

## Werk

**Jahr:** 1937

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:13

**Digitalisiert:** Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

**Werk Id:** PPN101433392X\_0013

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0013](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0013)

**LOG Id:** LOG\_0010

**LOG Titel:** Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem in der bodennahen Luftschicht

**LOG Typ:** article

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

## Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem in der bodennahen Luftschicht

Von **W. Paeschke**, Göttingen — (Mit 5 Abbildungen)

Unter Verweisung auf ausführliche Veröffentlichungen in den Beiträgen zur Physik der freien Atmosphäre wird über Messungen berichtet, die über verschiedenen Rauigkeiten ausgeführt wurden. Es kann gezeigt werden, daß das logarithmische Geschwindigkeitsverteilungsgesetz bis zu einer Meßhöhe  $z = 5$  m über dem Boden hinreichend erfüllt ist und die Ansätze der neueren Hydro- und Aerodynamik unter Berücksichtigung einer entsprechenden Nullpunktsverschiebung  $z_0$  zur numerischen Bestimmung wirk-samer Rauigkeitslängen  $k$  führen.

Zur Klärung der Vorgänge in der untersten, bodennahen Luftschicht wurden atmosphärische Messungen der Windgeschwindigkeit  $u(z)$ , der Temperatur  $t(z)$  und der relativen Feuchtigkeit  $F(z)$  bis zu einer Höhe  $z = 5$  m über dem Meßort durchgeführt, um aus diesen Profilen Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, die den Einfluß der Reibung als Funktion der Oberflächenbeschaffenheit erkennen lassen.

Nach umfassenden Vormessungen wurde schließlich das für den Göttinger Flugplatz vorgesehene Gelände, die angrenzenden Ländereien und später der Flugplatz selbst für die Messungen ausgewählt, sodaß folgende Rauigkeiten bei den verschiedensten Wetterlagen gemessen werden konnten:

- |  |                    |
|--|--------------------|
| 1. Ebene Schneefläche  | } Wintermessungen. |
| 2. Flugplatz Göttingen (niedriges Grasland)                  |                    |
| 3. Brachland   | } Sommermessungen. |
| 4. Niedriges Grasland  |                    |
| 5. Hohes Grasland (hartes Raygras auf dem Flugplatzgelände). |                    |
| 6. Getreideland (hoher Weizen).                              |                    |
| 7. Rübenland (Futterrüben).                                  |                    |

*Versuchs-anordnung* (vgl. Fig. 1). Den empfindlichsten Teil bilden zwei Hitzdrahtsonden gleicher Bauart und Abmessung. Diese sind so angeordnet, daß eine der beiden Sonden (an ihrer Stelle zeitweise ein Anemometer) in 2 m Höhe über dem Erdboden auf einem Dreibein fest eingebaut, während eine zweite Sonde am freien Ende eines schwenkbaren Armes angebracht ist, so daß die Meßhöhen variiert und auf diese Weise Profile vom Boden bis zu etwa 5 m Höhe gemessen werden können. Außerdem befindet sich ein Thermoelement zur Temperaturmessung an der zweiten Sonde und schließlich ist, zur dauernden Beobachtung der Windrichtung, eine primitive Windfahne (Baumwollfaden) vorgesehen. Diese dient einmal der Einstellung des schwenkbaren Armes gegen den Wind, andererseits einer etwaigen Feststellung der Richtungsänderung im Sinne der Ekman-Spirale beim Entfernen der Sonde vom Erdboden. Eine derartige Richtungsänderung des Windes innerhalb der bodennahen Luftschicht ist bis zur 5 m-Grenze

jedoch nicht feststellbar. Dagegen setzt sich ein Umspringen des Windes, besonders bei absinkender Luftbewegung, innerhalb sehr kurzer Zeit auf der ganzen Meßhöhe durch.

Der verspannte Mast aus Eisen- und Aluminiumrohr ist zerlegbar und leicht transportabel, so daß sich in verhältnismäßig kurzer Zeit ein Umbau im Gelände ermöglichen läßt. Mehr als 5 m in Lee des Mastes, also etwa 10 m von der Sonde entfernt, ist der Tisch mit der Meßbrücke und den Instrumenten aufgestellt. Es kann sich also keine störende Stauwirkung an den Sonden bemerkbar machen. Die Länge der Anlaufstrecke, also das von der Luft bestrichene ebene Gelände vor der Sonde, beträgt, je nach der Windrichtung, mehr als 500 m (Ausnahme bei

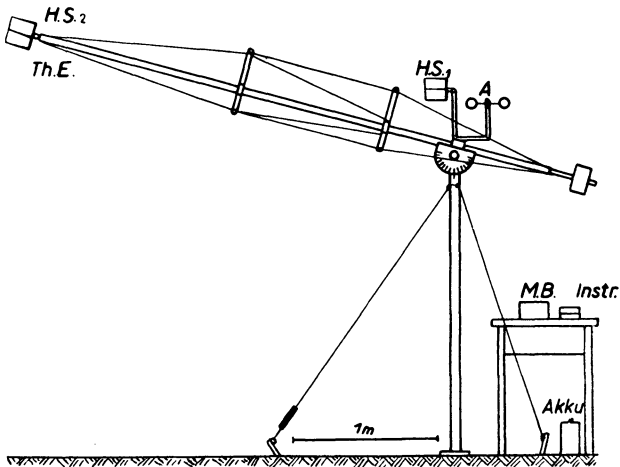


Fig. 1. Schematische Skizze der Versuchsanordnung.

Es bedeuten: A. Schalenkreuzanemometer, H. S. 1 Hitzdrahtsonde 1, H. S. 2 Hitzdrahtsonde 2, Th. E. Thermoelement, M. B. Meßbrücke, Instr. Sonstige Meßgeräte

Getreide- und Rübenland etwa 300 m). Es ist also sicher genügend groß, um einen gleichförmigen Zustand in dem untersuchten Höhenbereich herbeizuführen. Jedenfalls geben die Meßprofile keinen Anhalt dafür, daß irgendwelche Störungen verursacht worden sind durch die in der weiteren Umgebung von etwa 800 m stehenden Bäume und die Masten der Hochspannung bzw. die anders bebauten umliegenden Ackerflächen. Auf einen Sonderfall als Ausnahme soll in einem späteren Abschnitt (Diskussion der Profile) hingewiesen werden.

*Meßapparatur und Meßmethoden.* Außer den Hitzdrahtsonden mit der zugehörigen Brückenschaltung und den elektrischen Meßinstrumenten (Galvano- und Amperemeter), die der Temperatur- und Geschwindigkeitsmessung dienen, wurden Thermoelemente zur Temperatur- und ein Schalenkreuzanemometer zur Geschwindigkeitsmessung verwendet. Dieses war neben einer Hitzdrahtsonde in

einer konstanten Höhe  $z = 2$  m angebracht und diene lediglich Kontrollzwecken, um eine etwaige Änderung des Mittelwertes der Windgeschwindigkeit über längere Zeiträume festzustellen. Auf Einzelheiten über die Bauart der verwendeten Thermolemente und Zweidrahtsonden, ihrer Eichungen im Windkanal und Schaltungen bei Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen soll hier nicht näher eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung erscheint demnächst in den „Beiträgen zur Physik der freien Atmosphäre“.

Zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit wurden Thermo hygrometer von Lambrecht benutzt, weil sie im Gegensatz zu den an und für sich genaueren Psychrometern und Taupunktsinstrumenten mit dem Vorzug einer praktischen, handlichen Form den weiteren Vorteil verbinden, daß sie den naturgegebenen Zustand innerhalb der Vegetation in keiner Weise störend verändern.

Die gleichzeitigen Messungen von Wind, Temperatur und Feuchtigkeit lassen je nach der Wetterlage eine mehr oder weniger starke gegenseitige Beeinflussung dieser drei meteorologischen Elemente erkennen. Bei der Eichung der Hitzdrahtsonden wurde außerdem eine von der Luftfeuchtigkeit abhängige Wärmeabgabe der geheizten Drähte gefunden. Für atmosphärische Luft handelt es sich dabei um jene Anomalie der Wärmeleitfähigkeit von Luft und Wasserdampfgemischen, die für Gemische eines neutralen Gases mit einem Dipolgas zutrifft (vgl. dazu die kurze Mitteilung in der Phys. Zeitschr. [1] und die demnächst erscheinende ausführliche Arbeit).

Von der grundlegenden Theorie soll nur das zum Verständnis der folgenden Auswertungen und Definitionen der einzelnen Größen unbedingt Nötige gebracht werden, im übrigen wird auf die ausführliche Veröffentlichung verwiesen. Der Verarbeitung des Versuchsmaterials sind Ansätze der neueren Hydro- und Aerodynamik zugrunde gelegt, für die Geschwindigkeitsmessungen die Potenzgesetze, insbesondere aber das logarithmische Geschwindigkeitsverteilungsgesetz

$$u(z) = a \log z + b \dots \dots \dots (1)$$

mit  $u(z)$  als Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe  $z$  und  $a$  und  $b$  als Konstanten und schließlich die Beziehungen zwischen Mischungsweg und Austauschgröße einerseits und turbulenter Geschwindigkeit, Mischungsbewegung und Scheinreibung andererseits (vgl. Prandtl [2] und [3]). Nach dem Prandtl'schen Schubspannungsansatz

$$\tau_0 = \rho \left( l \frac{du}{dz} \right)^2 \dots \dots \dots (2)$$

mit  $\tau_0$  als Schubspannung am Boden,  $\rho$  Dichte der Luft und  $l$  als Mischungsweg, ergibt sich aus einer Dimensionsbetrachtung, daß der den Reibungszustand kennzeichnende Ausdruck  $\sqrt{\tau_0/\rho}$  die Dimension einer Geschwindigkeit hat, sodaß wir für die Schubspannungsgeschwindigkeit erhalten:

$$v_* \equiv \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = l \frac{du}{dz} \dots \dots \dots (3)$$

Darin ist der Mischungsweg  $l$  nach Prandtl proportional dem Wand- bzw. Bodenabstand  $l = \varkappa \cdot z$  mit  $\varkappa = 0.4$  nach Versuchsergebnissen von Nikuradse [4]. Führt man  $l = 0.4 z$  in die differenzierte Gleichung (1) ein, so erhält man aus (1) und (3) schließlich

$$v_* = \frac{0.4}{2.3} a = \frac{a}{5.75} \dots \dots \dots (4)$$

Die jeweiligen Werte von  $a$  ergeben sich aus den Meßprofilen, indem man die gemessenen Windgeschwindigkeiten  $u$  über den Logarithmen der zugehörigen Höhen aufträgt. Durch die Meßpunkte lassen sich oberhalb der Rauigkeitshöhe  $z_0$  (siehe unten), die als Mittelwert aus etwa 50 Einzelmessungen bestimmt wird, mit großer Annäherung Geraden legen, aus deren Neigung sich der jeweilige Wert von  $a$  ermitteln läßt. Damit wird die Schubspannungsgeschwindigkeit  $v_*$  als charakteristische Größe für den Reibungszustand des Geländes bestimmbar.

Nach Integration der Gleichung (2) ergibt sich andererseits

$$\left. \begin{aligned} u(z) &= \frac{1}{\varkappa} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} (\ln z + \text{const}) \quad \text{oder} \quad \text{mit } \varkappa = \frac{1}{2.5} \\ &= 2.5 v_* \ln \frac{z}{c_0}, \\ &= 2.5 v_* \ln \frac{7.35 z}{k}, \end{aligned} \right\} \dots \dots (5)$$

indem man  $c_0$  als Integrationskonstante mit einer Rauigkeitslänge  $k$  in Beziehung bringt. Auf diese Weise läßt sich schließlich die Rauigkeitslänge  $k$  aus jeder beliebigen Höhe  $z$  und der zugehörigen Geschwindigkeit  $u(z)$  numerisch ermitteln.

Gleichung (5) schreibt man allerdings wegen der Unsicherheit, wo innerhalb der Rauigkeit die Stelle  $z = 0$  der einfacheren Formel liegen soll, besser

$$u(z) = 2.5 v_* \ln \frac{z - z_0}{c_0},$$

worin  $z_0$  die jeweilige Nullpunktverschiebung angibt.

Wenn in den vorliegenden Fällen (Ausnahme Getreideland) eine befriedigende Übereinstimmung der  $z_0$ - und  $k$ -Werte erzielt worden ist, so liegt das daran, daß durch sorgfältiges Ausmessen der  $z_0$ -Werte die richtige Nullpunktverschiebung für jede Rauigkeit vorgenommen werden konnte. Bei stark nachgiebigen, hohen Rauigkeiten werden je nach der Windstärke Schwankungen der Halmlängen vorkommen. In diesem Falle ist es keineswegs sicher, daß die ausgemessene Rauigkeitshöhe bereits die für die Berechnung des  $k$ -Wertes maßgebende Nullpunktverschiebung  $z_0$  ergibt. Man wird vielmehr in der Weise vorgehen müssen, daß man bei der logarithmischen Auftragung einer Meßreihe eine weitere Höhenverschiebung vornimmt, bis die Meßpunkte des betreffenden Profils auf einer Geraden liegen. Erst diese Gesamtverschiebung gibt den richtigen  $z_0$ -Wert an.

Als Einzelbeispiel für die Geschwindigkeitsprofile soll Fig. 2 (Geschwindigkeitsprofile, gemessen über hohem Grasland) herausgegriffen werden. Dieser Sonderfall, der deutlich erkennen läßt, daß für Ausbildung eines Profils eine verhältnismäßig lange Anlaufstrecke vor der Sonde von großer Wichtigkeit ist, wurde schon einleitend kurz erwähnt. Das Profil 2 dieser Abbildung war seinerzeit über unbebautem Ackerland (Brachland) gemessen und auch dafür berechnet worden, ohne zunächst zu beachten, daß der Wind inzwischen gedreht hatte. Bei der numerischen Berechnung der Werte von  $v_*$  und  $k$  fiel dieses Profil für Brachland

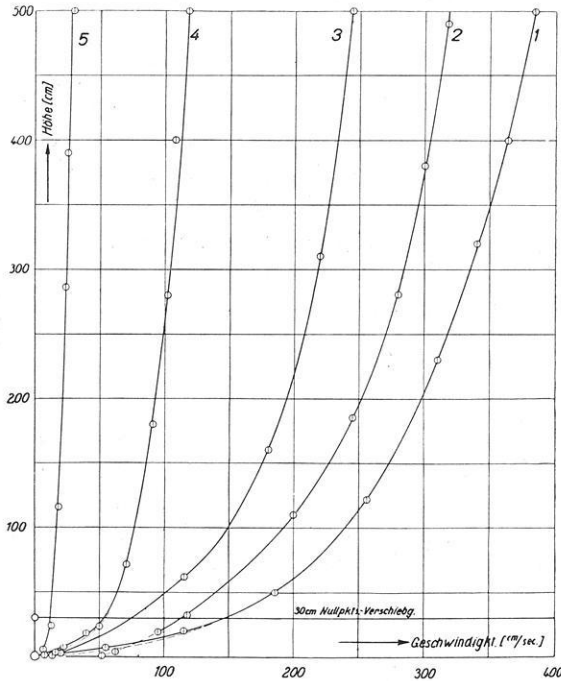


Fig. 2. Geschwindigkeitsprofile über Grasland (hoch). Profil 2 stellt einen Sonderfall dar, der den Einfluß der Anlaufstrecke auf die Ausbildung eines bestimmten Geschwindigkeitsprofils erkennen läßt

vollständig heraus, stimmte dagegen mit den später berechneten Werten von hohen Graslandprofilen sehr gut überein. Eine Nachprüfung ergab, daß der Wind bei dieser Sondenstellung etwa 500 m über Grasland und nur etwa 20 m vor der Sonde über eigentliches Meßgelände (Brachland) geweht hatte. Das Geschwindigkeitsprofil ist also bereits über dem hohen Grasland ausgebildet und während der letzten 20 m in seinem oberen Teil nicht mehr verändert worden. Innerhalb der Rauigkeitshöhe erkennt man jedoch daran, daß Profil 2 sich mit 1 kreuzt (sich also besser an den Erdboden anschmiegt als dieses), daß die bremsende Wirkung des hohen Grases bei Profil 2 gefehlt hat.

Noch besser als diese Einzelprofile über einer bestimmten Art der Bewachung läßt eine Zusammenstellung der Profile, gemessen über verschiedenem Untergrund (Fig. 3) erkennen, daß eine Nullpunktverschiebung je nach der Vegetationshöhe vorgenommen werden muß. Die unmittelbar an den Erdboden grenzende Zone nimmt eben eine Ausnahmestellung ein, die sich gesetzmäßig nicht erfassen läßt. Es ist dies jenes Gebiet der Mikroklimatologie, das charakterisiert ist durch stark überadiabatische Temperaturgradienten, hohen relativen Feuchtigkeitsgehalt und sehr starke Abnahme der Austauschwerte infolge der Erdbodennähe. So zeigen

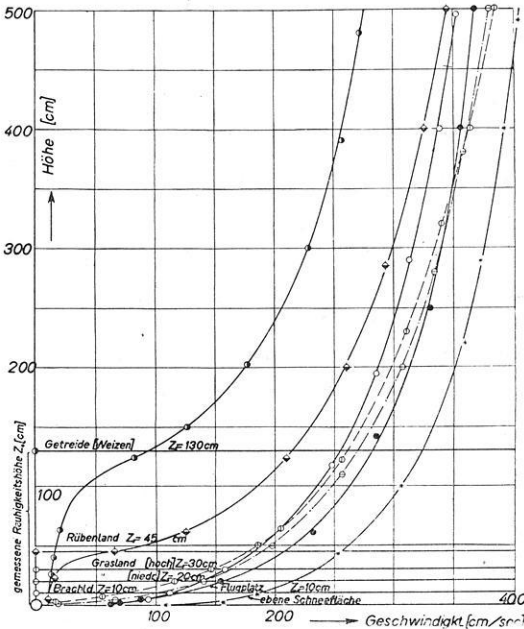


Fig. 3. Zusammenstellung der über verschiedenem Untergrunde gemessenen Geschwindigkeitsprofile zum Vergleich der Größenordnung der  $z_0$ -Werte (Nullpunktverschiebung) je nach Bestandshöhe

z. B. die beiden Profile über Getreide- und Rübenland deutlich, daß eine derartige Nullpunktverschiebung gerechtfertigt ist und die Höhe  $z_0$  für dichtstehende, hohe Bewachung nicht nur durch Ausmessung der Halmhöhen sehr genau bestimmbar ist, sondern mit hinreichender Genauigkeit auch durch die Höhenlage des oberen Wendepunktes in der betreffenden Profilkurve. Dagegen erscheint diese Verschiebung um das Stück  $z_0$  nach oben für niedrige Bewachung nicht begründet. Die graphischen Auftragungen zur Ermittlung der Rauheitslängen  $k$  zeigten jedoch die unbedingte Notwendigkeit einer Nullpunktverschiebung auch in diesen Fällen. Lediglich über einer ebenen Schneefläche erübrigte sich jede Höhenverschiebung. Diese Schneemessungen haben im Gegensatz zu den über allen anderen

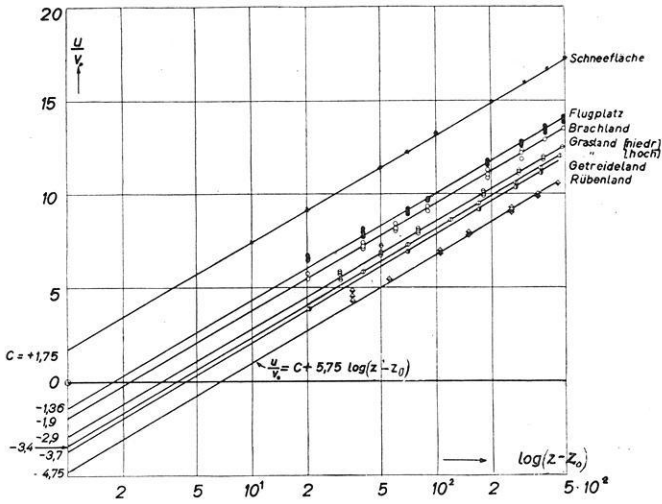


Fig. 4.  $\frac{u}{v_*}$  in Abhängigkeit von  $\log(z - z_0)$  für verschiedene Rauigkeiten. Diese dimensionslose Auftragung nach der Gleichung  $\frac{u}{v_*} = 5.75 \log(z - z_0) + C$  dient zur Bestimmung der wirksamen Rauigkeitslängen  $k$

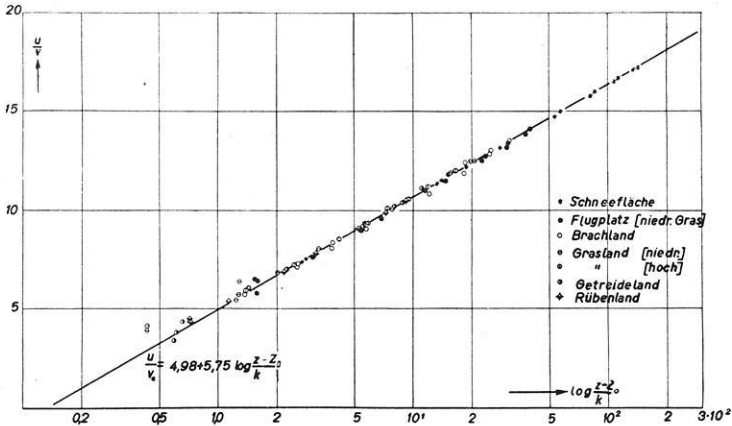


Fig. 5.  $\frac{u}{v_*}$  als Funktion von  $\log \frac{(z - z_0)}{k}$  für alle Geschwindigkeitsprofile. Die Darstellung läßt erkennen, daß das logarithmische Geschwindigkeitsverteilungsgesetz für alle gemessenen Rauigkeiten hinreichend erfüllt ist



Rauhigkeiten gemessenen Profilen das Aussehen von Geschwindigkeitsprofilen über einer ebenen Platte, wie sie im Laboratorium erhalten werden.

Schließlich lassen sich die Mittelwerte der Rauhigkeitslängen  $k$  für jede gemessene Bodenrauhigkeit aus einer dimensionslosen Auftragung von  $u/v_*$  über  $\log(z - z_0)$  mit Hilfe der Gleichung

$$\frac{u}{v_*} = 5.75 \log(z - z_0) + C \dots \dots \dots (6)$$

mit

$$C = 4.98 - 5.75 \log k$$

als Achsenabschnitt ermitteln (vgl. Fig. 4).

Eine Zusammenstellung dieser Werte gibt nachstehende Tabelle:

Art der Rauigkeit	Mittelwerte der Messungen	
	C[cm]	k[cm]
Ebene Schneefläche . . . . .	+ 1.75	3.64
Flugplatz Göttingen . . . . .	- 1.36	12.7
Brachland . . . . .	- 1.9	15.7
Niedriges Grasland . . . . .	- 2.9	23.5
Hohes Grasland . . . . .	- 3.4	29.0
Getreideland (Weizen) . . . . .	- 3.7	33.2
Rübenland . . . . .	- 4.75	49.3

Eine Kontrolle dieser Rechnungen gewährt Fig. 5. Es ist in diesem Falle für alle ausgewerteten Profile die dimensionslose Geschwindigkeit  $u/v_*$  über  $\log \frac{(z - z_0)}{k}$  aufgetragen. Sämtliche Profile (Meßpunkte) fallen gut in die Gerade

$$\frac{u}{v_*} = 4.98 + 5.75 \log \frac{(z - z_0)}{k} \dots \dots \dots (7)$$

die für die Bestimmung von  $k$  zugrunde gelegt ist. Die durchweg geringe Streuung ist in diesem Falle allerdings nur ein Beweis dafür, daß einmal das logarithmische Geschwindigkeitsverteilungsgesetz für alle gemessenen Rauhigkeiten hinreichend erfüllt und außerdem richtig gerechnet worden ist, denn die Konstanten  $v_*$  und  $k$  bzw.  $z_0$  sind für jedes Profil passend bestimmt worden. Nur für sehr kleine Werte von  $z/k$  ergeben sich systematische Abweichungen, bedingt durch die vorher erwähnten Störungen nahe der Bewachsung (Vegetationshöhe).

**Literatur**

[1] W. Paeschke: Feuchtigkeitseffekt bei Hitzdrahtmessung. Phys. Zeitschr. 36. Jahrg., 1935, Heft 16, S. 564.  
 [2] L. Prandtl: Meteorologische Anwendung der Strömungslehre. Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre (Bjerknes-Festschrift) 19, 188 (1932).  
 [3] L. Prandtl: Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung. Zeitschr. des Vereins Deutsch. Ing. 77, 105 (1933).  
 [4] J. Nikuradse: Strömungsgesetze in rauhen Röhren. VDI-Forschungsheft 361 (1933).