

Polyphasenansätze im Zeitbereichs-Beamforming

Marcus Kern¹, Holger Opfer²

^{1,2} Volkswagen AG, Konzernforschung, Brieffach 1777, 38436 Wolfsburg, Deutschland
Email: marcus.kern@volkswagen.de, holger.opfer@volkswagen.de

Einleitung

In der automobilen Messpraxis haben sich akustische Messsysteme etabliert, die mit einer Anordnung von Mikrofonen und einer nachgeschalteten Signalverarbeitung die Schalleinfallrichtung detektieren und dadurch die Schalldruckverteilung auf Quellorte im Fernfeld zurückrechnen und visualisieren können. Die Signalverarbeitung beruht i. A. auf dem „Delay&Sum-Beamforming“, deren Umsetzung im Zeit- oder Frequenzbereich erfolgt. Die Schwächen dieser Messtechnik bezüglich Ortsauflösung und Dynamik erschweren die Interpretation akustischer Bilder und bieten Ansätze für Verbesserungen, um das System universell im automobilen Entwicklungsprozess einsetzen zu können.

Bezüglich einer genaueren Quellenortung wurde in der Vergangenheit u. a. eine Methode vorgeschlagen, die durch Interpolation der zeitlich abgetasteten Mikrofonensignale feiner abgestufte Delays und damit mehr Blickrichtungen des Beams ermöglicht. Die Interpolation erfolgt mit einer *Polyphasenzerlegung* [1] [2], die auch zur effizienten Abstratenumsetzung eingesetzt wird [3]. Der allgemeine Begriff „Polyphase“ wird im Zusammenhang mit Filterbänken benutzt, deren Frequenzverhalten an ihren Bandpassausgängen als Überlagerung unterschiedlicher Phasengänge von Allpassfiltern interpretiert werden kann. Die *Polyphasenfilterbank* bezeichnet eine besondere Struktur einer Filterbank, mit der bei maximaler zeitlicher Unterabtastung spektrale Bänder auf Basis der DFT ohne spektrale Überlappungen effizient berechnet werden können. Im Kontext des Beamformings stellt sich nun die Frage, inwieweit man das Potenzial einer *Polyphasenfilterbank* für die effiziente Berechnung von Wellenzahlspektren und damit von akustischen Bildern nutzen kann.

Filterbank und Wellenzahlspektrum

Abb. 1 (oben) zeigt das maximal „sichtbare“ Wellenzahlspektrum eines 32-kanaligen Ringarrays für Wellen bis zu 4600Hz (doppelte räumliche Nyquistfrequenz). Die Parameter *Beambereich* und *Einfallswinkel* der Welle (beide max. $\pm 90^\circ$) legen dann den Ausschnitt fest, aus dem sich das akustische Bild ableitet (Abb 1 unten). Die Berechnung erfolgt mittels einer 2D-Fouriertransformation der Mikrofontgewichtung und liefert für eine monofrequente Welle aus 0° -Richtung gleichzeitig den sichtbaren Ausschnitt für das akustische Bild. Im Gegensatz zu den diskreten Spektralwerten einer reinen DFT entspricht ein kontinuierlicher Spektralverlauf der Annahme eines abgetasteten, endlichen Signals, das außerhalb der Beobachtung nicht existiert. Somit stellt die Berechnung eines gefensternten (und gewichteten) Schalldruckortsverlaufes die Umsetzung einer *räumlichen* Filterbank

dar. Das akustische Bild in Abb. 1 (unten) ist als Wellenzahlbandpass zu interpretieren. Die Möglichkeit, Bandpasssignale an den Ausgängen einer Filterbank unterabzutasten, ist offensichtlich. Je schmaler der Bandpass, desto geringer wird der Einfluss von spektralen Aliasing-Anteilen; sie liegen außerhalb des Wellenzahlbereichs, der für das akustische Bild relevant ist.

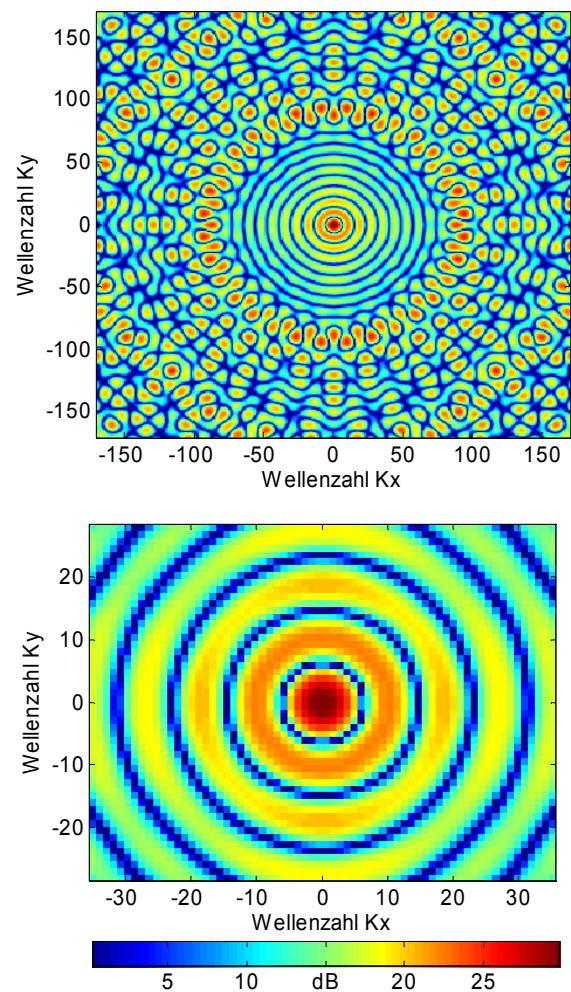


Abbildung 1: Wellenzahlspektrum einer Ringapertur mit Rechteckgewichtung bis zu einer Frequenz von 4600 Hz (doppelte Nyquistfrequenz); maximal sichtbares Array-Pattern für Winkelbereiche $\pm 90^\circ$ (Bild oben); Ausschnitt für Beambereich $\pm 24^\circ$ in x-Richtung und $\pm 17^\circ$ in y-Richtung und Einfallswinkel 0° (Bild unten) \Rightarrow akustisches Bild

Ein größeres Beobachtungsfenster erzeugt bei gleichem Sensorabstand eine schmalere Hauptkeule im gleichen Wellenzahlbereich; die spektrale Selektivität (= Ortsauflösung) wird besser. Zudem fallen die Überlappungen periodifizierter Anteile schwächer aus; die

Dynamik steigt. Die *Polyphasenfilterbank* als Abwandlung einer DFT-Filterbank sieht solch ein vergrößertes Fenster vor und berechnet aus L gewonnenen Abtastwerten effizient $M < L$ Spektralwerte [4]. Gerade für große Arrays mit vielen Mikrofonen stellt diese Form der Filterbank eine effiziente Berechnungsmethode für Wellenzahlspektren bereit, um z.B. Echtzeitbilder für einzelne Frequenzen berechnen zu können.

Interpolation von Abtastwerten

In der Praxis hat man es aus Aufwandsgründen jedoch eher mit Arrays begrenzter Größe und Mikrofonanzahl zu tun. Eine fehlerfreie Interpolation des Schalldruckortsverlaufes mittels „zero-padding“ und Tiefpassfilterung lässt sich nur bis zur Abtastgrenze $f_{\text{abstast}}/2$ anwenden, da keine neue räumliche Information hinzugefügt werden kann. Im Gegensatz dazu liegen die Zeitdaten i. A. überabgetastet vor. Je höher die Abtastrate, desto mehr Richtungen lassen sich im Delay&Sum-Beamformer auflösen. Eine empfohlene Überabtastung mit Faktor 10 generiert große Datenmengen. Die Interpolation der *zeitlichen* Abtastwerte bietet dabei die Möglichkeit, die Abtastrate zu reduzieren und so Speicher während der Aufnahme zu sparen. Mit einer *Polyphasenzerlegung* erreicht man eine zusätzliche Effizienz im interpolierten Beamforming-Prozess [1], siehe (Abb. 2).

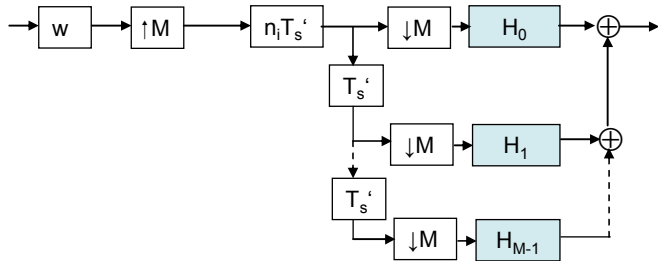


Abbildung 2: Interpolations-Beamformer mit Polyphasenzerlegung [1], dargestellt für einen Kanal und eine Schwenkrichtung: Das mit w gewichtete Eingangssignal erfährt zunächst ein „zero-padding“, danach die Laufzeitkompensation. In M Sub-Filter-Zweigen erfolgt eine Unterabtastung und die Interpolation mit $H_m(z)$.

Das Interpolationsfilter rekonstruiert das Abtastsignal mit einem vorgegebenen Interpolationsfaktor fehlerfrei bis zur Nyquistfrequenz. Die Aufnahme muss dann auch nicht mit hoher Abtastung erfolgen. So reduziert sich der Speicherbedarf bei Aufnahme eines 4s-Signals mit 32 Kanälen von 30 MB @ $f_s = 96$ kHz auf 4 MB @ $f_s = 12$ kHz. Mit der umgesetzten Interpolation in MATLAB ohne Polyphasenzerlegung erreicht man bereits ca. 20% Zeitersparnis für die gesamte Messung (Abb. 3) incl. Datentransfer zum Messrechner und Auswertung.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Studie zeigt anhand von theoretischen Überlegungen und Simulationen die Anwendbarkeit einer effizienten Filterbankstruktur, wie man sie aus dem Zeitbereich kennt, auf die Konstruktion von akustischen Bildern aus Wellenzahlspektren. Die Ergebnisse veranschaulichen, wie sich die durch die Mikrofonanordnung vorgegebene räumliche Unterabtastung auf Wellenzahl-Bandpässe

auswirkt und in welchem Zusammenhang die Gestalt eines Bandpasses (Beschränkung auf Raumrichtungen und Frequenzbereiche) mit einer erlaubten Unterabtastung und der damit verbundenen Reduzierung von Aliasing-Artefakten steht. Das verwendete Gewichtungsfenster bestimmt dabei mit seiner Nebenkeulenstruktur direkt den Einfluss von Aliasing-Artefakten. Ein großes Mikrofonarray bietet neben den bekannten Vorteilen auch den Ansatz für eine *räumliche Polyphasenfilterbank* zur effizienten Auswertung. In diesem Zusammenhang soll untersucht werden, inwieweit eine Polyphasenfilterbank auf räumliche Abtastwerte angewendet werden kann.

Die künstliche Erhöhung der Abtastrate durch Interpolation reduziert den Speicher- und Rechenzeitbedarf bei gleichbleibender Qualität des akustischen Bildes (Abb. 3). Nach [1] bringt die Polyphasenzerlegung im „Interpolations-Beamformer“ einen zusätzlichen Rechenzeitgewinn von bis zu 50%. Dieses Verfahren soll in weiteren Studien umgesetzt und hinsichtlich Effizienz bewertet werden.

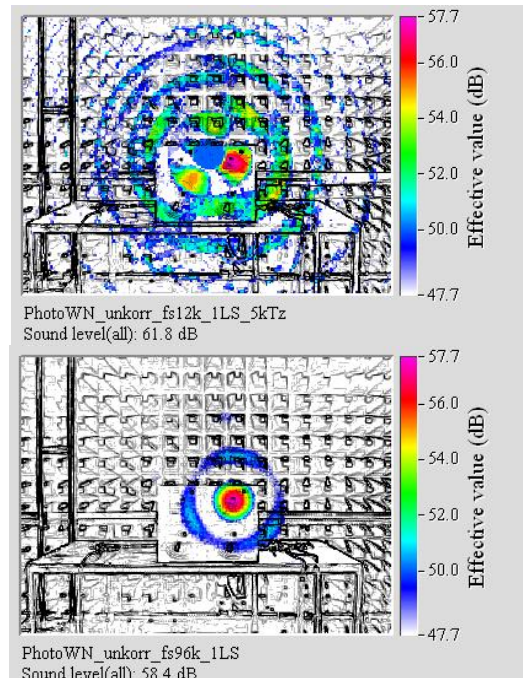


Abbildung 3: Ortung mit *Akustischer Kamera* [5] eines Hochtöners (weißes Rauschen, 5kHz-Terz): Abtastrate 12kHz (oben); interpolierte Abtastrate 96kHz (unten).

Literatur

- [1] Schobben, D.; Sommen, P.: Increasing Beamsteering Directions Using Polyphase Decomposition, IEEE 1996
- [2] Salim, T.; Devlin, J.; Whittington, J.: FPGA Implementation of a Phased Array DBF using Polyphase Filters, IEEE 2004
- [3] Zölzer, U.: Digitale Audiosignalverarbeitung, B.G. Teubner Stuttgart, 1997
- [4] Vary, P.; Heute, U.; Hess, W.: Digitale Sprachsignalverarbeitung, B. G. Teubner Stuttgart, 1998
- [5] Gesellschaft zur Förderung angewandte Informatik (GfAI): *Akustische Kamera* und Software *NoiseImage*