

# Dreidimensionale Windmessung und deren Nutzungsmöglichkeit für die Umweltakustik

Dr. Dietrich Kühner, deBAKOM GmbH, Odenthal

## 1. Einleitung

Mit Förderung durch die Europäische Union und das Umweltbundesamt wird derzeit ein Forschungsprojekt durchgeführt, mit dem ein für die gesamte Europäische Union anwendbares Modell zur Schallausbreitung entwickelt werden soll. Die deBAKOM GmbH ist Mitglied des Konsortiums und befasst sich mit der Beschaffung von Messdaten zur Validierung des Modells [1].



[www.harmonoise.org](http://www.harmonoise.org)

Abb. 1: HARMONOISE Logo + Website

Seitens der Meteorologen wurde unmittelbar nach der Bewilligung des Projekts im August 2001 angeregt, dreidimensionale Winddaten oder den Windvektor direkt messtechnisch zu erfassen. Im folgenden sollen die Gründe dafür dargelegt werden.

## 2. Messung

Die Messung des Windvektors erfolgt mit drei Ultraschallgebern, die in drei unterschiedlichen Winkeln angeordnet sind. Gemessen wird die Schallgeschwindigkeit für diese drei Richtungen und daraus der Windvektor und die Temperatur bestimmt. Abbildung 2 zeigt den Sensor.



Abb. 2: Sensor

Die zeitliche Auflösung kann mit dem gezeigten Sensor bis auf 160 Hz gebracht werden. Die vertikale Windgeschwindigkeit  $v_z$  ist naturgemäß deutlich niedriger als die horizontalen Komponenten. Welche Informationen lassen sich aus diesem extensiven Datenfluss ableiten?

## 3. Turbulente kinetische Energie

Nach einem Ansatz, der auf Reynolds zurückgeht, kann die Windgeschwindigkeit für jede Komponente in zwei Teile zerlegt werden, einen Teil, der seinen Wert langsam ändert und einen turbulenten Teil, der sich schnell ändert:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ (1) \quad v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ T &= \bar{T} + T' \end{aligned}$$

Die kinetische Energie der sich im Windfeld bewegenden Luft ergibt sich aus:

$$(2) \quad E_{kin} = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2),$$

mit  $\rho$  der Dichte der Luft. Die mittlere kinetische Energie ist durch

$$(3) \quad E_m = \frac{1}{2} \rho (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)$$

gegeben ist und die turbulente kinetische Energie TKE, die durch

$$(4) \quad TKE = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

bestimmt ist. Weiter lassen sich aus dieser Messung  $\overline{w' \cdot T'}$  oder die Mischterme in der Form  $\overline{u' \cdot v'}$  oder  $\overline{(u'+v') \cdot w'}$  unmittelbar mit Hilfe der dreidimensionalen Windmessung bestimmen. Weiter können neben der Temperaturvarianz auch Mischterme mit der Temperaturfluktuation bestimmt werden, wie z. B. der Term  $\overline{w' \cdot T'}$ , d.h. der Mischterminus aus vertikaler Windgeschwindigkeitsfluktuation und Temperaturfluktuation.

## 4. Wetterlage

Eine Ableitung der physikalischen Zusammenhänge ist im Rahmen dieses Vortrags nicht möglich; hier sei auf die einschlägige meteorologische Literatur [2] verwiesen. Hier soll

das wichtigste Beispiel herausgegriffen werden. Der Wärmehalt eines Luftvolumens gegenüber seiner Umgebung wird durch beschrieben:

$$(5) \quad W = c_p \cdot \rho \cdot T^4$$

mit  $\rho$  der Dichte der Luft und  $c_p$  der spezifischen Wärme. Multipliziert mit der vertikalen Windgeschwindigkeit ergibt sich der vertikale Wärmefluss  $H$ , der durch die turbulente Strömung transportiert wird:

$$(6) \quad H = c_p \cdot \rho \cdot \overline{wT}$$

Ist der Wärmefluss positiv  $H > 0$ , wird Wärme, die am Boden durch Sonneneinstrahlung freigesetzt wird, nach oben transportiert. Ist der Wärmefluss negativ, d.h. Wärme wird zum Boden transportiert  $H < 0$ , liegt eine stabile Wetterlage vor. Diese Situation entsteht, wenn dem Boden durch Strahlungskühlung Energie entzogen wird. Dies geschieht in der Regel nachts bei offenem Himmel. Ist  $H \sim 0$ , dann liegt eine indifferente Wetterlage vor. Damit ist aus der 3D-Windmessung eine unmittelbare Bestimmung der Wetterlage möglich und damit der für die Schallausbreitung wichtigen Temperatur- und Windprofile, wie im folgenden gezeigt wird.

## 5. Windprofile

Monin und Obukhov haben in den 50er Jahren gezeigt, dass die Strömung der Luft in den bodennahen Luftschichten über eine Länge  $L$  skaliert werden kann. Diese sogenannte Monin-Obukhov-Länge ergibt sich aus:

$$(7) \quad L = -\frac{c_p \cdot \overline{\rho} \cdot \overline{T} \cdot u_*^3}{k \cdot g \cdot H}$$

wobei  $u_*$  die Reibungsgeschwindigkeit oder Schubspannungsgeschwindigkeit ist,  $k$  die Karmann-Konstante und  $g$  die Erdbeschleunigung.  $L$  ist unabhängig von der Höhe über dem Boden. Aufgrund dieser Eigenschaft lassen sich die Wind- und Temperaturgradienten durch die Variable

$$(8) \quad \zeta = Z / L$$

ausdrücken. Die Änderung der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit und der Höhe lässt sich nunmehr durch

$$(9) \quad \frac{k \cdot z \cdot \partial \overline{u}}{u_* \cdot \partial z} = \varphi_m(\zeta)$$

ausdrücken, wobei für  $H \approx 0$

$$(10) \quad \zeta = 0$$

und  $\varphi_m = 1$  ist. Für stabile Wetterlagen hingegen gilt

$$(11) \quad \varphi_m(\zeta) = 1 + 5\zeta = 1 + 5 \cdot z / L$$

und für instabile Wetterlagen

$$(12) \quad \varphi_m(\zeta) = (1 - 16\zeta)^{-1/4} = \left(1 - \frac{16 \cdot z}{L}\right)^{-1/4}$$

Das Geschwindigkeitsprofil des Windes ergibt sich durch Integration von Gl.(9)

$$(13) \quad \overline{v}_k = \frac{u_*}{k} m \cdot \ln \left[ \left( \frac{z}{z_o} \right) - \Phi m(\zeta) \right]$$

mit  $z_o$  der Höhe über dem Boden, ab der die mittlere Windgeschwindigkeit  $\overline{v}_k > 0$  ist.

$\Phi m$  ist wie folgt definiert:

$$(14) \quad \Phi m(\zeta) = \int_0^{\zeta/L} [1 - \varphi m(\zeta)] \cdot d\zeta$$

Damit können aus Gl.(7) und Gl.(9) mit der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit und dem Wärmefluss  $u_*$  und  $L$  bestimmt und anhand Tabelle 14 TALuft-Entwurf über Bodenrauigkeit die Profile berechnet werden.

In den VDI-Richtlinien 3945 [3] und 3783 [4] finden sich heuristische Profile und hilfreiche ergänzende Informationen.

Entsprechend kann für das Temperaturprofil und die Feuchteverfahren werden. Somit stehen ausgehend von der Messung des dreidimensionalen Windvektors und der Temperatur alle Größen zur Verfügung, um das Windprofil und Temperaturprofil bis 200 oder 300 m über dem Boden zu berechnen, wobei für die Zwecke der Akustik prinzipiell die Gradienten ausreichend sind.

## 6. Zusammenfassung

Damit steht ein einfach zu handhabendes Gerät zur Verfügung, mit dem gesichert günstige Ausbreitungsbedingungen bestimmt werden können. Andererseits ist davon auszugehen, dass das zukünftige harmonisierte europäische Ausbreitungsmodell wesentlich auf diese Profile aufbaut.

Weiter sei darauf hingewiesen, dass die neue TALuft, die derzeit als Entwurf vorliegt, ebenfalls mit geringer Modifikation auf das obige Modell abstellt.

Herrn Prof. Heimann von der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt sei für seine Hinweise an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

## 7. Schrifttum

- [1] European Noise Model „HARMONOISE“, European Commission, DG Information Society, Unit B4 „Applications for the Protection of the Environment“
- [2] Alfred K. Blackadar, Turbulence and Diffusion in the Atmosphere, Springer Verlag, 1998
- [3] VDI 3945, Umweltmeteorologie, Atmosphärische Ausbreitung, Partikelmodell, Teil 3
- [4] VDI 3783, Umweltmeteorologie, Messwertgeführte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle