnittes bei gleichbleibendem Flächeninhalt hatte in den Modellversuchen Unterschiede des Taubeschlages ergeben. Erwartungsgemäß nahm der Taubeschlag mit der Vergrößerung des Umfanges gegenüber dem Flächeninhalt zu (Randfeldwirkung).

Außerdem ist nicht gleichgültig, ob das Blattmodell in fester oder baumelnder Stellung dem Tau exponiert wird. Es würde zu weit führen, das entsprechende Zahlenmaterial vorzubringen, zumal die Befunde den physikalischen Erwartungen voll entsprechen.

8. Taubeschlagsstudien im Auflichtmikroskop.

Weil wir im Schrifttum keine befriedigende Antwort darauf fanden, wie die Taubeschlagsbildung auf den Blättern vor sich geht, suchten wir dies selbst experimentell zu klären. Mit Hilfe eines Zeißschen Auflichtmikroskopes wurde an kleinen Blättern von *Mesembrianthemum cristallinum*, *Alyssum montanum*, *Verbena hybrida* und *Teucrium chamaedrys* (Abb. 7a, b, c, d) die ganze Entstehung des Taubeschlages laufend verfolgt. Unter den verschieden erprobten Methoden zur Erzielung eines künstlichen Taubeschlages bewährte sich folgende für unsere Zwecke am besten: ein 1– $1\frac{1}{2}$ cm dicker, kleiner Eisblock wurde zwecks Aufsaugung des Schmelzwassers auf eine Schicht dicker Filtrierpapierblätter gegeben. Auf seine Oberseite wurde das Versuchsblatt so gelegt, daß die Blattunterseite möglichst viel Kontakt mit dem Eis hatte, und das Ganze unter das Auflichtmikroskop geschoben. An das Versuchsblatt wurde ganz nahe eine ausgezogene Kapillare gebracht, durch die ein wasserdampfreicher Luftstrom langsam (während der mikroskopischen Beobachtung) über die zu beobachtende Blattoberfläche geblasen wurde. Die Einrichtung wurde so getroffen, daß der Mikroskopierende mit seinem Mund die Zuführung wasserdampfreicher Luft aus einer mit Leitungswasser beschickten Gaswaschflasche betätigen konnte und seine Hände zur Bedienung des Kreuztisches und der Optik frei hatte.

Auf diese Art und Weise konnte man Entstehen und Vergehen eines Taubeschlages in beliebigem Tempo bewirken und beobachten.

Bei stärkerer Vergrößerung konnte man sehen, daß sich zunächst an Rauheiten der Blatt- oder Haaroberfläche aller kleinste Wassertröpfchen bilden, die bei weiterer Zuführung wasserdampfreicher Luft in verschieden schnellem Tempo an Größe zunehmen. Makroskopisch ist von einem Taubeschlag in diesem Stadium noch nichts zu sehen (Abb. 8). Bei makroskopischem Sichtbarwerden des Taues besteht der Niederschlag schon aus sehr beträchtlichen und in ihrer Größe sehr unterschiedlichen Tropfen. Es herrscht in diesem Beschlag direkt „Leben“, das sich in scheinbarem „Springen und Hüpfen“ der Wassertropfen kundtut. Dies kommt dadurch zustande, daß große Tropfen kleinere ansaugen, sich vergrößern, wieder von noch größeren aufgesogen werden usw. Wahrscheinlich spielen hierbei häufig in Lösung gehende Stoffe der Zell-

membranen, welche die Oberflächenspannung der Tröpfchen vergrößern, auch eine Rolle. Gehen dagegen oberflächenaktive Stoffe in Lösung, fließen die Tröpfchen rascher ineinander und es kommt mehr zur Ausbildung zusammenhängender, dünner, hautartiger Wasserflecken. Letzteres beobachteten wir z. B. an Blättern von *Chrysanthemum*.

Es wäre jedenfalls falsch, wenn man annehmen würde, es würde sich an Haaren und Papillen nur an den äußersten Spitzen derselben Wasser kondensieren. Vielmehr beschlägt sich die ganze Oberfläche eines derartigen Gebildes. In einer reinen Strahlungsnacht wird natürlich dieser Kondensationsvorgang von den kühleren Spitzen ausgehen und von da fortschreitend sich über das ganze Organ erstrecken.

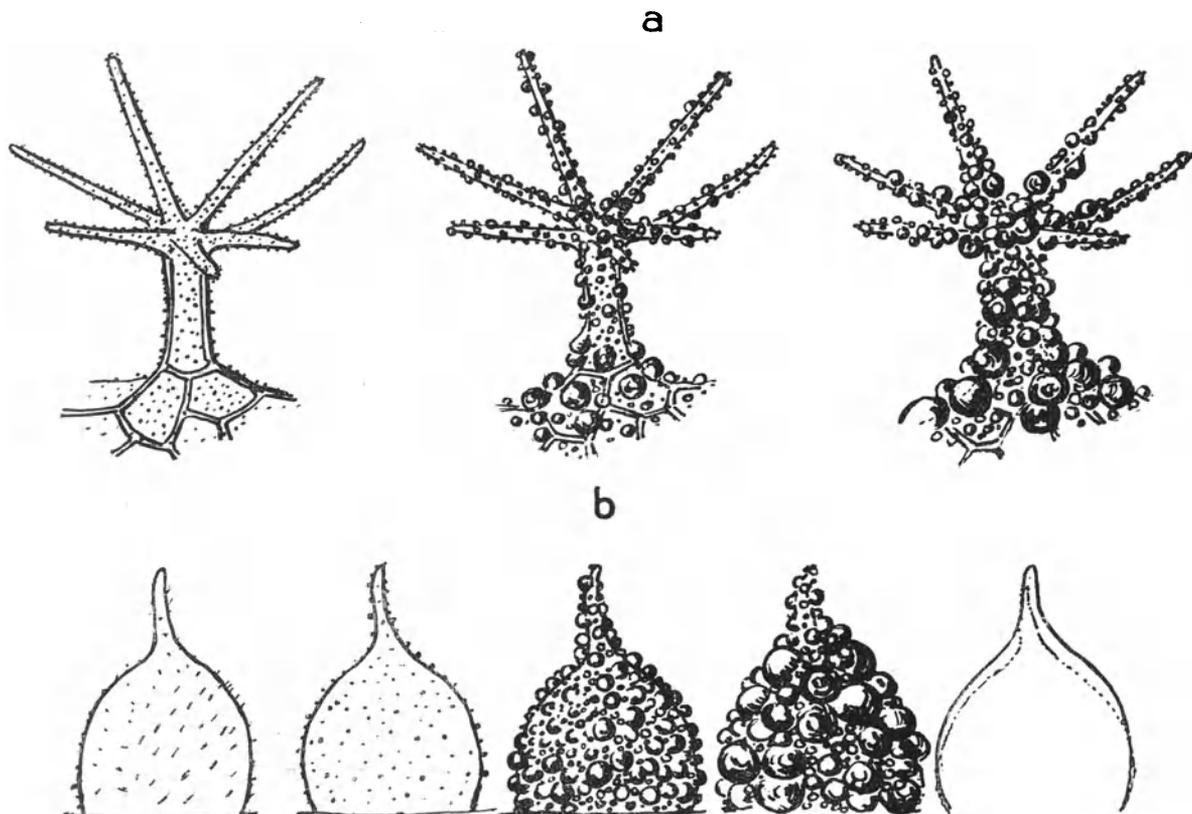


Abb. 8. Taubildungsvorgang nach mikroskopischen Beobachtungen. a) *Alyssum montanum*, b) *Mesembrianthemum cristallinum*.

Bei schief oder senkrecht stehenden Blatthaaren konnten wir beobachten, wie große Wassertröpfchen infolge der Einwirkung der Schwerkraft sackartig nach abwärts hingen und schließlich sogar an den Fuß des Haares herabglitten.

Wenn man nun sieht, wie bei manchen Blatthaaren die Fußzelle mit lebendem Plasma erfüllt ist, das Saugkräfte ausüben kann, so möchte man derartige Haargebilde als ideale „Taufänger“ ansprechen. Solche Haargebilde wurden früher lediglich mit Transpirationsschutz in Zusammenhang gebracht. Wenn sie aber so dünn und vereinzelt stehen, wie in Abb. 7, Tafel (b, c, d), so können sie keinen Transpirationsschutz darstellen, sondern eher das Gegenteil. Ihre planmäßige Verteilung mit Abständen, welche gegenseitige Beeinflussung bei Kondensationsvorgängen verhindern, und ihre Ausstattung mit lebenden Fußzellen lassen es viel wahrscheinlicher erscheinen, daß sie im Dienste der Taunutzung stehen.

Daß der Tau durch derartige Organe tatsächlich eingesogen wird, konnte von uns an *Mesembrianthemum cristallinum* (Abb. 8) nicht nur durch Wägungen, sondern auch durch mikroskopische Messung der Volumenvergrößerung nach künstlicher Betauung festgestellt werden.

9. Tauaufsaugvermögen der Blätter verschiedener Pflanzen.

Um zu ermitteln, wieviel vom Taubeschlag von den Blättern unter Umständen aufgesaugt (imbibiert) wird, wurden die Blätter nicht wie vorher mit voller Turgeszenz und in Wasser steckend, sondern ohne Wasser und mit Wassersättigungsdefiziten dem Tau exponiert. Es war uns dabei vollständig klar, daß wir mit dem Wassersättigungsdefizit einen unkontrollierbaren Faktor in unsere Versuche brachten. Aber es kam uns nur auf Vergleiche unter gleichen Bedingungen an. Letztere suchten wir dadurch zu erreichen, daß wir

die Versuchsblätter zur gleichen Zeit pflückten. Dabei ergaben sich recht erhebliche Unterschiede. In der gleichen Taunacht hatten z. B. Löwenzahn, Chrysanthemum und Himbeere pro dm² Blattfläche ungefähr gleich starken Taubeschlag. Das Löwenzahnblatt kam sogar mit deutlichen Welkungserscheinungen in die Taunacht. Trotzdem hatte das Löwenzahnblatt nur 7,8%, das Chrysanthemumblatt aber 20,4% und das Himbeerblatt 56,2% des Taues am Morgen eingesogen.

In einer anderen Taunacht mit nässendem Nebel und feinem Nieseln wies das Tabakblatt mit 2360 mg pro dm² den höchsten Belag auf, hatte aber davon nur rund 20% imbibiert, während 3 Verbenenblätter nur 820—1330 mg pro dm² Gewichtszunahme zeigten, aber 63—75% des Taues imbibiert hatten.

Um die in verschiedenen Taunächten gewonnenen Ergebnisse untereinander vergleichen zu können, bilden wir einen sog. „Taunutzungsquotienten“ =
$$\frac{\text{Imbibierter Tau} \cdot 100}{\text{Gesamttau} \cdot \text{einfache Blattfläche in cm}^2}$$

Dieser Nutzungsquotient gestattet uns die Versuchspflanzen nach der Größe ihrer effektiven Taunutzung zu ordnen. Sie gruppieren sich wie folgt:

Quotient > 1	Quotient 0,5 ÷ 1	Quotient ± 0,5
Mesembrianthemum cristallinum . . . 3,9	Cucumis sativus 0,9	Valerianella olitoria 0,43
Achillea millefolium 3,0	Phacelia tanacetifolia 0,8	Helianthus tuberosus 0,46
Chenopodium Bonus Henricus . . . 2,3	Chrysanthemum spec. 0,5	Rubus Idaeus 0,39
Verbena hybrida 1,8	Borrago officinalis 0,9	Calendula officinalis 0,30
Viola odorata 1,7	Sinapis arvensis 0,6	Raphanus sativus 0,30
Stellaria media 1,4		Cyclamen persicum 0,24
		Nicotiana tabacum 0,24
		Physalis Alkekengi 0,32
		Solanum lycopersicum 0,15
		Leontodon taraxacum 0,07

Von praktischer Bedeutung kann die Taunutzung nur für die Pflanzen der ersten zwei Gruppen sein. Bezeichnend ist, daß den höchsten Quotienten eine Pflanze aus der Kaplandflora aufweist, auf deren Fähigkeit zur Tauaufnahme bereits Marloth hinwies.

Die geringsten Quotienten weist unter unseren Pflanzen der Löwenzahn auf, der eine tiefgehende Pfahlwurzel besitzt, daher auf Taunutzung gar nicht angewiesen ist, sondern dessen Wachsbelag auf den Blättern den Tau sehr leicht abrollen läßt und die Blattoberfläche schlecht benetzbar macht. In dieser Richtung, d. h. mit Bestimmung des Taunutzungsquotienten, müßte unsere heimische Tiefland- und Hochgebirgsflora bearbeitet werden, um diejenigen Pflanzen zu ermitteln, die ein hohes Taunutzungsvermögen haben.

10. Betrachtungen über die pflanzenphysiologische Wirkung des Taues.

Über die ökologische und pflanzenphysiologische Bedeutung des Taues ist schon viel geschrieben worden; trotzdem gehen die Meinungen stark auseinander (s. das Sammelreferat von J. Stephan (11)). Verallgemeinernde Schlußfolgerungen aus Einzeluntersuchungen führen allzuleicht zu Irrtümern und Fehlschlüssen. Ein typisches Beispiel in dieser Hinsicht ist die Arbeit von Wetzel (12). Dieser studierte die Größe des Taubeschlages, des von Pflanzen imbibierten Taues und ihrer Transpiration. Dabei kam Wetzel zu dem Schluß, daß der Tau in unseren Zonen pflanzenphysiologisch ohne Bedeutung ist, weil der aufgesogene Tau nur wenige Prozente der Tagestranspiration zu decken vermöge.

Diese Schlußfolgerung von Wetzel geht nach unserer Ansicht zu weit und berücksichtigt nicht eine wichtige Tatsache, auf die schon 1861 der große Pflanzenphysiologe Sachs hinwies, daß nämlich ein Taubelag die Transpiration vermindert, bzw. schont. Diese Schonzeit der Transpiration kann für Pflanzen mit angespanntem Wasserhaushalt auf schwierigem Standort von entscheidender Bedeutung sein.

Registrierende Taumesser setzen uns in die Lage, diese „Schonzeit“ nach jedem Taufall zu ermitteln; hierbei kann zweckmäßig die Tauplatte durch lebendes Blattwerk ersetzt werden. Schon bei einem vollständig frei exponierten Tauschreiber nach Keßler-Fueß macht die Zeit, welche zur Verdunstung des Taubeschlages am folgenden Vormittag notwendig ist, je nach Witterungscharakter bis zwei Stunden aus. Pflanzen, welche einen windgeschützten Standort mit Vormittagsschatten einnehmen, weisen bei uns und besonders im Mittel- und Hochgebirge häufig noch zur Mittagszeit Taubelag auf. Die Schonzeit kann sich also in solchen Fällen auf viele Stunden des Tages erstrecken. Das Entscheidende ist nun nicht, wieviel Prozent der Tagestranspiration durch imbibierten Tau gedeckt werden können, sondern ob die Pflanze trotz starker Wassersättigungsdefizite ohne Schaden durchhalten kann.

Aus den nach dem Vorbild von Kostytschew und seiner Mitarbeiter von zahlreichen Forschern in den letzten 10 Jahren durchgeführten Untersuchungen der CO_2 -Assimilation am natürlichen Standort wissen wir, daß zur Erzielung normaler Tagesausbeuten in der Kohlenstoffassimilation die Pflanzen keineswegs sämtliche Stunden des Strahlungstages benötigen, sondern diese in erstaunlich kurzer Zeit (oft genügt $\frac{1}{2}$ —1 Stunde) erstellen.

Vorausgesetzt, daß die Pflanze ohne physiologische Schäden Unterbilanzen in ihrem Wasserhaushalt auszuhalten vermag, kann in vielen Fällen die kleine Wassereinnahme durch Tauimbibition sowie die durch den Taubelag erzielte „Schonzeit der Transpiration“ genügen, um solange im Blatt ausreichende Wasserhältnisse aufrechtzuerhalten, als zur Erzielung eines lebensnotwendigen Minimums der Kohlenstoff-Tagesausbeuten notwendig ist.

Während z. B. Pflanzen tropischer Regenwälder schon bei wenigen Prozenten Wassersättigungsdefizit Dauerschäden davontragen, werden von Xerophyten Wassersättigungsdefizite bis zu 85% schadlos ertragen. So fand Schanderl (13) bei der Würzburger Wellenkalkflora Defizite bis zu 62% und Rouschal (14) bei wintergrünem Goldlack solche bis zu 85%.

Um zu einer richtigen Einschätzung des Tauess im Wasserhaushalt unserer Pflanzen zu gelangen, darf man nicht lediglich berechnen, wieviel Prozent der Tagestranspiration durch die imbibierte Taumenge gedeckt werden, sondern man muß auch den transpirationsschonenden Effekt der gesamten Betauungszeit hinzuaddieren. Außerdem muß man berücksichtigen, daß Sein und Nichtsein von zeitweise unter schwierigen Wasserverhältnissen lebenden Pflanzen oft einzig davon abhängt, wie sie kritische Zeiten des Wassermangels überwinden. In solchen kritischen Zeiten bedeuten kleine Entlastungen des angespannten Wasserhaushaltes natürlich mehr als in normalen, ja sie können über Leben und Tod des betreffenden Pflanzenindividuums entscheiden.

Nach unserer Ansicht spielt der Taugenuß auch bei den Pflanzen unserer geographischen Breite eine Rolle und zwar unter folgenden Bedingungen:

1. Bei Pflanzen, welche ihre Vegetationsorgane zeitweise (Jugend) oder immer in den bodennahen oder bodennächsten Luftschichten entwickeln (Kräuter, Gräser und niederliegende Sträucher).
2. Bei Pflanzen mit genügend entwickeltem Imbibitions- bzw. Taunutzungsvermögen.
3. Bei Pflanzen, welche größere Wassersättigungsdefizite schadlos ertragen können.
4. Bei Kräutern, deren Entwicklung in eine Zeit häufiger Tauspendung fällt, z. B. bei wintergrünen und Kräutern des Frühjahrs und Herbstaspektes.
5. Bei Hochgebirgspflanzen, weil dort die Tauspendung eine intensivere und häufigere ist.

Wir neigen mit Marloth (15) und Henrici auf Grund der geschilderten Beobachtungen der Beschlagsbildung an Pflanzenhaaren mit Hilfe des Auflichtmikroskops zu der Ansicht, daß papillöse Vorstülpungen und Haare auf den Blättern im Dienste der Taunutzung stehen können.

Übersehen darf nicht werden, daß das Tauproblem pflanzenphysiologisch betrachtet nicht nur eine positive, sondern auch eine negative Seite hat. So spielt z. B. der Tau sicherlich bei Infektionen mit Algenpilzen, wie Phytophthora und Peronospora, eine bedeutende Rolle und wirkt beim Getreiderostbefall verstärkend.

Nach mündlichen Mitteilungen von Stellwaag ist bisher bei der Aufstellung von Inkubationskalendern für die Rebenperonospora der Tau keineswegs in Rechnung gesetzt worden.

Von praktischer Bedeutung ist auch der Tau als Lösungsmittel für Spritzmittelniederschläge der chemischen Schädlingsbekämpfung. Aber nicht allein Spritzmittelniederschläge können sich im Taubelag lösen, sondern wie Bode gezeigt hat, auch pflanzliche Exkretionsstoffe, welche mit dem Tau von den Blättern abtropfen und im Bereich der Kronentraufe auf andere Pflanzen unter Umständen sogar keimungshindernd wirken können.

Bode (16) machte am Wermut (*Artemisia Absinthium*) noch eine andere Beobachtung, welche in diesem Zusammenhange erwähnenswert ist. An heißen und trockenen Sommertagen ist die Oberfläche der Blattkutikula von Wermutblättern mit einer großen Zahl kleiner Exkrettröpfchen übersät. Stellt man von derartigen Blättern Querschnitte her, legt sie auf Objektträger in einen Wassertropfen und bedeckt sie mit Deckgläschen derart, daß an einigen Stellen der trockenen Epidermisfläche Luftbläschen hängen bleiben, so kann man unter dem Mikroskop an den Epidermisstellen oder Blatthaaren, welche in die inzwischen wasserdampfgesättigten Luftblasen hineinragen, die Kondensation kleiner Wassertröpfchen beobachten, welche rasch größer werden und schließlich zerlaufen. Aus diesen Beobachtungen zieht Bode die Schlußfolgerung: „Die Schnelligkeit, mit der diese Tropfenbildung vor sich geht, macht es wahrscheinlich, daß an den Entstehungszentren dieser Tropfen zuvor eine anhydrische Substanz vorhanden gewesen ist.“

Anhydrische (hygroskopische) Substanzen beschleunigen also die Wasserdampfkondensation und zählen mit zu den Ursachen für die bei unseren Versuchen festgestellten mengenmäßig so unterschiedliche Taubenetzung der Laubblätter. Hygroskopisch wirken auch die Sekrete der Tabakblätter (siehe unseren Versuch Punkt 6). Jedenfalls spielen neben Haaren und Papillen der Laubblätter auch deren kutikuläre oder Drüsensekrete für die Taubildung eine nicht geringe Rolle. Sie können eine Kondensation schon vor Erreichung des allgemeinen Taupunktes bewirken.

Schließlich sei noch ein Gebiet angedeutet, das sich an das der makroskopisch sichtbaren Kondensation anschließt, nämlich die durch Hygroskopizität entstehende Mikrokondensation, worunter wir die auch mikroskopisch nicht mehr sichtbare Wasserdampfkondensation verstehen möchten, welche in der Welt der Mikroorganismen, insbesondere bei Schimmelpilzen, eine Rolle spielt. Schimmelpilze können sich, wie z. B. Kie ne (17) am Kellerschimmel (*Cladosporium cellare* Schanderl) nachweisen konnte, das zu ihrem Wachstum allerdings in unverhältnismäßig geringer Menge notwendige Wasser auch aus einer Atmosphäre weit unter 100% relativer Feuchtigkeit (ab 85%) beziehen. Die sich hierbei abspielenden Mikrosublimationen entziehen sich einstweilen noch unseren Kenntnissen. Dies ist aber bestimmt auch ein aussichtsreiches Forschungsgebiet der Zukunft, ein Grenzgebiet der Physik, Chemie und Biologie.

11. Zusammenstellung der neuen Gesichtspunkte.

1. Mit geeigneten Lysimetermessungen (Bodenwaagen) ist man imstande, nicht nur Verdunstungs-, sondern auch Kondensationserscheinungen der Oberfläche zu verfolgen, die denjenigen des gewachsenen Bodens nahekommen.
2. Es ist möglich, den Zeitpunkt des Phasenüberganges des Wassers aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand und umgekehrt zu erfassen. Doch gilt dies streng nur für die tätige Oberfläche der Apparatur.
3. Die Wasserdampfexhalation des Bodens besteht aus Verdunstung des kapillar nachgesaugten Oberflächenwassers, aus dem durch Temperatur- und Druckschwankungen bewirkten Massentransport feuchter Bodenluft und nach oben gerichtetem Diffusionsstrom des Wasserdampfes.
4. Die Bodenexhalation übertrifft in unseren Breiten in der Regel die Kondensation; dieser Überschuß wird beim bewachsenen Boden durch nächtliche Pflanzentranspiration ein wenig verstärkt, durch den Pflanzentau jedoch wesentlich verringert; oft beträgt dann umgekehrt der Pflanzentau das Mehrfache der Bodenexhalation.
5. Die Bodenexhalation pflegt erst in der zweiten Nachthälfte der Kondensation zu weichen. Jene ist bei Sonnenuntergang weit größer als bei Sonnenaufgang.
6. Taumesser, die nicht den Verlauf der Taubildung, sondern nur Summen angeben, können, auch wenn sie nicht hygroskopisch sind, keine sichere Auskunft über den Nachttau geben, der oft wieder verdunstet oder durch Regen verdeckt wird.
7. Die Taubildung erfolgt nicht immer gleichmäßig ansteigend, sondern mit Unterbrechungen, manchmal ruckweise.
8. Für die Tau- und Reifbildung ist die Ausstrahlung ein wesentlicher Faktor, der aber trotzdem allein nicht hinreicht, die anfallende Kondensation zu berechnen.
9. Aus den Lysimeterwägungen geht auch hervor, daß die immer noch behauptete Kondensation im Boden keinerlei Rolle spielt.
10. Die Kondensation in strahlungsbeschränkten Bodenvertiefungen (Mulden, Böschungen) ist auf Ansammeln stagnierender Kältestluft zurückzuführen.
11. Normalfeuchter Boden exhaliert bei Nacht noch genug Wasserdampf, um damit eine schwache bis mittelstarke Tau- und Reifbildung mengenmäßig zu bestreiten. Dennoch geht diese auf dem Umweg über die bodennahe Luftschicht vor sich, deren Feuchtigkeitsgehalt dieserart entscheidend erhöht wird.
12. Durch Windschutz, richtige Bodenbearbeitung (öfteres Hacken) und Irrigation kann der Taugenuß der Pflanzen künstlich erhöht, durch Bodenbedeckung herabgesetzt werden.
13. An der Taubildung sind auch die Luftdruckschwankungen mit beteiligt. Welche Rolle diese, insbesondere die auch bei ruhigem Barometerstand auftretenden mikrobarischen Veränderungen im Gasstoffwechsel der Pflanze spielen, wird angeregt zu untersuchen.
14. Es wird versucht, Einblick in die Vorgänge an den Grenzflächen (äußere und innere Oberfläche hohl-räumiger Körper) beim Prozeß der Wasserumwandlung zu erlangen. Außer der Diffusion ist hierbei auch die dynamisch und thermisch bewirkte Austauschströmung mit wirksam.

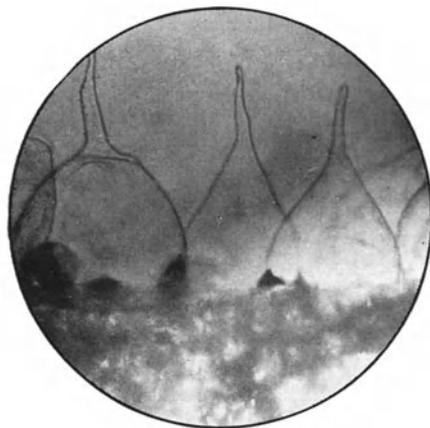
15. Die Zeit des Abtauens eignet sich am besten zur Bekämpfung von Unkraut, Schädlingen und zur Düngung mit Spurenelementen. Dabei ist es heute möglich, die Feuchtigkeit auch nicht mehr bodennaher Luftschichten durch Bestäubung vom Flugzeug aus herabzubringen.
16. Der Taugenuß der Pflanzenblätter beträgt das fünf- bis siebenfache der Tauschreiberwerte; auf pflanzenbestandene Bodenoberfläche berechnet wird dieses Verhältnis noch krasser.
17. Blattmodellversuche zeigen den Unterschied des Taubeschlages je nach Höhe, Flächenstellung im Raum und Umfang (Randgestaltung).
18. Mit Hilfe des Auflichtmikroskopes glückte es, künstliches An- und Abtauen fortlaufend zu beobachten. Es zeigt sich, daß gewisse Blatthaare und Papillen eher ideale Taufänger als Verdunstungsschützer sind. Auch die vermutete Aufsaugung geringer Taumengen durch die Pflanze bestätigte sich an der beobachteten Volumsvergrößerung papillöser Gebilde.
19. Bringt man von der Pflanze imbibierten Tau in ein Verhältnis zum Gesamttau und zur Blattfläche, so gestattet ein solcher „Taunutzungsquotient“ (H. Schanderl) eine Abstufung der Pflanzen nach ihrer effektiven Taunutzung.
20. Es gibt Pflanzen, die infolge tiefreichender Wurzel usw. auf einen Taugenuß weniger angewiesen sind (z. B. Löwenzahn) und die schwer benetzbare Blätter haben (Wachsbelag).
21. Tauschreiber lassen die „Transpirationsschonzeit“ der Pflanzen ermitteln, die in Trockenperioden von vitaler Bedeutung ist.
22. In unseren Breiten spielt der Taugenuß eine Rolle bei Pflanzen, die a) ihre Vegetationsorgane in der bodennahen Schicht entwickeln, b) die ein genügend entwickeltes Imbibitions- und Ausnutzungsvermögen haben, c) deren Entwicklung in die Zeit häufigster Tauspendung fällt und d) die größere Wassersättigungsdefizite schadlos ertragen können.
23. Die an Pilzen beobachtete Mikrocondensation befähigt diese Organismen auch aus der relativ trockeneren Atmosphäre noch Wasser zu binden.

Schrifttumhinweis.

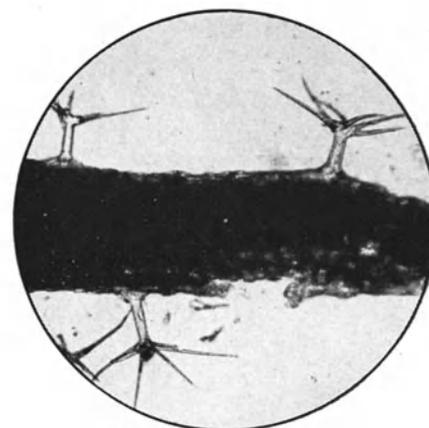
1. E. Hiltner, Pflanzenbau, Wiss. Arch. f. Landw. 3, 1. 1930.
 2. Th. Homén, Bodenphysikalische und meteorologische Beobachtungen 1894.
 3. F. Zunker, Handb. d. Bodenlehre VI von E. Blanck 1930.
 4. O. W. Keßler, Bioklim. Beibl. 1939.
 5. W. Schmidt u. P. Lehmann, Sitz.-Ber. Ak. Wiss. Wien, IIa, 138, 9/10, 1929.
 6. R. Geiger, Das Klima der bodennahen Luftschicht 1927.
 7. J. Schubert, Met. Ztschr. 1915.
 8. O. W. Keßler u. W. Kaempfert, Wiss. Abh. R. f. W. VI, 2 1940.
 9. G. Hager, Handb. d. Bodenlehre I von E. Blanck 1930.
 10. G. Fritzsche, Bioklim. Beibl. 1934.
 11. J. Stephan, Bioklim. Beibl. 1938.
 12. Wetzell, Flora Bd. 17, 1924.
 13. H. Schanderl, Planta Arch. f. wiss. Bot. Bd. X, 1930.
 14. Rouschal, Österr. Bot. Zeitschr. Bd. 88, 1939.
 15. R. Marloth, Trans. Roy. Soc. S. A. I, 1910.
 16. H. R. Bode, Planta Arch. f. wiss. Bot. Bd. 30, 1940.
 17. E. Kiene, Vorratspflege und Lebensmittelforschung Bd. 2, 1939.
-



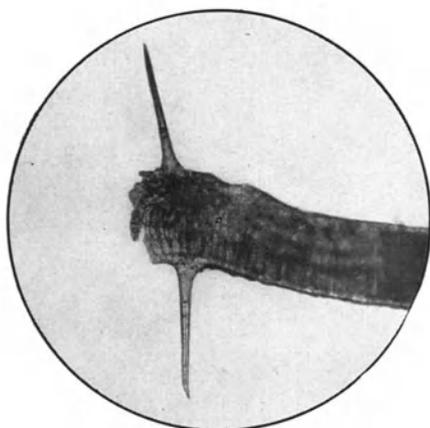
Abb. 1. Lysimeter mit eingehängtem Gefäß.



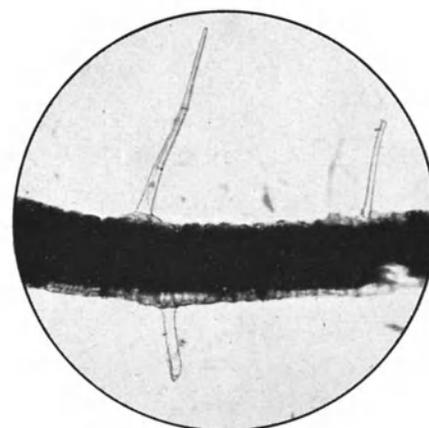
a) *Mesembr. crystallinum*.



b) *Alyssum montanum*.



c) *Verbena hybrida*.



d) *Teucrium chamaedrys*.

Abb. 7. Blatthaargebilde als Taufänger (48fach vergr.).