Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Kiel 1977 (1978):

Herrn Prof. Dr. Walter Dammann zum 70. Geburtstag gewidmet.

Energiehaushalt der Pflanzenbestände im Solling

Fritz Wilmers

The meteorological measurements within the Solling project of the IBP on the meadow W1, the beech forest B1, and the spruce forest F1 are the energetic basis of the biological investigations.

The characteristic differences of the heat balance equation

$$Q + B + V + L + P = O$$

between the plant communities W1, B1, F1 are considered.

1. Einführung

Da im Sollingprojekt die Erfassung des gesamten Energieumsatzes der Ökosysteme angestrebt wurde (ELLENBERG 1971), mußte die Primärenergie und ihre Umsetzungen möglichst genau bestimmt werden. Es wurden daher meteorologische Messungen in den Haupt-Probeflächen durchgeführt und die aufbereiteten Daten laufend an die Interessenten weitergegeben (KIESE 1971). Die Messungen wurden unter W. Damman von O. Kiese begonnen, von C. Kayser und W. Eils weitergeführt und wurden 1974 vom Verfasser übernommen. Die technische Betreuung der Anlage obliegt seit Jahren Herrn Surkow, die Wartung und Überwachung der Wetterstationen Frau Malinowski und die rechnerische Aufarbeitung und Weitergabe der Daten Herrn Müller-Tuchtenhagen. Ohne ihre aufopferungsvolle Mitarbeit und die Mithilfe der übrigen Mitarbeiter des Instituts für Meteorologie und Klimatologie wäre die jahrelange Durchführung der Messungen nicht möglich.

Untersuchungen des Energiehaushaltes wurden von meteorologischer Seite in den Hauptbeständen vorgenommen: B1 (Buchenwald), F1 (Fichtenforst), W1 (Wiese) (EILS 1972, KIESE 1972). Neben grundsätzlichen Bemerkungen zur Messung und Berechnung sollen Problematik und Verschiedenartigkeit an einigen Beispielen diskutiert werden.

2. Der Wärmehaushalt

Die Energieumsetzungen können mit Hilfe der Wärmehaushaltsgleichung

$$Q + B + V + L + P = O \qquad (1)$$

beschrieben werden. Sie gilt in dieser Form für eine horizontale, massenlose und trägheitslose Fläche, z.B. den Erdboden, und ist daher in jedem Moment ausgeglichen (GEIGER 1961). Zur Bezugsfläche gerichtete Wärmeströme werden positiv gerechnet. Die einzelnen Terme bedeuten:

Q = Strahlungsbilanz
V = Strom latenter Wärme
P = Wärmestrom in der Pflanzenmasse
B = Bodenwärmestrom
L = Strom fühlbarer Wärme

Die Strahlungsbilanz läßt sich zerlegen in einen kurzwelligen und einen langwelligen Anteil:

$$Q = Q_k + Q_l \qquad (2)$$

Mit S + H = Globalstrahlung
R = Albedo
A = Atmosphärische Gegenstrahlung und
E = langwellige Ausstrahlung

läßt sich die Strahlungsbilanzgleichung in der folgenden Form schreiben:

$$Q = (S + H)\ (1 - R) + A - E \qquad (3)$$

Nachts vereinfacht sich Gleichung (3) zu

$$Q = Q_l = A - E \qquad (4)$$

Aus Gründen der Vergleichbarkeit erfolgt die Berechnung in SI-Einheiten ($J\ m^{-2}s^{-1}$).

Ergebnisse des Sollingprojekts der DFG (IBP), Mitt. Nr. 182.

Der für die Photosynthese aufgewendete Energieanteil kann über Küvettenmessung (LANGE u. SCHULZE 1971) direkt bestimmt werden. Somit ist die Strahlungsbilanz von verschiedenen Variablen abhängig. Für praktische Zwecke begnügt man sich meist mit der pauschalen Strahlungsbilanz. Sie bildet in der für Wärmehaushaltsberechnungen am häufigsten verwendeten Sverdrup-Methode die Hauptenergiequelle, gegen die alle Terme aufgerechnet werden (BAUMGARTNER 1956). Die Registrierung der Bilanz wird durch Strahlungsbilanzmesser ermöglicht, wobei die Bestimmung der Einzelkomponenten zusätzliche Solarimeter für S + H und R erfordert. Der Bodenwärmestrom ist im wesentlichen durch die physikalische Wärmeleitung zu beschreiben gemäß

$$B = \lambda \frac{d\,\vartheta}{d\,z} \qquad (5)$$

bzw. durch die tägliche Temperaturwelle der Tautochronenmethode

$$B = -\int_0^{z^*} \varrho\, c\, \frac{\delta\,\vartheta}{\delta\,t}\, dz \qquad (6)$$

wobei die Wärmeleitfähigkeit λ über die Temperaturleitfähigkeit $\alpha = \frac{\lambda}{\varrho\, c}$ mit den physikalischen Bodenkonstanten Dichte ϱ und Wärmeleitfähigkeit c zusammenhängt; $\frac{\delta\,\vartheta}{\delta\,t}$ ist die zeitliche Temperaturänderung, z^* die Tiefe, in der $\frac{\delta\,\vartheta}{\delta\,t} = 0$ wird. Die Messung erfolgt über einen Satz von Bodenthermometern bis zur Eindringtiefe der täglichen Temperaturwelle, im Solling an den drei Stationen bis in 50 cm Tiefe. In Pflanzenbeständen ist B durchweg gering, so daß Modellentwicklungen zu einer Parametrisierung angestrebt werden.

Der Wärmestrom in der Pflanzenmasse P kann mit einer dem Bodenwärmestrom B entsprechenden Gleichung bestimmt werden.

$$P = -\int_0^{z^*} \varrho\, c\, \frac{\delta\,\vartheta}{\delta\,t}\, dz \qquad (7)$$

Dabei ist die Pflanzenmasse als eine gleichmäßige Schicht der Höhe z^* gedacht. Das Intervall 0 bis z^* gibt die Schichtdicke an. P ist im Jahresdurchschnitt mit etwa 1% von Q durchweg der geringste Anteil des Wärmehaushaltes und wird daher häufig vernachlässigt. Bei Wäldern ergibt P im Kronenraum mit der Bestandsluft und B zusammen den Strom B, muß jedoch getrennt bestimmt werden (RAUNER 1966).

Die Wärmeströme L (fühlbare Wärme) und V (latente Wärme) können normalerweise nicht direkt gemessen werden, sondern müssen rechnerisch bestimmt werden aus dem Gradienten von T und q , der Temperatur und der spezifischen Feuchte, und zwar unter den Voraussetzungen des Austausches nach SCHMIDT (1925) mit der Methode von SVERDRUP (1936) aus dem Bowen-Verhältnis R = L/V nach BOWEN (1926).

Bei den Waldbeständen liegt der Hauptumsatz im Kronenraum. Im Gegensatz zur festen Erdoberfläche und den niedrigen Pflanzenbeständen verteilen sich die Umsätze in Wäldern praktisch auf eine größere Kronenschicht, die mit dem Stammraum und der Bodenoberfläche in Beziehung steht. Als zweite Umsatzfläche geringerer Bedeutung wirkt die Oberfläche des Erdbodens. Die Werte sind jedoch im Gesamtwert für B enthalten. Für die Wiese wurden die Umsatzflächen nicht getrennt. EILS (1972) konnte aber nachweisen, daß der Anteil von B und P mit der Höhe des Wiesenbestandes variiert.

Die Erwärmung eines Pflanzenbestandes durch die Einstrahlung setzt einen konvektiven Austauschprozeß in Gang, durch den fühlbare Wärme, in Form von erwärmter Bestandesluft, und latente Wärme in Form von verdunstendem Wasser, an die Atmosphäre abgegeben wird. Rund 80-90% der Strahlungsbilanz werden auf diese Weise verbraucht (FRANKENBERGER 1955). Der Rest wird in Boden, Bestandsluft und Bestandsraum kurzfristig gespeichert, praktisch zusammengefaßt als Bodenwärmestrom B.

Die Jahresbilanz der Bestände ist soweit ausgeglichen, daß der Strahlungsüberschuß durch L + V in die Atmosphäre abgeführt wird, während der Bodenwärmestrom Null wird (FRANKENBERGER 1953/54, TAJCHMAN 1967). Für die Primärproduktion der Pflanzenmasse verbleibt etwa 1% der Bilanz (GEIGER 1961).

2.1 Vergleich der Bestände

Beim Vergleich der drei Bestände W1, B1, F1 im Solling zeigt sich, daß die Tagessummen der Globalstrahlung, wie auch die der Gegenstrahlung oft nahezu gleich sind. Die Strahlungsbilanz der Bestände, also das Resultat der von den Pflanzen ausgenutzten und umgesetzten Strahlungsenergie unterscheidet sich dagegen ganz erheblich voneinander +). Das liegt an der unterschiedlichen Albedo und Ausstrahlung der einzelnen Bestände. Die Albedo betrug z.B. im Juli 1971 für W1 22.9, B1 13.9 und F1 5.8% als Monatsmittel. Im Zusammenhang damit und in Abhängigkeit von der Transpiration und Benetzung unterscheiden sich auch die Werte der langwelligen Eigenstrahlung der Bestände.

+) Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse der früheren Mitarbeiter im Sollingprojekt, Dr. O. Kiese und Dipl.-Geogr.' C. Kayser, herangezogen (KAYSER u. KIESE 1973).

Insgesamt ergibt sich tagsüber eine Bilanz, die während der positiven Phase bei W1 21%, bei B1 28% und bei F1 30% der Gesamteinstrahlung, also von [(S + H) + A] beträgt. Als effektive Anteile, bezogen auf die Globalstrahlung sind das 50%, 56% und 70% von (S + H).

Die mittleren Tageswerte für den Juli 1971 ergeben eine entsprechende Verteilung der Energieumsätze in den drei Beständen. Die Durchlässigkeit der Bestände für die kurzwellige Strahlung ist ähnlich gereiht, W1 hat die größte Durchlässigkeit, wenn auch abhängig von der Bewuchshöhe, B1 bei voller Belaubung 5-7%, F1 nur 4% Transmission. Daher bleibt der Fichte ein größerer Anteil der Strahlung im Kronenraum, da ja auch die Albedo geringer ist. Von der Fichte wird also mehr Strahlungsenergie in Wärme und Verdunstung umgesetzt als von der Buche. Die mittleren Beträge für die Verdunstung liegen bei etwa 60% der Bilanz, und zwar bei der Buche etwas höher als bei der Fichte. Trotzdem verdunstet die Fichte insgesamt mehr Wasser als die Buche (100 mm zu 76 mm im Juli nach KAYSER u. KIESE 1973). Der prozentuale Anteil von V an der Wärmebilanz der Wiese ist im Sommer noch höher - um 70% - während er im Frühjahr und Herbst bei etwa 40-50% liegt, in Abhängigkeit von der Grasentwicklung. Das entspricht auch Messungen von FRANKENBERGER (1953/54).

Im konkreten Fall mußte der größte Teil der Verdunstung aus dem Bodenvorrat entnommen werden, da der Monatsniederschlag im Juli 1971 nur 17.6 mm betrug, so daß die Fichte 24 mm mehr Wasser aus dem Grundwasservorrat verbrauchte als die Buche.

Tab. 1: Tagessummen der Wärmebilanz in kJ m^{-2} d^{-1} und des Niederschlages in mm im Buchenbestand B1 im Mai 1972 an ausgewählten Tagen (in Klammern Tage mit teilweisem Meßausfall)

Datum	Q	B	V	L	P	Niederschlag	
3.5.	(6068.2)	(-834.8)	(-6020.8)	(452.0)	(335.4)	-	vor Laubausbruch
6.5.	(14015.0)	(-961.4)	(-5200.1)	(-7375.0)	(-478.5)	-	teilweiser Laubausbruch
9.5.	7311.8	-661.8	-3793.0	-2995.2	138.2	4.9	
12.5.	5523.3	191.2	-5530.0	- 240.7	56.2	7.0	
17.5.	1395.1	326.1	-1472.6	- 153.7	- 94.9	2.0	
18.5.	4433.1	- 9.3	- 924.5	-3268.8	-230.5	-	
21.5.	5090.4	-604.6	65.0	-4463.1	- 87.7	-	
24.5.	5554.7	-595.7	-1273.1	-4258.3	572.4	6.2	
26.5.	5721.8	-146.7	-5524.2	- 190.7	139.8	5.8	
27.5.	4782.6	294.2	-1478.0	-3438.0	-160.8	13.2	voller Laubausbruch

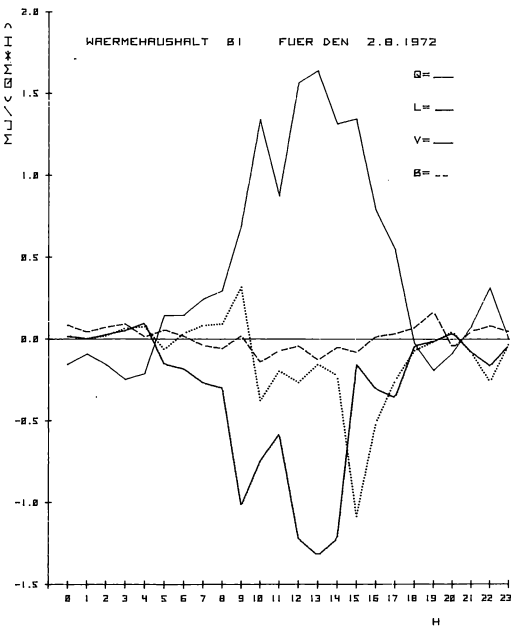

Abb. 2: Tagesgänge der Energieströme im Buchenbestand B1 am 2.8.1972

2.2 Niederschlag und Wärmehaushalt

Zur besseren Übersicht werden in Tab. 1 Tagessummen der Wärmehaushaltsgrößen vom Mai 1972 für den Buchenbestand B1 zusammengestellt. Sie werden mehrfach zum Vergleich herangezogen.

Tab. 2: Mittlere Tagessummen der Wärmebilanzen der Stationen B1 und F1 (kJ m^{-2} d^{-1})

		Q	B	V	L	P
25.-31.Mai 1972	B1	5460	34	-3222	-2383	111
	F1	5067	56	-4934	- 259	60
August 1972	B1	6288	-65	-4140	-2201	118
	F1	4558	-68	-4032	- 523	65

Daß die Verdunstung bzw. die Aufteilung auf L und V durch das Wasserangebot beeinflußt wird, zeigen folgende Tagessummen des Wärmehaushaltes, verglichen mit den Niederschlägen aus Tab. 1. Der letzte Niederschlag vor einer 9-tägigen Trockenperiode fiel in B1 am 1 . Mai 1972. Der 17.5.72 zeigt ein Überwiegen von V; am 18.5. herrscht starke Erwärmung mit einem Rückgang von V; am 21.5. weitere sehr starke Erwärmung und leichter Taufall; am 24.5. Beginn einer Niederschlagsperiode; noch dominiert L, aber am 26. und 28.5. überwiegt wieder V.

So schwankt das Verhältnis der Wärmeströme außerordentlich stark, wenn auch die Tendenzen im großen und ganzen gleich liegen.

2.3 Variabilität im Jahres- und Tagesgang

Der Buchenwald ist ein Ökosystem mit großen jahreszeitlichen Unterschieden. Während der laublosen Phase dringt die Globalstrahlung in den Bestand ein und erreicht zu mehr als 40% den Boden. Das zeigt das Verhältnis der Globalstrahlung am Erdboden zu derjenigen über dem Bestand (Abb. 1 nach GARVE 1976). Mit dem Blattaustrieb nimmt der Betrag der Transmission rasch ab und erreicht bei voll entfalteter Belaubung nur noch Werte um 5-7% der ungehinderten Globalstrahlung. Die damit zusammenhängende prozentuale Abnahme von B zeigen drei Tage aus dem Mai 1972 (Tab. 1). Der 3.5., unmittelbar vor Laubausbruch hat einen großen Betrag von B (rd. 15% von Q), am 6.5. waren es nur noch 9%; am 27.5. erfolgte dagegen eine Wärmeentnahme aus dem Boden.

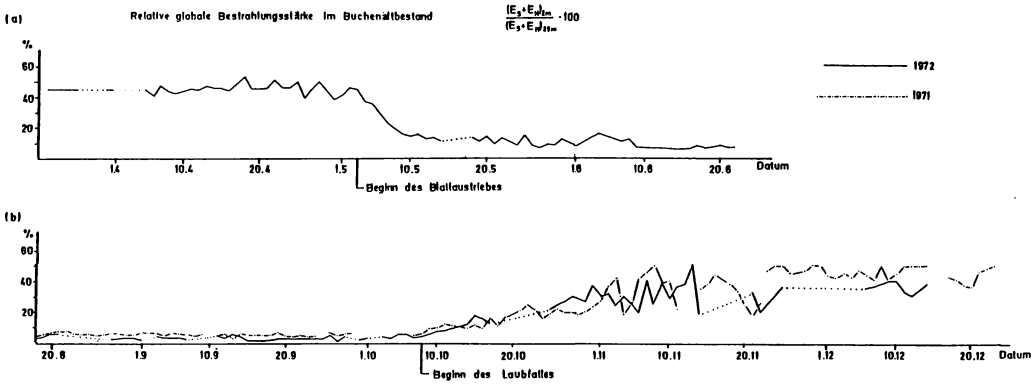

Abb. 1: Relative globale Bestrahlungsstärke im Buchenbestand B1 (nach GARVE 1976)

Der tatsächliche Tagesgang der Wärmeströme ergibt sich aus Diagrammen der Bestände W1, B1 und F1 (Abb. 2, 3, 4). Hier zeigt sich auch die starke Variation im Tagesgang, die oft zu beobachten ist. Geringe Änderungen der Bewölkung wirken auf die Strahlungsbilanz und ändern damit alle anderen Ströme. Selbst an scheinbar wolkenlosen Strahlungstagen sind solche Schwankungen zu sehen.

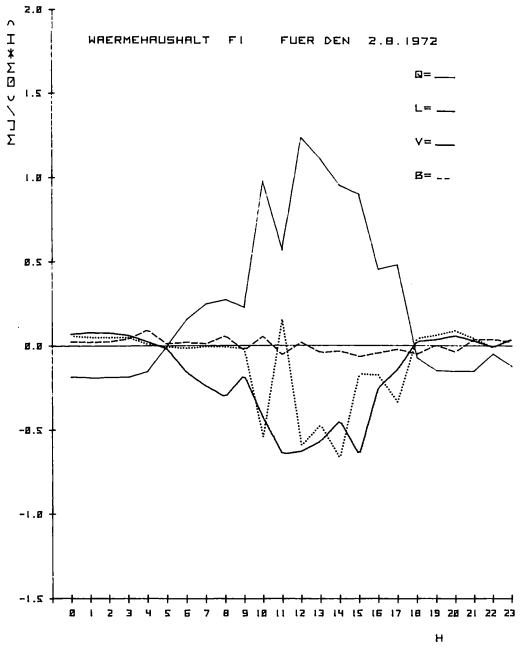

Abb. 3: Tagesgänge der Energieströme im Fichtenbestand F1 am 2.8.1972

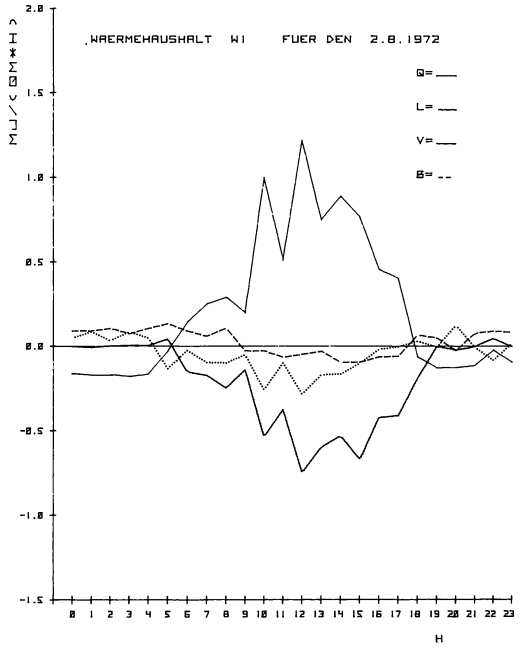

Abb. 4: Tagesgänge der Energieströme der Wiese W1 am 2.8.1972

Die Energieumsätze im Winter sind nur Bruchteile der Umsätze im Sommer. Zum Vergleich seien einige Tage mit Extremwerten von F1 zusammengestellt (Tab. 3). Im März ist es der maximale Strahlungstag des Monats mit einer geschlossenen Schneedecke, im April und Juli sind es jeweils die Tage mit den höchsten und niedrigsten Strahlungsbilanzen des Monats.

Tab. 3: Extremtageswerte der Energiebilanz (MJ m^{-2} d^{-1}) der Station F1

Datum	Q	B	V	L	P
10.3.72	.1	.1	- .3	- .1	.1
6.4.72	- .3	.2	.1	- .1	.1
30.4.72	-1.8	-1.4	8.7	-5.0	- .5
5.7.72	6.1	- .3	-3.4	-2.3	- .1
28.7.72	1.1	- .2	- .4	- .5	.0

3. Bewertung

Welche Beziehungen ergeben sich für den Ökologen aus derartigen Messungen? Nach der Standortdefinition von WALTER (1951) sind die meteorologischen Faktoren ein Teil des Standortes. Durch die energetische Betrachtungsweise ist es möglich, die Einzelfaktoren zu Haushaltsgrößen zusammenzufassen. Sie sind nicht unabhängig voneinander, sondern bilden ein System. Dabei ist der Energieverbrauch der einzelnen Größen begrenzt und wird nach der Art eines Rückkoppelungssystems von den anderen geregelt.

Nach BERGER-LANDEFELDT (1964), der die meteorologischen Standortsmessungen im Solling initiiert hat, ist es "... Aufgabe der Ökologie, die Pflanzen ..." - und ich muß hinzufügen, allgemein die Lebewesen - "... in ihren Wechselbeziehungen zur Umwelt, mit der sie als Teile der gesamten Natur auf das Engste verknüpft sind, zu begreifen." Dazu sollen unsere Messungen einen Beitrag liefern.

Literatur

BAUMGARTNER A., 1956: Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Ber. Dt. Wetterdienst 5(28).

BERGER-LANDEFELDT U., 1964: Über den Strahlungshaushalt verschiedener Pflanzenbestände. Ber. Dt. Bot. Ges. 77: 27-48.

BOWEN J.S., 1926: The ratio of heat losses by condensation and by evaporation from any surface. Physic. Rev. 27: 779.

EILS W., 1972: Der Wärmehaushalt einer Wiese in Abhängigkeit von unterschiedlicher Bestandshöhe. Ber. Inst. Met. u. Klimat. TU Hannover 7.

ELLENBERG H. (Ed.), 1971: Integrated experimental ecology. Berlin (Springer).

FRANKENBERGER E., 1953/54: Messungen der natürlichen Verdunstung über Gras nach verschiedenen Methoden und einige Folgerungen betreffend atmosphärischer Turbulenz und Konvektion. Ann. Met. 6(1).

- , 1955: Über vertikale Temperatur-, Feuchte- und Windgradienten in den untersten 7 Dekametern der Atmosphäre, den Vertikalaustausch und den Wärmehaushalt am Wiesenboden bei Quickborn/Holst. Ber. Dt. Wetterdienst 3(20).

GARVE C.-J., 1976: Temperatur- und Feuchteprofile eines Buchenaltbestandes im Solling. Diplomarbeit Inst. Met. u. Klimat. TU Hannover (unveröff.).

GEIGER R., 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht, 4. Aufl. Braunschweig (Vieweg).

KAYSER C., KIESE O., 1973: Energiefluß und -umsatz in ausgewählten Ökosystemen des Sollings. Tagungsber. u. wiss. Abh. Dt. Geographentag Kassel: 484-491.

KIESE O., 1971: The measurements of climatic elements which determine production in various plant stands. In (Ed. H. Ellenberg): Integrated experimental ecology. Berlin (Springer): 132-142.

- , 1972: Bestandmeteorologische Untersuchungen zur Bestimmung des Wärmehaushaltes eines Buchenwaldes. Ber. Inst. f. Met. u. Klimat. TU Hannover 6.

LANGE O.L., SCHULZE E.-D., 1971: Measurement of CO_2 gas-exchange and transpiration in the beech (*Fagus silvatica* L.). In (Ed. H. Ellenberg): Integrated experimental ecology. Berlin (Springer): 16-28.

RAUNER J.L., 1966: Methodik und einige Ergebnisse der experimentellen Erforschung des Wärmehaushaltes der Waldbestände. Angew. Meteorol. 5: 157-165.

SCHMIDT W., 1925: Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probleme der kosm. Physik 7.

STRAUSS R., 1971: Energiebilanz und Verdunstung eines Fichtenwaldes im Jahre 1969. Wiss. Mitt. Met. Inst. Univ. München 23.

SVERDRUP H.U., 1936: The eddy conductivity of the air over a smooth snow field. Geophys. Publ. 11(7).

TAJCHMAN S., 1967: Energie- und Wasserhaushalt verschiedener Pflanzenbestände bei München. Wiss. Mitt. Met. Inst. Univ. München 12.

WALTER H., 1951: Grundlagen der Pflanzenverbreitung: Standortslehre. Stuttgart (Ulmer): 566 S.

Adresse

Dr. Fritz Wilmers
Inst. f. Meteorologie u. Klimatologie TU
Herrenhäuser Str. 2

D-3000 Hannover 21

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie

Jahr/Year: 1978

Band/Volume: 7_1978

Autor(en)/Author(s): Wilmers Fritz

Artikel/Article: Energiehaushalt der Pflanzenbestände im Solling 565-571