

Meteorologisches Institut der Universität Bonn und  
Institut für Meteorologie und Klimatologie der Technischen Universität Hannover,  
Bundesrepublik Deutschland

## **Eine log-linear Analyse von Windprofilmessungen aus der zentralen Sahara im ungestörten Tagesgang**

**K. Fraedrich und G. Tetzlaff**

Mit 1 Abbildung

Eingegangen am 10. August 1972

### **Zusammenfassung**

Für einen störungsfreien Tag (26./27. Dezember 1970) in der zentralen Sahara werden Windprofilmessungen (bis 5,7 m Höhe) ausgewertet. Es zeigt sich, daß das log-linear Gesetz unter wüstenhaften Bedingungen (thermische Schichtung:  $-0,07 \leq z/L \leq 1,0$ , hohe Windgeschwindigkeit) anwendbar ist. Anhand der Wind- und Schubspannungsgeschwindigkeit, Richardsonzahl und Monin-Obuchow-Länge wird ein typischer Tagesgang dokumentiert. Der mittlere Monin-Obuchow-Koeffizient  $\beta$  ergibt sich zu 6.1.

### **Summary**

#### **A Log-Linear Analysis of Wind Profile Measurements in the Central Sahara during an Undisturbed Day**

Wind profile data (heights up to 5.7 m) are evaluated for an undisturbed day (26./27. December 1970) in the Central Sahara Desert. It is found that the log-linear law is valid for desertlike conditions (thermal stratification:  $-0.07 \leq z/L \leq 1.0$ , high windspeed). A typical diurnal variation is documented for the wind- and frictional velocity, the Richardson-number, and the Monin-Obuchow-length. The mean Monin-Obuchow-coefficient is 6.1.

### **1. Einleitung**

Bei Wärmehaushaltsuntersuchungen ist die Bestimmung des vertikalen Stroms sensibler Wärme nur mit dem großen Aufwand der Korrelationsmessungen exakt möglich. Bei den Profilmessungen stel-

len sich die Schwierigkeiten bei der Trennung von latentem und sensiblem Wärmestrom ein. Besonders bei großen Stabilitäten und Labilitäten sind im allgemeinen einfache Parametrisierungen wie der log-linear Ansatz nicht mehr geeignet.

In der vorliegenden Arbeit soll nun untersucht werden, ob die zur Bestimmung des sensiblen Wärmestroms erforderlichen Größen auf einfache Art gewonnen werden können, obwohl unter den Bedingungen starker Stabilität und Labilität gemessen wurde. Ein weiteres Ziel ist die Ermittlung des Tagesganges der Profilparameter unter klimatologisch repräsentativen Verhältnissen. Zur Auswertung wird auf ein methodisch einfaches Verfahren von Webb [5] zurückgegriffen.

## 2. Beobachtungen

Die den Auswertungen zugrunde liegenden Messungen wurden im Winter 1970/71 in der zentralen Sahara gewonnen. Der Meßplatz lag in der Nähe der Oase Faya Largeau (Tschad) in 17°47' N, 19°11' E. Der Untergrund war im Umkreis mehrerer Kilometer eben und homogen, in Anströmrichtung etwa auf 10 km. Die Messungen erfolgten in sechs Höhenstufen bis zu einer Höhe von 5,70 m. In allen Höhen wurden die Windgeschwindigkeit und die Temperatur kontinuierlich registriert. Die Genauigkeit kann mit  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  für die Temperatur und mit  $\pm 0,1\text{ m/sec}$  für die Winddaten angegeben werden. Zeitangaben erfolgen in MEZ. Die Mittelbildung bezieht sich auf einen Zeitraum von 10 min, um Instationarität nach Möglichkeit auszuschließen. Als Beispiel wurden zwei typisch wolkenlose Tage, der 26. und 27. 12. 1970 ausgewertet. Die Tageswelle ist gut ausgeprägt, denn die Meßwerte kehren nach 24 Stunden auf den Ausgangswert zurück, so daß angenommen werden kann, daß keine großräumigen Störungen überlagert sind. Es wird ohne merklichen Fehler statt der potentiellen Temperatur  $\Theta$  die Temperatur  $T$  verwendet.

## 3. Log-linear Analyse

Das log-linear Windprofil von Monin und Obuchow beschreibt bekanntlich den Einfluß der thermischen Schichtung auf das logarithmische Profil:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \cdot \left( 1 + \beta \cdot \frac{z}{L} \right), \quad (1)$$

bzw. integriert:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_0} + \beta \frac{z - z_0}{L} \right).$$

Dabei ist  $u_*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit (in guter Näherung vertikal konstant),  $k$  ( $\sim 0,4$ ) die von Karmansche Konstante,  $\beta$  eine empirische Konstante und  $L$  die Monin-Obukhowsche Skalen-Länge, die definiert wird durch  $L = -\frac{u_*^3}{k g H / c_p \varrho \Theta}$ ,  $H$  = vertikaler Wärmefluß,  $c_p$  = spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck,  $\varrho$  = Luftdichte,  $g$  = Erdbeschleunigung,  $\Theta$  = potentielle Temperatur ( $^{\circ}$  K).

Im folgenden soll die Anwendbarkeit des log-linear Profils unter Wüstenbedingungen (extrem stabile bzw. labile Schichtung, z. T. hohe Windgeschwindigkeit) geprüft werden mit dem Ziel, die empirischen Konstanten zu gewinnen und die Voraussetzung zur Bestimmung des sensiblen Wärmestroms aus Profilmessungen zu testen. Dazu wird eine Methode angewandt, die Webb [5] entwickelte:

Integration von (1) zwischen zwei beliebigen Meßhöhen  $a$  und  $b$  und Division durch  $\ln b/a$  führt zu:

$$\frac{\bar{u}_b - \bar{u}_a}{\ln b/a} = \frac{u_*}{k} \left\{ 1 + \frac{\beta}{L} \left[ \frac{b-a}{\ln b/a} \right] \right\}. \quad (2)$$

Zu jeder Meßserie werden für jedes verfügbare Höhenpaar  $a, b$  die Messungen graphisch dargestellt mit der Abszisse  $(b-a)/\ln b/a$  und der Ordinate  $(u_b - u_a)/\ln b/a$ . Ist das log-linear Gesetz gültig, liegen die Punkte auf einer Geraden mit der Steigung  $\beta/L$  (negativ bei Labilität, positiv bei Stabilität, horizontal bei Neutralität). Der Ordinatenschnittpunkt ist  $u_*/k$ , der Abszissenschnittpunkt  $X = -L/\beta$ . Bei bekannten  $L$  läßt sich  $\beta$  berechnen.

Der Zusammenhang zwischen dem diabatischen Wind- und Temperaturprofil liefert die Richardson-Zahl

$$Ri = \frac{z}{L} \cdot \left( 1 + \beta \frac{z}{L} \right), \quad (3)$$

[2, 4], die aus den Temperaturmessungen für die Prandtl-Schicht wie folgt gewonnen wird:

$$Ri_z = \frac{\bar{\Theta}_b - \bar{\Theta}_a}{(u_b - u_a)^2} \cdot \frac{g}{\Theta} z \ln \frac{b}{a}, \quad (4)$$

wobei  $z$  das geometrische Mittel aus  $b$  und  $a$  ist:  $z = \sqrt{a \cdot b}$ .

Damit ergibt sich über den Abszissenabschnitt  $X = -L/\beta$

$$L = z/Ri_z \cdot (1 - z/X) \quad (5)$$

und

$$\beta = z/Ri_z \cdot (z - X). \quad (6)$$

Der sensible Wärmestrom (vertikal konstant), definiert als  $H = c_p \cdot \rho \cdot u_* \cdot T_*$ , läßt sich berechnen zu

$$H = -c_p \rho u_*^2 \frac{\Delta \bar{\theta}}{\Delta \bar{u}}, \quad (7)$$

wobei alle Niveaus ( $a, b$ ) in der Prandtl-Schicht liegen.

Diese Methode hat den Vorteil, daß die Daten direkt als Höhen-differenzen der gemittelten Windgeschwindigkeit und potentiellen Temperatur eingehen, wie sie aus dem Experiment gewonnen werden. Der traditionelle Weg hingegen über die mittleren Werte enthält noch die Integrationskonstante  $z_0$  (für das Windprofil).

Die Unsicherheit der Bestimmung von  $z_0$  hängt vor allem ab von der Art des Untergrundes und der Ansprechlänge (fetch) bei Inhomogenitäten. Bei den vorliegenden Profilen macht sich der Einfluß der Rauigkeit durch Abknicken des Windprofils wegen des geringen  $z_0$  ( $\sim 0,04$  cm) nicht bemerkbar (vgl. [3]).

#### 4. Ergebnisse

Es werden nach der mit (2) angegebenen Form die Windprofile zu signifikanten Tageszeiten graphisch dargestellt (Abb. 1). Die Meßwerte liegen stets auf einer Geraden, so daß für die weitere Auswertung die Gültigkeit des log-linear Ansatzes unter den hier vorliegenden Bedingungen angenommen werden kann. Somit könnten nach den oben genannten Gln. (2) bis (6) die Profilparameter  $u_*/k$ ,  $z/L$ ,  $L$ ,  $\beta$  bestimmt werden. Insbesondere ergibt sich nach (4)  $Ri_{1,8}$  unter Einbeziehung der Temperaturdifferenzen zwischen  $b = 5,70$  m und  $a = 0,52$  m. Dabei treten Gradienten  $\Delta \theta$  von  $-0,30^\circ \text{C/m}$  im labilen (13 h) und  $+0,25^\circ \text{C/m}$  im stabilen Falle (01 h) auf. Die Windgeschwindigkeiten  $u_z$  variieren zwischen 3,6 und 9,1 m/sec bei  $z = 1,8$  m. Die gefundenen Geraden werden jeweils bis zu den Schnittpunkten mit den Koordinatenachsen extrapoliert und geben  $u_*/k$  bzw.  $X = -1/\beta$  an. Mit Hilfe der  $Ri_{1,8}$  ergibt sich die Monin-Obuchow-Länge  $L$  und daraus mit (6) auch  $\beta$ . Für die repräsentative Höhe  $z = 1,8$  m wurde das Stabilitätsmaß  $z/L$  bestimmt (siehe Tab. 1). Alle berechneten Parameter befinden sich in Übereinstim-

mung mit den in der Literatur [2, 4, 5] für das log-linear Profil angegebenen Werten. Mit Hilfe von  $z/L$  lassen sich die Grenzen der

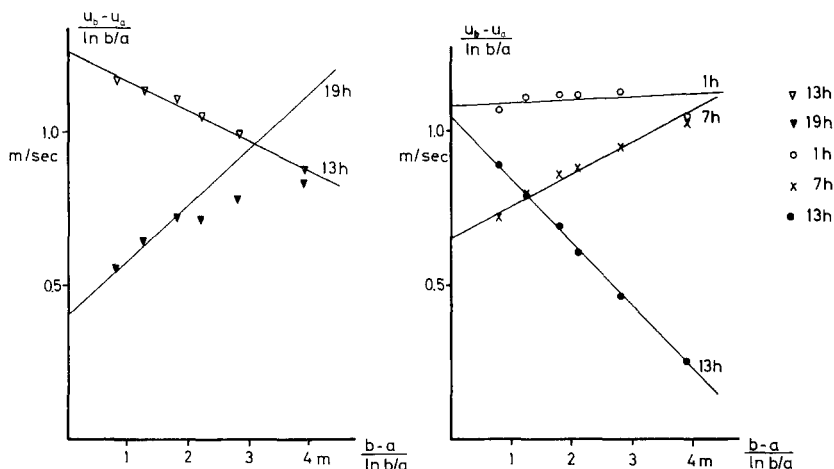


Abb. 1. Log-linear Analyse der Windprofile am 26./27. 12. 1970. Der Ordinaten-schnittpunkt gibt  $u_*/k$ , der Abszissenschnittpunkt  $L$  bzw.  $\beta$  (durch Gl. (6))

Gültigkeit im stabilen und labilen Bereich finden, d. h. der log-linear Ansatz gilt für  $-0,07 \leq z/L \leq 1,0$ . Alle berechneten Werte liegen in dem geforderten Intervall. Der Mittelwert von  $\beta$  beträgt 6,1, im labilen Fall 7,2, im stabilen 5,7. Die Tagesgänge der ermittel-

Tabelle 1\*. Ergebnisse der Auswertungen von Temperatur- und Windprofilen (10 min-Mittel) vom 26. und 27. 12. 1970 ( $z=1,8$  m)

Zeit	$u_z$ m/sec	$u_*/k$ m/sec	$Ri_z$	$z/L$ m	$I$	$\beta$
13 h labil	9,11	1,26	-0,028	-0,024	-75	6,1
19 h stabil	3,64	0,40	0,052	0,071	25	5,2
01 h stabil	6,28	0,65	0,035	0,045	40	6,2
07 h nahe neutral	8,70	1,08	0,008	0,008	220	4,6
13 h labil	7,38	1,05	-0,090	-0,051	-35	8,4

\* Die ermittelten Werte für  $u_*/k$  erscheinen in Bezug auf die Größe des sensiblen Wärmestroms recht hoch. Allerdings befinden sie sich in guter Übereinstimmung mit den von Webb erzielten Ergebnissen.

ten Größen waren gut ausgeprägt, wobei sich der Übergang von stabilen und labilen Verhältnissen deutlich in dem Profil von 7 Uhr zeigt (siehe Tab. 1).

## 5. Schluß

Es zeigt sich, daß die Windprofilmessungen unter Wüstenbedingungen im log-linear Bereich liegen. Bei stark konvektiven Verhältnissen werden  $u_*$ -Werte gefunden, die zu hoch liegen für eine geeignete Bestimmung des sensiblen Wärmestroms. Vielleicht sollte eine Geschwindigkeitsskala eingeführt werden, die große konvektive Wirbel repräsentativer parametrisiert [1].

## Literatur

1. Businger, I. A., I. C. Wyngaard, Y. Izumi, and E. F. Bradley: Flux-profile Relationships in the Atmospheric Surface Layers. *J. Atm. Sc.* 28, 181—189 (1971).
2. Danzeisen, H.: Ergebnisbericht zum Problemkreis: Diabatische Wind- und Temperaturprofile. *Inst. Theor. Meteor. F. U. Berlin*, 5—44 (1968).
3. Deacon, E. L.: Vertical Diffusion in the Lowest Layers of the Atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 75, 89—103 (1949).
4. Klug, W.: Zum vertikalen Windprofil. *Beitr. Phys. Atm.* 36, 226—253 (1963).
5. Webb, E. K.: Profile Relationships: The Log-Linear Range and Extension to Strong Stability. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 96, 67—90 (1970).

Anschriften der Verfasser: Dr. K. Fraedrich, Meteorologisches Institut der Universität Bonn, Auf dem Hügel 20, D-5300 Bonn, Bundesrepublik Deutschland; Dipl.-Met. G. Tetzlaff, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Technischen Universität Hannover, Herrenhäuserstraße 2, D-3000 Hannover-Herrenhausen, Bundesrepublik Deutschland.