# Erweiterung der CLEANT-Methode zur Entfaltung bei Mikrofonarray-Messungen an Hochgeschwindigkeitszügen

Mikolaj Czuchaj[1], Adam Kujawski[1], Ennes Sarradj[1]
[1] TU Berlin, FG Technische Akustik, ,Einsteinufer 25, 10587 Berlin, Deutschland

## Einleitung

Mikrofonarraymethoden zur Charakterisierung von bewegten Schallquellen werden auch zur Untersuchungen von Vorbeifahrtgeräuschen bei Eisenbahnzügen eingesetzt.

Solche Methoden müssen in der Lage sein, aus der Bewegung resultierende akustische Effekte, wie den Dopplereffekt und damit zusammenhängende konvektive Verstärkung korrekt zu berücksichtigen und eine akustische Quellkarte mit korrekten Quellstärken und befriedigender räumlicher Auflösung für alle interessierenden Frequenzbereiche zu generieren. Da konventionelles Beamforming diese Bedingungen nicht vollständig erfüllen kann, wurden bereits existierende Entfaltungsmethoden auf Szenarien mit bewegten Quellen angepasst. Die meisten dieser Methoden arbeiten dabei ausschließlich im Frequenzbereich. Cousson et al. haben 2019 die CLEANT Methode entwickelt [1], welche eine Entfaltung im Zeitbereich vornimmt. Bei der Benutzung der Methode lässt sich eine deutlich verbesserte Genauigkeit in der Lokalisierung und Quantifizierung von bewegten akustischen Quellen erreichen. Die CLEANT Methode wurde bereits 2020 mit Erfolg zur Auswertung von Messungen an Hochgeschwindigkeitszügen angewendet [2].

In diesem Beitrag wird über weitere Ergebnisse mit der CLEANT Methode berichtet. Zusätzlich zur Bestimmung der akustischen Quellkarten, wird auch die Möglichkeit diskutiert, die Richtcharakteristik der Quellen mit Hilfe der Methode zu schätzen.

## Auswertungsstrategie

In der bisherigen Anwendung der CLEANT Methode [2] zur Auswertung von Messungen an Hochgeschwindigkeitszügen wurde eine akustische Quellkarte des gesamten Zuges erstellt. Die dort benutzte Auswertungsstrategie berechnet dabei diese Quellkarte aus mehreren Teilkarten unter Verwendung eines sich mit dem Zug bewegendem Gitters. Jede dieser Teilkarten wurde durch Mittelwertbildung über bestimmte Winkel erstellt. Dies ist in Abbildung 1 schematisch gezeigt. Eine Teilkarte wurde aus einer Mittelung mehrerer Beobachtungen eines sich bewegenden Gebiets berechnet.

$$\bar{M_1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{5} M_i \tag{1}$$

So wird hier beispielhaft die erste Teilkarte $\bar{M_1}$ aus einer Mittelung von 5 Beobachtungen dieses Bereiches, den Subkarten $M_1$ bis $M_5$ berechnet. $n$ bedeutet in Gleichung 1 die Anzahl der Beobachtungen einer Teilkarte. Die einzelnen Beobachtungen erfolgen hier zu verschiedenen Zeitpunkten und unter den Winkeln $\phi_1$ bis $\phi_5$ zum Array $a$. Anschließend ergibt sich die gesamte Schallkarte des Zuges aus der räumlichen Überlagerung dieser Teilkarten. Es ist offensichtlich, dass aufgrund der Mittelung in den einzelnen Teilkarten die winkelabhängige Information verloren geht.

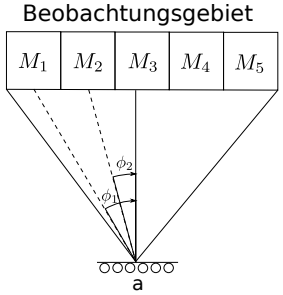


**Abbildung 1:** Skizze der bisherigen Auswertungsstrategie. Die einzelnen Subkarten sind mit den Buchstaben $M_1$ bis $M_5$ gekennzeichnet.

Diese Auswertungsstrategie erlaubt eine Lokalisierung und Quantifizierung der Quellen gibt aber keine Information über die Richtcharakteristik der sich in den einzelnen Teilkarten befindenden Quellen. In einer Erweiterung dieser Auswertungsstrategie wird nun versucht die einzelnen Subkarten ohne Mittlung winkelabhängig auszuwerten um so eine Schätzung der Richtcharakteristik der Quellen zu bekommen. Ferner wurde bei der Auswertung das Signal zweimal gefiltert, wie in Abbildung 2 dargestellt, um eine Trennung der akustischen Quellen im Frequenzbereich bei gleichzeitiger Berücksichtigung des Dopplereffekts zu ermöglichen. Vor der Anwendung der CLEANT Methode wird das Messsignal mit einem Breitbandfilter und nach der Anwendung mit einem Schmalbandfilter gefiltert. Die Breite des ersten Filters ist gerade so gross, dass es das Band des schmalleren Filters unter Einfluss des Dopplereffekts enthält.

## Getestete Eingangsdaten

Die Auswertungsstrategie wurde sowohl an synthetisch erzeugten Daten als auch an Messdaten einer Zugvorbeifahrt getestet. Bei dem Versuchen mit synthetischen Daten wurde eine am Mikrofonarray sich mit 160 km/h vorbei bewegende Dipolquelle, parallel zum Array simuliert. Die Modellierung der bewegten Quelle erfolgte mit dem

**Abbildung 2:** Skizze zur Anwendung des Doppelfilters.

Python Package Acoular [3]. Als Signalform der Quelle wurde weißes Rauschen angenommen. Der simulierte Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Hier bewegt sich die simulierte Dipolquelle $x$ parallel zum Mikrofonarray $a$ in einem Abstand von $d = 10$ m. Bei der Anwendung der Methode wurde auf einem sich mit der Quelle bewegendem Gitter gerechnet und es wurden die Subkarten winkelabhängig ausgewertet die die Quelle enthalten. Dabei wurde das in den Subkarten rekonstruierte Signal der Quelle mit dem Quellsignal sowie der Schallpegel verglichen. Letzterer wurde aus einem gleitendem Mittelwert mit einer Fenstergröße von 1024 Abtastwerten gebildet.

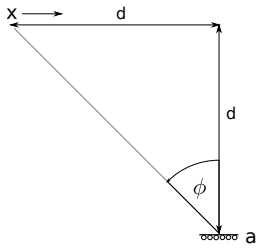


**Abbildung 3:** Skizze des simulierten Messaufbaus.

Die realen Messdaten stammen von einer Zugvorbeifahrt eines sich mit 80 km/h bewegenden Dieseltriebzuges. Hier wurde der Bereich des ersten Powerpacks des Zuges, welcher in der Abbildung 4 gelb markiert ist, analysiert. Dieser befindet sich direkt nach dem ersten Radpaar des Zuges und wurde hier als Quellbereich mit den Dimensionen 4m x 1.25m definiert.

## Ergebnisse

Bei den Tests an synthetischen Daten ist zu sehen, dass die Quellsignale vor allem bei kleinem Winkel $\phi$ zum Mikrofonarray gut rekonstruiert werden. Der Vergleich von Quellsignal und rekonstruiertem Signal ist in Abbildung 5 dargestellt. Erst ab Winkeln von +- 25 Grad sind Abweichungen im rekonstruiertem Signal zu erkennen. Die-

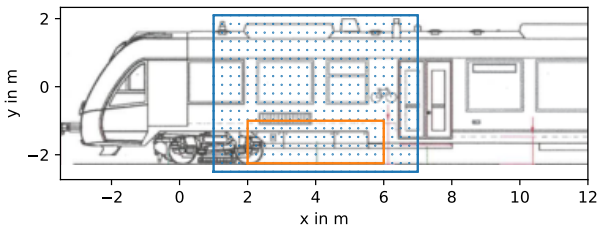


**Abbildung 4:** Skizze des untersuchten Dieseltriebzuges. Blau markiert ist der Bereich des bewegten Gitters und in gelb ist der untersuchte Bereich des Powerpacks markiert.

se Abweichungen nehmen mit der Größe des Winkels zu. Ebenfalls lässt sich erkennen, dass bei negativen Winkeln das rekonstruierte Signal im Verhältnis zum Quellsignal zu groß und bei positiven Winkeln zu schwach ist. Der aus dem Quellsignal und rekonstruiertem Signal resultierende Schallpegel ist in Abbildung 6 dargestellt . Man kann sehen, dass der rekonstruierte Schallpegel gut mit dem dem der Quelle übereinstimmt. Allerdings lässt sich wieder eine Überschätzung der Quelle bei negativen Winkeln und Unterschätzung bei positiven Winkeln beobachten.

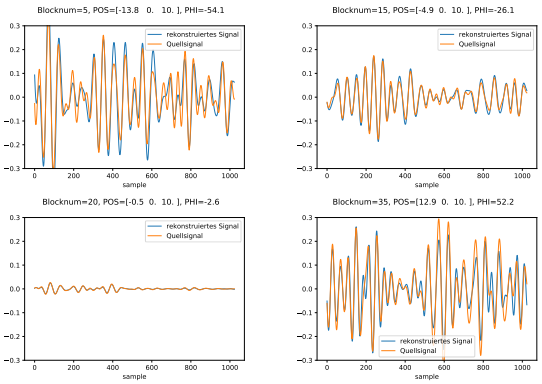


**Abbildung 5:** Unter verschiedenen Winkeln rekonstruiertes Signal der Dipolquelle mit weißem Rauschen.

Die aus den Messdaten resultierenden Teilkarten sind in Abbildung 7 dargestellt. Sie zeigen, dass Quellen meist im Integrationsbereich gefunden werden aber in ihrer Position deutlich schwanken. So wird bei fast allen Winkelbereichen eine Quelle im Mittelpunkt des Integrationsbereiches gefunden, die Positionen der anderen verändern sich von Winkel zu Winkel. Besonders bei großen positiven Winkeln liegen viele gefundene Quellen außerhalb des Integrationsbereiches. Abbildung 8 zeigt die Integration über dem Quellbereich dabei wird ein Schallpegel von 90 dB mit Schwankungen von +- 1 dB bestimmt. Dies würde einer monopolartigen Charakteristik entsprechen welche bei dem Bereich des Powerpacks zu erwarten wäre.

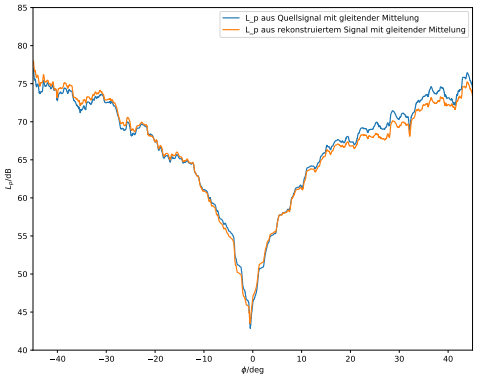


**Abbildung 6:** Simulierter Schallpegel und rekonstruierter Schallpegel.

## Fazit

Es wurde gezeigt, dass mit einer winkelabhängigen Auswertungsstrategie des CLEANT Verfahrens, Quellsignale von simulierten Dipolquellen und damit Ihre Richtcharakteristik rekonstruiert werden können. Darüber hinaus wurde die Methode verwendet um aus Arraymessdaten die Charakteristik des Powerpacks eines Dieseltriebzuges zu schätzen. Auch hier lieferte die Methode eine zu erwartende Richtcharakteristik einer Monopolquelle.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des von der Europäischen Gemeinschaft geförderten Projektes S2R TRANSIT (881771) durchgeführt.

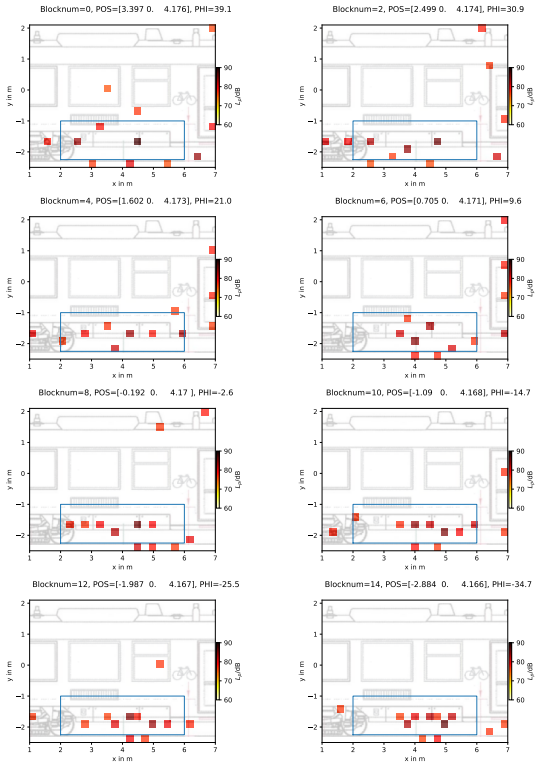


**Abbildung 7:** Unter verschiedenen Winkeln mit der CLEANT Methode ermittlete Quellkarten.

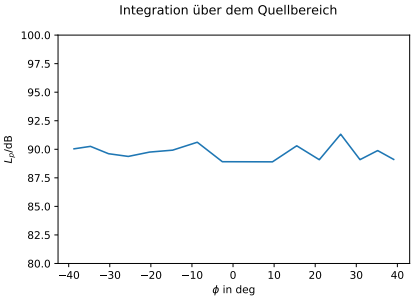


**Abbildung 8:** Der Schallpegel der über dem Quellbereich des Powerpacks aufintegrieten Quellen in Abhängigkeit vom beobachteten Winkel $\phi$.

## Literatur

[1] R. Cousson, Q. Leclère, M.-A. Pallas, and M. Berengier. „A time domain clean approach for the identification of acoustic moving sources.“Journal of Sound and Vibration, 443, 47-62, 2019. doi:10.1016/j.jsv.2018.11.026.

[2] A. Kujawski and E. Sarradj. „Application of the CLEANT method for high speed railway train measurements “BeBec 2020

[3] E. Sarradj and G. Herold. „A Python framework for microphone array data processing “Applied Acoustics, 116, 50-58, 2017.