Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in bodennahen Luftschichten

Walter Vieser*)
(Aus dem Meteorologischen Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe)

1. Einleitung

1.1 Methodik der Feuchtemessung.

GEIGER (22), (21) betont bei der Besprechung der wenigen vorliegenden Messungen von FRANSSILA (20), ROSSI (56) und RAMDAS (53) die Notwendigkeit, möglichst genaue Ergebnisse der Temperatur- und Feuchtemessung in der bodennahen Luftschicht zu gewinnen.

Im Meteorologischen Institut der Technischen Hochschule wurden die bisherigen Untersuchungen (15), bei denen die Methodik der Feuchtemessung

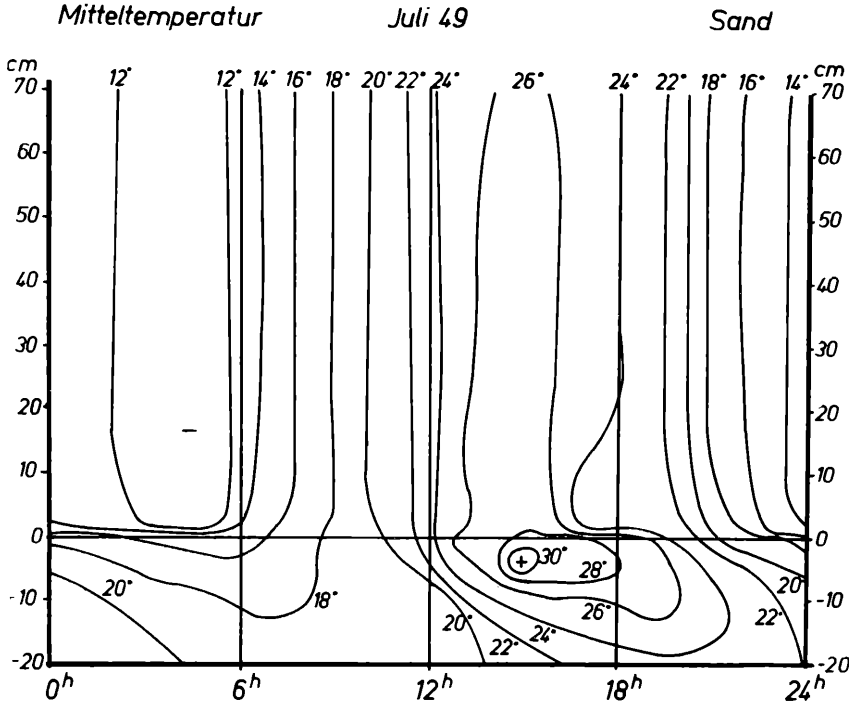

Abb. 2. **Mitteltemperaturen über Sand.**

*) Nach einer gleichnamigen Diplom-Arbeit von Doz. Dr. M. Diem, Meteorologisches Institut, gekürzter und überarbeiteter Auszug.

mit Kleinhygrometern erprobt wurde, weitergeführt und systematisch auf die verschiedensten Untergrundbedingungen erweitert.

Es ist uns eine angenehme Pflicht, auch an dieser Stelle der **C. Freudenberg-Stiftung** für die großzügige Hilfe zu danken, die es uns ermöglichte, die Methodik der Feuchtemessung auf exakte Eichungen aufzubauen.

1. 2 **Methodik der Temperaturmessung.**

Bei der Temperaturmessung wurden Eisen-Konstantan-Thermoelemente von 0,5 mm ∅ verwendet und der Strahlungseinfluß durch Budigschirme (10) weitgehend ausgeschaltet. Bei einer Stromempfindlichkeit von $0{,}2 \times 10^{-6}$ Amp./Skt. des verwendeten Lichtmarkengalvanometers von Hartmann & Braun entsprachen 0,1 °C einem halben Skalenteil.

Messungen über Sandboden, über und in Vegetation und über einer Asphaltdecke.

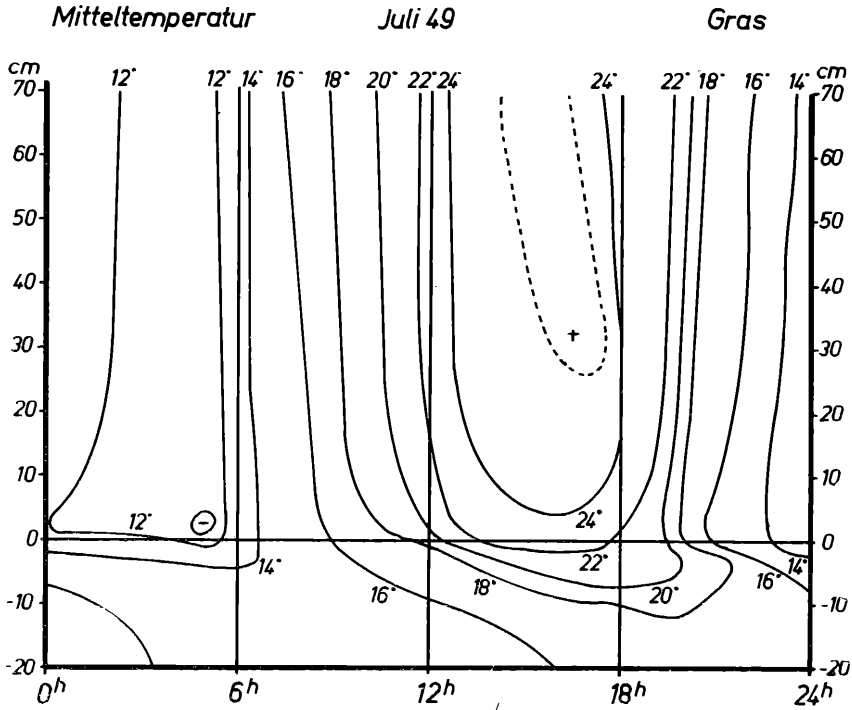

Abb. 3. **Mitteltemperaturen über Gras.**

2. 1 **Messungen über Sand und in und über Gras im Juli 1949.**

2. 11 **Anordnung und Wetterlage.**

Im Botanischen Garten der Technischen Hochschule wurden 3,5 m voneinander entfernt über einem sandigen Weg und im Gras in 0, 2, 4, 8, 16, 32, 64 und 128 cm Höhe Thermoelemente und Hygrometer angebracht. Einen Teil der Meßstelle über Sand zeigt die Abb. 1, s. Tafel I, in der auch der Übergang zum benachbarten Grasstück zu erkennen ist, das in den unteren 5 cm stark verfilzt war und sich erst nach oben auflockerte.

Die Messugen wurden vom 4. 7. 49, 17 Uhr bis zum 9. 7. 49, 19 Uhr ununterbrochen in maximal einstündigen Abständen durchgeführt. Die Wetterlage entsprach dem heißen und trockenen Sommer 1949. Aus den Protokollen und Vergleichswerten der meteorologischen Hütte entnehmen wir:

4. Juli: heißer Abend, um 19 Uhr 28,2^0, wolkenlos, windstill.

5. Juli: Ci-Aufzug, um 14 Uhr 31,4^0, 23 % r. F., Bewölkungszunahme. Zwischen 15 und 16 Uhr gewittriger Schauer mit Wind bis 3 m/sec.; kein nennenswerter Niederschlag.

6. Juli: Nachts wechselnd bewölkt, Minimum 11,1^0, kühler als am Vortag; schwachwindig.

Juli: Nachts klar, Minimum 7,4^0, am Boden bis 5,8^0, wolkenlos und windstill, über Mittag leicht bewölkt.

8. Juli: Nachts wolkenlos und windstill, Temperatur bis 10^0 absinkend, tags wechselnd bewölkt, schwachwindig.

9. Juli: Nachts über 7/10, dabei hohe nächtliche Temperatur, tags Cu, Maximum 26,0^0.

2. 12 **Der mittlere Temperaturgang.**

Der Gang der Temperatur in der bodennahen Schicht war während der Meßtage so gleichmäßig, daß über die 5 Tage gemittelt werden konnte. In den Abb. 2 und 3 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Am auffälligsten ist die Temperaturverteilung z. Zt. des mittäglichen Maximum. Über Gras treten die höchsten Temperaturen in 30 cm Höhe knapp über den Spitzen der Grashalme auf, während sie beim Sand zwischen Erdoberfläche und 5 cm Tiefe liegen. Dieser Gegensatz zu den Messungen von GEIGER (21) und KERÄNEN (37) kann dadurch erklärt werden, daß das Oberflächenthermoelement beschattet war, während daneben im Boden infolge Wärmeleitung die auftreffende Strahlung voll wirksam wurde.

Die nächtlichen Minima liegen über Sand in 15—20 cm Höhe, was GEIGER (21) bei benachbarter Vegetationsdecke für normal hält. Im Gras sinkt dagegen die kalte Luft zwischen den Halmen fast bis zum Boden. Die nächtliche Konvektion wirkt sich erst oberhalb der Grasspitzen aus und beeinflußt damit nur die Temperatur über Sand, während im Gras die Kaltluft statisch absinkt. Es läßt sich die Erscheinung auch nach DIEM (15) als Ausstrahlungseffekt der bodennächsten Zentimeter erklären.

Mit Ausnahme der kurzen Zeitspanne von 9—13 Uhr ist die Sandoberfläche immer wärmer als die darüberliegende Luft, wobei in den Stunden vor Sonnenaufgang die Differenz auf 3^0 ansteigt. Beim Gras bleibt die Bodenoberfläche von 7—19 Uhr kälter als die darübergelagerte Luft und nur z. Zt. der nächtlichen Temperaturminima von 2—6 Uhr ist der Boden wärmer als die Luft. Bei starker Ausstrahlung tritt vereinzelt ein zweites Temperaturmaximum auf, das aber infolge der Mittelbildung nicht sichtbar wird.

Ein Vergleich der Ergebnisse über Sand und Gras zeigt, daß die Unterschiede im Boden und an der Oberfläche am größten sind, nach oben abnehmen und in 128 cm praktisch 0^0 betragen. Die Mittelwerte aus allen gemessenen Differenzen zwischen Gras und Sand ergeben eine Kurve aus zwei logarithmisch ansteigenden Teilen mit einem Gebiet stetigen Übergangs im Bereich der Vegetationsoberfläche. Die größeren Differenzen (größer 1 ^{0} C) treten erst unterhalb 10 cm auf.

2. 13 **Die Temperaturunruhe.**

Registrierungen von GEIGER (21), HAUDE (30) u. a. haben gezeigt, daß die kurzfristigen Schwankungen der Temperatur ein besonderes Kennzeichen der bodennahen Luftschicht sind. In Abb. 5 wurden die Messungen vom 9. 7 49, 13—15 Uhr zusammengefaßt, die in 5-minütlichen Abständen gewonnen wurden. Während dieser Zeit war es sonnig, die Bewölkung betrug 4/10 Cu und nahm um 14.30 Uhr vorübergehend auf 7/10 zu. Der Wind frischte um 14 Uhr auf 1,0 m/sec auf, war um 15 Uhr auf 0,2 m/sec abgesunken und betrug 15.30 Uhr 0,8 m/sec.

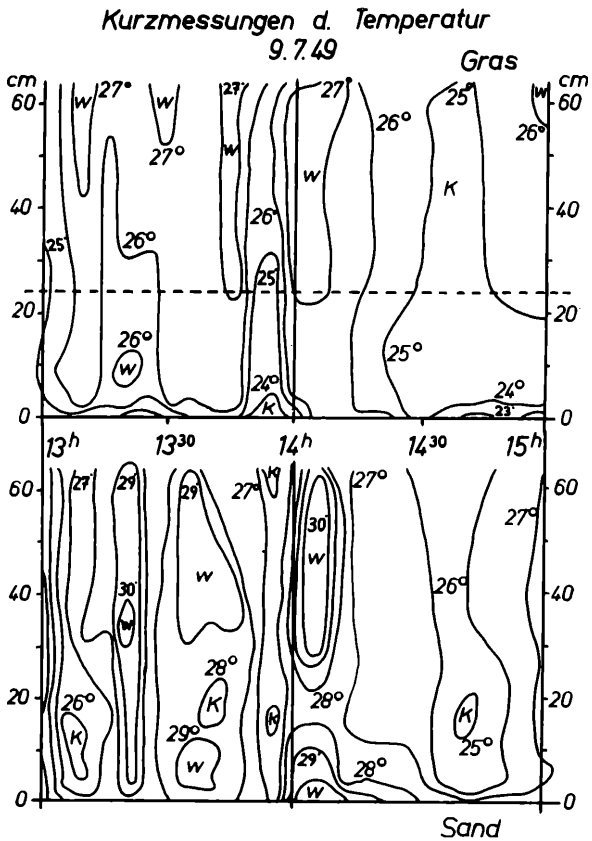

Abb. 5. **Temperaturunruhe über Sand und Gras.**

Der Wechsel der Temperaturen über Sand ist viel ausgeprägter als über Gras. Es bilden sich geschlossene warme und kalte „Lufttropfen". Der auffrischende Wind um 14 Uhr führt durch Advektion zu den höchsten Temperaturen. Die Abschirmung der direkten Strahlen um 14.30 Uhr hat eine deutliche Abkühlung in allen Höhen zur Folge. Beim Sand greifen die Schwankungen bis zum Boden durch, beim Gras werden sie in der Oberfläche der Halme abgebremst.

2. 14 **Die Feuchtigkeit.**

Der Wasserdampf der bodennahen Luftschicht stammt zum größten Teil aus dem Boden. Damit wird der Gang der Feuchte weitgehend vom Wasserhaushalt des Bodens abhängig, zu dessen Messung uns heute noch keine geeigneten Geräte zur Verfügung stehen. Wir betrachten deshalb im Folgenden nur die relative Feuchte und den Dampfdruck über dem Boden und zeigen die Unterschiede zwischen Sand und Gras auf. In den Abb. 6 und 7 sind jeweils die Linien gleichen Dampfdrucks und gleicher relativer Feuchte gezeichnet. Über Gras ist der Gang wieder durch die Vegetationsdecke bestimmt, in der die Feuchte ständig höher als in der darüber liegenden

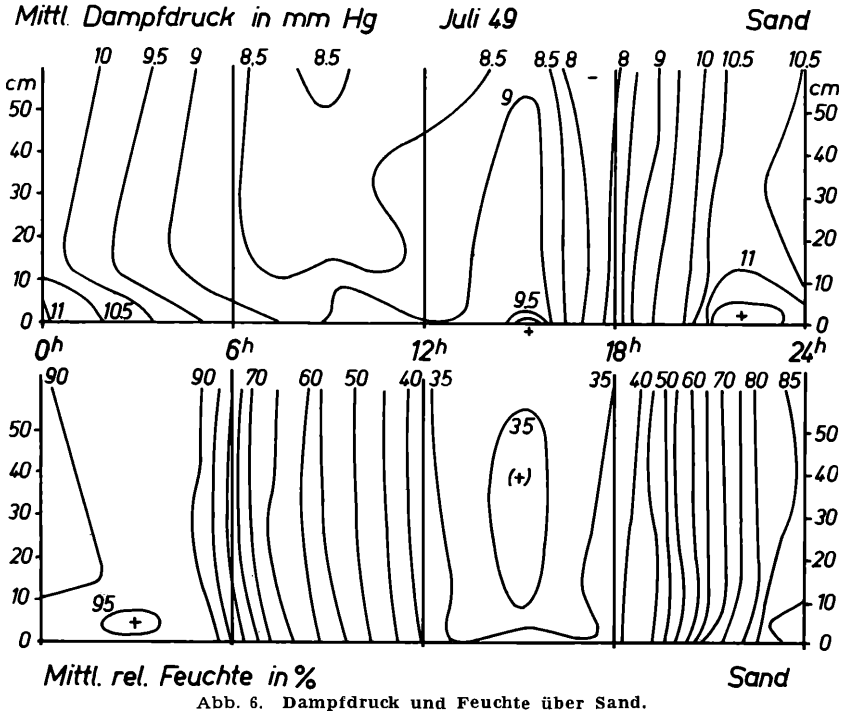

Abb. 6. **Dampfdruck und Feuchte über Sand.**

Luftschicht ist. Über Sand dagegen liegt das nächtliche Maximum in 5 cm über der Erdoberfläche, wie schon bei den Messungen von DIEM (15) gezeigt werden konnte. Auch während des ganzen Tages bleibt die relative Feuchte über Sand in 2 cm am höchsten. Da der mittlere Dampfdruck am Boden die maximalen Werte (Abb.8) und ein zweites Maximum zwischen 21 und 11 Uhr in 64 cm Höhe hat, ist damit der Nachweis erbracht, daß 1. der Wasserdampfnachschub ausschließlich aus dem Boden erfolgt und 2. die von MÖLLER (46) gegebene Erklärung für den Gang des Dampfdrucks auch für die bodennächsten Schichten gültig sind. Die Unterschiede der relativen Feuchtigkeit über Sand bleiben in der Vertikalen unter 7 %.

Entsprechend dem Gang der Temperatur variiert die relative Feuchte über Gras stärker (Abb. 9). Immer liegt in 2 cm der höchste Wert. Die Differenz mit der Höhe beträgt um 4 Uhr früh 5 % und steigt bis auf 21 %

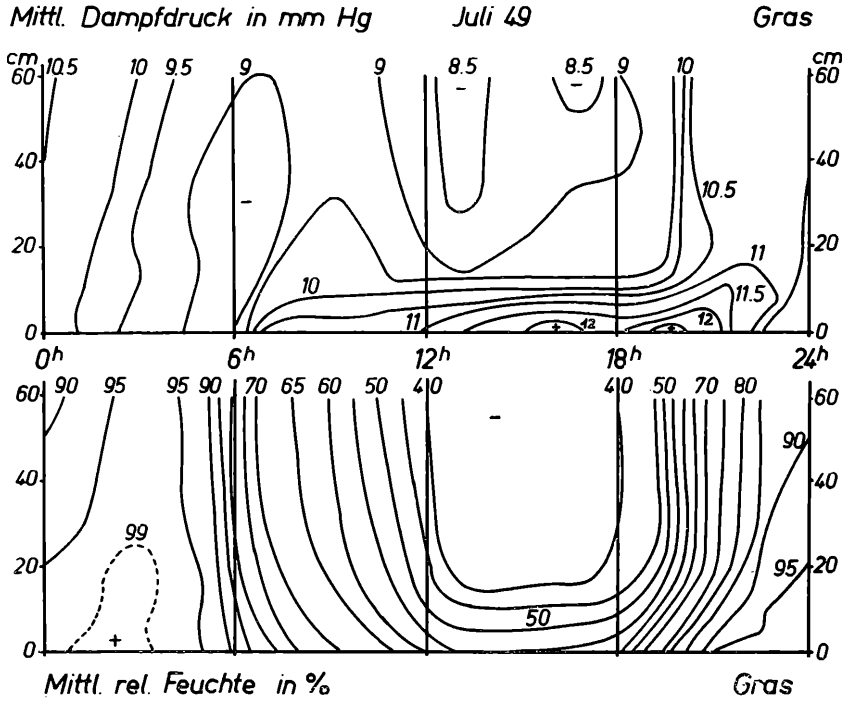

Abb. 7. **Dampfdruck und Feuchte über Gras.**

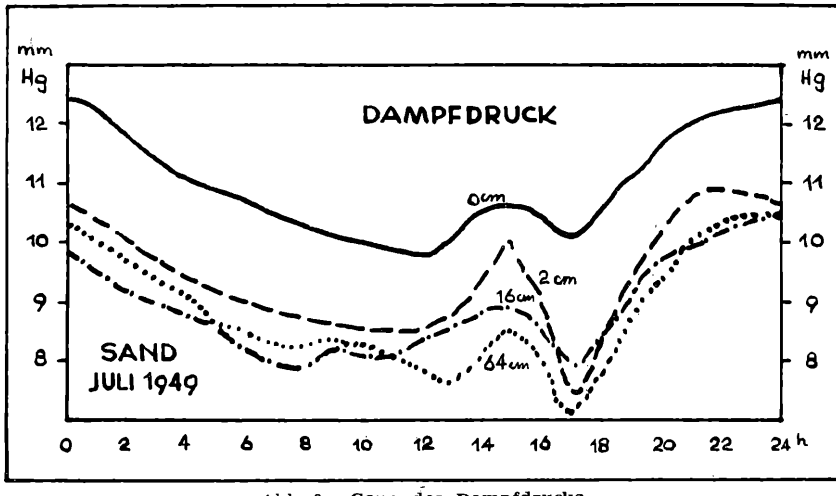

Abb. 8. **Gang des Dampfdrucks.**

um 14 Uhr zwischen 2 und 64 cm Höhe. Der Dampfdruck folgt während der Tagestunden diesem Gang, während von 23—5 Uhr sein Maximum in 64 cm liegt.

Wir können also eindeutig die von GEIGER (21) definierten Nass- und Trockentypen der Feuchtigkeitsverteilung und Übereinstimmung mit den Messungen von FRANSSILA (20) feststellen. Zur Erklärung des Dampfdruckganges ziehen wir die Überlegung von MÖLLER (46) heran. Solange vom Boden her der Verlust durch Verdunstung ergänzt werden kann und der Austausch gering ist, finden wir den „winterlichen Gang", der bei uns im Gras zwischen 2 und 18 cm Höhe auftritt. Der „sommerliche Gang" ist durch Konvektion und Austausch bestimmt. Der Rückgang des Dampfdrucks von Mitternacht bis kurz vor Sonnenaufgang wird durch Taubildung

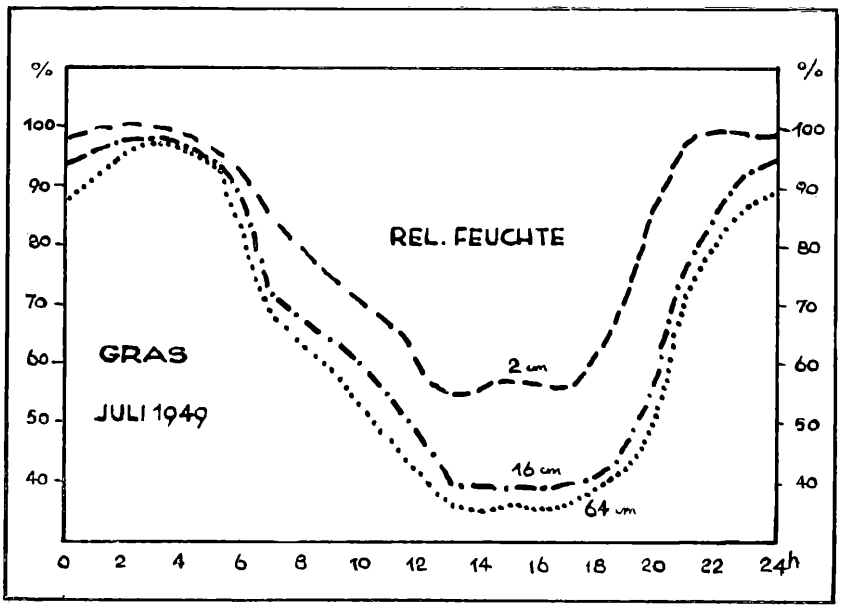

Abb. 9. **Gang der Feuchte.**

bedingt. Der erste Anstieg am Vormittag ist ein Zeichen für die lebhafte Verdunstung vom Boden aus. Bei dem weiteren Anstieg der Temperatur müßte infolge der Verdunstung der Dampfdruck weiter ansteigen oder mindestens gleich bleiben. Durch Austausch und Konvektion tritt aber eine Umlagerung zwischen den wasserdampfärmsten Schichten des großklimatischen Raums und den wasserdampfreichen in Bodennähe ein, sodaß mit der Höhe der Dampfdruck abnimmt.

Im Gras findet der Austausch in der Vegetationsoberfläche seine untere Grenze, während er sich über den Sand bis zum Boden durchsetzen kann. Erst wenn der Austausch sein Maximum überschritten hat, überwiegt wieder die Verdunstung und der Dampfdruck steigt erneut an, bis die Taubildung einsetzt. So läßt sich aus dem Dampfdruckgang der Einfluß des Austausches ablesen, wobei einmal die bodennächsten Schichten, zum anderen die großklimatischen Räume erfaßt werden.

Im Hochsommer kann der Austausch so lebhaft werden, daß das mittägliche Minimum des Dampfdrucks unter dem morgendlichen Minimum liegt, wie wir es bei Sand und Gras mehrfach beobachtet haben. Es stellt sich damit der „Wüstentyp" der Verteilung ein, und das nächtliche Maximum wird zum Hauptmaximum, wenn ein sekundäres Temperaturmaximum am Abend die Verdunstung lange und intensiv unterhält.

2. 15 **Differenzen zwischen Sand und Gras.**

Die Unterschiede des Wasserhaushalts unter Sand und unter Gras führen selbst bei der geringen Entfernung der Meßstellen voneinander zu Unterschieden, die bei der relativen Feuchtigkeit bis 35,5 % beim Dampfdruck bis fast 4 mm Hg ansteigen (Abb. 10). Die relative Feuchtigkeit bleibt in der Vegetationsdecke zu allen Zeiten höher als über Sand.

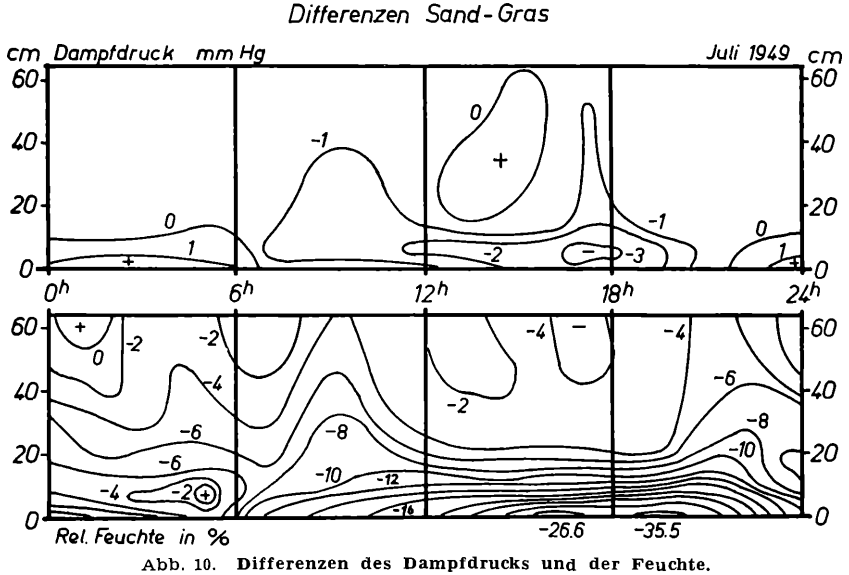

Abb. 10. **Differenzen des Dampfdrucks und der Feuchte.**

2. 2 **Messungen im Oktober 1950**

2. 21 **Anordnung und Wetterlage.**

Um die hochsommerlichen Messungen von 1949 zu ergänzen, wurden im Oktober 1950 innerhalb einer Grasfläche beim Meteorologischen Institut in und über Gras, über Sand und über Asphalt auf 2,5×2,5 m^2 großen Versuchsflächen die Messungen weitergeführt. Trotz der nahestehenden Gebäude sind die Ergebnisse kennzeichnend für den Untergrund. Die Meßanordnung wurde gegenüber 1949 nicht verändert.

In den Tagen vom 3. 10. 1950 19 Uhr bis zum 6. 10. 1950 18 Uhr herrschte ein später Altweibersommer mit langsam von 11,4° auf 9,6°C absinkendem Tagesmittel der Temperatur. Die täglichen Schwankungen betrugen noch maximal 12°, die Bewölkung bestand aus wenigen Zehnteln Cs oder Ci-Bänken. In der Nacht vom 5./6. 10. setzte Nebel ein, der jede Temperatur- und Feuchteänderung verhinderte und sich erst am 6. 10. 1950 um Mittag auflöste.

2. 22 **Temperatur.**

In Abb. 11 sind die Isothermen über den drei Versuchsflächen Sand, Gras und Asphalt und im darunter befindlichen Boden zusammengefaßt.

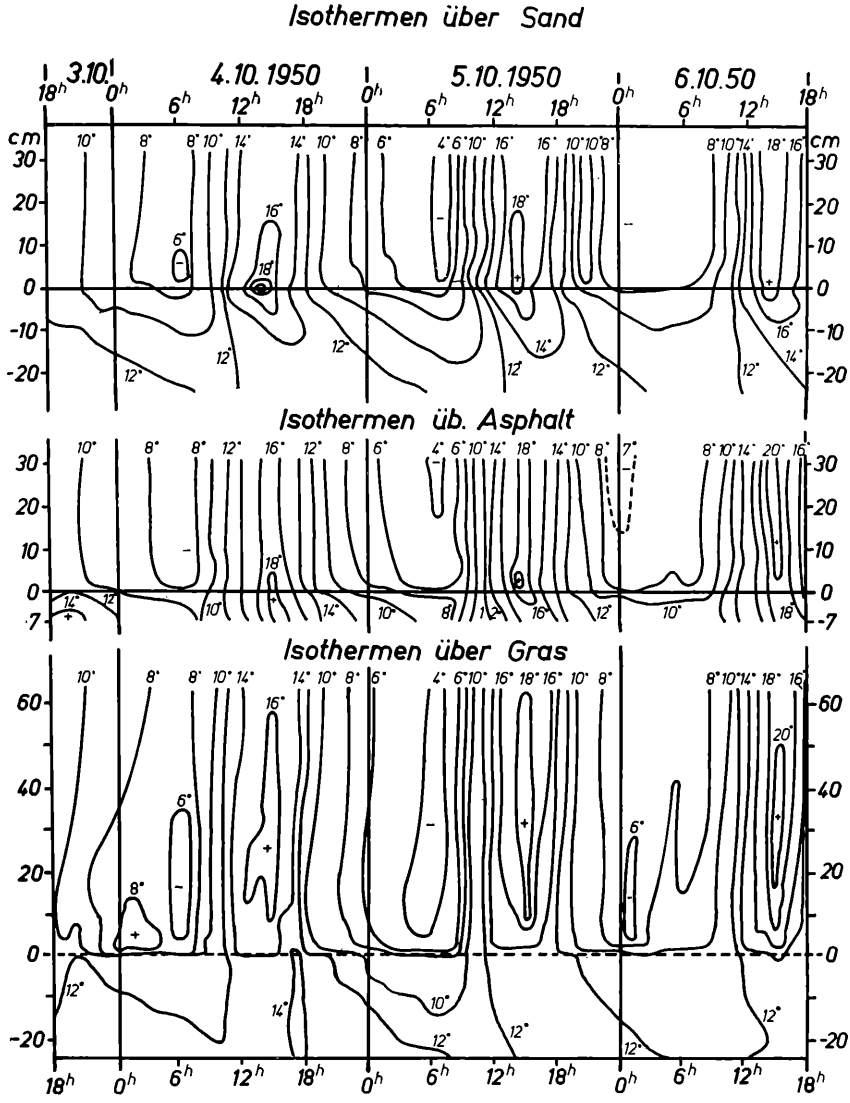

Abb. 11. **Isothermen über Sand, Asphalt und Gras.**

Über Sand bleiben die Unterschiede mit der Höhe gering, sie betragen zwischen Boden und 32 cm Höhe maximal 2,2° C und werden darüber gleich 0, sodaß auf der Auswertung der höheren Meßstellen verzichtet wer-

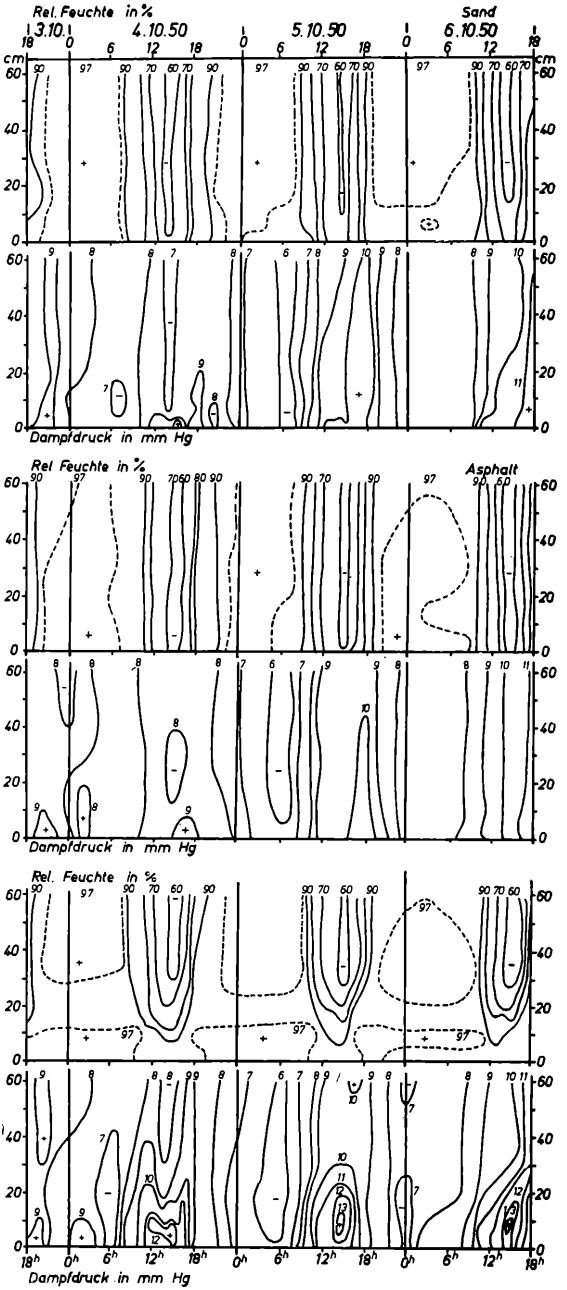

Abb. 12, 13 und 14. **Feuchte und Dampfdruck über Sand, Asphalt und Gras.**

den konnte. Die Maxima und die nächtlichen Minima liegen in unmittelbarer Bodennähe, wobei die Unterschiede der Minima zwischen 60 cm Höhe und Boden nur noch 2° betragen.

Über Gras verschiebt sich die Lage der Maxima und Minima typisch in die Obergrenze der Halme, die noch deutlicher als bei den Messungen 1949 zur zweiten in sich geschlossenen Oberfläche wird. Damit dehnt sich der „bodennahe" Einfluß bis etwa 60 cm Höhe aus.

Über Asphalt gleichen die Isothermen weitgehend denen über Sand, die Maxima sind etwas näher an den Boden gerückt. Die unter der Erdoberfläche ebenfalls mit Thermoelementen gemessenen Temperaturen zeigen den steten Übergang aus der Luft an den Boden, wobei selbst in und über der Asphaltdecke keine allzu großen Sprünge beobachtet werden.

Nach den Ansätzen von KERÄNEN (37) und G. JOOS (35) läßt sich unter der Annahme, daß die Flächen gleicher Temperaturen parallel zur Erdoberfläche liegen und daß an dieser periodische Temperaturschwankungen stattfinden, die Temperaturleitfähigkeit K des Bodens [cm^2/sec] sowohl aus der Phasenverschiebung wie auch aus der Amplitudenverkleinerung berechnen. In Tabelle 1 sind die mittleren Werte zusammengefaßt.

Sand		Gras		Asphalt	
Tiefe	K	Tiefe	K	Tiefe	K
Juli 49		Juli 49			
5—10 cm	0.0054	0—5 cm	0.0035		
10—20 cm	0.0133	5—10 cm	0.0040		
0—20 cm	0.0188	10—20 cm	0.0080		
		0—20 cm	0.0073		
Okt. 50		Okt. 50		Okt. 50	
0—1 cm	0.0038	1—5 cm	0.0126	0—2 cm	0.0060
1—5 cm	0.0150	5—10 cm	0.0169	2—7 cm	0.0082
5—10 cm	0.0086	10—25 cm	0.0117		
10—25 cm	0.0145	0—25 cm	0.0075		
0—25 cm	0.0119				

Tab. 1 Temperatur-Leitfähigkeit im Sand, unter Gras, im Asphalt.

Die Werte streuen im üblichen Rahmen und werden besonders durch den wechselnden Wassergehalt im Boden bestimmt. F. ALBRECHT (1) zeigt, daß mit Hilfe der Temperaturleitfähigkeit K an Hand bekannter Eichwerte sich der Wassergehalt im Boden messen läßt. Doch scheinen nach unserer Erfahrung die Störungsmöglichkeiten von außen zu groß zu sein, um gesicherte Ergebnisse zu erhalten.

2. 23 **Feuchtigkeit.**

Der Verlauf der Isohypsen der relativen Feuchte und des Dampfdrucks in Abb. 12, 13 und 14 ist einfacher als in den Abb. 6 und 7, was unmittelbar eine Folge des im Herbst verminderten Austausches ist.

Über Sand finden wir ein flaches Maximum des Dampfdrucks zwischen Mittag und Sonnenuntergang in unmittelbarer Bodennähe. Die relative Feuchte hat ihr Minimum am Nachmittag, ihr Maximum erreicht sie einige Stunden nach Sonnenuntergang mit Sättigung, die bis in die Morgenstunden anhält. Dabei bleibt die bodennächste Schicht etwas trockener, d. h. Sättigung wird hier infolge Wärmeleitung und Strahlung nicht ganz erreicht.

Im Gras bildet sich deutlich die Doppelschichtung heraus, wobei die Feuchte in der Schicht zwischen Boden und 5 cm Höhe nie unter 90 % sinkt. Darüber nimmt sie bis zur Obergrenze der Halme ab, um dann wieder zu einem zweiten Maximum anzusteigen. Die Vegetationsoberfläche teilt den Dampfdruckaustausch in zwei deutlich getrennte Bereiche. Um Mittag dringt

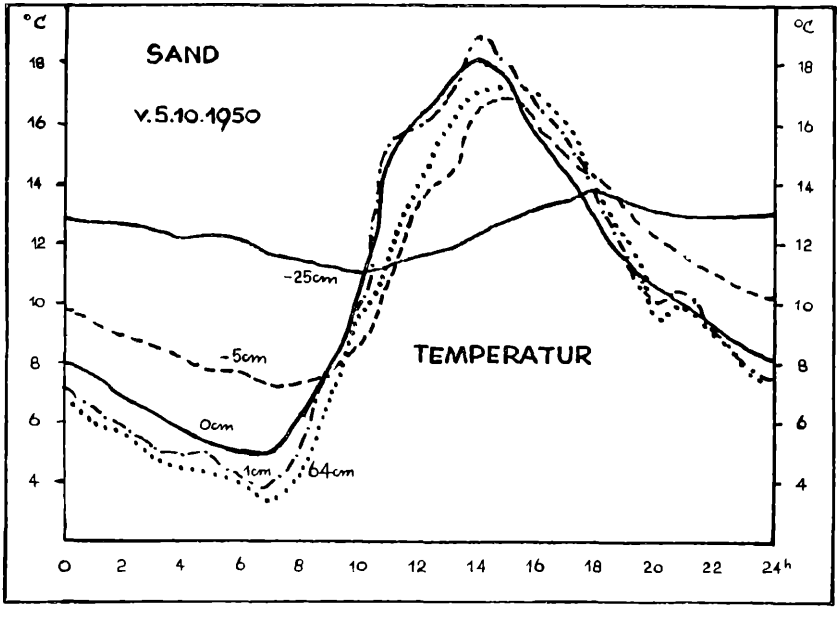

Abb. 15. **Gang der Temperatur über Sand.**

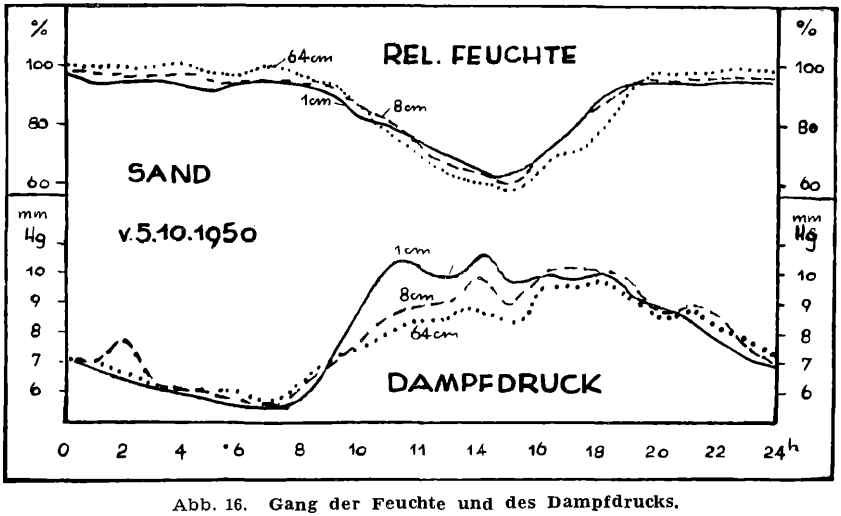

Abb. 16. **Gang der Feuchte und des Dampfdrucks.**

die Strahlung in das Gras ein und fördert die Verdunstung des Bodens und der vom Tau befeuchteten Pflanzen. Innerhalb des Grases bleibt der Austausch gering, die mittäglichen Maxima erreichen Werte von über 12 mm Hg. Bei der Taubildung in den Morgenstunden geht der Dampfdruck in allen Höhen zurück.

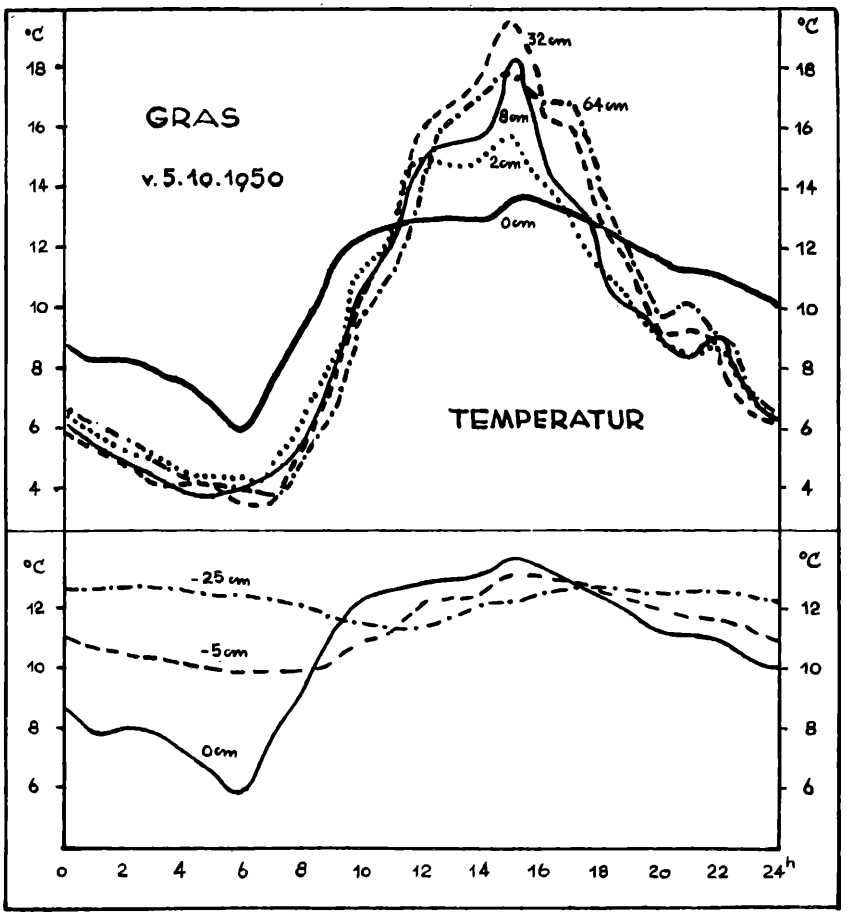

Abb. 17. **Gang der Temperatur über Gras und im Boden.**

Über der Asphaltschicht wird der Dampfdruck überwiegend durch Advektion bestimmt; infolge des nächtlichen Taufalls sinkt er vor Sonnenuntergang stark ab. Bei Einsetzen der Sonnenstrahlen trocknet die nasse Oberfläche rasch ab und wir finden bei Tag sowohl beim Dampfdruck wie auch bei der relativen Feuchte eine Verteilung, die sich nur wenig mit der Höhe ändert. Die Wirkung des Austausches setzt sich ungehindert bis zur Asphaltdecke durch und sorgt für gute Durchmischung.

2. 24 **Der tägliche Gang von Temperatur und Feuchte am 5. Oktober 1950.**

Im Abschnitt 2. 1 haben wir den täglichen Gang der Temperatur für die vermessenen 5 Tage dargestellt und konnten damit die **mittleren** Verhältnisse einer Wetterlage erfassen. Im Gegensatz dazu soll jetzt ein einzelner Tag betrachtet werden, der für die ganze Meßreihe als repräsentativ gelten kann. Am 5. Oktober setzte während der wolkenlosen Nacht starker Taufall ein, der einem Niederschlag von 0,1 mm entsprach. Zwischen 7—9 Uhr herrschte Dunst, teilweise leichter Nebel. Am Nachmittag zog ein leichter Cs-Schleier auf, der vorübergehend bis zu 4/10 des Himmels bedeckte und bis in die Nacht anhielt.

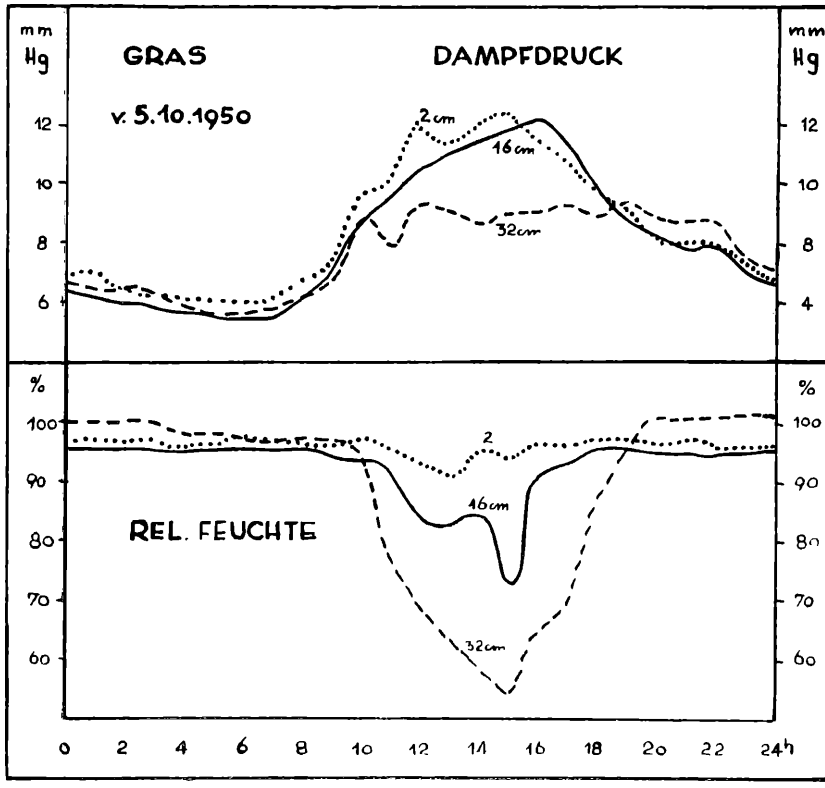

Abb. 18. **Gang der Feuchte und des Dampfdrucks über Gras.**

2. 241 **Tagesgang über Sand.**

In der Nacht ist der Boden um 1° wärmer als die Luft in 1 cm Höhe (Abb. 15), und um 1,5° wärmer als die Luft in 64 cm Höhe. Während des Tages erwärmt sich der Boden am Mittag auf maximal 2,5° über die Lufttemperatur und die täglichen Schwankungen betragen bis zu 14° C. Im Boden dagegen sind die Temperaturen viel ausgeglichener: in 5 cm Tiefe beträgt die tägliche Schwankung rund 10°, in 25 cm Tiefe 3°. Die Maxima und Minima unter der Erdoberfläche verschieben sich bis zu 4 Stunden. Wie schon bei den Mittelwerten festgestellt, unterscheiden sich die Werte der

relativen Feuchte (Abb. 16) mit der Höhe maximal nur um 10 %. Dagegen ist der Dampfdruck größeren Schwankungen unterworfen, wobei in den Vormittagsstunden Differenzen bis zu 2.4 mm Hg auftreten. In der Nacht werden die Unterschiede — von einer geringen Störung abgesehen — kleiner 0,5 mm.

2. 242 **Tagesgang im Gras.**

Erheblich stärkere Schwankungen finden wir beim Tagesgang im Gras (Abb. 17). Am Boden erreicht die Schwankung etwa 8°, während sie in der Vegetationsoberfläche in 36 cm Höhe auf 16,2° ansteigt. Der Temperaturgang im Boden zeigt, daß die Temperatur an der Erdoberfläche weitgehend durch Wärmeleitung im Boden bedingt ist. Nur zwischen 8 und 17 Uhr überschreitet die Temperatur der Oberfläche diejenige in 5 cm Tiefe. Zur Zeit des Tagesmaximum um 15 Uhr betragen die Differenzen zwischen 32 cm Höhe und Erdoberfläche 7,0°, zwischen 32 cm und 64 cm Höhe 1,7°. Während des abendlichen Temperaturrückganges kühlt die Luft rascher ab, wobei auch die obere Halmzone erfaßt wird, während die Temperatur am Erdboden nur langsam absinkt. Dampfdruck und Feuchtigkeit (Abb. 18) zeigen den normalen Typ. Über Nacht liegen die Werte eng beisammen, um erst bei Tag infolge Verdampfung wesentliche Unterschiede aufzuweisen. Die relative Feuchtigkeit geht in 32 cm Höhe von 95 % am Morgen auf 55 % am Mittag zurück, während der Wert in 2 cm Höhe nur wenig um 95 % schwankt. Auch hier erfolgt also ein fortlaufender Transport von Wasserdampf vom Boden her, zumal auch der Dampfdruckgang einen analogen Verlauf zeigt. Das nächtliche Minimum des Dampfdrucks in 16 cm Höhe läßt sich durch die Taubildung an den Grashalmen erklären.

2. 243 **Tagesgang über Asphalt.**

Während des täglichen Austausches sind die Temperaturunterschiede zwischen 1 und 64 cm Höhe außerordentlich gering (Abb. 19) und werden erst nach Erliegen des Austausches größer, um beim morgendlichen Minimum um 7 Uhr auf 1,5° anzusteigen. Daß unmittelbar an der Asphaltoberfläche keine höheren Temperaturen gemessen wurden, ist eine Folge der Beschattung der Thermoelements. Der Temperaturrückgang unter der Oberfläche weist größere Schwankungen auf. Durch die untergelagerte Steinpackung von etwa 5 cm Höhe sind Hohlräume entstanden, die offensichtlich durch Wärmeleitung zu einer stärkeren Veränderlichkeit der Temperatur führen.

Der tägliche Gang der Feuchtigkeit (Abb. 20) weist nur außerordentlich geringe Schwankungen auf, wie es infolge der nahezu porenlosen Oberfläche des Asphalts (Porenvolumen = 10 %) nicht anders zu erwarten war. Kurze Anstiege des Dampfdrucks in der bodennächsten Schicht sind durch Advektion zu erklären.

2. 25 **Kurzfristige Messungen.**

Analog den Messungen im Sommer 1949 wurden auch im Herbst 1950 an einem Nachmittag und an einem Vormittag Messungen in 5-minütlichen Abständen durchgeführt. Am Nachmitag des 5. Oktober waren einzelne Cirren am Himmel. Am 6. Oktober um Sonnenaufgang herrschte starker Nebel. Die Temperaturunruhe über Asphalt war am geringsten (Abb. 21). Über Sand traten am Nachmittag einige Kalt- und Warmluftbereiche auf, die aber nicht die Intensität der geschlossenen Tropfen des Sommers erreichten. Beim Gras bildet sich innerhalb der Vegetation eine in sich geschlossene Warmluftzone aus, die nur geringen Schwankungen unterworfen war.

Die schneenahe Luftschicht.

1 Anordnung und Wetterlage.

Eine Exkursion in das Hornisgrindegebiet im nördlichen Schwarzwald gab Gelegenheit zur Untersuchung der Luftfeuchtigkeit über, und der Temperatur über, in und unter einer Schneedecke. Die Messungen wurden am Nordosthang des Hochkopfes in einer flachen Mulde in 1000 m Höhe durchgeführt. Über 80 cm Firnschnee lagen 32 cm Neuschnee. Die Beob-

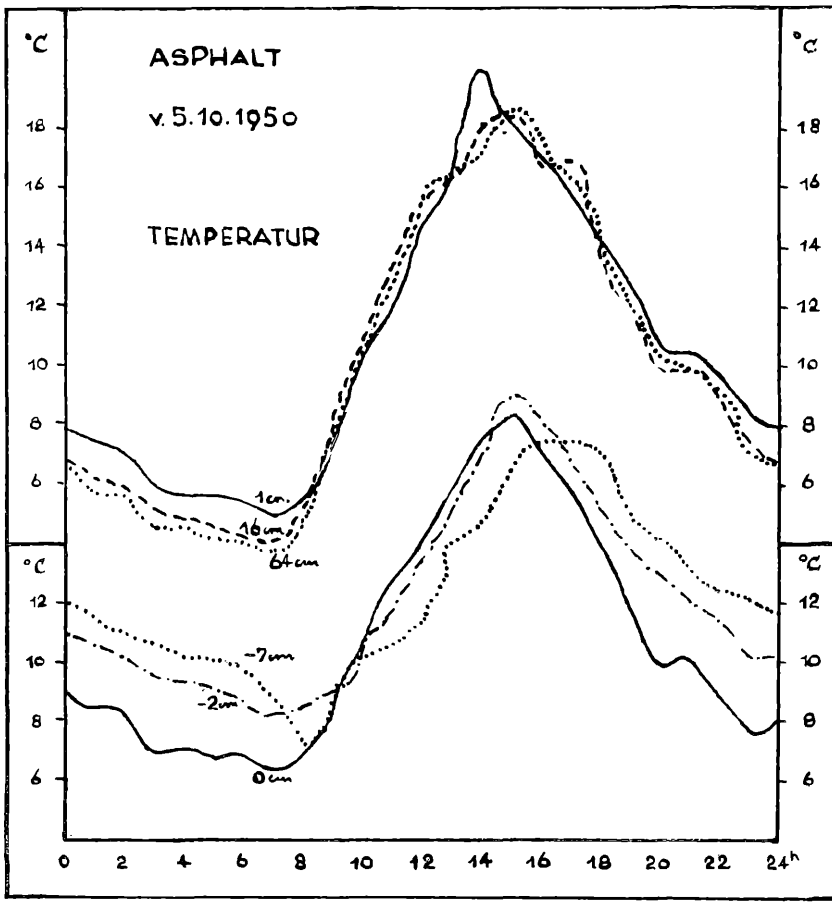

Abb. 19. **Gang der Temperatur in und über Asphalt.**

achtungen setzten am 27. 2. 1950, 14.15 Uhr nach Abschluß des Schneefalls ein und dauerten bis zum 8. 3. 1950 18.30 Uhr. Die Temperaturen wurden mit Thermoelementen gemessen und tags meist zur vollen Stunde abgelesen, während in der Nacht mit Ausnahme des 28. 2. / 1. 3. 1950 eine mehrstündige Pause eintrat. Die Messungen der Feuchtigkeit waren nicht so regelmäßig und begannen erst am 3. 3. 1950.

Die Wetterlage war während der ersten 5 Meßtagen stabil mit Temperaturen immer unter 0 °, sodaß der Schnee keine wesentlichen Metamorphose unterworfen war. Ab 3. 3. 50 wurde die Einstrahlung so stark, daß sich die Neuschneedecke innerhalb kurzer Zeit umkristallisierte und auf 12 cm zusammensackte.

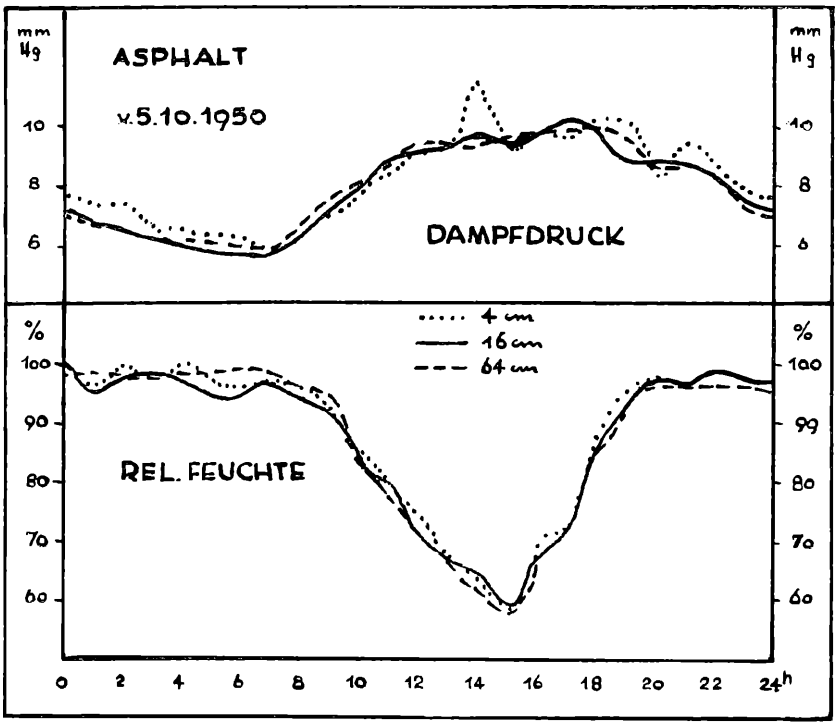

Abb. 20. **Gang der Feuchte und des Dampfdrucks über Asphalt.**

3. 2 Die Temperatur in und über der Schneedecke.

Die Temperaturen der Luft und der Schneedecke sind so eng miteinander verflochten, daß wir sie gemeinsam behandeln. In Abb. 22 sind die Isothermen in und über Schnee vom 27. 2. 50 bis zum 4. 3. 50 dargestellt, wobei der nächtliche Verlauf gestrichelt intrapoliert wurde. Über den Isothermen ist der Gang der Bewölkung gezeichnet. Die Isothermen der Luft finden unmittelbar unter der Schneeoberfläche ihre stetige Fortsetzung, womit ihr Verlauf dem einer feuchten Wiese ähnelt. Allerdings dringt dort der tägliche Gang nicht so tief in den Boden ein. Die nächtlichen Minima erreichen ihre tiefsten Werte unmittelbar in oder über der Schneeoberfläche. Das Minimum sinkt in den ersten drei Nächten mit Bewölkung auf — 12°, während in der 4. wolkenlosen Nacht nur — 8° erreicht wird. Durch die Lage am Rand eines Hochwaldes vermischen sich hier mikro- und makroklimatische Erscheinungen in unübersichtlicher Weise. Aus den Beobachtungen konnte unmittelbar der Temperaturgang in den verschiedenen Höhen

entnommen werden. In 118 cm über der Schneedecke nähert sich der Gang der Temperatur schon weitgehend den mit dem „Aßmann" gemessenen Kontrollwerten der Temperatur (in Abb. 23 die Kreuze). Die tägliche Schwankung beträgt 6—8°, in 28 cm Höhe steigt sie bis zu 10° an. Temperatur- und -abstieg erfolgen in kurzen Zeiten.

Die stärksten Temperaturschwankungen bis zu 12,5° treten an der Schneeoberfläche auf. Die mittäglichen Temperaturen steigen bis plus 0,5° an. Die zeitlichen Änderungen werden noch rascher, am 1. 3. 50 fällt die Temperatur zwischen 16—17 Uhr um 5,3°. Der Tagesgang in 22 cm unter der Schneeoberfläche zeigt schon wesentlich verkleinerte Amplituden, wobei die Maxima unter —1,2°, die Minima über —4,5° bleiben.

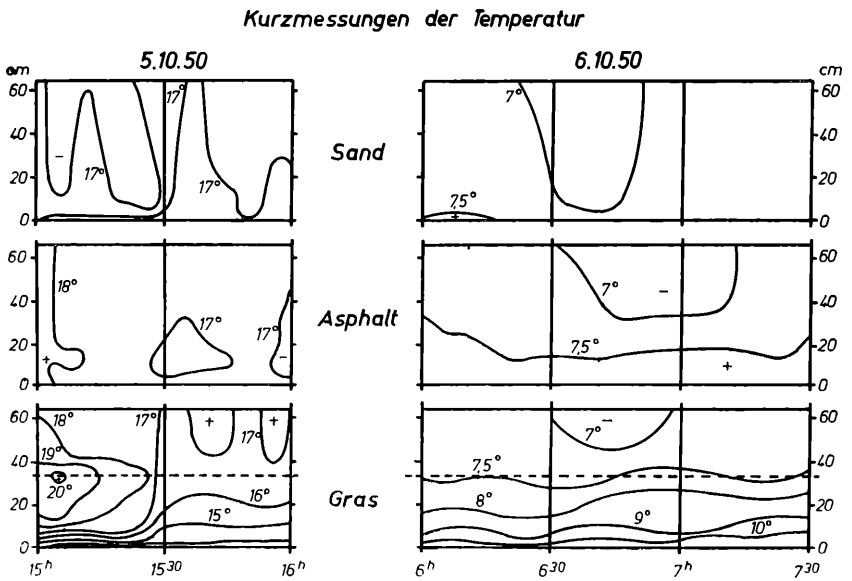

Abb. 21. **Temperaturunruhe.**

3. 3 Differenzen Schnee — Luft

In der Tab. 2 sind für die ungestörten Tage vom 27. 2. — 2. 3. 1950

Höhe	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
118 cm	— 9.1	— 9.1	— 9.2	— 8.1	— 5.7	— 4.4	— 4.1	— 3.7	— 6.6	— 8.4	— 8.5	— 8.7
28 cm	—10.7	—10.7	—10.6	— 9.9	— 6.0	— 3.1	— 3.6	— 5.7	— 7.9	—10.2	—10.4	—10.4
0 cm	—10.4	—11.0	—11.4	—11.0	— 7.4	— 3.0	— 0.6	— 1.2	— 6.5	— 9.2	— 9.7	—10.0
— 22 cm	— 2.9	— 3.2	— 3.3	— 3.3	— 3.1	— 3.0	— 2.9	— 2.0	— 1.8	— 2.1	— 2.2	— 2.6
Δ t	1.3	1.9	2.2	2.9	1.7	— 1.4	— 3.5	— 2.5	— 0.1	+ 0.8	1.2	1.3

Tab. 2 Mitteltemperaturen und Differenz $\triangle$ t 118 — 0 cm vom 27. 2.—2. 3. 1950

die mittleren Temperaturen und die Differenzen zwischen 118— 0 cm zusammengestellt. Diese Mittelwerte werden durch die Differenzen zwischen Luft in 3—118 cm Höhe und Schnee in Tab. 3 ergänzt. Die Auszählung wurde in einzelnen Temperaturstufen vorgenommen, und bei 91 Beobachtungsreihen war die Luft in 38 Fällen wärmer, in 26 Fällen nahezu gleich und nur in 27 Fällen kälter als der Schnee. Selbst bei Tauwetter war die

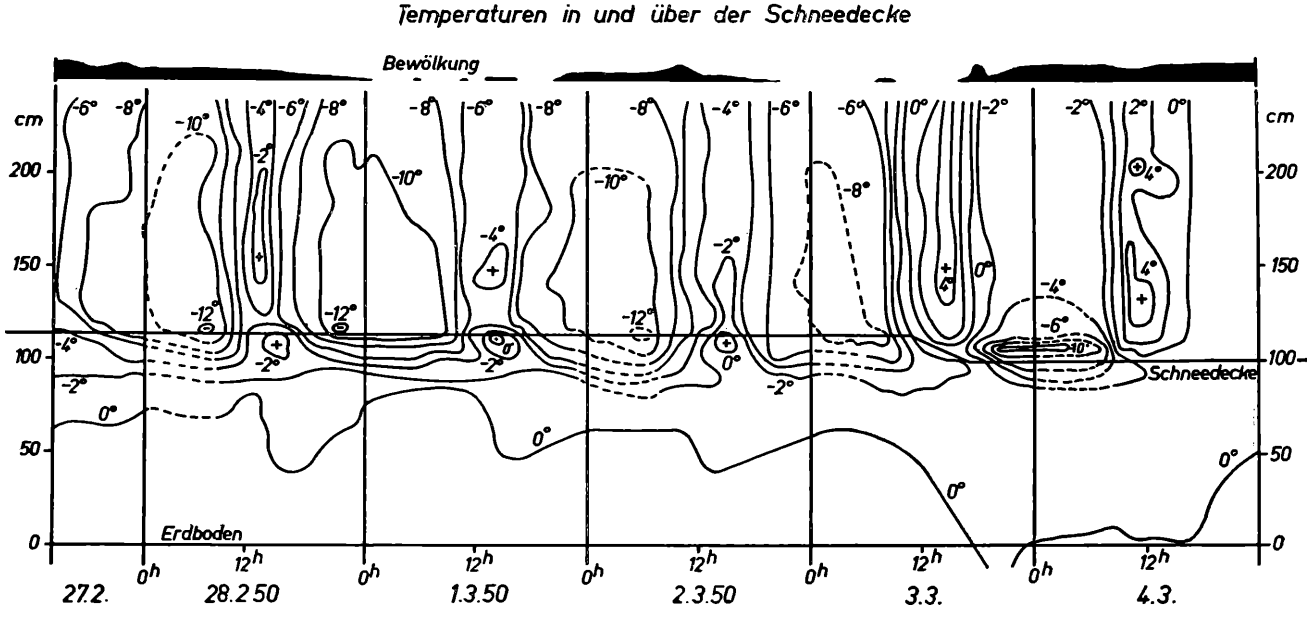

Abb. 22. Temperaturen in und über der Schneedecke.

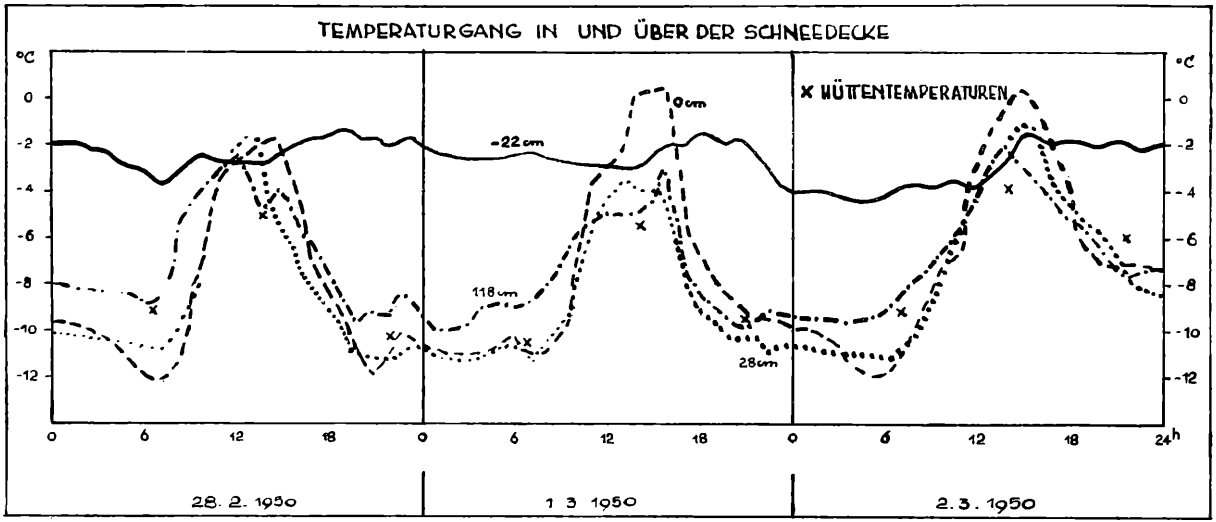

Abb. 23. **Gang der Temperaturen in und über der Schneedecke.**

	3 cm — Schnee Anzahl		Zeit	118 cm — Schnee Anzahl		Zeit
— 6°	1		16	—		—
— (6°—4°)	7		11—15	5		12—16
(4°—2°)	9	27	12—16, 20—21	6	19	11—17
— (2°—1°)	5		13—14, 17—18	8		13—14, 18—19
— (1°—1,5°)	5		18—22			—
— (0,5°—0°)	10	26	20—22, 11—14	3	10	—
(0°—0,5°)	16		19—23, 10—11	7		20—22
(0,5°—1°)	18		0—9, 13—18	4		22—1
1 — 2	9	38	7—12	16	55	20—7, 13—17
2 — 4	11		7—10, 13—16	22		7—13, 16—21
4 — 6	—		—	13		7—12, 20—22

Tab. 3 Temperaturdifferenzen Luft — Schnee

Schneeoberfläche auch während der Einstrahlung infolge Verdunstung kälter als die darübergelagerte Luft. In der Nacht sind die Unterschiede am geringsten, am Nachmittag am höchsten. Dabei zeigen die Werte der Tabelle deutlich, daß es nahezu gleichgültig ist, ob der Höhenunterschied 0—3 oder 0—118 cm beobachtet wird.

3. 4 Temperatur im Schnee über und in der Erdoberfläche

In Abb. 22 haben wir die Isothermen über und in der Schneedecke dargestellt. Da wir die Messungen gleichzeitig auf die darunterliegende Hochmoorschicht ausdehnen konnten, ergab sich ein einmaliges Bild über die Zusammenhänge im Temperaturgang, das über den beobachteten Zeitraum hinaus allgemeines Interesse hat. Am Ende der Meßreihe am 9. 3. 1950, 9.30 Uhr, wurden die in Tab. 4 wiedergegebenen Schneedichten gemessen.

Höhe über Boden (cm)	Schneedichte g/dm³
2	480
10	540
20	500
30	480
35	450
50	440
60	520

Tab. 4 Schneedichten

Der Schnee hatte eine schon weitgehende Verfirnung durchgemacht und die Lage der 0° Isotherme in rund 50 cm über dem Boden läßt den Schluß zu, daß die weitere Umkristallisation noch im Gange ist. In Tab. 5 sind die

Höhe/Zeit	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Mittel
+ 10 cm	0.2	0.3	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	— 0.2	— 0.2	— 0.2	0.0	0.4	0.15
— 10 cm	— 0.5	— 0.5	— 1.3	— 0.3	— 0.1	— 0.1	— 0.4	— 0.4	— 0.2	— 0.3	— 0.2	— 0.2	— 0.37

Tab. 5 Temperaturen in Firn + 10 cm und Moorboden — 10 cm.

Temperaturmittel im Firn und im Moorboden vom 27. 2. und 2. 3. 50 zusammengestellt. Die Erdschicht ist während der ganzen Zeit gefroren und um 0,5° kälter als der übergelagerte Schnee. Diese Messung steht im Widerspruch zu zahlreichen anderen Beobachtungen (69), (70), (71) und läßt sich nur so erklären, daß vor dem ersten Schneefall der Boden gefroren war und dann nicht mehr auftaute. Durch Verdunstung wurde in der Folgezeit so viele Wärme entzogen, daß mindestens während unseren Messungen sich der Frost hielt und 10 cm tief in den Boden eindrang.

3. 5 **Wärme- und Temperaturleitfähigkeit**

Die gleichzeitige Beobachtung der Schneedichte und der Oberflächentemperatur (Tab. 6) zeigt einen offensichtlichen Zusammenhang zwischen

	Schneedichte gr/dm³	Oberfl. Temp. um 07.20
28. 2. 1950	100	— 12.4°
1. 3. 1950	140	— 11.1°
2. 3. 1950	140	— 11.3°
3. 3. 1950	160	— 8.3°
4. 3. 1950	220	— 4.5°

Tab. 6 Schneedichte und Oberflächentemperatur

der Oberflächentemperatur und der Schneedichte: Mit der höheren Schneedichte nimmt die Temperaturleitfähigkeit zu. J. BRACHT (7) hat die Beziehung $S = 0.0049 \ \varrho^2$ aufgestellt und da die Temperaturleitfähigkeit $K = \frac{\lambda}{c \ \varrho}$ ist, wird $K = 0.00974 \ \varrho$ wenn wir für die spez. Wärme c des Schnees 0,504 cal/° C einsetzen.

Mit Hilfe der harmonischen Analyse des Temperaturganges im Schnee in 0, 12 und 22 cm Tiefe am 1. 3. 1950 und im 3tägigen Mittel ergibt sich die Temperaturleitfähigkeit zu den in Tab. 7 zusammengestellten Werten. Wenn wir für die Schneedichte einen mittleren Wert von 0,25 gr/cm³ einsetzen, erhalten wir nach den Ansätzen von BRACHT in Tab. 7 die Werte der beiden letzten Spalten. In der Schicht 0—12 cm ist die nach unserer Methode bestimmte Temperaturleitfähigkeit größer als nach BRACHT. Wir haben es

		unsere Messung K	nach Bracht K	nach Bracht λ
1. 3. 50	0—12 cm	0.0085		
	12—22 cm	0.0026		
	0—22 cm	0.0072	0·0024	0.00034
3-tägig. Mittel	0—22 cm	0.0071		

Tab. 7 Temperaturleitfähigkeit im Schnee.

mit der Störungsschicht (P. LEHMANN (43) zu tun, in der die Einflüsse der Luft und der Oberfläche sich stark auswirken. In der Schicht darunter stimmen die Ergebnisse sehr gut mit denen bei GEIGER (22), BRACHT (7), HANN-SÜRING (29) und NIEDERDORFER (47) angegebenen Werten überein.

3. 6 **Die Feuchte über Schnee**

Die Messungen der Feuchte über der Schneedecke waren durch die exponierte Lage der Meßstelle mit Schwierigkeiten verbunden und beschränkten sich deshalb auf einzelne windschwache Tage, bei denen sich der Einfluß der Wetterlage stark durchsetzte.

Am 3. 3. 50 (Abb. 24) kam nach einem strahlungsklaren Tag gegen 17 Uhr stärkere Bewölkung auf, die am Abend wieder auf 2/10 zurückging. Erst in der Nacht um 21 Uhr stieg die Bedeckung auf 8/10 an. Das Temperaturmaximum wurde um 15 Uhr erreicht, leichter Wind sorgte zusammen mit der Strahlung für lebhaften Austausch. Entsprechend bildete sich keine

ausgeprägte Dampfdruckverteilung aus und die relative Feuchtigkeit hatte ihr Minimum z. Zt. des Temperaturmaximums. Am Abend stieg die relative Feuchte mit der Bewölkungszunahme bis 18 Uhr rasch auf 70 % an, um dann nochmals auf 40 % zurückzugehen. Der Dampfdruck betrug in Hüttenhöhe um 14 Uhr 3,5 mm Hg, um 21 Uhr 1,9 mm. Temperatur und Bewöl-

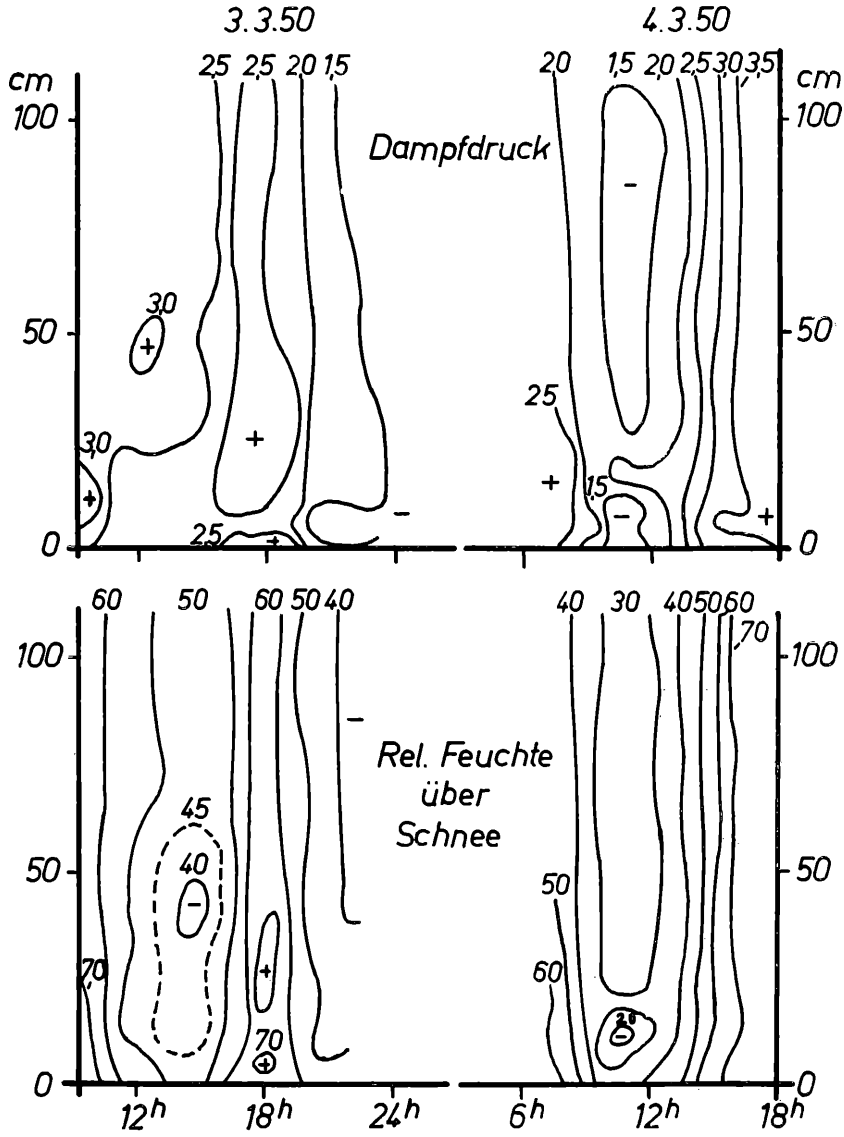

Abb. 24. **Feuchte und Dampfdruck über der Schneedecke.**

kung wiesen am Nachmittag auf föhniges Absinken der Luft hin, das zu der starken Austrocknung führte, aber nicht in die untersten 10 cm eindringen konnte.

In der Nacht zum 4. 3. und am 4. 3. 50 erfolgte ein Ci- und später Sc-Aufzug, der den ganzen Himmel bedeckte und am späten Nachmittag zu leichtem mit Schnee vermischten Regen führte. Temperaturzu- und Feuchteabnahme werden in den Vormittagstunden abgebremst, die Feuchtigkeit nimmt bis zum beginnenden Niederschlag stark zu. Der Dampfdruckgang ist analog.

Die beiden Strahlungstage am 6. und 8. 3. 50 zeigen den ungestörten Verlauf der relativen Feuchte (Abb. 25). Die Minima liegen z. Zt. der höchsten Lufttemperatur, der Anstieg der Feuchte am Abend führt zu Sättigung in der ganzen bodennahen Schicht.

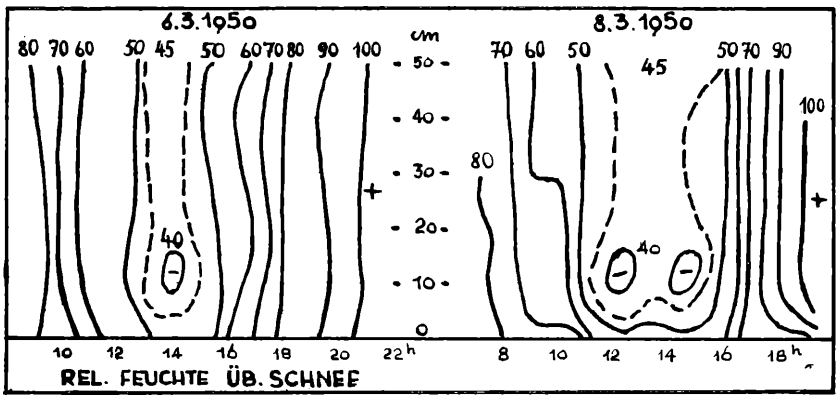

Abb. 25. **Feuchte über Schnee.**

4. Die wassernahe Luftschicht.

4. 1 Vorversuche.

Über einer Wasserfläche wurden im Laboratorium in 2, 12, 22, 32, 42, 52, 73, 102 und 152 mm Höhe Temperatur und Feuchte und in 2 mm Wassertiefe die Temperatur gemessen. Die Wassertemperatur wurde von 17,6° auf 25,8, 31,3, 39,8 und 47,3° C erhöht, während die Lufttemperatur im Raum über die Versuchsdauer gleichmäßig 22,6° bei 72 % relativer Feuchte betrug.

Die Ergebnisse zeigen wieder ganz eindeutig eine Schicht (Abb. 26) von 0 — etwa 2 cm, in der das stärkste Gefälle des Dampfdrucks und der relativen Feuchte auftritt. Über dieser Grenzschicht setzt der Austausch ein und verlangsamt die Feuchteabnahme mit der Höhe.

Durch die Verdunstung in der Wasseroberfläche entsteht ein hoher Wärmebedarf, der z. T. aus der unmittelbar überlagerten Luftschicht gedeckt wird, wie der Temperaturverlauf in der Grenzschicht zeigt. In der Schicht oberhalb 2 cm setzt der Austausch ein und es ergibt sich bei den hohen Wassertemperaturen von 39,8 und 43,7° eine stark veränderliche Schichtung der Lufttemperatur. Wenn auch in der Natur so extreme Unterschiede zwischen Wasser- und Lufttemperatur wie in den beiden letzten Fällen nicht auftreten, so zeigen doch alle Messungen die Möglichkeiten und Grundzüge des Wasserdampfhaushaltes über einer Wasserfläche auf.

4. 2 **Messungen über einem See.**

Die Versuche im Laboratorium wurden auf einem in der Nähe von Karlsruhe gelegenen Baggersee von 150×50 m und einer Tiefe von 12 m ausgedehnt. Nur das Ostufer des Sees verläuft flach, sodaß in 8 m Entfernung vom Ufer bei 1,2 m Wassertiefe die Meßanordnung wie bei allen übrigen Messungen aufgebaut werden konnte. Über Wasser wurde in 50, 37, 25, 17, 11, 7, 4 und 2 cm Höhe Temperatur und Feuchte, unter Wasser in —1, —7 —20, —40, —70 cm und schließlich 10 cm unter dem Seeboden die Temperatur gemessen.

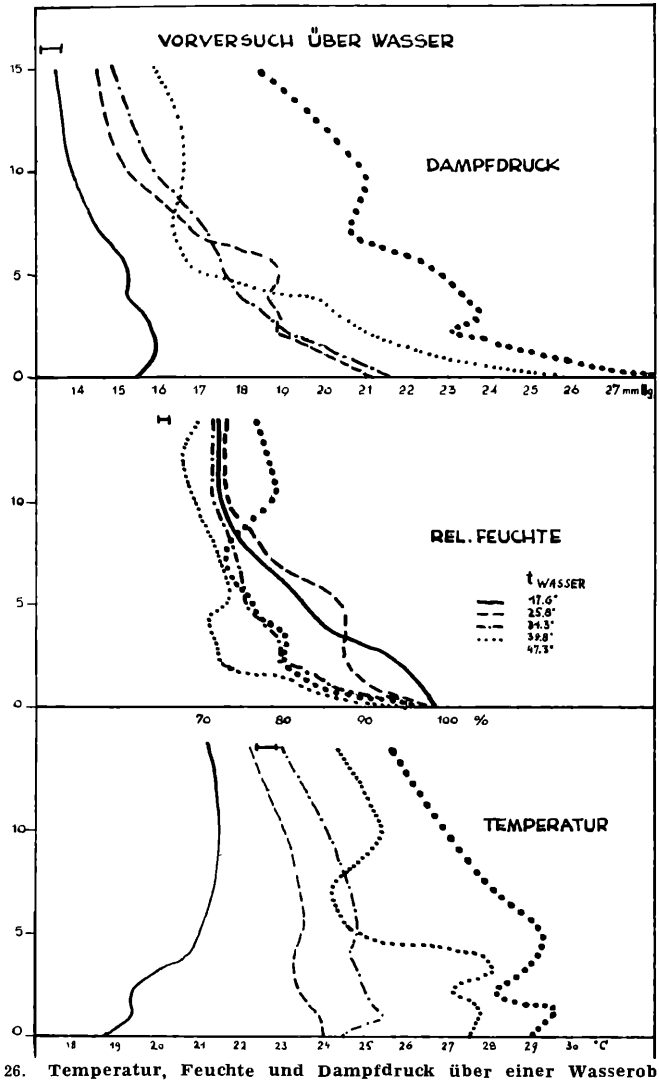

Abb. 26. **Temperatur, Feuchte und Dampfdruck über einer Wasseroberfläche.**

4. 21 **Temperatur.**

Die Messungen von KUHLBRODT und REGER (2) haben gezeigt, daß über dem freien Meere die täglichen Temperaturschwankungen kleiner als 1° sind. Demgegenüber ist bei einem kleinen See die Strahlungseinwirkung so groß, daß bereits die tägliche Schwankung der Wassertemperatur 2,5° beträgt und sich bis zum Seeboden fortpflanzt. In Tab. 8 sind Mittelwerte der

	Wasser						Luft				
	Boden	— 70	— 40	— 20	— 7	— 1	2	4	11	25	50 cm
Maximum	25.7	26.3	26.3	26.3	26.2	26.2	28.0	27.6	27.6	28.1	27.7
Mittel	24.6	24.9	25.1	24.9	24.9	25.0	22.4	22.3	22.1	22.0	22.0
Minimum	23.3	23.7	23.8	23.7	23.9	23.8	16.5	16.2	15.9	15.6	15.4
Schwankung	2.4	2.6	2.5	2.6	2.3	2.4	11.5	11.4	11.7	12.5	12.3

Tab. 8 Mitteltemperaturen in Wasser und Luft.

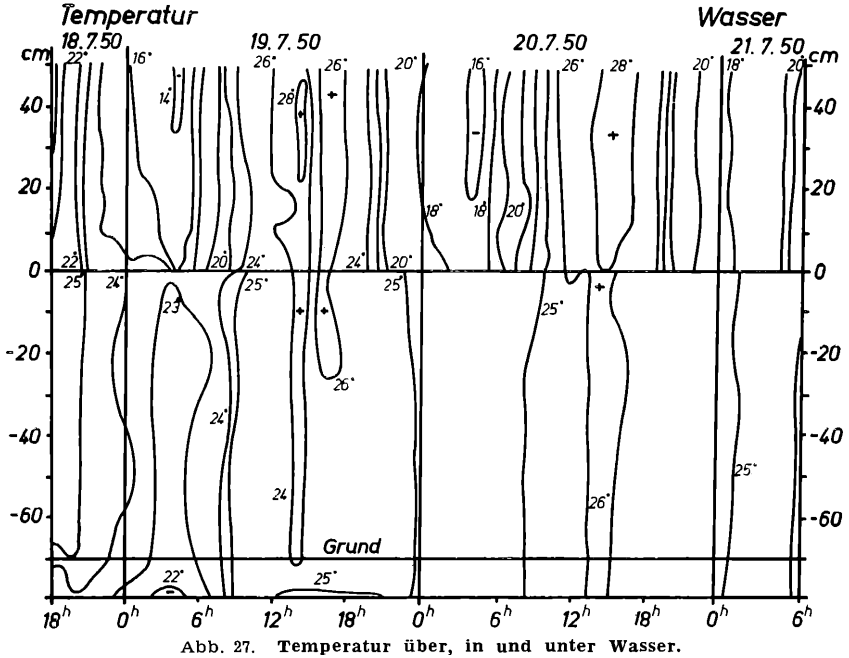

Abb. 27. **Temperatur über, in und unter Wasser.**

Temperatur für die 4 Meßtage 18. 7. bis 21. 7. 50 zusammengefaßt. Es zeigt sich deutlich, daß in diesem See nicht die Wärmeleitung sondern fast ausschließlich der Wärmeaustausch maßgeblich ist. Der Temperaturgang (Isothermen Abb. 27) pflanzt sich bis zum Boden fort, dringt in ihn ein und führt dort noch zu erheblichen Schwankungen. Um die Mittagszeit ist die Lufttemperatur höchstens um 2° wärmer als das Wasser, während sie sich bei Nacht bis zu 8° unter die Wassertemperatur abkühlt. Die tägliche Schwankung hat ihr Maximum zwischen 25—40 cm Höhe und erreicht dort im Mittel 12,5°. Bis zu dieser Höhe überwiegt der Einfluß des Wassers, darüber gleicht sich die Temperatur an die großklimatischen Verhältnisse an, wie wir es ähnlich bei der Wirkung der Grasdecke gefunden haben. Die Grenzschicht über Wasser findet bei den Betrachtungen der Luftfeuchtigkeit und des Seerauchens eine weitere Bestätigung.

4. 22 **Feuchtigkeit**

Die Isohypsen der relativen Feuchte und des Dampfdrucks (Abb. 28) lassen die Grenzflächen zwischen 25—40 cm deutlich erkennen. Hier enden die von unten her reichenden nächtlichen Sättigungsgebiete und es beginnen nach oben die Zonen größerer Trockenheit. Oberhalb der Grenzfläche werden die Schwankungen des Dampfdrucks und der relativen Feuchtigkeit rasch größer (Tab. 9). Die Übertemperatur des Wassers läßt bei Nacht erst

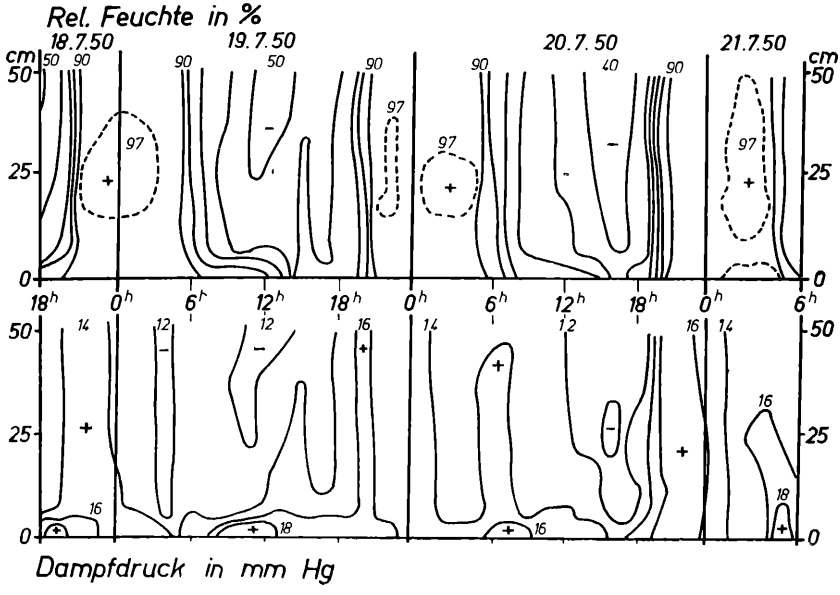

Abb. 28. **Feuchte und Dampfdruck über Wasser**

	Höhe	4	11	25	50 cm
Dampfdruck mm Hg	Maximum	16.5	15.8	15.6	15.6
	Mittel	14.5	13.6	13.4	13.0
	Minimum	13.0	12.1	11.3	10.8
	Schwankung	3.5	3.7	4.3	4.8
relative Feuchte %	Maximum	95	95	98	95
	Mittel	75	71	71	69
	Minimum	50	45	41	39
	Schwankung	45	50	57	56

Tab. 9 Dampfdruck und relative Feuchte über Wasser.

oberhalb 15 cm Sättigung der Luft zu, die in 25 cm Höhe ihr Maximum erreicht. Unterhalb dieser Schicht steigt die relative Feuchte maximal auf 92 % an, während der Dampfdruck an der Wasseroberfläche seine höchsten Werte hat. Mit der zunehmenden Erwärmung der Luft wird die Verdunstung der Wasseroberfläche stärker, der Dampfdruck steigt von unten her an. Dabei bildet sich eine dreifache Welle des Dampfdruckganges aus, die

nur so zu erklären ist, daß nach dem Frühminimum der Temperatur die Verdunstung sehr intensiv ist, während der Austausch erst um Stunden später einsetzt und die Grenzfläche in etwa 25 cm Höhe als Sperrschicht wirkt.

4. 23 Beobachtungen bei Seerauchen

Bei den Beobachtungen am Baggersee konnten wir im Hochsommer Seerauchen feststellen, das nach ROSSMANN (57) sonst auf die Übergangsjahreszeiten beschränkt ist. ROSSMANN beschreibt für den „Sandsee" südlich Karlsruhe den Vorgang wie folgt:

„Über Nacht hat sich die Luft infolge Ausstrahlung über den Uferflächen stark, über Wasser dagegen nur wenig abgekühlt. Am Morgen gleitet die kalte Luft bei Landwind über die Wasseroberfläche, allerdings zunächst nur in einer Schicht von 10 cm Höhe mit genügend kleiner Reibung. Die warme wasserdampfgesättigte Luft über dem Wasser dringt nun infolge ihres thermischen Auftriebs in die darüberliegende kalte Luftschicht ein und kondensiert dabei ihren Wasserdampf. Der Austausch geht stoßweise vor sich." Die Temperatur und der Dampfdruck (Tab.10) in den Morgenstunden des

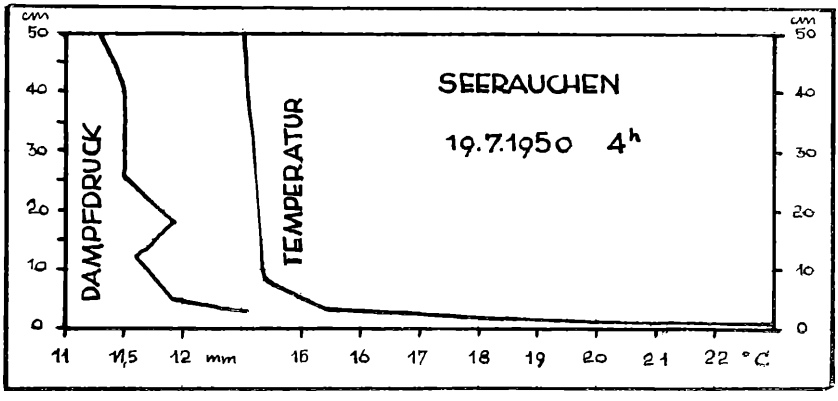

Abb. 29. **Temperatur und Dampfdruck bei Seerauchen.**

Zeit	Temperatur				° Celsius			Dampfdruck mm Hg				Wind	Obergrenze
	Wasser	2	4	7	11	25	50 cm	2	7	25	50 cm		Seerauchen
19. 7. 50:													
03.00	23.0	18.0	17.0	15.9	15.6	15.2	15.0	14.7	13.0	12.5	12.3	C	50 cm
04.00	23.0	15.6	15.0	14.4	14.4	14.3	14.0	12 6	11.8	11.5	11.3	C	40 cm
05.00	23.4	17.6	17.1	16.5	15.8	15.4	15.1	13.1	13.3	12.9	12.4	1	30 cm
20. 7. 50:													
04.00	24.0	17.4	16.7	16.3	16.4	15.8	15.8	14.1	13.3	13.3	13.0	1	

Tab. 10 Temperatur und Dampfdruck bei Seerauchen.

19. 7. und des 20. 7. 50 entsprechen etwa den Forderungen von ROSSMANN, nur bleibt nach unseren Beobachtungen der „Landwind" aus. Nur der thermische Auftrieb führt zur Nebelbildung, setzt in den Ecken und Buchten ein und breitet sich langsam über den See aus.

Um die wassernahe Grenzschicht in ihrem Einfluß auf das Seerauchen deutlich zu machen, haben wir die Werte vom 19. 7. 50, 04.00 Uhr in Abb. 29

gezeichnet. Die aufsteigenden Nebelwölkchen stoßen nur selten über die Grenzfläche hinaus, deren Höhe etwa zwischen 25 und 40 cm schwankt (Abb. 30 [s. Tafel I], um 4. 00, eine Stunde vor Sonnenaufgang).

Zusammenfassung.

Mit Thermoelementen und Kleinhygrometern wurden die Temperaturen und Feuchteverhältnisse über Sand, Gras, Asphalt, Schnee und Wasser gemessen und dabei die Abhängigkeit von Wetterlage und Jahreszeit beobachtet. Das Auftreten bestimmter Typen der Dampfdruckverteilung wird durch den Austausch verursacht. Über Gras liegt das Maximum der Temperatur und Feuchte in der Obergrenze der Halme, beim unbewachsenen Boden in der Erdoberfläche. Über Wasser bildet sich zwischen 25—30 cm Höhe eine Grenze des Einflusses der Wasseroberfläche aus.

SCHRIFTTUM

(1) **F. Albrecht,** Die Weiterentwicklung der Meßtechnik d. Wassergehalts des Bodens auf therm. Grundlage.
Archiv f. Met., Geoph. u. Bioklimat. 1, 148—155, 1949.

(2) **A. v. Anderko,** Die Wärmebewegung im pseudo-isotrop. Erdboden.
MZ **30,** 580, 1913.

(3) **A. Angström,** Über Variationen der atmosp. Temperaturstrahlg. und ihren Zusammenhang mit der Zusammensetzung der Atmosphäre
Gerl. B. **21,** 145—161, 1929.

(4) — On the rediation and temperature of snow and the convection of the air at its surface.
Arkiv of Matematik, Astronomi or Fysik, **13,** Nr. 21, 13.
Referiert v. A. Defant in MZ **36,** 153, 1919.

(5) — Über die Gegenstrahlg. der Atmosphäre.
MZ **33,** 529—538, 1916.

(6) **H. Berg,** Messgn. der Austauschgröße d. bodennahen Luftschichten.
Beitr. Ph. d. fr. Atmosph. **23,** 143—164, 1936.

(7) **J. Bracht,** Über die Wärmeleitfähigkeit d. Erdbodens und des Schnees den Wärmeumsatz im Erdboden.
Veröff. Geoph. Ins. Leipzig, XIV, Heft 3. 1949.

(8) **H. Brauckhoff,** Die Messg. d. Luftfeuchtigkeit mittels Haarhygrometer W. u. K., **2,** 33—37, 1949.

(9) **H. Bruch,** Die vertikale Verteilg. v. Windgeschw. u. Temp. in den untersten Metern ü. d. Wasseroberfläche. Veröff. Inst. f. Meereskunde, Reihe A, **Heft 38,** 1940.

(10) **W. Budig,** Beschirmung v. Bodenthermometern gegen nächtl. Ausstrahlung. Veröff. Pr. Met. Inst. **Nr. 294,** 1917.

(11) **A. Büdel,** Der Strahlungsschutz am Thermometer.
Z. f. ang. Met. **50,** 225—230, 1933.

(12) — Feuchtemessgn. i. d. bodennahen Luftschicht.
Z. f. ang. Met. **48,** 289—293, 1931.

(13) **A. Defant,** Die nächtl. Abkühlung der untersten Luftschichten u. d. Erdoberfl. in Abhängigkeit v. Wasserdampfgehalt d. Atmosph.
MZ **35,** 224—245, 1918.

(14) — Zum tägl. Gang der relativen Feuchte.
MZ **32,** 61—69, 1915.

(15) **M. Diem,** Gang der relat. Feuchtigkeit in der bodennahen Luftschicht im Gras u. ü. nacktem Humus.
Im Erscheinen: Archiv Met., Geoph. Biokl.

(16) **A. Dobrowsky**, Über eine modellmäßige Darstellung des Eindringens der periodischen Temperaturschwankungen d. Erdboden. MZ **61**, 91—97, 1944.

(17) **G. S. Eaton**, High relat. temp. of pavements surfaces. M. W. Rev. 47, 801—802, 1919.

(18) **E. Etienne**, Geophys. Arbeiten auf einer Grönland-Expedition. Veröff. Geoph. Inst. Leipzig, 2. Ser. XIII 1938.

(19) **G. Falkenberg**, Der Einfluß der Wellenlängentransformation auf das Klima bodennaher Luftschichten u. a. Temperatur der freien Atmosph. MZ **48**, 341—346, 1931.

(20) **M. Franssila**, Mikroklimat. Untersuchungen des Wärmehaushalts. Helsinki 1936.

(21) **R. Geiger**, Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 1942.

(22) — Mikroklima und Pflanzenklima. Hb. d. Klimatologie **I. D**, Berlin, Bornträger 1930.

(23) — Die Temperaturverh. an niederschlagsfreien, sonnenscheinreichen Sommertagen. MZ **54**, 278 ff., 1937.

(24) — Mikroklimatologie. Z. f. ang. Met. **45**, 74—85, 1928.

(25) — Über selbständige und unselbst. Mikroklimate. MZ **46**, 539 ff., 1929.

(26) — Mikroklimatische Beschreibung d. Wärmeschichtung am Boden. II. Mitteilg. MZ **54**, 133—138, 1937.

(27) **J. Hann**, Meteorologie von Fernando Noronha. Wiener Akademie, Akad. Anzeiger 1914, XII.

(28) **Hann-Süring**, Lehrbuch d. Meteorologie, 4. Aufl. Anhang, Leipzig 1926.

(29) — Leipzig 1926. 5. Aufl. 104, Leipzig 1937.

(30) **W. Haude**, Temperatur und Austausch d. bodennahen Luftschicht über einer Wüste. Beitr. Ph. fr. Atm. **21**, 129—142, 1934.

(31) **E. Hiltner**, Der Tau und seine Bedeutung f. d. Pflanzenwuchs. Wiss. Arch. f. Landwirtschaft. **A 3, Heft 1**

(32) **Th. Homén**, Der tägl. Wärmeumsatz im Erdboden u. d. Wärmestrahlung zw. Himmel u. Erde. Leipzig 1897.

(33) — Bodenphysikal. u. met. Beobachtungen mit bes. Berücksichtigung d. Nachtfrostphänomens. Berlin 1894.

(34) **D. E. Howell u. R. Craig**, A small hygrometer. Science **89**, 544, 1939.

(35) **G. Joos**, Lehrbuch der theoretischen Physik. 6. Aufl. 427—428, Leipzig 1945.

(36) **Lord Kelvin**, Report of the Treasuree Committee. London 1877, S. 94.

(37) **J. Keränen**, Wärme- und Temperaturverhältnisse der obersten Bodenschichten. (Einf. i. d. Geophysik II). Berlin, J. Springer, 1929.

(38) — Über die Temperatur d. Bodens u. d. Schneedecke in Sodankylä nach Beob. m. Thermoelementen. Ann. acad. scient. Fennicae, Ser. A 13,, Nr. 7. Helsinki 1920.

(39) **W. Knochenhauer**, Mikroklimat. Ergänzungen zu: Inwieweit sind die Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen unserer Flughäfen, repräsentativ? Erf. Ber. d. Deutsch. Flugwetterdienstes, 9. Folge Nr. 2, 1934.

(40) **W. Koch,** Messungen der Luftfeuchtigkeit mit Thermoelementen ohne künstl. Belüftung.
Gesundheits-Ingenieur, **59,** 1936.

(41) **C. Koppe,** Über Feuchtigkeitsbestimmgn. m. Hilfe d. Psychometers u. d. Haarhygrometers u. ü. eine sehr zweckmäßige Verbindung beider Instrumente. Östr. Z.Met. 13, 1878.

(42) **E. Kuhlbrodt u. J. Reger,** Die met. Beob. in „Wissensch. Ergebn. der Deutsch. Atlant. Expedition a. d. Meteor 1925—1927", **14,** Berlin 1938

(43) **K. Lehmann,** Abhandlung über Bodentemperaturen.
Veröff. Geoph. Inst. Leipzig XV, Jubiläumsband 79—92, 1949.

(44) **S. L. Malurkar u. L. A. Ramdas,** Theory of extremely high lapserates of temp. very near the ground.
Indian J. of Physcs **6,** 495—508, 1931.

(45) **A. Merz,** Die Oberflächentemperatur der Gewässer.
Veröff. Inst. f. Meereskunde Berlin **5,** 1920.

(46) **F. Möller,** Über den tägl. Gang d. Dampfdrucks u. seine interdiurne Veränderlichkeit.
MZ **54,** 124—133, 1937.

(47) **E. Niederdorfer,** Messgn. d. Wärmeumsatzes über schneebedecktem Boden. MZ **50.** 201 ff., 1933.

(48) **W. Paeschke,** Mikroklimat. Untersuchungen innerhalb und dicht über verschiedenartig. Bestand.
Bioklim. B. **4,** 155—163, 1937.

(49) **W. Peppler,** Die Temperaturverh. bei Seerauchen ü. d. Bodensee. Ann. Hydr. u. marit. Met. **54,** 198 ff, 1926

(50) **H. Philipps,** Zur Theorie der Wärmeströmung in Bodennähe.
Gerl. B **56,** 229—319, 1940.

(51) **P. Raman,** Heat radiation from the clear atmosph. at night.
Proc. Indian Acad. Sciences **1,** 815—821, 1935.

(52) **K. R. Ramanathan u. L. A. Ramdas,** Derivation of Angströms formula f. atm. radiation and some general consid. regarding nocturn cooling of air-layers near the ground.
Proc. Indian Acad. Sciences **1,** 822—829, 1935.

(53) **L. A. Ramdas,** The variation with height of the water vapour content of the air-layers near the ground of Poona. Bioklim. B. **5,** 30—34, 1938.

(54) — **u. S. Atmanathan,** The vert. distrib. of air temp. near the ground during night.
Gerl. B. **37,** 116—117, 1932.

(55) **U. Roll,** Zur Frage d. tägl. Temperaturgangs und des Wärmeaustausches i. d. unteren Luftschichten über dem Meere.
Archiv d. d. Seewarte **59,** Heft 9, 1939.

(56) **V. Rossi,** Über mikroklimat. Temperatur- und Feuchtigkeitsbeobachtungen mit Thermoelementpsychrometern.
Soc. Scient. Fennica, Comm. Phys. Math. **6,** Nr. 25, 1933.

(57) **F. Roßmann,** Beobachtungen über Schneerauchen und Seerauchen.
Z. f. ang. Met. **51,** 309—317, 1934.

(58) **R. Rubenson,** Temp. u. Feuchtigkeitsverh. in den untersten Luftschichten bei der Bildung des Taus.
MZ **11,** 65—75, 1876.

(59) **W. Schmidt,** Über Boden- und Wassertemperaturen.
MZ **44,** 406—411, 1927.

(60) **W. Shouljekin,** The evaporation of Seewater and the thermal Intercourse between the Sea and Atmosphere.
Gerl. B. **20,** 99—122, 1928.

(61) **S. Siegel**, Messgn. d. nächtl. therm. Gefüges i. d. bodennahen Luftschicht. Gerl. B. **47**, 369—399, 1936.
(62) **J. Siegenthaler**, Bodentemp. in Anhängigkeit v. äußeren met. Faktoren. Gerl. B. **40**, 305—333, 1933.
(63) **J. Stephan**, Das Tauproblem (Sammelreferat). Bioklim. B. **5**, 75—81, 1938.
(64) **R. Süring**, Leitf. d. Met. 405, Leipzig 1927.
(65) — Der tägl. Temperaturgang in geringen Bodentiefen. Veröff. Pr. Met. Inst. Nr. 302, Abh. 5, Nr. 6, Berlin 1919.
(66) **H. Wald**, Ein Psychrometer ohne künstl. Belüftung. Z. ges. Kälte-Industrie, **39, 1932.**
(67) **E. Wollny**, Unters. ü. d. Einfluß d. oberfl. Abtrocknung des Bodens auf dessen Temp. u. Feuchtigkeitsverhältnisse. Forsch. a. d. Gebiet d. Agrikulturphysik III, Heft 4/5, 1880.
(68) **G. Wüst**, Temperatur- und Dampfdruckgefälle in d. untersten Metern über der Meeresoberfläche. MZ 54, 4—9, 1937.
(69) **W. Paulcke**, Prakt. Schnee- u. Lawinenkunde, Springer, Berlin 1938.
(70) **J. Neher**, Schneeuntersuchungen im Gelände. Beitr. z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie, Lief. 3.
(71) **O. Eckel, Chr. Tams**, Untersuchungen über Dichte-, Temperatur- und Strahlungsverhältnisse der Schneedecke in Davos. Beitr. z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie, Lief. 3.

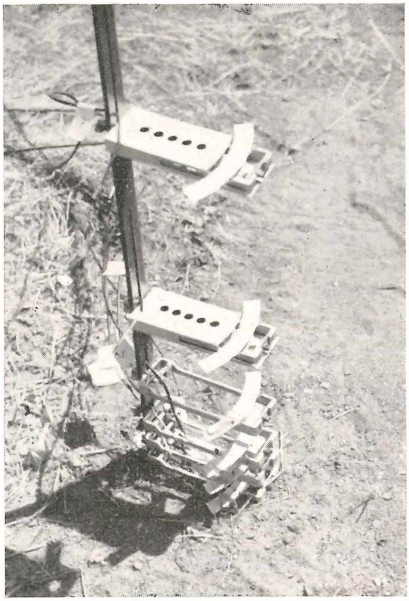

Abb. 1. Anordnung der Thermoelemente und Haarhygrometer

Abb. 30. Seerauchen, 19. 7. 1950, 04.00 Uhr

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Beiträge zur naturkundlichen Forschung in Südwestdeutschland

Jahr/Year: 1951

Band/Volume: 10

Autor(en)/Author(s): Vieser Walter

Artikel/Article: Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in bodennahen Luftschichten 3-34