

Literatur

[1] Bastian, P.; Zanner, L.; Krüger, G.: Erste Erfahrungen bei der Lagerung von Speisemöhren nach mechanischer Krauttrennung. Gartenbau 26 (1979) H. 8, S. 231—233.

[2] Agrotechnische Forderungen an eine Maschine zur Krauttrennung bei Möhren und Speisewiebeln. FZM Schlieben/Bornim, 1980 (unveröffentlicht).
 [3] Zanner, L.; Bastian, P.; Krüger, G.: Mechanische Krauttrennung bei der Ernte von Speisemöhren —

Abschätzung der Windgeschwindigkeit in der Nähe der Oberfläche

Dr. T. Foken, Meteorologisches Hauptobservatorium Potsdam

Verwendete Formelzeichen

c_p	J/K · kg	spezifische Wärme bei konstantem Druck
D	m	s. Gleichung (4)
d	m	effektive Bestandshöhe
d_B	m	Bestandshöhe
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
H	W/m ²	fühlbarer Wärmestrom
L	m	Monin-Obuchov-Länge
T_o	K	absolute Schichtmitteltemperatur
u	m/s	Windgeschwindigkeit
u^*	m/s	Schubspannungsgeschwindigkeit
x	m	horizontaler Abstand vom Rauigkeitswechsel
z	m	Höhe
z_B	m	Bezugshöhe
z_o	m	Rauigkeitsparameter
δ	m	Höhe der internen Grenzschicht
ζ	—	Stabilitätsparameter ($\zeta = z/L$)
ζ_{krit}	—	kritischer Wert von ζ (Übergang neutral — labil)
κ	—	von-Kármán-Konstante ($\kappa = 0,4$)
λ	—	Normierungsparameter ($\lambda = 0,5$)
ρ	kg/m ³	Luftdichte
τ	kg/m · s ²	tangentiale Bodenschubspannung
φ_M	—	universelle Funktion des Windprofils

jedoch soll dieser Bereich hier nicht näher betrachtet werden. Die Windgeschwindigkeitsabhängigkeit mit der Höhe läßt sich in folgender Formel darstellen:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{z_o} \quad (1)$$

$$u^* = (\tau/\rho)^{1/2} \quad (2)$$

Die Rauigkeit der Unterlage wird im sog. Rauigkeitsparameter z_o berücksichtigt, der aber formal nur eine Integrationskonstante ist und der Bedingung $u(z_o) = 0$ genügt. Ohne die Problematik dieses Parameters näher zu diskutieren, sind in Tafel 1 einige Werte von z_o dargestellt, die hinsichtlich ihrer Genauigkeit für praktische Belange ausreichend sind. Neben der Rauigkeit, die sich nur auf die Oberfläche des Bodens oder des Bestands bezieht, muß noch die Bestandshöhe berücksichtigt werden. Da der Bestand nicht vollständig geschlossen ist, wirkt aber nur eine effektive Bestandshöhe d, die in guter Näherung für alle landwirtschaftlichen Kulturen wie folgt angenommen wird:

$$d = 0,6 \cdot d_B \quad (3)$$

Statt z_o in Gl. (1) muß demnach

$$D = z_o + d \quad (4)$$

gesetzt werden mit $D \ll z$. Kann diese einschränkende Bedingung nicht erfüllt werden, so ist im Zähler des Logarithmus in Gl. (1) noch D zu addieren. Die nachfolgenden Angaben sind dann entsprechend umzurechnen.

Die Gl. (1) gilt streng genommen nur für neutrale Schichtung, d. h., es herrscht Isothermie mit der Höhe vor. Untersuchungen ergaben allerdings [3], daß die Gültigkeit von Gl. (1) auf einen größeren Bereich mit nahezu neutraler Schichtung ausgedehnt werden kann. Trotzdem muß noch auf abweichende Schichtungsverhältnisse hingewiesen werden. Stabile Verhältnisse sind gegeben, wenn die Unterlage aufgrund von Ausstrahlung kalt gegenüber der darüber befindlichen Luft ist. Diese Bedingungen sind bei heiterem bis wolkenlosem Wetter in den Nacht- und Morgenstunden anzutreffen. Da derartige Wettersituationen im allgemeinen windschwach sind, ist nach der o. g. Einschränkung noch keine voll ausgebildete Turbulenz vorhanden, so daß die hier angegebenen Beziehungen nicht anwendbar sind. Andererseits sind aber auch die gegenwärtigen Kenntnisse zum Windprofil unter diesen Bedingungen noch widersprüchlich. Auf weitere Ausführungen soll daher verzichtet werden. Demgegenüber muß aber der labile Fall beachtet werden, der bei warmer Unterlage (gegenüber der Luft), d. h. bei Aufheizung durch Sonneneinstrahlung bei heiterem bis wolkenlosem Wetter vor allem in den Mittagsstunden, auftritt. Dazu wird von der Gleichung des Windgradienten in der allgemeinen Form ausgegangen:

Tafel 1. Rauigkeitsparameter z_o in Abhängigkeit von der Unterlage (überarbeitete Werte aus [2])

Unterlage	z_o m
kurzes Gras	0,001
Wasser (schwach bewegt)	0,001
Schnee	0,005
Stoppeln	0,01
Beton	0,01
langes Gras	0,05
Ackerschollen	0,05
Rüben	0,05
Getreide	0,2

Der Windgradienten in der allgemeinen Form ausgegangen:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^*}{z \kappa} \varphi_M(\zeta) \quad (5)$$

Als universelle Funktion soll die Beziehung nach Skeib [3] verwendet werden, die gut mit Beziehungen anderer Autoren sowie experimentellen Ergebnissen übereinstimmt und den Vorteil einer leichten Integrierbarkeit hat:

$$\varphi_M = \begin{cases} 1 & |\zeta| < |\zeta_{krit}| = 0,06 \quad (6a) \\ (\zeta/\zeta_{krit})^{-1/4} & \zeta < \zeta_{krit} = -0,06 \quad (6b) \end{cases}$$

Während Gl. (6a) dem neutralen Fall entspricht und mit Gl. (5) nach Integration sofort Gl. (1) ergibt, erhält man unter labilen Bedingungen mit Gl. (6b) nach der Integration:

$$u(z) - u(z_B) = - \frac{u^*}{0,25 \kappa (L \cdot \zeta_{krit})^{-1/4}} (z^{-1/4} - z_B^{-1/4}) \quad (7)$$

Für $z < \zeta_{krit} \cdot L$ gilt demnach die Gl. (1). Darüber ist eine merkliche Abnahme des Gradienten entsprechend der labilen Schichtung zu verzeichnen (Bild 1). Die zur Bestimmung des Schichtungs Zustands herangezogene Monin-Obuchov-Länge kann man in nachfolgender Weise ermitteln:

$$L = \frac{T_o \rho c_p u^3 \lambda}{\kappa^2 g H} \quad (8)$$

3. Besonderheiten des Windprofils

Die bisherigen Ausführungen gelten nur für ebenes Gelände mit einheitlicher Oberflächenstruktur. Diese Bedingungen treffen aber nur im Flachland für sehr große Felder zu und nicht für die überwiegende Anzahl der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Nachteilig wirken sich vor allem Geländestufen (Bild 2a) und

1. Einleitung

Die Anwendung der modernen Technik in der Landwirtschaft erfordert in immer stärkerem Maß eine meteorologische Beratung. Dies betrifft nicht nur die übliche Wettervorhersage, sondern auch spezielle Angaben, z. B. zur Bodenfeuchte. Bedeutung erlangt aber auch die Höhenverteilung der Windgeschwindigkeit über bewachsenem und unbewachsenem Boden, wie dies beispielsweise beim Einsatz moderner Sondierertechnik notwendig ist [1]. Weil hierbei viele Einflußgrößen zu beachten sind, können keine verallgemeinerten Beratungen erfolgen. Andererseits bietet aber auch die deutschsprachige Fachliteratur keine umfassende und für den Praktiker geeignete Darstellung. Nachfolgend soll deshalb die Problematik erläutert werden. Es wird ein Nogramm abgeleitet, das es ermöglicht, aus Windmessungen in einigen Metern Höhe auf die Windstruktur in Oberflächennähe zu schließen. Es können aber auch aus langjährigen Mittelwerten der Windgeschwindigkeit (meist in 10 bis 20 m Höhe gemessen) entsprechende Werte für bodennahe Höhen ermittelt werden.

2. Theorie des oberflächennahen Windprofils

Für den Fall ausgebildeter Turbulenz, was man bei Windgeschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s in rd. 2 m Höhe annehmen kann, ist die Windgeschwindigkeit in der Höhe z proportional zum Logarithmus der Höhe. Dies gilt bis zu Höhen von rd. 20 bis 50 m innerhalb der sog. Boden- oder Prandtl-Schicht. Lediglich unmittelbar an der Oberfläche bis in rd. 1 cm Höhe sind noch molekulare Austauschbedingungen vorhanden,

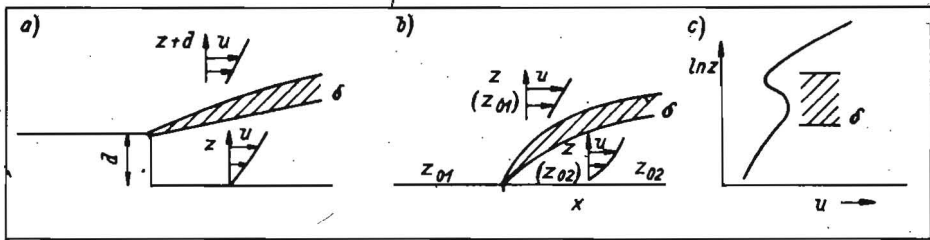
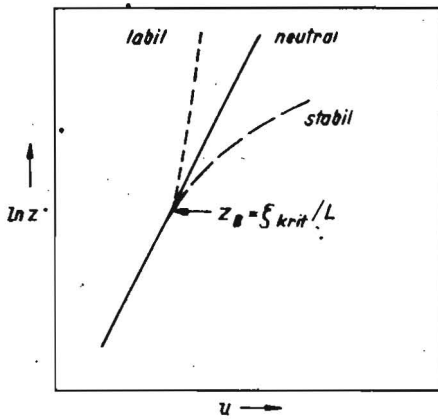


Bild 2. Ausbildung interner Grenzschichten (schraffiert dargestellt)
a) an Geländestufen; b) bei Rauigkeitswechsel; c) im Windprofil

Bild 1. Änderung des Windprofils durch Schichtungseinflüsse

Rauigkeitswechsel (Bild 2b), d. h. Übergänge zwischen verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten (z. B. Wiese—Getreide), aus. Die sich dabei ausbildenden internen Grenzschichten sind Störungszonen mit Abweichungen vom normalen Windprofil von 1 bis 3 m/s [4] (Bild 2c). Unterhalb der internen Grenzschicht befindet sich ein Windprofil mit den Eigenschaften der Unterlage, während oberhalb der internen Grenzschicht das Windprofil noch durch die vorausgegangene Unterlage bestimmt wird.

Für praktische Belange kommt es darauf an, den Abstand von der Geländestufe oder vom Rauigkeitswechsel zu kennen, für den bis in eine bestimmte Höhe störungsfreie Windmessungen möglich sind. Unabhängig von der Richtung eines Rauigkeitswechsels kann eine Abschätzung nach Gl. (9) erfolgen [5]:

$$\delta(x) = 0,5 \cdot x^{0,4} \quad (9)$$

Eine ganz grobe Faustregel wäre: Ungestörte Streichlänge des Windes und Höhe des unverfälschten Profils verhalten sich wie 100:1 [6].

4. Praktisch anwendbares Bestimmungungsverfahren

Unter Berücksichtigung der o. g. Einschränkungen und Voraussetzungen

- $u (\approx 2 \text{ m}) \geq 1 \dots 2 \text{ m/s}$
- Bestimmung von $D = z_0 + d = z_0 + 0,6 \cdot d_B$
- $z \geq \delta(x) = 0,5 \cdot x^{0,4}$
- $D \ll z, D < 1 \text{ m}$

lassen sich einfache Nomogramme zur Ermittlung der Höhenverteilung des Windes angeben. Im Bild 3 ist ein sowohl für den neutralen als auch für den labilen Fall anwendbares Nomogramm dargestellt.

Neutrale Bedingungen (s. Abschn. 2):

- Man bestimmt in einer Höhe die Windgeschwindigkeit und ermittelt den Punkt A.
- Dann verbindet man A mit dem Wert von D und erhält die gewünschte Beziehungsg-

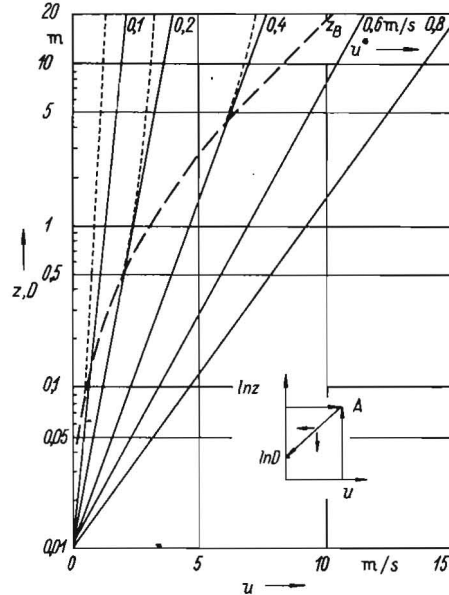


Bild 3. Nomogramm zur Ermittlung der Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit

gerade für die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit.

Labile Bedingungen (s. Abschn. 2):

- Die Kurvenschar (oberhalb gestrichelter Grenzlinie punktierte Kurven) wird parallel zur $\ln z$ -Achse so lange verschoben, bis der Nullpunkt in Übereinstimmung mit D ist.
- Bestimmung des Punktes A wie im neutralen Fall.
- Liegt der Punkt A unterhalb der gestrichelten Grenzlinie, so erfolgt die Bestimmung wie im neutralen Fall.
- Liegt der Punkt A oberhalb der Grenzlinie, so ist eine zu den eingetragenen punktierten Kurven parallele Linie zu ermitteln, die dann unterhalb der Grenzlinie linear mit D verbunden wird. Diese Kurve dient der Er-

mittlung der Höhenverteilung des Windes. Die Genauigkeit dieses Verfahrens beträgt rd. 20%, jedoch ist der Fehler mindestens $\pm 1 \text{ m/s}$. Bei dieser Genauigkeitsforderung ist die Beschränkung auf nur zwei Schichtungsklassen für den Bereich neutral bis labil gerechtfertigt. Im labilen Fall wurde ein fühlbarer Wärmestrom von 100 W/m^2 zugrunde gelegt.

5. Zusammenfassung

Nach einer kurzen Einführung in die Theorie des Windprofils erfolgen Hinweise zu Besonderheiten, die an Geländestufen und beim Wechsel der Oberflächenrauigkeit eintreten. Für die praktische Anwendung wird ein Nomogramm mitgeteilt, das es ermöglicht, aus Windmessungen in einer Höhe bei neutraler und labiler Schichtung auf die Höhenverteilung des Windes nahe der Oberfläche zu schließen.

Literatur

- [1] Ahrens, F.: Übertragungsverhalten und Meßeinrichtung zum Erfassen landwirtschaftlicher Bearbeitungsgrenzen mit Hilfe von Ultraschall. *agrartechnik* 30 (1980) H. 3, S. 104—106.
- [2] Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig: Vieweg & Sohn 1961.
- [3] Skeib, G.: Zur Definition universeller Funktionen für die Gradienten von Windgeschwindigkeit und Temperatur in der bodennahen Luftschicht. *Z. Meteor.* 30 (1980) H. 1, S. 23—32.
- [4] Hupfer, P.; Foken, T.; Bachstein, U.: Fine structure of the internal boundary layer in the nearshore zone of the sea (Feinstruktur in der internen Grenzschicht in der ufernahen Zone des Meeres). *Boundary-Layer Meteor.* 10 (1976) S. 503—505.
- [5] Foken, T.; Skeib, G.: Über die Genauigkeit und Auswertung von Profilmessungen zur Energieaustauschbestimmung. *Z. Meteor.* 30 (1980) H. 6.
- [6] Peterson, E. W.; Busch, N. E.: The effect of local terrain irregularities on the mean wind and turbulence characteristics near the ground (Der Effekt lokaler Geländeunterschiede auf die mittlere Windgeschwindigkeit und die Turbulenzcharakteristika nahe der Unterlage). *WMO Note* (1978) No. 510, S. 45—50. A 2766

Folgende Fachzeitschriften der Elektrotechnik erscheinen im VEB Verlag Technik:
Elektrie; der Elektro-Praktiker; Fernmeldetechnik; messen — steuern — regeln;
NachrichtentechnikElektronik; radio—fernsehen—elektronik