Mikrofonarraymessungen für aeroakustische Messungen bei hohen Einfallswinkeln

Thomas Ahlefeldt, Gianna Mazzitelli

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 37073 Göttingen, Deutschland, Email: thomas.ahlefeldt@dlr.de

Einleitung

In der Entwicklungsphase von Prototypen in beispielsweise der Flugzeug- und Automobilindustrie stellt die Mikrofonarraymesstechnik bei der Anwendung in Windkanälen mit offener oder geschlossener Messstrecke eine wichtige Rolle zur Beurteilung von aeroakustischen Schallquellen dar. In letzter Zeit haben sich hier zwei neue Herausforderungen ergeben: zum einen werden für die Lärmbeurteilung von Flugzeugen bei Start und Landung hohe Abstrahlwinkel für die Berücksichtigung der Quellrichtcharakteristiken bedeutsamer. Des Weiteren werden bei Untersuchungen an Fahrzeugen zunehmend Mikrofonarrays mit sehr großer Apertur verwendet.
In beiden Fällen werden Quellgebiete mit dem Mikrofonarray unter teilweise sehr hohen wie auch sehr unterschiedlichen Einfallswinkeln untersucht. Durch die großen Abstände zum Untersuchungsobjekt gewinnen Effekte an Bedeutung, welche sonst vernachlässigbar sind (Eigenschaften des Strömungsfeldes, geometrische Effekte, Störquellen).
In dieser Arbeit wird der Einfluss des Einfallswinkels zwischen Quelle und Mikrofonarray auf die akustische Positionen der Sensoren des Mikrofonarrays betrachtet. Zu diesem Zweck werden an verschiedenen Orten mit einem akustischem Positionserfassungssystem die Sensorpositionen bestimmt und verglichen. Abschließend wird der Einfluss der variierenden Sensorpositionen auf die Quelllokalisation des Delay-and-Sum Beamformers anhand experimenteller Daten betrachtet.

Messaufbau

Zur Erfassung der akustischen Positionen der Arraymikrofone wurde ein akustisches GPS-Verfahren eingesetzt, welches die Positionen der Arraymikrofone auf Grundlage von Triangulation mit bekannten Quellpositionen und einem Referenzmikrofon mit einer Genauigkeit von < 1 mm erfasst[1]. Nachweislich erhöht dieses Verfahren die Genauigkeit des Beamformers deutlich, da auch Eigenschaften wie die relativen Phasendifferenzen der Sensoren erfasst werden.
Es wurde ein Mikrofonarray mit einer Apertur von 5 m x 3 m und 144 Mikrofonen untersucht. Die Mikrofonarrayträger bestand aus einer Gitterkonstruktion auf welcher die Mikrofone unter Berücksichtigung einer vorhergehenden Optimierung verteilt wurden. Abbildung 1 zeigt ein Photo des Aufbaus.
Anstelle der üblichen Anwendung an nur einer Position wurde die Kalibriereinheit an mehreren Positionen verwendet, um jeweils die akustischen Mikrofonpositionen zu ermitteln. Wie in Abbildung 2 skizziert, wurden 9 Positionen $\{i, j\}$, mit $i = 1, 2, 3$ und $j = 1, 2, 3$ untersucht.

Abbildung 1: Photo des Versuchsaufbaus. Rechts im Bild das Mikrofonarray, links die Kalibriereinheit.

Hierdurch ergab sich eine Variation der Position der Kalibriereinheit in der (x, z)–Ebene. Das Zentrum der Kalibriereinheit befand sich etwas unterhalb des Zentrums des Mikrofonarrays konstant bei $y_a = -0.34$ m (in Arraykoordinaten, siehe folgender Abschnitt). Der Winkel α_n beschreibt den Einfallswinkel zur Mikrofonachse eines Mikrofons n.

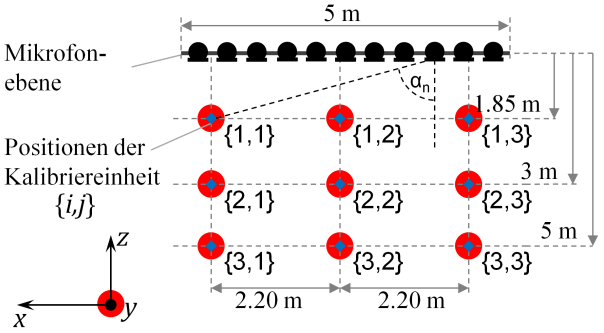

Abbildung 2: Skizze des Messaufbaus mit Koordinatensystem der Kalibriereinheit.

Des Weiteren konnten die im Rahmen der Kalibrierung verwendeten Lautsprechersignale der Kalibriereinheit zur Quelllokalisierung mittels Beamforming verwendet werden. Dies ermöglicht zum einen den Vergleich der ermittelten akustischen Positionen für die verschiedenen Kalibrierpositionen wie auch die Untersuchung des Einflusses auf das Beamforming. So können zum Beispiel die an Position $\{1, 2\}$ ermittelten Sensorpositionen verwendet werden, um eine Quelle an Position $\{3, 2\}$ mittels Beamforming zu rekonstruieren.

Akustische Positionserfassung

Auswertung

Durch das akustische GPS ergeben sich akustische Positionen im kartesischen Koordinatensystem $(\mathbf{x}_q, \mathbf{y}_q, \mathbf{z}_q)$.

Durch den Index q wird ausgedrückt, dass dieses Koordinatensystem auf die Kalibriereinheit bezogen ist. Um die Ergebnisse der verschiedenen Kalibrierpositionen vergleichen zu können, müssen diese in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Unter der Annahme, dass sich bei Mikrofonen direkt gegenüber der Kalibriereinheit ($\alpha_n = 0°$) die ermittelte Position durch die Kalibrierung nicht ändert, wurden die Koordinatensysteme durch eine lineare Abbildung in ein arraybezogenes Koordinatensystem $(\mathbf{x}_a, \mathbf{y}_a, \mathbf{z}_a)$ überführt.
Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Positionsermittlung an Kalibrierposition {3,2} im Vergleich zur geometrischen Vorgabe in der (x, y) – Ebene.

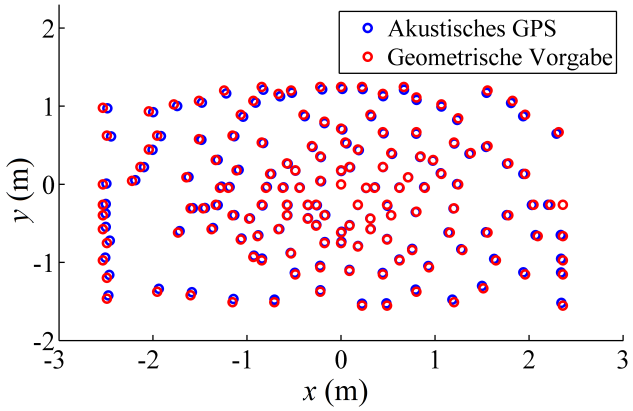

Abbildung 3: Mit dem akustischen GPS ermittelte Sensorpositionen an Position {3,2} (blau) im Vergleich zur geometrischen Vorgabe (rot) in der (x, y) – Ebene.

Im Vergleich zur geometrische Vorgabe zeigt sich eine deutliche Tendenz der Verschiebung der Mikrofonpositionen zum Zentrum des Arrays hin. Da bei der geometrischen Vorgabe auch Ungenauigkeiten beim Einbau der Mikrofone einen Einfluss haben können, werden im Folgenden die Ergebnisse der Kalibrierpositionen miteinander verglichen.

Ergebnisse

Abbildung 4 stellt die Differenz der ermittelten Mikrofonpositionen $\mathbf{x}_{\{3,2\}} - \mathbf{x}_{\{1,2\}}$ in der (x, y) – Ebene im arraybezogenen Koordinatensystem dar. Gezeigt werden die Differenzen der x und y – Komponente sowie der Betrag des Verschiebungsvektors $\Delta r = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}$. Für die z–Komponente zeigten sich nur sehr geringe Differenzen, weshalb hier auf eine Darstellung verzichtet wird.
Für die x-Komponente zeigt sich eine deutlich Verschiebung der Positionen zu $x = 0$ (Position der Kalibriereinrichtung) hin, welche mit zunehmenden Abstand deutlicher wird. Ein vergleichbarer Effekt zeigt sich für die y-Komponente. Hier ergibt sich eine deutlich Verschiebung der Positionen zu $y = -0.34$ m (Position der Kalibriereinrichtung) hin. Zusammenfassend zeigt sich der Effekt bei Betrachtung von Δr: Durch die Verschiebung der Kalibriereinheit von Position $\mathbf{x}_{\{1,2\}}$ zu $\mathbf{x}_{\{3,2\}}$ ergeben sich Mikrofonpositionen, welche in Richtung Zentrum des Arrays verschoben sind.

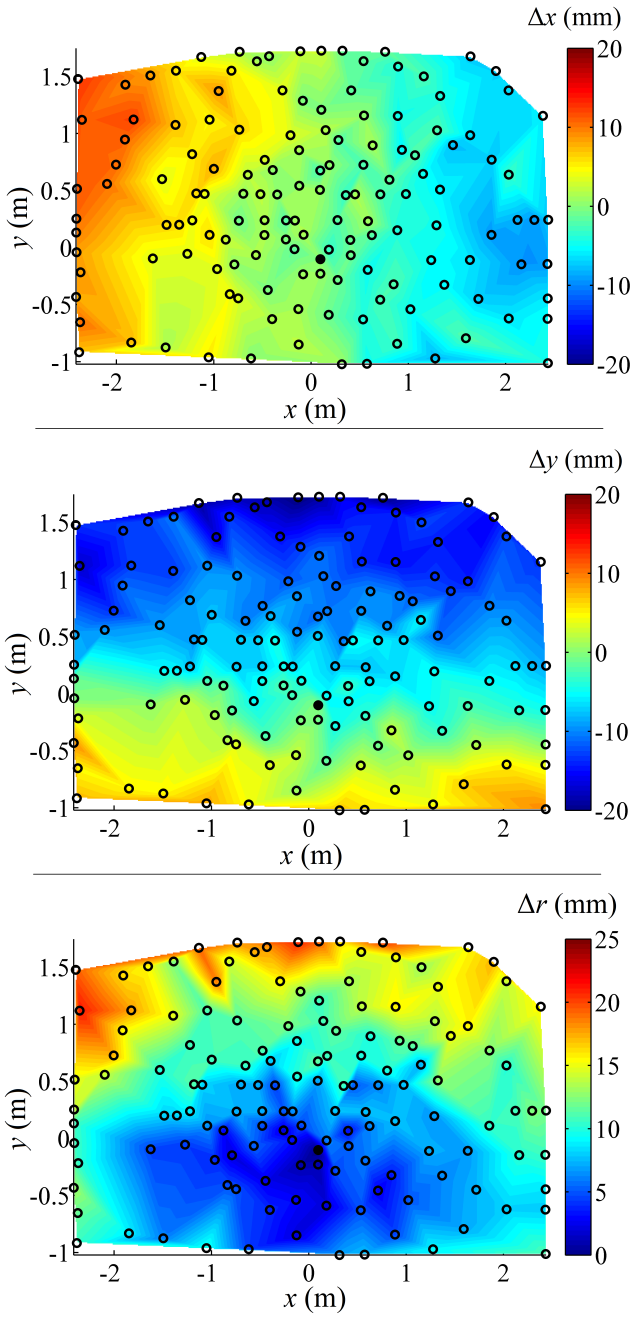

Abbildung 4: Differenz der an den Kalibrierpositionen {3,2} und {1,2} ermittelten Mikrofonpositionen dargestellt in der (x, y) – Ebene.

Abbildung 5 stellt den Zusammenhang zwischen Δr und dem Winkel α_n dar. Der Winkel α_n beschreibt den Winkel zwischen Position der Kalibriereinheit und der Mikrofonachse der Arraymikrofone. Wie in der Legende der Abbildung zu sehen, werden jeweils Abstandsdifferenzen der Kalibrierpositionen der beiden hinteren Reihen ($i = 2, 3$) im Bezug zur Kalibrierposition der ersten Reihe ($i = 1$) dargestellt.
Allgemein wird mit größer werdenden Winkel α_n die Änderung der Mikrofonpositionen Δr größer und erreicht Differenzen von bis zu 4.25 cm. Der Anstieg über dem Winkel ist hierbei mit Ausnahme vom Fall $\{2, 1\} - \{1, 1\}$ in etwa linear. Für die größeren Differenzen zwischen den Kalibrierpositionen $\{3, j\} - \{1, j\}$ ist der Anstieg und auch die Streuung größer als für die geringeren Differen-

zen $\{2,j\} - \{1,j\}$. Weiterhin zeigen sich auch für sehr große Winkel $\alpha_n > 40°$ große Streuungen.
Es zeigt sich, dass der Winkel zur Mikrofonachse einen systematischen Einfluss auf die akustische Position der Mikrofone hat. Dieser Einfluss wird mit größer werdenden Abstand stärker. Ursachen hierfür können zum Beispiel eine winkelabhängigen Phasencharakteristik der Mikrofone und eine Interaktion der akustischen Wellen mit dem Mikrofon sein.

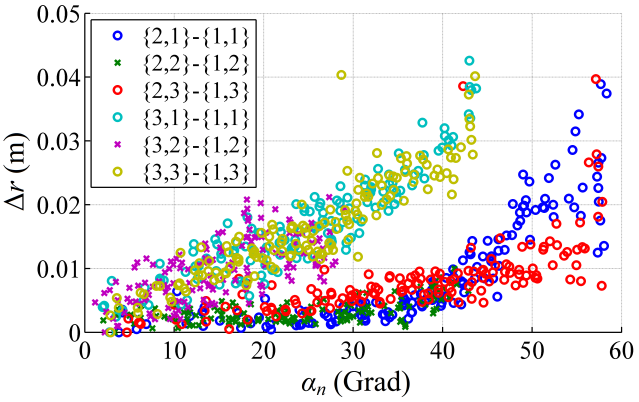

Abbildung 5: Differenz Δr beim Vergleich der Positionen $\{i,j\}$, $i = 2,3; j = 1,2,3$ mit der jeweiligen Referenzposition $\{1,j\}$, $j = 1,2,3$ über dem Winkel α_n.

Einfluss auf das Beamforming

Im Folgenden wird der Einfluss der an den unterschiedlichen Kalibrierpositionen ermittelten Mikrofonpositionen auf das Beamforming-Ergebnis betrachtet. Hierzu werden die an einer Kalibrierposition ermittelten Mikrofonpositionen auf eine Messung mit einer anderen Quellposition angewendet.
So kann eine Abschätzung des zu erwartenden Fehlers bei Untersuchungen an Quellen in einem großen Untersuchungsbereich durchgeführt werden.

Auswertung

Die Messdaten wurden mit dem Standard Frequenzbereichs Beamformer zur Rekonstruktion der Quellleistung $\hat{S}$ auf den Gitterpositionen $\mathbf{y_f}$ ausgewertet:

$$\hat{S}(\mathbf{y}_f, \omega) = \hat{\mathbf{e}}^{\mathcal{H}} \mathbf{R} \hat{\mathbf{e}}. \tag{1}$$

$\mathbf{R}$ bezeichnet die spektrale Kreuzkorrelationsmatrix der Mikrofonsignale in Abhängigkeit von der Frequenz ω. Der sogenannte Steering Vektor $\mathbf{e}$ beschreibt die relevante Phasendifferenz basierend auf einer Monopolabstrahlung der Quellen. Zusätzlich beinhaltet $\mathbf{e}$ Abstandskalierungen und die Sensorenwichtung. Im Rahmen der Auswertung wurden zwei Steering Vektoren angewendet. Zur Ermittlung der genauen Quellposition wurde der Steeringvektor Sarradj Typ 1 (siehe [2]):

$$\hat{\mathbf{e}}_\mathbf{n} = \frac{1}{N} e^{-jkr_n}, \tag{2}$$

für die Sensoren $n = 1,2,...,N$ mit $N = 144$ verwendet. Zur Ermittlung der genauen Quellstärke wurde der Steeringvektor Sarradj Typ 3 (identisch zu conventional, siehe [3]) verwendet:

$$\hat{\mathbf{e}}_\mathbf{n} = \frac{1}{r_n} \frac{1}{\Sigma_{m=1}^{N} r_m^{-2}} e^{-jkr_n}. \tag{3}$$

Das äquidistante Auswertegitter in der (x,y) - Quellebene umfasst eine Fläche von 0.1 m x 0.1 m und hat eine räumliche Auflösung dxy von 0.1 mm.

Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt zwei Quellkarten zur Messung an der Quellposition {1,3} bei einer Frequenz von 24 kHz. Auf der linken Seite ist als Referenz das Ergebnis unter Verwendung der gleichen Position für die Bestimmung der Mikrofonpositionen und des Beamfomings dargestellt. Deutlich ist eine nahezu symmetrische Quellabbildung, welche hinsichtlich der monopolartigen Abstrahlung der untersuchten Quelle auch der zu erwartenden Punktspreizfunktion entspricht. Auf der rechten Seite ist zum Vergleich das Ergebnis unter Verwendung der an Kalibrierposition {3,3} ermittelten Mikrofonpositionen zu sehen. Wie in Abbildung 5 gezeigt wurde, sind hier Unterschiede in den Mikrofonpositionen von bis zu 0.04 m vorhanden, was sich deutlich auf die Quellkarte auswirkt. Diese zeigt nun eine Deformation der Quellabbildung mit einer zusätzlichen Sekundärquelle und eine entspricht somit nicht mehr der zu erwartenden Punktspreizfunktion. Deutlich zu sehen ist der Unterschied auch im Vergleich des Schalldruckpegels und der Quellposition. Der Pegel ist um etwa 3 dB abgesenkt und auch die Position der Quelle ist insbesondere in x-Richtung um mehr als 1 cm verschoben. Dies zeigt deutlich die Defokussierung der Quelle durch die abweichenden Mikrofonpositionen, wodurch ein signifikanter Teil der Energie in den Nebenkeulenbereich transferiert wird.

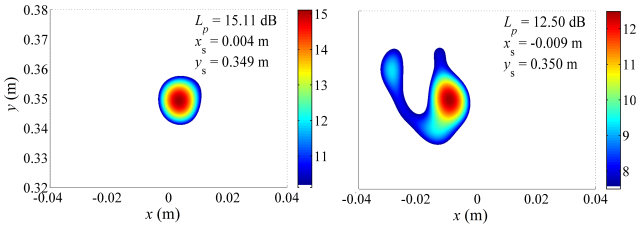

Abbildung 6: Quellkarte bei einer Frequenz von $f = 24$ kHz. Quellposition {1,3} unter Verwendung der Kalibrierposition {1,3} (links) bzw. {3,3} (rechts).

Der Einfluss der Defokussierung auf den rekonstruierten Schalldruckpegel und die Position in der (x,y)–Ebene der rekonstruierten Quelle wird in Abbildung 7 über der Frequenz dargestellt. Ort und Schalldruckpegel der Quelle wurden unter Berücksichtigung der entsprechenden Steering-Vektoren anhand der Maxima der Quellkarten ermittelt. Es werden die Quellpositionen der ersten Reihe $i = 1$ betrachtet und mit den unterschiedlichen Mikrofonpositionen der Reihen $i = 1,2,3$ ausgewertet. Hierzu wurden die Mikrofonpositionen jeweils in das Koordinatensystem der Quellposition überführt. Analog zur

Abbildung 5 werden dann die Differenzen der Quellkarten basierend auf den ermittelten Sensorpositionen der beiden hinteren Reihen ($i = 2, 3$) zu denen der ersten Reihe (Referenz, $i = 1$) dargestellt.

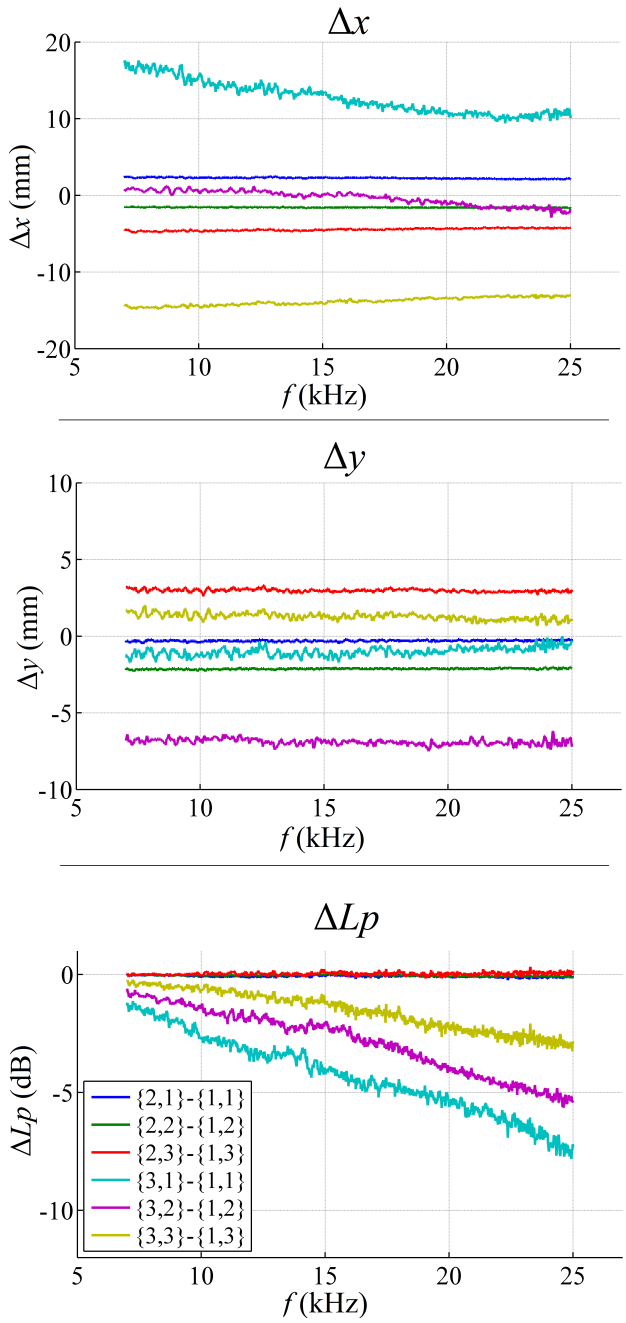

Abbildung 7: Differenz der Quellpositionen in $\Delta x, \Delta y$ und der rekonstruierten Quellstärke L_p [dB] über der Frequenz für die Quellpositionen $\{i, j\}$ mit $i = 2, 3$ und $j = 1, 2, 3$ unter Verwendung der Kalibrierpositionen $\{i, j\}$ mit $i = 1$ und jeweils $j = 1, 2, 3$.

Es ist zu sehen, dass es bei Verwendung von an anderem Ort ermittelten Mikrofonpositionen zu deutlichen Abweichungen der Quellkoordinaten wie auch zu einer Verringerung des Schalldruckpegels kommt.
Die Differenzen sind bei der x–Koordinate mit bis zu 1.76 cm deutlich größer als bei der y–Koordinate, bei der die maximale Abweichung 0.76 cm beträgt. Darüber hinaus sind die Abweichungen bei den mittleren Positionen $j = 2$ im Vergleich zu den seitlichen Positionen $j = 1$ und 3 kleiner. Dies deutet darauf hin, dass bei Quellen die sich relativ weit seitlich gegenüber dem Array befinden, eine Abweichung von Kalibrier- und Quellort zu einer höheren Ungenauigkeit bei der Ortung der Schallquelle führt.
Für den Schalldruckpegel ist für die Reihe $i = 2$ keine signifikante Abweichung zu erkennen. Bei einem größer werdenden Abstand (Reihe $i = 3$) sind jedoch mit der Frequenz zunehmende Abweichungen von bis zu 7.8 dB zu sehen.

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verwendung von Mikrofonarrays mit großer Apertur wurden mögliche Auswirkungen auf die Ermittlung akustischer Mikrofonpositionen unter Verwendung des akustischen GPS untersucht. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Effekte der Variation von Einfallswinkel und Abstand zwischen Kalibriereinheit und Array experimentell untersucht und in einem zweiten Schritt der Einfluss abweichender Mikrofonpositionen auf Beamforming-Ergebnisse analysiert.
Dabei konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Entfernung der Kalibriereinheit zum Array die Mikrofonpositionen radial nach innen zum projizierten Zentrum der Platte auf das Mikrofonarray verschoben erscheinen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der Winkel zur Mikrofonachse einen systematischen Einfluss auf die akustische Position der Mikrofone hat. Dieser wird mit größer werdenden Abstand stärker. Dies lässt auf einen Einfluss der Phasencharakteristik der Mikrofone und der Interaktion der akustischen Wellen mit den Mikrofonen schließen.
Im Rahmen der Analyse des Einflusses abweichender Mikrofonpositionen auf Beamforming-Ergebnisse wurden unterschiedlichen Mikrofonpositionen zur Ortung derselben Quelle verwendet. Dabei stellte sich heraus, dass wenn Quell- und Kalibrierort nicht übereinstimmen, die ermittelten Quellkoordinaten und -pegel vom Referenzfall zum Teil signifikant abweichen.

Literatur

[1] Lauterbach et. al.: Procedure for the Accurate Phase Calibration of a Microphone Array. AIAA 2009-3122, 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2009).

[2] Sarradj, E.: Three-Dimensional Acoustic Source Mapping with Different Beamforming Steering Vector Formulations. Advances in Acoustics and Vibration Vol. 2012 (2012).

[3] Sitsma, P.: Experimental techniques for identification and characterisation of noise sources. Advances in Aeroacoustics and Applications, VKI Lecture Series, (2005).

[4] Mazzitelli G. S.: Experimentelle Bestimmung des Einflusses der Mikrofonrichtcharakteristik auf die Lokalisierung von Arraymikrofonen. Masterarbeit an der Technischen Universität Braunschweig –in Vorbereitung– (vorr. 2016).