

Beamforming im Zeitbereich mit Zeropadding

Dirk Döbler¹

¹ Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik, 12489 Berlin, Deutschland, Email: doebler@gfai.de

Einleitung

Die Nutzung akustischer Filme zur Ortung und Analyse in-stationärer Signale ist seit einigen Jahren Stand der Technik. Dabei wird häufig Beamforming im Zeitbereich eingesetzt [1]. Die Zeitsignale der Mikrofone (Abb.1) werden dazu in Intervalle unterteilt, und für jedes Intervall wird ein akustisches Foto gerechnet. Bei der Analyse impulshaltiger Signale mit Zeitintervallen, die in der Nähe der Wellenlänge der zu untersuchenden Signale liegen, gleichzeitiger Verwendung eines planaren Mikrofonarrays und einer planaren Abbildungsebene kommt es zu einem in der Abb. 1 dar-gestellten Effekt. Ein akustischer Film, zusammen-gesetzt aus diesen Bildern, zeigt eine sich vom Rand in das Zentrum des Bildes bewegende kreisförmige "Wellenfront", welche schließlich in der Mitte des Bildes an der Position des Lautsprechers zusammenfällt.

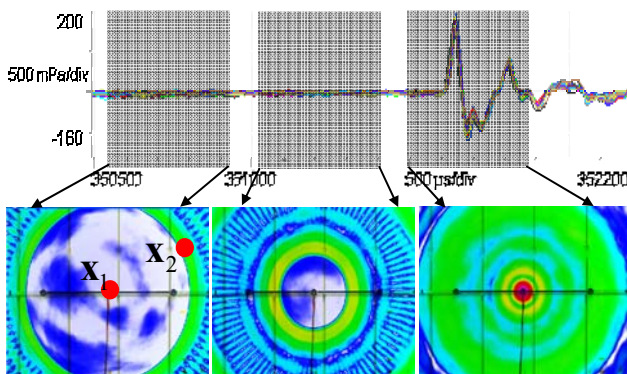


Abbildung 1: Schalldruckverlauf der 48 Mikrofone eines Ringarrays und korrespondierende akustische Bilder verschiedener Zeitintervalle. Rot: 60 dB, weiß: 30 dB. Der Impuls wird von einem Lautsprecher an Position x_1 in 2m Abstand emittiert.

Einwärts laufende Wellenfronten als Artefakt des Time Domain Beamforming

Ursache dieses Effektes ist die Faltung von Orts- und Zeitinformationen in den Mikrofonkanälen. Ein zu einem Zeitpunkt t_2 empfangener Impuls in einem Kanal kann sowohl am Ort A zum Zeitpunkt t_0 als auch am Ort B zum Zeitpunkt t_1 abgegeben worden sein. Der Algorithmus des Beamforming versucht durch konstruktive und destruktive Überlagerung eine Separation von Ort und Zeit, welche aber durch die begrenzte Mikrofonzahl nicht vollständig gelingt. Abb. 2 zeigt beispielhaft das Errechnen des Schalldruckpegels für zwei Bildpunkte \mathbf{x}_1 und \mathbf{x}_2 aus Abb. 1. Das zu berechnende Zeitintervall für die Pegelwerte liegt dabei vor dem Impuls. Mit Gleichung 1 erhält man für den Bildpunkt \mathbf{x}_1 als Schalldruckpegel 34 dB und für \mathbf{x}_2 45 dB.

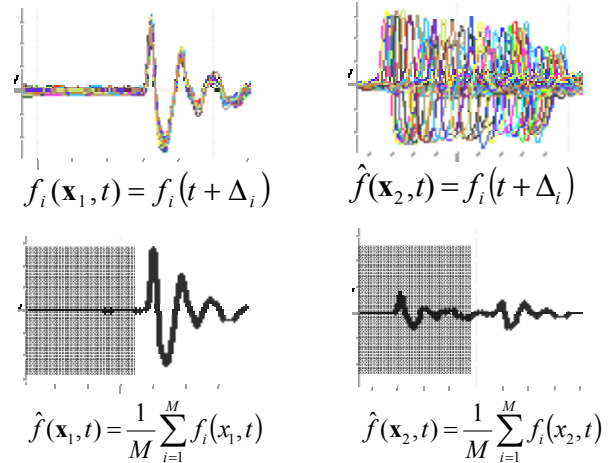


Abbildung 2: Rechenschritte eines Delay- und Sum-Beamformers für Bildpunkt \mathbf{x}_1 (links) und \mathbf{x}_2 (rechts)

Für den Bildpunkt in der Mitte (\mathbf{x}_1) sind die Schall-laufzeiten und damit die Verzögerungen (Δ_i) relativ kurz und alle gleich. Der Schalldruckpegel von 34 dB stellt das korrelierte Rauschen für diesen Bildpunkt dar. Das gleiche Verfahren für Bildpunkt \mathbf{x}_2 führt aufgrund der längeren Verzögerungen dazu, dass Signalanteile, die nicht zum betrachteten Zeitbereich gehören, im Algorithmus verarbeitet werden. Im Ergebnis ist der Pegel für

$$\hat{p}_{eff}(\mathbf{x}, n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \hat{f}^2(\mathbf{x}, t_k)} \quad (1)$$

\mathbf{x}_2 wesentlich höher als der Pegel für \mathbf{x}_1 (destruktive Über-lagerung, nichtkorrelierter Impuls, da der Impuls nicht aus \mathbf{x}_2 emittiert wird).

Dieses Ergebnis gilt für alle Punkte zirkular um den Arraymittelpunkt, es entsteht eine kreisförmige Pegel-überhöhung. Wird der zu berechnende Bereich auf der Zeit-achse nun in Richtung des Impulses verschoben, so wandert diese kreisförmige Pegelüberhöhung scheinbar zum Zentrum des Bildes und "kollabiert" an der Position der tatsächlichen Quelle. Für andere Positionen der Schallquelle ergeben sich ähnliche, dann aber unsymmetrische Bilder. Komplexere Muster entstehen bei der Verwendung von nichtplanaren Arrays, aber auch hier wandern die Muster mit dem Verschieben des Zeitintervalls in die Position der Quelle. Dies gilt auch für alle nichtplanaren Abbildungsebenen, wenn in diesen mehrere Abbildungspunktmen-gen gebildet werden können, innerhalb derer die Punkte einen gleichen durchschnittlichen Abstand zu den Mikrofonen haben.

Grenzen der Analyse im Zeitbereich

Diese einlaufenden Muster wirken bei der zeitlich hoch aufgelösten Ortung von Schallsignalen zunächst verwirrend auf den Betrachter. Da sie aber in der Schallquelle zusammenlaufen, ist die Ortung trotzdem möglich. Bei Schallereignissen, die aus einer schwachen Anregung mit nachfolgender stärkerer Impulsantwort bestehen (zum Beispiel Anschlagen eines Glases, Erregung einer Mauer durch Schallbrücken) wird die Ortung der Anregung durch diese Artefakte erschwert bis verhindert. Ein Beispiel ist in Abb. 3 zu sehen.

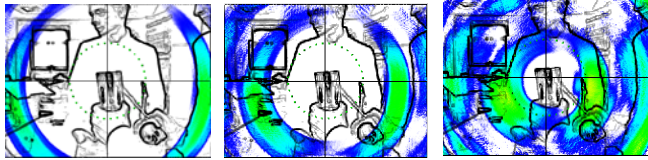


Abbildung 3: Akustischer Film vom Anschlag eines Glases. Mit herkömmlichen Verfahren nicht zu orten

Zeropadding im Zeitbereich

Eine Verbesserung der Analyse kann durch Zeropadding erreicht werden. Dazu wird zunächst die maximale Verzögerung in der Szene und die dazu äquivalente Anzahl von Samples berechnet (der größte vorkommende Abstand zwischen einem Bildpunkt und einem Mikrofon). Dann werden die Mikrofondaten für jedes zu berechnende Zeitintervall (für jedes Bild) ausgeschnitten und um die der maximalen Verzögerung äquivalente Anzahl von Samples verlängert. Der Signalwert dieser Samples wird zu Null gesetzt. Jetzt kann der Beamformer auf diese Daten angewendet werden, ohne dass Signale von später stattfindenden Ereignissen in die Berechnung einfließen. Im oben gewählten Beispiel des Glasanschlags kann so nicht nur die exakte Stelle des Beginns der Erregung lokalisiert werden, sondern auch verschiedene Schwingungsmodi im Einschwingvorgang (Abb. 4).

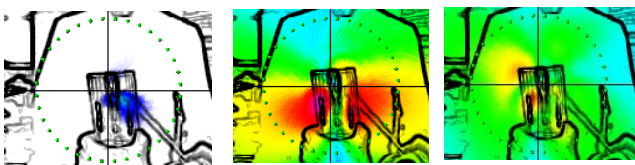


Abbildung 4: Gleiche Szene wie in Abb. 3, aber berechnet mit Zeropadding

Anwendungsfeld Bauakustik

In der Bauakustik treffen mehrere Randbedingungen zusammen, die eine Analyse ohne Zeropadding erschweren. In massiven Wänden ist die Schallgeschwindigkeit wesentlich höher als in der sie umgebenden Luft. Wird eine solche Wand angeregt (z.B. durch Klopfen oder eine Schallbrücke), so ist die Schallemission der Anregung (und damit das zur Verfügung stehende Zeitintervall für die Ortung) nur äußerst kurz. Danach wird diese Emission von der "Antwort" der Wand vollständig überlagert, da diese "Antwort" in der Regel deutlich mehr Schallleistung umsetzt als die Erregung selbst. Zum zweiten sind gerade in der Bauakustik die Differenzen zwischen den Verzögerungen für einzelne

Punkte sehr groß, da die Berechnung in der Regel dreidimensional erfolgt und die Räume sehr groß sein können. Dadurch sind viele Signale außerhalb des interessierenden Zeitintervalls in der Berechnung enthalten. Abb. 5 zeigt die Ortung einer Wandanregung eines Raumes ohne und mit Zeropadding.

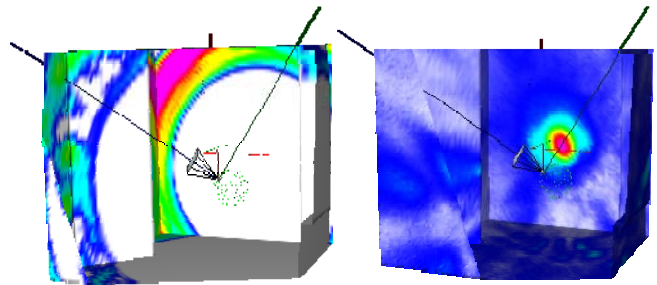


Abbildung 5: Ortung einer Wandanregung mit einem Hammer, links ohne Zeropadding, rechts mit Zeropadding

Zusammenfassung und Ausblick

Einlaufende Wellenfronten bei der zeitlich hoch aufgelösten Ortung akustischer Emissionen stellen ein Artefakt des Delay- and Sum Beamformers dar und sind kein Merkmal einer "Interferenztransformation" [2]. Sie entstehen prinzipbedingt durch die vom Algorithmus vorgenommene Rückverzögerung und das dadurch bedingte Einfließen von akustischen Ereignissen außerhalb des zu berechnenden Zeitintervalls. Zeropadding bietet eine einfache Möglichkeit zur Unterdrückung dieser Artefakte. Im vorgestellten Verfahren können allerdings auch Quellen verdeckt werden. Dies ist dann der Fall, wenn die Verzögerungen zur Berechnung dieser Quellorte größer werden als das markierte Zeitintervall, für planare Abbildungsebenen bekommt der Beamformer einen "Tunnelblick". Mit einer Renormierung der Verzögerungen kann diesem Effekt begegnet werden. Dabei werden die absoluten Laufzeiten von einem Punkt zum Array nicht mehr berücksichtigt, es wird also nur noch mit relativen Verzögerungen gearbeitet. Allerdings verlieren dadurch die einzelnen Bildpunkte ihren Zeitbezug zueinander, d.h. Quellen, die zeitgleich im akustischen Film erscheinen, müssen nicht unbedingt mehr zeitgleich sein. Eine Schärfung der Analyse im Ortsbereich bedingt also eine Unschärfe im Zeitbereich, und umgekehrt.

Förderhinweis

Diese Arbeit wurde aus Haushaltsmitteln des BMWi unter der Vorhaben-Nr. 14594BR über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert. Der Schlußbericht ist über die AiF verfügbar.

Literatur

- [1] Dougherty, R.P.: Advanced Time-domain Beamforming Techniques. Proc. of 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, 2004.
- [2] Heinz, G.: Zur Physik bildgebender Rekonstruktion akustischer Bilder und Filme im Zeitbereich. DAGA 2007.