

Modellierung der Schallausbreitung in einer realen Atmosphäre

Dr. Dietrich Kühner, deBAKOM GmbH, Odenthal

1. Einleitung

Die Ähnlichkeitstheorie nach Monin-Obukhov [1] ist heute die Basis für die Beschreibung der bodennahen Atmosphäre. Die daraus abgeleiteten Modelle zur turbulenten Diffusion von Luftverunreinigungen beschreiben den derzeitigen Stand der Technik zur Ausbreitung luftfremder Stoffe. Die Entwurfsfassung einer neuen „Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ tabelliert verbindlich für 6 Ausbreitungsklassen, die Bodenrauigkeit und die Monin-Obukhov-Längen. Das bedeutet, dass praktisch für jeden Ort in Deutschland die Häufigkeit der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Stabilitätsklasse mit den zugehörigen Monin-Obukhov-Längen zur Verfügung steht, wobei über die Bodenrauigkeit eine Anpassung an die jeweilige Bodenstruktur erfolgt, d.h. ob die Ausbreitung über Wasser, Feld und Wiese, Stadt oder Wald erfolgt. Ausgehend von diesen Größen können sowohl die Wind- als auch die Temperaturprofile bzw. deren Gradienten berechnet werden. Darüber hinaus stehen Aussagen über die Turbulenz zur Verfügung. Die daraus ableitbaren Aussagen zur Schallausbreitung im Freien sollen hier umrissen werden.

2. Wind- und Temperaturprofile und Stabilitäts- oder Ausbreitungsklassen

In Abbildung 1 ist das Windgeschwindigkeits- und Temperaturprofil für die Stabilitätsklasse I nach TALuft bei einer Rauigkeitslänge von 0.01 bei 2 m/s Windgeschwindigkeit (Monin-Obukhov-Länge 7 m) dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass das Temperaturprofil schon im bodennahen Bereich von einigen Metern linear verläuft und mit zunehmender Höhe die Temperatur zunimmt. Andererseits stellt sich dieser lineare Anstieg bei der Windgeschwindigkeit oberhalb von 40 m ein.

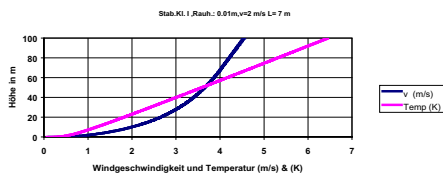


Abb. 1 :Wind- und Temperaturprofil für Inversionswetterlage

In Abbildung 2 sind die Gradienten dargestellt, d.h. sie sind positiv und in bodennahen Bereichen deutlich nicht linear.

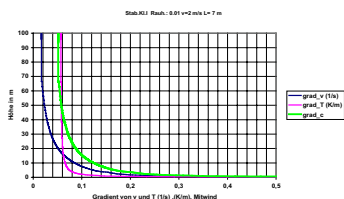


Abb. 2: Wind- u. Temperaturgradient für Inversionswetterlage

Bei gleicher Windgeschwindigkeit und geschlossener Wolkendecke nachts oder auch tagsüber stellen sich für die Stabilitätsklasse III (nach TALuft III1) die Profile ein, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind.

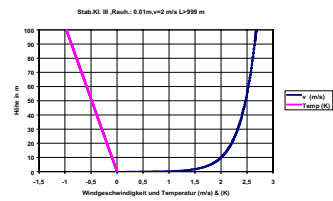


Abb. 3: Wind- u. Temperaturprofil f. indifferente Wetterlage (Stabilitätsklasse III und v = 2 m/s)

Das Windprofil folgt streng der logarithmischen Höhenabhängigkeit, das Temperaturprofil ist linear und wird durch die adiabatische Temperaturabnahme mit der Höhe bestimmt, die $-1 \text{ }^\circ\text{C pro 100 m}$ beträgt. Der Temperaturgradient ist, wie der Abbildung 4 entnommen werden kann, konstant und für den Wind proportional mit $1/\text{Höhe}$, jedoch positiv.

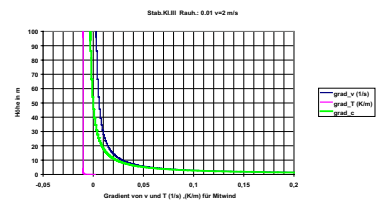


Abb. 4: Wind- und Temperaturgradienten

Ab 50 m ist auch für die Mitwindrichtung damit zu rechnen, dass der Gradient der Schallgeschwindigkeit

$$(1) \quad \frac{dc}{dz} = \frac{\partial v}{\partial z} + 0,6 \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

negativ wird. Das bedeutet, dass die Reichweite der Quelle begrenzt ist, oder dass der Schallstrahl ab einem bestimmten Abstrahlwinkel nicht mehr zum Boden zurückkommt und sich in Mitwindrichtung eine Schattenzone ausbildet.

Für die gleiche Windgeschwindigkeit sind die Profile in Abbildung 5 und 6 für die Stabilitätsklasse VI (V nach TALuft) dargestellt.

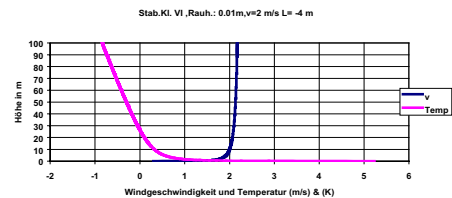


Abb. 5: Wind- und Temperaturprofil (Stabilitätsklasse VI)

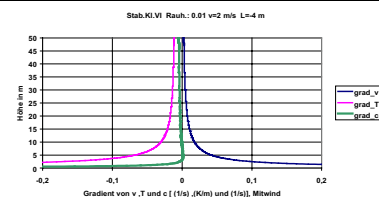


Abb. 6: Gradienten Wind, Temperatur und Schallgeschwindigkeit (Stabilitätsklasse VI)

Der Schallgeschwindigkeitsgradient ist außer für den Höhenbereich von 4 bis 10 m, wie Abb. 6 zeigt, negativ, d.h. es bildet sich in Mitwindrichtung eine Zone aus, in die Schall hineingelenkt wird; danach erfolgt für eine bodennahe Quelle die Ausbildung einer Schattenzone. Dies erklärt beispielsweise, warum Schießlärm bei Abständen über 1.000 m tagsüber bei Sonnenschein und Mitwind nicht immer wahrnehm-

bar ist, da sich in Mitwindrichtung eine Schattenzone ausbildet, die von der Windgeschwindigkeit abhängt.

3. Turbulenz

Wenn in Mitwindrichtung eine Schattenzone entsteht, stellt sich die Frage, wieviel akustische Energie durch Turbulenz oder turbulente Fluktuation der Gradienten in die Schattenzone eingestreu wird. Die Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie liefert auch zur Turbulenz detaillierte Informationen. In Abbildung 7 sind für die Ausbreitungsklasse V die Streuungen der Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Höhe angegeben. Addiert man die Streuungen quadratisch, ergibt sich ca. **0.6 m/s** in Bodennähe und in 10 m Höhe ca. **0.5 m/s**.

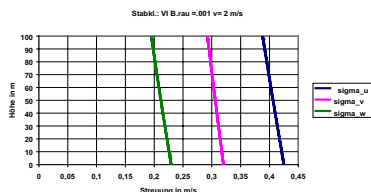


Abb. 7: Streuung der drei Komponenten des Windvektors in Abhängigkeit von der Höhe

Die Schallgeschwindigkeit c kann mit der von Reynold stammenden Formulierung zur Darstellung turbulenter Strömungen durch einen Mittelwert \bar{c} und einen durch die Turbulenz bestimmten Wert c' beschrieben werden:

$$(2) \quad c = \bar{c} + c'$$

Entsprechend Gl.(2) kann geschrieben werden:

$$(3) \quad c = c_o + \overline{v_h \cdot (z)} + v_h(z)$$

wobei v_h für die horizontale Windgeschwindigkeit steht, die aus einem Mittelwert $\overline{v_h}$ und einem turbulenten Wert v_h besteht. c_o ist die Schallgeschwindigkeit des ruhenden Mediums, Temperaturfluktuationen werden zur Vereinfachung der Formulierung vernachlässigt.

Die Schallausbreitung wird durch den Gradienten der Schallgeschwindigkeit bestimmt, der durch den Differenzquotienten angenähert werden kann:

$$(4) \quad \frac{\Delta c}{\Delta z} = c_o + \frac{c_1 \cdot (v_h \cdot (z + \Delta z)) + c_1 \cdot (v_h'(z + \Delta z) - v_h'(z))}{\Delta z}$$

Der Ausdruck legt nahe, dass der Schallgeschwindigkeitsgradient zur Zufallsgröße wird, wenn $v_h'(z + \Delta z)$ mit $v_h'(z)$ nicht zumindest autokorreliert und

$$\overline{v_h \cdot (z)} < \bar{v}'$$

wobei \bar{v}' die Streuung der Windgeschwindigkeit ist. Abbildung 5 legt für 2 m/s Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe für die Mitwindrichtung nahe, dass diese Bedingung erst ab einer Höhe von 0.5 m über dem Boden erfüllt ist. Die Bedingung

$$\overline{v_h(z)} \gg \bar{v}'$$

wird auch für Höhen bis 100 m nicht erfüllt. In Abbildung 8 ist ein mit Sodar gemessenes Profil [2] dargestellt, das zeigt, daß die obigen Überlegungen durch Messungen unmittelbar zu belegen sind.

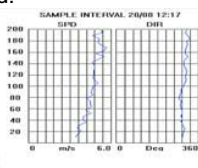


Abb. 8: Sodar gemessenes Profil der Windgeschwindigkeit (SPD) und Richtung (DIR) [2]

Aus dieser Abbildung wird auch deutlich, dass die turbulenten Änderungen autokorreliert sind. Aus der Ähnlichkeitstheorie lassen sich diese Autokorrelationen unmittelbar ableiten. Für die Wetterlage der Abbildung 6 ergibt sich die in Abbildung 9 dargestellte Autokorrelationsfunktion:

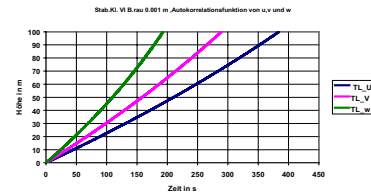


Abb. 9: Autokorrelationszeiten in der Stabilitätsklasse VI

Mit der Windgeschwindigkeit von 2 m/s multipliziert ergibt sich die Autokorrelationslänge, d.h. beispielsweise, dass die Autokorrelationslänge in 20 m Höhe ca. 140 m beträgt und für die vertikale Windbewegung ca. 80 m. Das bedeutet, dass in diesen Höhen der Einfluss der Turbulenz auf den Gradienten erheblich ist, d.h., dass die turbulente Autokorrelationszeit 80 s beträgt. Hingegen ist in Bodennähe und nahe am Boden die Autokorrelationslänge im Bereich von Metern oder Zentimetern, so dass hier davon ausgegangen werden kann, dass der Schallgeschwindigkeitsgradient durch den Zufallsanteil des Windfeldes dominiert wird und zu einer überwiegend turbulenten Größe wird. Damit stellt sich die Frage, wie im Sinne der Gleichung 2 der mittlere Schallgeschwindigkeitsgradient zu bestimmen ist. Dabei bietet sich an, $\frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$ durch Mittelung

über das Eikonale der Schallwelle zu bestimmen:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{1}{a} \cdot \int_0^a \frac{\partial c(z) \cdot 1}{\partial z \cdot \sqrt{1 + z'^2}} dx$$

wobei x die Ausbreitungsrichtung und a die Länge des Eikonals (x) ist. Dieses Integral kann vereinfacht werden, indem man über die Ausbreitungsfläche F integriert, die durch den Abstand A zwischen Quelle und Aufpunkt und die maximale Höhe Z_{max} des Eikonals definiert ist. Dies führt zu:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\overline{v_h(Z_{max} \cdot Z_o)}}{Z_{max}}$$

wobei Z_o die Bodenrauigkeiten beschreibt und Z_{max} die maximale Höhe des Eikonals über dem Boden. Für einen parabolischen Eikonilverlauf führt Z_{max} zu der folgenden einfachen Bestimmungsgleichung:

$$Z_{max}^2 = \frac{r^2 \cdot v \cdot (Z_{max})}{8 \cdot c_o}$$

oder v der Abstand ist. Für eine indifferente Wetterlage zu

$$Z_{max}^2 = \frac{r^2 \cdot u_*}{8 \cdot c_o \cdot k} \ln \cdot (Z_{max} / Z_o)$$

wobei u_* die Schubspannungsgeschwindigkeit ist und k die Karman Konstante.

Mit der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie lässt sich die obige Gleichung für indifferente Wetterlagen auf alle Wetterlagen verallgemeinern, einschließlich der Berücksichtigung der Einflüsse der Temperatur und der Luftfeuchte, d.h. in Verbindung mit der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie lassen sich einfache Ausbreitungsmodelle formulieren, die eine hohe Genauigkeit in der Beschreibung der meteorologischen Effekte erwarten lassen.

4. Schrifttum

- [1] Alfred K. Blackadar, Turbulence and Diffusion in the Atmosphere, Springer Verlag, 1998
- [2] Prof. Stuart Bradley, University of Salford