

Beamforming an bewegten Objekten im Zeitbereich

Gero Zechel, Andreas Zeibig, Michael Beitelschmidt

Technische Universität Dresden, Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik, 01062 Dresden, Email: gero.zechel@gmail.com

Einleitung

Für ein bestehendes Mikrofonarray sollte ein Algorithmus entwickelt werden, mit dem sich Schallquellen an bewegten Objekten wie fahrenden Kraft- oder Schienenfahrzeugen visuell orten und bewerten lassen. Die Oberfläche des Objekts wird dabei als Raster N ortsdiskreter Bildpunkte B_n modelliert. Es wird angenommen, dass sich an jedem dieser Bildpunkte ein Punktstrahler befindet, der einen bestimmten Beitrag zur gesamten Schallemission leistet. Jeder Bildpunkt soll daher durch Beamforming im Zeitbereich fokussiert und sein äquivalenter Schalldruckpegel bestimmt werden.

Beamforming im Zeitbereich

Um den Mikrofonen eine Richtwirkung zu verleihen, werden diese beim klassischen Delay&Sum-Beamforming rechnerisch so verschoben, dass sie sich scheinbar auf einer Kugeloberfläche um den Bildpunkt befinden, und ihre Signale anschließend überlagert. Dazu müssen die Phasen und Amplituden der Aufnahmen anhand der tatsächlichen Entfernung vom Bildpunkt korrigiert werden. Nach [1] ergibt sich für den Schalldruckverlauf

$$p(t) = \sum_{m=1}^M w_m \cdot p_m(t - \Delta t_m).$$

Aufnahmen bewegter Quellen

Abbildung 1 zeigt die Auswirkungen auf ein Mikrofonsignal, wenn sich die Quelle dem Mikrofon annähert. Mit der kontinuierlichen Abnahme des Schallausbreitungswegs zwischen t_1 und t_2 steigt die Amplitude. Zugleich bewirkt das Abnehmen der Schalllaufzeit, dass die beiden zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 emittierten Schallereignisse mit unterschiedlicher Verzögerung am Mikrofon eintreffen – das Signal also gestaucht und damit die Frequenz erhöht wird. Die benötigten Berechnungsparameter Δt_m und w_m sind folglich nicht konstant, sondern Funktionen von der Zeit.

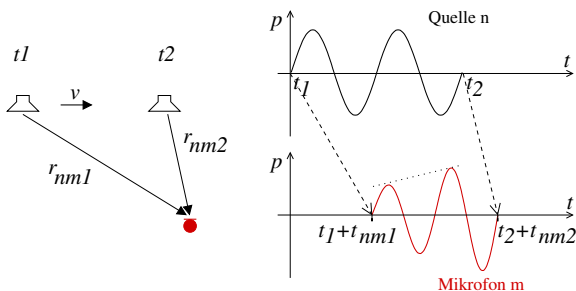


Abbildung 1: Auswirkung der Bewegung einer Schallquelle auf die aufgezeichneten Mikrofonsignale

Rekonstruktion des Quellsignals

Statt die Mikrofonsignale dergestalt zu bearbeiten, dass diese nach dem Delay&Sum-Verfahren summiert werden können, wird das Quellsignal zu jedem seiner Abtastschritte direkt aus einzelnen Aufzeichnungswerten der Mikrofone berechnet (Abbildung 2). Zu diesen diskreten Zeitpunkten ist die Position des Bildpunkts aus der Objektgeschwindigkeit eindeutig bestimmbar und damit die Schallausbreitungswege im ruhenden Medium bekannt.

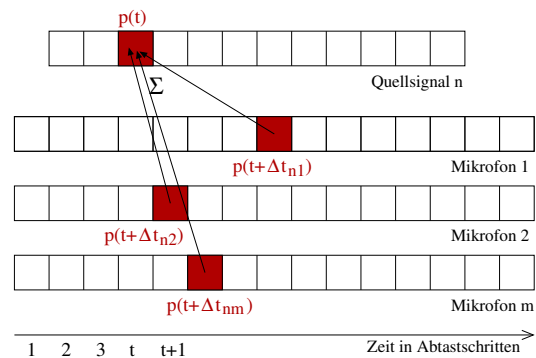


Abbildung 2: Beamforming durch zeitdiskretes Zusammensetzen des Quellsignals aus einzelnen Mikrofonsignalwerten

Algorithmus

Die Vorgehensweise lässt sich in den folgenden Algorithmus fassen:

1. Bestimmen des Zeitraums, über den der Bildpunkt fokussiert werden soll
- Für jeden Abtastschritt t wiederholen:
 2. Ort des Bildpunkts zum Zeitpunkt t berechnen
 3. Schalldruck $p(t)$ mit Null initialisieren
 - Für jedes Mikrofon m wiederholen:
 4. Ortsvektor des Mikrofons auslesen
 5. Schallausbr.-weg berechnen ($r_{nm} = |\vec{r}_{nm}|$)
 6. Schalllaufzeit berechnen ($t_{nm} = \frac{r_{nm}}{c}$)
 7. Wichtungsfaktor berechnen ($w_m = \frac{r_{nm}}{r_{bezug}}$)
 8. Vom Mikrofon m zum Zeitpunkt $t + t_{nm}$ aufgezeichneten Schalldruck auslesen
 9. Diesen Schalldruck mit w_m wichten und zu $p(t)$ hinzuaddieren
 10. Schalldruck $p(t)$ durch Mikrofonanzahl teilen
 11. Schalldruckverlauf des Bildpunkts zurückgeben

In Schritt 8 kann dabei entweder lediglich der nächstliegende Abtastwert ausgelesen oder zwischen den beiden benachbarten Abtastwerten interpoliert werden.

Programmierung und Optimierung

Der Algorithmus wurde als separate Funktion in ein Matlab-Programm eingebettet, das die Bildpunkte verwaltet und den Algorithmus auf jeden einzelnen anwendet. Um die Performance des schleifenlastigen Algorithmus zu verbessern, wurde diese Funktion in C geschrieben. Die rechenaufwändigste Operation stellt die Berechnung des Bildpunkt-Mikrofon-Abstands dar, die zu jedem Abtastschritt für jedes Mikrofon durchgeführt werden muss. Diese kann beschleunigt werden, indem für das dabei nötige Ziehen der Quadratwurzel das Heron-Verfahren [3] angewendet wird. Für dieses iterative Verfahren genügt ein einziger Iterationsschritt, da das Ergebnis aus dem vorausgehenden Abtastschritt bereits in guter Näherung bekannt ist.

Messung eines Güterzugs

Nach eingehender Untersuchung des Programms mit Simulationen und im Messlabor wurde abschließend eine Außenmessung an einem Güterzug durchgeführt. Die Aufnahme erfolgte mit einem in [2] entwickelten Doppelkreisarray ($r_a = 0,65$ m) in 6,4 m Abstand zum Gleis unter Nutzung von 32 synchronen Kanälen eines NI-Messsystems mit einer Abtastrate von 50 kHz. Der Zug bestand aus einer Lok mit zwei zweiachsigen Drehgestellen, und einer Reihe von Gelenkflachwagen mit je drei zweiachsigen Drehgestellen, die zwei 40-Fuß-Container tragen können. Die Geschwindigkeit konnte mit einer Radarpistole auf 70 km/h bestimmt werden. Die Auswertung umfasst die ersten 90 m des Zuges über eine Höhe von 3,6 m. Bei dem gewählten Bildpunktabstand von 80 mm beträgt die Bildpunktanzahl damit 52969. Jeder Bildpunkt wurde über 4 m verfolgt, das entspricht 0,21 s oder 10286 Abtastschritten. Die Berechnung dauerte auf einem einfachen Desktoprechner rund 75 Minuten. Das Ergebnis in den Oktavbändern von 1000 Hz bis 4000 Hz zeigt Abbildung 3. Darauf ist der gemessene Zug deutlich wiederzuerkennen. Die Lok beginnt bei etwa $x = 45$ m, die Wagenkupplungen befinden sich bei $x = 28$ m, $x = 1$ m und $x = -26$ m. Der dritte Containerwagen wird durch den linken Bildrand abgeschnitten. Die beiden Fahrzeugschizzen stimmen mit diesen Werten exakt überein: die Länge der Lok beträgt 16,8 m, die der Containerwagen 27,05 m. Es ist deutlich zu erkennen dass die Radsätze die Hauptschallquellen darstellen. Diese lassen sich dabei differenziert bewerten.

Zusammenfassung

Ein Beamforming-Algorithmus im Zeitbereich, der die Ortung von Schallquellen an bewegten Objekten ermöglicht, konnte entwickelt werden, indem das Problem durch zeitliche Diskretisierung auf das wiederholte Lösen der ortsstationären Aufgabe reduziert wurde. Seine Gültigkeit konnte unter realen Bedingungen gezeigt wer-

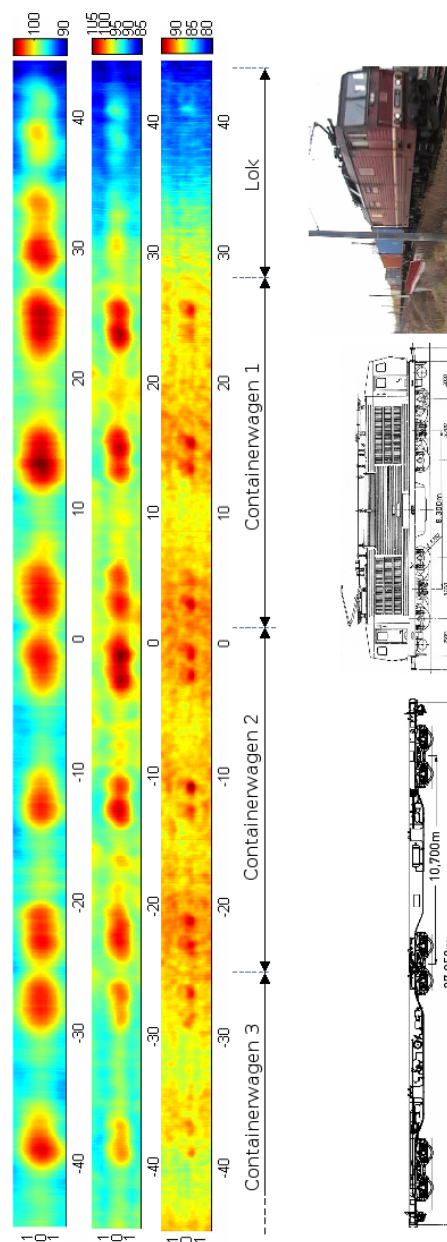


Abbildung 3: Auswertung der Messung eines Güterzugs in den Oktavbändern 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz

den, ohne dass dabei das Potential eines geometrisch und messtechnisch optimierten Mikrofonarrays ausgeschöpft werden musste. Durch seine Einfachheit, seine handhabbaren Rechenzeiten und seinen minimalen Speicherbedarf bietet er eine gute Grundlage für die Implementierung weiterer Funktionen.

Literatur

- [1] Johnson, D. H. und Dudgeon, D. E.: Array Signal Processing: Concepts and Techniques. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993
- [2] Schulze, C.: Anwendung eines Mikrofonarrays zur Ortung von Schallquellen. Diplomarbeit. Dresden, 2004.
- [3] Wikipedia. Heron-Verfahren. 2007. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Heron-Verfahren&oldid=38368890>.