Angew. Botanik **63**, 403—415 (1989)
© 1989, Vereinigung für Angewandte Botanik, Göttingen
ISSN 0066-1759/ASTM-Coden: ANBTAJ

Deutscher Wetterdienst,
Agrarmeteorologische Beratungs- und Forschungsstelle Geisenheim;
Forschungsanstalt Geisenheim,
Fachgebiet Weinbau und Fachgebiet Rebenzüchtung und Rebenveredlung

Windverhältnisse in einer klimatisierten Gaswechselkammer

Von
H. Hüster, W. Bettner und R. Ries

(Eingegangen am 26. 4. 1989)

Summary

Wind Pattern in a Gas Exchange Chamber

The measurements of wind velocities with a sensible thermal anemometer show a very heterogeneous and for the used type of gas exchange chamber a typical wind pattern. A single vine leaf prominently changes the wind pattern in the chamber. The wind velocities in the gas exchange chamber at a medial rotation number are higher than in the natural environment. The results of a leaf transpiration model show a considerable dependence of the transpiration on the wind velocity modulated by other meteorological environmental conditions. To get more realistic transpiration data, the wind velocity in the chamber should be conformed to the prevailing wind conditions outside.

1. Einleitung

Die Freilandmessung der Transpirations- und Nettophotosyntheseraten an Rebblättern soll mit Gaswechselkammern unter möglichst natürlichen Bedingungen erfolgen. Man erreicht dies mit elektronischen Regelmechanismen für die Temperatur und die Luftfeuchte. Die Windgeschwindigkeit wird dagegen konstant gehalten. Wenn die Gaswechselkammer für die Bestimmung des Stomatawiderstandes eingesetzt wird, ist eine ausreichend hohe Windgeschwindigkeit notwendig, um den Grenzschichtwiderstand an der Blattoberfläche und damit den Meßfehler niedrig zu halten. Werden jedoch Transpirationsmessungen im Freiland gemacht, dann muß die Windgeschwindigkeit den natürlichen Bedingungen außerhalb der Gaswechselkammer angepaßt werden, weil sie je nach Konstellation der mikrometeorologischen Bedingungen erheblichen Einfluß auf die Transpiration eines Blattes haben kann (Campbell, 1977). Wegen des Fehlens der Regelmechanismen für den Wind in der Gaswechselkammer ist es nicht möglich, die äußeren mikrometeorologischen Bedingungen der erzwungenen oder freien Konvektion über dem Blatt in dieser nachzuvollziehen. Welche physiologische Bedeutung den wechselnden Grenzschichtbedingungen zukommt, ist noch weitgehend unbekannt. Es läßt sich aber vermuten, daß mit zunehmender Windgeschwindigkeit der Stomatawiderstand größer wird (Burrows und Milthrope, 1976).

Über die Verteilung der Windgeschwindigkeiten in einer klimatisierten Kammer soll in dieser Arbeit berichtet werden. Es werden die Unterschiede der Geschwindigkeit in verschiedenen Schichten der Kammer und der Einfluß eines Blattes auf das Strömungsfeld gezeigt. Abschließend werden am Beispiel eines mathematischen Blattmodells die Auswirkungen der Windgeschwindigkeit auf die Transpiration abgeschätzt.

2. Material und Methoden

2.1. Material

Die Messungen wurden in zwei baugleichen Gaswechselkammern (Abb. 1) durchgeführt, die zur Ermittlung der Nettophotosynthese- und Transpirationsleistung von Rebblättern eingesetzt werden. Die Kammern haben ein Volumen von 8 Litern und sind aus Plexiglas gebaut. Es ist möglich, in diesen Geräten unter anderem die Temperatur zu regeln. Dazu ist ein Peltieraggregat vorgesehen, welches mit einem Teil in die Kammer eingebaut ist. Es wird mit einem Luftleitblech zum Meßraum abgeschlossen. Das Leitblech hat die Aufgabe, den Luftstrom, der durch ein Querstromgebläse, welches an der Stirnseite innerhalb der Kammer eingebaut ist, erzeugt wird, über die Peltierelemente zu führen. Dieses Gebläse ist notwendig für die gute Durchmischung der Luft in der Kammer. Der Raum über dem Luftleitblech mißt 320 mm Länge, 215 mm Breite und 65 mm Höhe. Der Strom der Luft wird vom Gebläse durch die Rippen des Peltieraggregates gedrückt und

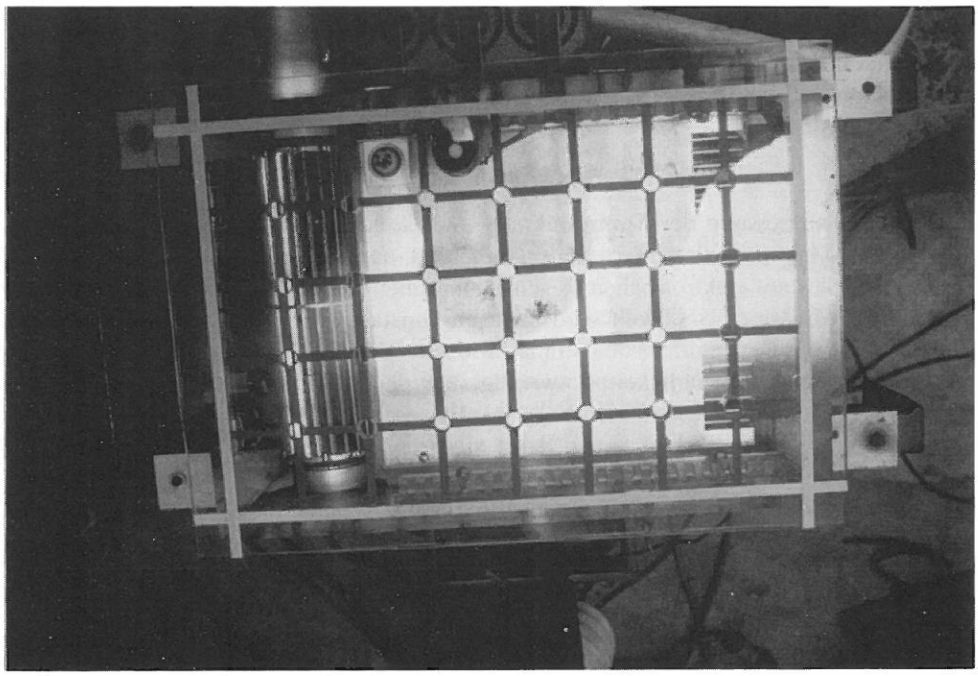

Abb. 1: Versuchsanordnung mit der Gaswechselkammer und der modifizierten Abdeckung für Windmessungen.

kommt an der gegenüberliegenden Seite heraus, durch die das Blatt eingeführt werden kann.

Die Messungen der Windgeschwindigkeit erfolgten in zwei leeren Kammern sowie in einer Kammer mit einem Rebblatt, um die durch das Rebblatt auftretenden Veränderungen der Windgeschwindigkeit zu erfassen. Für diese Untersuchungen wurde ein ausgewachsenes Rebblatt einer Topfrebe der Sorte Müller-Thurgau verwendet.

2.2 Methoden

Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgte in allen Fällen mit einem thermischen Anemometer (Modell 4100 der Fa. Testoterm), das besonders für niedrige Windgeschwindigkeiten geeignet ist. Als Meßelement dient ein NTC-Widerstand, der durch eine elektronische Regelung so erwärmt wird, daß der Widerstandswert 100 °C entspricht. Der Widerstand, der in einer Perle sitzt, wird durch die Luftströmung abgekühlt und durch die Regelung wieder auf eine Temperatur von 100 °C aufgeheizt. Der für die Erwärmung benötigte Heizstrom ist der Windgeschwindigkeit proportional. Die Windgeschwindigkeit kann auf einer analogen Skala abgelesen werden. Je nach zu erwartender Windgeschwindigkeit kann aus zwei Meßbereichen ausgewählt werden. Die Genauigkeit liegt beim Meßbereich 0 bis 2 m/s bei ± 0,05 m/s und beim Meßbereich 2 bis 20 m/s bei ± 0,5 m/s.

Das Blatt wurde gegenüber dem Querstromgebläse mit dauerelastischem Kitt (Terrostat) eingebaut. Dazu war es notwendig, die Topfrebe möglichst nahe an die Kammer zu bringen, damit der Blattstiel und damit das gesamte Blatt weit in die Kammer hineinragen konnte (10 bis 12 cm). Um eine exakte Dichtung im Deckel der Kammer zu erreichen, wird die Einfuhröffnung für den Blattstiel mit einem zylindrischen Stopfen verschlossen, der in die Kammerwand eingepaßt ist.

Für die Messung der Windgeschwindigkeit an verschiedenen Punkten war es notwendig, einen Deckel anzufertigen, der 28 Bohrungen im Abstand von 40 mm enthielt (Abb. 1). Die Bohrungen waren in 4 Reihen mit je 7 Löchern angeordnet. Der Abstand der Löcher zum Küvettenrand betrug jeweils 20 mm.

Der Fühler des Anemometers war an einer teleskopartigen Verlängerung angebaut, mit der die Messungen der Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Abständen vom

Tab. 1: Umdrehungszahlen der Querstromlüfter von zwei Gaswechselkammern (1/min.).

Stufe	Gaswechselkammer 1	Gaswechselkammer 2
0	1739	1776
1	1786	1808
2	1883	1889
3	1982	2010
4	2140	2129
5	2278	2280
6	2419	2444
7	2611	2636
8	2812	2846
9	2964	3046

Leitblech durchgeführt wurden. Dazu waren jeweils 27 Löcher mit Stopfen verschlossen. In jedem Loch wurden die Messungen nacheinander in 1,5 cm, 3,0 cm und 3,8 cm Abstand vom Leitblech durchgeführt. Bei der Meßserie mit Blatt, das sich in 4,5 cm Höhe befand, wurde zusätzlich in 5,6 cm Höhe gemessen.

Die Drehzahl des Gebläses ließ sich mit Hilfe eines Potentiometers stufenlos einstellen. Für die Messungen wurden am Potentiometer zehn gleich große Skalenschritte gewählt. Da die Umdrehungszahl für die einzelnen Schritte nicht bekannt war, wurde sie mit Hilfe eines Stroposkopdrehzahlmessers ermittelt.

Für die Darstellung der Windgeschwindigkeitsverteilung in einer Ebene eignen sich besonders gut Isolinien. Isolinien verbinden Punkte benachbarter gleicher Werte, in diesem Fall Punkte gleicher Windgeschwindigkeit. Geschlossene Isolinien umfassen ein Maximum oder Minimum. Die Art des Extremums hängt davon ab, ob der Gradient senkrecht zur Isolinie zu- oder abnimmt. Je dichter die Isolinien beieinander liegen, desto stärker ist der Gradient der Windgeschwindigkeit. Isolinien sind i. a. geschlossene Gebilde ohne Anfang und Ende. Nur in einem Ausschnitt können solche Linien mit Anfang und Ende auftreten.

Im Fall der Abbildungen 2 bis 4 wird der Ausschnitt durch die 18 der 28 Meßpunkte am Rand des Kammerdeckels festgelegt. Prinzipiell können die Isolinien darüber hinaus bis zu den Wänden der Gaswechselkammer gezeichnet werden, weil hier die Windgeschwindigkeit Null ist. Jedoch wurde in den Abbildungen darauf verzichtet, da durch die starke Drängung der Isolinien am Rand die Darstellung unübersichtlich werden würde. Die Isolinien sind in Stufen zu 0,2 cm gezeichnet.

3. Ergebnisse

3.1. Windgeschwindigkeiten in der Gaswechselkammer

Die horizontale Verteilung der Windgeschwindigkeit wird durch Linien gleicher Windgeschwindigkeit (Isotachen) in den Abbildungen 2 bis 4 dargestellt. Der Ventilator befindet sich am oberen Rand der Isotachendarstellung und die Strömung ist zum Ventilator gerichtet.

Aus den Abbildungen erkennt man, daß die Windgeschwindigkeit in einer Ebene der Gaswechselkammer sehr unterschiedlich verteilt war. Die Abbildung 2a zeigt die Windgeschwindigkeitsverteilung bei der niedrigsten Umdrehungszahl des Ventilators in der Ebene 3 cm über dem Luftleitblech. Das Minimum lag unterhalb von 1 m/s in der Mitte der Kammer. Die Geschwindkeit nahm in Richtung Ventilator zu und stieg am rechten oberen Meßpunkt auf über 2,6 m/s. An den vier Meßpunkten, die sich an der dem Ventilator gegenüberliegenden Seite befanden, stieg die Windgeschwindigkeit nicht über 2 m/s.

Die Abbildung 2b zeigt die Geschwindigkeitsverteilung bei einer mittleren Drehzahl. Jetzt lag das Minimum bei 1,4 m/s und das Maximum stieg auf 3,4 m/s.

Die Abbildung 2c zeigt die Isoliniendarstellung bei der höchsten einstellbaren Umdrehungszahl. Das Minimum lag dabei unterhalb 1,6 m/s und das Maximum oberhalb 3,4 m/s an der linken und rechten Seite vor dem Querstromlüfter.

Das Verhältnis zwischen kleinster und größter Windgeschwindigkeit betrug 1:3, gleichgültig welche Umdrehungszahl des Ventilators eingestellt wurde (Abb. 2, Tab. 2). Markant waren in allen Fällen das Minimum in der Mitte der Kammer und die hohen

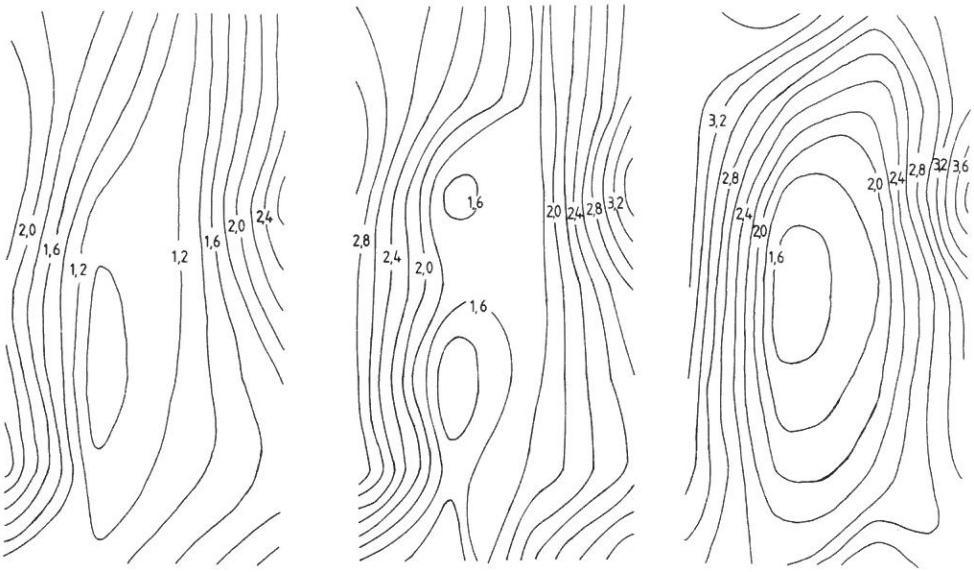

Abb. 2a
Windstufe 0
1739 U/min

Abb. 2b
Windstufe 5
2278 U/min

Abb. 2c
Windstufe 9
2964 U/min

Abb. 2: Horizontale Verteilung der Windgeschwindigkeit (m/s) in Abhängigkeit von der Drehzahl des Querstromlüfters in 3 cm Höhe in der Gaswechselkammer

Strömungsgeschwindigkeiten an der seitlichen Berandung. Dieses Muster wurde in den verschiedenen Höhenschichten und bei zwei bauartgleichen Kammern festgestellt und kann somit als typisch für diese Bauform angesehen werden.

Die Abbildung 3 zeigt die Windgeschwindigkeit in den Flächen 1,5 cm (Abb. 3a), 3 cm (Abb. 3b) und 3,8 cm (Abb. 3c) über dem Luftleitblech. Bei Betrachtung der Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen zeigt sich eine Zunahme der Geschwindigkeit mit der Höhe bis in 3,8 cm über dem Blech. Die höchsten Windgeschwindigkeiten wurden also gerade in dem Höhenbereich erreicht, in dem sich das Blatt befindet. Im oberen Teil der Kammer war die Windgeschwindigkeit gleichmäßiger als im unteren Teil, obwohl sich auch hier in der Mitte eine windschwache Zone ausgebildet hatte.

In der Abbildung 4 ist der Einfluß eines Rebblattes auf die Windgeschwindigkeit dargestellt. Das Blatt befindet sich in 4,5 cm Höhe und füllt etwa die untere Flächenhälfte in der Isotachendarstellung aus (Abb. 4b). Die Windgeschwindigkeit wurde unterhalb des Blattes gemessen. Das Blatt änderte das Windfeld erheblich. Dies wird deutlich an der Abbildung 4a, in der die Windverhältnisse in der Kammer ohne Blatt dargestellt sind, und hier besonders an der Stirnseite der Küvette, wo der Blattstiel in die Kammer eingeführt wird. Bei großen, stark gelappten Blättern berühren die Blattränder die Wände und werden umgebogen. Dadurch entstehen Leitflächen für die Strömung, die zu unerwartet hohen Windstärken führen und individuell sehr unterschiedlich sein können. Die Wind-

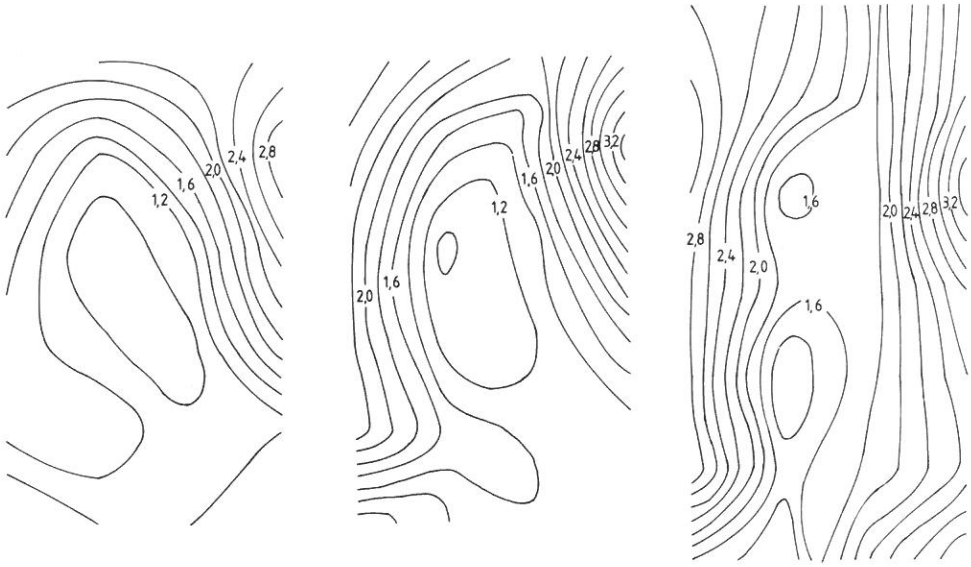

Abb. 3a
1,5 cm Höhe

Abb. 3b
3,0 cm Höhe

Abb. 3c
3,8 cm Höhe

Abb. 3: Horizontale Verteilung der Windgeschwindigkeit (m/s) in unterschiedlicher Höhe bei konstanter Umdrehungszahl (2278 U/min)

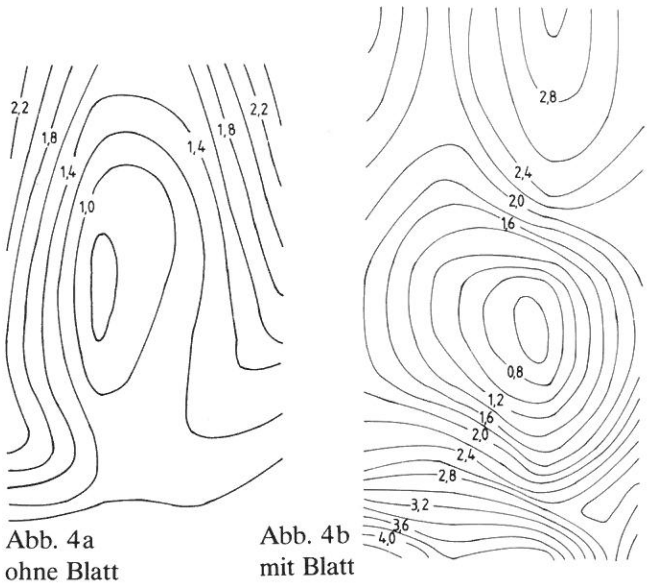

Abb. 4a
ohne Blatt

Abb. 4b
mit Blatt

Abb. 4: Einfluß eines Rebblattes (*Vitis vinifera* L.) auf die horizontale Verteilung der Windgeschwindigkeit (m/s) bei konstanter Umdrehungszahl (1982 U/min) in der Gaswechselkammer

Tab. 2: Vergleich der Windgeschwindigkeitsmessungen bei Windstufe 5 in m/sec.

Entfernung	ohne Blatt			mit Blatt				
Ventilator	1,5	3,0	3,8	1,5	3,0	3,8	5,6	cm Höhe
0 cm	—	—	2,5	—	—	2,3	1,6	
4	2,3	2,4	2,5	2,2	2,3	2,3	2,2	
8	1,9	2,3	2,5	1,9	1,7	2,1	2,3	
12	1,5	1,8	2,3	1,6	1,3	1,4	2,6	
16	1,3	1,6	2,1	1,3	1,6	1,5	3,1	
20	1,2	1,6	2,2	1,6	2,5	2,5	3,2	
24	0,9	1,2	2,1	1,0	2,6	3,6	3,8	
max.	3,0	3,5	3,6	2,5	3,5	4,5	4,8	
min.	0,8	1,0	1,2	0,6	0,6	0,7	1,0	
max./min.	3,8	3,5	3,0	4,2	5,8	6,4	4,8	

geschwindigkeit nahm dagegen nach kurzer Wegstrecke infolge starker Reibung rasch ab und war sogar niedriger als in einer Kammer ohne Blatt. Die Behaarung an der Blattunterseite, die von der Sorte abhängt, wirkte hier dämpfend. Die Tabelle 2 zeigt in der Gegenüberstellung die mittleren Windgeschwindigkeiten bei konstanter Umdrehungszahl des Ventilators mit und ohne Blatt. Der starke Einfluß des Blattes auf die Strömung wird besonders deutlich an den Minima und Maxima der Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten, auch im Mittel, wurden an der glatten Oberseite des Blattes erreicht. Sie nahmen nicht so stark mit der Entfernung von der Kammerwand ab wie auf der Blattunterseite. Die im Mittel höchsten Windgeschwindigkeiten wurden natürlich dort erreicht, wo die Luft von unten durch einen schmalen Spalt zwischen Peltier-Element und Wand der Gaswechselkammer in den Meßraum gedrückt wird. Sie entstehen also infolge eines Düseneffektes. In der untersten Schicht in 1,5 cm Höhe ist der Einfluß des Blattes vernachläßigbar gering.

3.2 Windgeschwindigkeit im Bestand während einer Vegetationsperiode

In der Tabelle 3 sind für die Vegetationsperiode 1986 die mittleren Windgeschwindigkeiten über 10 Tage, gebildet aus halbstündigen Windwegmessungen, sowie einige andere statistische Kenngrößen aufgeführt. Sie wurden in einer Weitraumanlage mit einem Zeilenabstand von 2,4 m in 2 m Höhe über Grund in der Zeilenmitte gemessen. Bei voller Laubentwicklung betrug die Laubwandhöhe 2 m. Die Windgeschwindigkeit verlangsamte sich bei zunehmender Entwicklung der Laubwand. Ab Juli überstieg sie nicht mehr die 1 m/s-Grenze und in 90 % der halbstündigen Mittelwerte wurde 1,6 m/s nicht mehr überschritten. Der Vergleich zeigt, daß im Freiland nie so hohe Windgeschwindigkeiten erreicht werden wie in der Kammer bei mittleren Umdrehungszahlen des Ventilators. Erst bei einer Einstellung der Umdrehungszahl auf die Stufe 0 (entspricht etwa 1700 bis 1800 U/min) sind mit der Umgebung vergleichbare Windgeschwindigkeiten wie im Freiland zu erreichen.

Tab. 3: Dekadenmittel der Windgeschwindigkeit am Standort Rüdesheimer Magdalenen Kreuz 1986 in 2 m Höhe in m/s.

Tage des Jahres	Mittel	Standard-abweichung	Minimum	Maximum	90 %-Percentile
120—129	2.0	1.56	0.1	7.9	3.9
130	1.5	1.16	0.1	5.4	3.3
140	1.4	0.94	0.1	6.2	2.7
150	1.5	0.99	0.0	5.0	2.9
160	1.3	0.95	0.0	7.2	2.5
170	1.1	0.64	0.0	3.2	1.9
180	0.7	0.50	0.0	2.5	1.5
190	0.8	0.63	0.0	3.3	1.6
200	0.7	0.50	0.0	4.0	1.4
210	0.8	0.52	0.0	2.4	1.6
220	0.6	0.39	0.0	2.0	1.1
230	0.7	0.49	0.0	2.4	1.5
240	0.6	0.38	0.0	1.8	1.2
250	0.7	0.49	0.0	2.5	1.3
260	0.7	0.45	0.0	1.9	1.4
270	0.6	0.38	0.0	2.1	1.1
280	0.5	0.41	0.0	2.8	1.0
290—299	0.7	0.63	0.0	3.3	1.6

3.3 Untersuchung der Windabhängigkeit der Transpiration mit einem mathematischen Blattmodell

Welche Auswirkungen die Windgeschwindigkeit auf die Transpiration hat, soll mit Hilfe eines vereinfachten Verdunstungsmodells eines Blattes gezeigt werden. Die Formulierung des Modells geht auf Penman (1949) zurück, wurden von Monteith (1965) modifiziert und für Anwendungen vielfach benutzt, z. B. Campbell (1977), Monteith (1978), Jarvis und Morison (1981).

$$E = 600 \frac{s \cdot R_n \rho \cdot c_p \cdot D/R_H}{L \cdot (s + \gamma \cdot R_V/R_H)}$$

Für den Widerstand des Wärmetransportes R_{Ha} in einer laminaren Strömung bei erzwungener Konvektion gilt der Ansatz (Campbell, 1977)

$$R_{Ha} = 307 \cdot \left[\frac{d}{u} \right]^{0,5}$$

Mit dem Ansatz für turbulente Strömung ergeben sich im mikrometeorologischen Skalenbereich ähnliche Werte, so daß die Unterschiede in der Strömung hier vernachläßigt werden können (Monteith, 1978). Da am Blatt von beiden Seiten Wärme transportiert wird, sind die Widerstände parallel geschaltet, und es ist $R_H = R_{Ha}/2$. Vorausset-

zung ist, daß die Widerstände auf beiden Blattseiten identisch sind. Der Widerstand des Wasserdampftransportes ist eine Reihenschaltung des Stomatawiderstandes R_S und des Grenzschichtwiderstandes R_{Va}. Da der wesentliche Beitrag der stomatären Verdunstung nur von der Blattunterseite geleistet wird, gilt $R_V = R_S + R_{Va}$. Der Grenzschichtwiderstand des Wasserdampftransportes ist (Campbell, 1977)

$$R_{Va} = 283 \cdot \left[\frac{d}{u} \right]^{0,5}$$

Die Symbole haben folgende Bedeutung:

E = Transpiration in $mg/dm^2/min$
s = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve $g/m^3/Kelvin$
R_n = Nettostrahlungsbilanz $Watt/m^2$
ϱ = spezifisches Gewicht der Luft g/m^3
c_p = spezifische Wärme der Luft Joule/g/Kelvin
D = Sättigungsdefizit g/m^3
L = Verdampfungswärme Joule/g
γ = Psychochrometerkonstante $g/m^3/Kelvin$
d = Länge des Blattes in Strömungsrichtung m
u = Windgeschwindigkeit m/s

Der Zahlenfaktor 600 macht die Dimensionierung der Eingangsgrößen konsistent mit der Verdunstung in $mg/dm^2/min$. Bei der Untersuchung der Windgeschwindigkeitsabhängigkeit der Transpiration wurde das Modell für verschiedene Situationen, die durch die meteorologischen und pflanzenphysiologischen Parameter bestimmt wurden (Tab. 4), durchgerechnet. Bei der Gegenüberstellung von zwei extremen Einstrahlungsverhältnissen

Tab. 4: Modellparameter für unterschiedliche Randbedingungen.

		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Strahlungsbilanz	W/m^2	500	500	0	200	200	−10	−10
Lufttemperatur	°C	30	30	30	30	30	15	15
rel. Feuchte	%	80	80	80	30	30	90	90
Stomatawiderstand	s/m	200	2000	200	200	2000	200	2000

des Blattes — nämlich sehr hohe bzw. sehr niedrige Einstrahlung — zeigt sich eine gegenläufige Abhängigkeit der Transpiration von der Windgeschwindigkeit. Bei hoher Nettostrahlungsbilanz (Fall F1, Abb. 5) ist die Blattemperatur höher als die Umgebungstemperatur. In diesem Fall wird das Blatt mit zunehmender Windgeschwindigkeit abgekühlt. Das Sättigungsdefizit nimmt ab und die Transpiration wird um 28 % geringer. Unter Wasserstreßbedingungen (F2) bei hohem Blattwiderstand sinkt die Transpiration noch mehr und die Abnahme erreicht etwa 50 %. Geht die Nettostrahlungsbilanz bei niedriger Einstrahlung gegen Null (F3), dann nimmt das Blatt die Temperatur der Umgebung an. Unter diesen Bedingungen erhöht sich die Transpiration mit zunehmender Windgeschwindigkeit.

Die Variation der Transpiration bei meteorologischen Randbedingungen, wie sie im Sommer 1985 vorkamen, ist in der Abbildung 5 (Mitte und unten) durch die Kurven F4 bis F7 dargestellt. Bei mäßiger Nettostrahlungsbilanz (200 Watt/m^2), bezogen auf eine horizontale Fläche, sowie warmen Umgebungstemperaturen und niedriger Feuchte (F4) nimmt die Transpiration um 25 % mit der Windgeschwindigkeit zu. Bei dieser Konstella-

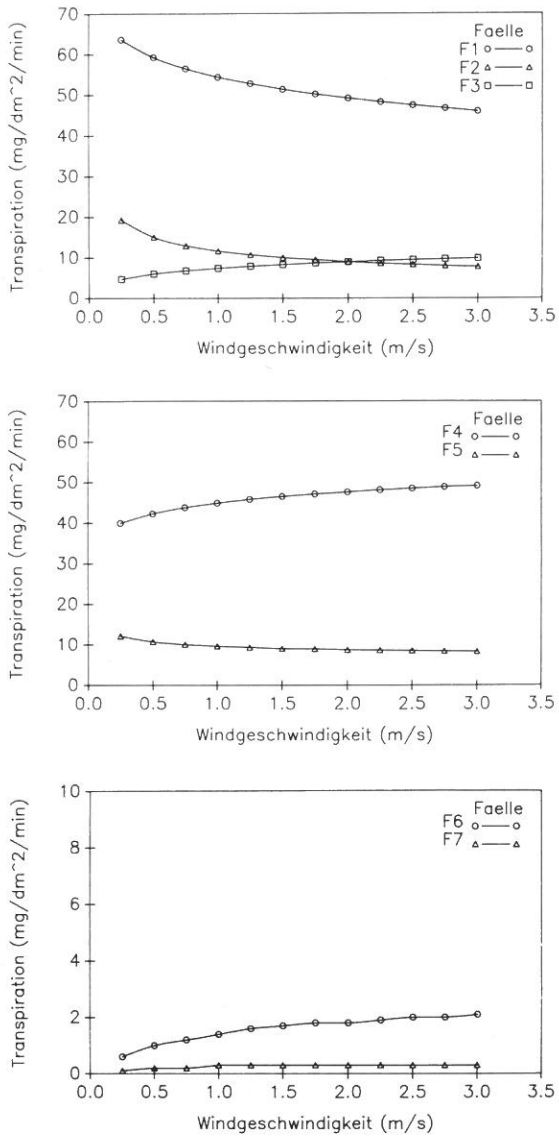

Abb. 5: Abhängigkeit der Transpiration von der Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Randbedingungen des Blattranspirationsmodells (zu den Parametern der Randbedingungen F1 bis F7 siehe Tabelle 4)

tion der meteorologischen Umgebungsbedingungen ist die Blattemperatur noch nicht hoch genug gegenüber der Lufttemperatur, so daß eine Abkühlung und damit eine Erniedrigung des Sättigungsdefizites erfolgen kann. Vielmehr wird durch die Windgeschwindigkeit die Transpiration noch mehr angeregt. In der Annahme einer Streßsituation mit hohem Blattwiderstand (F5) dagegen nimmt die Transpiration ab, weil jetzt der abkühlende Effekt der Luftströmung wegen des geringen Übergangswiderstandes des sensiblen Wärmestromes größer ist.

Nachts, wenn die Nettostrahlungsbilanz negativ wird (F6 und F7, Abb. 5 unten), ist eine Zunahme der Transpiration mit der Windgeschwindigkeit festzustellen. Jedoch ist das absolute Niveau der Verdunstungsmenge sehr niedrig.

4. Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse zeigen die unterschiedliche räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeit in einer klimatisierten Gaswechselkammer. Besonders stark wird die Windgeschwindigkeitsverteilung durch das Blatt verändert. Neben sehr hohen Windgeschwindigkeiten an der Luvseite des Blattes werden sehr niedrige Werte an der Leeseite gemessen. Durch Regelmechanismen werden zwar die Temperatur und Feuchte in der Kammer den Umgebungswerten nachgeführt, jedoch fehlt für den Wind eine entsprechende Regelung. Dadurch kann in der klimatisierten Kammer die Entstehung von Mikroturbulenzen durch Wärmekonvektion unterdrückt werden, die bei geringer Windgeschwindigkeit unter natürlichen Umgebungsbedingungen entstehen (Koch et al., 1971). Die Blattemperaturen sind dann in der Kammer infolge des Abkühlungseffektes niedriger als außerhalb.

Die Windgeschwindigkeit beeinflußt aber auch die Transpiration (Gates, 1976; Brutsaert, 1984). Die Zusammenhänge wurden im vorstehenden Abschnitt durch ein Blattranspirationsmodell illustriert. Vergleichbare Ergebnisse fanden Gates (1976) und Campbell (1977).

Der Vorteil solcher Modelle ist, daß der funktionale Zusammenhang einzelner Einflußgrößen untersucht werden kann, während alle übrigen Größen konstant gehalten werden. Die Fallbeispiele F4 bis F7 beschreiben die Windabhängigkeit der Transpiration mit meteorologischen Randbedingungen, wie sie für unsere Klimazone repräsentativ sind, d. h. eine Zunahme der Transpiration mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Die Fälle F1 bis F3 sind Beispiele für feuchtwarme Klimate mit hoher Einstrahlung und Lufttemperatur bei geringem Sättigungsdefizit.

Tab. 5: Vergleich von Transpirationsmessungen an Reben (*Vitis vinifera* L.).

Quelle	Meßart		Transpiration $mg \cdot dm^{-2} \cdot h^{-1}$
Ries (1984)	Küvette	Labor	900—1600
Beran (1983)	Küvette	Freiland	1400—1700
Bettner (pers. Mitt.)	Küvette	Freiland	850— 990
Ries (1984)	Hydrokultur	Freiland	125— 520

Eine Gegenüberstellung der Transpirationsmessungen (Tab. 5) bei vergleichbaren Umgebungsbedingungen zeigt, daß bei Messungen mit Gaswechselkammern, sei es im Labor (Ries, 1984) oder im Freiland (Beran, 1983; Bettner, pers. Mitteilung) höhere Werte gefunden wurden als bei Messungen mit Hydrokulturen im Freiland (Ries, 1984). Die Unterschiede werden durch die hohen Windgeschwindigkeiten in der klimatisierten Kammer verursacht, wie sie im Freiland nur ausnahmsweise beobachtet werden. Reduziert man die Windmessungen in Bestandshöhe (Tab. 3) um den Faktor zwei, um eine Abschätzung der Windgeschwindigkeit am Blatt zu erhalten, dann werden 1 m/s nicht überschritten. Messungen von Smart (1982) ergaben, daß die Werte sogar um den Faktor 5 niedriger als oberhalb des Bestandes waren. Quantitativ kann der Unterschied durch die Modellrechnung nicht vollständig belegt werden, da die komplexen pflanzenphysiologischen Zusammenhänge und deren Wechselwirkung mit den Umgebungsparametern in dem Modell nur durch den Stomatawiderstand beschrieben werden.

5. Zusammenfassung

Messungen der Windgeschwindigkeit mit einem empfindlichen thermischen Anemometer zeigen eine sehr ungleichmäßige, aber bauarttypische Geschwindigkeitsverteilung in der Gaswechselkammer. Ein Rebblatt verändert markant die Windverhältnisse. Im Vergleich zu Freilandmessungen sind die Windgeschwindigkeiten in der Gaswechselkammer bei einer mittleren Umdrehungszahl zu hoch. Berechnungen mit einem Blattranspirationsmodell zeigen, daß die Windgeschwindigkeit, abhängig von den meteorologischen Umgebungsbedingungen, die Verdunstung erheblich beeinflussen kann. Deshalb sollte sich die Einstellung der Umdrehungszahlen des Ventilators an den tatsächlich vorherrschenden Windgeschwindigkeiten in Blattnähe orientieren.

Literatur

Beran, N., 1983: Die Bedeutung des Wassersättigungsdefizites der Atmosphäre für die Transpiration der Rebe unter besonderer Berücksichtigung der Blattemperatur und der Lichtintensität. Die Weinwissenschaft 3, 147—161.

Brutsaert, W., 1984: Evaporation into the atmosphere. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

Burrows, F. J. und Milthrope, F. L., 1976: Stomatal conduction in the control of gas exchange. In: T. T. Kozlowski (ed.), Water deficits and plant growth, 103—152. Academic Press, New York.

Campbell, G. S., 1977: An introduction to environmental biophysics. Springer Verlag, New York.

Gates, D. M., 1976: Energy exchange and transpiration. In: O. L. Lange, L. Kappen und E.-D. Schulze (eds.), Water and plant life, 137—147. Springer Verlag, New York.

Jarvis, P. G. und Morison, I. T. L., 1981: The control of transpiration and photosynthesis by the stomata. In: P. G. Jarvis and T. A. Mansfield (eds.), Stomatal physiology, 247—279. Society for Experimental Biology, Seminar Series 8, Cambridge University Press, Cambridge.

Koch, W., Lange, O. L. und Schulze, E.-D., 1971: Ecophysiological investigations on wild and cultivated plants in the Negev Desert. Oecologica 8, 296—309.

Linacre, E. T., 1972: Leaf temperature, diffusion resistances, and transpiration. Agric. Meteorol. 10, 365—382.

Monteith, J. L., 1965: Evaporation and environment. In: G. E. Fogg (ed.), The state and movement of water in living organism, 205—234. Academic Press, New York.

Monteith, J. L., 1978: Umweltphysik. Steinkopff Verlag, Darmstadt.

Penman, H. L., 1948: Natural evapotranspiration from open water, bare soil, and grass. Proc. R. Soc. London, Ser. A. 193, 120—145.

Ries, W. R., 1984: Transpiration, CO_2-Gaswechsel und Trockensubstanzproduktion verschiedener Rebsorten bei hohem Wasserangebot. Dissertation, Univ. Bonn.

Smart, R. E., 1982: Vine manipulation to improve vine grape quality. In: A. D. Webb (ed.), Symp. Grape and Vine Cent. June 1980, 362—375. Univ. of Calif., Davis.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Herbert Hüster, c/o Deutscher Wetterdienst, Agrarmeteorologische Beratungs- und Forschungsstelle Geisenheim, Kreuzweg 25, D-6222 Geisenheim.

Dr. Wolfgang Bettner, c/o Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Weinbau, Von-Lade-Straße 1, D-6222 Geisenheim.

Dr. Rudolph Ries, c/o Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Rebenzüchtung und Rebenveredlung, Von-Lade-Straße 1, D-6222 Geisenheim.