

50 JAHRE MONIN-ObUKHOV'sche ÄHNLICHKEITSTHEORIE

Thomas Foken
Universität Bayreuth

- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973



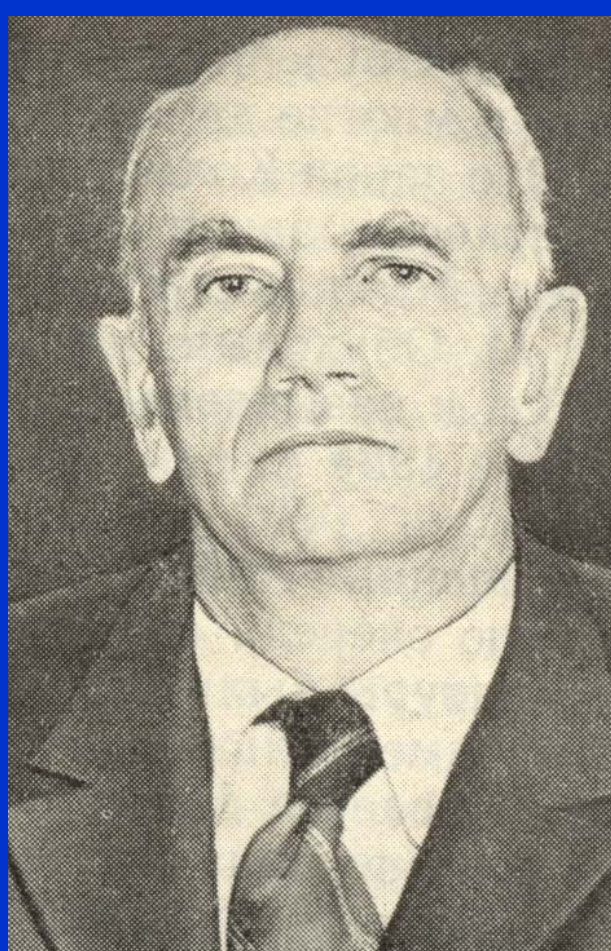
Thomas Foken
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
Meteorologentagung
Karlsruhe, 07-10.09.2004

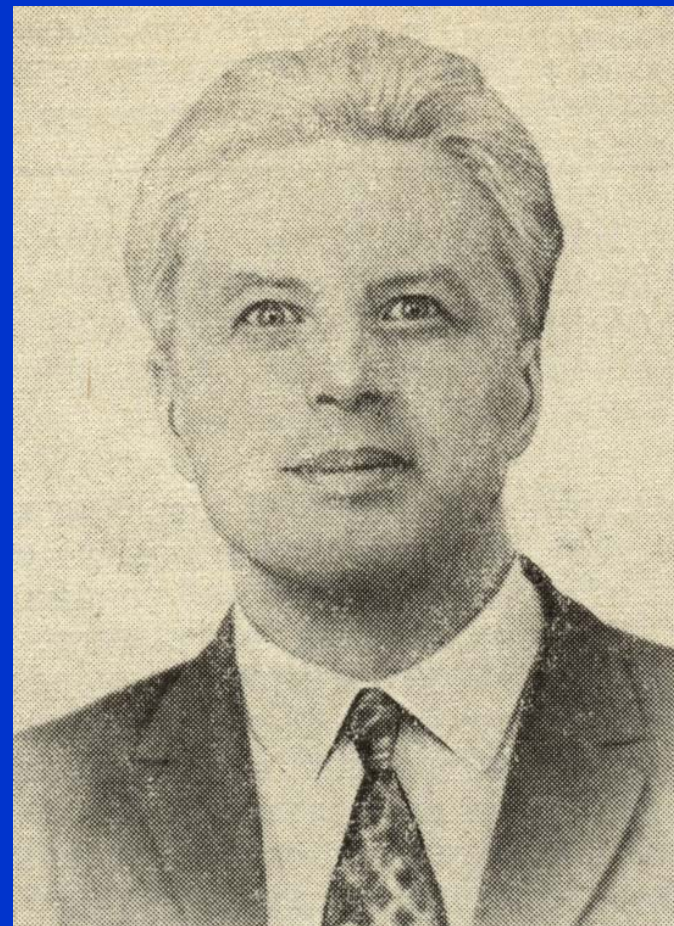


- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973



Aleksander M. Obukhov
05.05.1918 – 03.12.1989

Nachruf von A.M. Yaglom:
BLM 53 (1990), v-xi



Andrej S. Monin
*** 02.07.1921**



Thomas Foken
 Universität Bayreuth
 Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
 Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
 Meteorologentagung
 Karlsruhe, 07-10.09.2004

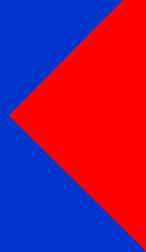


Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Persönliche Kontakte zu A. M. Obukhov und A. S. Monin

- 1975 and 1976: Teilnehmer der Expeditionen KASPEX-75 und KASPEX-76 des Instituts für Ozeanologie in Moskau (Direktor: A. S. Monin)
- 1981: Teilnehmer des Experimentes ITCE-81 in Tsimlyansk, Russland des Instituts für Physik der Atmosphäre (Direktor: A. M. Obukhov)
- 1980 – 1990: Wissenschaftlicher Sekretär des KAPG-Projektes “Untersuchung der Atmosphärischen Grenzschicht” initiiert durch A. M. Obukhov





Kurze Geschichte der Mikrometeorologie

Grundlegende Erkenntnisse zur Turbulenz in der Hydrodynamik und in der Atmosphäre durch Reynolds, Taylor, Prandtl, Richardson, v. Kármán, und andere.

- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

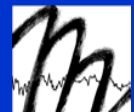


Kurze Geschichte der Mikrometeorologie

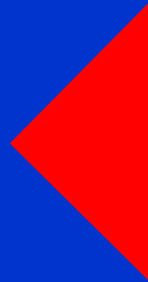


Vor dem 2. Weltkrieg war das Zentrum der Mikrometeorologie in Wien, München und Potsdam: Schmidt (Austauschkoeffizient), Geiger (Klima der bodennahen Luftschicht), Paeschke (Verschiebungshöhe), Albrecht (Instrumentelle Entwicklungen und globale Energiebilanz; nach dem Krieg in Australien), Lettau (Leipziger Windprofil; nach dem Krieg in den USA)

- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973



Kurze Geschichte der Mikrometeorologie



Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Während des 2. Weltkrieges kamen die meisten Entdeckungen von russischen Wissenschaftlern: Kolmogorov (Isotrope Turbulenz), Obukhov (Ähnlichkeitsanalyse, u.a.), Yaglom, Monin und anderen.



Thomas Foken
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
Meteorologentagung
Karlsruhe, 07-10.09.2004



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

Die Obukhov Länge

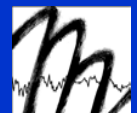
$$L = - \frac{v_*^3}{\kappa \cdot \frac{g}{T_0} \cdot \frac{q}{c_p \cdot \rho}}$$

$$\overline{w'T'} = \frac{q}{c_p \cdot \rho} = const$$

$$-\overline{\rho u'w'} = \tau = const \quad v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

Obukhov, A. M., 1946: Turbulence of the atmosphere with inhomogeneities in temperature (in Russian). Izv. AN SSSR, vol. 1

Alle Symbole entsprechend der Originalarbeit!



Grundlagen für die Ableitung der Obukhov-Länge



Annahme, dass die folgenden Parameter die atmosphärische Turbulenz über einem Pflanzenbestand beschreiben:

$$\frac{g}{T_0} \quad v_* \quad \frac{q}{c_p \cdot \rho}$$

Als Kombination gibt es nur einen einzigen Parameter mit der Dimension einer Länge – die Obukhov-Länge.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank 1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov 1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta 1963
Businger et al. 1971
Haugen 1973

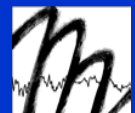
- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

Die turbulente Prandtl-Zahl

Annahme $K_H > K_m$ für labile Schichtung:

$$\frac{1}{Pr_t} = \frac{K_H}{K_m} > 1$$

Anmerkung: Monin & Obukhov (1954) nutzten $K_H = K_m$ wegen der vorhandenen experimentellen Probleme, sie dokumentierte aber eine mögliche Modifikation ihrer Theorie.



Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Die Eddy Kovarianz Methode

$$\tau = -\rho \overline{u'w'}$$

Obukhov: Die absolute Messung der Schubspannungsgeschwindigkeit ist von fundamentaler Bedeutung für Untersuchungen in der Bodenschicht und die Kontrolle indirekter Methoden.

Montgomery, R. B., 1948: Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. J. Meteorol 5: 265-274

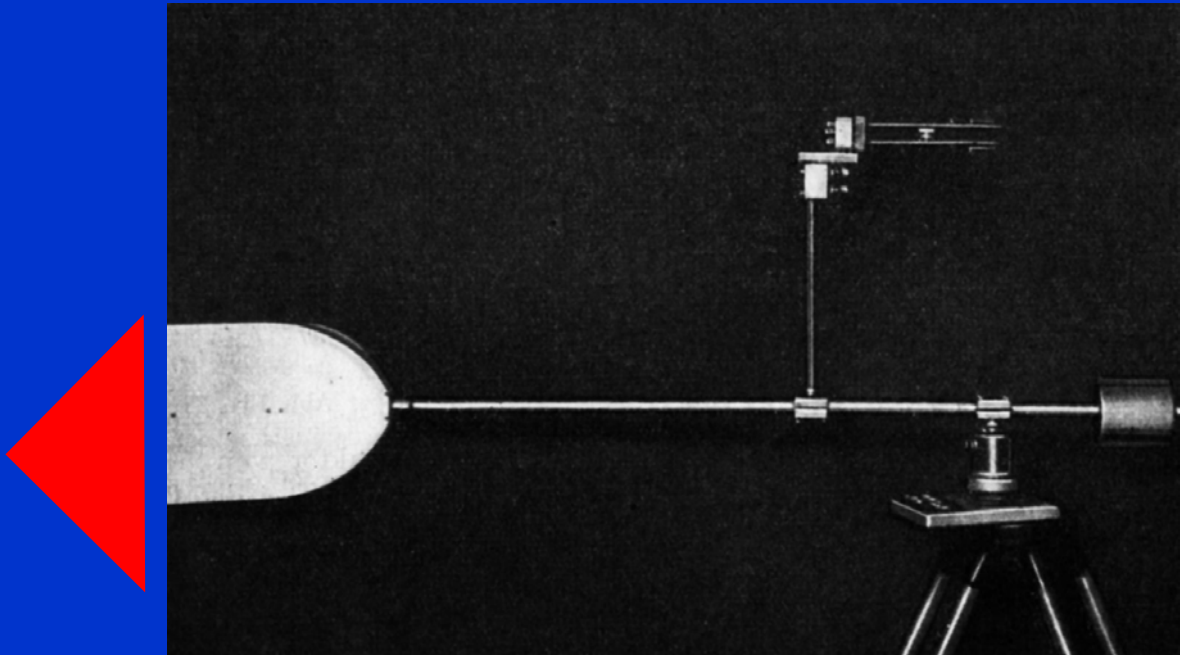
Obukhov, A. M., 1951: Investigation of the micro-structure of the wind in the near-surface layer of the atmosphere (in Russian). Izv. AN SSSR, ser. geophys., vol. 3, p. 49ff

Swinbank, W.C., 1951: The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. J. Meteorol. 8: 135-145.



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

Die Eddy Kovarianz Methode



Windfahne mit zwei Hitzdrahtanemometern (um 90° versetzt) zur Messung der Schubspannungsgeschwindigkeit (Obukhov, 1951) auf der Grundlage der Arbeiten von Konstantinonov (1949).



Reynolds 1894

Taylor 1910

Prandtl 1920

Richardson 1920

Schmidt 1925

Geiger 1927

Paeschke 1937

Albrecht 1940

Kolmogorov 1941

Obukhov 1946

Priestley/Swinbank
1947

Lettau 1949

Obukhov/
Swinbank 1951

Monin & Obukhov
1954

Obukhov 1960

Bovsheverov 1960

Kaimal/Mitsuta
1963

Businger et al.
1971

Haugen 1973

Die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie

Grundlagen:

- Grundlegende experimentelle Arbeiten des Geophysikalischen

Hauptobservatoriums Leningrad:

Lajchtman, Budyko, u.a.

- Das logarithmische Windprofil (Prandtl)
- Verschiebungshöhe (Paeschke, 1937)
- Obukhov-Länge (1946)

Monin, A. S., Obukhov, A. M., 1954: Fundamental laws of the turbulent mixing in the near surface layer of the atmosphere (in Russian). Trudy Geophys. Inst. AN SSSR No. 24 (151), p. 163 ff.

Alle Symbole entsprechend der Originalarbeit!

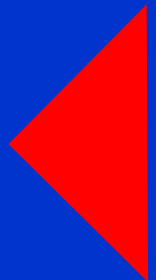
- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

Die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie

Die dimensionslosen Wind- und Temperaturprofile

ohne κ und $Pr_t = 1$

$$\frac{\kappa \cdot z}{v_*} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = \frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$$



müssen eine Funktion der externen Parameter

$$\frac{g}{T_0} \quad v_* \quad \frac{q}{c_p \cdot \rho}$$

und der Höhe z sein. Nur die Kombination z/L ist möglich.



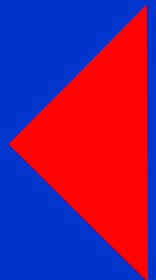
- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973

Die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie

Daraus folgen Wind- und Temperaturprofile mit den universellen Funktionen:

$$\frac{\kappa \cdot z}{v_*} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = \varphi_1\left(\frac{z}{L}\right)$$

$$\frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \varphi_2\left(\frac{z}{L}\right)$$



Die universelle Funktion kann für $|z/L| < 1$ als Reihe entwickelt werden mit $\beta = 0.6$:

$$\varphi\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + \beta \frac{z}{L}$$



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973

Die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie

Stark labile Schichtung, $z/L \ll -1$:

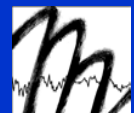
$$f\left(\frac{z}{L}\right) \approx C\left(\frac{z}{L}\right)^{-1/3} + const$$

**Stark stabile Schichtung $z/L \gg 1$:
Wegen**

$$K = \kappa \cdot v_* \cdot L \cdot Ri$$

folgt:

$$Ri \approx R = const$$



Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie als Dogma

Vor 20-30 Jahren war es nahezu unmöglich in
begutachteten Zeitschriften über
Forschungsergebnisse zu publizieren, die
nicht im Einklang mit der Ähnlichkeitstheorie
standen (speziell in Russland),

d.h. die ersten Studien über ‚Counter
Gradienten‘ wurden in ‚grauer‘ Literatur
publiziert:

- über dem Meer (Foken & Kuznecov, 1978),
- über Wald (Denmead & Bradley, 1985)



Thomas Foken
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
Meteorologentagung
Karlsruhe, 07-10.09.2004



Andere Ähnlichkeitsgesetze von Obukhov

Ähnlichkeitsfunktionen für den Strukturparameter:

$$C_T^2 \approx \overline{w'T'}^{4/3} \cdot \left(\frac{g}{T_0} \right)^{-2/3} \cdot z^{-4/3}$$

Obukhov, A. M., 1960: About the structure of the temperature and wind field under convective conditions (in Russian). Izv. A SSSR, ser. geophys., 1392-1396

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank 1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov 1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta 1963
Businger et al. 1971
Haugen 1973

Die Entwicklung des Ultraschallanemometers

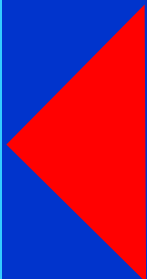
Eine notwendiges Messgerät zur Bestimmung universeller Funktionen:

Bovsheverov, V.M. & Voronov, V.P., 1960. Sonic propeller (in Russian). Izv. AN SSSR, seria geophys 6: 882-885.

Kaimal, J.C. & Businger, J.A., 1963. A continuous wave sonic anemometer-thermometer. J. Climate & Appl. Meteorol., 2: 156-164.

Mitsuta, Y., 1966. Sonic anemometer-thermometer for general use. J. Meteorol. Soc. of Japan, Ser. II, 44: 12-24.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

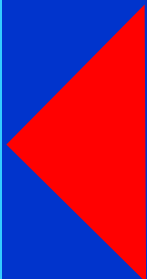


Die Entwicklung des Ultraschallanemometers



**Russisches Phasenverschiebungs-
Ultraschallanemometer (modernerer
Typ, 1986)**

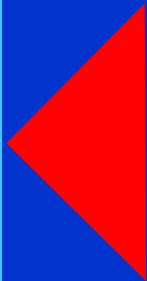
- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973

Experimentelle Anstrengungen

Verschiedene Experimente in den USA (O'Neill, Lettau), Australien (Kerang, Wangara u.a., Swinbank, Dyer), Russland (Tsimlyansk, Tsvang)



Tsimlyansker
Messfeld

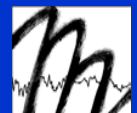
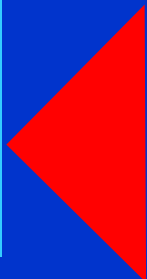


Reynolds 1894
 Taylor 1910
 Prandtl 1920
 Richardson 1920
 Schmidt 1925
 Geiger 1927
 Paeschke 1937
 Albrecht 1940
 Kolmogorov 1941
 Obukhov 1946
 Priestley/Swinbank
 1947
 Lettau 1949
 Obukhov/
 Swinbank 1951
 Monin & Obukhov
 1954
 Obukhov 1960
 Bovsheverov 1960
 Kaimal/Mitsuta
 1963
 Businger et al.
 1971
 Haugen 1973

Experimentelle Anstrengungen

Vergleichsexperimente für Turbulenzmessgeräte mit mikrometeorologischen Untersuchungen:

Jahr	Ort	Unterlage	Quelle
1968	Vancouver, Canada	water	Miyake et al. (1971)
1970	Tsimlyansk, Russland	step	Tsvang et al. (1973)
1976	Conargo, Australien	step	Dyer (1981); Dyer & Bradley (1982)
1981	Tsimlyansk, Russland	step	Tsvang (1985)



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973

Experimentelle Anstrengungen

Teilnehmer an ITCE-81 in Tsimlyansk



(von links nach rechts) Perepelkin, Gurjanov, Brömme, Richter, Tsvang, Gerstmann, Zubkovskij †, Obukhov †, Foken, Perepelkina, technician; nicht auf dem Bild: Kalistratova, Kukharez, Pretel, Zeleny †



Thomas Foken
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
Ähnlichkeitstheorie

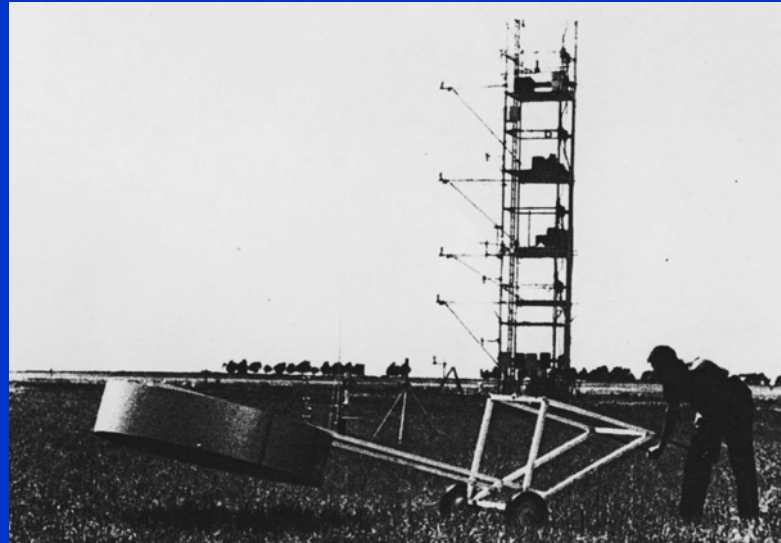
DACH 2004
Meteorologentagung
Karlsruhe, 07-10.09.2004



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank
1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov
1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta
1963
- Businger et al.
1971
- Haugen 1973

Experimentelle Anstrengungen

Das KANSAS Experiment 1968



Haugen – Kaimal – Wyngaard – Businger u.a.:
Izumi, Y., 1971. Kansas 1968 field program data
report. Air Force Cambridge Research Papers, No.
379, Air Force Cambridge Research Laboratory,
Bedford, MA.



Die Universal Funktion nach Businger et al. (1971)

$$\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right) = \begin{cases} \left(1 - 15 \frac{z}{L} \right)^{-1/4} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + 4.7 \frac{z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 1 \end{cases}$$

$$\varphi_H \left(\frac{z}{L} \right) = \begin{cases} 0.74 \cdot \left(1 - 9 \frac{z}{L} \right)^{-1/2} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \\ 0.74 + 4.7 \frac{z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 1 \end{cases}$$

$$\kappa = 0.35 \quad \frac{1}{\text{Pr}_t} = 1.35 \quad !$$

**Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and
Bradley, E.F., 1971. Flux-profile relationships in the
atmospheric surface layer. J. Atm. Sci. 28: 181-189.**

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Der 'Workshop on Micrometeorology'

O'KEYPS-Beziehung:

$$\left[\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]^4 - \gamma \cdot \frac{z}{L} \left[\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]^3 = 1$$
$$\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right) = \left(1 + \gamma \cdot \frac{z}{L} \right)^{-1/4}$$

Dyer-Businger-Beziehung:

$$\varphi_H = \begin{cases} \varphi_m^2 & z/L < 0 \\ \varphi_m & z/L \geq 0 \end{cases}$$

Haugen, D.H. (Editor), 1973. Workshop on micrometeorology. Am. Meteorol. Soc., Boston, 392 pp.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Thomas Foken
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
Meteorologentagung
Karlsruhe, 07-10.09.2004



Normierung der Obukhov-Länge

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \cdot \frac{1}{Pr_t} \cdot \frac{g}{T_0} \cdot \frac{\overline{w'T'}}{c_p \cdot \rho}}$$

Auch mit $1/Pr_t$

auch ohne κ ,
z. B. S. S. Zilitinkevitch

Yaglom, A.M., 1977. Comments on wind and temperature flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.*, 11: 89-102.

- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

Normierung der universellen Funktionen

$$\frac{\kappa}{\text{Pr}_t} \cdot \frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \varphi_H \left(\frac{z}{L} \right)$$

$$\varphi_H \left(\frac{z}{L} \right) = \text{Pr}_t \left(1 + \gamma \cdot \frac{z}{L} \right)^{-1/2} \quad \frac{z}{L} < 0$$

Einfügen von Pr_t sowohl in der Profilgleichung als auch in der universellen Funktion, z. B. bei Högström (1988) in der universellen Funktion.

Yaglom, A.M., 1977. Comments on wind and temperature flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.*, 11: 89-102.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank 1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov 1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta 1963
Businger et al. 1971
Haugen 1973

Die Obukhov-Länge für feuchte Luft

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \cdot \frac{g}{T_{v0}} \cdot \frac{\overline{w'T_v'}}{c_p \cdot \rho}}$$

Die Anwendung der virtuellen
(oder Schall-) Temperatur ist
physikalisch richtiger

aber

alle universellen Funktionen
wurden für trockene
Bedingungen bestimmt.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973



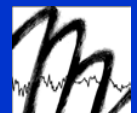
Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Kritik der KANSAS-Ergebnisse

- Flusstörungen durch den Mast
- Overspeeding der Schalensternanemometer
- Probleme mit den Phasenverschiebungs-Ultraschallanemometern
- Unrealistische von-Kármán-Konstante

Wieringa, J., 1980. A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorol.* 18: 411-430.

Högström, U., 1988. Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorol.* 42: 55-78.



Die universelle Funktion nach Businger et al. (1971), modifiziert durch Högström (1988)

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \left(1 - 19.3 \frac{z}{L}\right)^{-1/4} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + 6 \frac{z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 1 \end{cases}$$

$$\varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 0.95 \cdot \left(1 - 11.6 \frac{z}{L}\right)^{-1/2} & -2 < \frac{z}{L} < 0 \\ 0.95 + 7.8 \frac{z}{L} & 0 < \frac{z}{L} < 1 \end{cases}$$

$$\kappa = 0.4 \quad \frac{1}{Pr_t} = 1.05$$

Pr_t in der univ. Fkt. !

Högström, U., 1988. Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorol.* 42: 55-78.

- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973

Neuere Untersuchungen zum Stand der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie wurden z. B. diskutiert auf den Tagungen:

- EGS General Assembly 1990 Kopenhagen (Mascart & Dlugi)
- EGS Workshop Grenoble 1994 (Foken & Oncley)
- Zusammenfassung publiziert durch:

Högström, U., 1996. Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 78: 215-246.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Reynolds 1894
 Taylor 1910
 Prandtl 1920
 Richardson 1920
 Schmidt 1925
 Geiger 1927
 Paeschke 1937
 Albrecht 1940
 Kolmogorov 1941
 Obukhov 1946
 Priestley/Swinbank
 1947
 Lettau 1949
 Obukhov/
 Swinbank 1951
 Monin & Obukhov
 1954
 Obukhov 1960
 Bovsheverov 1960
 Kaimal/Mitsuta
 1963
 Businger et al.
 1971
 Haugen 1973

Die turbulente Prandtl-Zahl

Autor	$1/Pr_t$
Businger et al. (1971)	1.35
– Korrektur nach Wieringa (1980)	1.00
– Korrektur nach Högström (1988)	1.05
Kader & Yaglom (1972)	1.15 – 1.39
Foken (1990)	1.25
Högström (1996)	1.09 ± 0.04

aus: Foken, Th., 2003: Angewandte Meteorologie, Springer

Anmerkung: Selbst heute ist die Genauigkeit der turbulenten Prandtl-Zahl nur 5-10 %.



Thomas Foken
 Universität Bayreuth
 Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
 Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
 Meteorologentagung
 Karlsruhe, 07-10.09.2004



Reynolds 1894
 Taylor 1910
 Prandtl 1920
 Richardson 1920
 Schmidt 1925
 Geiger 1927
 Paeschke 1937
 Albrecht 1940
 Kolmogorov 1941
 Obukhov 1946
 Priestley/Swinbank
 1947
 Lettau 1949
 Obukhov/
 Swinbank 1951
 Monin & Obukhov
 1954
 Obukhov 1960
 Bovsheverov 1960
 Kaimal/Mitsuta
 1963
 Businger et al.
 1971
 Haugen 1973

Die von-Kármán-Konstante

Autor	κ
Monin & Obukhov (1954)	0.43
Businger et al. (1971)	0.35
Pruitt et al. (1973)	0.42
Högström (1974)	0.35
Kondo & Sato (1982)	0.39
Högström (1996)	0,40 ± 0,01

aus: Foken, Th., 1990: Turbulenter Energieaustausch. Ber. DWD No. 180

Anmerkung: Der Wert 0.40 für die von-Kármán-Konstante ist weitgehend akzeptiert.



Thomas Foken
 Universität Bayreuth
 Abteilung Mikrometeorologie

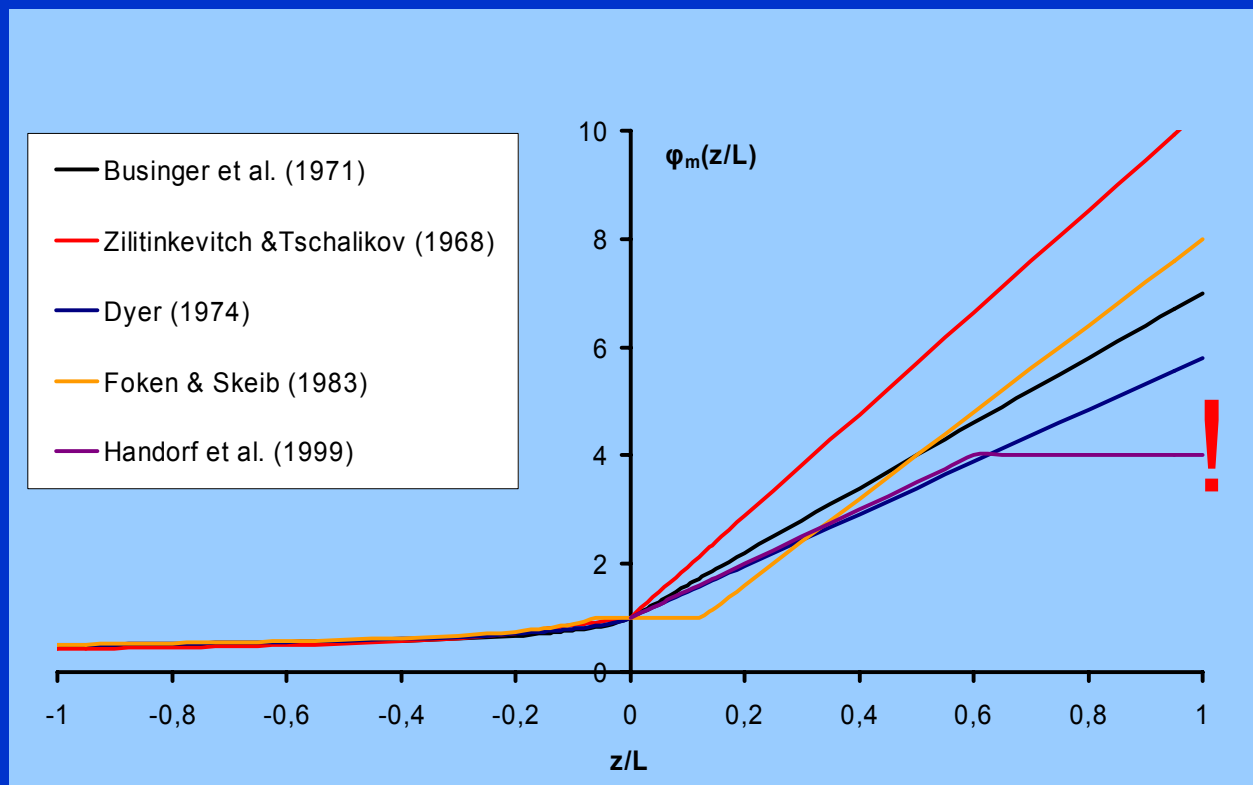
50 Jahre Monin-Obukhov'sche
 Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
 Meteorologentagung
 Karlsruhe, 07-10.09.2004



Reynolds 1894
 Taylor 1910
 Prandtl 1920
 Richardson 1920
 Schmidt 1925
 Geiger 1927
 Paeschke 1937
 Albrecht 1940
 Kolmogorov 1941
 Obukhov 1946
 Priestley/Swinbank
 1947
 Lettau 1949
 Obukhov/
 Swinbank 1951
 Monin & Obukhov
 1954
 Obukhov 1960
 Bovsheverov 1960
 Kaimal/Mitsuta
 1963
 Businger et al.
 1971
 Haugen 1973

Die universellen Funktionen



Anmerkung: Nach Modifikation durch Högström (1988), keine markanten Probleme bei labiler Schichtung, aber ...



Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Genauigkeit der universellen Funktionen

- $|z/L| \leq 0.5$: $|\delta\phi_H| \leq 10 \%$
- $|z/L| \leq 0.5$: $|\delta\phi_m| \leq 20 \%$
- $z/L > 0.5$: $\phi_H, \phi_m = \text{const} ?$
- $\phi_H, \phi_m = f(z_i) ?$ (Johannson et al. 2001)

Anmerkung: Die Einschränkungen in der Genauigkeit der turbulenten Prandtl- und Schmidt-Zahl und die der universellen Funktionen beeinflussen alle Wetter- und Klimamodelle!

Högström, U., 1996. Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 78: 215-246.



Begrenzung in der Gültigkeit der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie

- nur in der Bodenschicht (constant flux layer, Prandtl-Schicht) gültig
- nur gültig für $|z/L| \leq 1 \dots 2$
- nur gültig oberhalb der rauen Unterschicht (möglicherweise nicht gültig über hoher Vegetation)
- nur gültig über homogenen Unterlagen

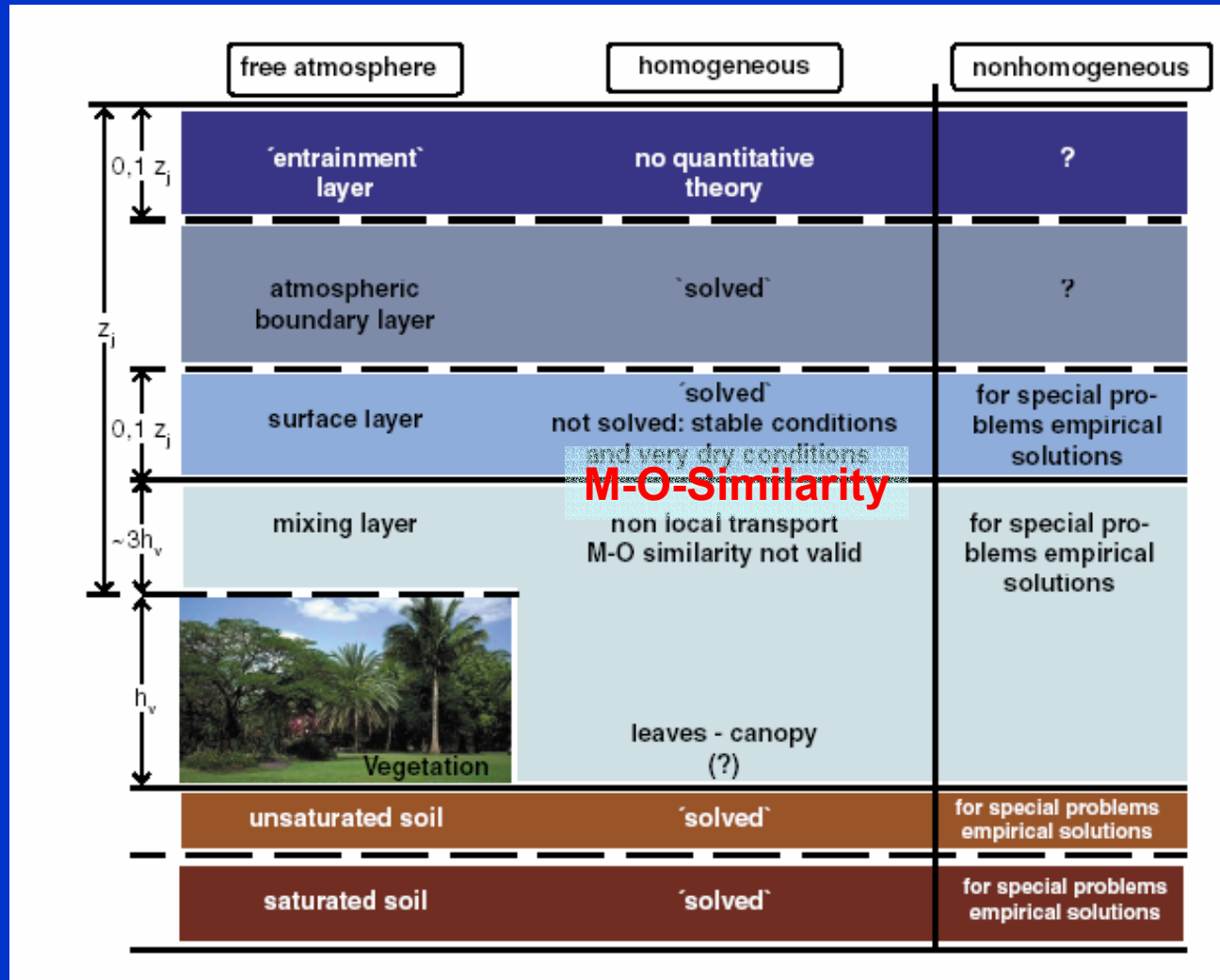
Anmerkung: Ein besseres Verstehen der Grenzen unter nicht-idealen Bedingungen setzt ein exaktes Wissen über die Parameter der Ähnlichkeitstheorie voraus.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Was wissen wir ?

Plugi & Mascart (1990)

- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973



M-O-Similarity



Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973

Der Schlüssel zu exakten Parametern der Ähnlichkeitstheorie sind direkte Flussmessungen (Obukhov, 1946)

There are some among us who consider turbulence and its measurement to be a black art. There are others who criticize because they perceive a lack of proof of the validity of the measurements that are reported; and there are some of use who must recognize that some of our earlier results are indeed suspect. However, all is not as bad as it might sometimes seem.

B. B. Hicks (1986)

.... und einige Fortschritte sind gemacht worden in
den letzten 15-20 Jahren.



Die Zeit ist reif für ein neues KANSAS- oder Tsimlyansk- Experiment!

- Wyngaard et al. (1982): Die Probleme mit KANSAS 1968 können nur mit einem neuen Experiment gelöst werden.
- Die Eddy Kovarianz Methode wurde in den letzten 5-10 Jahren deutlich weiterentwickelt (neue Geber, verbesserte Korrekturen, Qualitätskontrollen).
- Modellierer müssen verstehen, dass nur eine bessere Physik und keine 'Schrauben' der Schlüssel zu besseren Modellen sind und dass die Bodenflüsse ein wesentlicher Teil in jedem Modell sind.

Reynolds 1894
Taylor 1910
Prandtl 1920
Richardson 1920
Schmidt 1925
Geiger 1927
Paeschke 1937
Albrecht 1940
Kolmogorov 1941
Obukhov 1946
Priestley/Swinbank
1947
Lettau 1949
Obukhov/
Swinbank 1951
Monin & Obukhov
1954
Obukhov 1960
Bovsheverov 1960
Kaimal/Mitsuta
1963
Businger et al.
1971
Haugen 1973



- Reynolds 1894
- Taylor 1910
- Prandtl 1920
- Richardson 1920
- Schmidt 1925
- Geiger 1927
- Paeschke 1937
- Albrecht 1940
- Kolmogorov 1941
- Obukhov 1946
- Priestley/Swinbank 1947
- Lettau 1949
- Obukhov/
Swinbank 1951
- Monin & Obukhov 1954
- Obukhov 1960
- Bovsheverov 1960
- Kaimal/Mitsuta 1963
- Businger et al. 1971
- Haugen 1973



ITCE-81 Tsimlyansk

Die 50 Jahre der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie sind auch 50 Jahre einer modernen Mikrometeorologie. Der Dank gilt unseren Lehrern, die daran ihren Beitrag haben.



Thomas Foken
Universität Bayreuth
Abteilung Mikrometeorologie

50 Jahre Monin-Obukhov'sche
Ähnlichkeitstheorie

DACH 2004
Meteorologentagung
Karlsruhe, 07-10.09.2004

