

# Quellenortung im Freiland: Einfluss der Umgebungsbedingungen und Bestimmung der Quellenhöhe durch Bodeneffektinversion

Roland Kruse<sup>1</sup>, Shahram Taherzadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Oldenburg, Institut für Physik, 26111 Oldenburg, E-Mail: roland.kruse@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> The Open University, Dept. of Design, Development, Environment and Materials, MK7 6AA Milton Keynes, UK

## Einleitung

Mikrofonarrays dienen der Lokalisation von Schallquellen sowie der Unterdrückung von Hintergrundgeräuschen. Anwendungen im Freiland sind die Detektion von Personen und Fahrzeugen und die Bestimmung der Quellposition(en) an ausgedehnten Objekten wie Industrieanlagen. Typischerweise ist der Abstand Array / Quelle wesentlich höher als die Arrayabmessungen, so dass das Freifeld – Fernfeldmodell verwendet wird. Dieses ist eine deutlich vereinfachte Beschreibung der Schallausbreitung im Freien, mehrere Faktoren beeinflussen sie (Abb.1).

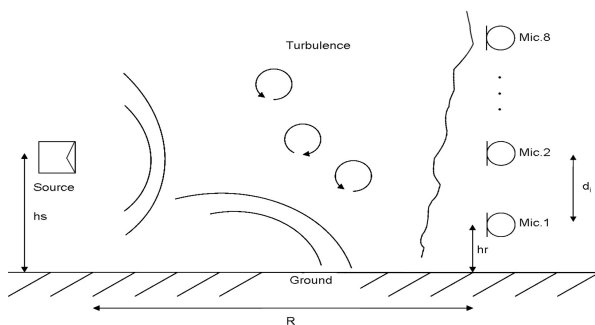


Abb. 1: Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Schallausbreitung im Freien.

Der Direktschall ist überlagert mit der Bodenreflexion. Vertikale Schallgeschwindigkeitsgradienten führen zu einem Kippen der Wellenfront. Turbulenz führt zu zufälligen Schwankungen in Schalldruck und Phase. Als Resultat ändern sich die Phasen- (und Pegel-) Beziehungen an den Arraymikrofonen, die die Basis der Lokalisationsverfahren darstellen. Darüber hinaus kommt es zu Änderungen im Absolutschallpegel und somit zu einer Änderung im Signal/Rauschverhältnis (SNR). In der Literatur sind als Konsequenz Schwankungen des Positionsschätzers sowie systematische Abweichungen beschrieben [1]. Theoretische Studien bestätigen den Anstieg der Variabilität mit zunehmender Stärke der Turbulenz und Quellentfernung [2]. Die praktischen Auswirkungen werden unterschiedlich bewertet. Einerseits werde der Effekt der Turbulenz mit zunehmender Arraygröße verringert [3]. Andererseits kann die Korrelationslänge so gering sein, dass größere Arrays keine bessere Leistung erbringen als solche mittlerer Größe [4]. Um den Einfluss der verschiedenen Umweltfaktoren im Freiland auf die Quellenortung besser zu verstehen und zu robusteren Verfahren zu gelangen wurde die nachfolgende Studie durchgeführt.

## Methode

Der Effekt der Faktoren Bodenimpedanz, Schallgeschwindigkeitsgradient und Turbulenz wurde durch numerische Simulation bestimmt. Zunächst wurde für

verschiedene Geometrien und Arraygrößen die komplexe Übertragungsfunktion zwischen Quelle und (8) Mikrofonen mittels analytischem Modell [5] bzw. CN-PE ermittelt. Testsignalen verschiedener Frequenz wurde räumlich weißes Rauschen hinzugefügt, um einen SNR von 20 dB zu erhalten. Zwei Verfahren der Lokalisation wurden eingesetzt: der *delay-and-sum* Beamformer [6] sowie MUSIC [7] als hochauflösendes Verfahren. Zusätzlich wurde statt des Freifeldmodells das die Bodenreflexion berücksichtigende Modell [5] zusammen mit diesen klassischen Verfahren angewandt („Bodeneffektinversion“). Zur Validierung wurden Freilandmessungen mit einem 8-elementigen, vertikalen linearen Array mit 20cm Mikrofonabstand über verschiedenen Böden mit ein bzw. zwei Quellen ausgeführt.

## Ergebnisse und Diskussion

Der Einfluss der Bodenreflexion auf horizontale und vertikale Arrays bei Verwendung der Freifeldannahme ist in Abb.2 dargestellt. Während bei horizontalen Arrays nur Fehler in der geschätzten Einfallsrichtung (DOA) von wenigen Grad auftreten sind diese bei vertikalen Arrays wesentlich größer. Gleichzeitig führt Turbulenz bei diesen Arrays zu einer hohen Variabilität des Schätzers (Abb.3), die mit der Impedanz zunimmt. Hierbei handelt es sich um einen indirekten Effekt: Turbulenz verändert die Bodenreflexion und betrifft daher insbesondere die vertikalen Arrays. Schallgeschwindigkeitsgradienten haben einen mittleren Einfluss, wobei vert. Gradienten im Allgemeinen höher sind als horizontale.

Durch Berücksichtigung der Bodenreflexion im Schallfeldmodell wird nicht nur der Fehler in der DOA reduziert, sondern es ist mit einem einzelnen vertikalen Array möglich, sowohl Quellhöhe und -abstand zu bestimmen. Freilandmessungen im Bereich bis 40m führten bei Freifeldannahme zu einem mittleren Fehler in der DOA von nicht weniger als  $1.5^\circ$ , während Bodeneffektinversion einen minimalen mittleren Fehler von  $0.3^\circ$  aufwies. Ein Beispiel einer Messung mit einer einzelnen Quelle (Rosa Rauschen bei 10dB SNR) zeigt Abb.4. Die Quelle wurde an der korrekten Position gefunden, die Verwendung eines höheren Frequenzbereichs und insbesondere MUSIC erhöht die räumliche Auflösung deutlich. Diese ist zur Trennung mehrerer Quellen erforderlich, wie Abb.5 zeigt. Nur mit MUSIC konnten die Quellen in gleicher Höhe aber unterschiedlichem Abstand (15 und 24m) unterschieden werden. Mit Freifeldverfahren waren sie bei Frequenzen bis 4 kHz nicht trennbar. Die Zuverlässigkeit ist bei geg. Array abhängig von SNR und Frequenzbereich. Simulationen zeigen, dass bereits ab  $-5$  dB SNR bei Frequenzen über 250 Hz mit einem Anteil „guter“ (Fehler Höhenwinkel  $< 0,5^\circ$ ,

Abstand < 10%) Positionsschätzungen größer 90% zu rechnen ist, selbst wenn nur ein kleines 8-Mikrofon Array von 1,40m Länge angenommen wurde. Eine Höhe des untersten Mikrofons von 2m hat sich hierbei als optimal erwiesen.

### Zusammenfassung

Vertikale Arrays erfahren bei Freifeldannahme einen systematischen Fehler in der geschätzten Quellhöhe aufgrund der Bodenreflexion. Durch Verwendung eines Schallfeldmodells mit Bodenreflexion (Bodeneffekt-inversion) kann dies verhindert und mit einem einzelnen Array können sowohl Quellabstand als auch -höhe bestimmt werden. Vorteilhaft ist weiterhin, dass zusammen mit MUSIC auch dichter benachbarte Quellen getrennt werden können als dies mit klassischen Methoden möglich ist. Problematisch ist weiterhin die Variabilität des Positionsschätzers aufgrund von Turbulenz.

### Literatur

- [1] Wilson,DK., Tate, R. et al (1999). "Acoustic scintillations and angle-of-arrival fluctuations observed outdoors with a large planar vertical microphone array." Acoustics Research Letters online 106(2): L24-L29
- [2] Collier, S L., Wilson, DK. (2004). "Performance bounds for passive sensor arrays operating in a turbulent medium: Spherical-wave analysis." J. Acoust. Soc. Am. 116(2): 987-1001
- [3] Fergusson, BG. (2000). "Variability in the passive ranging of acoustic sources in air using a wavefront curvature technique." J. Acoust. Soc. Am. 108(4): 1535-1544
- [4] Havelock, D I. et al. (1995). "Spatial coherence of a sound field in a refractive shadow: Comparison of simulation and experiment." J. Acoust. Soc. Am. 98(4): 2289-2302
- [5] Nobile MA, Hayek SI. (1985). "Acoustic propagation over an impedance plane." J. Acoust. Soc. Am. 78(4): 1325-1336
- [6] Krim, H., Viberg, M. (1996). "Two decades of array signal processing research." IEEE Signal Processing Magazine 13(4): 67-94
- [7] Tuncer, TE., Yasar, TK., Friedlander, B. (2009). "Narrowband and Wideband DOA Estimation for Uniform and Nonuniform Linear Arrays." in: Tuncer, Friedlander (eds.). "Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation." Academic Press

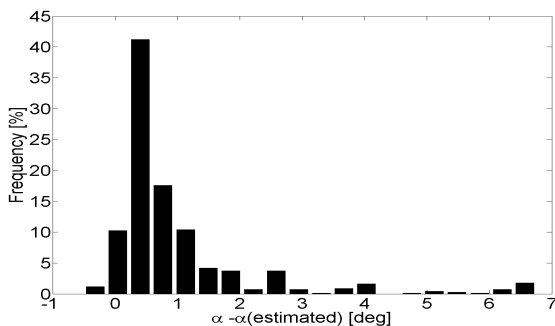


Abb. 2a: Verteilung des Fehlers in der geschätzten DOA für 1000 Kombinationen aus Geometrie, Frequenz und Bodenimpedanz: Horizontale Arrays.

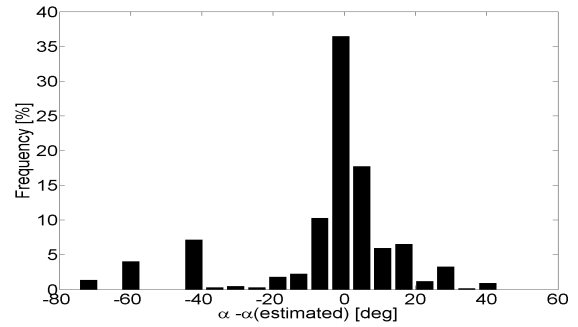


Abb. 2b: Verteilung des Fehlers in der geschätzten DOA: Vertikale Arrays.

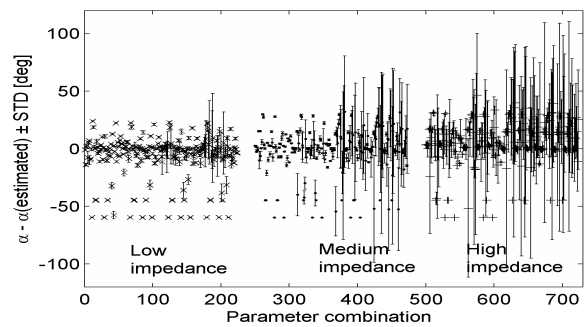


Abb. 3: Variabilität und Fehler des Elevationsschätzers aufgrund von Turbulenz für drei verschiedene Bodenimpedanzen. Der Abstand Quelle-Array nimmt jeweils von links nach rechts zu.

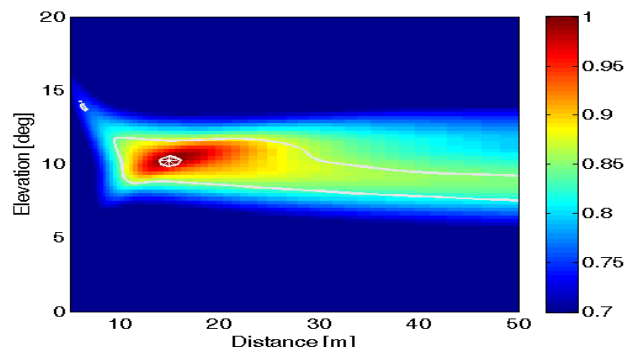


Abb. 4: Karte der geschätzten Quellstärke für eine Quelle in 15m Entfernung und 10° Elevation. Rosa Rauschen von 50-4000 Hz bzw. 500-4000 Hz (Linie). Kreis zeigt Ergebnis der Verwendung von MUSIC anstatt des delay-and-sum Beamformers.

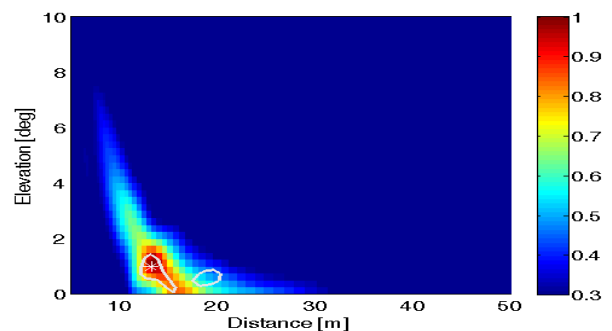


Abb. 5: Karte der geschätzten Quellstärke für Quellen in 15m bzw. 24m Entfernung und gleicher Höhe. Rosa Rauschen von 500-4000 Hz. Linie zeigt Ergebnis der Verwendung von MUSIC.