

Erweiterung des Beamforming-Verfahrens mittels synchronisierter Mehrfachmessungen und angepasster Filterung

Marcus Kern¹, Holger Opfer²

^{1,2} Volkswagen AG, Konzernforschung, Brieffach 1777, 38346 Wolfsburg, Deutschland
Email:marcus.kern@volkswagen.de, holger.opfer@volkswagen.de

Einleitung

Mit einem Mikrofon-Array und einer nachgeschalteten Signalverarbeitung, z.B. Beamforming, lassen sich Schallereignisse bestimmten Einfallrichtungen und damit auch Quellorten zuordnen. Die Güte der Ergebnisse im „akustischen“ Bild hängt neben anderen Einflussfaktoren im Wesentlichen von der richtungs- und frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Mikrofonarrays, dem sog. Array-Pattern, ab. Aus ihm lassen sich Dynamik und örtliches Auflösungsvermögen des Messsystems ablesen. Die Gestalt des Array-Patterns wird von der Mikrofonanzahl, deren Anordnung und Gewichtung sowie der geometrischen Ausdehnung der Array-Apertur bestimmt. In dieser Studie wird untersucht, inwieweit mittels synchronisierter Mehrfachmessungen und einer zusätzlichen angepassten Filterung der Mikrofonensignale eine Verbesserung der Ortsauflösung und Dynamik erreicht werden kann. Anhand von Simulationen und ersten Ergebnissen praktischer Messungen werden diese Ansätze hinsichtlich einer erweiterten Einsatzfähigkeit der *Akustischen Kamera* [1] [2] diskutiert [3].

Motivation

Das bekannte Problem einer unzureichenden Dynamik und Ortsauflösung lässt Mikrofonarray-Systeme in der allgemeinen Messpraxis oft an ihre Grenzen stoßen. Zur Reduzierung von Artefakten durch Nebenkeulen und Aliasing bei hohen Frequenzen ist eine hohe Mikrofondichte erforderlich; für eine bessere räumliche Auflösung bei tiefen Frequenzen werden große Array-Abmaße benötigt.

Die Idee ist es nun, eine vergrößerte Apertur aus der Synthese mehrerer, einfacher Geometrien zu realisieren. Basis der Untersuchungen ist ein konventioneller 32-kanaliger Mikrofonring, der zu verschiedenen Zeitpunkten ein Messobjekt aus n Positionen aufnimmt. Diese Mehrfachmessung, bestehend aus $n \cdot 32$ Mikrofonen, wird nach einer Synchronisierung dem Beamforming-Algorithmus zugeführt. Neben den zu ermittelnden Mikrofonpositionen ist es Voraussetzung, dass das Quellsignal reproduzierbar ist. Es werden Ergebnisse einer Durchschallungsmessung mit definiertem Anregungssignal gezeigt und zur Validierung der Reproduzierbarkeit einer Kohärenzanalyse unterzogen.

Simulation synthetisierter Array-Patterns

Die Simulationen zeigen den Einfluss der Array-Anordnung auf Dynamik und Auflösung im Beamforming-Ergebnis für eine Punktquelle im Zentrum der ersten Array-Position.

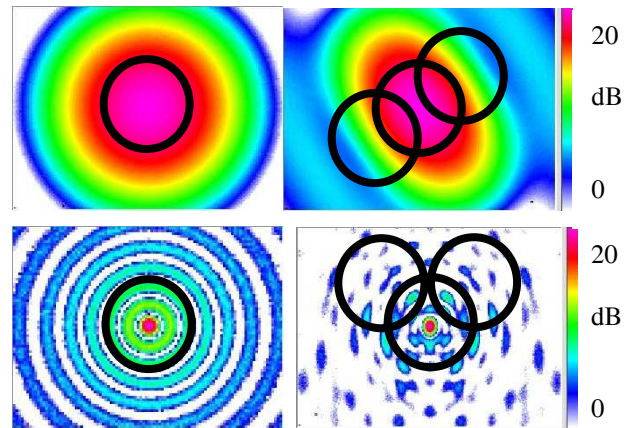


Abbildung 1: Simulierte Array-Pattern bei 500 Hz (oben) und 5 kHz (unten) mit einem Ring (links) und 3 Ringen (rechts). Ringdurchmesser: 75 cm, Analyseabstand: 1m

Experimentelle Untersuchungen

Anders als bei der Simulation müssen bei praktischen Messungen die Einzelmessungen der verschiedenen Positionen untereinander synchronisiert werden und auf eine i. A. nicht bekannte Quellenverteilung in der Bildebene zurückgerechnet werden. Abb. 2 zeigt eine Durchschallungsmessung mit 3 künstlichen Leckagen an der oberen und unteren Fensterdichtung. Das über Lautsprecher erzeugte Anregungssignal im Fahrzeuginnenraum ist dabei exakt reproduzierbar, sodass eine Synchronisierung der Messpositionen auf einen „virtuellen“, gemeinsamen Aufnahmezeitpunkt erfolgen kann.

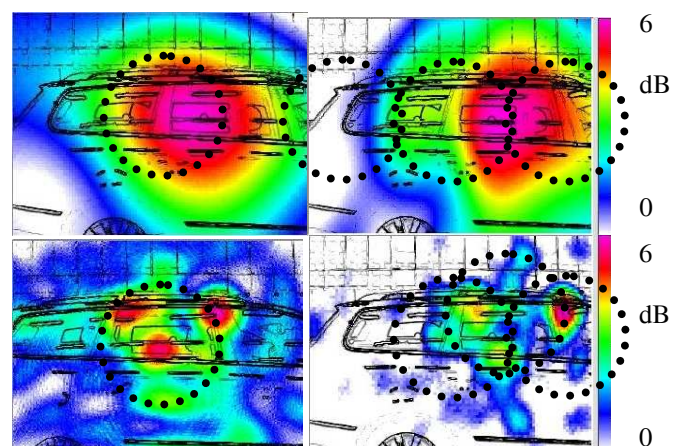


Abbildung 2: Durchschallungsmessung an hinterer Seitentür mit 3 künstlichen Leckagen. 1kHz-Terzband (oben), 3,15kHz-Terzband (unten), 1-Ring-Messung (links), 3-Ring-Messung (rechts)

Die Analyse der 1-Ringmessung im 1kHz-Terzband zeigt eine ausgedehnte Hauptschallquelle im Bereich der C-Säule und der Scheibe (Abb. 2 links oben). Simulationen mit drei Punktquellen an den Leckagestellen bestätigen die Vermutung, dass diese drei kohärenten Einzelquellen im 1kHz-Terzband zu einer großen verschmelzen. Aufgrund der verbesserten räumlichen Auflösung der synthetisierten Apertur wird die Dynamik in einigen Bildbereichen um 1-2 dB verbessert: schwächere Quellen, wie z.B. an der hinteren Seitenscheibe, können besser identifiziert werden.

Im 3kHz-Terzband treten die künstlichen Transmissionsstellen an der Scheibendichtung deutlich hervor (Abb. 2 unten). Nach der Auswertung von mehreren, synchronisierten Array-Positionen wird die Dynamik insgesamt verbessert: Pegelunterschiede zwischen den künstlichen Leckagen sind nun zu erkennen, ferner sind Scheinquellen um die Fensterflächen im dargestellten Dynamikbereich unterdrückt (Abb. 2 rechts unten).

Kohärenz und Synchronisierbarkeit

Eine schlechte Synchronisierbarkeit mehrerer Einzelmessungen äußert sich im akustischen Bild in verschobenen bzw. ausgedehnten Quellorten auf der Fokusebene, insbesondere bei der Analyse hoher Frequenzen. Die Kohärenz, definiert als die frequenzabhängige, lineare Abhängigkeit zweier Signale, kann dabei als Maß der Reproduzierbarkeit herangezogen werden. Quellensignale, die im Laufe einer Mehrfachmessung stochastischen Schwankungen unterliegen (z.B. aufgrund von thermischen Änderungen während einer Motormessung), weisen i. A. eine reduzierte Kohärenz zwischen den Einzelmessungen auf.

Im Falle eines eindeutig reproduzierbaren Quellensignals stellt die Synchronisation der Einzelmessungen kein großes Problem dar; das Quellsignal wird als Referenz parallel mit aufgezeichnet und dient zur Synchronisation eines „virtuellen“, gemeinsamen Aufnahmezeitpunktes. Unterzieht man nun zwei räumlich eng beieinander liegende Mikrofonkanäle aus synchronisierten Einzelmessungen einer Kohärenzanalyse, so kann man aus ihr ein Maß für die Reproduzierbarkeit einer Mehrfachmessung ableiten. Bei einem Quellensignal, das keinen stochastischen Schwankungen zwischen den Einzelmessungen unterliegt, ist eine hohe Kohärenz zu erwarten. Abb. 3a zeigt die Kohärenz zwischen zwei räumlich eng zusammen liegenden Mikrofonen aus zwei Arraypositionen bzw. Messungen. Im qualitativen Vergleich mit den Kohärenzen zweier Kanäle (1 und 2 sowie 1 und 16, Abb. 3b, c) innerhalb *eines* Arrays ist sie nicht signifikant schlechter; dies spricht für eine gute Synchronisierbarkeit. Frequenzbereiche, die zwischen Mehrfachmessungen geringe Kohärenzen aufweisen, können hingegen eine schlechte Synchronisierbarkeit voraussagen und zu einer fehlerhaften Quellenortung im akustischen Bild führen. Geringe Kohärenzen zwischen Kanälen innerhalb eines Arrays treten i. d. R. zu hohen Frequenzen auf und lassen fehlende Phasenbeziehungen von Störanteilen vermuten. Im Beamforming-Prozess mitteln sich diese Anteile durch inkohärente Addition weitestgehend heraus.

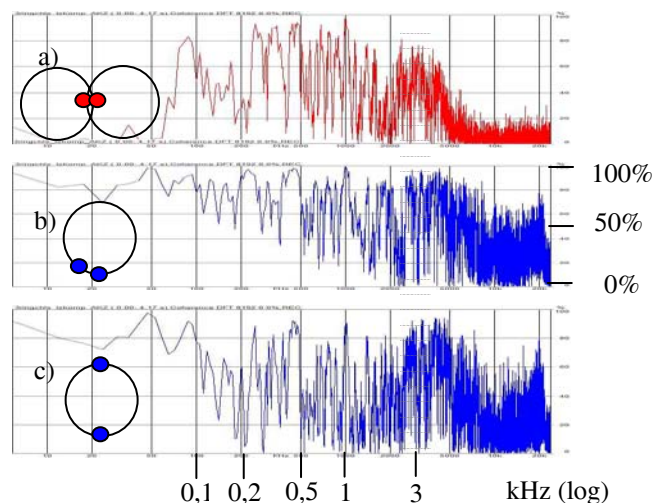


Abbildung 3: Kohärenzen zwischen a) 2 Kanälen aus 2 Einzelmessungen, b) Kanal 1 und 2, c) Kanal 1 und 16 innerhalb *eines* Arrays

Bezogen auf ein mit Mehrfachmessungen abgetastetes Schallfeld kann es sinnvoll sein zu überprüfen, ob und ab welcher Anzahl von Mikrofonen das Schallfeld ausreichend gut, im Sinne einer hohen Kohärenz, beschrieben ist. Hierzu dient die *multiple Kohärenz* als Maß. Sie besagt allgemein, wie groß die lineare Abhängigkeit eines Ausgangssignals zu einer bestimmten Anzahl von (Referenz-)Eingangskanälen ist. Der Wert der multiplen Kohärenz steigt mit der Anzahl der Referenzkanäle. Der Vergleich zwischen der multiplen Kohärenz innerhalb eines Arrays und zwischen zwei synchronisierten Messungen, bei der ein Kanal eines Arrays auf mehrere Kanäle des zweiten Arrays bezogen wird, kann Aufschluss über die Qualität der reproduzierten Messung geben.

Zusammenfassung und Ausblick

Synchronisierte Mehrfachmessungen können die Qualität des akustischen Bildes verbessern, Reproduzierbarkeit und genaue Bestimmung der Mikrofonpositionen vorausgesetzt. Hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens werden weitere Kohärenzanalysen durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit von Quellensignalen besser quantifizieren zu können. Die Studie bildet des Weiteren die Basis für 3-dimensionale Mehrfachmessungen mit einer räumlichen Darstellung des akustischen Bildes.

Literatur

- [1] Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GfAI), Berlin: *Akustische Kamera* und Software *NoiseImage*
- [2] Jäckel, O.: *Strength and Weakness of Calculating Beamforming in the Time Domain*, BeBeC, Berlin, 2006
- [3] Kern, M.; Opfer, H.: *Methoden zur Erweiterung der Einsatzbedingungen von Beamforming-Verfahren*, DAGA, Braunschweig, 2006