

# Effiziente Methoden zur Analyse bewegter Schallquellen mit hochkanaligen Mikrofonarrays

Andy Meyer<sup>1</sup>, Dirk Döbler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GFaI e.V., 12489 Berlin, E-Mail: meyer@gfai.de

<sup>2</sup> GFaI e.V., 12489 Berlin, E-Mail: doebler@gfai.de

## Einleitung

Beamforming in Kombination mit erweiterten Algorithmen als Methode, um Schallquellen sichtbar zu machen, wird seit über zwei Jahrzehnten im Bereich der Schienenfahrzeuge als Hilfsmittel benutzt, um Schallquellen zu analysieren und damit Lärm zu mindern [1]. Sowohl in der Analyse von Fahrzeugmodellen (z.B. 1:25) in geschlossenen Windkanälen als auch bei realen Vorbeifahrten liefert diese Methode gute Ergebnisse.

Vorbeifahrten stellen immer noch eine besondere Herausforderung dar, weil neben der erforderlichen Entdopplung der Signale weitere Parameter (vollständiges optisches Bild, Ein- und Ausfahrtszeitpunkt in die Messstrecke, Geschwindigkeitsprofil) durch zusätzliche Messungen ermittelt werden müssen.

Das Paper zeigt am Beispiel der Vorbeifahrt eines Hochgeschwindigkeitszuges, wie sich unter Ausnutzung der Videodaten die Vorbereitungs-, Mess- und Auswertzeiten durch automatisierte Erfassung und Berechnung der o.g. Parameter verringern lassen. Vorteil ist weiterhin die Einsparung jeglicher zusätzlicher Messhardware (Lichtschranken, GPS usw.).

## Anforderungen an das Messsetup

Hochkanalige Mikrofonarrays mit eingebauter optischer Kamera gehören bei dieser Art von Messungen mittlerweile zur Standardkonfiguration. Die Dimension sowie die Mikrofonanzahl des Arrays werden dabei an die zu erwartende untere sowie obere Grenzfrequenz angepasst.

Zur Erreichung der erforderlichen Videoqualität ist es unerlässlich, dass für die Aufnahme des Hochgeschwindigkeitszuges eine Videokamera mit ausreichender Framerate (min. 60FPS) und kurzer Belichtungszeit (1/1000s) gewählt wird. Voraussetzung für eine so kurze Belichtungszeit ist eine ausreichende Ausleuchtung des zu messenden Objektes.

## Panoramabild aus Bewegtbildanteilen

Grundsätzlich ist es unmöglich, bei einer Messentfernung von etwa 5 bis 10m den vorbeifahrenden Zug (Straßenbahn, LKW,...) komplett mit der optischen Kamera zu erfassen. Erstellt man mit einer zusätzlichen Kamera ein Bild aus einer größeren Entfernung, so ist dieses Bild detailarm und an den Rändern perspektivisch verzerrt. Des Weiteren fehlt dieser Aufnahme jeder geometrische Bezug zu dem Mikrofonarray. Bisher wurde dieses Problems dadurch gelöst, dass eine Strichskizze des Objektes von einem Bearbeiter mit dem akustischen Bild überlagert wurde. Diese äußerlich subjektive Art der Kombination konnte nur unter Zuhilfenahme von Referenzquellen (z.B. Stromabnehmer eines ICE3) eindeutig durchgeführt werden. Bei Objekten ohne Referenzquelle (Diesellokomotive mit Wagen) stellt sich

eine Zuordnung der akustischen Emissionen zu der entsprechenden Baugruppe als außerordentlich schwierig dar.

Eine Lösungsmöglichkeit wurde bereits in [2] vorgestellt. Dabei fährt das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit ( $V$ ) an der Videokamera vorbei und nimmt eine Anzahl  $N$  Frames  $F_n (n = 1 \dots N)$  auf. In zwei aufeinanderfolgenden Frames  $F_n$  und  $n+1$  werden dann eindeutige, korrespondierende Referenzpunkte auf dem bewegten Teil des Bildes gesucht, um daraus die Translationsparameter zwischen diesen beiden Bildern berechnen zu können. Mit Hilfe dieser Parameter kann dann ein Panoramabild sukzessive zusammengesetzt werden, welches das komplette Fahrzeug enthält.

Leider hat der entwickelte Algorithmus noch entscheidende Schwächen, die ebenfalls in [2] beschrieben werden.

- parallele Ausrichtung der Videokamera zum vorbeifahrenden Objekt (z.B. zu den Schienen).
- konstante Geschwindigkeit

Des Weiteren ergeben sich im Beispiel von Zugvorbeifahrten Bereiche, die aufgrund von immer wiederkehrenden Segmenten (Fenster, Räder,...) eine automatische Zuordnung von Referenzpunkten erschweren und sehr fehleranfällig machen.

Zur Beseitigung dieser Schwächen wurde ein vollautomatischer Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, aus einem Video die bewegten Anteile zweier Bilder  $F_n$  und  $n+1$  zu extrahieren und mit Hilfe eines korrelativen Verfahrens die Verschiebung dieses bewegten Anteils zwischen den beiden Bildern sowohl in X- als auch in Y-Richtung zu ermitteln.

## Korrelativer Algorithmus zur Erzeugung eines Panoramabildes

Zur Reduzierung der Rechenzeit wird im ersten Schritt der sich bewegende Bildbereich segmentiert. Dazu gibt es in der Literatur verschiedene Möglichkeiten (z.B. Segmentierung nach Farbregionen, Kantendetektion,...). Im vorliegenden Fall wurde ein Schwellwertverfahren mit vorheriger Differenzbildberechnung umgesetzt. Der Vorteil in dieser robusten Lösung besteht darin, dass die Auswirkung von Bildfehlern wie z. B. Bildrauschen und Helligkeitsunterschieden auf die Bildsegmentierung minimiert wird.

Nach der Trennung von bewegten und unbewegten Bildtei-

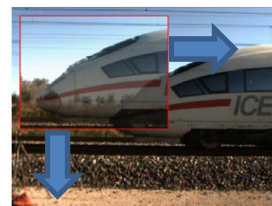


Abbildung 1: Prinzip der Bildkorrelation

len können die Korrelationen des bewegten Bildausschnitts aus  $F_n$  (rote Markierung in **Abbildung 1**) mit dem gesamten Bild  $F_{n+1}$  über alle drei Farbkanäle berechnet werden. Dazu

wurde die Kreuzkorrelationsmatrix  $r_{xy}$  nach Formel (1) bestimmt, wobei  $F_n(i)$  die  $i$ -te Intensität,  $\bar{F}_n$  der Mittelwert der Intensitäten und  $\sigma(F_n)$  die Standardabweichung der Intensitäten aus dem Bild  $F_n$  ist.

Die Kreuzkorrelationskoeffizienten haben ihr Maximum beim Verschiebungsvektor  $\vec{t} = (\Delta x, \Delta y)$  zwischen zwei aufeinanderfolgenden Frames.

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(F_n, F_{n+1})}{\sigma(F_n)\sigma(F_{n+1})} = \frac{\sum_i ((F_n(i) - \bar{F}_n)(F_{n+1}(i) - \bar{F}_{n+1}))}{\sqrt{\sum_i (F_n(i) - \bar{F}_n)^2} \sqrt{\sum_i (F_{n+1}(i) - \bar{F}_{n+1})^2}} \quad (1)$$

Als Ergebnis dieser Berechnungen ergeben sich  $N-1$  Verschiebungsvektoren, die die Grundlage bilden, um das Panoramabild zusammenzusetzen. Zur Detektion von groben Fehlern können statistische Tests durchgeführt werden.

Des Weiteren kann aus den Verschiebungsvektoren und dem Abstand vom Mikrofonarray zum Objekt ein Geschwindigkeitsprofil abgeleitet werden, welches zur Korrektur des Dopplereffektes erforderlich ist.



Abbildung 2 : Panoramabild eines ICE3

Sollte das Array zum Zeitpunkt der Messung nicht horizontal zum Messobjekt ausgerichtet sein, so führt das im Panoramabild zu einem vertikalen Versatz, der durch eine Bildrotation korrigiert werden muss. Zur Berechnung einer korrekten akustischen Karte gehört dann noch eine Korrektur der Schiefstellung des Arrays (Mikrofonpositionen) gegenüber dem Panoramabild.

### Erweiterter Beamforming Algorithmus

Ein gut verwendbarer Algorithmus wurde bereits in [5] beschrieben und soll deswegen nicht näher erläutert werden. Bei Messungen an Hochgeschwindigkeitszügen hat sich herausgestellt, dass die Breite des Trackingfensters (steering range) großen Einfluss auf die akustische Bildqualität hat.



Abbildung 3 : Beamforming Map 500Hz, 1m steering range

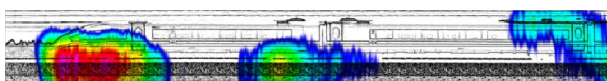


Abbildung 4 : Beamforming Map 500Hz, 10m steering range

Für die Kartierung tiefer Frequenzen darf das gewählte Fenster nicht zu schmal (Abbildung 3) sein, da sonst die rekonstruierte Zeitfunktion zu kurz ist (angeschnittene Wellen, schlechte Mittelung).

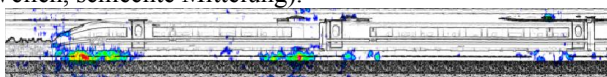


Abbildung 5 : Beamforming Map 4000Hz, 1m steering range

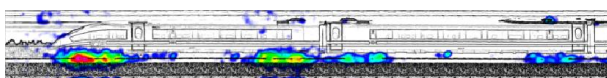


Abbildung 6 : Beamforming Map 4000Hz, 10m steering range

Für höhere Frequenzen ist ein zu breites Trackingfenster ungünstig, da dann an den Ein- und Ausfahrtspositionen sehr schräg auf die Quellen fokussiert wird (Abbildung 6) und die Quellen verschmiert (ungünstige Auflösung des Arrays). Außerdem kann man davon ausgehen, dass viele Quellen

gerichtet senkrecht zur Oberfläche abstrahlen (insbesondere Schienen und Räder), so dass das Array diese Signale überwiegend erfasst, wenn sich die Quellen vor dem Array befinden.

Schließlich ist die entfernungsabhängige Dämpfung der Schallsignale zu bedenken. Sollte diese aufgrund der Entfernung zum Array bereits größer als der mögliche Arraykontrast sein, ist das Trackingfenster auf jeden Fall zu groß gewählt. Ein Vorschlag zur Lösung dieser widersprüchlichen Forderungen ist die Verwendung frequenzabhängiger Trackingbreiten.

### Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass unter Ausnutzung vorhandener Hardware ohne weitere Informationen die Auswertung von Vorbeifahrtsmessungen vollautomatisch möglich ist. Dazu wurden die folgenden Parameter aus den Bildinformationen (Video) mit einem korrelativen Algorithmus bestimmt und ggfs. kompensiert.

- Panoramabild des Bewegtbildanteils
- Ein- und Ausfahrtszeiten des Objektes
- Geschwindigkeitsprofil
- Ausrichtungsfehler des Array

Mit Hilfe dieser Informationen und einem speziell angepassten Beamforming-Algorithmus im Zeitbereich inklusive Doppler-Korrektur kann dann ohne weitere Nachbearbeitung die akustische Karte berechnet werden. Sowohl die Messungen sowie die Auswertungen haben sich somit signifikant vereinfacht und die Benutzbarkeit gesteigert.

Wie in [6] bereits dargestellt, sollten zur Verbesserung der akustischen Ergebnisse noch verschiedene erweiterte Algorithmen auf ihre Wirksamkeit hin untersucht werden. Des Weiteren ist es möglich, die Qualität des Panoramabildes zu steigern, in dem man eine Kamera mit einer höheren Auflösung verwendet. Zur Steigerung der Robustheit des Verfahrens könnte letztlich die Segmentierung zur Bestimmung des Bewegtbildanteils verfeinert werden.

### Literatur

- [1] Barsikow et al. "Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones." Journal of Sound and Vibration (1987)
- [2] Stier et al. "Generating train side views from video sequences for microphone array PASS-BY measurements", 4th BeBeC, Berlin, 2012
- [3] Clever „Ermittlung von Geschwindigkeitsverteilungen aus Farbbildern unter Verwendung des Korrelationsverfahrens“, Studienarbeit, TU Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik, 2004
- [4] Lauterbach et al. „Microphone array measurements on high-speed trains in wind tunnels“, 3th BeBeC, Berlin, 2010
- [5] Zechel et al. "Time-domain beamforming on moving objects with known trajectories", 3th BeBeC, Berlin, 2010
- [6] Michel et al. „Localisation of sound sources on moving vehicles with microphone arrays“, Euronoise 2003, Naples, 19-21 May 2003

### Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (MF100107) gefördert.