

Berichte
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 73
(Band 10)

DK 551.506.22 : 551.52 + 551.573

**Beiträge zum Internationalen
Geophysikalischen Jahr
1957/58**

**1. Meß-Ergebnisse und Berechnungen zum Wärmehaushalt
der Erdoberfläche**

von

Ernst Frankenberger

(mit 43 Abbildungen und 10 Tabellen im Text
sowie 10 Tabellen im Anhang)

Offenbach a. M. 1960
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	3
Abstract	3
1. Zum Forschungsthema und seiner Behandlung	4
2. Liste der verwendeten Formelzeichen	4
3. Beschreibung der Meßfelder	6
4. Beschreibung der Meßmethoden, ihrer Fehlergrenzen und der gebotenen Kontrollmöglichkeiten	7
4.1. Das Wärmehaushalts-Meßverfahren nach Sverdrup- Albrecht und seine Voraussetzungen	7
4.1.1. Die elektrischen Psychrometer und Hygrometer	8
4.1.2. Kontrollen, die auf dem Tagesgang der Schwankungsbreite beruhen	9
4.1.3. Die Strahlungsbilanzmesser	10
4.1.4. Die Messung der Bodenkomponente des Wärmehaushalts ..	11
4.2. Mittelbare Austauschmethoden	14
4.3. Zur Bestimmung der Schmelzwärme pro Flächen- und Zeit- einheit	15
4.4. Unmittelbare Austauschmethode	16
5. Ergebnisse der Registrierungen am Quickborner Wiesen- Meßfeld	25
6. Ableitung von Grundlagen zur Berechnung der Landes- verdunstung	26
6.1. Die Bodenkomponente des Wärmehaushalts	27
6.2. Die Strahlungsbilanz verschiedener Bestände	28
6.3. Gesetzmäßigkeiten des Wärmeübergangs	30
6.4. Zur Verdunstung der Wälder	36
7. Zur Ausführung der Berechnung des Landes-Wärme- haushaltes	36
Literatur	41
Anhang 1—10	

Anschrift des Verfassers:

Dr. E. Frankenberger, Quickborn/Holst., Bahnhofstr. 31

Zusammenfassung

Beim Deutschen Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hamburg, sind mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft e. V., Bad Godesberg/Rh., während des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 die Komponenten des Wärmehaushalts der Erdoberfläche laufend am Wiesenmeßfeld Quickborn bei Hamburg und täglich abwechselnd auf Versuchsfeldern mit Acker, Stoppeln, Kartoffeln, Roggen, Klee, Hafer und Rüben gemessen worden, die 20 km nördlich bei Lentförden/Heidmoor liegen und dem Institut für Futterbau der Bundesanstalt für Milchwirtschaft gehören.

Es wurden drei verschiedene Methoden angewendet, nämlich das von Sverdrup-Albrecht benutzte, auf vertikalen Gradientmessungen fußende Verfahren, welches Gleichheit vertikaler Austauschkoeffizienten für Wärme und Wasserdampf voraussetzt, ein indirektes Austauschmeßverfahren und eine neue Feinstruktur-Apparatur zur Messung der vertikalen atmosphärischen Wärmestromdichte mit automatischer Auswertung. Das letzte Verfahren, dessen Anwendung an einen Windgeschwindigkeitsbereich von 1 bis 7 m/sec gebunden ist, wurde hauptsächlich verwendet, um die Gültigkeit der beim Sverdrup-Albrecht-Verfahren gemachten Voraussetzungen nachzuprüfen. Auf die Konstanten der Apparatur und ihren Einfluß auf das Meßergebnis wird eingegangen.

Bei diesen Vergleichsmessungen traten mitunter erhebliche Unterschiede auf, doch ließ sich zeigen, daß sie bei hinreichender Meßdauer sehr klein werden und daß eine eventuelle Verschiedenheit der Austauschkoeffizienten für Wärme und für Wasserdampf kleiner als circa 4% ist, wenn genügend lange Meßreihen vorliegen. Bei stärkeren Inversionen von mehr als 1½° C pro 100 m Höhe erwies sich die Strahlungsscheinleitung als ein nicht zu vernachlässigendes Glied der Wärmeübertragung.

Aus den Meßergebnissen, die in Lentförden gewonnen wurden, ließen sich Gesetzmäßigkeiten der Strahlungsbilanz, der Evapotranspiration und des Bodenwärmestroms am besonders häufig im Lande vertretenen Feldern ableiten, welche als Grundlage zur Abschätzung der mittleren Wärmehaushaltskomponenten Schleswig-Holsteins benutzt werden. Hierzu wurden zur Berücksichtigung der Waldflächen u. a. Ergebnisse von Verdunstungsmessung durch Baumgartner mit der bei gleichen meteorologischen Bedingungen beobachteten Wiesenverdunstung verglichen.

Abstract

The Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hamburg, has carried out with the support of the Deutsche Forschungsgemeinschaft e. V., Bad Godesberg (Rhine), during the International Geophysical Year 1957/58, measurements of the components of the heat balance of the earth's surface daily above grassy soil at Quickborn near Hamburg and in turn above test fields of bare soil, with stubbles, potatoes, rye, clover, oats, and turnips lying 20 km north near Lentförden/Heidmoor, which belong to the Institut für Futterbau of the Bundesanstalt für Milchwirtschaft (Institute for the cultivation of fodder-plants of the Federal Authority for dairy products).

Three different methods have been applied: 1) the Sverdrup-Albrecht method, which is based on vertical gradient measurements and on the assumption, that the vertical exchange coefficients for heat and water vapour are equal, 2) an indirect procedure of exchange measurements, and 3) a recently developed microstructure apparatus with automatic evaluation to measure the density of the vertical atmospheric heat flux. This last procedure, the application of which is limited to a range of wind velocity between 1 to 7 m/sec, has mainly been used to check the accuracy of the assumptions made for the Sverdrup-Albrecht method. The constant data of the apparatus and their influence on the records are also referred to.

The comparison of the different methods showed sometimes considerable differences, but they decreased over a sufficiently long period of observation. Likewise the eventual discrepancy between the exchange coefficients of heat and water vapour becomes smaller than 4% if the obser-

vations series are long enough. With accentuated inversion layers of more than 1,5° C/100 m height, radiation conductivity is acting as a quite important factor of heat transfer.

The observations of Lentförden allow to deduct some laws on the radiation balance, evapotranspiration and the flux of surface temperature in fields of some frequency in the region which serve as a basis to estimate the mean components of the heat balance in Schleswig-Holstein. Forestry areas have been taken into account by comparing the evaporation measurements by Baumgartner with the evaporation of grassy soil observed under equal meteorological conditions.

1. Zum Forschungsthema und seiner Behandlung

Der Wärmehaushalt der Erdoberfläche steht bekanntlich mit vielen für das Leben des Menschen wichtigen Erscheinungen in Zusammenhang. Er ist maßgebend für das Klima der untersten Luftschichten, über die Evapotranspiration wirkt er auf den Wasserhaushalt des Bodens ein und über die Wärmezufuhr in die Atmosphäre auf deren Strömungsform.

Während die an die Verdunstung der Landflächen gebundene latente Wärme auch in unseren Breiten ein wesentlicher Bestandteil des Energiehaushalts der Atmosphäre sein kann, ist die vom Boden kommende fühlbare Wärme klein, gemessen am gesamten Wärmeumsatz. Beide beeinflussen die vertikale Temperatur- und Feuchteverteilung und damit auch die atmosphärische Zirkulation. Allen für die Zirkulation maßgebenden Größen galt das besondere Interesse während des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 (IGJ). Zwar wirkt die atmosphärische Strömung mit ihren Begleiterscheinungen selbst stark steuernd auf den Wärmehaushalt des Erdbodens, trotzdem sollte die vorliegende Arbeit ein kleiner Beitrag zur IGJ-Forschung sein.

Der großräumigen Ausdehnung atmosphärischer Zirkulationserscheinungen entsprechend, war auch das Ziel unserer Untersuchung nicht die Erkenntnis der vielfältigen mikrometeorologischen Einzelvorgänge in der Bewuchszone des Bodens, sondern deren Gesamtwirkung auf die Atmosphäre. Aus diesem Grunde war der Begriff „Erdoberfläche“ großzügig aufzufassen. Wir haben uns bemüht, die mittleren Wärmehaushaltskomponenten eines ganzen Landes, nämlich die Schleswig-Holsteins zu bestimmen.

Im allgemeinen verlangen großräumige Probleme auch besonders angepaßte großzügige Untersuchungsmethoden. So lag es nahe, die aus den Unterschieden zwischen Niederschlag und Abfluß gewonnenen Werte der Landesverdunstung in Verbindung mit Ergebnissen von Strahlungsmessungen zur Ermittlung der Landes-Wärmehaushaltskomponenten zu verwenden. Leider liefern solche Untersuchungen nur Mittelwerte langer Zeiträume, nicht aber die für die Zirkulationsforschung benötigte feinere Struktur des Wärmehaushalts. Es blieb uns nicht erspart, die Methoden der kleinräumigen Wärmehaushaltsforschung über denjenigen Feldkulturen anzuwenden, die wesentlichen Anteil an der Schleswig-Holsteiner Landesfläche haben.

Natürlich ist man bei derartig synthetischen Ermittlungsverfahren mannigfaltigen Fehlerquellen ausgesetzt, um so mehr, als die Wärmesummen bei manchen Komponenten schon nach relativ kurzer Zeit aus positiven und negativen Summanden ähnlicher Größe bestehen. Es mußte deshalb angestrebt werden, Gesetze zu gewinnen, mit deren Hilfe die Größe der Wärmehaushaltskomponenten als Funktion kurzzeitiger, wie auch möglichst langzeitiger Mittelwerte der steuernden meteorologischen Größen dargestellt werden kann. Austauschgesetze kamen hierfür nicht in Frage, weil bekanntlich Austauschkoefizienten der für kennzeich-

nende Messungen nötigen Höhen nicht in linearem Zusammenhang mit den für sie maßgebenden Größen stehen.

Zur hier angemessenen Definition des Begriffs „Erdoberfläche“ sei noch bemerkt, daß die Wärme- und Wasserdampfspeicherung derjenigen Luft weitgehend vernachlässigt werden mußte, die sich im Bestandsraum zwischen den Pflanzen befindet.

2. Liste der verwendeten Formelzeichen

(S+H) Sonnen- und Himmelsstrahlung (Globalstrahlung),

visible range of the radiation from the sun and the sky

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

R Am Boden reflektierte sichtbare Strahlung, bezogen auf (S+H), Albedo, radiation reflected by the ground and its plants, related to (S+H), Albedo

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

Q Strahlungsbilanz (kurz- und langwellig), net radiation

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

B Pro Flächeneinheit in den Boden eintretende (+) oder aus ihm herauskommende (—) Wärme pro Zeiteinheit, heat per area- and time-unit entering (+) or leaving (—) the soil

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

L Vertikale Stromdichte atmosphärischer Wärme, (+) für die nach oben gehende, (—) für die zum Boden gerichteten Transporte, vertical heat transfer to (+) or from (—) the atmosphere per area- and time-unit

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

V Wärmearbeit (+) bei der Wasserdampfproduktion oder Wärmegewinn (—) bei der Taubildung, gerechnet pro Zeit- und Flächeneinheit des Bodens, latent heat used (+) for the evapotranspiration or produced (—) during the dew production, per area- and time-unit

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

G Wärme, verwendet zum Auftauen von gefrorenem Wasser (+) oder freiwerdend beim Gefrieren (—), gerechnet pro Zeit- und Flächeneinheit, heat, used for smelting snow and ice (+) or produced during the freezing of groundwater (—), per area- and time-unit

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

N Transport fühlbarer Wärme, gebunden an fallende Niederschläge, pro Zeit- und Flächeneinheit, vertical transport of sensible heat by raindrops per time- and area-unit

(cal·cm⁻²·min⁻¹)

F Nettobeträge der Wärme, die in photochemischen und chemischen Prozessen zum Aufbau von Pflanzenmasse (+) verbraucht oder bei der Verrottung von Pflanzenteilen frei (—) wird, gerechnet pro Zeit- und Flächeneinheit, net amount of heat used for the formation (+) or the combustion (—) of plants (cal·cm ⁻² ·min ⁻¹)	c Spezifische Wärme des Bodens, specific heat of the ground material (cal·gr ⁻¹ ·°C ⁻¹)
c _p Spezifische Wärme von Luft bei konstantem Druck, (cal·gr ⁻¹ ·°C ⁻¹)	ρ _B Dichte des Bodens, density of the soil material (gr·cm ⁻³)
A _L Vertikaler Austauschkoefizient für Wärme, vertical exchange coefficient for heat (A = ρK, ρ air density, K diffusion coefficient) (gr·cm ⁻¹ ·sec ⁻¹)	t Zeit, time (sec)
A _v Vertikaler Austauschkoefizient für Wasserdampf, vertical exchange coefficient for water vapour (gr·cm ⁻¹ ·sec ⁻¹)	r Radius, radius (cm)
Θ Potentielle Temperatur, potential temperature (°K)	W Ohmscher Widerstand, electrical resistance (Ohm)
z Höhe über dem Boden, height above the ground (cm)	i Elektrische Stromstärke, electrical current (Amp.)
r _w Spezifische Verdampfungswärme von Wasser latent heat of a gram water vapour (gr·gr ⁻¹)	u Windgeschwindigkeit, wind velocity (cm·sec ⁻¹)
R _L Gaskonstante der Luft, gas constant for air (mb·gr ⁻¹ ·cm ³ ·°K ⁻¹)	w Vertikale Windkomponente, vertical component of the wind velocity (cm·sec ⁻¹)
R _w Gaskonstante des Wasserdampfs, gas constant for water vapour	x Die in der Richtung der mittleren Windgeschwindigkeit gelegene Raumkoordinate, coordinate in the direction of the mean wind velocity (cm)
q Spezifische Feuchte (gr Wasserdampf pro gr feuchter Luft), specific humidity	m Exponent der Näherungsgleichung für die vertikale Verteilung der Windgeschwindigkeiten, exponent of the equation approximating the vertical distribution of windvelocity $\bar{u}/\bar{u}_1 = (z/z_1)^m$
e Dampfdruck, pressure of water vapour (QS: lenght of the mercury column) (mm QS)	T Absolute Temperatur, absolute temperature (°K)
p Luftdruck, air pressure (mm QS)	σ Konstante des Stephan-Boltzmannschen Gesetzes, constant of the Stephan-Boltzmann-law
θ Aktuelle Temperatur, actual temperature (°C)	R _T Verhältnis der Ausschläge, welche die von oben kommenden und die von unten kommenden Strahlungen an einem Strahlungsbilanzmesser nach Fleischer-Schulze hervorrufen (abhängig von Gerätetemperatur!), relation of the deflection-widths of a Fleischer-Schulze net radiation meter produced by the downward and by the upward radiation
θ' Feuchttemperatur, wet bulb temperature (°C)	k Verhältnis der Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes zu derjenigen, die bei gleichen sonstigen Bedingungen unter voller Benetzung von Pflanzen und Boden stattfinden würde, relation of the evapotranspiration of a field and the evapotranspiration of the same field in the case of full wetness of plants and soil, but in the same meteorological conditions
γ Adiabatischer Temperaturgradient, adiabatic temperature gradient (°K·cm ⁻¹)	l Verhältnis der Evapotranspiration eines Bestandes zu derjenigen der Meßfeld-Wiese, relation of the evapotranspiration of a field and the evapotranspiration of the meadow, forming the Quickborn measuring place.
E Sättigungsdruck des Wasserdampfs, maximum pressure of water vapour at the air temperature (mm QS)	
J Relative Feuchtigkeit, relative humidity (%)	
λ Wärmeleitfähigkeit des Bodens, heat conductivity of the ground material (cal·cm ⁻¹ ·°C)	

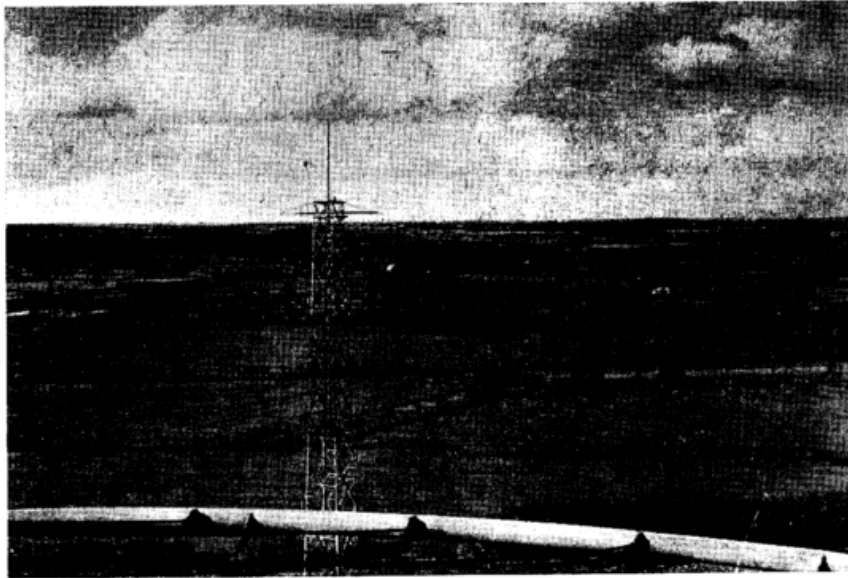


Abb. 1
Quickborner Wiesenlandschaft, von einem der Quickborner Funktürme aus gesehen.

3. Beschreibung der Meßfelder

Das Quickborner Meßfeld liegt $12\frac{1}{2}$ m hoch auf $53^{\circ} 44' N$ und $9^{\circ} 53' E$ zwischen den beiden südlichsten Türmen der Wetterfernmeldezentrale. Wie der größte Teil der Umgebung ist auch der Boden des Meßfeldes Dauergrünland. Das Gelände ist eben. Im Norden ist der Horizont auf 28° von den niedrigen Dienstgebäuden der Fernmeldezentrale verdeckt. Bei Winden aus diesem Bereich ist bisweilen die vertikale Temperatur- und Feuchte-Schichtung von den Häusern beeinflusst. In etwa 100 m Umkreis befindet sich der 120 cm hohe Latenzaun des Dienstgebäudes, dessen Holzteile 27% der Zaunfront einnehmen. Für die Schleswig-Holsteiner Landschaft typische Erlenhecken und Einzelbäume finden sich erst in Abständen einiger hundert Meter.

Wir haben die von H. Sverdrup und von F. Albrecht benutzte Wärmehaushalts-Meßmethode angewendet, welche auf Messungen vertikaler Temperatur- und Feuchte-Unterschiede beruht.

Die am Boden befindlichen Quellen bzw. Senken der Flüsse von Wärme und Wasserdampf einerseits und von Bewegungsgröße andererseits unterscheiden sich am Meßfeld, wie an den meisten Gebieten Norddeutschlands, wesentlich durch ihre Anordnung. Die ersten sind die der Strahlung ausgesetzten Flächen, im wesentlichen in Höhe der Oberteile von Grashalmen und Feldpflanzen liegend, die zweiten dagegen vorwiegend die mehr linienhaft angeordneten Baumreihen, Zäune und Knicks, welche große Teile der erstgenannten Flächen vor dem Angriff des Windes schützen. Deshalb eignet sich für Wärmehaushaltsmessungen am Erdboden die Sverdrup-Methode, welche eine Ähnlichkeit nur bei der räumlichen Temperatur- und Feuchteverteilung voraussetzt, besser als Verfahren, welche eine Ähnlichkeit der Temperatur-, Feuchte- und Windgeschwindigkeitsverteilung zur Voraussetzung haben (Thornthwaite-Holzmann, Monin-Obuchow).

150 m weiter nordwestlich befindet sich ein zweites, ebenfalls aus Dauergrünland bestehendes Meßfeld. Da es von den Dienstzimmern aus eingesehen und schnell erreicht werden kann, haben wir es für den Betrieb des unmittelbaren Austauschmeßverfahrens ausersehen, obwohl wir auf Art und Zeit der Bodennutzung keinen Einfluß hatten. Vom Juli 1957 bis zum Juni 1958 befanden sich die Wiesenböden beider Meßfelder in gleichem

Zustand, dann wurde das nördlichere als Weide benutzt. Wir mußten deshalb die Apparatur im Sommer 1958 zum Schutz vor dem Weidevieh an den Westrand der Wiese setzen.

Abbildung 1 zeigt die Quickborner Wiesenlandschaft, von einem Funkturm aus gesehen.

Weitere Meßfelder befinden sich 16 km weiter nördlich in Lentförden/Heidmoor. Sie gehören dem Institut für Futterbau der Bundesanstalt für Milchwirtschaft. Jedes dieser Felder ist zirka 0,7 ha groß und konnte mittels eines 300 m langen Meßkabels von einem zentral gelegenen Punkt aus erreicht werden. Auch hier wurde vorzugsweise die Sverdrup-Albrecht-Methode angewendet. Bei der Messung vertikaler Temperatur- und Feuchte-Unterschiede mußten für die Meßniveaus geringere Höhen als in Quickborn benutzt werden. Die internen Grenzschichten, die sich über den Feldern bilden, erreichen eine für solche Messungen hinreichende Dicke erst dort, wo der Wind fast die ganze Länge des Feldes überstrichen hat.

Abbildung 2 zeigt den 250 cm langen Mast, an dem die für die Sverdrup-Albrecht-Methode benötigten Geräte mittels vertikal verstellbarer Arme befestigt sind, nämlich zwei Psychrometer, ein Strahlungsbilanzmesser und ein Schalenkontaktanemometer für 100 m Windweg pro Kontakt. Außerdem trägt der Mast einen

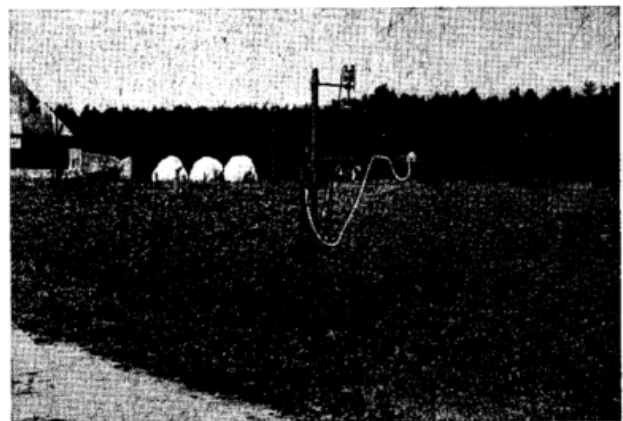


Abb. 2
Psychrometer und Strahlungsbilanzmesser mit Schaltkasten am transportablen Mast über einem Lentfördenener Kartoffelfeld.



Abb. 3

Zentral zwischen Versuchsfeldern gelegener Schrank mit den Registriergeräten für die Strahlung, die Bodentemperaturen, sowie für vertikale Temperatur- und Feuchttemperatur-Differenzen.

Schaltkasten, welcher die Kompensationswiderstände der Wheatstonschen Meßbrücken und die Anschluß-



Abb. 4

Fühler für den vertikalen Wärmestrom am Ostseestrand.

4. Beschreibung der Meßmethoden, ihrer Fehlergrenzen und der gebotenen Kontrollmöglichkeiten

4.1. Das Wärmehaushalts-Meßverfahren nach Sverdrup-Albrecht und seine Voraussetzungen

Um die Komponenten des Wärmehaushalts am Erdboden laufend zu messen, wurde wie schon im Jahr 1953/54 hauptsächlich die bekannte Sverdrup-Albrecht-Methode angewendet. Die Wärmebilanzgleichung des Erdbodens lautet

$$Q + B + L + V + G + N + F = 0 \quad [1]$$

Es sei uns gestattet, zur Einsparung von Setzarbeit beim Druck der Vorzeichen von der Gleichung

$$Q = B + L + V + G + N + F \quad [2]$$

auszugehen, bei welcher der effektive Strahlungsgenuß der Erdoberfläche Q , die vom Boden in die Atmosphäre gehende Wärme L , die vom Boden in den Untergrund gehende Wärme B , die an den Wasserdampf der Verdunstung gebundene latente Wärme V und die zum Schmelzen von Schnee und Eis verwendete Wärme G ,

buchsen für die elektrischen Bodenthermometer enthält. Es konnte erreicht werden, daß die beträchtliche Länge des Meßkabels die registrierten Werte nicht beeinflusste, auch nicht bei erheblichen Temperaturänderungen.

Auf Abbildung 3 sehen wir den Schrank für die Aufnahme des Temperatur- und Feuchteschreibers, des Photozellenkompensators, des Strahlungsbilanzmessers, des Ladegeräts, der Vergleichsinstrumente und einer Vorratsflasche für destilliertes Wasser. Ein Satz Bodenthermometer unter Gras und unter nackter Erde, sowie ein Regenmesser ergänzen die Ausrüstung des Lentföhrdener Meßfeldes.

Am 13. 11. 1957 und am 24. 4. 1958 ist auch der Wärmehaushalt an der Ostseeküste (Schönbergerstrand) untersucht worden. Dabei waren die Kompensatoren für die Wärmestrom-Meßgeräte an einem Spezialgestell im Volkswagen des Beobachters untergebracht. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Aufstellung. Der Strom zum Betrieb der Apparatur wurde freundlicherweise von Herrn Marquard, Schönbergerstrand, zur Verfügung gestellt, dem für seine Unterstützung hiermit gedankt wird.



Abb. 5

Die Verstärker der Apparatur zur unmittelbaren Messung des Wärmestroms im PKW.

sowie der Nettobetrag F der beim Auf- und Abbau von Pflanzensubstanz in chemischen Prozessen gebundenen oder freiwerdenden Wärme, positiv gezählt werden, negativ dagegen die effektive Ausstrahlung des Bodens ($-Q$), die aus der Atmosphäre und dem Boden zur Oberfläche gerichteten Wärmeströme ($-L$) und ($-B$), die Kondensationswärme der Taubildung ($-V$) und die beim Gefrieren von Wasser am Boden freiwerdende Energie ($-G$), alle diese Größen pro Flächeneinheit der Bodenoberfläche gerechnet. Die Komponente N , welche die an flüssiges Regenwasser gebundene Wärme darstellt, kann in unserem an Starkregen armen Klima vernachlässigt werden. Auch die Komponente F lassen wir wegen ihrer geringen Größe zunächst unberücksichtigt. Auf Methoden zur Bestimmung der Schmelz- und Gefrierwärme G werden wir später eingehen. Bei der Anwendung der Sverdrup-Albrecht-Methode mißt man Q unmittelbar. Auch die Komponente B kann für sich aus Messungen der spezifischen Wärme und des spezifischen Gewichtes von Bodenproben, sowie der Bodentemperaturen berechnet werden. Da, wenn $(Q-B)$ gleich etwa $(L+V)$ ist,

$$V = \sim (Q-B) \cdot 1 / (1+LV) \text{ und} \quad [3]$$

$$L = \sim (Q-B) \cdot 1/V / (1+L/V), \quad [4]$$

hat man zur Bestimmung der übrigen Komponenten noch den Quotienten L/V zu ermitteln, was in der Regel durch Messungen des vertikalen Gefälles der Temperatur und des Dampfdruckes in Bodennähe geschieht. Man setzt nämlich nach W. Schmidt

$$L = - c_p \cdot A_L \cdot \Delta \Theta / \Delta z \quad [5]$$

und

$$V = - r_w \cdot A_V \cdot \Delta q / \Delta z \quad [6]$$

Mit $q = R_L/R_W \cdot e/p$ ist das gesuchte Verhältnis

$$L/V = c_p \cdot p \cdot R_W \cdot R_L^{-1} \cdot r_w^{-1} \cdot (\Theta_1 - \Theta_2) / (e_1 - e_2) \cdot A_L/A_V, \quad [7]$$

Die Indizes beziehen sich auf zwei bodennahe Niveaus, in denen die Temperatur und der Dampfdruck gemessen werden. Der Abstand der Niveaus Δz geht nicht in die Rechnung ein, doch sei bemerkt, daß der Abstand um so kleiner gewählt werden muß, je geringer die luv-seitige Erstreckung des auf seinen Bodenwärmehaushalt zu untersuchenden Feldes ist. Wie kürzlich G. Hollmann (23) ausführlich dargelegt hat, darf man W. Schmidtsche Austauschkoefizienten lediglich auf denjenigen Teil mikroturbulenter Wärmetransporte anwenden, der durch turbulente Temperaturschwankungen zustande kommt. Wie auch schon H. P. Schmitz (11) betonte, hat der Vertikalaustausch von Wärme einen mikroturbulenten Massentransport zur Folge, an den u. U. ein beträchtlicher Teil des Wärmetransports gebunden ist. Die genannten Autoren betrachten jedoch den Austauschvorgang ohne die Wärmezufuhr am Erdboden, die ebenfalls einen Massentransport hervorruft. Unter stationären Bedingungen kompensieren sich in den bodennächsten Schichten beide Massenflüsse so weitgehend, daß der W. Schmidtsche Wärmeaustausch den gesamten Wärmetransport darstellt. Bisher ist meist angenommen worden, daß die vertikalen Austauschkoefizienten für Wärme A_L und für Wasserdampf A_V gleich groß sind. Bei früheren Messungen hatte Frankenberger gefunden, daß Verschiedenheiten, wenn überhaupt vorhanden, dann kleiner als 7% sein müßten. Etienne A. Bernard (1) hält es für möglich, daß bei größeren Temperaturgradienten die Thermodiffusion Einfluß auf die Verdunstung hat — die leichteren Gaskomponenten diffundieren bevorzugt nach kälteren Stellen. — Er weist auch auf ältere

Beobachtungen von E. Pasquill (2) hin, nach denen der Quotient A_L/A_V von der vertikalen Dichteänderung der Luft abhängt. Wenn auch aus neueren Messungen von E. Suomi und C. B. Tanner (3) hervorzugehen scheint, daß der Quotient A_L/A_V nicht stark von 1 abweicht, so wurde doch für notwendig gehalten, die nach dem Sverdrup-Albrecht-Verfahren ermittelten Komponenten L mit Hilfe einer anderen Methode zu kontrollieren. Über diese Untersuchung wird in einem späteren Abschnitt ausführlich berichtet.

Wir wenden uns zunächst der Frage zu, wie und mit welcher Genauigkeit die Bestimmungstücke des Wärmehaushalts bei der Sverdrup-Albrecht-Methode gemessen werden.

4.1.1. Die elektrischen Psychrometer und Hygrometer

Temperaturen und Feuchttemperaturen wurden in 2, 13, 28 und 70 m Höhe über dem Quickborner Meßfeld, gelegentlich auch dicht über dem Grase mit elektrischen Psychrometern neuer Bauart gemessen. Bei Benutzung von älteren Psychrometern war man genötigt, die Ansaugöffnungen ständig gegen den Wind zu richten, um Fälschungen der Feuchttemperatur-Anzeige durch Dampfabgabe aus dem Wassergefäß zu vermeiden. Abb. 6 und 7 zeigen ein neues Psychrometer, dessen Tank nach außen völlig geschlossen ist. Der Docht des Feuchtthermometers saugt Wasser durch eine im Innern liegende Öffnung. Zeitweise verwendete verchromte Regenblenden haben sich als unzuverlässig erwiesen, weil sie sich bei Bestrahlung merklich erwärmten. Am günstigsten ist es, die Ansaugrohre der Psychrometer ständig nach Norden zu richten. Die Reflexion der Strahlungsschutzhüllen wurde durch Überzüge aus poliertem Aluminium verbessert, indem an Stelle des Putzens der Hüllen jeweils neue Aluminiumfolien aufgelegt wurden. Der Psychrometerlüfter wird von einem Synchronmotor der Firma Papst angetrieben, der sich dank der großen Oberfläche seines Außenläufers nur unbedeutend erwärmt. Der Luftstrom hat an den Thermometern eine Geschwindigkeit von 2.7 bis 3.0 m/sec.

Durch eine Schaltuhr werden abwechselnd die Thermometer zweier Niveaus nach obigem Schema in eine Meßbrücke geschaltet (Abb. 8). Der Ausschlag auf den Registrierstreifen ist hinreichend proportional

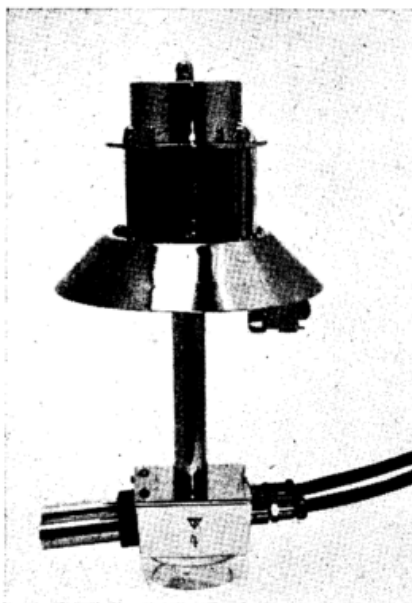


Abb. 6
Elektrisches Psychrometer.

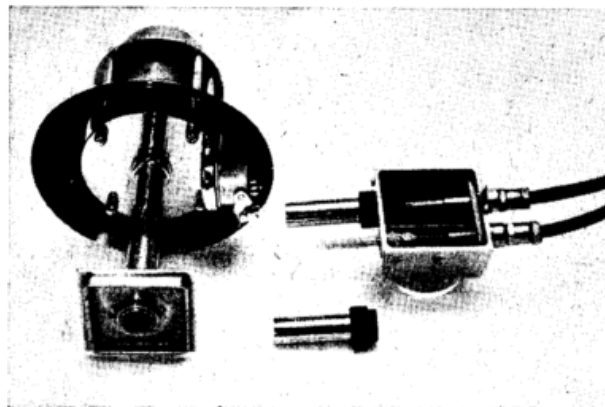


Abb. 7
Elektrisches Psychrometer, zerlegt

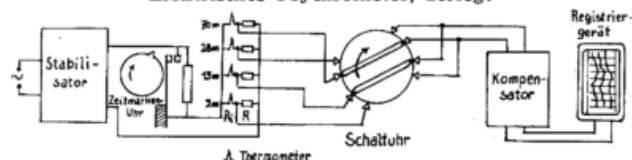


Abb. 8
Schaltplan der Sverdrup-Albrecht-Anlage.

$(\vartheta_2 - \vartheta_1) / \vartheta$ und die gesuchte Temperaturdifferenz kann mit einer Fluchtlinienskala ausgewertet werden, bei welcher der jeweilige Temperaturbereich berücksichtigt wird. Es wurden sorgfältig aufeinander abgegliche Spezialthermometer von 100 Ohm Widerstand der Firma Degussa verwendet. Trotzdem sind dann und wann spontane Änderungen des Nullpunktes der Meßbrücke aufgetreten, die aber stets frühzeitig erkannt wurden, weil Kontrollmessungen mit Quecksilberthermometern regelmäßig vorgenommen worden sind.

4.1.2. Kontrollen, die auf dem Tagesgang der Schwankungsbreite beruhen

Die Registrierspuren der oberen Meßniveaus geben auch selbst oft die Möglichkeit einer Nullpunktsskontrolle. Zu Zeiten adiabatischer Temperaturschichtung ist nämlich die Schwankungsbreite der vertikalen Temperaturdifferenzen am kleinsten, weil turbulente Vertikalbewegungen dann nicht mit Temperaturänderungen verknüpft sind.

Die Halbwertsbreite der durch unmittelbare Kontrollen gewonnenen Fehlerkurve von fünfminütigen Mittelwerten vertikaler Temperaturdifferenzen betrug etwa 0.04°C und geht sicherlich vor allem zu Lasten der direkten Thermometerablesungen.

Besser noch und häufiger als bei den trockenen Thermometern zeigen sich in den Registrierspuren der Differenzen von Feuchttemperaturen Zeiten mit minimaler Schwankungsamplitude. Es sind das diejenigen, in denen ein etwa vorhandener Austausch fühlbarer Wärme gerade durch einen entgegengesetzten Austausch latenter Wärme kompensiert wird und in denen die Erdoberfläche wie der Docht eines Psychrometers mit der darüber befindlichen Luft im Austausch steht. Ersetzt man in Gleichung [7] die Differenz $(e_1 - e_2)$ unter Vernachlässigung des Luftdruckeinflusses durch die entsprechenden Differenzen trockener und feuchter Temperaturen und die Differenz der potentiellen Temperaturen durch die Differenz der aktuellen, so gewinnt man als Kriterium für Zeiten mit verschwindendem Austausch von Gesamtenergie $(L+V)$, d. h. für $L/V = -1$, die Bedingung

$$(\vartheta'_1 - \vartheta'_2) = -\gamma \cdot \Delta z \cdot (2.05 dE/d\vartheta' + 1)^{-1} \quad [8]$$

Mit dieser Gleichung können die Nullpunkte unserer Feuchttemperatur-Meßanlage leicht kontrolliert werden; denn die Feuchttemperatur ϑ' wird ebenfalls laufend registriert und die der adiabatischen Schichtung entsprechenden Temperaturdifferenzen $\gamma \cdot \Delta z$ der Meßniveaus sind bekannt. Wo sich ausgeprägte Minima der Schwankungsamplituden ergaben, wurde zunächst ge-

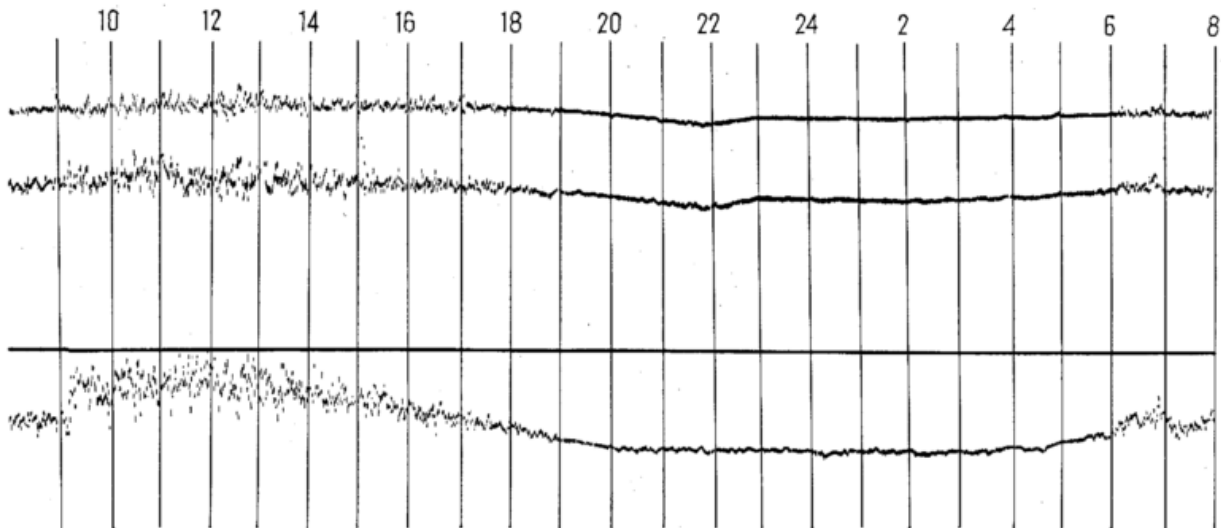


Abb. 9
Photographische Registrierung der Feuchttemperaturdifferenzen zwischen 70 und 28, 70 und 13, sowie 13 und 2 m Höhe. Minimum der Schwankungsbreite hier 19.30 WOZ.

prüft, ob diese nicht durch besonders turbulenzarme Wetterlagen, wie Nebel, starke Bodeninversionen etc. hervorgerufen sind. Ist das nicht der Fall, so läßt sich an Hand des Minimums der Schwankungsbreite nicht nur der Nullpunkt der Feuchttemperaturdifferenz-Skala, sondern auch die Richtigkeit der zu diesem Zeitpunkt gemessenen Werte der Strahlungsbilanz Q und der Bodenkomponente des Wärmehaushalts B prüfen, muß doch bei $L/V = -1$ auch Q gleich minus B sein. Abb. 9 zeigt auf der Durchzeichnung einer Original-Registrierung solch ein Minimum der Schwankungsbreite um 19.30 WOZ.

Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt muß die Feuchteschichtung mit Hygrometern ermittelt werden. Versuche, Lithiumchloridföhler zu der erforderlichen hohen Meßgenauigkeit zu bringen, blieben unbefriedigend. Deshalb wurden Haarhygrometer mit elektrischer Fernübertragung angewendet. Um eine Beschädigung der Haarharfen durch Starkniederschläge, Sturm etc. zu vermeiden, sind sie in Strahlungsschutzrohre gesetzt worden. Diese Rohre wurden mit dem

Lüfter der elektrischen Aspirationsthermometer gekoppelt. Abb. 10 zeigt auf der linken Seite das Gerät, sowie am Stativ hängend eine ausgebaute Haarharfe. Die Meßelemente sind in Form eines Zylindermantels angeordnet. Flexible Halterungen in der Zylinderachse garantieren die bestmögliche Verteilung der mechanischen Spannung auf alle Haare. Leider ergeben sich an den Registrierungen vertikaler Differenzen der relativen Feuchten keine Möglichkeiten, den Nullpunkt so einfach zu kontrollieren wie bei den Temperaturregistrierungen. Nur wenn die Empfindlichkeit der Hygrometer im ganzen Meßbereich konstant wäre, sollte zu Zeiten minimaler Schwankungsamplituden die Bedingung

$$L/V = \frac{100}{dE/d\vartheta' \cdot J}$$

erfüllt sein. Die Forderung konstanter Empfindlichkeit im gesamten Meßbereich ließ sich nicht hinreichend verwirklichen. Deshalb wurde jede Gelegenheit ausgenutzt, mit Feuchtthermometern zu messen. Bei den Kontrollmessungen der vertikalen Feuchttemperatur-

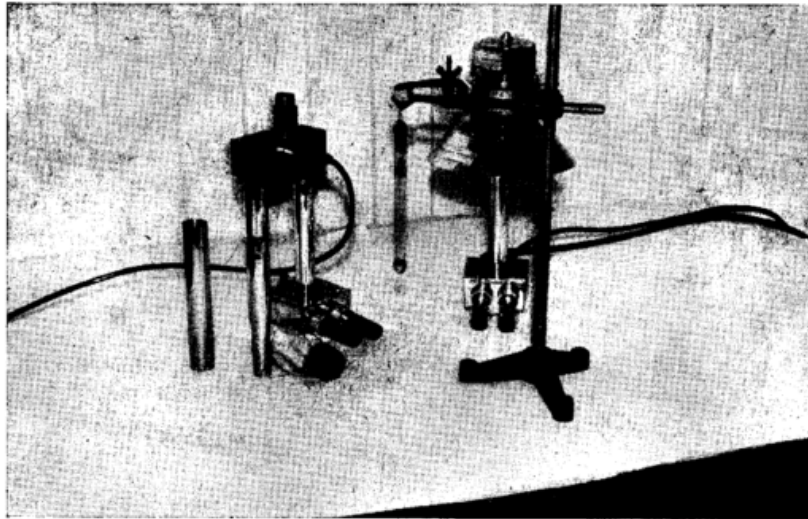


Abb. 10

Von links nach rechts: Äußere und innere Hülse zum Strahlungsschutz des Hygrometers, Feinpotentiometer zur elektrischen Übertragung der Meßwerte, am Stativ Haarharfe mit Zylinderform, dahinter: Hygrometer und Psychrometer kombiniert ohne Lüfter, sowie Psychrometer mit Lüfter.

schichtung waren die mittleren Abweichungen zwischen den unmittelbar mittels Quecksilberthermometern und den elektrisch gemessenen Werten 0.03°C größer als bei den trockenen Thermometern. Auch hier ist die Streuung vor allem durch die beschränkte Ablesegenauigkeit der Quecksilberthermometer hervorgerufen, z. T. aber auch durch kleine Unterschiede im Zustand der Dochte und ihrer Belüftung. Bei den Kontrollen sind gleichzeitig in 2 Höhen je 10 unmittelbare Ablesungen vorgenommen worden. Der Fehler der so bestimmten vertikalen Temperaturdifferenzen beträgt circa 0.04°C . Der mittlere Fehler der Differenz trockener Temperaturen, die mit der elektrischen Anlage gemessen sind, wird auf 0.02° , bei den Dampfdrücken auf 0.045 mm QS geschätzt. Größere Fehler sind von Mai bis August 1958 aufgetreten, wo sich infolge falscher Orientierung der Strahlungsblenden eine zusätzliche Erwärmung der Thermometer einstellte. Diese konnte nach umfangreichen Untersuchungen ihrer Abhängigkeit vom Azimut und von der Höhe des Sonnenstandes, sowie von der Windgeschwindigkeit eliminiert werden.

Der Fehler von nach [7] berechneten Quotienten L/V schwankt sehr stark mit der Windgeschwindigkeit, Tages- und Jahreszeit. Sein Durchschnittswert beträgt gegen Mitternacht 31% , gegen Mittag 8.5% . Die mittleren Fehler der Komponenten L und V sind wesentlich kleiner, nämlich gegen Mitternacht 22% bei V und 16% bei L , was einem mittleren Absolutfehler von 2.6 mcal

$\text{cm}^2\text{min}^{-1}$ entspricht. Mittags beträgt der mittlere durch die Temperaturmessung bedingte Fehler bei V nur 2.3% , bei L 7.1% , was einem mittleren Absolutfehler von $4.2\text{ mcal cm}^2\text{min}^{-1}$ gleichkommt. Abb. 11 zeigt die Häufigkeitsverteilung der durch Mängel der Temperaturmessungen verursachten möglichen relativen Fehler der Wärmehaushaltskomponente L im September.

In seltenen Fällen sind grobe Störungen der Meßanlage eingetreten, weil die Ansaugrohre der Psychrometer mit Schnee oder Reif verstopften, und weil sich an den trockenen Thermometern im Nebel größere Tropfen gebildet haben, die nach der Nebelaufklärung nicht genügend schnell verdampften. Die vertikale Änderung der Windgeschwindigkeit hat zur Folge, daß das Ausmaß, die Eintrittszeit bzw. das Ende solcher Störungen von der Höhe über dem Boden abhängt. Deshalb treten stets ungewöhnliche Temperaturschriebe bei solchen Situationen ein, die an starken Gegenläufigkeiten der auf dem gleichen Streifen nebeneinander registrierten Kurven erkannt werden.

4.1.3. Die Strahlungsbilanzmesser

Zur Messung der Strahlungsbilanz standen ein Kompensationsgerät nach Albrecht/Wagner in der Bauart von Prof. Baumbach und zwei Lupolenstrahlungsbilanzmesser nach Fleischer/Schulze zur Verfügung. Mit den letztgenannten Geräten konnten auch die von oben und unten kommenden Strahlungsströme getrennt gemessen werden, was sich als nützlich erwies, wenn die Gleichheit der Empfindlichkeiten der oberen und unteren Thermosäulen zu prüfen und Unterschiede der Strahlungsbilanz verschiedener Felder zu untersuchen waren. Bei jeder sich bietenden Gelegenheit wurden die Strahlungsmeßgeräte mit Hilfe eines an der Strahlungszentrale Fuhrsbüttel geeichten Linke-Feußner-Aktinometers kontrolliert. Im Jahre 1957 und im Frühjahr 1958 war das monatlich meist zweimal, in der übrigen Zeit des Internationalen Geophysikalischen Jahres des meist bedeckten Himmels wegen seltener möglich. Bei diesen Eichkontrollen bewährte sich besonders das auf dem Quickborner Meßfeld eingesetzte Lupolengerät 609/37007/3. Die mittlere Abweichung der Eichkonstanten vom Mittelwert betrug 1.8% , die relative Streuung 2.3% . Eichungen wurden meist zwischen 10 und 11 Uhr vorgenommen. Das ist nicht ganz unwesentlich, weil das Lupolengerät

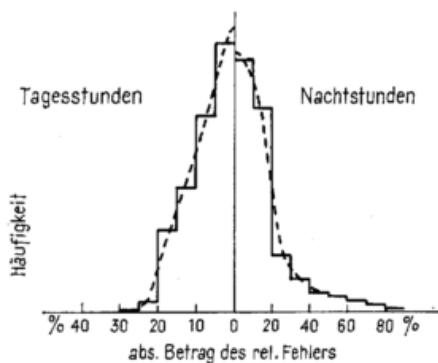


Abb. 11

Häufigkeitsverteilung der durch Mängel der Temperaturmessungen verursachten relativen Fehler der Wärmehaushaltskomponente L bei der Sverdrup-Albrecht-Methode in den Tages- und Nachtstunden des September.

den Übergang von negativer zu positiver Strahlungsbilanz morgens und den abendlichen Übergang in umgekehrter Richtung zu Zeiten registrierte, die gegenüber dem Kompensationsgerät um einige Minuten gegen Mitternacht verschoben sind und weil mittags die Anzeigen des Kompensationsgerätes einige Prozent größer waren als die des Lupolengerätes. Bei den gewählten Kontrollzeiten ergaben sich bei beiden Geräten gleiche Tagessummen der Strahlungsbilanz. Eine genaue Analyse der beschriebenen Eigenheiten erschien in Anbetracht der Höhe sonstiger Fehler nicht lohnend.

Über Maßnahmen zur Unterdrückung der Taubildung auf den Lupolenkappen ist bereits berichtet worden. Da vollkommenere Lösungen erst später gefunden worden sind, erwiesen sich die nächtlichen Werte des Kompensationsgerätes im allgemeinen als zuverlässiger. Da nachts gewöhnlich keine sehr starken Schwankungen der Strahlungsbilanz vorkommen, leidet hier auch die Genauigkeit der Auswertung nicht unter der Unlinearität der Eichkurve. Tagsüber wurden dagegen die vom Lupolengerät angezeigten Werte benutzt. Wegen der von der Sonnenhöhe stark abhängigen Reflexion der Thermoelemente, wegen Benetzung- und Belüftungseffekten war die absolute Meßgenauigkeit der Strahlungsbilanz je nach der Jahreszeit und den Wetterbedingungen stark verschieden. Sie schwankt etwa zwischen 0,005 und 0,030 cal/cm²min. Unter diesen Umständen erscheint die Angabe von Millicallorien pro cm² und Minute kaum noch gerechtfertigt. Trotzdem wurden so viele Dezimalen der Strahlungsbilanz angegeben, wie unter optimalen Meßbedingungen verantwortet werden kann. Später werden wir weitere Kontrollmethoden kennenlernen, die öfters gestatten, den Fehlerbereich einzuengen.

Die mittlere Empfindlichkeit der Lupolengeräte lag bei 0,042 cal/cm²min pro mm Ausschlag. Die Empfindlichkeit des Kompensationsgerätes betrug ca. 5,5 mm für die ersten 10 mcal/cm²min und etwa 55 mm für 1 cal/cm²min.

4.1.4. Die Messung der Bodenkomponente des Wärmehaushalts

Was an Pflanzenteilen in die Atmosphäre ragt, ist von uns als Teil des Bodens angesehen worden. Wie eingangs erwähnt, sind auch die Wärmeumsätze im porösen Boden nicht an eine scharf definierbare Grenzfläche gebunden. M. Trénel (4) hat festgestellt, was zuvor schon verschiedene Wissenschaftler vermutet hatten, daß nämlich Zustandsänderungen des Wassers zwischen flüssiger und gasförmiger Phase zeitlich und räumlich sehr verbreitet sind. Wasser verdunstet an warmen Stellen und kondensiert an kalten. Hierdurch werden Temperaturgefälle abgeschwächt. Um auch die latenten Wärmetransporte mitzufassen, haben wir die Bodenkomponente des Wärmehaushalts in drei Glieder zerlegt:

B_g stellt den Wärmefluß pro Flächeneinheit der Erdoberfläche dar, welcher den Temperaturänderungen der Pflanzen entspricht. Selbst in der Zeit üppigsten Vegetationsstandes ist diese Komponente wenig ergiebig, kommen doch auf einen cm² Boden selten mehr als 0,4 gr Pflanzenmasse.

B_λ ist der Wärmestrom, welcher ein Niveau im Boden durchsetzt, in welchem nur noch die zum jahreszeitlichen Rhythmus der Wärmebewegung gehörigen sehr schwachen Temperaturgefälle auftreten.

B_s faßt die Änderungen des Wärmeinhalts einer obersten Bodenschicht zusammen, in welcher infolge zeitweilig starker vertikaler Tempera-

turgefälle latente Wärmetransporte besonders häufig auftreten.

E. Röd hat im Rahmen der DFG-Aufgabe Fr 66/4 verschiedene Bodentemperaturgänge analysiert. Dazu wurden die Größen $\lambda d^2\theta_B/dz^2$ und $\rho_B c d\theta_B/dt$ verglichen. Nur in denjenigen Tiefen, in denen beide Größen übereinstimmen, ist allein die unmittelbare Leitung fühlbarer Wärme für Temperaturänderungen verantwortlich. Es wurden jedoch zeitweilig beträchtliche Unterschiede gefunden, die mit zunehmender Tiefe abnehmen und etwa in Schichten von 25 bis 30 cm unter der Erdoberfläche unter die Meßgenauigkeit sinken. Wir konnten deshalb, wie schon bei den Wärmehaushaltsmessungen des Jahres 1953, die vertikalen Temperaturgradienten in 35 cm Tiefe als kennzeichnend für den Wärmetransport in oder aus tieferen Schichten ansehen, während der Beitrag der obersten Schichten zur Komponente B nur aus der zeitlichen Änderung von deren Mitteltemperatur abgeleitet werden kann.

Somit ist

$$B = B_g + \int_{35}^0 \rho_B \cdot \sigma \cdot d \cdot \frac{d\theta_B}{dt} \cdot dz + B_\lambda \quad [9]$$

Es wurde versucht, die Wärme-Aufnahme und Abgabe der oberirdischen Pflanzenteile B_g nach Messungen des Temperaturganges in verschiedenen Höhen der Bestände und Auswiegen der Pflanzenmasse zu bestimmen. Bei einer spezifischen Wärme der Pflanzen von 0,9 cal/gr C° und der extremen zeitlichen Temperaturänderung von 5°/Std ergab sich für B_g ein Höchstwert von 30 mcal/cm²min. In der Zeit von November bis Mai, sowie für 14 Tage nach dem Mähen des Grases konnte B_g sogar ganz vernachlässigt werden. In der übrigen Zeit wurden die Temperaturänderungen im Bestande mit Thermographen gemessen. Der Höhe des Meßfühlers über dem Boden, dem Abklingen der Temperaturänderungen zum Boden hin und der vertikalen Verteilung der Pflanzenmasse entsprechend, gingen die gemessenen Änderungen nur zu 2/3 in B_g ein.

Für die Messung des zweiten Summanden in [9] erwies es sich als günstig, daß die Änderung von ρ_B und c mit der Tiefe gegenläufig sind. In Abb. 12 sind der

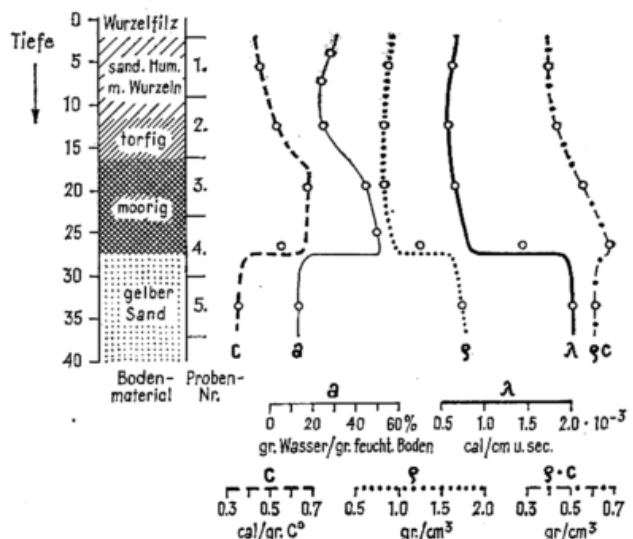


Abb. 12

Spezifische Wärme c , Dichte ρ_B , Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärme der Volumeneinheit ρc des Quickborner Wiesensbodens als Funktion der Tiefe am 1. 8. 1957.

Wassergehalt a , die Dichte ρ_B , die spezifische Wärme c und die Wärmeleitfähigkeit λ als Funktion der Tiefe z eingetragen und die Bodenarten angegeben. Trotz der großen Änderungen von ρ_B wie c beim Übergang von

der Humus- zur Sandschicht ändert sich das Produkt ϱ_{BC} nur sehr wenig. Da außerdem die für B wesentlichen Temperaturänderungen vorwiegend in den obersten Bodenschichten auftreten, kann man das Produkt ϱ_{BC} vor das Integral setzen. Allerdings mußte ϱ_{BC} , besonders im Sommer, von Zeit zu Zeit neu bestimmt werden. Quecksilberthermometer, die unter Gras in 0, 2, 5, 10, 20 und 100 cm Tiefe angebracht waren, gestatteten, die Richtigkeit der von einem elektrischen Stabthermometer gemessenen Mitteltemperatur der Schicht von 0 bis 35 cm Tiefe zu kontrollieren.

Die Dichte ϱ_B des Bodens wurde mit Hilfe eines Ausstechers von 4.5 cm Durchmesser und einem Fassungsvermögen von 112.5 cm³ bestimmt, der in Abb. 13 dargestellt ist. Meist wurde Boden in der natürlichen Lagerung dem Meßfeld entnommen. Dazu wurde die Grasnarbe abgehoben, mit einem Spaten bis zu der gewünschten Tiefe gegraben, die Bodenoberfläche geglättet und der dünnwandige, unten geschärfte Ausstecher mit einem Gummihammer eingeschlagen. Das in Abb. 13 sichtbare Kopfstück, das mit einem Ansatz in das Ausstechrohr paßte, ermöglichte ein Einschlagen ohne Verkanten. Durch die Griffe des Kopfstückes, die Zapfen am Ansatz und die entsprechenden Nuten im Ausstechrohr konnte eine Drehbewegung auf den Ausstecher übertragen werden, was das Herausziehen der Bodenprobe erleichterte. Der Durchmesser des Ausstechers war genügend groß und die Schärfe des Ausstechrandes hinreichend, um Kompressionen der Bodenproben klein zu halten. Die Unterfläche der Probe wurde mit einem Messer glatt geschnitten und schließlich die Dichte der Probe durch Wägungen des gefüllten und des leeren Ausstechers ermittelt.

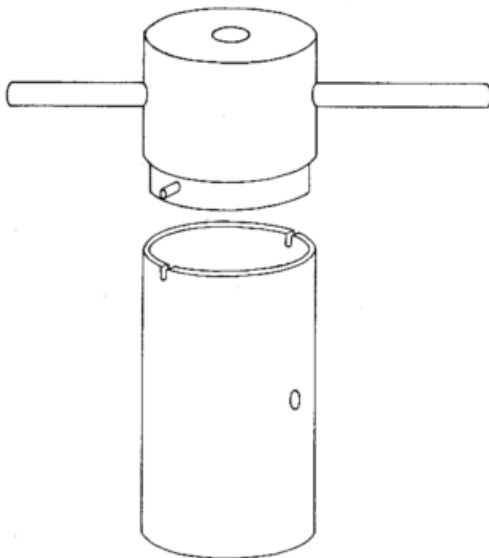


Abb. 13

Ausstecher für die Bodenproben zur Bestimmung von ϱ_B u. λ

Zeitweilig mußten Bodenproben anderer Meßstellen (z. B. aus Heidmoor) in einem Glasgefäß mit Schliffdeckel bis zur Untersuchung aufbewahrt werden. Wenn die Bodenfeuchte unter 5% lag, kam es vor, daß der Boden beim Ausstechen zerkrümelte. Der anmoorige Quickborner Boden war immer zum Ausstechen geeignet.

Die Dichte des Bodens wurde zunächst etwa einmal pro Woche bestimmt, später nach Erkennen der Beziehungen zwischen Wassergehalt und Dichte in größeren Zeitabständen.

Für Tiefen zwischen 5 und 15 cm sind folgende Werte gefunden worden:

Ort	Dichte des Bodens			
	Zahl der Messungen	Mittelwert	Maximum	Minimum
Quickborn	42	1.14	1.48	0.82 gr/cm ³
Heidmoor	41	1.41	2.08	1.10 gr/cm ³

Die Genauigkeit bei der Bestimmung kennzeichnender Werte der Bodendichte leidet unter:

- 1.) Fehlern der Wägung (0.2%) und der Volumenmessung (0.5%),
- 2.) Fehlern beim Ausstechen (Kompression, Abkrümeln) (bis etwa 1%) und
- 3.) Abweichungen der Bodendichte des Meßortes von der mittleren Dichte größerer Gebiete (einige Proz.).

Bei je drei Proben, die mit geringem zeitlichen Abstand von drei verschiedenen Stellen des Meßfeldes entnommen worden sind, betrug die mittlere Abweichung der 9 Einzelwerte vom Mittelwert 5.1%. Die mittlere Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert jeder der drei Stellen war 2.2% und die Streuung 3.1%. Der hohe Sandanteil bei zwei der Proben ließ allerdings bereits mit bloßem Auge erkennen, daß Stellen erfaßt worden sind, an denen bei weiter zurückliegenden Grabungen die natürliche Lagerung der Bodenschichten verändert war. Die Gesamtstreuung der Dichteangaben liegt bei 8%.

Die spezifische Wärme c des Bodens wurde im Laboratorium kalorimetrisch gemessen. Folgende Schritte wurden hierbei ausgeführt:

Entnehmen einer Bodenprobe,

Abwiegen von 100 gr,

Mischen mit 100 gr Wasser,

Erwärmen des entstandenen Breies im Kalorimeter auf elektrischem Wege,

nach Beendigung der Erwärmung Vornahme von 5 Temperaturmessungen im Abstand von je 1 Minute, dazwischen Schütteln des Breies,

gleichzeitig Temperaturmessungen in bereitgestelltem kaltem Wasser von 200 gr Gewicht.

Hinzugießen des kalten Wassers zum warmen Bodenbrei auf die 6. Minute,

Temperaturmessungen im Gemisch auf die volle 7. bis 10. Minute, dazwischen Schütteln des Gemisches.

Nach graphischer Extrapolation der Temperaturgänge auf die 6. Minute kann die spezifische Wärme des Bodens in der bekannten Weise berechnet werden. Dazu ist noch die Kenntnis der Wärmekapazität des Kalorimeters erforderlich. Sie ergab sich aus einer Versuchsreihe, bei der anstelle von 100 gr Boden 100 gr Wasser eingefüllt wurden. Hiermit sind dann auch etwaige Wärmeverluste durch Verdunstung, Erwärmung durch Schütteln etc. eliminiert. Bei 41 gleichartigen Versuchen mit Wasser ergab sich eine Streuung von 4.35%.

Zur Bildung des Integrals $\int_0^{35} d\varrho_B/dt \cdot dz$ wurde, einem Vorschlag von Dr. E. Röd entsprechend, ein Stabthermometer benutzt, dessen Meßelement, ein Platindraht von 2 mal 35 cm Länge und 100 Ohm Widerstand in einem dünnwandigen Glasrohr vergossen ist. Die Stelle, bei der im Rohr die Zuleitungen beginnen, ist äußerlich durch eine Ringmarke gekennzeichnet. Die Vergleichswiderstände der Meßbrücke waren dicht an der Meßstelle angebracht, so daß die Widerstandsänderungen der kurzen Zuleitungen zum Stabthermometer ohne Einfluß auf das Meßergebnis blieben. An dem Registriergerät entsprach einer Änderung der mittleren Bo-

dentemperaturen um 1°C ein Ausschlag von 32 mm, womit das Speicherglied auf $1 \text{ mcal/cm}^2 \text{ min}$ genau bestimmbar war.

H. Lettau (5) hat vorgeschlagen, für Bodentemperaturmessungen netzartige Temperaturfühler in horizontalen Ebenen des Bodens anzubringen, um repräsentative Mitteltemperaturen zu gewinnen. Die Anzeigen eines einzelnen Stabthermometers sind natürlich von Zufälligkeiten des Bewuchses und der Bodenstruktur der Meßstelle beeinflusst. Da aber unser Meßplatz in hinreichendem Abstand von den Baustellen der Funkmastfundamente liegt und wie der Hauptteil der weiteren Umgebung seit Jahrzehnten Dauergrünland darstellt, können wir kennzeichnende Werte der vertikalen Temperaturverteilung erwarten. Wir haben zur Kontrolle zeitweise zwei Stabthermometer benutzt und verglichen. Die beiden untersten Spuren in der Abb. 14 wiedergegebenen Registrierung gehören diesen Thermometern zu. Der mittlere Unterschied von 88 Werten

der stündlichen Temperaturänderung betrug nur $7.10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/Stunden}$.

Das letzte Glied in Gleichung [9] ist das Leitungsglied

$$B_k = \lambda d\theta_B/dz. \quad [10]$$

Anstelle des Temperaturgefälles wurde die vertikale Temperaturdifferenz zwischen Niveau von 32.5 und 37.5 cm Tiefe gemessen. Hierzu waren zwei Degussa-Hartglas-Stabthermometer mit 100 Ohm Platindraht in horizontaler Lage in den Boden gebracht worden. Wie die zur Messung der Lufttemperaturschichtung benutzten Thermometer waren auch sie gegeneinander geschaltet, so daß die jeweilige Mitteltemperatur in die Empfindlichkeit einging und bei der Auswertung zu berücksichtigen war. Wegen des sehr glatten Tagesganges des zu messenden Temperaturgefälles konnte ein hochempfindliches Registriergerät genutzt werden. Einer Temperaturdifferenz von 1°C auf 5 cm entsprach ein Ausschlag von 170 mm.

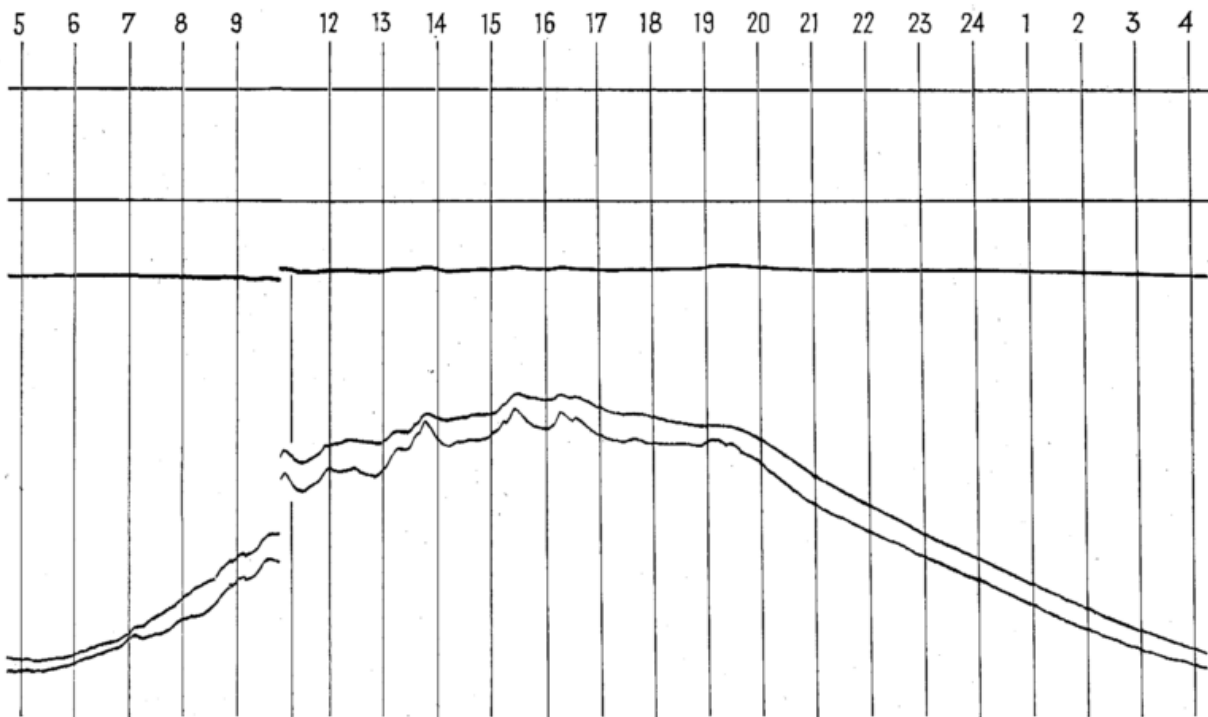


Abb. 14
Photographische Registrierung der Bodentemperaturen. Die beiden unteren Kurven gehören zu den mittleren Bodentemperaturen von 0 bis 35 cm Tiefe zweier verschiedener Meßstellen unter Wiesengras.

In Abb. 14 gehört die oberste Registrierspur zur verwendeten Meßspannung, die zweite zeigt den Galvanometer-Nullpunkt, die dritte gehört zum hier interessierenden vertikalen Differenzenquotienten der Bodentemperatur in 35 cm Tiefe.

Die stündlichen Zeitmarken sind mittels kurzzeitiger Erhöhungen der Meßspannung erzeugt worden.

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens wurde derselbe Ausstecher verwendet, der auch zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes dient. Im Zentrum des Ausstecherkopfes befindet sich eine Bohrung von 10 m Durchmesser, die einem zweiten dünnen Ausstecher Führung gibt. Wird dieser Ausstecher eingeschlagen, so entsteht ein Loch in der Bodenprobe, in das ein Heizstab eingeführt werden kann, der guten Kontakt mit dem Bodenmaterial hat. Auf halber Höhe des eisernen Heizstabmantels ist ein Konstantendraht eingelötet. Der Konstantendraht, so-

wie ein am Eisenmantel angelöteter Eisendraht ist zusammen mit den Zuführungen zur Heizwicklung zentrisch auf einer Seite herausgeführt. Der Ausstecher mit der Bodenprobe kann nun auf beiden Seiten so gut gegen Abfluß von Wärme isoliert werden, daß diese vom Heizstab radial abfließt. Hierzu dienen zwei Kissen, die Mäntel aus wasserundurchlässigem Kunststoff und Wattefüllungen haben. Am freien Ende des Konstantendrahtes ist eine zweite Lötstelle Konstantan-Eisen angebracht, die in eine Bohrung des äußeren Ausstechermantels eingeführt werden kann. Um trotz der elektrischen Isolation dieser Lötstelle einen möglichst guten Wärmekontakt mit dem Material des Mantels zu haben, ist die Bohrung nicht radial, sondern schräg zur Ausstecherachse orientiert.

Wir werden später bei der Diskussion der Meßergebnisse noch über Fehler der Messungen zu sprechen haben, die durch die oben erwähnte Überlagerung eines Stromes an Wasserdampf gebundener latenter

Wärme zu dem mit dem Temperaturgefälle proportionalen Strom fühlbarer Wärme entstehen konnten. In Voraussicht solcher Effekte haben wir den Heizstrom möglichst klein gehalten. Die relativ lange Einstellzeit des Temperatur-Gleichgewichtes betrug 1 Stunde. Um zu wohldefinierten Temperaturdifferenzen zu kommen, mußten wir im Laboratorium einen kräftigen Ventilator betreiben, der den Ausstechermantel mit 1 bis 2 m/sec Geschwindigkeit belüftet und Temperaturschichtungen im Laboratorium verhindert.

Wenn man den Strom latenter Wärme in der Bodenprobe (Verdampfung am Heizstab, Kondensation an der Innenseite des Ausstechermantels) vernachlässigen kann, so gilt

$$L = -\lambda \frac{d\theta}{dr} \quad [11]$$

wobei $L = 0.24 \text{ i}^2 W / (2\pi r l)$ die Heizleistung pro Flächeneinheit ist. $d\theta/dr$ ist umgekehrt proportional dem Radius. Durch Integration über r erhält man

$$\lambda = 0.24 (2\pi l) \cdot l \cdot i^2 \cdot W \cdot \ln r_a/r_l \cdot (\theta - \theta_a)^{-1} \quad [12]$$

Bei den Leitfähigkeitsmessungen lieferte der Heizstab pro Einheit seiner Oberfläche ca. 10^{-2} cal/sec . Es ist das etwa das 3-fache der größten beobachteten natürlichen Bodenwärmestromdichte unter Gras.

Als mittlere Wärmeleitfähigkeit λ des anmoorigen Quickborner Bodens wurde $2.3 \cdot 10^{-3}$, für die des sandigenen Lentförderner Bodens $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ erhalten, Werte, die im Rahmen der in Geigers Lehrbuch des Klimas der bodennahen Luftschichten veröffentlichten Tabelle (6) liegen. Die Extreme von λ lagen beim

	Maximum	Minimum
Quickborner Boden	$3.0 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3} \text{ cal}/(\text{cmsecC}^\circ)$
Lentförderner Boden	$3.0 \cdot 10^{-3}$	$0.4 \cdot 10^{-3} \text{ cal}/(\text{cmsecC}^\circ)$

Es ist auch eine Untersuchung über den Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit des Bodens und seinem Wassergehalt durchgeführt worden. Dazu wurden Bodenproben, ohne sie aus dem Ausstecherrohr zu entfernen, langsam in einem Heraeus-Trockenschrank getrocknet, stufenweisen die Leitfähigkeit gemessen und der Wassergehalt durch Wägungen bestimmt. Abb. 15 zeigt das Ergebnis einer solchen Meßserie. Weil sich Wassergehaltsbestimmungen mit dem CN-Gerät der Firma Riedel de Haën verhältnismäßig schnell durchführen lassen, ist mitunter auf die unmittelbare Leitfähigkeitsmessung verzichtet worden.

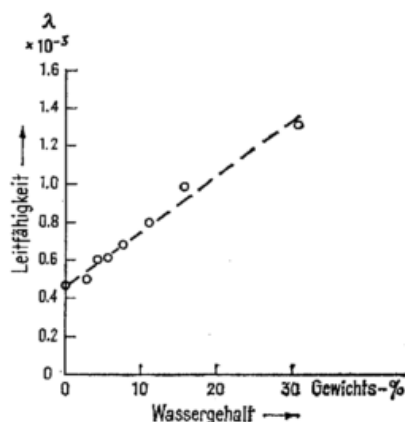


Abb. 15

Die Wärmeleitfähigkeit des Quickborner Bodens als Funktion des Wassergehaltes (künstliche Trocknung).

Berücksichtigt man alle Fehler, die in die Bestimmung der Bodenwärmestromdichte eingehen, sowie die

Häufigkeit der Konstantenbestimmung, so erhält man für die Stunde einen Gesamtfehler von $5 \text{ mcal/cm}^2 \cdot \text{min}$, für die Tagessumme des Bodenwärmeflusses pro Flächeneinheit einen mittleren Fehler von etwa 3 cal. Weil eine Gegenläufigkeit von ϱ_B und c einerseits und von ϱ_{BC} und $d\theta_B/dt$ andererseits beobachtet wird, sind die Fehler des Speicherungsgliedes im allgemeinen kleiner als veranschlagt, während Fehler des Leitungsgliedes, das kaum noch einen täglichen Gang erkennen läßt, in den Summen längerer Zeiträume stark in Erscheinung treten.

4.2. Mittelbare Austauschmeßmethoden

Die Sverdrup-Albrecht-Methode wird in der oben beschriebenen Form unzuverlässig, wenn sich der Quotient L/V dem Werte -1 nähert oder ihn erreicht. Es werden dann entsprechend der Gleichungen [3] und [4] etwaige Fehler der Q - oder B -Messung stark vergrößert auf die Wärmehaushaltskomponenten L und V übertragen. Solche Fälle treten besonders häufig im strahlungsarmen Winter oder in bewölkten Nächten auf, z. B. im Dezember 1957 an 100 Stunden, im Juli an 30. In diesen Fällen helfen Austauschbeziehungen weiter.

Wegen der bekannten Schwierigkeiten, den Einfluß der Bodenrauigkeit und der vertikalen Temperaturschichtung auf den Austausch eines nicht völlig homogenen Geländes zu bestimmen, haben wir uns nicht auf bestimmte theoretische Ansätze gestützt, sondern auf diejenigen empirischen Beziehungen zwischen der Wärmehaushaltskomponente L , den vertikalen Unterschied der Temperatur zwischen den beiden bodennächsten Meßniveaus $\Delta\theta$ und der Windgeschwindigkeit u , welche sich nach Sverdrup-Albrecht in denjenigen Zeiten ergeben haben, in denen L/V den Wert -0.2 noch nicht unter- bzw. den Wert -1.8 bereits überschritten hatte. In einem Koordinatensystem wurde L über $\Delta\theta$ eingetragen und am Meßpunkt die Windgeschwindigkeit vermerkt. Man bevorzugte dabei Tage, an denen ein ausgeprägtes Minimum der Schwankungsbreite von $\Delta\theta$ die Anwendung des unter 4.1.2. beschriebenen Kontrollverfahrens ermöglichte. Man benötigt etwa 15 Einzelwerte, um Isoplethen der Windgeschwindigkeit mit genügender Sicherheit einzeichnen zu können. An Hand der Diagramme kann man bei Vorliegen von Werten der vertikalen Temperaturdifferenz zweier Niveaus und der Windgeschwindigkeit L ohne Kenntnis von L/V , B und Q bestimmen. Man kann ein Austauschdiagramm auch mit Hilfe der Werte vertikaler Feuchttemperaturdifferenzen, der Differenz $(Q-B)$ und der Windgeschwindigkeiten herstellen, wenn die Meßniveaus so benachbart sind, daß man die potentielle Temperaturdifferenz mit der aktuellen gleichsetzen kann. Aus Gleichung [6] ergibt sich nämlich mit $q = R_l/R_w \cdot e/p$, daß bei normalem Luftdruck

$$V = -r_w \cdot R_l \cdot R_w^{-1} \cdot p^{-1} \cdot \Delta e \cdot \Delta z^{-1} \cdot A_v = \sim -0.49 \cdot \Delta e / \Delta z \cdot A_v \quad [13]$$

ist. Ersetzen wir in [13] noch Δe durch die aus der Psychrometergleichung resultierenden Differenzen trockener und feuchter Temperaturen, ebenfalls für Normaldruck,

$$\Delta e = (dE/d\theta' + 0.49) \Delta\theta' - 0.49 \Delta\theta \quad [14]$$

und addieren wir Gleichung [5], in welcher wir voraussetzungsgemäß $\Delta\theta$ durch $\Delta\theta'$ ersetzen, so ergibt sich bei Gleichheit von A_v mit A_l

$$(L+V) = (Q-B) = -A c_p \cdot (2.05 dE/d\theta' + 1) \cdot \Delta\theta' / \Delta z \quad [15]$$

Wir müssen demnach die gleichen Windgeschwindigkeitsisoplethen im Austauschdiagramm erhalten, wenn wir anstelle der Temperaturdifferenzen die Feucht-

temperaturdifferenzen und anstelle der Wärmehaushaltskomponente L den Quotienten $(Q-B)/(2.05 \, dT/d\theta + 1)$ verwenden.

Abbildung 16 zeigt ein Austauschdiagramm, das am Lentfördrer Meßfeld gewonnen ist. Man erkennt an den relativ geringen Abweichungen der Meßpunkte von den Isoplethen der Windgeschwindigkeit, daß bei höheren Windstärken (erzwungene Turbulenz) eine Proportionalität zwischen Strom und Gefälle besteht. Hier erweist sich die Anwendung der viel umstrittenen Austauschkoeffizienten von W. Schmidt als nützlich. Wichtig ist allerdings, daß stündliche Mittelwerte benutzt werden, weil solche kürzerer Zeiten oft nicht für den Gesamtaustausch repräsentativ sind. Erst bei

Windgeschwindigkeiten unterhalb von 3 m/sec und bei Temperaturgradienten von mehr als ca. 33° pro 100 m macht sich die Austauschsteigerung der freien Konvektion bemerkbar. Hier muß man bei der Anwendung des Diagramms, wie wir noch sehen werden, u. U. die Tageszeit berücksichtigen. In den Stunden des frühen Vormittags bilden sich nämlich starke Temperaturgradienten aus, und bis zum Einsetzen der freien Konvektion liegen auch die $(Q-B)$ -Werte auf der vom Nullpunkt ausgehenden geradlinigen Verlängerung der Isoplethen.

Weil die vertikalen Austauschkoeffizienten mit der Windstärke wachsen, werden bei hohen Windgeschwindigkeiten kleine vertikale Temperatur- und Feucht-

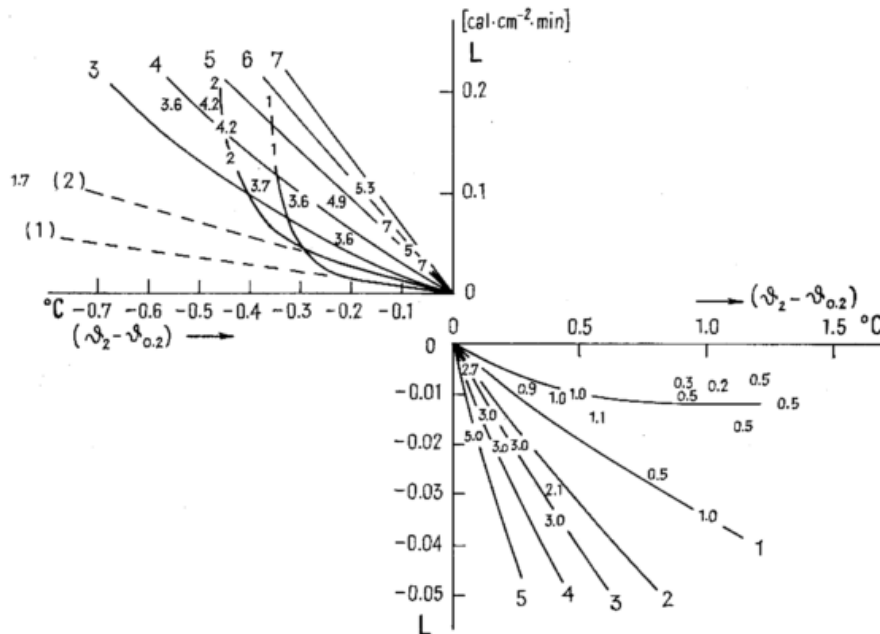


Abb. 16
Vertikale Wärmestromdichte L als Funktion des Temperaturunterschieds der Luft in 2 und 0,2 m Höhe über einem Klee-feld. Die kleineren Ziffern geben die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe an.

temperatur-Unterschiede gefunden. Etwaige Nullpunktverschiebungen des Temperaturschreibgerätes können dann große Fehler der abgeleiteten Quotienten L/V zur Folge haben. In diesen Fällen ist der Anwendung des Austauschdiagramms der Vorzug vor der Benutzung der Gleichungen [3] und [4] zu geben.

Will man Werte der Wärmestromdichte L erhalten, die dem Mittelwert größerer Geländeflächen näher kommen, als das bei den Sonderuntersuchungen am Meßfeld Lentfördrer erwünscht war, so erweist sich ein Austauschdiagramm als nützlich, das auf empirischem Wege unter Benutzung der Windwerte und der Werte vertikaler Temperaturgefälle größerer Höhen gewonnen wird. Leider ist man aus Gründen der Meßgenauigkeit genötigt, den Abstand benachbarter Meßstellen um so größer zu wählen, je höher sich die unterste über dem Erdboden befindet. Den größeren Abständen Δz entsprechend, kann man dann gewöhnlich potentielle Temperaturdifferenzen größerer Höhe nicht mehr mit den aktuellen gleichsetzen, womit der Vorteil entfällt, ein mittels der Größen $(Q-B)/(2 \, dT/d\theta + 1)$ und $\Delta\theta'$ gewonnenes Austauschdiagramm näherungsweise auch für L und $\Delta\theta$ zu benutzen.

Abb. 17 gibt den empirischen Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte L , den vertikalen Temperaturdifferenzen zwischen 13 und 2 m Höhe, sowie den Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe wieder. Wie an der Lage einzelner Meßpunkte zu den eingezeichneten

Windgeschwindigkeitsisoplethen zu erkennen ist, ist die Streuung hier größer als bei der vorigen Abbildung 16. Im inversionellen Bereich (rechter Teil der Abbildung) ist die durchschnittliche Abweichung $3-4 \, \text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, im überadiabatischen Bereich ca. $5 \, \text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$. Leider ist es nicht möglich, die sicherlich vorhandenen stetigen Übergänge zwischen den relativ hohen überadiabatischen Austauschkoeffizienten zu den relativ kleinen inversionellen Werten mit Hilfe des Diagramms näher zu studieren. Man erkennt lediglich, daß dieser Übergang um so schroffer ist, je geringer die Geschwindigkeit des Windes war. Wir werden aber Näheres hierüber in einem späteren Kapitel behandeln können, wobei auch der mit einem Stern gekennzeichnete Punkt Erwähnung finden wird. Abb. 17 gilt für eine Bodenrauigkeit, wie sie durch das spätherbstliche und winterliche abgestorbene Wiesengras ohne Schneebedeckung gebildet wird.

4.3. Zur Bestimmung der Schmelzwärme pro Flächen- und Zeiteinheit

Beim Schmelzen von Schnee liegen oft die Feuchtemperaturen der Luft über null Grad, so daß die Psychrometer benutzt werden können, um nach Gleichung [15] die Summe $(L+V)$ aus der vertikalen Feuchtemperaturdifferenz und der Windgeschwindigkeit mit Hilfe des Austauschdiagramms (Abb. 16 oder 17) zu be-

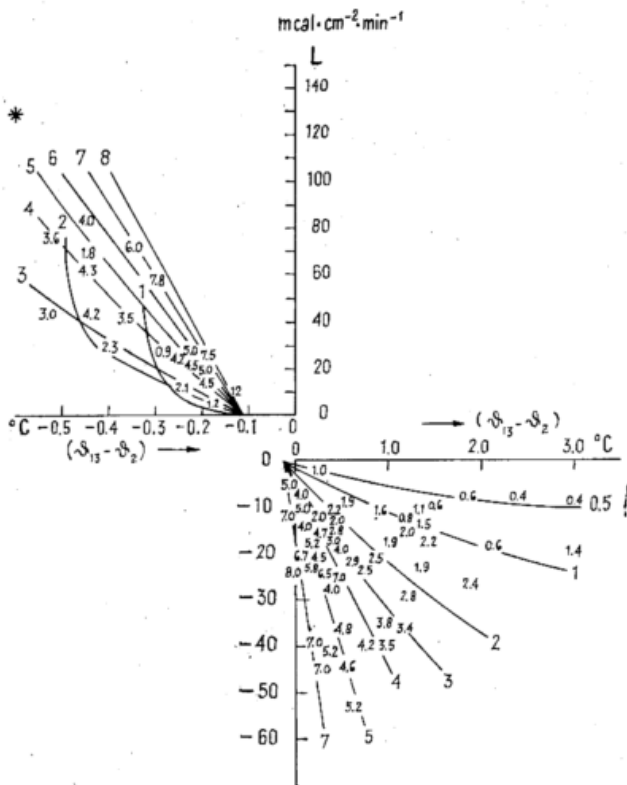


Abb. 17

Vertikale atmosphärische Wärmestromdichte L über Gras als Funktion des Temperaturunterschieds zwischen 13 und 2 m Höhe, Parameter ist die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe.

stimmen. Da beim Auftreten von Schmelzwärme ($L+V$) gleich ($Q-B-G$) ist, läßt sich beim Vorliegen gemessener Werte von Q und B durch Subtraktion G leicht bestimmen. Auch Schmelzvorgänge, die innerhalb der oberen Bodenschichten auftreten, werden bei diesem Verfahren erkennbar. Bei der Anwendung von Austauschdiagrammen auf Tage mit Schneebedeckung haben wir zunächst eine Rauigkeitskorrektur eingeführt. Paeschke (7) hat festgestellt, daß vertikale Austauschkoefizienten über Gras 40% größer sind als über Schnee. Dementsprechend haben wir die mit dem Diagramm erhaltenen ($Q-B-G$)-Werte mit dem Korrekturfaktor 0.71 versehen. Die Schneefälle, Gefrier- und Tauvorgänge längerer Zeiträume haben uns aber gezeigt, daß sich der richtige Korrekturfaktor nicht wesentlich von 1 unterscheidet. Offenbar sind über unserem Meßfeld Turbulenz und Austauschkoefizienten nur wenig vom Zustand der Unterlage und mehr von den höheren Hindernissen wie Hecken, Zäune etc. abhängig. Wir haben uns deshalb bei der Ermittlung von G auch vorwiegend auf die Ermittlung der Höhen und des Wassergehaltes des gefallenen Schnees, deren Änderungen und auf die beobachteten Durchschnittswerte der Schneebedeckung, sowie auf die beobachteten Bodentemperaturen verlassen. Es wurde festgestellt, daß die Grasnarbe unseres Meßfeldes im Winter durchschnittlich 0.15 gr Wasser/cm² des Bodens enthält, so daß allein der häufige Wechsel zwischen nächtlichem Bodenfrost und mittägigem Auftauen eine Tagesamplitude von G in Höhe von 12 cal/cm² bringt.

4.4. Unmittelbare Austauschmeßmethode

Neben der Sverdrup-Albrecht-Methode und dem Austauschdiagramm ist noch ein drittes Verfahren angewendet worden, bei welchem die durch turbulente Bewegungen getragenen vertikalen atmosphärischen Flüsse aus simultanen Messungen der vertikalen Zu-

satzkomponenten des Windes und den Abweichungen der Konzentration der übertragenen Größe von ihrem Mittelwert abgeleitet werden. Beim vertikalen Impulsstrom (Reynoldsstress) sind solche Messungen zuerst von Dines und F. Möller, dann von Shiotani und von A. M. Obuchow veröffentlicht worden, beim atmosphärischen Wärmestrom von W. Albrecht und in vollkommener Form von W. C. Swinbank, sowie von D. Parson und A. F. Bunker. Eine eingehende Behandlung der Theorie solcher Messungen findet man bei C. H. B. Priestley und W. C. Swinbank (8).

Dank der Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ist es gelungen, der Swinbankschen Anordnung eine Form zu geben, in welcher die sonst mühsame Auswertung automatisch vollzogen wird. Die technischen Einzelheiten der neuen Apparatur sind 1958 von E. Frankenberger (9) beschrieben worden. Wir gehen auf sie nur soweit ein, als zum Verständnis der Wirkungsweise und der möglichen Fehler erforderlich ist.

Der Vertikal-Komponentenföhler, genauer der Föhler für das Produkt $\rho\omega$, besteht aus zwei geraden gleichlangen Platindrähtchen, die durch Anlegen einer konstanten elektrischen Spannung geheizt werden. Mittels einer sehr leichten Windfahne werden die Drähte dem Winde so ausgesetzt, daß die Mittellinie des von ihnen gebildeten Winkels stets horizontal liegt, und daß die senkrechten Projektionen der Drähtchen in Windrichtung verlaufen. In der elektrischen Schaltung bilden die Drähtchen die beiden Zweige einer Wheatstonschen Meßbrücke, in welcher Querspannungen auftreten, sobald die Temperaturen und damit auch die Widerstände der Drähtchen verschieden sind. Weht der Wind horizontal, so tritt kein Temperaturunterschied auf, weil dank der symmetrischen Lage die Längskomponenten und die Querkomponenten der Anblasung bei beiden Hitzdrähtchen gleich sind. Hat jedoch der Wind eine von Null verschiedene Vertikalkomponente, so ist auch das Verhältnis der Längs- und Querkomponente der Anblasung bei beiden Drähtchen verschieden. Dort, wo die Längskomponente überwiegt, stellt sich die höhere Drahttemperatur ein. Bereits 1927 hat Simmons Richtungsmesser des Windes auf dieser Grundlage konstruiert.

Die Empfindlichkeit E solcher Geräte, die man in mA pro Winkelgrad angibt, wird um so größer und ihr Meßbereich um so kleiner gefunden, je spitzer der von den Hitzdrähtchen gebildete Winkel ist. Bei unserer Apparatur ist der Winkel veränderlich. Zwei Stauplatten regeln ihn so, daß die Empfindlichkeit E der Apparatur annähernd proportional der Windgeschwindigkeit wird. Man kann dann die vom Meßfühler gelieferten Spannungen als proportional der Größe der Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit ansehen. Befriedigende Proportionalität konnte leider nur in einem Windgeschwindigkeitsbereich zwischen 1.0 und 7 m/sec erzielt werden.

Die elektrischen Spannungen, welche der Meßfühler liefert, werden durch einen photoelektrischen Kompensationsverstärker mit linearer Charakteristik (Lindeck-Rothe Schaltung) verstärkt, den wir im Folgenden w Verstärker nennen werden. Der Verstärker besitzt zwei Ausgänge. Aus dem ersten kann man Ströme entnehmen, deren Vorzeichen der Richtung der Vertikalkomponente entspricht. Der zweite Ausgang liefert die den verstärkten Meßwerten entsprechenden Ströme nur, solange die Vertikalkomponente wahlweise nur das positive oder nur das negative Vorzeichen besitzt, d. h. an diesem Ausgang können wahlweise nur die Aufwind- oder nur die Abwindkomponenten des Windes gemessen werden.

Bevor wir weitere technische Einzelheiten des Wärmestrommessers beschreiben, haben wir auf die vom

Standpunkt der Meßgenauigkeit wichtige Frage einzugehen, wie der Meßfühler justiert wird. Bekanntlich täuscht ein Justierfehler von 1 Winkelgrad bei einer Windgeschwindigkeit von 5.8 m/sec bereits eine Vertikalkomponente von 10 cm/sec vor. Die Turbulenztheorie unterscheidet zwischen der mittleren Strömung und den Zusatzgeschwindigkeiten. Die mittlere Strömungsrichtung wird, da es im Gelände völlig ebenen Boden nicht gibt, mehr oder weniger von der Horizontalen abweichen. Mit den Symbolen w für die momentane und $\bar{w}$ für die mittlere Vertikalkomponente der Strömung ist die mittlere Neigung der Strömungsrichtung zur Horizontalen durch die Bedingung gekennzeichnet

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\bar{w}}{u}$$

In leicht welligem, aber großräumig flachem Gelände gilt für die vom Boden erwungene Vertikalbewegung der Luft

$$\iint \varrho \cdot w_z \cdot dx_z \cdot dy_z = \iint \varrho \cdot \bar{w}_z \cdot dx_z \cdot dy_z,$$

während für den turbulenten Anteil eine örtliche Kontinuität

$$\int_0^T \varrho \cdot (w_z - \bar{w}) \cdot dt_z = \int_0^T \varrho \cdot (w_z - \bar{w}) \cdot dt_z$$

angenommen werden kann, solange man nur wenige Meter (bis ~ 5) über dem Boden mißt und T hinreichend groß ist.

Apparative Organe, welche den Meßfühler in die mittlere Neigung des Windrektors stellen sollen, müssen so träge arbeiten, daß ihre Zeitkonstante groß gegen dasjenige kleinste T ist, für welches die Kontinuitätsgleichung gerade erfüllt ist.

Wir fragen uns, wie lange wir ϱw messen müssen, bis mit einer vorgegebenen Genauigkeit die Kontinuitäts-Bedingung erfüllt ist. Dazu müssen wir wissen, wie die Amplitude vertikaler Geschwindigkeitsschwankungen von ihrer Periode abhängt. Wir benutzen zunächst Quickborner Beobachtungen der Geschwindigkeitsamplituden langperiodischer Windschwankungen, um an Hand von Modellvorstellungen Aufschluß über die zu erwartenden Vertikalkomponenten zu erhalten. In Abb. 18 stellen die im Abstand L' gezeichneten vertikalen Linien die Orte dar, denen unmittelbar benachbarte Windgeschwindigkeitsmaxima zugehören.

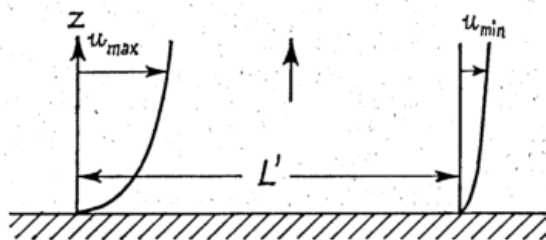


Abb. 18
Zweidimensionales Modell einer Windschwankung.

Aus einer Veröffentlichung des Meteorologischen Amtes für Nordwestdeutschland 1949 (12) ist zu entnehmen, daß die größten langperiodischen Geschwindigkeitsunterschiede in 10 m Höhe das 0.76-fache, in 30 m Höhe das 1.01-fache und in 70 m Höhe das 1.08-fache der in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeit betragen. Sie wachsen in ähnlicher Weise mit der Höhe wie die mittlere Geschwindigkeit, was in der Abbildung durch die beiden Profilkurven angedeutet ist. Nimmt man an, daß durch Luftdruckschwankungen wesentliche kleinräumige Konvergenzen und Divergenzen der Strömung nicht entstehen, so ist der mittlere absolute

Betrag der Vertikalgeschwindigkeit im zweidimensionalen Modell gegeben durch

$$|\bar{w}|_z = \frac{1}{L'} \int_0^z \Delta \bar{u}(z) dz$$

Die Interpolation der oben gegebenen Böigkeitsdaten liefert für den Höhenbereich zwischen 0 und 250 cm einen mittleren Geschwindigkeitsunterschied von $0.14 \bar{u}_{10}$. Somit ist

$$|\bar{w}| = \sim 35/L' \cdot \bar{u}_{10} \quad (\text{cm/sec})$$

Wir messen bei Turbulenzuntersuchungen $|\bar{w}|$ zu etwa $0.1 \cdot \bar{u}_{10}$. Da höchstwahrscheinlich das Schwankungsspektrum des Windes dem der Temperatur ähnlich ist, können wir eine Meßgenauigkeit von 4% beim Wärmestrom erwarten, wenn sie 2% bei der Vertikalgeschwindigkeit beträgt. Eine mittlere Vertikalgeschwindigkeit von $0.002 \cdot \bar{u}_{10}$ tritt nach obiger Gleichung auf, wenn der Abstand L' 180 m beträgt. Diesem räumlichen Ausmaß entspricht eine Schwankungsdauer, die größenordnungsmäßig bei $180/\bar{u}_{10}$ liegt, d. h. zwischen 30 und 180 sec.

Wählt man die Beobachtungszeit zu 8 Minuten, so fallen in sie ca. 1.3 bis 4 derartige Perioden. Der mittlere Fehler von $|\bar{w}|$ infolge Auftretens von Bruchteilen einer Vollperiode ist somit kleiner als 1%. Eine graphische Untersuchung zeigt, daß der Fehleranteil der höheren Frequenzen fast ebensohoch ist als derjenige der betrachteten Grenzfrequenz. Im Einzelfall werden auch Fehler von 5% auftreten, da bei experimentellen Untersuchungen die Maximalamplituden etwa das Fünffache der mittleren erreichten, doch sind für ein dreidimensionales Modell geringere mittlere Vertikalgeschwindigkeiten und entsprechend kürzere Zeiten T zu erwarten.

Wir verwenden nun für die Fehlerbetrachtung eine von E. L. Deacon (13) 1955 veröffentlichte Spektralkurve des Reynoldsstress, die auf theoretischen wie auf experimentellen Befunden beruht und von der wir annehmen, daß sie der Spektralkurve der Energie der vertikalen Windkomponente ähnlich ist. Diese Kurve, die für eine Windgeschwindigkeit von 3.34 m/sec und eine Höhe von 7 m über dem Boden gilt, haben wir am niederfrequenten Ende verlängert und erhalten als Anteil der längerdauernden Schwankungen

länger als 90 sec	1%	des Spektrums
länger als 55 sec	2%	des Spektrums
länger als 40 sec	3%	des Spektrums
länger als 35 sec	4%	des Spektrums.

Das sind Werte, die den aus unseren Modellvorstellungen abgeleiteten sehr ähnlich sind.

Die Einstellung des Meßfühlers der w -Apparatur wurde folgendermaßen vorgenommen: Im Laboratorium konnte die Mittellinie des von den Hitzdrähten gebildeten Winkels auf etwa 1° genau mittels einer Justierschraube senkrecht zur Achse des Mastes eingestellt werden. Auf dem Meßfeld wurde der Mast an den Spannseilen auf 0.5 bis 1° genau senkrecht gestellt. Die restliche Justierung des Nullpunktes der Messung auf die mittlere Strömungsrichtung wird automatisch mit Hilfe einer elektrischen Regelung erreicht. Hierzu ist vor den ersten Ausgang des w -Kompensators ein hochempfindlicher Motor der Firma Fernsteuergeräte O.H.G. Berlin-Wilmersdorf geschaltet. Die Zahl der Umdrehungen seiner Welle ist proportional der Differenz

$$\int_0^T \varrho (w_z - \bar{w}) \cdot dt_z - \int_0^T \varrho (w_z - \bar{w}) \cdot dt_z$$

Bei Überwiegen eines der Glieder infolge fehlerhafter Justierung, Neigung des Geländes, mangelhaftem elek-

trischem Abgleich oder auf Grund von Zufälligkeiten der Turbulenz überwiegt eine einseitige Drehrichtung des Motors, dessen Bewegungen über ein Untersetzungsgetriebe auf die Nullpunktstellvorrichtung des im $\bar{u}$ -Verstärkers befindlichen Galvanometers übertragen werden. Gemäß einer Exponentialfunktion regelt der Motor die Nullstellung mit einer Zeitkonstante von 520 sec so ein, daß die zweite Bedingung erfüllt erscheint.

Die Amplituden der Schwankungen von 5 sec Dauer — d. s. solche, die dem Maximum der Spektralkurve nahe liegen — werden durch die Nachreglung nur um einige Promille beschnitten. Bei einer Schwankung von harmonischer Form und 90 sec Dauer beträgt der Verlust im Mittel 5%. Wiegt man die Verluste einzelner Schwankungszeitzbereiche mit dem Anteil, den sie am Spektrum haben, so erhält man einen Totalverlust von 2—3%. Er nimmt mit wachsender Windgeschwindigkeit ab. Etwas geringer sind die Verluste, die beim hochfrequenten Ende des Spektrums infolge eines geringen Schlupfes beim Anlaufen des Meßmotors eintreten. Sie nehmen mit der Windgeschwindigkeit zu, so daß sich durch beide Fehler ein nur wenig mit der Windgeschwindigkeit veränderlicher Gesamtfehler von 3—4% ergibt. Um diese Beträge werden vertikale Wärmeströme zu klein gemessen. In jüngster Zeit hat F. Wippermann (14) eine Gleichung gewonnen, mit welcher man den Einfluß der Apparatekonstanten auf die Größe der gemessenen Mittelwerte auch bei einer exponentiellen Nachreglung berechnen kann. Auf das oben genannte von Deacon angegebene Spektrum angewendet, ergab sich für unser Gerät eine erforderliche Korrektur, die um 2% kleiner ist als die aus den Modellvorstellungen abgeleitete und 2% beträgt.

Das zur Messung kurzperiodischer Temperaturänderungen benutzte Thermometer ist aus Platindraht von 0.02 mm Durchmesser gefertigt. Es ist in eine Wheatstonesche Brücke geschaltet, die mit dem ersten Ausgang des w -Kompensators verbunden ist. Wir messen somit am Ausgang dieser Temperaturmeßbrücke eine dem Produkt $\bar{q}w\bar{\theta}$ proportionale Spannung, die mittels eines zweiten Kompensators, den wir $\bar{q}w\bar{\theta}$ -Kompensator nennen, unter Verstärkung auf ca. 10^5 zum Antrieb eines Zählermotors benutzt wird.

Der Meßbereich der Kompensatoren reicht bis 10 mA, die den Stromspitzen vorbehalten werden müssen. Der mittlere Zählerstrom ist 0.5 bis 1 mA und der Anlaufstrom 0.01 mA. Bekanntlich geht, solange die Kontinuitätsbedingung erfüllt ist, die Größe der Mitteltemperatur nicht in den turbulenten vertikalen Wärmestrom ein, weil sich ihre positiven und negativen Produkte mit $\bar{q}w$ aufheben. In der Praxis ist sie aber doch bedeutsam, weil sie bzw. der ihr entsprechende Querstrom der Meßbrücke die Momentanwerte der Produkte $\bar{q}w\bar{\theta}$ über den Bereich linearer Verstärkung herauszuheben vermag. Es muß deshalb angestrebt werden, die Temperaturmeßbrücke so gut abzustimmen, daß die positiven und negativen Zählerströme vorherrschend von den Temperaturschwankungen und weniger von der Mitteltemperatur abhängen.

Um auch die Abstimmung der Temperatur-Meßbrücke weitgehend zu automatisieren, ist dem regen Drahtthermometer ein sehr träges entgegengeschaltet. Es besteht aus einem hochpolierten Metallzylinder, der thermisch und elektrisch isoliert, eine Spule aus Platindraht enthält. Die Halbwertszeit dieses Thermometers ist derjenigen der Motornachlaufvorrichtung angeglichen worden. Am Mast des Gebers ist ein kleines Potentiometer angebracht, mit dem man Korrekturen der Abstimmung vornehmen kann. Leider kommen mitunter derart rasche Änderungen der mittleren Lufttemperatur vor, daß die Stromspitzen 10 mA erreichen oder

überschreiten. Bisweilen war es viermal am Tage notwendig, die Abstimmung zu korrigieren. Die Anlage konnte deshalb leider nicht völlig ohne Aufsicht gelassen werden. Die Kompensatoren wurden hierzu im Meteorologen-Arbeitsraum aufgehängt und über ein 100 m langes Kabel mit dem Geber verbunden. Die Notwendigkeit einer Abstimmungskorrektur äußerte sich an Ausschlägen eines Milliampereometers und an den feinen Geräuschen, die bei stärkerem Strom vom Zählermotor ausgehen, weil der Deckel als Resonator wirkt.

Das Gehäuse des Meßfühlers konnte mittels eines Elektro-Magneten vom Beobachtungsraum aus um einen Winkel von 4° gekippt und gleichzeitig das Getriebe der Regelvorrichtung von der Nullpunktstellvorrichtung des Galvanometers ausgekoppelt werden. Das Kippen des Meßfühlers täuscht eine zusätzliche Vertikalkomponente des Windes von $\bar{u} \tan 4^\circ$ vor. $\bar{u}$ bedeutet die Windgeschwindigkeit in Höhe des Meßfühlers, welche mit einem leichten Flügelrad-Anemometer gemessen worden ist. Durch das Vortäuschen einer zusätzlichen Vertikalkomponente entsteht ein bevorzugt einseitiges Drehen der Regelvorrichtung. Mit dem Getriebe ist ein Signalgeber verbunden, welcher gestattet, die mittlere Tourenzahl während des Kippens zu bestimmen. Die Empfindlichkeit des Meßfühlers E ergibt sich als Quotient der dieser Tourenzahl entsprechenden Stromstärke und der Vertikalkomponente $\bar{u} \tan 4^\circ$. Es hat sich bei statistischer Verarbeitung der Meßergebnisse, wie wir noch sehen werden, gezeigt, daß wir im Bestreben, die Wärmestrommessung nur so kurz wie möglich zu unterbrechen, die Zeit der Empfindlichkeitsprüfung öfters zu klein gewählt haben. Der mögliche Fehler der Laboratoriumseichnungen für w und $\bar{\theta}$ lag bei 2—3%.

Bevor wir die Meßreihen der Wärmehaushaltskomponenten am Erdboden während des Internationalen Geophysikalischen Jahres anführen, haben wir noch kurz auf eine Sonderuntersuchung einzugehen, die für die Anwendung der Meßmethoden wichtig ist.

Wie oben bereits erwähnt wurde, bietet unsere Apparatur zur unmittelbaren Messung der Stromdichte atmosphärischer Wärme auch die Möglichkeit, den mittleren Absolutbetrag der Vertikalkomponente des Windes zu bestimmen. Über die Ergebnisse ist ausführlich in der Zeitschrift „Physik der Atmosphäre“ berichtet worden, so daß wir hier nur die dort abgeleiteten Folgerungen zu nennen brauchen:

1.) Der mittlere Absolutbetrag der turbulenten Vertikalkomponente des Windes, $|\bar{w}|$, ist weitgehend der mittleren Windgeschwindigkeit eines bodennahen Niveaus proportional. So ist in $2\frac{1}{2}$ m Höhe

$$|\bar{w}| = 0.139 \bar{u}_{0.5}$$

2.) Da die Reibung des Windes dicht über unserem Meßfeld von kleinräumigen Rauigkeitswerten abhängt, — nämlich von denen des Wiesenbodens —, in größerer Höhe aber von der durchschnittlichen Rauigkeit eines größeren Geländes, so finden wir in höheren Schichten für die mittleren Absolutwerte der Vertikalkomponente eine Proportionalität mit Windgeschwindigkeitswerten, die dicht über den höchsten Hindernissen unseres Geländes gemessen werden. So war in 70 m Höhe

$$|\bar{w}| = 0.118 \bar{u}_{0.9}$$

3.) In geringen Höhen ist $|\bar{w}|$ gleich der Schubspannungsgeschwindigkeit. Wir fanden

$$\begin{aligned} * \\ u_{2.5} &= 0.139 \bar{u}_{0.5}, \\ * \\ u_{16} &= 0.140 \bar{u}_{0.5}, \end{aligned}$$

wobei das Anwachsen der Proportionalitätsfaktoren, wie unter 2.) erwähnt, durch den Windschutz zu er-

klären ist, den entferntere höhere Hindernisse unserem Meßfeld bieten.

4.) Eine Abhängigkeit der Quotienten $\overline{w}/\bar{u}_{0,5}$ von der vertikalen Temperaturschichtung war nicht festzustellen. Den Änderungen der Windgeschwindigkeit folgt die vertikale Windkomponente mit großer zeitlicher Verzögerung.

5.) Approximiert man die vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung zwischen 10 und 70 m Höhe durch eine Potenzfunktion

$$(\bar{u}/\bar{u}_1) = (z/z_1)^m \quad [16]$$

so gilt für den Mischungsweg

$$1 - z \cdot (\bar{u}/\bar{u}_{0,5}) \cdot (z_{0,5}/z)^{m+1} \quad [17]$$

und für den vertikalen Diffusionskoeffizienten

$$K = (\bar{u}/u_{0,5})^2 \cdot (z_{0,5}/z)^m \cdot z/m \cdot \bar{u}_{0,5} \quad [18]$$

Mittlere stündliche Diffusionskoeffizienten, die für eine Höhe von 35 m nach dieser Formel berechnet sind, stimmen bei $\bar{u}_{10} = 3$ m/sec auf -18% , bei 5 m/sec auf -26% und bei 8 m/sec auf -9% mit denjenigen Diffusionskoeffizienten überein, die für 35 m allein aus den vertikalen Temperaturgradienten und Wärmehaushaltsdaten, d. h. ohne Benutzung von Wind- oder Turbulenzwerten berechnet worden sind. Wegen der geringen Größe vertikaler Temperaturgradienten in 35 m Höhe sind die aus dem Wärmehaushalt berechneten K-Werte mit großen Fehlern behaftet, die den gefundenen Unterschied zu erklären gestatten.

6.) Die aus vertikalen Unterschieden der Windgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchtigkeit größerer Höhen mittels Austauschgleichungen berechneten Vertikalströme decken sich mit den nach Wärmehaushaltsverfahren bestimmten nur, wenn stündliche Mittelwerte verwendet werden. Das ist mit der großen Mächtigkeit derjenigen Schichten zu erklären, an deren Grenzen wir Zustandsgrößen gemessen haben.

7.) Die unter 5.) erwähnte Ähnlichkeit der aus Windwerten und aus Wärmehaushaltsdaten abgeleiteten mittleren stündlichen Austausch- oder Diffusionskoeffizienten wird nur bei Wetterlagen beobachtet, bei welchen überadiabatische, neutrale oder mäßig inversionelle Temperaturschichtung herrscht. In starken In-

versionen von mehr als 1.5°C pro 100 m wird wesentlich mehr Wärme übertragen als nach den aus Winddaten berechneten Austauschkoefizienten erwartet wurde. Offenbar äußert sich hierin die Wirkung der sog. Strahlungsscheinleitung.

Wir haben diese Ergebnisse benutzt, um auch Austauschkoefizienten der unteren Schichten zu berechnen. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß der vertikalen Verteilung der Windgeschwindigkeiten in den bodennahen Schichten etwas höhere Exponenten m entsprechen als in den größeren Höhen. Hierfür ein Beispiel: Bei einem Temperaturunterschied zwischen 13 und 2 m Höhe von -0.6°C ist als Mittelwert zahlreicher Messungen ein Exponent m von 0.175 gefunden worden. Für eine Windgeschwindigkeit von 6 m/sec und m zu 0.175 liefert Gleichung [18] einen vertikalen Diffusionskoeffizienten, der in Verbindung mit dem angenommenen Temperaturgefälle einen vertikalen Wärmestrom L von $133 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ zur Folge hat. Zur Kontrolle haben wir diesen Wert im Austauschdiagramm mit einem Stern gekennzeichnet. Er stimmt gut mit

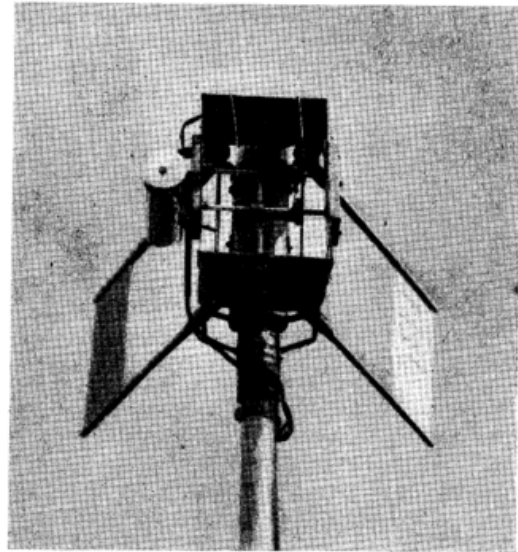


Abb. 19
Fühler des Wärmestrom-Meßgeräts.

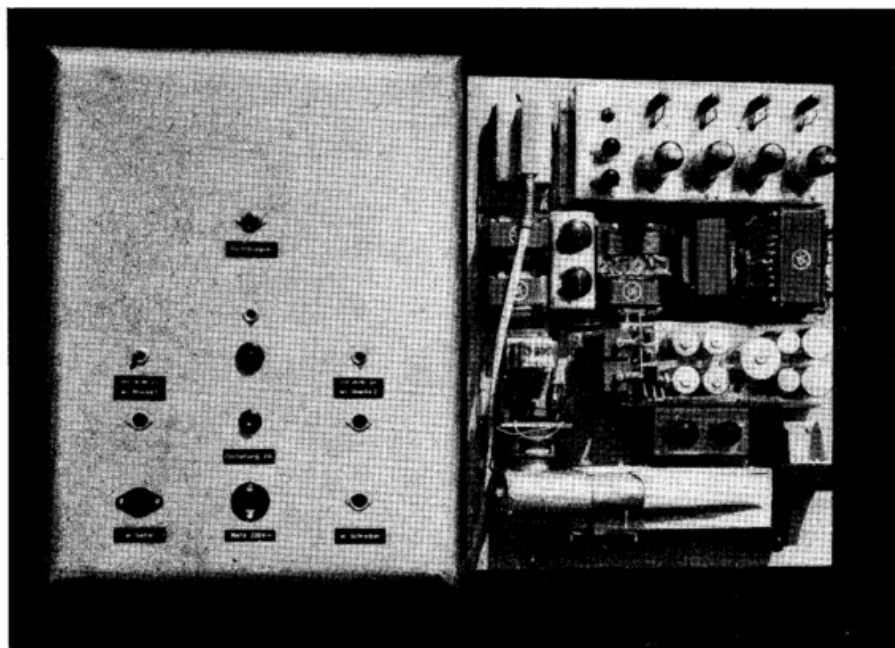


Abb. 20
Der Verstärker mit Kompensator für die Messung der vertikalen Windkomponente.

den allein aus Wärmehaushaltsdaten ermittelten Wert überein, wobei allerdings die Abhängigkeit von m sehr hoch ist. Ein um nur 3% höherer Exponent m führt bereits auf eine um 14% kleinere Wärmestromdichte.

Während Abb. 19 den Geberteil des Wärmestrom-Meßgerätes zeigt, sieht man auf Abb. 20 den w -Verstärker, auf Abb. 21 den $q_{w\theta}$ -Verstärker und auf

Abb. 22 den $\overline{w}$ -Schreiber. Dank der rapiden Fortschritte in der Transistortechnik könnte man heute die Geräte leichter bauen.

Wir wenden uns nun den mit der gleichen Apparatur gemessenen vertikalen Wärmestromdichten zu. Wir haben an geeigneten Tagen, d. h. an solchen, an denen wir Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 7 m/sec, nicht aber Niederschlag erwarten konnten, die Appa-

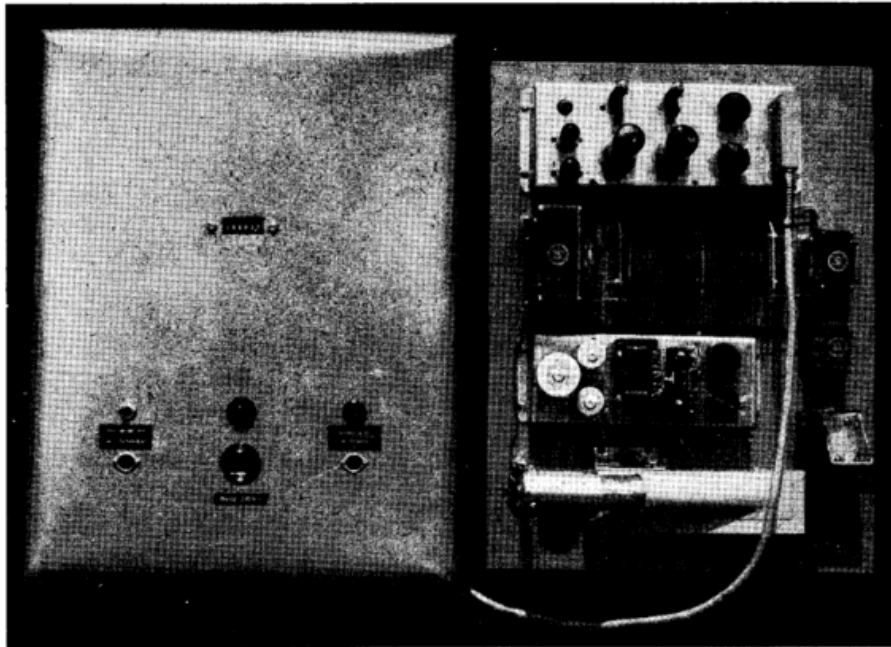


Abb. 21
Der Verstärker mit Zählvorrichtung für den vertikalen Wärmestrom pro Flächeneinheit.

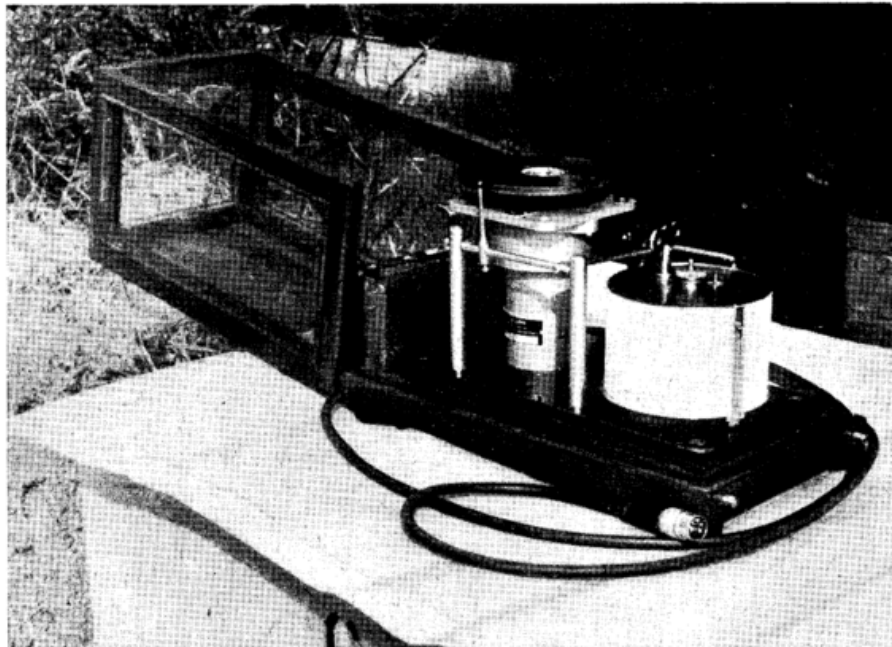


Abb. 22
Schreibgerät für die vertikale Windkomponente.

ratur auf einem benachbarten Wiesenmeßfeld aufgestellt und die Wärmesummen am Zähler auflaufen lassen. Ablesungen wurden stündlich und halbstündlich vorgenommen, die mittlere Wärmestromdichte für jedes Intervall berechnet und aus ihnen durch Summierung,

bzw. Interpolation die mittlere stündliche Wärmestromdichte L_F gebildet. Diese Werte stehen in Spalte 5 der Tabelle 1, während die Spalte 4 die nach der Sverdrup-Albrecht-Methode für den gleichen Zeitraum ermittelten Wärmestromdichten F_A enthält.

Tab. 1
Vergleich von stündlichen Mittelwerten der Wärmestromdichte,
gewonnen nach der Sverdrup-Albrecht-Methode L_A
und nach Feinstrukturmessungen L_F

Datum	Stunde	Richard- sonsche Zahl	Wärme- strom- dichte nach Sv.-Albr. L_A	Wärme- strom- dichte nach Fein- struktur L_F	rel. Ab- weichung $100 \cdot (L_A - L_F) / (L_A + L_F)$	Nr.	
	WOZ		mcal · cm ⁻² · min ⁻¹				
5. 7. 57	14—15	—0.046	160	215	—14	1	
"	15—16	—0.041	190	170	6	2	
"	16—17	—0.024	99	65	15	3	
"	17—18	0.018	55	17	53	4	
"	18—19	0.000	00	—27	100	5	
"	19—20	—0.018	—114	—72	—29	6	
31. 7. 57	11—12	—0.070	220	175	11	7	
"	12—13	—0.055	200	100	33	8	
"	13—14	—0.042	150	100	20	9	
"	14—15	—0.026	150	235	—22	10	
"	15—16	—0.022	120	133	—5	11	
"	16—17	—0.100	100	106	—4	12	
"	17—18	—0.035	48	61	—12	13	
"	18—19	0.000	00	0	0	14	
22. 8. 57	17—18	—0.020	54	60	—6	15	
23. 8. 57	8—9	—0.150	73	83	—6	16	
"	9—10	—0.270	113	153	—15	17	
"	10—11	—0.460	103	175	—26	18	
"	11—12	—0.55	121	170	—18	19	
"	16—17	—0.010	00	35	—100	20	
"	17—18	0.120	—25	—5	—66	21	
"	18—19	0.400	—28	—30	3	22	
4. 9. 57	16—17	—0.040	108	72	20	23	
"	17—18	0.130	—33	13	—230	24	
6. 9. 57	16—17	0.010	00	35	—100	25	
"	17—18	0.300	—25	—5	—66	26	
"	18—19	—∞	—28	—30	3	27	
10. 9. 57	11—12	—0.029	35	20	26	28	
"	12—13	—0.040	43	220	—67	29	
"	13—14	—0.010	16	37	—38	30	
"	14—15	0.00	—40	—67	24	31	
"	15—16	—	—15	—5	—50	32	
"	16—17	0.012	—35	—22	—21	33	
13. 11. 57	15—16	—0.049	—	36	—	34	Ostseestrand
31. 3. 58	9—10	—0.022	130	68	31	35	
"	11—12	—0.040	319	240	15	36	Bei L_F -Fühler mehr Reif
"	12—13	—0.045	352	240	18	37	
1. 4. 58	10—11	—0.038	165	186	—6	38	Bei L_F -Fühler mehr Reif
"	11—12	—0.026	232	138	24	39	
"	13—14	—0.015	329	191	26	40	
"	15—16	—0.002	96	148	—21	41	
"	18—19	0.015	—6	—10	17	42	
12. 4. 58	10—11	—0.070	348	233	19	43	
"	11—12	—0.020	360	337	3	44	

Tab. 1 (Forts.)

Datum	Stunde	Richard- sonsche Zahl	Wärme- strom- dichte nach Sv.-Albr. L_A	Wärme- strom- dichte nach Fein- struktur L_F	rel. Ab- weichung $100 \cdot (L_A - L_F) / (L_A + L_F)$	Nr.	
	WOZ		$\text{mcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$				
24. 4. 58	15—16	— 0.000	—	58	—	45	Ostseestrand
31. 7. 58	12—13	— 0.120	193	200	— 2	46	
"	13—14	— 0.035	128	100	12	47	
"	14—15	— 0.098	65	30	61	48	
1. 8. 59	9—10	— 0.40	178	108	24	49	
"	11—12	— 0.20	171	109	22	50	
"	12—13	— 0.23	142	147	— 2	51	
23. 9. 58	17—18	0.26	— 18	— 24	14	52	
26. 9. 58	17—18	0.065	— 44	— 55	11	53	
2. 10. 58	11—12	— 0.140	113	141	— 11	54	
"	12—13	— 0.035	64	140	— 37	55	
"	14—15	— 0.030	16	39	— 41	56	
"	15—16	0.065	— 32	— 39	10	57	
"	16—17	0.10	— 44	— 28	— 22	58	
"	17—18	0.35	— 25	— 18	— 15	59	
3. 10. 58	10—11	— 0.11	156	186	— 9	60	
"	11—12	— 0.11	151	220	— 18	61	
"	12—13	— 0.16	88	190	— 43	62	
"	13—14	— 0.060	47	101	— 37	63	
"	14—15	— 0.090	37	66	— 28	64	
"	15—16	— 0.055	35	— 40	670	65	
"	16—17	0.240	— 25	— 26	2	66	
"	17—18	1.00	— 34	— 50	19	67	
7. 10. 58	9—10	— 0.12	44	65	— 19	68	
"	10—11	— 0.06	47	156	— 52	69	
"	11—12	— 0.048	106	28	55	70	
"	12—13	— 0.040	84	66	12	71	
"	13—14	— 0.070	18	90	— 66	72	
"	14—15	0.00	— 2	56	— 101	73	
"	15—16	0.040	— 33	— 62	30	74	
27. 11. 58	15—16	0.03	— 24	— 46	31	75	
"	16—17	0.03	— 13	— 13	0	76	
1. 12. 58	8— 9	0.03	— 25	— 30	9	77	
"	9—10	0.015	— 14	— 20	17	78	
"	10—11	— 0.002	5	— 8	430	79	
"	11—12	— 0.009	23	40	— 27	80	
"	12—13	— 0.007	33	33	0	81	
"	13—14	0.00	12	— 18	500	82	
"	14—15	0.00	— 5	— 6	9	83	
"	15—16	0.23	— 32	— 22	— 18	84	
"	16—17	0.09	— 24	— 56	24	85	
"	17—18	0.075	— 22	— 13	— 25	86	
12. 12. 58	11—12	— 0.070	17	13	13	87	

Die Häufigkeitsverteilung des Absolutwerts der Unterschiede ist in der punktierten Linie der Abb. 23 wiedergegeben. Die zugehörige Abscissenskala befindet sich am unteren Rand. Wie die Krümmung der Linie erkennen läßt, sind die großen Unterschiede etwas seltener aufgetreten, als einer Zufallsverteilung entspricht. Das liegt nicht an Eigenheiten der Apparaturen, sondern an der Verteilung der Wetterbedingungen innerhalb der Meßzeiten. Große Unterschiede sind nämlich an große Wärmestromdichten geknüpft, und diese traten während unserer Versuche viel seltener auf, als die geringen. Es ist somit vorteilhafter, die relativen Fehler zu analysieren. Bedenken wir noch, daß die Wärmestromdichte L oft nur ein kleines Restglied der Energiedichte ($Q-B$) darstellt — bei hohen Windstärken wird L wegen der Steigerung der Verdunstung mitunter sogar mittags negativ —, und daß bei der unregelmäßigen Form der Wolkenschatten keine Gewähr gegeben ist, daß die 150 m voneinander entfernten Wiesen-Meßfelder im Laufe einer Stunde den gleichen Strahlungsgenuß hatten, so wird auch die enorme Größe der Unterschiede verständlich. Ihr Mittelwert beträgt, wie man in Abb. 23 am Schnittpunkt der zu 25% gehörigen Ordinate ablesen kann, 25 mcal/cm²min, während der mittlere Absolutwert aller gefundenen Wärmestromdichten bei nur 86 mcal/cm²min gelegen hat.

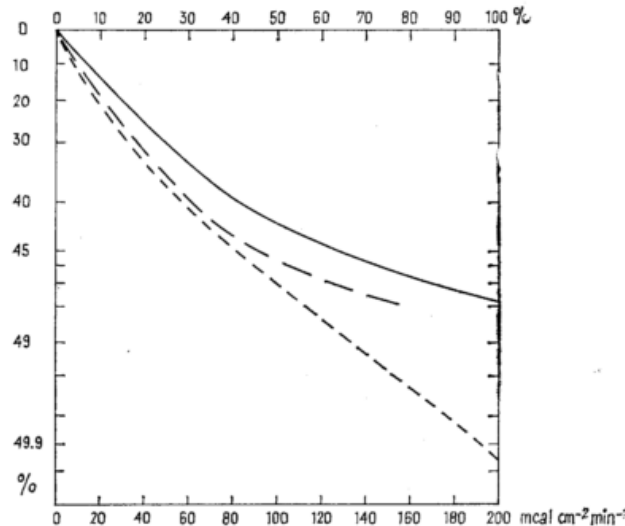


Abb. 23

Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zweier Wärmestromdichten von ihrem Mittelwert, beide gleichzeitig mit zwei verschiedenen Methoden (Sverdrup-Albrecht und Swinbank-Methode) gemessen: Kurz gestrichelte Linie, Skala am unteren Bildrand. Dasselbe für die relativen Abweichungen, ausgezogene Linie, Skala am oberen Bildrand. Die lang gestrichelte Linie gibt die Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen zweier Wärmestromdichtenwerte von ihrem Mittelwert, beide für benachbarte Meßplätze über Gras nach Sverdrup-Albrecht ermittelt.

In Spalte 6 der Tabelle 1 finden wir die relativen Abweichungen der Einzelergebnisse vom Mittelwert $(L_A - L_F)/(L_A + L_F)$. Ihre Häufigkeitsverteilung wird durch die ausgezogene Linie in Abb. 23 wiedergegeben, wozu die Skala am oberen Bildrand gehört. Auch diese Verteilung ist nicht die des Zufalls. Eine sehr ähnliche Form hat die Verteilung der zur Sverdrup-Albrecht-Methode gehörigen relativen Meßfehler bzw. kleinräumigen Unterschiede von L , die wir auf Grund einer Parallelmessung der Strahlungsbilanz und der Bodenwärmestromdichte B mit Hilfe weiterer Geräte finden konnten. Wir haben sie in Abb. 23 als gestrichelte Linie eingetragen. Eine Analyse zeigt, daß der weitaus größere Teil der Unterschiede ($L_A - L_F$) auf die Sverdrup-Albrecht-Methode zurückzuführen ist. Wir sind trotzdem auf diese Methode ange-

wiesen, weil ihr Einsatz nicht wie bei unseren Feinstruktur-Geräten an bestimmte Wetterlagen gebunden ist.

Die Fehler der Swinbank-Methode sind hauptsächlich entstanden, weil wir den Laboratoriums-eichungen weniger getraut haben, als den am Meßort mit Hilfe der oben beschriebenen Kippvorrichtung gewonnenen Empfindlichkeitswerten. Im Bestreben, die Wärmestrommessung nur möglichst kurze Zeit zu unterbrechen, haben wir für Nacheichungen jeweils nur ca. 7 min verwandt. Wie spätere Prüfungen ergeben haben, reicht diese Zeit mittags nicht aus, der Voraussetzung des Verfahrens gemäß, die mittlere Windströmung in 3 m Höhe als hinreichend horizontal ansehen zu können.

Ein Zusammenhang der relativen Abweichungen mit der Richardsonschen Zahl aus Spalte 3 der Tabelle 1 ließ sich nicht feststellen. Eine Zuordnung mittlerer Fehler auf einzelne Größenklassen der Wärmestromdichte finden wir in Tabelle 2. Dort sind sowohl Mittelwerte der Absolutbeträge relativer Abweichungen $(L_A - L_F)/(L_A + L_F)$, wie auch Mittelwerte unter Berücksichtigung des Vorzeichens, d. h. die mittleren relativen Abweichungen der nach beiden Verfahren gemessenen Wärmestromsummen jedes Intervalls angegeben.

Tab. 2

Mittelwerte der relativen Abweichungen von den nach Sverdrup-Albrecht und nach Swinbank gemessenen Wärmestromdichten von ihrem Mittelwert $(L_A - L_F)/(L_A + L_F)$ für einzelne Größenklassen der Wärmestromdichte, ohne und mit Berücksichtigung des Vorzeichens der Abweichung.

Wärmestrom- dichten-Intervall mcal · cm ⁻² min ⁻¹	Mittlere relative Abweichung		Zahl der Messungen
	Absolutwert ‰	Realwert ‰	
0 — 10	246	160	8
11 — 20	51	— 22	9
21 — 30	23	— 16	11
31 — 50	25	14	9
51 — 100	28	— 1	14
101 — 150	24	— 11	17
151 — 200	12	— 3	9
201 — 300	19	19	4
301 — 348	3	3	1

Es läßt sich leicht zeigen, daß die bei den ersten beiden Intervallen gefundenen außerordentlich großen relativen Abweichungen eine Folge ungenügender Berücksichtigung von Wärmespeicherungen in Bodennähe sind, deren Ort sich bei den großen Änderungsgeschwindigkeiten der Temperatur zur Zeit des Vorzeichenwechsels der Strahlungsbilanz nicht angeben läßt. Betrachten wir nämlich diejenigen Messungen für sich, die dem Vorzeichenwechsel um mehr als 1 Stunde folgten — es sind das die Messungen Nr. 42, 52, 59, 66, 76 und 83 —, so konstatieren wir auch bei ihnen wesentlich kleinere relative Abweichungen, nämlich $(L_A - L_F)/(L_A + L_F)$ gleich 11% und $1/n \cdot (L_A - L_F)/(L_A + L_F)$ gleich 3%. Die Abweichung der Verteilung relativer Abweichungen in Abb. 21 von der Zufallsverteilung geht vor allem zu Lasten dieser Mängel.

Wie sich bereits an der Symmetrie der Fehlerkurve hatte erkennen lassen, sind die Summen der nach beiden Methoden gemessenen Wärmestromdichten annähernd gleich. Da 82 vergleichbare Messungen vorliegen, sollte man einen mittleren Unterschied der Summen erwarten, der im Bereich von etwa 1/9 des mittleren Unterschieds der Einzelmessungen, d. h. bei etwa 2% liegt.

Wie wir bereits im Abschnitt 3. berichteten, waren die Meßfelder lediglich im Jahr 1957 und Frühjahr 1958 gleichartig bewirtschaftet und deshalb mit gleichartiger Grasdecke versehen. Wir betrachten deshalb, diesem Zeitraum entsprechend, die beiden Hälften der Tabelle 1 gesondert.

In der ersten Hälfte stehen 39 bezüglich des Bodenzustandes vergleichbare Wärmestromdichten, deren Summen, der Fehlerbetrachtung entsprechend, auf etwa 3% genau gleich sein sollten. Das ist der Fall. Während der gesamten Meßzeit sind

nach der Sverdrup-Albrecht-Methode

$$60 \times 3,294 \text{ gleich } 198 \text{ cal/cm}^2$$

nach der Swinbank-Methode

$$60 \times 3,326 \text{ gleich } 199 \text{ cal/cm}^2$$

von der Erdoberfläche in die Atmosphäre übertragen worden.

Während der Messungen, deren Ergebnis in der ersten Tabellenhälfte steht, war das Gras des Sverdrup-Albrecht-Meßfeldes relativ lang, das des Swinbank-Meßfeldes, dem Weidebetrieb entsprechend, kurz. Wie sich die Graslänge auf die Wärmehaushaltskomponente L auswirkte, können wir aus den Ergebnissen der Sverdrup-Albrecht-Methode in der Zeit des Grasschnittes ableiten. Wie noch im Abschnitt 6.3. ausführlich erläutert wird, ist es möglich, bei verschiedenen Wetterbedingungen gewonnene Wärmehaushaltskomponenten vergleichbar zu machen und eine Zahl k abzuleiten, die ausschließlich auf die mehr oder weniger große Verdunstungsfreudigkeit eines Pflanzenbestandes zurückgeht. So fanden wir als Mittelwert von 6 trockenen Tagen, die vor dem Grasschnitt liegen, k zu 0.75 an, an 6 trockenen Tagen nach der Trocknung des Heues k zu 0.65 und an 6 trockenen Tagen, die mehr als 14 Tage nach der Mahd liegen, k zu 0.72. Die letztgenannte Zahl k erscheint auch für das unter Weidebetrieb stehende Gras angemessen, weil die Zahl des Weideviehs pro Flächeneinheit dem Grase ständig eine Möglichkeit zum Erhalten einer Durchschnittslänge von ca. 10 cm gelassen hat. Dem Unterschied der k -Werte 0.75 und 0.72 entspricht bei dem mittleren Verhältnis $V/(Q-B)$ von 0.79 ein Unterschied der Wärmestromdichte von 14%, entgegengesetzter Richtung.

Die 41 vergleichbaren Messungen der rechten Tabellenhälfte ergeben zusammen nach der Sverdrup-

Albrecht-Methode einen aufwärtsgerichteten Wärmetransport von $60 \times 1,557$ gleich 93.2 cal/cm^2 . Entsprechend den oben angeführten Befunden auf die Verhältnisse des Swinbank-Meßfeldes umgerechnet, werden daraus $93,2 \times 1,14$ gleich 106 cal/cm^2 , während mit der Swinbank-Methode 105 cal/cm^2 gemessen worden sind. Auch hier besteht demnach eine gute Übereinstimmung.

Größer sind die relativen Unterschiede der nach unten strömenden Wärme. Hier stehen bei den 25 Stunden mit einheitlich nach unten gerichtetem Wärmestrom einem Wärmetransport

nach der Sverdrup-Albrecht-Methode

$$-44 \text{ cal/cm}^2$$

nach der Swinbank-Methode

$$-45 \text{ cal/cm}^2$$

gegenüber. Die 6 Stunden der Messungen Nr. 5, 24, 65, 73, 78 und 82, in denen das Vorzeichen der nach beiden Methoden gemessenen Wärmestromdichten verschieden war, erbrachten

nach der Sverdrup-Albrecht-Methode

$$+1 \text{ cal/cm}^2$$

nach der Swinbank-Methode

$$-1 \text{ cal/cm}^2$$

Im Ganzen sprechen die Ergebnisse dafür, daß die gefundenen Unterschiede der Einzelmessungen nur zum kleineren Teil auf Meßfehler zurückzuführen sind. Es zeigt sich, daß man mit der Annahme A_L/A_V sei 1, keine erheblichen Fehler bei der Anwendung der Sverdrup-Albrecht-Methode auf längere Meßreihen einführt. Wenn alle Meßfehler in $Q, B, \Delta \Theta$ und Δe unbeträchtlich wären, muß der Unterschied ($L_A - L_F$) auf Abweichungen des Quotienten A_L/A_V zurückzuführen sein. Wir berechneten

$$L_A = L/V \cdot (Q-B) \cdot (1 + L/V)^{-1} \quad [4]$$

Durch Differentiation und Substitution von V durch $(Q-B) \cdot (1 + L/V)^{-1}$ erhält man

$$\frac{d L/V}{L/V} = \frac{d L}{L_A} \cdot (1 + L/V) \quad [19]$$

Der Schwerpunkt der Quotienten L/V lag bei den Untersuchungen bei 0.26. Unserer statistisch gesicherten Übereinstimmung der Wärmesummen L_A und L_F auf 2–3% entspricht demnach ein möglicher Unterschied der Austauschkoefizienten für Wärme und für Wasserdampf von circa 3–4%.

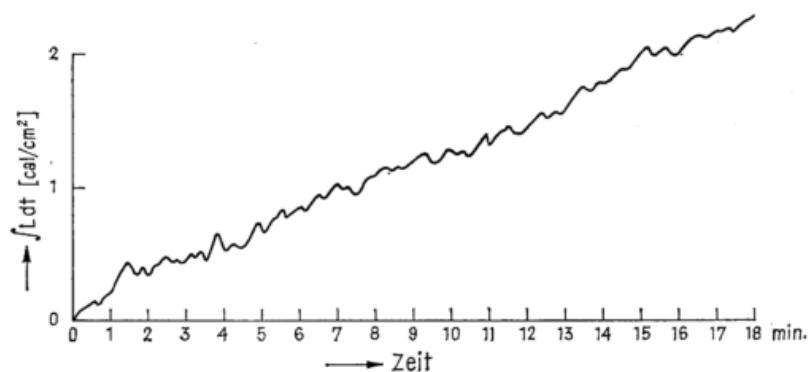


Abb. 24
Zeitlicher Verlauf des vertikalen Wärmetransportes pro cm^2
nach Ablesungen des Zählers im Abstand von 10 sec
am 3. 10. 58 gegen 11.30 WOZ.

Wir geben in Abbildung 24 noch ein Beispiel für den ziemlich gleichmäßigen Verlauf des vertikalen Wärmetransportes über gleichförmigen ebenen Untergrund. Als der Wind am 31. 7. 58 von den Stationsgebäuden kam, wurden dagegen starke Schwankungen

längerer Periode beobachtet. Abbildung 25 zeigt einen solchen unregelmäßigen Verlauf.

Unsere stichprobenartigen Messungen der Wärmehaushaltskomponenten unmittelbar an der Küste waren

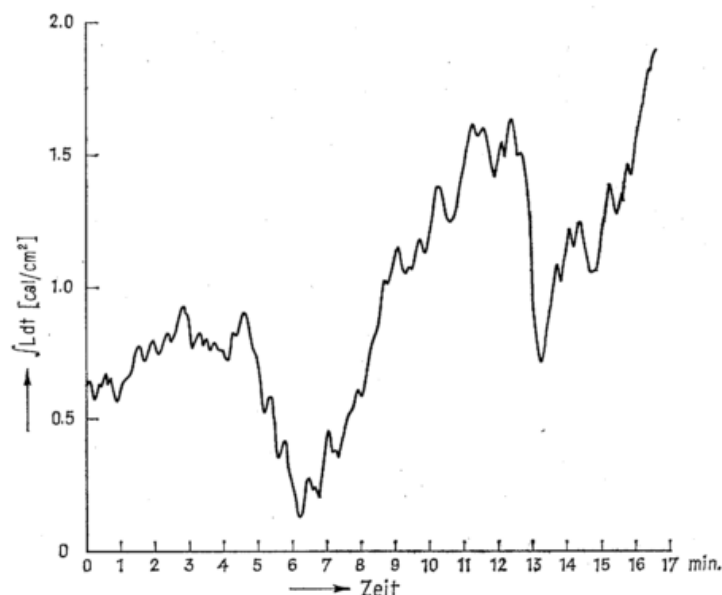


Abb. 25
Zeitlicher Verlauf des vertikalen Wärmetransports pro cm^2 am 31. 7. 1958 gegen 14.30 WOZ nach Zählerablesungen im zeitlichen Abstand von 10 Sekunden. Hier treten circa 120 m hinter einem Gebäude starke langperiodische Schwankungen auf.

leider nicht sehr instruktiv, weil sich am flachen Strand keine für größere Flächen repräsentativen Wassertemperaturen einstellen können. Bei unseren Messungen am Schönbergerstrand interessierten wir uns mehr für die Größe vertikaler Austauschkoefizienten über dem Wasser. Am 13. 11. 57 um 16 Uhr wurde bei dichter Bewölkung und einer Windgeschwindigkeit in 2.4 m Höhe von $7\frac{1}{2}$ m/sec ein vertikaler Wärmestrom von $36 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^{-1}$ gemessen. Mittels eines Aspirationspsychrometers sind vertikale Unterschiede der Temperatur und des Dampfdruckes ermittelt worden, die über L/V auf eine latente Wärmestromdichte von $70 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^{-1}$ führten. In 1 m Höhe betrug der vertikale Austauschkoefizient ca. $1.1 \text{ gr/cm}^2\text{sec}^{-1}$.

Am 24. 4. 58 zeigte gegen 15 Uhr unser Gerät in $2\frac{1}{2}$ m Höhe einen aufwärtsgerichteten Wärmestrom von $58 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^{-1}$, während sich für den latenten Wärmestrom eine Dichte von $203 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^{-1}$ errechnen ließ. Die freie Ostsee war zu dieser Zeit sicherlich noch kälter als die Luft, der Strand dagegen durch Strahlung um 1.5° über die Lufttemperatur aufgeheizt. Die über der Flachwasserzone liegende atmosphärische Grenzschicht ist am Ufer so dünn, daß die in 2.4 m Höhe gemessenen Wärmehaushaltskomponente L nur ca. 60% der an der Wasseroberfläche befindlichen Werte betrug. Eine Extrapolation der Windschichtung bis 10 m Höhe bildete die Grundlage für Quotienten $\bar{u}/u_{10}$, die nur etwa halb so groß waren wie über dem Quickborner Gelände.

5. Ergebnisse der Registrierungen am Quickborner Wiesen-Meßfeld

Anhang 1 gibt ein Quickborner Tagesprotokoll der zur laufenden Bestimmung der Wärmehaushaltskomponenten verwendeten stündlichen Mittelwerte meteorologischer Größen wieder. Die obersten 4 Zeilen enthalten die Windgeschwindigkeiten aus vier verschiedenen Höhen. Wie wir noch sehen werden, lassen sich aus ihnen Rückschlüsse auf den vertikalen Wärmetransport ziehen. Es folgt die Windrichtung in 32teiler Skala, sowie das Produkt $\sqrt{u_2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta'_2)}$, das nach Feststellungen von E. Frankenberger (15) und

G. Hofmann (16) für den Ventilationsanteil der Verdunstung maßgebend ist. Die nächsten 6 Zeilen enthalten je 3 Differenzen der aktuellen Lufttemperaturen und der Feuchttemperaturen zwischen verschiedenen Meßniveaus der Quickborner Funkmasten, sowie die Größe $(dE/d\vartheta' + 0.5)$, die zur Berechnung vertikaler Dampfdruckdifferenzen aus den obigen Temperaturdifferenzen benötigt wird. Weiter sind in die Liste die Temperaturen und Feuchttemperaturen im Hüttenniveau aufgenommen, die bereits in der 6. Zeile Verwendung fanden, sowie der Dampfdruck im Hüttenniveau. Es folgen die Quotienten L/V und darunter die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen bezüglich der spezifischen Wärme der Volumeneinheit q_{bc} und der Wärmeleitfähigkeit λ . Die folgenden Spalten enthalten die Stände der Bodenthermometer zu drei verschiedenen Tageszeiten und die Auswertungen der Registrierungen des integrierenden Bodenthermometers und des Bodentemperatur-Gradientmessers aus 35 cm Tiefe. Nun kommen endlich die stündlichen Mittelwerte der Bodenwärmehaushaltskomponenten. Wir haben sie in Bruchteilen der für Strahlungsintensitäten viel benutzten Dimension $\text{cal} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ angeben, weil diese formal mit dem Wasserverbrauch der Verdunstung in mm pro Stunde nahezu zahlengleich ist. Am unteren Rand des Blattes finden sich Beobachtungsdaten über den Niederschlag, die Niederschlagszeiten und die Bewölkung. Eine Reihe von Spalten ist freigelassen zum Eintragen abgeleiteter Größen, die für Sonderuntersuchungen gebraucht werden.

Anhang 2 bringt als Beispiel das Tagesprotokoll einer Lentföhrdener Meßreihe, bei dem wir uns wegen der relativ geringen horizontalen Erstreckung der Pflanzenbestände (50—70 m) mit einem einzigen Meßniveau für die Windgeschwindigkeitsbestimmung und nur zwei Niveaus für die psychrometrischen Messungen begnügen mußten. Das unterste Psychrometer wurde je nach der Art des Bodenbewuchses so hoch über die obersten Pflanzenteile gelegt (10—30 cm), daß trotz der Ungleichmäßigkeiten der Bodenbewachung in Anbetracht der Windrichtungspendelungen gerade noch repräsentative stündliche Mittelwerte der Zustandsgrößen erwartet werden konnten. Besonders von der obersten Meßstelle war zu fordern, daß in ihr vertikale Gefälle der Temperatur und des Dampfdrucks herr-

schen, die noch typisch für den zu untersuchenden Pflanzenbestand sind, d. h. daß

$$\bar{u} \cdot \partial i / \partial x \ll \partial i / \partial z \cdot |w|$$

sein soll. Bei Stichproben, die mit Psychrometern dort ausgeführt wurden, wo Felder mit unterschiedlichem Wärmehaushalt aneinander grenzen, erwies sich diese Forderung beim Dampfdruck für die Leeseite des 50 m breiten Feldes in 1 m Höhe erfüllt. Bei der Temperatur war meist schwer zu entscheiden, ob in Anbetracht der starken Schwankungen und der geringen Größe der horizontalen Gradienten (ca. $0.1^\circ/50$ m) hinreichend lange Meßreihen vorgelegen haben. Doch bieten gerade die starken Schwankungen eine Gewähr für starke vertikale Durchmischung. Bei den hohen Wärmeumsätzen und geringen Windgeschwindigkeiten des Sommers haben wir das obere Psychrometer meist 150 cm über den Boden gestellt; bei den geringen Wärmeumsätzen und hohen Windstärken des Herbstes meist nur 50—60 cm, wiewohl es dann schwierig wurde, verlässliche Temperaturunterschiede solcher geringer Niveaudifferenzen zu ermitteln. Zeiten mit Windrichtungen, bei denen die das Psychrometer erreichende Luft weniger als 20 m des zu untersuchenden Feldes bestrichen hatte, blieben bei der Auswertung unberücksichtigt.

Im Anhang 3 folgen nun die Summen der Wärmehaushaltskomponenten für jeden Tag des Internationalen Geophysikalischen Jahres. Diese Summen unterscheiden sich bei den Wintertagen mitunter bis zu 12 cal/cm^2 von den in den Tagesprotokollen abgeleiteten Werten. Bei langandauernden Schneefällen ergaben sich nämlich unglaubliche Werte der Strahlungsbilanz. Anscheinend hat die Belüftung der Lupolenhauben nicht immer ausgereicht, eine teilweise Abdeckung durch Schnee zu verhindern. Die korrigierten Werte sind in Klammern gesetzt. Die Schneehöhen unseres Meßfeldes wichen offenbar zeitweise von denen der weiteren Umgebung ab, denn unwahrscheinliche Beträge der Schmelzwärme wurden selten, wenn statt der eigenen Beobachtungsergebnisse die Schneehöhe-Messungen der Klimastation Quickborn verwendet wurden, die dank ihrer geschützten Lage weniger Schneewehen aufweist. Auch traten im Winter gelegentlich so hohe Windgeschwindigkeiten auf, daß die dem Wind besonders gut ausgesetzten Temperaturmeßstellen der größeren Höhen Reibungserwärmungen bis zu 0.07°C aufwiesen. Hierdurch erschienen die zum Boden gerichteten Wärmeströme bei Windgeschwindigkeiten über 11 m/sec zu groß.

Auch die Ergebnisse der Komponente B mußten nachträglich um rd. $1.35 \text{ cal/cm}^2 \text{ Tag}$ korrigiert werden, weil eine Nacheichung der Bodenthermometer, die auch zur Aneichung der elektrischen Meßeinrichtung verwendet worden sind, im interessierenden Bereich Korrekturen von 0.23 bis 0.16°C ergeben hat. Vor und während des IGJ wollten wir diese seit mehreren Jahren benutzten Thermometer nicht aus dem Boden nehmen, um die Dichte des Bodens und den guten Kontakt nicht zu stören. Daß die Jahressumme von B mit -277 cal/cm^2 dennoch ein starkes Überwiegen des Wärmeentzugs anzeigt, kann auf folgende 4 Ursachen zurückgehen:

- 1.) Bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung können Spuren von Wasser in der Nähe des Heizstabes verdampft und am Ausstehermantel kondensiert sein, wodurch die Leitfähigkeit um so höher ausfällt, je feuchter der Boden ist.
- 2.) Der Boden nahm im Juni und Juli 1957 infolge relativ hoher Bestrahlung besonders viel Wärme auf, die dann im Jahre 1958 mit der bekannten Verzögerung abgegeben worden ist.
- 3.) Die Sickerwasserbewegung im Boden verläuft von wärmeren Stellen (Dorf) zu kälteren (Pinnau-Niederung).

- 4.) Mindestens ein Teil der Schmelzwärme kann der Bodenkomponente des Wärmehaushalts zugerechnet werden.

Die bei der Verrottung pflanzlicher Teile auftretende Wärme liegt zwar in ähnlicher Höhe. Da wir aber mit dem integrierenden Thermometer lediglich die Wärmeänderungen der obersten Bodenschicht, in welcher ein Hauptteil der Verrottung verläuft, messen und in Rechnung setzen konnten, kann es sich bei der überwiegenden Wärmeabgabe des Bodens nicht um Zersetzungswärme handeln.

Tab. 3

Summe der Wärmehaushaltskomponenten des Quickborner Wiesenmeßfelds für die einzelnen Monate cal/cm^2

Monat	Q	B	V	L	G
Juli 1957	8 226	360	6 105	1 761	
Aug. 1957	5 479	334	4 371	774	
Sept. 1957	3 140	— 77	2 894	323	
Okt. 1957	1 277	— 123	1 449	— 49	
Nov. 1957	49	— 401	963	— 513	
Dez. 1957	— 474	— 363	506	— 617	
2. Halbjahr 1957	17 697	— 270	16 288	1 679	
Jan. 1958	— 511	— 401	364	— 548	74
Febr. 1958	47	— 162	620	— 468	57
März 1958	2 156	— 199	1 502	808	45
April 1958	5 202	134	2 724	2 344	
Mai 1958	6 669	372	4 650	1 647	
Juni 1958	6 638	276	4 710	1 652	
Juli 1958	5 719	243	4 257	1 219	
Aug. 1958	6 031	189	4 589	1 253	
Sept. 1958	3 718	— 42	3 421	339	
Okt. 1958	1 444	— 166	1 626	— 16	
Nov. 1958	265	— 298	531	32	
Dez. 1958	— 235	— 223	348	— 422	62
Jahr 1958	37 143	— 277	29 342	7 840	238

Anhang 4 enthält stündliche Mittelwerte der Strahlungsbilanz, des Bodenwärmestroms, des Wärmehaushalts für Evapotranspiration und des atmosphärischen Wärmestroms für unser Wiesenmeßfeld in den einzelnen Monaten des Geophysikalischen Jahres.

Wegen der oben erwähnten Notwendigkeit, an den stündlichen Werten der Gefrierwärme nicht unerhebliche Korrekturen vorzunehmen — sie ergaben sich aus der Forderung, daß nach Abschluß einer Frostperiode die Summe mit der Gefrierwärme der als Schnee gefallenen Niederschläge übereinstimmen muß, — haben wir lediglich die mit kleiner Korrektur versehenen Werte des 6., 7., 23. und 24. Februar 1958 in Tab. 4 zu einem mittleren Tagesgang zusammengefaßt. Da die meisten Frosttage, wie die genannten, mittags Temperaturen dicht am Gefrierpunkt aufwiesen, verdienen diese ausgesuchten Werte besonderes Interesse.

6. Ableitung der Grundlagen zur Berechnung der Landesverdunstung

Nur wenn wir wissen, wie die Wärmehaushaltskomponenten von den meteorologischen Elementen abhängen, und wie die Art des Bestandes auf sie einwirkt,

Tab. 4

Mittlerer Aufwand an Schmelzwärme pro Flächeneinheit am 6., 7., 23. und 24. Februar 1958.

Tageszeit	0—2	2—4	4—6	6—8	8—10	10—12	12—14	14—16	16—18	18—20	20—22	22—24
Gefrierwärmedichte mcal/cm ²	—16	—22	—20	—18	2	22	21	2	—20	—13	—13	—18

können wir vom Wärmehaushalt unserer Meßfelder auf den Landeswärmehaushalt schließen.

Wir haben den folgenden Fragen nachzugehen:

1. Wie groß sind die Unterschiede der Wärmehaushaltskomponente B verschiedener Felder, d. i. diejenige Wärme pro Flächeninhalt, die von der Bestands- oberfläche in den Boden hinein oder aus ihm heraus- tritt?

2. Wie unterscheidet sich die Strahlungsbilanz der verschiedenen Schleswig-Holsteiner Feldarten von der des Quickborner Wiesengrases?

3. Lassen sich Gesetze oder Interpolationsverfahren ableiten, mit deren Hilfe die stichprobenartigen Bestandsmessungen zu vollständigen Reihen ergänzt werden können?

Diese Fragen haben nicht nur für die uns gestellte Aufgabe Interesse. Wir gehen ihnen deshalb, soweit wie möglich, mit einer Ausführlichkeit nach, die durch die Fehlergrenze des Ausgangsmaterials mitunter kaum noch gerechtfertigt ist.

6.1. Die Bodenkomponente des Wärmehaushalts

Wir wollen uns zunächst ansehen, wie die Bodenkomponente B des Wärmehaushalts der Erdoberfläche von der Art des Bestandes abhängt. Wie wir bereits wissen, ist die im Zuge der Jahresperiode von B im Mittel eines vollen Tages gespeicherte Wärme klein ge-

gen die Tagesamplitude. Deshalb treten die Einflüsse der Bewachung besonders deutlich hervor, wenn wir den Einfluß der Vegetation und der Vegetationsphase auf die Amplitude der Tagesperiode untersuchen. Hierzu eignet sich besonders gut der Quotient

$$\frac{\sum_{0}^{24} |B|}{\sum |Q|}$$

der nach einfacher Addition der absoluten Beträge der mittleren stündlichen Bodenwärmestromdichten B und der mittleren stündlichen Strahlungsbilanzwerte Q gebildet werden kann. Er hat den Vorzug, in denjenigen Monaten, in denen B überhaupt wesentliche Beträge erreicht, unabhängig von der jeweiligen Temperaturdifferenz Boden/Luft zu sein.

Abbildung 26 zeigt den Quotienten als Funktion der Jahreszeit. Die obere waagerechte Linie gilt für ein frisch gepflühtes Feld, die darunter befindliche gestrichelte waagerechte Linie für Stoppel- und Saatefelder. Von dieser unteren Linie ausgehend, nehmen die Quotienten mit Aufgehen der Saat und der Entwicklung von Blättern und Halmen ab, bis ein Wert von etwa 0.11 erreicht ist. Durch die Anfangsbuchstaben der Bestände haben wir in Abb. 26 die mittlere Größe der Quotienten für jeden Monat, wo vorhanden auch Mittelwerte verschiedener Meßserien des gleichen Bestandes gekennzeichnet. Daß sich letztere nicht immer decken, liegt z. T. an Unterschieden der Bodenfeuchtigkeit, bei Messungen auf Kartoffelfeldern auch an der Wahl der Bodentemperaturmeßstelle, die abwechselnd nördlich und südlich der Furche gelegt worden ist.

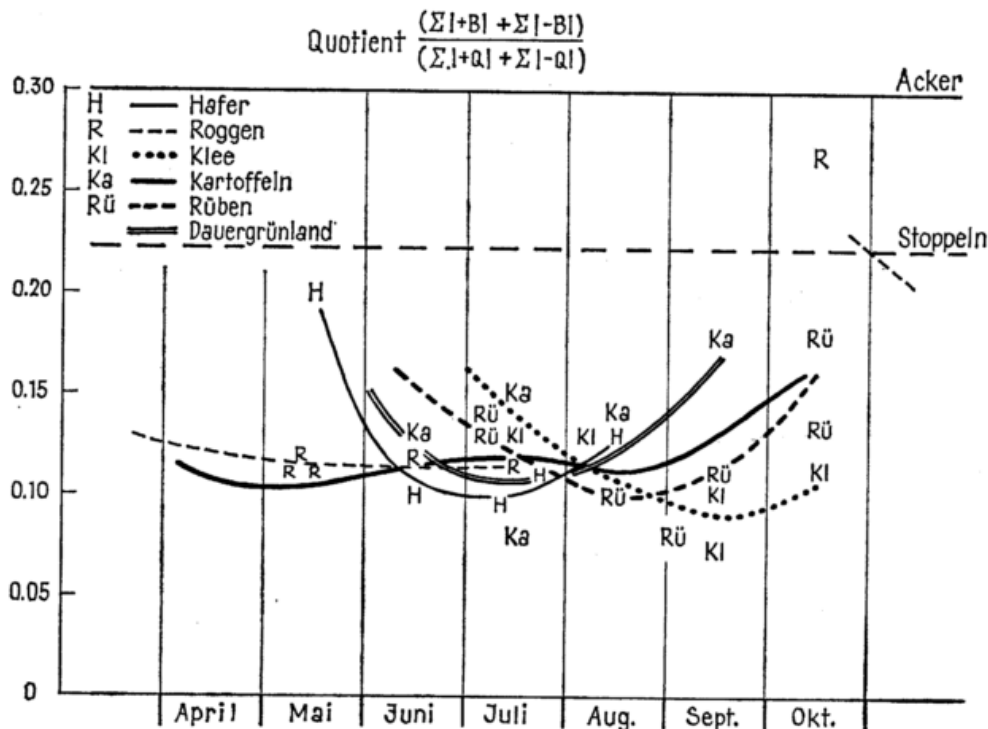


Abb. 26

Summe der Absolutwerte stündlicher Wärmestromdichten der Bodenkomponente B des Wärmehaushalts der Erdoberfläche bezogen auf die Summe der Absolutwerte der Strahlungsbilanz Q für verschiedene Felder. Nach voller Entwicklung der Pflanzen sinkt der Quotient auf circa 0.11.

In der Zeit voller Pflanzenentwicklung liegen die Quotienten $\Sigma |B|/\Sigma |Q|$ fast unabhängig von der Pflanzenart bei 0.11. Sie wachsen, wenn Blätter absterben, wie bei Kartoffeln und Rüben. Auffällig ist, daß im Herbst die Quotienten bei Klee gras kleiner als beim Wiesengras waren. Der Unterschied der B-Werte macht bei der Amplitude der Tagesperiode 5% der Strahlungsbilanz aus.

Für die Berechnung der Landesverdunstung benutzen wir lediglich die Wärmesummen ganzer Tage. Im Mittel betrug im Frühling und Herbst

$$\left| \sum_{\text{v}}^{24} B \right| = \sim 0.2 \cdot \sum_{\text{v}}^{24} |B|.$$

Daraus folgt, daß für unsere Rechnungen nur noch die Vegetationsphase von Bedeutung ist, nicht aber die Bestandsart.

6.2. Die Strahlungsbilanz verschiedener Bestände

Bekanntlich zeichnet der Schreiber des Lupolenstrahlungsbilanzmessers nach Fleischer-Schulze außer einer Kurve für die Bilanz noch zwei Kurven für die von oben und von unten kommende Strahlung. Angezeigt wird dabei die Strahlung jeder Richtung, vermindert um die Temperaturstrahlung des Gerätes, also

$$\text{sowohl } S + H + A - \sigma T_G^4,$$

$$\text{wie } R \cdot (S + H) + E - \sigma T_G^4 \quad (R \text{ ist die Albedo),}$$

wenn man die Teilabsorption der Hauben sowie die Temperaturunterschiede zwischen den geschwärzten Thermoelementen und dem weißen Gerätekörper vernachlässigen kann.

Das die Gerätetemperatur T_G enthaltende Glied fällt bei der Auswertung der Strahlungsbilanz heraus, beeinflusst aber das Verhältnis der Ausschläge, welche die den Strahlungsströmen verschiedener vertikaler Richtungen zugehörigen Kurven zeigen. Gerade dies Verhältnis ist aber besonders gut für eine praktische Berücksichtigung des Einflusses der Bestandseigenschaften auf die Strahlungsbilanz geeignet. Wir schreiben deshalb

$$Q = a \cdot (1 - R_T), \quad [20]$$

wobei a gleich $S + H + A - \sigma T_G^4$ ist. Trotz der formalen Analogie zur Albedo R ist R_T keine physikalische Konstante, sondern eine Variable, die von der Gerätetemperatur sowie von der Windgeschwindigkeit, der psychrometrischen Differenz und sogar von der Strahlung selbst abhängt, wie wir gleich sehen werden. Setzen wir in E und A die Strahlungstemperaturen T_B und T_A ein, so ist

$$R_T = \frac{r(S + H) + \sigma(T_B^4 - T_G^4)}{(S + H) + \sigma(T_A^4 - T_G^4)} \quad [21]$$

Es ist zweckmäßig, die Strahlungstemperaturen von Luft und Boden auf die Gerätetemperatur zu beziehen, die annähernd mit der Temperatur einer weiß gestrichenen Thermometerhütte übereinstimmt, wenn, wie bei unseren Versuchen, der Meßfühler des Bilanzmessers in 2 m Höhe angebracht ist. Wir schreiben

$$\begin{aligned} T_A &= T_G + \Delta T_A \quad \text{und} \\ T_B &= T_G + \Delta T_B = \sim T_G + \underset{0.05}{\underset{2}{(\vartheta - \vartheta)}} \end{aligned}$$

Bildet man die vierten Potenzen der Strahlungstemperaturen und vernachlässigt man die beiden letzten Glieder der binomischen Reihe, so begeht man einen

Fehler, der weniger als 1% des vollständigen Wertes ausmacht. Es ist

$$R_T = \frac{R + 4\sigma T_G^3 \frac{\Delta T_B}{(S + H)}}{1 + 4\sigma T_G^3 \frac{\Delta T_A}{(S + H)}} \quad [22]$$

$4\sigma T_G^3$ hat bei 15° C einen Wert von $7.5 \cdot 10^{-3}$. Im Quotienten $\Delta T_A/(S + H)$ bestehen keine physikalischen Beziehungen zwischen Zähler und Nenner. Er hängt stark von der Bewölkung ab. Sein Zahlenwert wurde mittags an einem heiteren Maitage zu $-8.1 \text{ C}^\circ/\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ und am Mittag eines Regentages im Mai zu $+15^\circ \text{C}/\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ gefunden, womit der Nenner von R_T die Werte 0.94 und 1.11 hatte. Es gibt Bewölkungsverhältnisse und Dampfgehalte der Atmosphäre, bei denen der Nenner den Wert 1 annimmt. R_T setzt sich deshalb im wesentlichen aus einem von der Albedo abhängigen großräumig gültigen Summanden und einem vom Mikroklima abhängigen Summanden zusammen. Wenn auch der Zusammenhang zwischen $(S + H)$ und ΔT_B physikalisch enger ist als der mit ΔT_A , so geht doch die Windgeschwindigkeit ein und bei feuchten Böden auch die psychrometrische Differenz, die mit einer Verdunstungssteigerung ΔT_B verkleinern und sogar negativ werden lassen kann. Einen rohen Überblick über die Größenordnung von ΔT_B als Funktion der Globalstrahlung liefert die Abb. 27, in welcher die Differenz der Thermometerablesungen im Niveau 5 cm über Wiesengras und im Niveau der Thermometerhütte eingetragen sind, wie sie im Juni 1958 gefunden wurden.

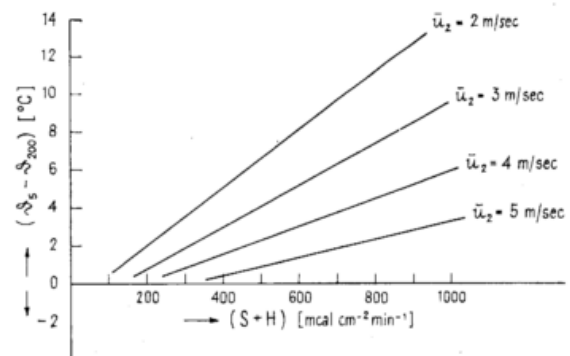


Abb. 27

Temperaturdifferenz zwischen 200 und 5 cm Höhe über Gras beim Klimatermin II im Juni 1958 als Funktion der Globalstrahlung. Parameter ist die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe. Da die Ordinatenwerte auch noch von der psychrometrischen Differenz abhängen, handelt es sich um eine rohe Mittelwertbildung, nicht um einen physikalischen Zusammenhang.

Weil auch die psychrometrische Differenz in ΔT_B eingeht, könnte nur eine dreidimensionale Darstellung ein exaktes Bild der Zusammenhänge wiedergeben. Wir haben dagegen großzügig die Isotachen so gelegt, wie es etwa den mittleren Verhältnissen entspricht. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten (3.5 m/sec) trägt der zweite Summand im Zähler von [22] ca. 30% zu R_T bei.

Nach diesen Erläuterungen des Aufbaus von R_T geben wir Meßergebnisse. In ihnen erkennt man deutlich nicht nur die Unterschiede der Albedo R , sondern auch die Wirkung der Bestandseigentümlichkeiten auf die Quotienten L/V und damit auf die Temperaturdifferenz $(\vartheta_B - \vartheta_A)$. Sofern die Bestände nicht von Regen benetzt sind, werden die Quotienten L/V stark von der Stomata- oder Porenweite abhängen. Wo wenig Wasserdampf austreten kann, ist L/V groß und die sogenannte Verdunstungskraft der Atmosphäre kann die Größe der vertikalen Wärmeströme L und damit den Temperaturunterschied $(\vartheta_B - \vartheta_A)$ nur wenig beeinflussen. Ein typisches Beispiel hierfür bietet die Größe der R_T -Werte eines Roggenfeldes in den Mittagsstunden des Juli 1958, die wir in Abb. 28 als Funk-

tion der Strahlungsbilanz wiedergegeben haben, wobei die eingetragenen Ziffern der Windgeschwindigkeit in 2,5 m Höhe bedeuten.

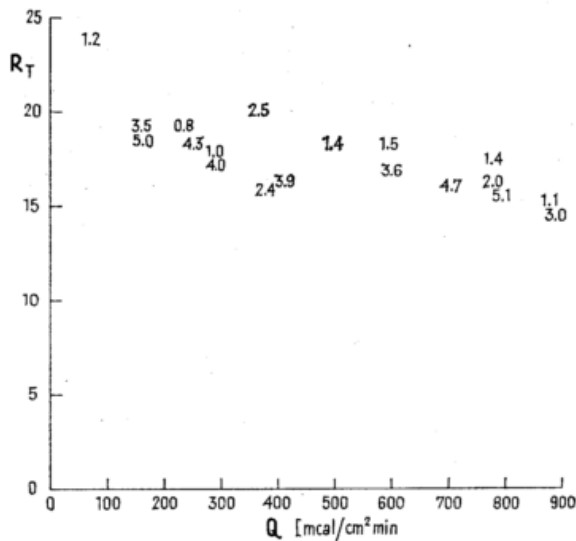


Abb. 28

Der Lupolen-Strahlungsbilanzmesser liefert 3 Strahlungskurven, entsprechend der von oben und von unten kommenden Strahlung, sowie der Strahlungsbilanz. Das Verhältnis der beiden ersten, das auch von der Temperatur des Fühlers abhängt, ist als Funktion der Strahlungsbilanz angegeben, wobei die Ziffern die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe angeben. Es handelt sich um Messungen über einem Roggenfeld im Juni und Juli 1957/58.

Je kleiner Q , um so höher ist hier R_T . Die gut belüfteten Ähren sind gerade bei starker Bestrahlung relativ kalt. Der Gedanke an einen endothermen Umsatz absorbiert Strahlung liegt nahe, doch ist zu bedenken, daß sich auf den weißen Scheiben eines Strahlungsbilanzmessers über trockenen Kornfeldern schon im Laufe eines halben Tages soviel Staub sammelt, daß ihre Absorption größer wird. Der Anstieg der Gerätetemperatur kann ein Abnehmen von R_T verursachen. Entgegengesetzt ist der Verlauf der R_T -Werte über dem stets recht feuchten Wiesengras. Bei geringer Strahlungsintensität treten hier sehr kleine, mitunter sogar negative L/V -Werte auf, weil die Verdunstung vorwiegend eine Ventilationsverdunstung ist, ΔT_B

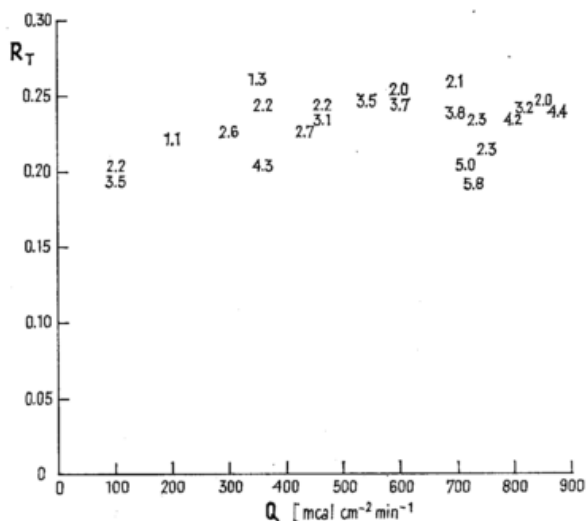


Abb. 29

Dasselbe wie in Abb. 28, jedoch für Messungen über Wiesen-gras im Juli 1958. Weil Gras im Gegensatz zu reifem Getreide von der Luftfeuchtigkeit abhängige, wechselnd starke Evapotranspiration hat, ist auch die Wärmeentwicklung, sowie die Temperaturdifferenz zwischen 2 m Höhe und dem Gras stark wechselnd und deshalb die Streuung der Meßwerte größer als in Abbildung 28.

kann dann auch negative Werte annehmen. Dementsprechend sind die R_T -Werte im Allgemeinen um so größer, je höher die Strahlungsbilanz oder die Globalstrahlung. Abb. 29 zeigt die Lage der gemessenen Werte von R_T einer Wiese, ebenfalls in den Mittagsstunden des Juni 1958. Weil hier die Ventilationsverdunstung stark von der Luftfeuchtigkeit und von der Windstärke abhängt, ist die Streuung der R_T -Werte in Abb. 29 größer als in Abb. 28.

Mittelwerte mittägiger R_T -Werte verschiedener Bestände sind in der folgenden Tabelle enthalten:

Tab. 5

Das Verhältnis der von Lupolenstrahlungsbilanzmessern angezeigten Intensitäten der von unten und von oben einfallenden Strahlungen, R_T , für verschiedene Bestände während der Mittagsstunden

Bestand	100 $\bar{R}_T$	$u_2 < 2$ $u_2 > 4$		$Q < 0.3$ $Q > 0.4$		Bestand	
		m/sec		cal cm ⁻² min ⁻¹		naß	trocken
Acker	12.5						
Kleegras	22.6	22.7	21.3	21.7	22.9		
Wiese	24.7	24.8	24.4	23.8	25.7		
Rübenfeld	15.5						
Juli							
Rübenfeld	19.6						
Sept./Okt.							
Kartoffelfeld	19.6						
Juni/Juli							
Kartoffelfeld	13.0						
Sept./Okt.							
Winterroggen-							
Saatfeld	15.4	17.4	13.6	15.8	15.1		
Roggenfeld	17.1	17.5	17.1	18.7	16.3	16.1	17.2
Juni/Juli							
Hafersaatfeld	13.2						
Haferfeld	20.9						

Im allgemeinen gingen wir bei der Berechnung der Strahlungsbilanz Q_{Bestand} für einen Bestand von den über der Quickborner Meßwiese gemessenen Mittelwerten Q_Q aus. Sie ist

$$\frac{Q_{\text{Bestand}}}{Q_Q} = \frac{(1 - R_{T, \text{Bestand}})}{(1 - R_{T, \text{Wiese}})} = f(R) \quad [23]$$

Gleichung [23] gilt bei Einsetzen der Tabellenwerte von R_T nur für die Zeit des hellen Tages, in welcher die Globalstrahlung die wesentlichste Komponente der Strahlungsbilanz ist. Aber auch mittags ist, wie beim Ausmessen der Ausschläge der Strahlungsbilanzregistrierung zu merken war, Gleichung [23] nur großzügig anwendbar, z. B. auf stündliche Mittelwerte, weil die Bodentemperatur den Änderungen der Globalstrahlung mit einer Verzögerung folgte, deren Zeitkonstante bei etwa 20 min liegt.

Uns interessieren aber weniger die Mittagswerte als die Tagessummen der Strahlungsbilanz. Bei den Auswertungen haben wir die Tagessummen gebildet und mit den nach [23] berechneten verglichen. Dabei wird offenbar, daß die Vorgänge am hellen Tag auch für die Summen der Strahlungsbilanz bestimmend sind. Wenigstens gilt das für die Vegetationszeit. Der Unterschied der gemessenen und berechneten Tagessummen betrug nämlich nur

bei reifem Winterroggen	ca. 3%
bei Winterroggensaat	ca. 2%
bei Kartoffelfeldern	ca. 3%

Diese geringen Unterschiede sind aber möglicherweise ganz oder teilweise durch Unsicherheiten der Eichung und Auswertungen hervorgerufen.

6.3. Gesetzmäßigkeiten des Wärmeübergangs

Wir haben nun allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Verdunstung zu untersuchen, die unsere Aufgabe der Berechnung mittlerer Wärmehaushaltskomponenten des Landes Schleswig-Holstein erleichtern können.

E. Frankenberger wies 1955 (15) auf den Befund hin, daß die Verdunstung des Quickborner Meßfeldes einen Strahlungsanteil V_Q und einen Ventilationsanteil V_V hat

$$V = V_Q + V_V \quad [24]$$

Für den Strahlungsanteil der Verdunstung hatte sich im September näherungsweise

$$V_Q = a \cdot Q \quad \text{mit } a = 0.53 \text{ und für}$$

$$V_V = b \cdot \sqrt{u_2} \cdot (\vartheta - \vartheta') \quad \text{mit } b = 0.0015$$

ergehen. G. Hofmann (16) hat gezeigt, daß dies Ergebnis in guter Übereinstimmung mit Wärmeübergangsformeln nasser Oberflächen steht, wenn man plausible Werte für die Wärmeübergangszahlen einsetzt. Nach seinen Rechnungen hat an die Stelle des empirischen Faktors a für nasse Oberflächen der Aus-

$$\left(1 + \frac{C_p \cdot p}{0.69 \cdot r \cdot dE/d\vartheta}\right)^{-1}$$

zu treten. Die hierin enthaltenen Temperaturabhängigkeit des Strahlungsgliedes der Verdunstung konnte am Quickborner Beobachtungsmaterial bestätigt werden.

Es lag deshalb nahe, Faktoren a und b zur Kennzeichnung des Zusammenhangs zwischen der Verdunstung V , der Strahlungsbilanz Q und dem Produkt $\sqrt{u} (\vartheta - \vartheta_2)$, das wir die Ventilationsgröße nennen, erneut, auch für andere Bestände und weniger feuchte Böden, zu untersuchen. Wir haben unter 1. geäußert, daß die Gesetze, die wir zur Extrapolation unserer Meßfeldergebnisse des Wärmehaushalts auf die Landesfläche verwenden wollen, möglichst lineare Beziehungen enthalten sollen. Das trifft leider auch für die Wärmeübergangs-Gleichungen nicht zu. Die Windgeschwindigkeit geht näherungsweise mit der Potenz $1/2$ ein und in den Tagessummen des Ventilationsanteils der Verdunstung erscheint die Summe der mittleren stündlichen Produkte $\sqrt{u} (\vartheta - \vartheta')$. Bei den einzelnen Stunden kann man anstelle des mittleren Produktes, wie die Erfahrung lehrte, noch das Produkt der Wurzel des stündlichen Mittelwertes von $\bar{u}$ und die Differenz der stündlichen Mittelwerte von Temperatur und Feuchttemperatur $(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}')$ verwenden. Die Summe der stündlichen Werte $\sqrt{u} (\vartheta - \vartheta')$ eines Tages ist dagegen im Sommer 5–10% größer als das Produkt aus der Wurzel der über den vollen Tag gemittelten Windgeschwindigkeit und der über den vollen Tag gemittelten psychrometrischen Differenz, im Winter sogar 80% und mehr. Wir kommen hierauf zurück. Natürlich ist dennoch ein Ausdruck, welcher die Potenz $1/2$ enthält, für Interpolationen geeigneter als Austauschgleichungen derjenigen Höhen, welche die für größere Geländeabschnitte kennzeichnenden vertikalen Gefälle haben. Dort ändert sich nämlich der vertikale Austauschkoeffizient im Laufe eines Tages u. U. um zwei Zehnerpotenzen.

Bevor wir uns näher mit den Faktoren der Wärmeübergangsgleichung befassen, haben wir noch auf eine Bemerkung einzugehen, die F. Kortüm (17) gegen die Anwendung der Hofmannschen Formel erhoben hat. Er weist nach, daß über relativ trockenen Beständen das Ventilationsglied der Verdunstung negativ werden

kann. Kortüm unterscheidet sich jedoch von G. Hofmann dabei durch die Annahme eines von der Benetzung unabhängigen Strahlungsgliedes, während Hofmann annimmt, daß sich bei Porenschluß der Pflanzen, zunehmender Reife, d. h. über nicht völlig benetzten Pflanzen die Faktoren a und b um gleiche Bruchteile verringern. Ist diese plausible Annahme berechtigt, so kann man a gleich $a_{\max}(\vartheta) \cdot k$ und b gleich $b_{\max} \cdot k$ setzen, das heißt, man kann bei Kenntnis der für volle Benetzung, ($k = 1$), gültigen Faktoren a und b den Benetzungseffekt durch eine einzige Zahl k beschreiben, die wir im folgenden Verdunstungskennzahl nennen. Immerhin ist Kortüms Einwand berechtigt, daß die mit der psychrometrischen Differenz aus 2 m Höhe gewonnene Gesetze nicht die reinen Wärmeübergangsformeln sein können; denn diese können nur an der Blattgrenzschicht gelten. Sie enthalten die Windgeschwindigkeit in den Potenz $1/2$. Die Übertragung von Wärme und Wasserdampf von der bestandsnahen Luft bis 2 m Höhe muß dagegen Austauschgesetzen folgen, in welche die Windgeschwindigkeit näherungsweise in der ersten Potenz eingeht. Wir werden somit zu untersuchen haben, wie weit die psychrometrische Differenz in 2 m Höhe von derjenigen verschieden ist, die sich an der Bestandsoberfläche messen läßt. Wir gehen dazu von der Sprungschen Näherungsformel für den Dampfdruck aus:

$$e = \sim e' - 0.49 (\vartheta - \vartheta') \cdot p/p_0, \quad [25]$$

vernachlässigen jedoch den im zweiten Glied enthaltenen Luftdruckeinfluß p/p_0 .

Bezeichnen wir mit Δe die Differenz der Dampfdrucke, mit $\Delta \vartheta$ die Differenz der Temperaturen zweier Niveaus, hier des Hüttenniveaus und der Bestandsoberfläche, so gilt

$$\Delta e = \sim \left(\frac{dE}{d\vartheta} + 0.49\right) \cdot \Delta \vartheta - 0.49 \cdot \Delta \vartheta$$

und

$$\frac{\Delta e}{0.49 \cdot \Delta \vartheta} = \sim \frac{\left(\frac{dE}{d\vartheta} + 0.49\right) \cdot \Delta \vartheta}{0.49 \cdot \Delta \vartheta} - 1.$$

Der Ausdruck $\Delta e/0.49 \Delta \vartheta$ weicht vom reziproken Wert des in Gleichung [7] dargestellten Bowenschen Quotienten L/V nur insoweit ab, als sich die aktuellen Temperaturgradienten von den potentiellen unterscheiden. Nach K. Brocks ist dieser Unterschied in den untersten Metern der Atmosphäre meist unbedeutend.

Somit ist

$$V/L + 1 = \sim (dE/d\vartheta + 0.49) \Delta \vartheta' / (0.49 \Delta \vartheta)$$

Solange Gefrierwärme am Bodenwärmehaushalt unbeteiligt ist, d. h.

$$V + L = Q - B \text{ ist, wird}$$

$$(Q-B)/L = \sim (2.05 dE/d\vartheta + 1) \cdot \Delta \vartheta' / \Delta \vartheta$$

oder

$$\Delta \vartheta' = \frac{\Delta \vartheta \cdot (Q-B)}{L \cdot (2.05 \cdot dE/d\vartheta + 1)}$$

Somit ist die gesuchte Größe bei Normaldruck

$$\Delta \vartheta - \Delta \vartheta' = \sim \Delta \vartheta \left(1 - \frac{(Q-B)}{(2.05 \cdot dE/d\vartheta + 1) \cdot L}\right) \quad [26]$$

Setzen wir noch $\Delta \vartheta = L \cdot 1/60 \cdot c_p \cdot \Delta z \cdot A^{-1}$, wobei A in gr/cm sec und L in $\text{cal/cm}^2\text{min}$ einzusetzen sind, sowie

$$L = (Q-B) \cdot L/V \cdot (1 + L/V)^{-1},$$

so ist der gesuchte Unterschied der psychrometrischen Differenz zwischen Bestandsoberfläche und Hüttenniveau in Termen des Wärmehaushalts am Erdboden

$$\Delta(\vartheta - \vartheta') = \sim \frac{\Delta z}{60 \cdot c_p \cdot A} \cdot (Q - B) \left[\frac{1}{(2.05 d E/d \vartheta + 1)} - \frac{1}{1 + V/L} \right] \quad [27]$$

Für den Austauschkoeffizienten A ist ein für die Temperaturdifferenzen der bodennahen Luftschicht repräsentativer Wert einzusetzen. Wir können zu seiner Bestimmung die Austauschschablone Abb. 16 benutzen. Da die Kleeagraskultur verhältnismäßig glatt ist, werden die Austauschkoeffizienten dort relativ klein und deshalb die gewonnenen Korrekturen der psychrometrischen Differenz besonders hoch sein. In erster Näherung ist nach dem Austauschdiagramm der Austauschkoeffizient proportional der Windgeschwindigkeit

$$A = \sim c' \cdot U,$$

wobei wir zur Erleichterung der Rechnungen die Windgeschwindigkeit U in m/sec einsetzen. Abb. 16 liefert für c' bei überadiabatischer Schichtung, die in der Zeit des hellen Tages vorherrscht,

$$c' = 1.1.$$

und für unteradiabatische Schichtung, wie sie nachts vorherrscht,

$$c' = 0.48.$$

Setzen wir diese Werte in [27] ein, so gewinnen wir für $\frac{\Delta(\vartheta - \vartheta')}{(Q-B)/U}$ Zahlenwerte, die in Abb. 30 dargestellt sind.

Größe und Vorzeichen von L/V sind in der Regel nicht unabhängig von (Q-B). Aus Gründen der Energiebilanz kann der obere Halbraum nur bei positiven Werten von (Q-B) erreicht werden, der linke untere Quadrant nur bei negativen (Q-B)-Werten. Lediglich im rechten unteren Quadrant kann (Q-B) sowohl positiv wie negativ sein. Nur im ersten Fall tritt eine Abnahme der psychrometrischen Differenz mit der Höhe ein. Bei Fehlen einer Ventilationskomponente der Verdunstung erreicht L/V über völlig nassen Flächen den durch den Schnittpunkt der Temperaturisoplethen mit der Abscisse bestimmten Wert. Sobald Wind aufkommt, oder $(\vartheta - \vartheta')$ von null verschieden ist, sinkt L/V, so daß $(\vartheta - \vartheta')$ nur mit der Höhe zunehmen kann. Ein Steigen des Wertes L/V über den des Schnittpunktes setzt notwendig voraus, daß die Bodenoberfläche nicht voll benetzt ist. In diesem Fall kann in unmittelbarer Bodennähe natürlich keine Sättigung herrschen. So sehen

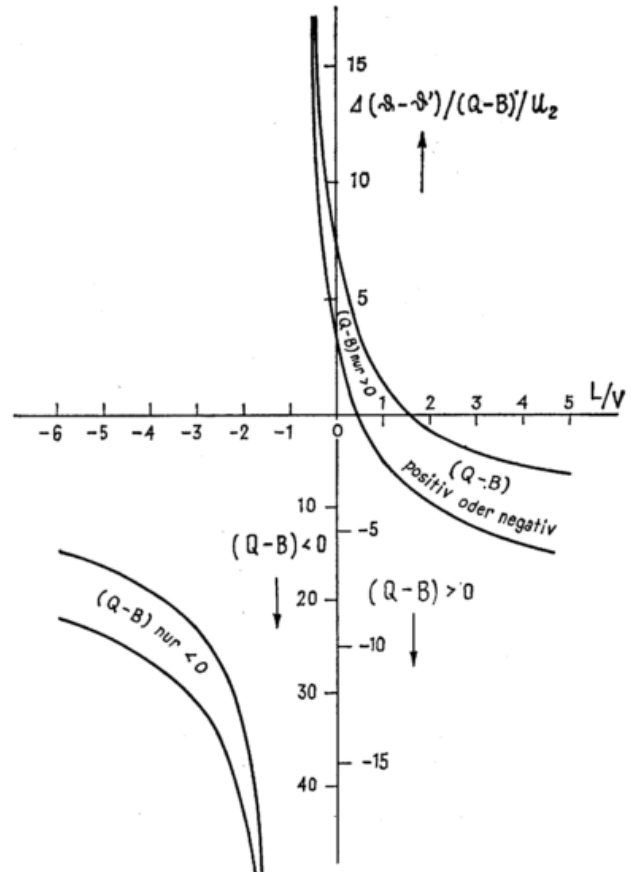


Abb. 30

Diagramm zur Berechnung vertikaler Unterschiede der psychrometrischen Differenz zwischen 2 und 0.2 m Höhe.

wir, daß stationäre Wärmeumsätze am Boden mit der Existenz von Nebel unvereinbar sind. Zur Nebelbildung gehören unstationäre Vorgänge oder advektive Wärme- und Wasserdampfkomponenten. Wir haben aus den mittleren Wärmehaushaltskomponenten des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1958 die Unterschiede der psychrometrischen Differenz zwischen Hüttenniveau und Bestandsoberfläche für die Mittags- und Mitternachtsstunden der einzelnen Monate berechnet. Sie sind in Tabelle 6 wiedergegeben:

Tab. 6

Vertikale Unterschiede der psychrometrischen Differenz zwischen den Höhen 200 und 20 cm über einem Klee grasbestand gegen Mittag und Mitternacht in Prozent des Mittelwertes der psychrometrischen Differenz.

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
11—12 Uhr	4.5	6.5	6	3	3	3	1	1	2	6	12	13 %
0—1 Uhr	52	20	10	16	12	15	12	31	12	16	22	16 %

Während der Vegetationszeit, die uns hauptsächlich interessiert, treten größere Unterschiede der psychrometrischen Differenz vor allem nachts auf, wenn der Vertikalaustausch gering ist. Als Windgeschwindigkeit haben wir die in 2 m Höhe gemessene in die Ventilationsgröße $1/\bar{u}$ $(\vartheta - \vartheta')$ eingesetzt. Wegen der Potenz $1/2$ machen sich dabei die Schichtungseinflüsse weniger stark bemerkbar als bei $(\vartheta - \vartheta')$. Benutzt man die Windgeschwindigkeit aus 10 m Höhe, so hat man zu berücksichtigen, daß $\bar{u}_2/\bar{u}_{10}$ mittags bei 0.76 und nachts bei 0.63 liegt. Aus Tabelle 6 folgt, daß Faktoren a und b, die man empirisch unter Verwendung der in

2 m Höhe gemessenen psychrometrischen Differenzen, mittels der Wärmehaushaltsgleichungen ermittelt, einen u. U. erheblichen Tagesgang zeigen werden.

Beim Festhalten an den Wärme-Übergangsformeln würden wir uns weit von der physikalisch fundierten Grundlage entfernen, wenn nicht die Wärmeumsätze nachts klein gegen die des Tages wären. Das gilt sogar für den Beginn und das Ende der Vegetationszeit unserer Breiten. Die Verdunstung der Stunden 18 bis 6 Uhr beträgt nur rd. 5% der von 6 bis 18 Uhr gemessenen. Die aus den Wärmeübergangsgleichungen abgeleiteten Zahlenwerte sollen deshalb lediglich auf Tages-

summen der Wärmehaushaltskomponenten angewendet werden.

Auch dann führen die wechselnden Unterschiede der psychrometrischen Differenzen zwischen Bestandsraum und Hüttenniveau noch zu kleinen Schwankungen der Faktoren a und b, die wir mit Hüttenwerten von Tag zu Tag ableiten. Die Faktoren fallen um so kleiner aus, je größer die Strahlungsbilanz und je geringer die Windstärke gewesen sind.

Trotzdem bieten die Wärmeübergangsgleichungen ein willkommenes Extrapolationsverfahren. Wir können erwarten, daß auch noch bei Verwendung der Temperaturwerte aus Thermometerhütten das Produkt $\sqrt{u}(\theta - \theta')$ in engen Beziehungen zum Ventilationsanteil der Verdunstung steht. Wir hatten bei früheren Untersuchungen den Faktor b auf den Wärmebedarf der Verdunstung einer Minute bezogen. Gehen wir auf die latente Wärme der Evapotranspiration einer Stunde über, so ist ihr Ventilationsanteil

$$V_v = k \cdot b_{\max} 60 \cdot \sqrt{u}(\theta - \theta'),$$

und die Tagessumme der ventilationsbedingten Komponente von V, wenn wir das Integral durch die Summe stündlicher Mittelwerte ersetzen,

$$\begin{aligned} \sum_{24} V_v &= k \cdot b_{\max} \cdot 24 \cdot 60 \sqrt{u}(\theta - \theta') = \\ &= k \cdot b_{\max} \cdot 60 \sum_{24} \sqrt{u}(\theta - \theta') \end{aligned}$$

und die Tagessumme der Evapotranspirations-Wärme V

$$\sum_{24} V = k \cdot a_{\max}(\theta) \sum_{24} (Q - B) + k \cdot b_{\max} \cdot 60 \cdot \sum_{24} \sqrt{u}(\theta - \theta'). \quad [28]$$

Die in a enthaltene Temperatur ist eine mit der Verdunstungsintensität gewogene. Es genügt, für sie das Mittel aus dem Temperatur-Maximum und der in üblicher Weise gebildeten Tages-Mittel-Temperatur $(\theta_I + \theta_{II} + 2 \cdot \theta_{III})/4$ einzusetzen (Indices: Klimabeobachtungstermine).

Von Michalowski (17) ist gezeigt worden, daß enge Beziehungen zwischen der psychrometrischen Differenz eines Tages und dem Strahlungsgenuß des Bodens existieren. Die vollständige Analyse des Tagesganges der psychrometrischen Differenz ist allerdings noch immer eine ungelöste Aufgabe, die durch die Tatsache erschwert wird, daß die vertikale Verteilung relativer Konvergenzen und Divergenzen der Wärmestromdichte sehr verschieden von derjenigen der Wasserdampfstromdichte ist. Für unsere Aufgabe können wir uns mit den empirischen Befunden des Tagesganges der Ventilationsgröße begnügen.

Anhang 5 zeigt den mittleren Tagesgang der Ventilationsgröße für die einzelnen Monate. Nachts ist sie klein und wenig veränderlich. Ihre Größe hängt dann nur von der Stärke der Advektion und von dem Sättigungsgrad der Luftmasse ab. Tagsüber tritt zu dieser advektiven Ventilationsgröße noch der strahlungsbedingte Anteil.

Es sei hier ein Rat angeführt, wie man aus den Beobachtungen zur Zeit der Klimatermine Tagessummen der Ventilationsgröße errechnen kann. Wir fanden als beste Näherung die Gleichung

$$\begin{aligned} \sum_{24} \sqrt{u_2}(\theta - \theta')_2 &= 2/\pi \cdot (\sqrt{u_2}(\theta - \theta'))_{II} \cdot \\ &\cdot (T_{SU} - T_{SA}) + 18 (\sqrt{u_2}(\theta - \theta'))_{2III}, \end{aligned}$$

wobei die römischen Indizes die Zeit der Klimatermine und $(T_{SU} - T_{SA})$ die Zahl der Stunden von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang bedeuten.

Wie groß sind die Faktoren $a_{\max}$ und $b_{\max}$?

Am besten sollte die Hofmannsche Wärme- und Stoffübergangsgleichung auf völlig benetzte Bestände

anwendbar sein. Wie Hofmann erläutert, hängt die Größe des Faktors b von der Form der Pflanzen ab, weil die Dicke der Grenzschichten an Blättern und Halmen von deren Ausmaß bestimmt wird. Sind die Grenzschichten dick, so fallen die Faktoren b klein aus und umgekehrt. Wir können allerdings vermuten, daß die Pflanzen im Bestand eine für hohen Wasserdurchfluß günstige Form und Dichte annehmen, und daß deshalb die Unterschiede der b-Faktoren verschiedener Bestände nicht sehr erheblich sein werden. Besonders leicht ist die Ableitung der Faktoren a und b beim Quickborner Wiesengras, von dem die meisten Messungen vorliegen. Wie in einer früheren Arbeit beschrieben, trägt man dazu die Größe

$$\sum_{\text{Tag}} V / \sum_{\text{Tag}} (Q - B) \cdot f(\theta)$$

über der Größe

$$\sum_{\text{Tag}} \sqrt{u}(\theta - \theta') / \sum_{\text{Tag}} (Q - B) \cdot (\theta) f$$

auf, wobei die Funktion $f(\theta)$, die zur Elimination des Einflusses der Lufttemperatur dient, den Wert

$$\left(1 + \frac{c_p \cdot p}{0.69 \cdot r} \cdot \frac{1}{(dE/d\theta)_{\theta}}\right) / \left(1 + \frac{c_p \cdot p}{0.69 \cdot r} \cdot \frac{1}{(dE/d\theta)_{15^\circ}}\right)$$

hat. Die Verbindungslinie der Meßwerte schneidet die Ordinate beim Wert a und die Steigung der Verbindungslinie ist mit dem Faktor b identisch.

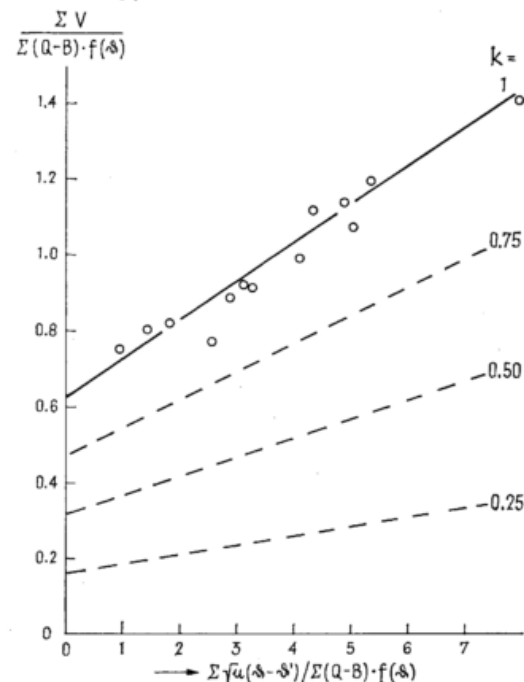


Abb. 31

Diagramm zur Bestimmung der Faktoren der G. Hofmannschen Wärmeübergangsformel a und b aus den Wärmehaushaltskomponenten von Tagen mit Dauerregen.

Abbildung 31 zeigt solch ein Diagramm für die Regentage des Septembers 1957. Im Anfang dieses Monats war dank reichlicher Niederschläge im August der Boden bereits recht feucht und am 9., 10., 11., 12., 14., 16., 22. und 23. September fielen weitere langanhaltende und ergiebige Niederschläge, die zu völliger Benetzung führten. In Abb. 32, die den effektiven Wasserfluß durch die Quickborner Bodenoberfläche, Niederschlag minus Verdunstung in mm, wiedergibt, erkennt man die starke Auffüllung des Bodenwassers in diesem Zeitraum.

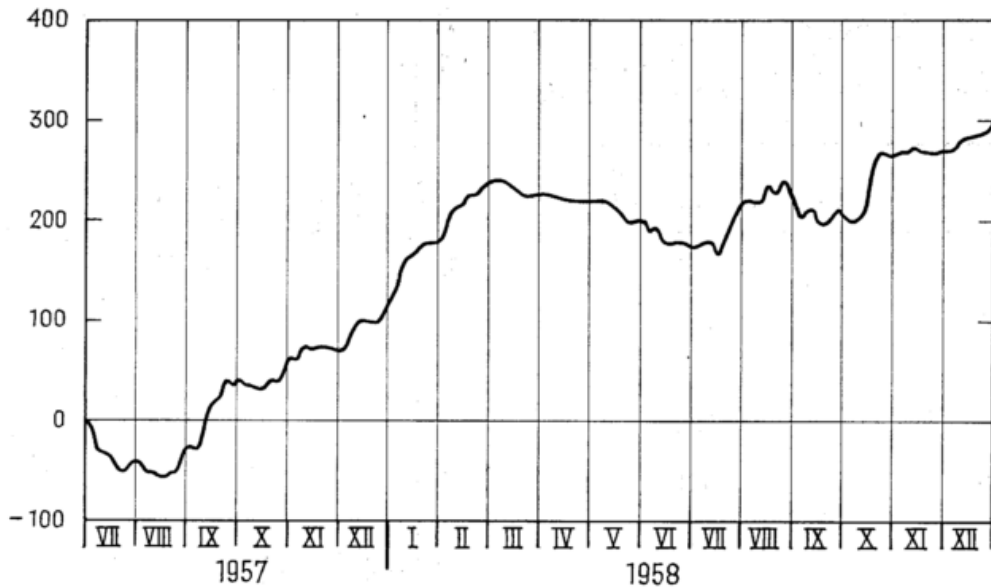


Abb. 32
Wasserdurchfluß durch die Erdoberfläche während des Internationalen Geophysikalischen Jahres in Quickborn, d. i. Niederschlagsmenge minus Verdunstungsmenge in mm als Summenfunktion.

Die zeitliche Andauer des Regens machte über 17% des Monats aus. Die Streuung der Meßwerte $\Sigma V/\Sigma (Q - B) \cdot f(\vartheta)$ in Abb. 31 beträgt etwa $\frac{1}{3}$ derjenigen, die wir eingangs für die Komponente L fanden, d. h. ca. 3–4%. In diesem Rahmen verläuft die ausgleichende Gerade durch den bei 15° C zu erwartenden Wert von $a = 0.625$. Ihre Steigung entspricht einem Faktor b von 0.00161. Diesen beiden Werten ordnen wir eine die Wasserbedeckung kennzeichnende „Verdunstungszahl“ $k = 1$ zu. Andere Linien der k-Skala sind punktiert eingetragen.

Tage mit langdauernden und ergiebigen Niederschlägen, wie sie für Abbildung 31 verwendet wurden, sind in Schleswig-Holstein selten. Meist ist die Verdunstung an Niederschlagstagen größer als die Niederschlagsmenge gewesen.

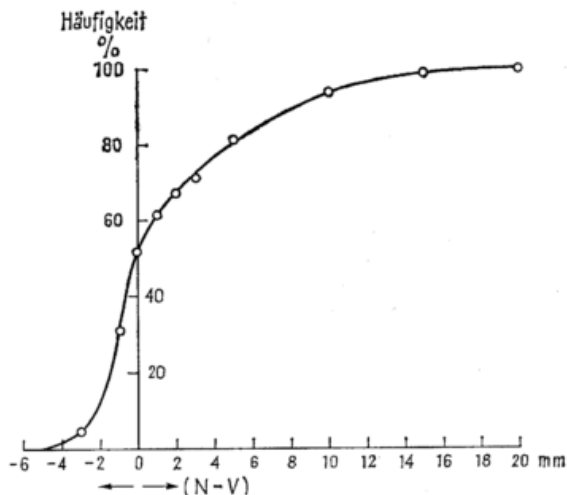


Abb. 33
Summenfunktion der Häufigkeit von Regentagen mit verschiedener Wasserbilanz (IGJ).

Abbildung 33 zeigt die Häufigkeit der Differenz Niederschlag weniger Verdunstung an den Regentagen der Vegetationszeit Mai bis Oktober als Summenfunktion. Es handelt sich dabei um 179 Regentage. Mehr als die Hälfte dieser Tage brachte dem Boden keinen effek-

tiven Gewinn an Wasser. Allerdings war der Wassergewinn an den Regentagen mit positiven Werten der Differenz Niederschlag-Verdunstung fast viermal so groß wie der Wasserverlust an den Regentagen mit negativen Werten von $(N-V)$.

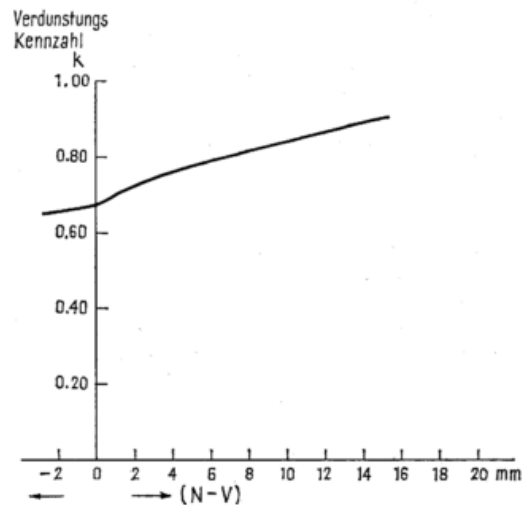


Abb. 34
Mittlere Verdunstungskennzahlen an Regentagen als Funktion ihrer Wasserbilanz.

Abbildung 34 zeigt uns mittlere Verdunstungskennzahlen der Regentage des gleichen Zeitraumes als Funktion der Wasserbilanz $(N-V)$ für das Quickborner Meßfeld. Besonders bemerkenswert ist, daß die Kurve auch in der rechten Bildhälfte, d. h. bei positiven Werten $(N-V)$ noch erheblich ansteigt. Die Starkniederschläge fielen nämlich oft in Form von Schauern, zwischen denen Zeiten mit teilweiser Abtrocknung des Bodens und seiner Bewachsung gelegen haben. Aus dieser Tatsache ist zu erklären, daß die Kurve den Wert 1.00 im Gegensatz zu den Septembertagen nicht erreicht.

Tabelle 7 enthält Mittelwerte der Verdunstungskennzahlen verschiedener Bestände für die Regentage. Diese sind, zunächst nur versuchsweise, mit Hilfe der k-Skala des Grases aus Abb. 31 bestimmt worden.

Tab. 7

Mittlere Verdunstungskennzahlen an Regentagen, ausgewertet mit der Kennzahlkala des Wiesenegrases (Abb. 31)

Bestand	Mittlere Verdunstungskennzahl an Regentagen
Wiesengras	0.79
Klee gras	0.83
Kartoffelfeld	0.77
hoher grüner Winterroggen	0.85
reifer Roggen	0.66
Rübenfeld vollblättrig	0.92
Rübenfeld untere Blätter tot	0.79
hoher grüner Hafer	1.10
Hafersaatfeld	0.81
Stoppelfelder	0.67
gepflügter Acker	0.78

Wir sehen, daß bei den Regentagen eine kritiklose Anwendung der Kennzahlkala des Grases auf andere Bestände zu nicht unerheblichen Fehlern führen kann. Es ist sicher, daß für die bedeutenden Unterschiede der abgeleiteten k -Werte bei Regentagen nicht allein die wechselnde Wasserbilanz verantwortlich ist, sondern auch das Vermögen mancher Pflanzen, aufgefangenes Niederschlagswasser an ihren oberen, gut ventilierten Teilen festzuhalten. Wir werden noch sehen, daß sich diese Eigenschaft stärker auswirkt, als die Besonderheiten eines Bestandes hinsichtlich der Anordnung saftführender Pflanzenteile, Stomata, Poren etc.

Besonders gut belüftet sind die großen Wassertropfen, die bei Regen zwischen den Spelzen der Haferripen in Höhen mit relativ hoher Windgeschwindigkeit und relativ niedrigem Dampfdruck hängen. Der Faktor b des Haferfeldes hat an Regentagen mit Sicherheit einen Wert, der höher als 0.0021 ist. Auch die vielfach horizontal gerichteten Rübenblätter vermögen Tau- und Regentropfen aufzufangen und wie die Haferripen lange Zeit hochzuhalten. Sonst sind aber die Unterschiede gering und ermutigen doch zur Anwendung einer einheitlichen k -Skala. Das wird noch deutlicher, wenn wir Monatsmittelwerte der k -Werte bilden, wobei die Ergebnisse aller Regentage, aller ersten Folgetage nach Regen, aller zweiten Folgetage nach Regen, aller dritten Folgetage etc. in Gruppen zusammengefaßt werden. In Abb. 35 bis 41 finden sich diese Mittelwerte von k für die untersuchten Bestände und Felder. Wir sehen dort, daß in der Zeit des stärksten Wachstums nach völligem Abtrocknen einer Regenbenetzung die Verdunstungskennzahlen k nahe 0.70 liegen, wie bei Hafer, Winterroggen, Wiesengras, Klee gras. Besonders verdunstungsfreudig sind die Rübenfelder, besonders sparsam mit Wasser die Kartoffelfelder. Niedrige Verdunstungskennzahlen treten natürlich auf, wenn Halme oder Blätter vergilben, wie bei Hafer im Juli, oder wenn junge Pflanzen in Zeiten starker Strahlung den Boden nicht völlig bedecken.

In fast allen Abbildungen finden wir in einzelnen Monaten vom 2. bis 4. Tag ab zunächst einen kleinen relativen Anstieg der k -Werte, so bei Rüben im August, bei Hafer im Mai, auch bei Wiesen- und Klee gras. Er ist darauf zurückzuführen, daß diese Tage oft die ersten Tage vor Niederschlägen gewesen sind, bei de-

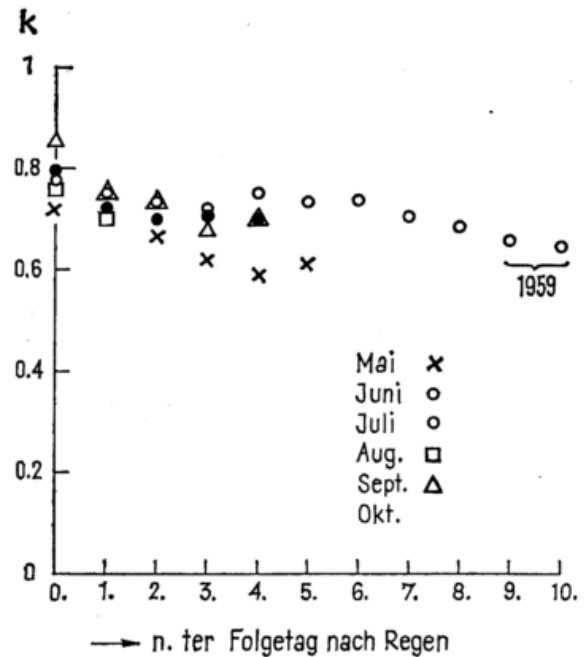


Abb. 35

Verdunstungskennzahlen des Wiesenegrases als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regen in Tagen.

nen die Strahlung bereits durch Aufzugsbewölkung wesentlich geschwächt war. Wir haben die Zusammenhänge bereits auf Seite 31 in Verbindung mit Gleichung [27] behandelt.

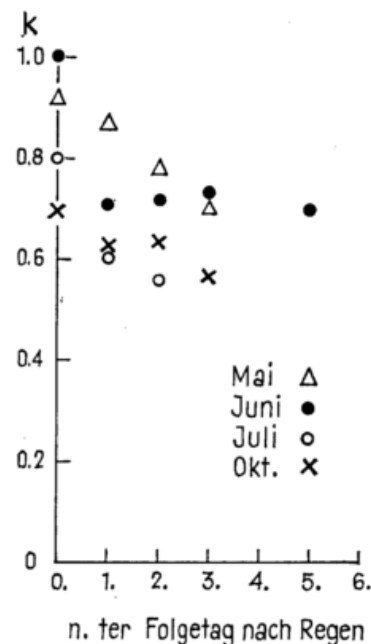


Abb. 36

Verdunstungskennzahlen von Winterroggen als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regentag.

Daß die Gesetze des Wärme- und Wasserdampfüberganges der trockenen Felder sehr ähnlich denen der trockenen Quickborner Wiese sind, ist in der Ähnlichkeit der mittleren Verdunstungskennzahlen nur angedeutet. Ein besserer Beweis ist in der Abnahme der mittleren k -Abweichung vom Mittelwert der einzelnen Tage-Gruppen zu sehen. Diese mittlere Abweichung beträgt:

an den Regentagen $8 \cdot 10^{-2}$,
an den ersten Folgetagen nach Regen $7 \cdot 10^{-2}$,
an den zweiten Folgetagen nach Regen $5 \cdot 10^{-2}$,
an den fünften Folgetagen nach Regen u. später $4 \cdot 10^{-2}$,

was die Unsicherheit der Bestimmung von $\sum_{v=1}^{24} v / \sum_{v=1}^{24} (Q-B)$ nicht wesentlich überschreitet. Allerdings darf nicht vergessen werden, daß die geringe Dauer der Trockenperioden des Internationalen Geophysikalischen Jahres und die reichliche Wasserversorgung der Böden in

der vorangegangenen Zeit für die Anwendung eines derart einfachen Rechenverfahrens günstig gewesen ist. Daß sich die im Jahre 1959 für Wiesengras gewonnenen k-Werte von Tagen, die als neunte und zehnte den Regentagen folgen, trotz der größeren Trockenheit

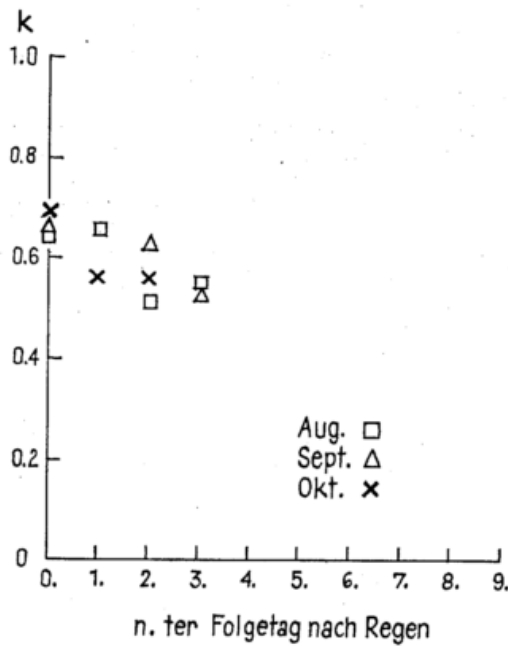


Abb. 37

Verdunstungskennzahlen von Stoppelfeldern und Acker als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regentag.

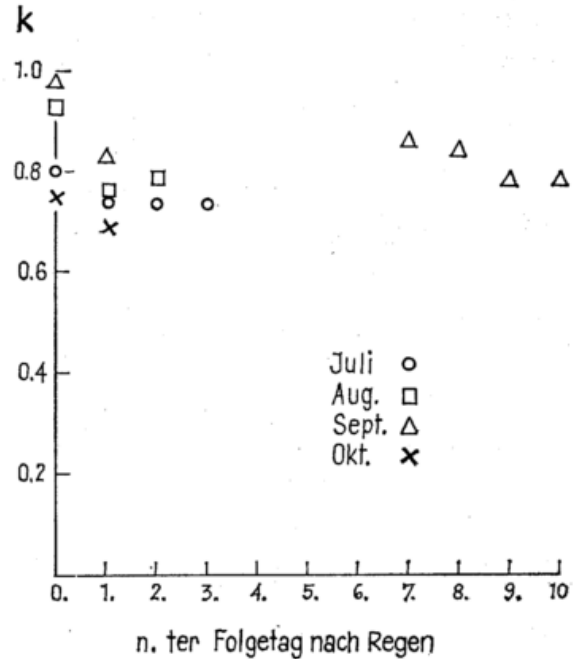


Abb. 39

Verdunstungskennzahlen von Rübenfeldern als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regentag.

gut an die im Jahre 1958 gefundenen anschließen, mag an der hohen Saugfähigkeit des anmoorigen Quickborner Bodens liegen. In trockenen Jahren wird sich außer dem zeitlichen Abstand vom letzten Regen noch die Wasserbilanz (N-V) als Merkmal für Verdun-

stungskennzahlen bewähren. Nachdem wir die Verdunstungskennzahlen verschiedener Bestände für z. T. recht extreme Vegetationsphasen kennengelernt haben, können wir mit größerer Sicherheit auch für die Kennzahlen der nicht unmittelbar untersuchten, in Schles-

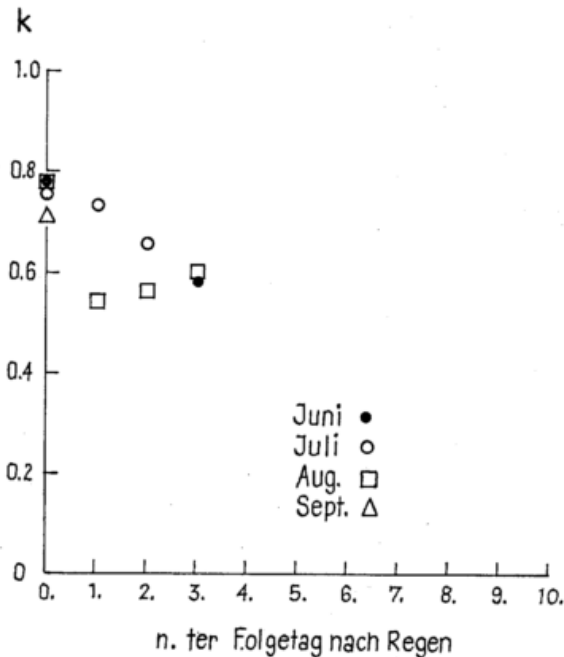


Abb. 38

Verdunstungskennzahlen von Kartoffelfeldern als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regentag.

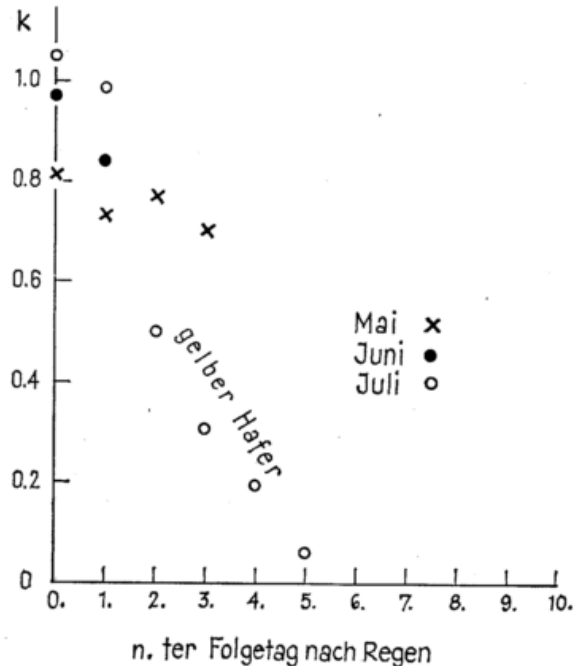


Abb. 40

Verdunstungskennzahlen von Haferfeldern als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regentag.

wig-Holstein weniger stark vertretenen Bestände plausible Annahmen machen. Schwierig ist dagegen die Beantwortung der Frage, wie sich Wälder, Baumschu-

len und Einzelbäume auf den Wärmehaushalt des Landes auswirken. Eigene Messungen hierzu liegen nicht vor.

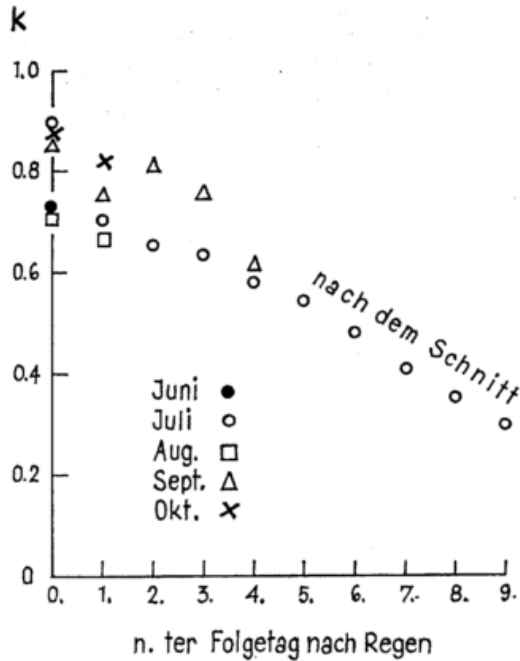


Abb. 41
Verdunstungskennzahlen von Kleeefeldern als Funktion des zeitlichen Abstandes vom letzten Regentag.

6.4. Zur Verdunstung der Wälder

Die Verdunstung der Waldflächen mittels Wärme- oder Stoffübergangsgleichungen in Beziehung zur Strahlung und zur Ventilationsgröße zu setzen, stößt auf die Schwierigkeit, daß das Hüttenniveau, aus dem unsere Klimamessungen stammen, selbst noch beim Jungbestand von Waldbäumen in einer Zone liegt, in dem die Gewächse ihr Umweltklima in erheblichem Maße selbst beeinflussen. Selbst wenn die Ventilationsgröße über den Wipfeln bekannt ist, braucht man zur Bestimmung der Faktoren a und b der Übergangsgleichungen von Wald vor allem längere Meßreihen, bei denen eine volle Benetzung des Laubes vorgelegen hat. Wir haben bereits beim Grase erkannt, daß eine volle Benetzung nur ganz selten vorliegt. Beim Walde mit seinen relativ großen Laubmassen und der erheblichen zeitlichen Verschiebung, mit der Zustandsänderungen verschiedener Zonen verlaufen, ist kaum mit einer Erfüllung unseres Wunsches nach voller Benetzung zu rechnen.

Verdunstungswerte längerer Zeiträume eignen sich für die Ermittlung von Faktoren a und b nur, wenn man annehmen darf, daß die Benetzung bzw. der Faktor k während der Messungen annähernd konstant war. Ein solcher Versuch wurde vom Verfasser mit Hilfe der von K. Göhre (18) veröffentlichten monatlichen Verdunstungsbeträge eines kleinen Bestandes von jungen Kiefern angestellt. Dabei ergab sich ein b -Wert, der fast eine Zehnerpotenz größer als der des Grases ist, während für a ein sehr kleiner Wert erhalten wurde.

Baumgartner (19) hat unmittelbar die Verdunstungswärme eines jungen Fichtenbestandes an heißen, windschwachen Julitagen zu 386 cal/cm^2 gemessen. Dies Ergebnis stimmt fast mit der berechneten latenten Wärme der Evapotranspiration unseres Wiesenmeßfeldes überein, die sich auf dem Umweg über die Ventilationsgröße des 10m-Niveaus für die gleiche Strahlung und die gleichen Wind-, Temperatur- und Feuchte-Bedingungen in 10 m Höhe zu 396 cal/cm^2 Tag ergab. Sicherlich haben Fichten, ebenso wie Kiefern, einen großen Faktor b der Ventilationsverdunstung, während wir gesehen haben, daß beim Grase das Strahlungsglied der Übergangsformel für die Verdunstung ausschlag-

gebend ist. Welches Glied auch entscheidend sei, — da, wie gezeigt wurde (17), die Ventilationsgröße während der Vegetationszeit weitgehend mit dem Strahlungsgenueß der Erdoberfläche parallel geht, — können wir erwarten, daß nicht nur in diesem speziellen Fall die Verdunstung der Fichten mit der des Wiesengrases weitgehend übereinstimmt. Wir gehen deshalb bei der Ermittlung der Waldverdunstung trockener Tage von der des Grases bzw. der Fichten aus. Die Verdunstungsbeträge von Waldbäumen, die man im Handbuch der Pflanzenphysiologie von Ruhland findet, erscheinen, soweit sie aus der Verdunstung einzelner Blätter ermittelt und auf ganze Bestände extrapoliert sind, relativ hoch gegen die Ergebnisse unmittelbarer Messungen. Wir verwenden deshalb, um auf die Verdunstung anderer Bestände zu kommen, nicht die Absolutbeträge, sondern nur die mittels der Blattverdunstung gewonnenen Relativzahlen,

$V_{\text{Fichte}}/V_{\text{Kiefer}}$	1,8
$V_{\text{Fichte}}/V_{\text{Buche}}$	1,1
$V_{\text{Fichte}}/V_{\text{Lärche}}$	0,91

Setzt man die Verdunstung der Kiefernbestände zu 1, so ist nach den Lysimetermessungen von Göhre an jungen Eichen die Verdunstung der Eichenbestände im:

Jan.	0.37	Mai	0.72	Sept.	0.77
Feb.	0.36	Juni	1.63	Okt.	0.51
März	0.76	Juli	1.58	Nov.	0.45
April	0.57	Aug.	1.04	Dez.	0.51

Die Verdunstung einzeln stehender Bäume und Baumreihen ist dagegen mit Sicherheit größer als die des Grases und kommt denjenigen Werten nahe, die aus der Verdunstung einzelner Blätter ermittelt und auf die Laubmasse der Baumkronen extrapoliert worden sind.

7. Zur Ausführung der Berechnung des Landes-Wärmehaushalts

Grundlagen der Berechnung sind nach dem oben Gesagten:

- die Kenntnis der Wärmehaushaltungskomponenten am Quickborner Meßfeld,
- die Kenntnis des Einflusses, den die von Schleswig-Holsteiner Feldern ausgehende Gesamtstrahlung auf ihre Strahlungsbilanz hat,
- die Kenntnis der Verdunstungskennzahlen der am meisten vertretenen Felder.

Sie werden ergänzt durch

- die auf Wetterkarten, 5-Tage- und Monatsübersichten des Wetteramtes Schleswig gegebenen Informationen über Temperaturen, Niederschlagsmengen und Niederschlagszeiten, sowie

durch Karten des Landesplanungsatlas, herausgegeben vom Ministerpräsidenten des Landes gemeinsam mit der Akademie für Raumforschung, aus denen die Flächenteile der verschiedenen Arten landwirtschaftlicher Bodennutzung etc. zu entnehmen waren.

Zunächst hatten wir den Zeitraum zu ermitteln, für den leidlich zuverlässige Werte von Wärmehaushaltungskomponenten angegeben werden können. Die ständige Wandlung von Wolkenfeldern, von Hoch- und Tiefdruckgebieten, sowie deren Zuggeschwindigkeit verursachen räumliche Unterschiede der Strahlungsbilanz und der Ventilationsgröße, durch die eine Extrapolation der Quickborner Ergebnisse erschwert wird. Zur Aufindung eines geeigneten Zeitintervalls haben wir Strahlungssummen verschiedener Zeitspannen verglichen, die mit einem Moll-Gorcinski-Globalstrahlungs-

messer in Quickborn und mit einem Robitzsch-Aktinographen in Schleswig gemessen worden sind. Der Unterschied des Strahlungsgenusses beider Orte ist um so kleiner, je größer der Summierungszeitraum wird. Der mittlere Absolutwert des Unterschieds, bezogen auf die mittlere Globalstrahlung beider Orte ist in Abb. 42 in der ausgezogenen Linie als Funktion des Summierungszeitraumes aufgetragen. Wir können damit rechnen, daß die gleiche Beziehung auch für die Strahlungsbilanz gleicher Bestände gilt, da wir von Fleischer (20) wissen, daß die Strahlungsbilanz in den Monaten der Vegetationszeit der Globalstrahlung proportional ist.

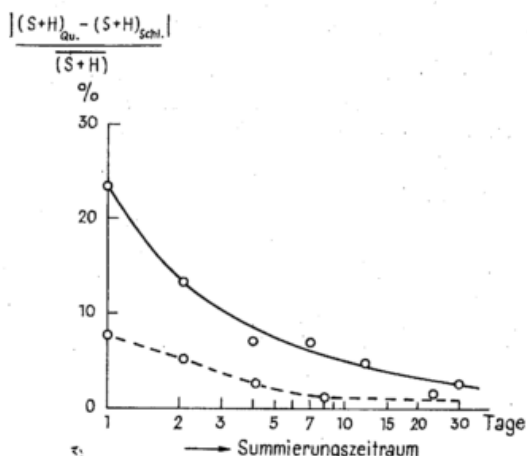


Abb. 42

Mittlerer relativer Unterschied (Absolutwert) des Genusses von Globalstrahlung als Funktion des Summierungszeitraumes für Quickborn und Schleswig als ausgezogene Linie und für Quickborn und Hamburg-Fuhlsbüttel als gestrichelte Linie.

Wir sehen in Abb. 42, daß im allgemeinen 3-Tage-Summen auf 10%, Dekadensummen auf etwa 5% übereinstimmen. Im Abb. 42 haben wir denselben Quotienten noch als punktierte Linie für die voneinander nur 13 km entfernten Meßstellen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn aufgetragen. Hier sinkt der mittlere relative Unterschied der Strahlungssummen bereits nach 3 Tagen unter 5%. Bei dem kleinsten Zeitraum sind die größten vorkommenden Unterschiede etwa 4 mal so groß, bei Dekaden etwa 2.5 mal so groß wie der mittlere Unterschied gewesen. Wir werden uns auf die Ermittlung der Monats-Summen der Wärmehaushaltskomponenten Schleswig-Holsteins beschränken.

In gleicher Weise haben wir die mittleren Ventilationsgrößen $\sum \sqrt{u} (\theta - \theta')$ zweier Klimastationen untersucht, die nicht weit von der nördlichsten und südlichen Grenze Schleswig-Holsteins entfernt sind, nämlich von Fuhlsbüttel und Flensburg. In der Erwartung, daß die Unterschiede zu regenarmen Tages- und Jahreszeiten am größten sind, wählten wir für die Untersuchung die Werte des Klimatermins II aus dem Mai. Mittlere relative Unterschiede der Summen von diesen Ventilationsgrößen aufeinander folgender Tage sind in Abbildung 43 als Funktion der Zahl der zur Summenbildung verwendeten Tage dargestellt. Ein großer Teil der relativen Unterschiede ist durch die grobe Stufung der im Klimabeobachtungsdienst verwendeten Beaufort-Skala zu erklären. Wir haben deshalb in Abbildung 43 durch die gestrichelte Linie angedeutet, welcher Anteil des Unterschieds durch diese Art der Meldung erklärt werden kann. Während der Vegetationszeit trägt die Ventilationsverdunstung, die — wie wir gesehen haben — von $\sum \sqrt{u} (\theta - \theta')$ abhängt, nur circa 33% zur Evapotranspiration bei, so daß der Einfluß der unterschiedlichen Lage beider Orte auf die Güte der Extrapolation unserer Quickborner Verdunstungswerte auf

Flensburg angenähert durch die weitere Ordinaten-Teilung auf der rechten Bildseite gegeben ist. In den Einheiten dieser Teilung ähnelt Abb. 42 der Abb. 43, so daß wir bei den Monatssummen der Verdunstungskomponente V eine Fehlergrenze der Extrapolationsmethode von durchschnittlich $\pm 5\%$ erwarten können. Im Einzelfall traten doppelte bis dreifache Unterschiede auf.

Gemessen an der Ausdehnung der Hoch- und Tiefdruckgebiete ist Schleswig-Holstein nicht groß. Dementsprechend fanden wir mit Hilfe der alle 5 Tage erscheinenden Übersichten des Wetteramtes Schleswig, daß die in Quickborn registrierten Niederschlagsmengen zeitlich und mengenmäßig mit dem Landesdurchschnitt meist gut übereinstimmen, nur im September 1958 war der Mittelwert der Schleswig-Holsteiner Niederschlagsbeobachtungen fast 30 mm größer, im Oktober 11 mm kleiner als auf unserem Meßfeld. Wir konnten demnach wagen, die Ergebnisse der Wärmehaushaltskomponenten des Landes an Niederschlagstagen denen der trockenen Tage gegenüberzustellen, obwohl während des Geophysikalischen Jahres die niederschlagsfreien Perioden selten eine Dauer von 4 Tagen überschritten haben.

Wir hatten auf den Abbildungen 33 und 34 gesehen, daß die Hälfte aller Regentage, nämlich die mit negativer Wasserbilanz ($N-V$) mittlere Verdunstungskennzahlen besitzen, die gleich, mitunter sogar kleiner sind als der Mittelwert von k an den ersten Folgetagen nach Regen. Dies Ergebnis ist verständlich, wenn man die Dauer der Niederschläge betrachtet. Während des IGJ 1958 hat es an 222 Tagen geregnet, d. h. an 61% aller Tage. Niederschläge über 1mm erbrachten 132, d. i. 36% aller Tage. Die Summe der am Tropfenschreiber gemessenen Niederschlagszeiten betrug 793 Stunden. Das sind nur 9% des Jahres. Wir haben deshalb bei der Zuordnung von Verdunstungskennzahlen manche Regentage den Folgetagen zugeordnet. Um die durch die Unvollkommenheit der Benetzungsskala gegebenen Fehlermöglichkeiten weiter einzuengen, haben wir die Landesverdunstung nicht mit Mittelwerten von $(Q-B)$, $\sqrt{u} (\theta - \theta')$ und k berechnet, sondern stets die in Quickborn gemessenen Wärmehaushaltskomponenten mit einem Korrekturfaktor versehen, entsprechend den Quotienten $(Q-B)/(Q-B)_{\text{Quickb.}}$ und $k/k_{\text{Quickb.}}$. Da in den Abbildungen 35 bis 41 der zeitliche Verlauf der Kennzahlen verschiedener Bestände ähnlichen Gang hat, wirkt sich bei diesem Verfahren eine falsche Zuordnung zu den Folgetagen kaum noch aus.

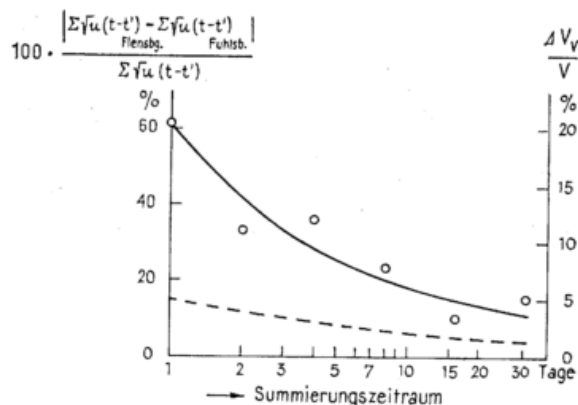


Abb. 43

Relativer Absolutwert der Differenz von Ventilationsgrößen $\sqrt{u} (\theta - \theta')$, die für Flensburg und Hamburg-Fuhlsbüttel am Klimatermin II im Mai herrschten. Gestrichelte Linie: Schwan-
kungsbereich, der wegen der groben Meldung der Wind-
geschwindigkeiten in Beaufort möglich ist.

Nach den erwähnten Karten des Landesplanungsamtes liegen folgende land- und forstwirtschaftlichen Kulturen, Bodenarten und Bodennutzungen im Sommer vor:

Forsten	8%
Dauergrünland	30%
Moore und Öden	6%
Seen und Flüsse	1%
Heide	3%
Baumschulen	3%
Hecken und Gräben	3%
Roggen	13%
Weizen	6%
Hafer	5%
Gerste	3%
Rüben	6%
Ackerwiesen und Weiden	6%
Kartoffeln	4%
Städte, Ortschaften, Gärten, Bahnanlagen, etc.	3%

An die Stelle der genannten Halm- und Feldfrüchte treten mit Ablauf der Vegetationsperioden Äcker, Stopfpfelder und Zwischenfrüchte.

Bei den Rechnungen sind die Schleswig-Holsteiner Inseln der Nord- und Ostsee, sowie die Seen und Flüsse nicht berücksichtigt worden.

Besondere Bedenken sind aufgetreten, ob man für den Landeshaushalt nicht die besonderen Eigenschaften der schweren Lehm Böden im Bereich der Ostseeküste besonders berücksichtigen müsse. Wir haben das unterlassen. In Lentförden/Heidmoor fanden wir während des IGJ eine jährliche Temperaturschwankung in 1 m Tiefe, die mit 13° C um 4° höher war als die unter dem Quickborner Meßfeld beobachtete. Trotzdem sind keine wesentlichen Unterschiede der Wärmehaushaltskomponenten B beider Orte festgestellt worden, weil sich die Temperaturamplituden etwas reziprok zu den mittleren spezifischen Wärmen der Volumeneinheit beider Bodenarten verhalten haben. Für Fragen des Beginns der Vegetation spielt sicherlich die Temperatur selbst eine wesentlich größere Rolle als die mit ihren Wechsel verbundenen Wärmeströme.

Die Korrekturglieder zur Berechnung des Landes-Wärmehaushalts aus den Wärmehaushaltskomponenten des Quickborner Meßfeldes

Die mittlere Strahlungsbilanz der Schleswig-Holsteiner Landesfläche F berechnet sich aus der in Quickborn gemessenen nach der Gleichung [23] zu

$$Q = Q_Q \cdot f(R), \text{ wobei}$$

$f(R) = f(R_1) \cdot f_1/F + f(R_2) \cdot f_2/F + \dots + f(R_n) \cdot f_n/F$, f bedeutet hier „Funktion von . . .“ und f_1, f_2, f_i die von den verschiedenen Kulturen beanspruchte Fläche. Der Index Q bezieht sich auf die am Quickborner Wiesen-Meßfeld gemessene Größe. Aus dem Ansatz

$$V_Q = k_Q \cdot a_{\max}(\vartheta) \cdot \sum (Q - B)_Q + b \cdot k_Q \cdot 60 \sum \sqrt{u}(\vartheta - \vartheta')$$

$$V_i = k_i \cdot a_{\max}(\vartheta) \cdot \sum (Q - B)_i + b \cdot k_i \cdot 60 \sum \sqrt{u}(\vartheta - \vartheta')$$

gewinnt man ein Korrekturglied l_i , das den Unterschied der Wärmehaushaltskomponenten V von Wiesengras und von den durch den Index i gekennzeichneten Beständen bedeutet, indem wir die Gleichung [23] einführen. Den Quotienten $(1-R_i)/(1-R_Q)$ ersetzen wir wieder durch den Ausdruck $f(R)$. Es ist dann

$$l_i = \frac{\left[f(R_i) \cdot \frac{k_i}{k_Q} - 1 \right] + \frac{60 \cdot b \cdot \sum \sqrt{u}(\vartheta - \vartheta')}{a(\vartheta) \cdot (Q - B)} \cdot \left[\frac{k_i}{k_Q} - 1 \right]}{1 + \frac{60 \cdot b \cdot \sum \sqrt{u}(\vartheta - \vartheta')}{a(\vartheta) \cdot (Q - B)} \cdot \frac{1}{k_Q}}$$

Das Korrektionsglied, das zur Umrechnung der Quickborner Wärmehaushaltskomponenten V in den Wärmebedarf der Landesverdunstung, pro Flächeneinheit dient, hat die Form

$$1 = l_1 f_1/F + l_2 f_2/F + \dots + l_n f_n/F$$

Der Quotient $60 \cdot b \cdot \sum \sqrt{u}(\vartheta - \vartheta')/(a(\vartheta) \cdot (Q - B)_a)$ ist identisch mit dem Verhältnis der Ventilationsverdunstung V_v zur strahlungsbedingten Verdunstung $V(Q - B)$, das im Winter zwischen 1 und 2, im Sommer an Regentagen etwas über 0,5, an trockenen Tagen unter 0,5 gelegen hat.

Wir haben die Berechnungen der Wärmehaushaltskomponente V des Landes Schleswig-Holstein nur für die Monate März bis Oktober durchgeführt. Im Winter sind bei Vorhandensein dicker Schneedecken und bei Schneefreiheit und vollständiger Benetzung keine wesentlichen Unterschiede des Landeswärmehaushalts vom Quickborner Wärmehaushalt zu erwarten.

Die Anteilzahlen f_i/F sind nur bei den Wäldern, Baumschulen, Ortschaften und bei Dauergrünland unveränderlich, die übrigen wechseln stark im Laufe des Jahres. Im März ist die Landesfläche bestandsmäßig am wenigsten differenziert, Wiesen, Acker und Wintergetreide nehmen die größten Teile des Landes ein. Leider waren jedoch für den März eingehende Untersuchungen über die unterschiedliche Schneebedeckung und ihre Folgen notwendig.

Unser Meßfeld liegt, dem Winde gut exponiert, in der offenen Flur. Hieran mag es liegen, daß unsere Schneepiegel wesentlich geringere Niederschlagsmengen fester Form (15 mm) erbrachten als der Landesdurchschnitt der Niederschlagsmeßstellen (24 mm). Auch herrschte nach den Beobachtungen der Klimastationen am 1., 2., 8., 9., 10., 11., 12., 13., 14., 15., 16., 17., 18., 21., 22., 29., 30. und 31. März eine geschlossene Schneedecke, während unser Meßfeld und seine nähere Umgebung am 10., 11., 12., 13., 22. und 31. noch oder bereits völlig schneefrei war. Schneewehen an hindernisreicheren Stellen und, wie die gegenüber dem Landesdurchschnitt höheren Quickborner Bodentemperaturen wahrscheinlich machen, eine durch den hohen Stand des Grundwassers und seine große Wärmekapazität verursachte intensive Wärmezufuhr aus dem Boden, sind für diese geringere Schneebedeckung verantwortlich. Diese hat zur Folge, daß die durchschnittliche Albedo unseres Meßfeldes geringer und die Summe der Strahlungsbilanz höher waren als an einer Station, die dem Landesdurchschnitt entspricht.

Bei und nach Neuschnee betrug R_T ca. 0,78, ging aber schon an den Folgetagen beträchtlich zurück. Der Durchschnittswert R_T aller Tage mit Schneebedeckung lag bei 0,35, gegen 0,21 der März Tage ohne Schnee. Lag Schnee, so betrug die durchschnittliche Wärmeabgabe des Bodens 8,2 cal/cm²Tag, ohne Schnee dagegen 14,8 cal/cm²Tag. Die zum Tauen verwendete Schmelzwärme war in Schleswig-Holstein rd. 88 cal/cm² größer als in Quickborn.

Richtwerte für die Verdunstung des Waldes an trockenen Tagen haben wir bereits oben behandelt. Für Tage mit Niederschlag haben wir Verdunstungsbeträge angesetzt, welche die Evapotranspiration der Wiesen um 5—10% übertreffen. Ebenso problematisch wie die $f(k)$ -Werte sind $f(R_T)$ -Werte des Waldes. Für unsere Schätzungen ist allerdings sehr ermutigend, daß die R_T -Werte der Bestände einen geringeren Spielraum haben als ihre Albedo. Für die von uns untersuchten Objekte führt R. Geiger Albedo-Werte zwischen 5 und 30% an, während der kleinste R_T -Wert (bei Acker) 12,5%, der größte (Wiesen, stark bestrahlt) 25,8% betrug. Das liegt an der Tatsache, daß eine stärkere Absorption im sichtbaren Teil des Spektrums zu einer

größeren Wärmestrahlung des Bestandes führt. Trotzdem scheint sich nach unserer Tabelle 5 auch die Farb-
tönung der Bestände in den R_T -Werten noch bemerk-
bar zu machen. Für den März haben wir berücksichtigt,
daß auch der Wald öfters stark bereift und beschneit
war. Für den Mai, in dem vorwiegend die Buchen ihr
Laub entfaltet haben, haben wir R_T zu $\frac{1}{4}R_Q$, für den
Sommer zu $\frac{1}{2}R_Q$ angenommen. Wir glauben damit zu
berücksichtigen, daß sich über den Baumkronen wegen
deren guter Durchlüftung keine besonders stark über-
hitzte Zone ausbilden kann, und daß nahezu 50% des
schleswig-holsteinischen Waldes aus dunklen Nadel-
hölzern besteht. Da nach Geiger auch Moorflächen
relativ kalt bleiben, haben wir für sie die gleichen R_T -
Werte eingesetzt. Den R_T -Wert der Heide schätzten wir
zu 0.19. Durch die Bildung der Quotienten $f(R)$ werden
auch Unsicherheiten, welche aus wechselnder Tönung
der Bestände resultieren, verringert; denn die Richtung

der Farbtonänderung im Laufe eines Jahres ist bei vie-
len Beständen ähnlich wie die des Wiesengrases.

3% des Landes werden von Ortschaften, Bahnen,
Straßen etc. eingenommen. Auch sie enthalten in Gär-
ten und Anlagen Flächen mit merklicher Evapotrans-
piration. Die k -Werte dieses Landesteiles haben wir
deshalb mit abnehmender Benetzung auf Werte absin-
ken lassen, die nur 2% niedriger als die der Äcker sind.
Für R_T wählten wir mit 0.18 einen Wert, der mitten
zwischen denen der Äcker und Wiesen liegt. In Anbe-
tracht des großen Umfangs der Rechnungen beschrän-
ken wir uns darauf, in Tabelle 8 den monatlichen Mit-
telwert der Größe $f(R_T)$ und des Korrektionsgliedes l
Schleswig-Holsteins, die Bestände mit größter und
kleinster Verdunstung, den Unterschied ihrer l -Werte
und den Unterschied der Wärmesumme pro Flächen-
einheit $\Delta \Sigma L$ für Niederschlagstage, wie für trockene
Tage anzuführen.

Tab. 8
Zur Umrechnung der Wärmehaushaltskomponenten des Quickborner
Meßfeldes in mittlere Komponenten Schleswig/Holsteins

Monat	$\overline{f(R_T)}$	$\overline{l}$	Bestand mit max. v Bestand mit min. v	$(l_{\max.} - l_{\min.})$	$\Delta \Sigma L$ cal. · cm. ² Tag
Niederschlagstage					
März (Schneetage)	1.08	0.04	Moor	0.37	4
	1.03	0.01	Wiese		
April	1.08	0.00	Forst Heide	0.16	9
Mai	1.16	0.20	Wintergetreide Wiesen	0.51	26
Juni	1.04	0.04	Moor Acker	0.47	53
Juli	1.05	0.07	Moor Acker	0.37	43
Aug.	1.05	0.05	Rübenfelder Heide	0.33	45
Sept.	1.06	0.03	Forsten Kartoffelfelder	0.38	32
Okt.	1.07	0.01	Moor	0.17	4
Trockene Tage					
März		0.00	Moor Forsten	0.40	17
April		0.06	Moor Forsten	0.76	130
Mai		0.09	Moor Ortschaften	0.71	85
Juni		—0.05	Moor Ortschaften	1.00	269
Juli		—0.15	Moor Haferfeld	0.97	129
Aug.		—0.06	Moor Haferfeld	0.48	72
Sept.		—0.05	Rübenfelder Heide	0.45	86
Okt.		—0.02	Moor Acker	0.24	4

Es ist mißlich, daß die Extreme oft gerade an denjenigen Beständen oder Flächen auftreten, an denen R und k geschätzt werden mußte. Trotzdem wird die Größe des Unterschiedes der Entwicklung atmosphärischer Wärme nach Größe und Jahresgang den wahren Werten nahe kommen. L ist nach der Gleichung

$$\Delta \sum L = \sum (Q-B) \cdot [f(R_1) - f(R_2)] - \sum V \cdot (l_1 - l_2)$$

berechnet worden.

Eine Fehlschätzung der Größen R und k des Waldes um 100% bringt nur eine Änderung der Korrektur l um 2—3 Einheiten der zweiten Dezimale nach dem Komma zuwege.

Die über dem Quickborner Meßfeld gewonnenen Werte der Verdunstungswärme sind, wie aus den Werten von I hervorgeht, denen der Landesverdunstung sehr ähnlich. Die Daten der Wärmeproduktion ΣL können dagegen sehr verschieden sein.

Für rohe Abschätzungen der Wärmehaushaltskomponenten in Zeiten mit normalem Jahresniederschlag kann die folgende Tabelle 20 einen Anhalt bieten:

Tab. 9

Mittlere Wärmehaushaltskomponenten an Regentagen und an trockenen Tagen. cal/cm²Tag.

Monat	Regentage				trockene Tage			
	Q	B	V	L	Q	B	V	L
März	53	—7	43	17	104	0	56	48
April	139	1	84	54	234	11	105	118
Mai	229	14	161	54	308	13	219	76
Juni	165	3	115	45	282	4	198	80
Juli	170	5	135	30	264	18	156	89
Aug.	190	5	139	46	250	11	189	50
Sept.	98	2	94	2	165	—1	136	30
Okt.	49	—4	52	1	52	—13	51	14

Ehe wir die Monatssummen des Wärmehaushalts der Erdoberfläche nennen, sei etwas zum Netto-Energieverbrauch der Photosynthese gesagt. Baumgartner (19) gibt Näherungswerte für den Nettoenergieverbrauch beim Aufbau der Pflanzenmasse an, der tagsüber positiv, nachts negativ ist und über den sich ein Energiegewinn bei der Verrottung pflanzlicher Teile überlagert. Aus Gründen ungenügender Meßgenauigkeit vernachlässigt er diese Energie bei der Auswertung seiner Wärmehaushaltsmessungen. Inzwischen hat E. Inoue (21) stichprobenartige Messungen der Photosynthese ausgeführt. Zwar waren dabei die vertikalen Konzentrationsunterschiede des Kohlendioxyds, auf denen seine Auswertungen beruhen, nur von der Größenordnung von % der mittleren Konzentration, doch scheinen die Energieumsätze durchaus in dem von Baumgartner oder von Rabinowitsch (22) angegebenen Bereich zu liegen. Wenn wir in der folgenden Tabelle Summen von Wärmehaushaltskomponenten anführen, von denen einige die Größenordnung des Netto-Energieverbrauchs der Photosynthese haben, so sehen wir uns genötigt, wenigstens deren Größenordnung anzugeben, obwohl es sich nur um sehr rohe Schätzungen handeln kann. Den Wärmegewinn bei der Verrottung von Pflanzenmasse lassen wir dabei überhaupt außer acht.

Die mittlere Strahlungsbilanz Schleswig-Holsteins ist ca. 6 1/2% größer gewesen als die des Quickborner Meßfeldes. Der Boden des Landes empfing fast ebensoviel Wärme, als er wieder abgegeben hat. Die Verdunstung Schleswig-Holsteins war im Mittel 2—3% größer, die Produktion atmosphärischer Wärme sogar 13 bis 14% größer als die der Quickborner Meßfeld-Wiese.

Im Anhang 6—10 sind noch Zusammenstellungen über die Temperatur und Feuchte und ihre vertikale Schichtung, sowie über die vertikale Verteilung der Windgeschwindigkeit in Quickborn während des Internationalen Geophysikalischen Jahres beigefügt.

Die Arbeit wurde beim Deutschen Wetterdienst am Meteorologischen Observatorium Hamburg ausgeführt. An ihr waren beteiligt: Herr Karl Haß und Herr Hel-

Tab. 10

Monats- und Jahres-Summen der Wärmehaushaltskomponenten des Landes Schleswig-Holstein im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1958 (pro Flächeneinheit (cm²) in cal/cm²)

Monat	Globalstrahlung	Strahlungsbilanz	Gewinn an Bodenwärme/cm ²	latente Wärme der Verdunstung pro cm ²	Gewinn atmosphär. Wärme/cm ²	Schmelzwärme/cm ²	geschätzte photosynth. Wärme/cm ²
I	(1 610	— 510	— 400	370	— 550	70	—)
II	(3 480	— 50	— 120	350	— 520	240	—)
III	6 430	2 020	— 200	1 410	680	130	—
IV	9 510	5 530	150	2 800	2 550	20	10
V	11 500	7 720	430	5 400	1 840	—	50
VI	12 300	6 890	270	4 700	1 870	—	50
VII	10 930	6 020	260	4 330	1 380	—	50
VIII	10 830	6 360	200	4 680	1 430	—	50
IX	8 420	3 930	20	3 420	460	—	30
X	4 040	1 550	— 170	1 620	90	—	10
XI	1 130	260	— 300	530	30	—	—
XII	1 120	— 240	— 220	340	— 420	60	—
Jahr	81 300	39 480	— 80	29 950	8 840	520	250

mut Wagner beim Bau des Wärmestrom-Meßgerätes, Herr Dipl.-Meteorologe Wolfgang Klockow bei der Einrichtung der Meßanlagen, den Messungen und allen Auswertungen, vornehmlich zur Bestimmung der Bodenkomponente des Wärmehaushalts, Herr Alfred Lubbe und Herr Werner Runge bei Auswertungen. Die Arbeit ist wesentlich durch eine Beihilfe unterstützt worden, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft

unter der Nr. Fr 66/1—4 (E. Frankenberger) Kennwort: AGI gegeben worden ist. Ihr gebührt besonderer Dank. Weiter wird Herrn Präsident Dr. Bell sowie Herrn Regierungsdirektor Prof. Dr. Rudolf Schulze, unter deren Leitung die Arbeiten standen, verbindlicher Dank ausgesprochen, ebenso Herrn Prof. Dr. Köhnlein, Direktor des Instituts für Futterbau, dem die Lentföhrdener Versuchsfelder zugehören.

Literatur

- (1) Bernard, E. A.: Le déterminisme de l'évaporation dans la nature. Publ. Inst. Nat. Ét. Agron. Congo Belge (I. N. É. A. C.) Ser. Sci. No 68 (1956)
- (2) Pasquill, F.: Eddy diffusion of water vapor and heat near the ground. Proc. Roy. Soc. London **198**, 106—140 (1949)
- (3) Suomi, V. E. and Tanner, C. B.: Evaporation estimates from heat budget measurements, Trans. Amer. Geophys. Un. **39**, 298—304 (1958)
- (4) Trénel, M.: Über Kondensationsvorgänge im Boden. Sitz.-Ber. Dt. Akad. Landwirtsch.-Wiss. Berlin **4**, H. 14 (1955)
- (5) Lettau, H.: Atmosphärische Turbulenz. Leipzig 1939, S. 225
- (6) Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 1950, S. 27
- (7) Paeschke, W.: Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeits- und Stabilitätsproblem in der bodennahen Luftschicht. Beitr. Phys. fr. Atm. **24**, 163—189 (1938)
- (8) Priestley, C. H. B. and Swinbank, W. C.: Vertical transport of heat by turbulence in the atmosphere. Proc. Roy. Soc. London A **189**, 543—561 (1947)
- (9) Frankenberger, E.: Ein Meßgerät für vertikale atmosphärische Wärmeströme. Techn. Mitt. Instrumentenwesen Dt. Wetterd. N. F. Nr. 4, 21—28 (1958)
- (10) Simmons, siehe Kleinschmidt, E.: Handbuch der meteorologischen Instrumente. Berlin 1935, S. 392
- (11) Schmitz, H. P.: Das Gleichungssystem für Wasserdampf und Wärmeinhalt. Z. Meteor. **8**, 352—369 (1954)
- (12) Rudloff, W. u. Frankenberger, E.: Windmessungen an den Quickborner Funkmasten 1947/48. MANWD Hamburg 1949
- (13) Deacon, E. L.: Turbulent transfer of momentum in the lowest layers of the atmosphere. Techn. Pap. Div. Meteor. Phys. Commonwealth Sci. Industr. Res. Org., Australia No 4 (1955)
- (14) Wippermann, F.: Über die Ermittlung der kinetischen Energie turbulenter Strömungen bei Verwendung gewichteter Mittelwerte. T. H. Darmstadt Meteor. Inst. (noch nicht veröffentlicht)
- (15) Frankenberger, E.: Über Strahlung und Verdunstung. Ann. Meteor. **7**, 47—52 (1955/56)
- (16) Hofmann, G.: Verdunstung und Tau als Glieder des Wärmehaushalts. Planta **47**, 303—322 (1956)
- (17) Kortüm, F.: Ein Beitrag zur Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. Wiss. Z. Univ. Berlin Math.-Naturwiss. R. **6**, 433—437 (1956/57)
- (18) Michalowsky, J.: Strahlungsbilanz und Landesverdunstung. Ann. Meteor. **8**, 7—10 (1957)
- (19) Göhre, K.: Lysimeterversuche über den Wasserhaushalt von unbewachsenen und mit jungen Eichen bewachsenen Böden. Arch. Forstwesen **3**, 645—674 (1954)
- (20) Baumgartner, A.: Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Ber. Dt. Wetterd. Nr. 28 (1956)
- (21) Fleischer, R.: Registrierung der Infrarotstrahlungsströme der Atmosphäre und des Erdbodens. Ann. Meteor. **8**, 115—122 (1957)
- (22) Inoue, E.: An aerodynamic measurement of photosynthesis over a paddy field. Proc. 7th Japan Nat. Congr. Appl. Mech. **2**, 211—214 (1957)
- (23) Rabinowitsch, E. L.: Photosynthesis and related processes. Vol. II Pt. 1. New York 1951, S. 1003—1008, zit. bei (1)
- (24) Hollmann, G.: Der mikroturbulente Vertikalaustausch von Masse und Wärme, ein Beitrag zur Lösung des Wärmeaustausch-Paradoxons von W. Schmidt. Beitr. Phys. Atm. **32**, 161—194 (1960)

Wärmehaushaltsdaten

Quickborn, 26.9.1958

WOZ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
u ₇₀	9.2	7.5	7.3	8.0	8.8	9.8	8.5	8.5	7.5	6.2	7.9	8.6	8.8	7.7	8.7	9.0	7.8	7.4	7.3	7.2	7.1	7.0	7.0	6.3	m/sec
u ₂₈	7.1	5.7	5.6	5.7	6.4	7.2	6.3	6.5	5.9	5.3	7.1	8.0	8.0	7.1	7.9	7.9	7.1	5.9	5.4	5.8	5.7	5.7	5.1	4.6	m/sec
u ₁₀	5.4	4.4	4.2	4.5	5.0	5.7	4.5	5.0	4.7	4.3	5.9	6.8	6.6	5.9	6.9	6.7	5.8	4.8	4.0	4.4	4.0	4.3	3.8	3.1	m/sec
u ₂	3.9	3.4	3.2	3.5	4.1	4.6	3.7	3.9	3.7	3.4	4.4	4.9	4.5	4.0	5.1	4.8	4.2	3.1	2.6	2.9	2.3	2.4	2.3	1.7	m/sec
DD	24	24	23	22	22	22	22	22	22	22	25	26	27	26	26	27	27	26	26	26	28	29	30	29	
(δ ₂ - δ ₃) · √u	22	26	25	24	22	24	19	18	29	37	44	73	70	56	64	68	62	44	31	29	21	20	23	21	
δ ₇₀ - δ ₂₈ NP +4.55	-0.10	0.00	-0.12	-0.20	-0.28	-0.22	-0.18	-0.30	-0.40	-0.30	-0.40	-0.52	-0.50	-0.40	-0.40	-0.50	-0.40	-0.20	+0.08	-0.20	-0.10	-0.20	-0.10	0.00	C°
δ ₇₀ - δ ₁₃ " +2.15	+0.40	0.00	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.35	-0.35	-0.50	-0.60	-0.60	-0.70	-0.70	-0.50	-0.70	-0.70	-0.55	-0.20	+0.12	-0.20	+0.02	-0.20	-0.10	+0.10	C°
δ ₁₃ - δ ₂ " -2.30	0.00	+0.10	+0.10	+0.02	+0.01	+0.01	+0.10	-0.10	-0.40	-0.42	-0.30	-0.50	-0.22	-0.20	-0.40	-0.50	0.00	+0.50	+0.60	+0.30	+0.40	+0.10	+0.10	+0.20	C°
δ ₇₀ - δ ₂₈ " +5.30	-0.21	-0.20	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.28	-0.23	-0.30	-0.30	-0.35	-0.40	-0.50	-0.40	-0.30	-0.45	-0.40	-0.30	-0.10	-0.20	-0.09	-0.20	-0.18	-0.10	C°
δ ₇₀ - δ ₁₃ " +3.00	-0.30	-0.20	-0.30	-0.39	-0.30	-0.30	-0.28	-0.30	-0.49	-0.51	-0.30	-0.45	-0.49	-0.43	-0.28	-0.30	-0.33	-0.22	-0.10	-0.26	-0.08	-0.25	-0.20	-0.09	C°
δ ₁₃ - δ ₂ " -1.88	-0.05	-0.10	-0.10	-0.10	-0.08	-0.08	+0.08	-0.10	-0.40	-0.48	-0.60	-0.80	-0.70	-0.52	-0.70	-0.62	-0.40	+0.03	+0.20	+0.02	+0.23	0.00	+0.02	+0.10	C°
dE/dδ +0.5	1.16	1.14	1.14	1.13	1.11	1.09	1.09	1.12	1.14	1.20	1.22	1.21	1.21	1.21	1.24	1.24	1.24	1.21	1.18	1.18	1.16	1.16	1.13	1.13	Torr/C°
e ₇₀ - e ₂₈	-0.19	-0.23	-0.28	-0.24	-0.19	-0.22	-0.22	-0.11	-0.14	-0.21	-0.23	-0.23	-0.36	-0.29	-0.12	-0.31	-0.30	-0.26	-0.16	-0.14	-0.05	-0.13	-0.16	-0.11	Torr
e ₂₈ - e ₁₃	-0.55	-0.23	-0.19	-0.20	-0.18	-0.18	-0.16	-0.17	-0.31	-0.31	-0.31	-0.07	-0.20	-0.25	-0.27	0.00	-0.02	-0.13	-0.17	-0.18	-0.21	-0.10	-0.19	-0.15	Torr
e ₁₃ - e ₂	-0.06	-0.16	-0.16	-0.12	-0.09	-0.09	+0.04	-0.06	-0.26	-0.37	-0.59	-0.62	-0.74	-0.53	-0.67	-0.52	-0.50	-0.21	-0.06	-0.13	+0.07	-0.05	-0.03	+0.01	Torr
δ ₂	12.0	11.9	11.9	11.4	10.6	10.3	10.1	10.8	12.0	14.0	14.6	15.5	15.4	15.0	15.8	16.1	15.9	14.6	13.4	13.2	12.5	12.3	12.5	11.8	C°
δ ₂	10.9	10.5	10.5	10.1	9.5	9.2	9.1	9.9	10.5	12.0	12.5	12.2	12.1	12.2	13.0	13.0	12.9	12.1	11.5	11.5	11.1	11.0	11.0	10.2	C°
e ₂	9.2	8.8	8.8	8.6	8.4	8.2	8.2	8.7	8.8	9.5	9.8	9.0	8.9	9.3	9.0	9.7	9.7	9.3	9.2	9.3	9.2	9.2	9.1	8.5	Torr
L/V	-0.90	-0.64	-0.64	-0.53	-0.62	-0.67	+2.57	-0.08	+0.55	+0.41	+0.16	+0.31	+0.07	+0.08	+0.21	+0.37	-0.11	-1.42	-5.80	-1.55	+3.57	-2.06	-3.43	+1.52	
δ _{B2}								11.5						12.5		13.1									
δ _{B5}								11.7						12.2		12.8									
δ _{B10}								12.2						12.5		12.8									
δ _{B20}								12.5						12.4		12.6									
δ _{B50}								12.9						12.9		12.9									
δ _{B100}								12.8						12.8		12.8									
$\frac{35}{d} \frac{d\delta_B}{dz} \cdot 10^3$	-14	-22	-14	-22	-22	-24	-18	-16	-30	52	42	40	14	22	80	40	0	-30	-14	0	-22	2	-18	-14	C°/h
$(\frac{d\delta_B}{dz})_{35} \cdot 10^3$	-16	-16	-16	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-16	-16	-14	-14	-12	-12	-10	-10	-10	-8	-8	-8	C°/h
B ₈	-6	-10	-6	-10	-10	-11	-8	7	13	23	18	18	6	10	35	18	0	-13	-6	0	-10	1	-8	-6	
B _λ	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	
B	-8	-12	-8	-13	-13	-14	-11	4	10	20	15	15	4	8	33	16	-2	-15	-8	-1	-11	0	-9	-7	
Q-B	-6	1	-13	6	2	0	-3	94	195	230	225	401	249	235	305	245	133	-17	-41	-27	-67	-32	-37	-25	
Bilanz Q	-14	-11	-21	-7	-11	-14	-14	98	205	250	240	416	253	243	338	261	131	-32	-49	-28	-78	-32	-46	-32	
V	9	25	9	21	20	22	7	102	126	163	194	307	232	217	252	179	150	42	9	49	-15	30	15	-10	
L	-15	-24	-22	-15	-18	-22	-10	-8	69	67	31	94	17	18	53	66	-17	-59	-50	-76	-52	-62	-52	-15	
N in 1 m Höhe								18.0																	mm
N am Boden								20.0																	mm

λ, ρ, c

Bewölkung

Regenzeiten

$\lambda = 0.0025 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec}} \cdot \text{C}^{-1}$

8 as, cu

00-01.00, ☉ 01.20-05.50, ☉ 07.20-08.20, ☾ 13.05-13.15

$B_S = 440 \cdot \int_{35}^{\lambda} d\delta_B / dt \cdot dz$

8 cu

3 sc, cu

$B_\lambda = 150 \cdot d\delta_B / dz \text{ (mcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$

$$\lambda = 0.0025 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec}} \cdot \text{C}^{-1}$$

8 as, cu

3 sc, cu

$$B_g = 440 \cdot \int_{35}^0 d\delta_B / dt \cdot dz$$

$$B_\lambda = 150 \cdot d\delta_B / dz \text{ (mcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$$

λ, g, c

Bewölkung

Regenzeiten

● 00-01.00, ● 01.20-05.50, ● 07.20-08.20, ♀ 13.05-13.15

Wärmehaushaltskomponenten der Erdoberfläche

am Quickborner Wiesen-Messfeld 1957/58
Tages-Summen in cal/cm²

Q = Strahlungsbilanz
B = Dichte des Wärmestroms, der in den Boden geht
V = Wärmeaufwand pro Zeit- und Flächeneinheit der Evapotranspiration
L = Dichte des atmosphärischen Wärmestroms

Juli 1957					August 1957					September 1957					Oktober 1957				
Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L
1	369	40	267	62	1	199	14	129	56	1	129	8	94	27	1	36	-24	17	43
2	447	7	269	171	2	257	12	194	51	2	70	13	62	-5	2	35	-7	30	12
3	393	22	270	101	3	141	16	98	27	3	261	4	141	56	3	73	-5	101	-23
4	342	20	59	63	4	174	11	119	44	4	190	4	120	66	4	92	-6	89	9
5	382	9	309	64	5	334	5	237	92	5	94	0	104	-10	5	5	5	25	-25
6	403	17	302	84	6	240	32	212	-4	6	182	8	144	30	6	60	16	52	-8
7	334	30	275	29	7	189	20	142	27	7	172	30	134	8	7	72	-8	58	22
8	362	6	280	76	8	225	11	179	35	8	68	7	69	-8	8	61	3	55	3
9	163	5	143	15	9	136	14	119	3	9	113	-1	101	13	9	69	-16	61	24
10	205	8	127	70	10	174	19	162	-7	10	159	6	160	-7	10	28	-4	20	12
11	281	1	152	129	11	257	3	226	28	11	14	-2	47	-31	11	66	11	46	9
12	369	24	297	48	12	170	4	158	8	12	32	-22	99	-45	12	109	-12	108	13
13	367	7	274	86	13	148	29	101	18	13	147	-11	162	-4	13	83	-14	85	12
14	207	2	165	40	14	257	39	221	-3	14	44	-3	71	-24	14	35	-2	37	0
15	149	-2	134	17	15	122	17	110	-5	15	92	-8	123	-23	15	53	-18	54	17
16	276	9	200	67	16	222	10	153	59	16	124	-3	99	28	16	32	2	40	-10
17	366	10	249	107	17	115	5	69	41	17	98	0	78	21	17	68	1	99	-32
18	290	13	220	57	18	223	10	150	63	18	165	4	111	50	18	17	15	45	-43
19	263	18	202	43	19	193	11	147	35	19	127	4	117	6	19	31	-13	78	-34
20	144	10	129	5	20	33	13	15	5	20	136	-9	129	16	20	37	-20	66	-9
21	207	10	152	45	21	128	-1	126	3	21	91	-8	104	-5	21	8	-5	38	-25
22	107	12	92	3	22	240	6	174	60	22	21	15	18	-12	22	4	-20	42	-18
23	155	10	114	31	23	174	14	136	24	23	38	3	38	-3	23	24	-13	33	4
24	255	-1	205	51	24	122	1	138	-17	24	135	-32	131	36	24	58	-12	68	2
25	177	-2	137	42	25	131	-3	132	2	25	128	-28	118	38	25	10	9	8	-7
26	72	10	66	-4	26	187	10	168	9	26	79	-22	76	25	26	25	5	17	3
27	223	11	150	62	27	157	12	120	25	27	12	12	32	-32	27	12	-2	24	-10
28	283	9	205	69	28	120	2	90	28	28	105	-1	88	18	28	32	0	19	13
29	204	26	136	42	29	191	6	154	31	29	83	-19	59	43	29	11	2	9	0
30	138	9	120	9	30	113	4	87	22	30	91	-25	65	51	30	15	6	9	0
31	293	10	205	78	31	107	-12	105	14						31	16	3	16	-3
Σ	8226	360	6105	1761	Σ	5479	334	4371	774	Σ	3146	-77	2894	323	Σ	1277	-123	1449	-49

Anhang 3 (Fortsetzung)

November 1957					Dezember 1957					Januar 1958						Februar 1958					
Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	G	Tag	Q	B	V	L	G
1	7	-28	91	-56	1	7	-19	31	-5	1	-14	-13	4	-5	-	1	22	-11	13	14	6
2	-3	-22	61	-42	2	9	8	5	-4	2	-37	-40	4	-3	-	2	4	4	4	-5	1
3	4	-16	83	-63	3	-17	-10	3	-10	3	-48	-32	3	-6	-13	3	2	-4	44	-38	-
4	-18	-1	88	-105	4	9	2	10	-3	4	-46	-25	1	-2	-20	4	-2	5	21	-28	-
5	-5	-5	75	-75	5	-5	-6	9	-8	5	4	-20	23	-8	9	5	-6	9	22	-37	-
6	23	-9	23	9	6	3	-14	21	-4	6	-4	-24	14	-40	46	6	-26	-22	21	-24	-
7	-8	-19	11	0	7	-12	-19	9	-2	7	-16	-11	13	-34	16	7	-29	-8	0	-12	-9
8	20	-22	48	-6	8	-12	19	4	-35	8	-12	-15	2	0	1	8	-11	-12	12	-37	26
9	7	-6	24	-11	9	-47	-45	15	-17	9	9	17	23	-62	31	9	29	-7	84	-62	14
10	20	-1	31	-10	10	-37	-40	9	-6	10	-16	-9	27	-34	-	10	-13	27	-3	-47	10
11	10	-5	38	-23	11	-32	-29	21	-24	11	5	4	30	-29	-	11	18	21	23	-26	-
12	15	-9	30	-6	12	0	-15	25	-10	12	-22	-9	11	-24	-	12	26	19	44	-37	-
13	16	-24	44	-4	13	(3	-11	29	-25)	13	0	-21	20	1	-	13	41	-12	33	20	-
14	33	-30	56	7	14	-15	-16	30	-29	14	2	-4	8	-2	-	14	22	33	43	-54	-
15	4	-12	10	6	15	-50	-25	-1	-24	15	10	-6	14	2	-	15	-3	13	2	-18	-
16	11	-9	21	-1	16	-77	-31	-5	-41	16	10	11	7	-8	-	16	28	-12	45	-5	-
17	10	-9	14	6	17	-21	-30	10	-1	17	-9	4	15	-28	-	17	21	-33	71	-17	-
18	10	-21	22	10	18	-8	-20	19	-7	18	-23	-10	36	-48	-	18	40	-21	41	17	3
19	5	-17	32	-10	19	-4	-15	27	-16	19	-38	-25	22	-35	-	19	3	-25	16	0	12
20	-20	-26	24	-18	20	11	5	51	-45	20	-37	-22	4	-19	-	20	-16	-11	2	-31	24
21	-21	-31	15	-5	21	-30	10	10	-50	21	-17	-17	12	-21	9	21	-7	-15	7	-5	6
22	1	-13	6	8	22	-20	2	19	-41	22	-34	-15	4	-30	7	22	-8	-17	18	-12	3
23	-22	-6	18	-34	23	3	-10	46	-33	23	-25	-11	4	-15	-3	23	-28	-18	5	-12	-3
24	1	7	3	-9	24	3	-6	32	-23	24	-48	-15	-5	-17	-11	24	7	-16	29	11	-17
25	10	15	6	-11	25	-8	-5	17	-20	25	-20	-17	2	-13	8	25	-18	-13	5	-3	-7
26	3	2	22	-21	26	5	2	15	-12	26	-53	-16	15	-25	-29	26	(-8	-11	12	-3	(-6)
27	8	10	15	-17	27	5	4	11	-10	27	17	-12	18	-10	21	27	(-20	-13	2	-6	(-3)
28	-10	3	9	-22	28	-31	-3	4	-32	28	-47	-14	5	-18	-6	28	(-22	-12	4	-11	(-3)
29	-47	-49	27	-25	29	-23	-9	25	-39	29	(-46	-16	-4	-20	(-6)						
30	-15	-48	18	15	30	-26	-16	12	-22	30	21	-11	15	-3	20						
					31	-47	-21	-7	-19	31	23	-10	17	8	8						
Σ	49	-401	963	-513	Σ	-474	-363	506	-617	Σ	-511	-401	364	-548	74	Σ	46	-162	620	-468	57

März 1958						April 1958					Mai 1958					Juni 1958				
Tag	Q	B	V	L	G	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L
1	2	-9	8	1	2	1	207	-10	147	70	1	208	17	141	50	1	344	19	242	83
2	26	-6	29	-10	13	2	73	-1	47	27	2	279	21	110	148	2	380	26	294	60
3	86	-6	47	11	33	3	193	9	105	79	3	139	-4	106	37	3	133	9	95	29
4	19	-8	17	1	9	4	82	5	51	26	4	230	-1	139	93	4	298	12	175	111
5	19	26	3	-15	5	5	127	8	72	47	5	279	29	144	99	5	107	-15	91	31
6	41	-16	54	7	-4	6	79	-5	70	14	6	56	21	46	-11	6	258	-3	224	37
7	12	-11	44	-8	-13	7	134	-2	80	56	7	331	6	212	113	7	363	17	272	74
8	19	-12	23	8	-	8	111	-2	53	60	8	180	28	121	31	8	187	9	141	37
9	51	-6	44	13	-	9	168	-3	85	86	9	260	32	178	51	9	43	-12	59	-4
10	26	-16	22	20	-	10	183	-3	88	98	10	189	20	121	48	10	249	10	166	73
11	65	-14	39	44	-4	11	226	-3	90	139	11	164	9	123	32	11	250	14	162	74
12	28	-10	27	19	-8	12	285	-4	171	118	12	221	2	184	35	12	150	-6	100	56
13	86	-11	76	21	0	13	273	4	88	181	13	212	6	151	55	13	312	-2	170	144
14	109	-10	66	56	-3	14	270	10	137	123	14	192	18	140	34	14	354	5	236	113
15	119	-6	82	42	1	15	250	15	99	136	15	90	8	55	27	15	374	25	304	45
16	81	-7	53	37	-2	16	159	-1	75	85	16	66	4	56	6	16	300	25	227	48
17	87	-8	50	46	-1	17	117	-3	65	55	17	248	-5	153	100	17	284	31	210	43
18	45	-8	40	15	-2	18	207	11	73	123	18	199	10	141	48	18	125	-9	97	37
19	80	-9	44	47	-2	19	46	15	28	3	19	244	21	164	59	19	180	3	113	64
20	51	-5	26	32	-2	20	140	19	82	39	20	300	28	202	70	20	84	12	59	13
21	109	-6	64	47	4	21	234	10	92	132	21	118	-12	109	21	21	104	9	65	30
22	130	-10	102	38	-	22	174	-3	115	62	22	238	0	195	43	22	138	-6	87	57
23	82	-7	60	29	-	23	176	5	108	63	23	320	22	243	56	23	185	12	128	45
24	53	-6	40	15	4	24	274	11	136	127	24	301	32	208	61	24	264	16	154	94
25	163	0	76	69	19	25	204	14	122	68	25	198	26	142	30	25	229	5	147	77
26	52	3	57	-9	1	26	54	-9	78	-15	26	177	-1	148	30	26	124	7	107	10
27	76	8	61	7	-	27	106	-2	61	47	27	235	7	154	75	27	284	24	208	52
28	107	6	42	59	-	28	119	-4	75	48	28	86	-3	72	17	28	361	22	263	76
29	21	-13	39	-5	-	29	223	22	100	101	29	271	11	205	55	29	89	9	64	16
30	102	-8	77	37	-4	30	308	31	131	146	30	298	3	274	21	30	85	8	50	27
31	209	-14	90	135	-2						31	342	17	213	112					
Σ	2156	-199	1502	808	45	Σ	5202	134	2724	2344	Σ	6669	372	4650	1647	Σ	6638	276	4710	1652

Anhang 3 (Fortsetzung)

Juli 1958					August 1958					September 1958					Oktober 1958				
Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L
1	158	14	133	11	1	296	25	203	68	1	207	5	177	25	1	72	5	64	3
2	365	17	304	44	2	241	-7	227	21	2	204	-1	180	25	2	103	-1	83	21
3	106	2	94	10	3	270	-2	190	82	3	207	0	176	31	3	105	-8	83	30
4	169	24	100	45	4	178	8	136	34	4	203	-8	162	49	4	68	1	91	-24
5	215	23	121	71	5	87	12	63	12	5	203	-10	152	61	5	48	-5	61	-8
6	69	-6	65	10	6	138	2	105	31	6	200	-4	184	20	6	59	-6	68	-3
7	139	7	109	33	7	175	-1	123	53	7	159	9	128	22	7	94	-16	109	1
8	138	8	97	33	8	214	7	145	62	8	138	-1	120	19	8	103	7	94	2
9	178	18	111	49	9	205	6	132	67	9	51	-1	55	-3	9	22	11	16	-5
10	304	21	195	88	10	263	15	200	48	10	135	3	93	38	10	25	15	20	-10
11	316	21	165	130	11	237	18	170	49	11	91	-2	107	-14	11	69	-14	90	-7
12	235	26	157	52	12	131	5	102	24	12	192	-2	153	41	12	3	-18	25	-4
13	131	3	128	0	13	141	7	93	41	13	166	-8	154	20	13	50	-12	60	2
14	172	-12	176	8	14	137	3	117	17	14	162	2	145	15	14	60	5	48	7
15	292	24	213	55	15	280	13	189	78	15	113	9	96	8	15	50	-13	98	-35
16	84	6	78	0	16	222	8	172	42	16	64	7	47	10	16	6	-29	44	-9
17	176	-11	171	16	17	229	-2	161	70	17	75	-5	78	2	17	23	-11	35	-1
18	257	-1	192	66	18	299	6	261	32	18	67	-7	67	7	18	60	-25	73	12
19	285	18	181	86	19	146	11	147	-12	19	129	1	99	29	19	53	-5	46	12
20	255	16	199	40	20	131	10	101	20	20	54	-1	62	-7	20	39	3	42	-6
21	26	-14	64	-24	21	156	4	104	48	21	130	2	118	10	21	71	-9	45	35
22	136	3	110	23	22	92	1	65	26	22	113	-2	96	19	22	57	-5	49	13
23	147	-9	126	30	23	152	1	112	39	23	87	-9	83	13	23	95	18	64	13
24	160	6	126	28	24	108	-6	82	32	24	24	-1	71	-46	24	4	6	15	-17
25	258	3	167	88	25	189	-2	123	68	25	53	-7	114	-54	25	5	-2	28	-21
26	116	2	101	13	26	213	2	145	66	26	123	3	126	-6	26	32	2	36	-6
27	108	12	63	33	27	208	6	119	83	27	100	-11	94	17	27	11	-7	25	-7
28	69	14	55	0	28	228	10	202	16	28	108	-12	111	9	28	28	-7	34	1
29	175	8	117	50	29	215	10	208	-3	29	78	-5	87	-4	29	4	-19	21	2
30	249	9	184	56	30	214	9	194	11	30	82	13	86	-17	30	-3	-25	24	-2
31	231	2	155	74	31	236	10	198	28	31					31	28	-3	35	-4
Σ	5719	243	4257	1219	Σ	6031	189	4589	1253	Σ	3718	-42	3421	339	Σ	1444	-166	1626	-16

November 1958					Dezember 1958					
Tag	Q	B	V	L	Tag	Q	B	V	L	G
1	22	-14	44	-8	1	-48	-34	12	-26	
2	7	-15	36	-14	2	-2	-13	8	-1	4
3	7	-17	26	-2	3	9	-11	4	3	13
4	37	-17	25	29	4	10	15	11	-16	
5	8	-5	6	7	5	-49	-13	18	-54	
6	20	-7	22	5	6	-50	-24	6	-32	
7	13	-13	18	8	7	(-1	-6	6	-3	2)
8	-5	-6	6	-5	8	-7	-17	34	-24	
9	6	-16	38	-16	9	(-16	-10	21	-27)	
10	11	-16	27	0	10	-14	-11	-2	-5	
11	-2	-19	13	4	11	3	-11	8	1	5
12	0	-18	12	6	12	4	-21	31	-1	-5
13	11	11	5	-5	13	-1	-10	0	-20	29
14	12	6	5	1	14	15	2	7	-3	9
15	19	6	7	6	15	-7	-6	7	-12	4
16	30	-2	19	13	16	3	8	11	-17	1
17	-16	-11	0	-5	17	2	8	5	-11	
18	6	-8	24	-10	18	5	-1	15	-9	
19	13	-19	31	1	19	-12	-5	20	-27	
20	5	-15	13	7	20	-17	-1	11	-27	
21	4	-16	13	7	21	-12	-2	12	-22	
22	26	-5	15	16	22	-17	-7	0	-10	
23	19	-4	23	0	23	15	0	13	2	
24	-4	-15	12	-1	24	8	-5	8	5	
25	7	-15	18	4	25	1	-10	7	4	
26	11	12	4	-5	26	-1	-16	19	-4	
27	4	-8	16	-4	27	5	-8	11	2	
28	6	-12	18	0	28	4	-6	13	-3	
29	-4	-25	23	-2	29	-31	-2	10	-39	
30	-8	-15	12	-5	30	-34	-9	-1	-24	
					31	0	3	19	-22	
Σ	265	-298	531	32	Σ	-235	-223	348	-422	62

Wärmehaushaltskomponenten der Erdoberfläche

am Quickborner Wiesen-Mesfeld 1957/58
Stündliche Mittelwerte in $\text{mcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$

Q = Strahlungsbilanz
B = Dichte des Wärmestroms, der in den Boden geht
V = Wärmeeintrag pro Zeit- und Flächeneinheit der Evapotranspiration
L = Dichte des atmosphärischen Wärmestroms

WOZ	Juli 1957				WOZ	August 1957				WOZ	September 1957				WOZ	Oktober 1957			
	Q	B	V	L		Q	B	V	L		Q	B	V	L		Q	B	V	L
0	-31	-16	4	-18	0	-32	-13	2	-21	0	-30	-17	4	-16	0	-32	-17	-10	-14
1	-29	-22	3	-11	1	-26	-15	3	-14	1	-29	-17	2	-13	1	-31	-14	-10	-17
2	-23	-22	8	-9	2	-26	-15	2	-13	2	-26	-14	4	-16	2	-29	-11	-4	-17
3	-23	-17	1	-6	3	-22	-12	7	-11	3	-27	-14	4	-17	3	-25	-10	5	-16
4	-11	-12	6	-4	4	-22	-11	2	-13	4	-28	-13	-1	-13	4	-21	-6	-2	-14
5	44	10	35	-2	5	-7	-6	9	-10	5	-22	-13	2	-9	5	-24	-6	-3	-15
6	130	17	104	9	6	62	6	45	11	6	2	-9	15	-4	6	-19	-5	3	-14
7	229	30	155	44	7	148	10	106	33	7	62	10	35	16	7	10	5	5	0
8	296	51	158	86	8	206	25	134	44	8	137	24	95	18	8	63	16	28	19
9	397	55	234	107	9	275	24	192	58	9	216	28	143	45	9	120	17	78	24
10	495	64	295	137	10	334	32	227	75	10	261	23	183	56	10	162	19	108	35
11	523	62	320	144	11	346	37	221	89	11	297	19	220	58	11	190	17	125	48
12	559	59	354	149	12	386	45	237	104	12	285	19	209	57	12	192	14	126	51
13	512	48	333	135	13	391	35	262	94	13	285	20	213	53	13	170	11	125	34
14	510	29	356	127	14	353	32	251	70	14	243	15	186	41	14	124	8	111	5
15	402	15	301	85	15	307	25	234	52	15	187	11	155	22	15	69	2	77	-10
16	244	-1	219	26	16	246	19	205	22	16	99	1	103	-5	16	2	-5	22	-15
17	168	-17	173	12	17	142	8	140	-7	17	17	-14	45	-15	17	-27	-18	3	-13
18	92	-20	121	-9	18	42	-2	64	-20	18	-29	-21	9	-18	18	-37	-20	-3	-14
19	7	-31	71	-33	19	-8	-15	12	-24	19	-40	-23	5	-21	19	-37	-18	-1	-17
20	-30	-40	19	10	20	-32	-15	6	-23	20	-36	-21	-1	-13	20	-39	-18	-3	-17
21	-32	-34	4	-1	21	-31	-12	4	-24	21	-29	-22	1	-8	21	-31	-15	-2	-14
22	-27	-29	9	-8	22	-33	-12	7	-28	22	-26	-17	-1	-8	22	-32	-16	0	-16
23	-25	-24	2	-3	23	-32	-13	6	-26	23	-27	-19	1	-9	23	-31	-17	3	-17
24					24					24					24				

Anhang 4 (Fortsetzung)

WOZ	November 1957				WOZ	Dezember 1957				WOZ	Januar 1958				WOZ	Februar 1958			
	Q	B	V	L		Q	B	V	L		Q	B	V	L		Q	B	V	L
0	-18	-14	10	-13	0	-25	-13	5	-17	0	-32	-11	5	-21	0	-43	-7	-9	-26
1	-19	-13	8	-14	1	-24	-11	3	-16	1	-32	-12	5	-21	1	-39	-8	-9	-24
2	-24	-13	8	-18	2	-21	-10	5	-16	2	-31	-12	5	-18	2	-40	-8	-9	-25
3	-26	-13	5	-18	3	-21	-11	7	-17	3	-30	-12	5	-19	3	-48	-8	-9	-28
4	-25	-12	6	-18	4	-18	-8	3	-16	4	-31	-13	5	-19	4	-46	-9	-9	-23
5	-23	-12	5	-16	5	-18	-7	5	-17	5	-34	-12	2	-20	5	-46	-9	-9	-22
6	-24	-12	5	-17	6	-20	-7	6	-18	6	-35	-13	3	-20	6	-47	-9	-7	-24
7	-24	-11	7	-19	7	-19	-5	5	-22	7	-33	-12	1	-17	7	-29	-8	3	-20
8	-3	5	16	-15	8	10	-7	8	-20	8	-17	8	8	-12	8	11	-7	19	1
9	38	0	41	-4	9	34	2	18	-11	9	16	2	19	0	9	66	-6	47	17
10	73	1	61	11	10	52	5	30	-1	10	43	0	32	9	10	106	-5	65	33
11	90	-4	71	24	11	53	3	45	2	11	59	-1	41	16	11	124	3	76	28
12	94	-7	80	21	12	33	1	45	7	12	61	-6	41	18	12	132	0	83	31
13	68	-8	68	7	13	9	-5	35	2	13	43	-6	36	7	13	97	2	73	5
14	38	-10	53	-7	14	-23	-6	25	-10	14	17	-11	26	-4	14	60	0	57	-8
15	1	-14	30	-19	15	-30	-13	8	-19	15	-13	-13	13	-13	15	8	-2	28	-19
16	-23	-12	20	-28	16	-29	-17	5	-19	16	-28	-13	4	-18	16	-31	-3	7	-26
17	-24	-12	13	-26	17	-29	-14	3	-20	17	-27	-11	4	-18	17	-40	-4	2	-27
18	-24	-12	12	-24	18	-29	-17	4	-16	18	-28	-11	6	-19	18	-37	-5	2	-26
19	-21	-12	11	-20	19	-26	-15	2	-16	19	-28	-11	6	-21	19	-34	-6	1	-26
20	-23	-12	8	-19	20	-27	-15	2	-16	20	-29	-11	6	-21	20	-36	-4	-2	-25
21	-25	-14	8	-19	21	-28	-15	3	-17	21	-29	-12	3	-21	21	-42	-6	-7	-23
22	-23	-13	7	-18	22	-26	-13	4	-18	22	-31	-12	4	-19	22	-38	-6	-7	-23
23	-24	-14	9	-18	23	-28	-16	4	-17	23	-30	-11	3	-19	23	-41	-5	-8	-26
24					24					24					24				
WOZ	März 1958				WOZ	April 1958				WOZ	Mai 1958				WOZ	Juni 1958			
	Q	B	V	L		Q	B	V	L		Q	B	V	L		Q	B	V	L
0	-48	-12	-5	-13	0	-39	-13	-4	-14	0	-35	-12	2	-26	0	-35	-24	0	-11
1	-47	-10	-5	-12	1	-36	-14	-3	-12	1	-35	-12	0	-24	1	-29	-17	-1	-11
2	-50	-12	-6	-13	2	-32	-13	-3	-10	2	-29	-11	1	-18	2	-30	-18	0	-12
3	-46	-10	-6	-12	3	-32	-15	-2	-10	3	-28	-12	4	-20	3	-26	-16	1	-11
4	-46	-11	-5	-13	4	-31	-15	-1	-10	4	-14	-9	6	-11	4	4	-5	13	-4
5	-46	-11	-6	-15	5	-18	-6	2	-8	5	20	0	24	-4	5	51	3	37	6
6	-23	-6	1	-11	6	49	1	27	7	6	107	8	77	23	6	141	19	90	32
7	34	-1	22	2	7	149	9	71	60	7	194	16	117	61	7	210	25	126	58
8	123	1	55	42	8	251	15	106	116	8	288	23	168	97	8	284	36	153	95
9	199	3	84	67	9	365	21	158	177	9	427	38	237	152	9	365	41	205	119
10	281	7	121	98	10	426	29	182	208	10	483	40	271	172	10	418	53	238	127
11	281	7	124	103	11	445	34	183	223	11	463	44	277	142	11	477	49	288	140
12	267	7	122	90	12	461	35	190	230	12	454	42	275	136	12	465	46	288	131
13	263	11	117	77	13	385	32	169	177	13	426	37	268	121	13	429	33	294	101
14	217	6	112	54	14	350	29	161	155	14	392	27	265	99	14	411	26	273	112
15	127	-2	82	23	15	271	15	140	115	15	282	19	196	66	15	297	8	229	59
16	31	-10	45	-4	16	163	7	101	54	16	210	15	164	30	16	219	4	174	41
17	-36	-16	12	-16	17	52	-7	58	1	17	106	2	100	4	17	141	-7	122	26
18	-55	-14	0	-17	18	-26	-14	11	-18	18	22	-9	50	-20	18	44	-19	70	-7
19	-57	-13	-5	-16	19	-42	-16	0	-20	19	-19	-14	13	-19	19	-12	-21	24	-14
20	-56	-12	-5	-15	20	-37	-15	0	-17	20	-31	-16	3	-19	20	-34	-27	8	-16
21	-54	-10	-6	-15	21	-34	-11	-3	-14	21	-28	-12	0	-15	21	-36	-23	3	-16
22	-50	-10	-5	-14	22	-37	-13	-4	-13	22	-32	-13	0	-19	22	-32	-20	2	-15
23	-49	-12	-4	-14	23	-40	-16	-5	-13	23	-35	-14	-2	-18	23	-34	-21	1	-13
24					24					24					24				

Anhang 4 (Fortsetzung)

Juli 1958					August 1958					September 1958					Oktober 1958				
WOZ	Q	B	V	L	WOZ	Q	B	V	L	WOZ	Q	B	V	L	WOZ	Q	B	V	L
0	-38	-24	-2	-12	0	-31	-12	0	-18	0	-33	-17	-3	-16	0	-24	-13	6	-17
1	-32	-21	-1	-11	1	-29	-12	0	-17	1	-34	-16	-4	-16	1	-25	-14	4	-15
2	-26	-17	3	-12	2	-30	-13	-2	-15	2	-33	-16	-2	-15	2	-25	-14	4	-15
3	-24	-17	2	-9	3	-29	-16	1	-14	3	-31	-17	-1	-14	3	-26	-14	1	-13
4	-7	-7	7	-7	4	-24	-14	4	-14	4	-34	-18	-1	-14	4	-24	-13	1	-12
5	36	5	32	-1	5	8	-3	20	-9	5	-31	-16	-1	-14	5	-23	-12	1	-13
6	107	14	78	16	6	72	6	60	6	6	-15	0	16	-2	6	-19	-14	6	-12
7	183	23	120	39	7	177	13	119	44	7	11	8	73	23	7	5	-11	22	5
8	264	32	170	62	8	244	16	166	61	8	186	12	126	48	8	63	0	54	10
9	329	40	203	85	9	327	25	207	96	9	264	18	176	70	9	149	7	88	36
10	377	50	227	68	10	416	30	263	123	10	318	20	217	73	10	176	11	119	51
11	393	50	231	112	11	460	33	296	130	11	352	23	199	81	11	210	18	134	50
12	412	-57	256	99	12	467	31	316	120	12	351	21	257	80	12	196	21	129	47
13	386	47	246	93	13	416	28	293	94	13	332	25	254	54	13	155	18	108	28
14	303	19	217	68	14	391	27	265	99	14	276	17	226	33	14	111	13	92	7
15	240	20	171	49	15	297	13	214	70	15	192	13	176	4	15	61	3	63	-6
16	190	4	145	41	16	192	6	150	35	16	96	5	112	-20	16	4	-6	30	-20
17	108	-6	96	17	17	83	-1	77	7	17	-6	-10	44	-28	17	-23	-13	11	-19
18	39	-15	59	-5	18	-3	-14	26	-16	18	-33	-18	9	-25	18	-26	-13	5	-19
19	-19	-24	20	-15	19	-30	-14	7	-22	19	-37	-17	4	-24	19	-24	-14	6	-16
20	-36	-31	10	-15	20	-30	-12	3	-21	20	-41	-15	2	-24	20	-23	-13	5	-15
21	-37	-29	5	-14	21	-35	-11	2	-26	21	-37	-14	-1	-23	21	-23	-13	3	-14
22	-39	-29	4	-13	22	-35	-14	0	-21	22	-37	-16	-2	-19	22	-25	-14	3	-14
23	-37	-26	2	-13	23	-33	-13	-1	-18	23	-36	-17	-3	-16	23	-23	-12	2	-13
24					24					24					24				

November 1958					Dezember 1958				
WOZ	Q	B	V	L	WOZ	Q	B	V	L
0	-16	-13	3	-6	0	-17	-10	3	-11
1	-13	-13	4	-5	1	-16	-10	5	-11
2	-9	-11	6	-4	2	-18	-9	4	-12
3	-9	-12	6	-3	3	-18	-9	5	-13
4	-8	-12	6	-3	4	-19	-9	3	-12
5	-7	-12	7	-3	5	-16	-8	4	-12
6	-8	-12	6	-2	6	-15	-8	5	-12
7	-7	-12	5	-1	7	-18	-9	4	-12
8	12	-5	14	3	8	-15	-9	5	-11
9	36	1	24	11	9	6	-6	12	-6
10	59	5	35	19	10	41	1	27	1
11	77	8	44	26	11	58	6	35	7
12	77	7	42	28	12	55	10	33	6
13	61	7	38	16	13	32	6	25	-3
14	36	-1	33	4	14	11	-1	17	-7
15	3	-7	14	-3	15	-15	7	6	-14
16	-12	-12	8	-7	16	-21	7	3	-16
17	-13	-12	7	-7	17	-18	-7	2	-13
18	-18	-14	4	-7	18	-20	-8	2	-13
19	-19	-15	4	-8	19	-19	-8	2	-14
20	-18	-14	3	-7	20	-19	-9	2	-13
21	-18	-14	4	-7	21	-20	-10	2	-11
22	-19	-15	2	-6	22	-23	-11	0	-12
23	-20	-15	2	-7	23	-21	-10	-1	-11
24					24				

Stündliche Mittelwerte der Ventilationsgröße

über dem Quickborner Meßfeld 1957/58

WOZ	1957						1958											
	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0																		
1	13	16	9	10	12	7	9	10	9	8	17	6	13	15	12	13	5	6
2	13	15	9	10	11	7	10	10	8	8	17	6	12	14	12	12	5	7
3	12	15	10	9	12	7	10	11	8	7	17	6	12	14	13	11	6	7
4	12	15	8	10	11	8	10	12	8	8	16	6	11	14	13	11	7	7
5	10	15	8	10	11	8	10	12	7	8	16	7	12	14	13	10	6	7
6	13	15	9	9	12	7	10	10	7	8	19	9	13	14	13	10	6	7
7	17	17	8	11	13	8	10	9	8	11	23	15	17	16	16	11	6	8
8	28	25	10	12	13	8	9	11	11	11	29	24	25	24	22	11	5	8
9	39	27	13	17	15	8	9	15	16	23	37	32	32	33	31	14	5	8
10	47	31	18	18	19	8	10	18	21	34	47	40	40	41	43	17	7	9
11	56	37	26	25	22	9	13	23	29	43	56	44	46	51	43	23	7	10
12	63	45	32	31	23	11	15	26	32	47	59	51	59	61	64	31	8	13
13	74	47	36	31	25	12	15	31	33	52	64	53	55	67	68	35	10	15
14	78	52	39	32	25	13	15	32	33	52	73	55	57	70	70	35	11	14
15	79	55	39	32	24	14	15	30	34	52	71	55	55	70	71	35	11	14
16	74	54	34	29	22	12	15	27	30	54	66	54	49	71	65	32	10	12
17	69	58	32	22	19	12	12	23	28	48	57	49	47	61	56	26	7	10
18	64	51	23	13	17	12	11	18	21	40	52	44	44	51	40	17	6	9
19	49	38	12	11	15	11	11	15	15	29	39	32	35	34	23	14	7	8
20	35	28	9	10	14	10	12	13	12	20	24	23	22	23	18	14	6	8
21	19	22	9	9	12	11	11	12	11	15	16	13	16	18	16	14	7	8
22	15	17	8	10	12	10	11	12	9	12	13	10	15	19	15	12	6	8
23	14	17	9	11	12	10	10	11	8	10	15	8	14	17	13	12	6	7
24	13	17	8	11	13	10	9	12	8	9	15	7	13	15	12	11	5	6

Mittlere vertikale Temperaturunterschiede (C°)
über dem Quickborner Mesfeld 1957/58

Jahr	Monat	Höhe	WOZ																							
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1957	J	13-2	1.35	1.34	1.26	1.16	1.00	0.40	-0.15	-0.35	-0.53	-0.57	-0.62	-0.65	-0.68	-0.64	-0.52	-0.33	-0.24	-0.17	-0.01	0.25	0.73	1.14	1.40	1.38
		70-13	1.24	1.26	1.26	1.21	1.18	0.65	-0.16	-0.51	-0.61	-0.66	-0.73	-0.74	-0.73	-0.77	-0.83	-0.81	-0.68	-0.57	-0.50	-0.24	0.20	0.65	0.92	1.22
		70-28	0.66	0.71	0.69	0.69	0.65	0.35	-0.09	-0.36	-0.38	-0.40	-0.46	-0.45	-0.41	-0.46	-0.45	-0.45	-0.38	-0.34	-0.31	-0.20	0.04	0.30	0.45	0.65
		13-2	0.69	0.74	0.68	0.70	0.54	0.36	-0.07	-0.29	-0.35	-0.39	-0.47	-0.51	-0.62	-0.54	-0.44	-0.36	-0.21	-0.05	0.19	0.63	0.92	0.76	0.69	0.65
	A	70-13	0.64	0.67	0.63	0.67	0.70	0.56	0.04	-0.37	-0.48	-0.60	-0.63	-0.69	-0.69	-0.76	-0.72	-0.71	-0.68	-0.58	-0.33	0.03	0.48	0.65	0.62	0.53
		70-28	0.37	0.37	0.32	0.33	0.34	0.30	-0.03	-0.30	-0.36	-0.40	-0.42	-0.42	-0.44	-0.48	-0.42	-0.41	-0.41	-0.37	-0.25	-0.06	-0.20	0.38	0.33	0.30
		13-2	0.66	0.66	0.51	0.43	0.37	0.38	0.36	0.08	-0.19	-0.29	-0.37	-0.41	-0.36	-0.27	-0.20	-0.13	0.06	0.34	0.73	0.98	1.14	1.03	0.91	0.79
		70-13	0.62	0.58	0.44	0.41	0.46	0.46	0.44	0.15	-0.32	-0.52	-0.60	-0.63	-0.59	-0.69	-0.67	-0.62	-0.50	-0.27	0.11	0.57	0.86	0.90	0.88	0.84
	S	70-28	0.26	0.25	0.15	0.12	0.17	0.17	0.09	0.02	-0.30	-0.41	-0.44	-0.44	-0.45	-0.44	-0.47	-0.47	-0.44	-0.33	-0.16	0.06	0.21	0.29	0.36	0.35
		13-2	0.97	0.84	0.66	0.65	0.52	0.42	0.30	0.22	-0.18	-0.33	-0.42	-0.42	-0.45	-0.38	-0.24	-0.11	0.20	0.64	0.84	0.96	1.03	1.02	0.95	0.96
		70-13	1.21	1.09	0.92	0.77	0.68	0.59	0.37	0.27	-0.08	-0.43	-0.52	-0.57	-0.57	-0.63	-0.60	-0.54	-0.35	0.03	0.34	0.50	0.72	0.92	0.94	0.95
		70-28	0.57	0.51	0.43	0.35	0.34	0.35	0.30	0.21	-0.07	-0.33	-0.37	-0.40	-0.39	-0.42	-0.41	-0.40	-0.30	-0.12	0.07	0.16	0.30	0.49	0.49	0.47
N	13-2	0.11	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.02	-0.11	-0.22	-0.20	-0.20	-0.10	0.03	0.12	0.18	0.17	0.18	0.17	0.15	0.15	0.15	0.14	
	70-13	-0.09	-0.15	-0.16	-0.17	-0.20	-0.19	-0.20	-0.22	-0.28	-0.39	-0.47	-0.52	-0.51	-0.51	-0.48	-0.40	-0.30	-0.27	-0.22	-0.18	-0.10	-0.05	-0.05	-0.08	
	70-28	-0.11	-0.14	-0.14	-0.18	-0.19	-0.18	-0.19	-0.20	-0.24	-0.29	-0.34	-0.36	-0.33	-0.35	-0.34	-0.31	-0.25	-0.24	-0.22	-0.17	-0.13	-0.11	-0.07	-0.10	
	13-2	0.52	0.52	0.42	0.38	0.30	0.27	0.29	0.23	0.23	0.11	-0.03	-0.03	-0.07	0.03	0.14	0.35	0.56	0.59	0.58	0.53	0.48	0.56	0.52	0.44	
D	70-13	0.26	0.21	0.08	0.02	0.04	0.00	-0.03	-0.09	-0.08	-0.13	-0.32	-0.43	-0.43	-0.42	-0.36	-0.20	0.09	0.10	0.16	0.20	0.22	0.16	0.14	0.17	
	70-28	0.19	0.16	0.09	0.04	0.05	0.03	-0.01	-0.04	-0.02	-0.06	-0.19	-0.23	-0.24	-0.24	-0.17	-0.11	0.09	0.07	0.11	0.16	0.17	0.15	0.14	0.14	
	13-2	0.58	0.71	0.66	0.54	0.58	0.61	0.58	0.56	0.39	0.09	-0.19	-0.23	-0.24	-0.16	-0.04	0.13	0.39	0.42	0.47	0.49	0.47	0.51	0.57	0.68	
	70-13	0.28	0.26	0.21	0.24	0.23	0.27	0.25	0.19	0.18	0.03	-0.22	-0.36	-0.46	-0.44	-0.42	-0.31	-0.16	-0.09	-0.03	0.05	0.08	0.07	0.13	0.22	
F	70-28	0.18	0.18	0.17	0.19	0.23	0.32	0.29	0.21	0.23	0.13	-0.08	-0.17	-0.25	-0.23	-0.19	-0.11	-0.08	-0.06	0.01	0.03	0.05	0.11	0.11	0.13	
	13-2	0.42	0.45	0.42	0.45	0.36	0.37	0.38	0.20	-0.04	-0.20	-0.26	-0.22	-0.21	-0.09	-0.03	0.07	0.25	0.43	0.53	0.63	0.47	0.47	0.40	0.40	
	70-13	0.16	0.22	0.24	0.19	0.14	0.06	0.04	0.01	-0.17	-0.35	-0.43	-0.48	-0.52	-0.53	-0.55	-0.45	-0.24	-0.09	-0.03	0.06	0.12	0.12	0.10	0.16	
	70-28	0.10	0.14	0.15	0.10	0.04	0.01	-0.03	-0.01	-0.15	-0.25	-0.33	-0.33	-0.34	-0.35	-0.35	-0.32	-0.22	-0.14	-0.07	-0.01	0.06	0.03	0.02	0.07	
M	13-2	0.29	0.24	0.25	0.23	0.25	0.28	0.15	-0.09	-0.32	-0.44	-0.53	-0.54	-0.48	-0.40	-0.28	-0.15	-0.01	0.14	0.26	0.28	0.26	0.25	0.23	0.26	
	70-13	0.04	0.07	0.09	0.06	0.03	0.03	-0.04	-0.29	-0.45	-0.55	-0.67	-0.69	-0.67	-0.70	-0.71	-0.64	-0.49	-0.34	-0.24	-0.15	-0.18	-0.10	-0.06	-0.01	
	70-28	-0.09	-0.07	-0.07	-0.08	-0.12	-0.11	-0.15	-0.27	-0.37	-0.41	-0.45	-0.46	-0.46	-0.48	-0.46	-0.44	-0.39	-0.33	-0.28	-0.24	-0.21	-0.18	-0.18	-0.15	
	13-2	0.56	0.52	0.45	0.51	0.51	0.39	0.09	-0.38	-0.57	-0.78	-0.86	-0.87	-0.84	-0.67	-0.59	-0.47	-0.29	-0.08	0.16	0.43	0.61	0.66	0.68	0.74	
A	70-13	0.42	0.44	0.52	0.48	0.47	0.38	0.00	-0.40	-0.58	-0.67	-0.77	-0.79	-0.83	-0.86	-0.87	-0.82	-0.75	-0.58	-0.31	-0.03	0.19	0.31	0.34	0.51	
	70-28	0.14	0.19	0.22	0.19	0.22	0.16	-0.03	-0.24	-0.35	-0.41	-0.47	-0.46	-0.42	-0.45	-0.45	-0.46	-0.45	-0.40	-0.26	-0.11	0.03	0.12	0.15	0.21	
	13-2	0.74	0.62	0.54	0.53	0.43	0.09	-0.20	-0.39	-0.55	-0.64	-0.71	-0.66	-0.59	-0.50	-0.48	-0.31	-0.22	-0.04	0.18	0.60	0.82	0.95	0.88	0.71	
	70-13	0.40	0.36	0.31	0.39	0.19	-0.07	-0.45	-0.64	-0.74	-0.84	-0.94	-0.85	-0.85	-0.90	-0.89	-0.82	-0.79	-0.66	-0.49	-0.17	0.11	0.29	0.36	0.33	
M	70-28	0.16	0.13	0.08	0.15	0.01	-0.12	-0.38	-0.49	-0.72	-0.55	-0.63	-0.56	-0.54	-0.58	-0.55	-0.54	-0.54	-0.49	-0.42	-0.25	-0.12	0.04	0.06	0.10	
	13-2	1.07	0.91	0.91	0.75	0.49	-0.02	-0.23	-0.44	-0.64	-0.69	-0.72	-0.77	-0.68	-0.60	-0.54	-0.41	-0.36	-0.24	0.04	0.23	0.60	0.69	0.71	0.93	
	70-13	0.78	0.83	0.79	0.87	0.66	0.07	-0.58	-0.68	-0.71	-0.75	-0.82	-0.82	-0.84	-0.84	-0.84	-0.77	-0.71	-0.65	-0.45	-0.25	0.13	0.49	0.65	0.77	
	70-28	0.43	0.48	0.48	0.53	0.35	-0.02	-0.39	-0.49	-0.48	-0.51	-0.54	-0.53	-0.52	-0.50	-0.49	-0.47	-0.45	-0.41	-0.37	-0.25	-0.03	0.18	0.30	0.41	
J	13-2	1.00	0.84	0.67	0.52	0.35	0.00	-0.19	-0.37	-0.43	-0.58	-0.62	-0.67	-0.62	-0.54	-0.45	-0.35	-0.35	-0.21	-0.04	0.31	0.66	0.90	1.01	1.03	
	70-13	0.99	0.94	0.81	0.64	0.42	0.06	-0.38	-0.57	-0.64	-0.67	-0.70	-0.70	-0.74	-0.78	-0.69	-0.64	-0.60	-0.51	-0.36	-0.06	0.31	0.64	0.77	0.92	
	70-28	0.50	0.50	0.40	0.30	0.21	0.00	-0.34	-0.44	-0.48	-0.46	-0.51	-0.50	-0.48	-0.51	-0.48	-0.46	-0.42	-0.40	-0.31	-0.14	0.03	0.20	0.25	0.41	
	13-2	0.60	0.56	0.46	0.59	0.57	0.26	-0.17	-0.37	-0.46	-0.58	-0.65	-0.68	-0.62	-0.56	-0.59	-0.48	-0.30	-0.11	-0.25	0.57	0.55	0.55	0.65	0.57	
A	70-28	0.30	0.20	0.14	0.15	0.20	0.07	-0.26	-0.43	-0.45	-0.51	-0.54	-0.50	-0.50	-0.48	-0.51	-0.50	-0.45	-0.39	-0.18	0.03	0.15	0.19	0.21	0.24	
	70-13	0.45	0.33	0.21	0.36	0.26	0.07	-0.39	-0.64	-0.72	-0.81	-0.87	-0.82	-0.85	-0.84	-0.89	-0.80	-0.74	-0.64	-0.30	0.11	0.31	0.41	0.48	0.46	
	13-2	0.77	0.66	0.51	0.46	0.50	0.47	0.17	-0.24	-0.42	-0.50	-0.51	-0.49	-0.47	-0.37	-0.31	-0.09	-0.16	0.55	0.93	1.14	1.09	1.01	0.98	1.07	
	70-13	0.77	0.73	0.71	0.70	0.60	0.50	0.08	-0.29	-0.58	-0.65	-0.70	-0.68	-0.69	-0.65	-0.62	-0.58	-0.47	-0.14	0.27	0.47	0.70	0.74	0.76	0.69	
S	70-28	0.54	0.51	0.56	0.61	0.52	0.45	0.12	-0.18	-0.37	-0.40	-0.45	-0.45	-0.45	-0.44	-0.40	-0.37	-0.32	-0.16	0.08	0.27	0.41	0.39	0.45	0.42	
	13-2	0.40	0.36	0.35	0.37	0.45	0.37	0.29																		

Mittlere vertikale Dampfdruckunterschiede (mm Q.S.)

über dem Quickborner Mesfeld 1957/58

Jahr	Monat	Höhe	WOZ																							
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1957	J	13-2	0.35	0.40	0.46	0.35	0.33	0.04	-0.29	-0.40	-0.43	-0.55	-0.59	-0.70	-0.74	-0.71	-0.68	-0.70	-0.53	-0.41	-0.39	-0.29	-0.19	0.05	0.28	0.35
		70-13	-0.08	-0.10	-0.01	0.01	-0.01	-0.05	-0.22	-0.17	-0.22	-0.26	-0.33	-0.39	-0.40	-0.39	-0.44	-0.48	-0.44	-0.40	-0.34	-0.33	-0.37	-0.33	-0.25	-0.22
		70-28	-0.09	-0.08	-0.02	0.00	0.02	0.00	-0.08	-0.04	-0.10	-0.13	-0.14	-0.17	-0.18	-0.20	-0.18	-0.19	-0.22	-0.18	-0.15	-0.16	-0.20	-0.20	-0.17	-0.20
	A	13-2	0.12	0.24	0.21	0.24	0.20	0.06	-0.22	-0.34	-0.41	-0.46	-0.58	-0.55	-0.58	-0.57	-0.57	-0.55	-0.53	-0.48	-0.43	-0.20	-0.02	0.08	0.12	
		70-13	0.01	0.09	0.05	0.18	0.22	0.17	0.03	-0.16	-0.19	-0.20	-0.27	-0.28	-0.33	-0.38	-0.40	-0.42	-0.41	-0.41	-0.37	-0.28	-0.25	-0.23	-0.14	-0.01
		70-28	-0.03	-0.02	0.00	0.07	0.08	0.05	0.01	-0.07	-0.08	-0.10	-0.16	-0.15	-0.19	-0.24	-0.25	-0.27	-0.28	-0.27	-0.26	-0.23	-0.19	-0.19	-0.12	-0.04
	S	13-2	0.09	0.09	0.04	0.02	-0.01	0.03	-0.02	-0.14	-0.25	-0.30	-0.36	-0.41	-0.37	-0.39	-0.37	-0.33	-0.30	-0.27	-0.17	-0.04	0.11	0.13	0.06	0.11
		70-13	-0.08	-0.07	-0.08	-0.06	-0.03	0.00	-0.02	-0.12	-0.20	-0.20	-0.23	-0.27	-0.30	-0.34	-0.32	-0.35	-0.33	-0.31	-0.29	-0.35	-0.25	-0.13	-0.16	-0.08
		70-28	-0.08	-0.10	-0.07	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.08	-0.11	-0.09	-0.14	-0.17	-0.18	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.21	-0.21	-0.20	-0.20	-0.16	-0.11	-0.10
	O	13-2	0.29	0.22	0.19	0.17	0.13	0.04	0.07	0.03	0.08	-0.14	-0.18	-0.20	-0.21	-0.16	-0.13	-0.10	-0.07	-0.01	0.08	0.16	0.20	0.23	0.23	0.26
70-13		0.05	0.12	0.00	-0.04	-0.01	0.00	-0.01	-0.07	-0.14	-0.20	-0.22	-0.24	-0.26	-0.25	-0.25	-0.25	-0.22	-0.23	-0.22	-0.20	-0.14	-0.12	-0.04	-0.06	
70-28		-0.04	0.04	-0.03	-0.01	0.04	0.07	0.02	-0.04	-0.06	-0.08	-0.11	-0.09	-0.13	-0.13	-0.12	-0.12	-0.13	-0.14	-0.14	-0.13	-0.08	-0.06	-0.06	-0.05	
N	13-2	-0.10	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.10	-0.09	-0.09	-0.11	-0.17	-0.16	-0.18	-0.21	-0.21	-0.21	-0.20	-0.14	-0.09	-0.07	-0.10	-0.09	-0.09	-0.10	-0.10	
	70-13	-0.12	-0.11	-0.11	-0.10	-0.10	-0.10	-0.11	-0.09	-0.12	-0.14	-0.13	-0.15	-0.14	-0.15	-0.12	-0.14	-0.13	-0.14	-0.12	-0.13	-0.13	-0.11	-0.11	-0.11	
	70-28	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08	-0.06	-0.07	-0.06	
D	13-2	0.03	-0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.04	-0.05	-0.05	-0.07	-0.07	-0.07	-0.08	-0.11	-0.08	0.00	0.10	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	
	70-13	0.01	-0.01	-0.02	0.01	-0.01	-0.06	-0.06	-0.05	-0.08	-0.10	-0.13	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.11	-0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02		
	70-28	0.00	-0.02	-0.05	-0.03	-0.04	-0.06	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	-0.09	-0.10	-0.10	-0.09	-0.10	-0.09	-0.05	-0.04	-0.05	-0.06	-0.04	-0.03	-0.04	0.00	
1958	J	13-2	-0.04	-0.03	-0.05	-0.05	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.08	-0.08	-0.08	-0.06	-0.05	-0.03	-0.06	-0.03	-0.04	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.03
		70-13	0.00	-0.02	-0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	-0.01	-0.05	-0.09	-0.10	-0.11	-0.08	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.01	-0.02	-0.02	0.02	0.05	0.01	-0.02
		70-28	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.01	-0.02	-0.05	-0.09	-0.13	-0.15	-0.15	-0.17	-0.13	-0.12	-0.12	-0.11	-0.07	-0.06	-0.04	-0.04	-0.01	0.00
	A	13-2	0.01	0.06	0.07	0.05	0.07	0.06	-0.04	-0.12	-0.18	-0.23	-0.25	-0.29	-0.27	-0.25	-0.23	-0.23	-0.22	-0.21	-0.17	-0.16	0.00	0.02	0.03	0.08
		70-13	-0.04	-0.07	-0.08	-0.09	-0.10	-0.08	-0.15	-0.17	-0.18	-0.15	-0.14	-0.20	-0.21	-0.20	-0.20	-0.23	-0.23	-0.22	-0.21	-0.17	-0.16	-0.17	-0.13	-0.05
		70-28	-0.04	-0.03	-0.05	-0.08	-0.10	-0.10	-0.11	-0.10	-0.07	-0.06	-0.05	-0.05	-0.10	-0.10	-0.10	-0.12	-0.10	-0.08	0.00	-0.08	-0.04	-0.07	-0.05	-0.04
	M	13-2	0.05	0.05	0.05	0.03	0.01	-0.14	-0.24	-0.32	-0.41	-0.48	-0.47	-0.55	-0.56	-0.54	-0.54	-0.51	-0.45	-0.40	-0.36	-0.28	-0.18	-0.08	-0.02	0.04
		70-28	-0.11	-0.09	-0.11	-0.07	-0.06	-0.09	-0.11	-0.09	-0.12	-0.14	-0.24	-0.22	-0.24	-0.26	-0.26	-0.26	-0.28	-0.24	-0.18	-0.18	-0.11	-0.16	-0.15	-0.16
		70-13	-0.16	-0.10	-0.12	-0.11	-0.09	-0.19	-0.23	-0.22	-0.26	-0.30	-0.38	-0.39	-0.39	-0.43	-0.45	-0.42	-0.42	-0.36	-0.31	-0.31	-0.25	-0.29	-0.26	-0.23
	J	13-2	0.28	0.22	0.21	0.18	0.05	-0.17	-0.33	-0.42	-0.47	-0.55	-0.63	-0.69	-0.64	-0.67	-0.61	-0.64	-0.57	-0.44	-0.44	-0.25	-0.11	0.01	0.08	0.21
70-13		-0.24	-0.18	-0.11	-0.14	-0.08	-0.15	-0.19	-0.22	-0.28	-0.30	-0.32	-0.35	-0.39	-0.42	-0.41	-0.42	-0.42	-0.40	-0.41	-0.29	-0.27	-0.30	-0.28	-0.27	
70-28		0.37	0.31	0.23	0.17	0.04	-0.15	-0.28	-0.36	-0.49	-0.57	-0.64	-0.62	-0.68	-0.60	-0.60	-0.53	-0.49	-0.41	-0.35	-0.20	-0.04	0.13	0.36	0.42	
J	70-13	0.03	0.09	0.17	0.14	0.08	-0.07	-0.23	-0.19	-0.24	-0.26	-0.26	-0.27	-0.25	-0.26	-0.22	-0.27	-0.25	-0.25	-0.27	-0.25	-0.21	-0.21	-0.13	-0.08	
	70-28	-0.13	-0.09	0.00	0.04	0.01	-0.05	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	-0.11	-0.09	-0.10	-0.12	-0.10	-0.15	-0.15	-0.16	-0.13	-0.16	-0.10	-0.07	-0.11	-0.12	
	70-28	0.28	0.25	0.27	0.31	0.29	0.08	-0.23	-0.32	-0.44	-0.51	-0.59	-0.65	-0.67	-0.66	-0.62	-0.58	-0.49	-0.40	-0.28	-0.07	0.06	0.17	0.23	0.18	
A	70-13	-0.10	-0.06	-0.02	-0.02	0.00	-0.05	-0.14	-0.19	-0.24	-0.29	-0.33	-0.39	-0.39	-0.42	-0.40	-0.36	-0.34	-0.31	-0.29	-0.26	-0.21	-0.20	-0.19	-0.15	
	70-28	-0.10	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.05	-0.08	-0.10	-0.15	-0.16	-0.20	-0.18	-0.23	-0.21	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.13	-0.13	-0.17	-0.10	-0.11	
	70-28	0.17	0.15	0.07	0.07	0.09	0.10	-0.02	-0.22	-0.35	-0.45	-0.57	-0.57	-0.61	-0.62	-0.63	-0.58	-0.48	-0.31	-0.08	0.08	0.12	0.14	0.21	0.23	
S	70-13	-0.08	-0.12	-0.12	-0.09	-0.08	-0.06	-0.10	-0.14	-0.22	-0.28	-0.29	-0.33	-0.35	-0.37	-0.31	-0.38	-0.38	-0.37	-0.41	-0.25	-0.27	-0.32	-0.20	-0.14	
	70-28	-0.08	-0.11	-0.11	-0.11	-0.06	-0.06	-0.04	-0.14	-0.24	-0.16	-0.17	-0.17	-0.19	-0.18	-0.18	-0.22	-0.24	-0.27	-0.28	-0.25	-0.19	-0.16	-0.16	-0.12	
	70-28	0.07	0.05	0.06	0.07	0.10	0.06	0.04	0.01	-0.14	-0.20	-0.24	-0.28	-0.28	-0.28	-0.24	-0.23	-0.22	-0.18	-0.07	-0.01	0.00	0.05	0.07	0.08	
O	70-13	-0.15	-0.14	-0.10	-0.12	-0.09	-0.11	-0.12	-0.15	-0.22	-0.21	-0.28	-0.27	-0.30	-0.30	-0.28	-0.26	-0.28	-0.26	-0.20	-0.19	-0.15	-0.12	-0.12	-0.09	
	70-28	-0.12	-0.17	-0.10	-0.12	-0.09	-0.08	-0.10	-0.10	-0.16	-0.11	-0.14	-0.15	-0.14	-0.18	-0.20	-0.17	-0.17	-0.17	-0.14	-0.12	-0.14	-0.12	-0.09	-0.10	
	70-28	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	-0.01	0.01	0.00	-0.05	-0.06	-0.10	-0.12	-0.12	-0.12	-0.10	-0.07	-0.03	-0.01	0.03	0.04	0.09	0.10	0.11	0.07	
N	70-28	-0.07	-0.06	-0.05	-0.03	-0.04	-0.05	-0.07	-0.07	-0.07	-0.09	-0.08	-0.08	-0.08	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.06	-0.09	-0.08	-0.03	-0.06	-0.06	-0.08	
	70-13	-0.11	-0.09	-0.09	-0.08	-0.07	-0.07	-0.09	-0.11	-0.11	-0.13	-0.14	-0.14	-0.16	-0.16	-0.17	-0.15	-0.12	-0.12	-0.10	-0.10	-0.10	-0.06	-0.08	-0.10	
	70-28	0.04	0.01	-0.01	-0.01	0.04	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.10	-0.12	-0.11	-0.10	-0.10	-0.08	-0.03	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.04	0.06	
D	70-13	0.03	0.00	0.01	0.01	-0.02	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.04	-0.0														

Mittlere Windgeschwindigkeiten (m/sec)

Jahr	Monat	Höhe	WOZ												
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1957	J	2	1.16	1.18	1.20		1.10	1.24	1.37	1.96	2.46	2.71	2.83	2.83	2.94
		10	1.97	1.89	1.91		1.88	2.02	2.17	2.70	3.26	3.46	3.74	3.81	3.93
		28	3.05	3.02	3.00		2.99	3.05	3.12	3.43	3.81	3.99	4.20	4.27	4.43
		70	4.95	4.91	4.84		4.80	4.96	4.80	4.40	4.29	4.41	4.55	4.50	4.68
	A	2	1.78	1.79	1.92		1.87	1.88	1.97	2.39	2.92	3.21	3.47	3.61	3.75
		10	2.72	2.70	2.80		2.70	2.73	2.87	3.26	3.78	4.07	4.46	4.59	4.87
		28	4.03	4.00	4.06		3.96	3.87	3.96	4.18	4.57	4.87	5.35	5.47	5.71
		70	6.41	6.32	6.23		6.16	6.00	6.06	5.94	5.85	5.94	6.30	6.41	6.74
	S	2	1.81	1.90	2.03		1.92	1.87	2.02	1.95	2.19	2.64	3.04	3.27	3.59
		10	2.87	2.85	3.00		2.94	2.85	3.01	2.87	3.12	3.59	3.98	4.33	4.63
		28	4.13	4.16	4.15		4.17	4.06	4.67	4.13	4.10	4.39	4.85	5.28	5.48
		70	6.39	6.47	6.35		6.33	6.23	6.48	6.08	5.81	5.56	5.76	6.18	6.55
	O	2	2.21	2.29	2.36		2.45	2.57	2.58	2.75	2.72	2.92	3.27	3.56	3.68
		10	3.20	3.23	3.31		3.32	3.56	3.55	3.63	3.81	3.99	4.37	4.76	4.78
		28	4.27	4.43	4.56		4.60	4.74	4.81	4.86	4.87	4.96	5.12	5.47	5.62
		70	6.47	6.56	6.61		6.68	6.93	6.94	7.00	6.98	6.56	6.31	6.48	6.68
	N	2	2.95	3.07	3.20		3.10	3.15	3.03	3.15	3.20	3.27	3.51	3.78	3.77
		10	4.48	4.58	4.75		4.58	4.60	4.45	4.53	4.63	4.74	4.87	5.14	5.26
		28	5.53	5.62	5.79		5.64	5.71	5.56	5.71	5.84	5.92	5.87	6.02	6.10
		70	7.19	7.43	7.53		7.46	7.47	7.38	7.56	7.61	7.66	7.53	7.33	7.37
	D	2	2.92	3.02	3.04		2.94	2.90	2.98	2.94	3.07	3.06	3.08	3.33	3.44
		10	4.17	4.22	4.28		4.16	4.09	4.11	4.17	4.24	4.23	4.23	4.48	4.56
		28	5.27	5.39	5.38		5.18	5.20	5.22	5.25	5.21	5.18	5.20	5.38	5.45
		70	7.38	7.46	7.38		7.13	7.20	7.19	7.20	7.10	7.11	6.98	6.91	6.83
J	2	3.56	3.62	3.42		3.28	3.28	3.15	3.13	3.10	2.92	3.14	3.42	3.42	
	10	4.77	4.83	4.59		4.46	4.52	4.44	4.44	4.24	4.02	4.12	4.28	4.41	
	28	5.99	6.11	5.91		5.64	5.70	5.70	5.60	5.31	5.02	5.07	5.30	5.36	
	70	7.94	8.02	7.81		7.62	7.66	7.41	7.64	7.23	6.90	6.82	6.90	6.71	
1958	F	2	3.98	3.98	3.94		3.94	3.88	3.61	3.36	3.36	3.65	4.01	4.47	4.62
		10	5.50	5.58	5.43		5.20	5.19	4.76	4.51	4.65	4.68	5.36	5.87	6.06
		28	7.47	7.18	7.03		7.02	6.76	6.39	6.10	6.10	6.07	6.42	6.76	7.26
		70	9.12	9.28	9.03		9.01	8.84	8.32	7.99	7.86	7.75	7.79	8.20	8.42
	M	2	2.61	2.55	2.47		2.48	2.52	2.59	2.57	2.83	3.47	3.78	3.96	4.15
		10	3.69	3.60	3.48		3.56	3.61	3.72	3.82	4.09	4.67	5.13	5.26	5.44
		28	4.59	4.37	4.33		4.44	4.46	4.58	4.57	4.71	5.30	5.76	5.89	6.08
		70	6.40	6.16	6.02		6.17	6.16	6.29	6.20	6.04	6.28	6.68	6.82	7.07
	A	2	2.11	2.04	2.16		2.12	2.12	2.01	2.45	2.93	3.29	3.83	4.11	4.30
		10	3.23	3.03	3.18		3.15	3.17	3.09	3.42	3.87	4.26	4.85	5.25	5.49
		28	4.29	3.99	4.11		3.93	3.97	3.95	4.10	4.32	4.76	5.39	5.74	6.06
		70	6.38	6.16	6.09		5.93	5.94	5.75	5.66	5.47	5.65	6.23	6.67	6.88
	M	2	1.90	2.03	2.13		2.08	2.06	2.30	2.67	3.11	3.49	3.77	4.05	4.10
		10	3.00	3.10	3.23		3.15	3.01	3.18	3.58	4.12	4.56	5.03	5.29	5.39
		28	3.97	4.06	4.13		4.05	3.97	4.05	4.20	4.73	5.15	5.63	5.95	5.97
		70	6.00	6.10	6.11		6.12	5.74	5.64	5.29	5.55	5.91	6.36	6.71	6.77
	J	2	1.14	1.22	1.25		1.38	1.50	1.57	2.20	2.50	2.70	2.84	2.87	3.06
		10	1.90	2.04	2.07		2.21	2.32	2.35	3.12	3.52	3.70	3.90	3.92	4.13
		28	3.03	3.16	3.06		3.26	3.24	3.14	3.58	4.08	4.17	4.38	4.42	4.77
		70	5.12	5.34	5.18		5.54	5.42	4.81	4.58	4.72	4.84	5.03	5.12	5.46
	J	2	1.68	1.81	1.87		1.95	2.10	2.40	2.82	3.21	3.55	3.77	3.83	3.96
		10	2.59	2.78	2.85		2.92	3.07	3.39	3.90	4.38	4.80	5.03	5.12	5.28
		28	3.93	4.16	4.21		4.13	4.17	4.36	4.73	5.17	5.61	5.81	5.96	6.16
		70	6.30	6.58	6.51		6.32	6.25	6.21	6.03	6.18	6.61	6.80	6.91	7.11
	A	2	1.85	1.83	1.91		1.90	1.86	1.97	2.34	2.72	3.11	3.33	3.61	3.70
		10	2.76	2.67	2.67		2.74	2.67	2.79	3.17	3.63	4.06	4.33	4.70	4.86
		28	3.79	3.78	3.84		3.90	3.75	3.75	4.05	4.36	4.73	5.19	5.50	5.64
		70	6.10	5.98	6.04		6.05	5.88	5.60	5.52	5.36	5.60	6.07	6.34	6.51
	S	2	1.48	1.47	1.58		1.67	1.78	1.70	1.84	2.22	2.55	2.94	3.27	3.44
		10	2.43	2.44	2.55		2.53	2.60	2.62	2.75	3.06	3.48	3.92	4.34	4.59
		28	3.16	3.24	3.27		3.29	3.30	3.26	3.27	3.30	3.57	4.07	4.37	4.62
		70	6.35	6.40	6.34		6.37	6.22	6.38	6.01	5.43	5.00	5.34	5.78	6.12
	O	2	2.28	2.20	2.17		2.16	2.14	2.19	2.17	2.13	2.59	2.76	3.07	3.23
		10	3.51	3.41	3.25		3.34	3.22	3.26	3.24	3.13	3.64	3.86	4.25	4.45
		28	4.33	4.13	4.07		4.06	3.99	3.94	3.94	3.74	4.17	4.37	4.70	4.89
		70	6.43	6.30	6.26		6.32	6.20	6.13	6.04	5.55	5.79	5.60	5.82	5.88
	N	2	1.32	1.31	1.44		1.54	1.60	1.63	1.63	1.63	1.76	2.01	2.07	2.13
		10	2.05	2.03	2.21		2.39	2.41	2.42	2.47	2.37	2.33	2.67	2.81	2.80
		28	2.63	2.57	2.74		2.91	2.90	2.97	2.86	2.86	2.77	3.08	3.05	3.15
		70	3.96	3.87	4.05		4.26	4.25	4.24	4.27	4.15	3.79	3.88	3.71	3.65
	D	2	2.53	2.54	2.47		2.50	2.49	2.51	2.56	2.44	2.46	2.75	2.90	2.96
		10	3.85	3.86	3.71		3.90	3.80	3.83	3.88	3.66	3.80	3.90	4.10	4.18
		28	4.92	5.00	4.90		4.92	4.78	4.88	4.96	4.79	4.92	5.05	5.04	5.03
		70	6.75	6.85	6.86		6.93	6.68	6.85	6.95	6.67	6.87	6.77	6.65	6.41

über dem Quickborner Meßfeld 1957/58

WOZ													
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
3.26	3.40	3.34	3.09	3.40	3.25	2.74	2.09	1.42	1.13	1.26	1.24		
4.26	4.56	4.56	4.47	4.67	4.56	4.06	3.30	2.43	1.95	2.05	2.07		
4.95	5.14	5.09	5.04	5.29	5.26	4.70	3.98	3.29	2.88	3.11	3.22		
5.20	5.50	5.43	5.47	5.93	6.00	5.54	5.07	4.64	4.49	4.83	5.03		
3.65	3.83	3.85	3.86	3.57	3.25	2.53	1.96	1.69	1.68	1.77	1.73		
4.70	5.10	5.10	4.98	4.88	4.54	3.60	3.06	2.84	2.78	2.82	2.76		
5.68	5.86	5.79	5.64	5.54	5.21	4.43	3.99	3.85	3.86	3.91	3.87		
6.66	6.95	7.06	6.68	6.68	6.53	5.87	5.72	5.87	6.11	6.31	6.30		
3.61	3.76	3.63	3.27	3.07	2.44	1.98	1.84	1.72	1.66	1.78	1.69		
4.77	5.01	4.99	4.73	4.34	3.69	3.08	2.79	2.69	2.65	2.77	2.74		
5.74	5.84	5.92	5.69	5.34	4.63	4.15	3.91	4.07	3.99	4.11	4.03		
6.86	6.91	6.93	6.86	6.54	6.17	5.87	5.75	5.93	6.10	6.28	6.39		
3.69	3.55	3.37	3.09	2.82	2.17	2.11	2.09	2.14	2.17	2.32	2.30		
4.90	4.77	4.52	4.24	3.83	3.46	3.26	3.23	3.22	3.29	3.38	3.35		
5.72	5.56	5.33	5.10	4.70	4.50	4.40	4.32	4.53	4.45	4.54	4.52		
6.76	6.58	6.43	6.27	6.24	6.41	6.58	6.60	6.73	6.73	6.81	6.80		
3.79	3.68	3.60	3.56	3.14	3.07	2.91	2.94	2.83	2.87	2.88	2.99		
5.33	5.27	5.23	4.97	4.77	4.66	4.38	4.36	4.32	4.42	4.40	4.48		
6.21	6.20	6.12	5.97	5.82	5.68	5.33	5.45	5.37	5.43	5.38	5.52		
7.53	7.44	7.40	7.44	7.53	7.37	7.13	6.91	7.10	7.10	7.13	7.19		
3.63	3.50	3.28	3.05	2.84	2.97	2.91	2.93	2.96	2.92	2.98	3.11		
4.79	4.68	4.65	4.32	4.10	4.28	4.21	4.20	4.10	4.17	4.23	4.35		
5.64	5.56	5.54	5.45	5.32	5.52	5.42	5.38	5.33	5.39	5.40	5.50		
6.91	6.83	6.99	7.10	7.23	7.48	7.50	7.40	7.45	7.45	7.35	7.50		
3.45	3.45	3.29	3.08	2.95	3.19	3.40	3.46	3.48	3.39	3.22	3.08		
4.57	4.52	4.36	4.14	4.12	4.38	4.57	4.78	4.74	4.62	4.33	4.27		
5.59	5.41	5.40	5.29	5.23	5.49	5.79	5.87	5.89	5.80	5.54	5.48		
6.84	6.69	6.81	6.81	7.04	7.33	7.66	7.84	7.82	7.61	7.45	7.15		
4.76	4.53	4.70	4.41	4.00	3.65	3.58	3.73	3.86	3.79	3.79	3.87		
6.24	6.08	6.20	5.85	5.44	4.99	4.95	5.15	5.41	5.22	5.27	5.38		
7.10	7.13	7.26	6.94	6.49	6.19	6.19	6.53	6.78	6.64	6.70	6.98		
8.53	8.46	8.69	8.42	8.26	8.14	8.20	8.65	8.94	8.70	8.79	8.92		
4.10	4.11	4.05	3.89	3.66	3.23	2.93	2.88	2.87	2.65	2.68	2.65		
5.40	5.45	5.43	5.22	4.99	4.52	4.16	4.07	4.02	3.81	3.72	3.79		
6.01	6.17	6.13	5.93	5.70	5.20	4.95	4.89	4.85	4.65	4.71	4.65		
7.08	7.11	7.21	7.03	7.01	6.70	6.60	6.60	6.56	6.41	6.54	6.48		
4.41	4.39	4.44	4.36	4.15	3.83	3.15	2.63	2.26	2.24	2.14	2.10		
5.81	5.75	5.79	5.85	5.54	5.16	4.40	3.93	3.47	3.37	3.23	3.10		
6.44	6.37	6.45	6.45	6.22	5.81	5.19	4.79	4.49	4.41	4.21	4.19		
7.31	7.34	7.45	7.56	7.29	7.02	6.70	6.66	6.51	6.44	6.22	6.25		
4.05	4.06	4.03	3.76	3.46	3.23	2.75	2.08	1.67	1.67	1.86	1.78		
5.34	5.38	5.39	5.11	4.75	4.50	3.92	3.06	2.68	2.65	3.04	2.95		
5.97	6.13	6.09	5.76	5.36	5.10	4.64	3.90	3.64	3.67	4.05	4.03		
6.27	6.94	6.90	6.62	6.20	6.13	5.78	5.21	5.25	5.49	5.99	6.09		
2.92	2.97	2.80	2.87	2.76	2.51	2.20	2.09	1.43	1.46	1.37	1.24		
3.98	4.08	3.80	4.03	3.96	3.68	3.32	3.14	2.49	2.52	2.41	2.14		
4.58	4.64	4.43	4.74	4.70	4.30	4.06	4.00	3.40	3.58	3.64	3.34		
5.24	5.23	5.10	5.56	5.53	5.22	5.15	5.39	5.23	5.60	5.61	5.56		
3.85	3.90	3.74	3.43	3.49	3.36	2.91	2.13	1.91	1.68	1.66	1.70		
5.20	5.20	5.03	4.66	4.74	4.53	4.00	3.26	2.94	2.66	2.58	2.56		
6.07	6.03	5.91	5.48	5.58	5.47	4.91	4.33	4.04	3.77	3.84	3.91		
7.08	7.03	6.92	6.60	6.65	6.68	6.26	5.95	5.88	5.69	5.89	6.09		
3.78	3.90	3.69	3.61	3.25	2.82	2.22	1.68	1.69	1.74	1.67	1.72		
4.98	5.09	4.91	4.78	4.35	3.82	3.23	2.62	2.55	2.73	2.61	2.56		
5.79	5.89	5.68	5.62	5.13	4.71	4.07	3.72	3.63	3.78	3.74	3.68		
6.71	6.86	6.67	6.63	6.12	5.94	5.74	5.64	5.83	6.04	5.87	5.92		
3.33	3.31	3.31	3.11	2.72	2.13	1.72	1.61	1.61	1.73	1.46	1.41		
4.50	4.44	4.48	4.27	3.77	3.15	2.66	2.51	2.61	2.49	2.30	2.23		
4.50	4.51	4.60	4.40	4.01	3.56	3.26	3.19	3.30	3.16	3.06	2.87		
6.00	5.93	6.18	6.13	5.85	5.71	5.84	6.02	6.32	6.34	6.16	6.03		
3.25	3.14	3.06	2.89	2.46	2.20	2.05	2.09	2.23	2.07	2.16	2.16		
4.45	4.40	4.26	4.20	3.65	3.37	3.10	3.16	3.35	3.21	3.26	3.31		
4.93	5.02	4.92	4.82	4.35	4.07	3.94	4.03	4.23	4.08	4.14	4.19		
5.92	6.03	6.10	6.28	5.95	5.95	5.93	5.92	6.17	6.05	6.13	6.11		
2.15	2.10	2.06	1.77	1.51	1.46	1.53	1.53	1.60	1.46	1.32	1.33		
2.84	2.91	2.94	2.67	2.34	2.32	2.38	2.44	2.49	2.31	2.12	2.08		
3.10	3.20	3.25	3.06	2.84	2.71	2.96	2.97	3.10	2.93	2.72	2.70		
3.60	3.77	3.85	3.85	3.79	3.90	4.26	4.35	4.42	4.14	4.08	4.00		
3.19	3.01	2.92	2.88	2.78	2.73	2.71	2.72	2.68	2.62	2.56	2.45		
4.31	4.17	4.11	4.10	4.03	4.07	3.96	3.99	3.91	3.95	3.88	3.73		
5.21	5.12	5.15	5.20	5.23	5.20	5.04	5.16	5.12	5.19	5.08	4.97		
6.42	6.42	6.59	6.94	7.07	6.88	7.00	6.95	6.88	7.07	6.93	6.74		

