

# Differenz-Beamforming als Methode zur Variantenanalyse in der Fahrzeugakustik

Steffen Schmidt<sup>1</sup>, Dirk Döbler<sup>2</sup>

GFaI e.V., 12489 Berlin

<sup>1</sup>E-Mail:sschmidt@gfai.de <sup>2</sup>E-Mail:doebler@gfai.de

## Einleitung

Akustische Messverfahren werden zunehmend in Entwicklungsabteilungen eingesetzt, um die akustischen Eigenschaften von Produkten zu optimieren. Um unterschiedliche Varianten oder Modifikationen an Bauteilen bewerten zu können, ist es erforderlich, die Messergebnisse vergleichen zu können. Dies kann sich bei bildgebenden Verfahren wie dem Beamforming schwierig gestalten, insbesondere dann, wenn die Unterschiede zwischen den Messungen sehr klein sind.

Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem kleinste Unterschiede in Beamforming-Ergebnissen visualisiert werden können (Vorher-/Nachher-Analyse). Dabei wird die Differenz zwischen zwei Beamforming-Karten berechnet und in einer neuen Karte dargestellt. Die frequenzselektive Ergebniskarte enthält nur die akustischen Informationen, in denen sich die Ausgangskarten unterscheiden und blendet identische Quellen aus. Dadurch wird es möglich, die Auswirkung kleiner Veränderungen am Messobjekt zu visualisieren, weil die unveränderten Teile nicht angezeigt werden.

## Variantenanalyse

Auch in der Fahrzeugentwicklung wird verstärkt Wert auf die akustischen Eigenschaften von Automobilen gelegt. Alle Automobilhersteller versuchen die akustischen Eindrücke für den Fahrer und die anderen Passagiere zu optimieren. Dafür werden akustische Messungen von verschiedenen Design-Varianten einzelner Bauteile oder -gruppen (z. B. Außenspiegel oder Scheibenwischer) durchgeführt. Der anschließende Vergleich der Messergebnisse ermöglicht die Bewertung der Varianten. Um die während der Fahrt durch die Luftströmung erzeugten Geräusche zu minimieren, werden solche Vergleichsmessungen auch in Windkanälen durchgeführt.

Bei Messungen in Windkanälen kommt erschwerend dazu, dass das gesamte Fahrzeug im Luftstrom Geräusche erzeugt. Um hier einzelne Bauteile analysieren zu können, müssen die Windgeräusche der restlichen Karosserie unterdrückt werden. Dafür werden meist ganze Radkästen und andere Komponenten abgeklebt, was ein sehr zeitaufwendiger und somit auch kostenintensiver Vorgang ist.

Ein häufig eingesetztes akustisches Analyseverfahren ist Beamforming. Dabei werden Schallereignisse mit Hilfe von mehrkanaligen Mikrofon-Arrays aufgenommen und die Ergebnisse in akustischen Karten dargestellt. Dadurch ist es möglich, Schallquellen sowohl in 2D als auch in 3D zu lokalisieren. Durch die Verwendung von Beamforming-Algorithmen, die im Frequenzbereich arbeiten, können die

Analyse und Visualisierung auf die zu untersuchenden Frequenzbänder eingeschränkt werden.

Das Vergleichen akustischer Karten von Windkanalmessungen ist nicht immer einfach möglich. Wenn zwischen den Messungen nur kleine Veränderungen vorgenommen wurden, sehen die Ergebnisse sehr ähnlich aus und die Unterschiede können durch rein visuelles Vergleichen nicht immer identifiziert werden. Problematisch sind außerdem Quellen, die in beiden Messungen vorkommen und schwächere Quellen verdecken, die durch die Veränderungen entstanden sind. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, kann die Differenz zwischen zwei akustischen Karten berechnet werden um so die Veränderungen darzustellen.

Die Differenzanalyse, also das Bestimmen der Differenz zwischen Messergebnissen um daraus neue Informationen abzuleiten, ist ein weitverbreitetes Verfahren in der Wissenschaft. Sie wird zum Beispiel eingesetzt, um DNA anhand ihrer thermischen Differenzspektren[1] zu beschreiben oder um die Bilder von akustischen Mikroskopen zu verbessern[2].

## Differenz-Beamforming

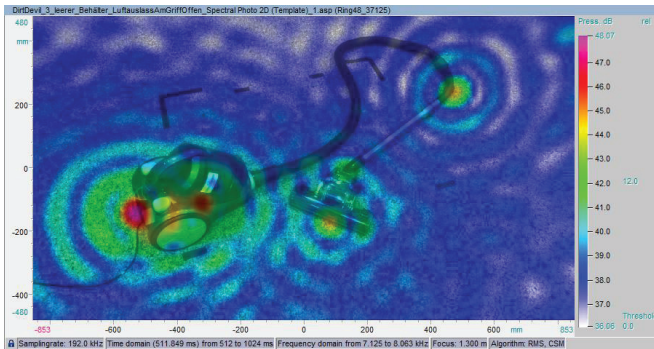
Die Berechnung einer Differenz-Beamforming-Karte erfolgt durch Subtraktion von zwei spektralen akustischen Ausgangskarten. Das Ergebnis wird ebenfalls als akustische Karte dargestellt, wobei hierfür eine spezielle Farbcodierung verwendet wird.

Eine zweidimensionale akustische Karte besteht aus einer Menge von Bildpunkten (Pixel), die in einer Projektionsebene liegen. Bei der Darstellung der akustischen Karte auf einem 3D-Modell handelt es sich um Punkte im dreidimensionalen Raum. Jedem dieser Punkte ist ein Schalldruckpegel zugeordnet, der durch Anwendung eines Beamforming-Algorithmus, z.B. Delay-and-Sum[3] mit Hilfe von Phasenverschiebung oder einer Kreuzspektralmatrix (CSM) berechnet wurde.

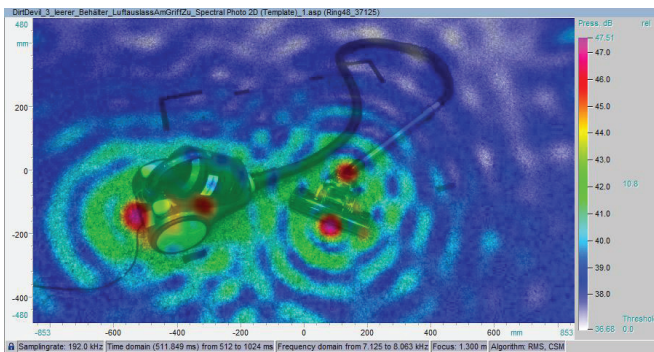
Um verwertbare Ergebnisse erzielen zu können, müssen die beiden Messungen mit dem identischen Messaufbau durchgeführt werden. Dies beinhaltet:

- gleiches Mikrofon-Array
- unveränderte Messumgebung (z.B. Temperatur, Umgebungsgeräusche)
- feste Position und Abstand zwischen Array und Messobjekt
- gleiche Abtastfrequenz

Darüber hinaus ist es erforderlich, dass die Eigenschaften der akustischen Karten übereinstimmen. Beide Karten müssen mit der gleichen Anzahl an Bildpunkten, mit dem gleichen Beamforming-Algorithmus und den gleichen FFT-Parametern (z.B. Blocklänge, Fensterfunktion) berechnet worden sein. Für die beiden akustischen Karten in Abb. 1 und 2 wurden zwischen den Messungen keine Änderungen am Messaufbau vorgenommen. Lediglich der Schieberegler zur Regelung der Saugleistung wurde in der Messung für Abb. 2 geschlossen.

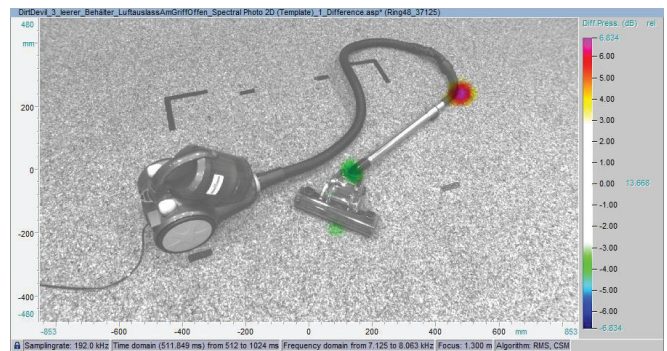


**Abbildung 1:** Akustische Karte eines Staubsaugers, Saugleistungsregler geöffnet, berechnet mit CSM und Blocklänge 4096 Samples



**Abbildung 2:** Akustische Karte eines Staubsaugers, Saugleistungsregler geschlossen, berechnet mit CSM und Blocklänge 4096 Samples

Als Ergebnis des Beamforming im Frequenzbereich erhält man den Schalldruck für einzelne Frequenzbänder (Koeffizienten). Die Anzahl der Koeffizienten und somit die Frequenzauflösung hängt von der Auflösung der Fouriertransformation ab. Zur Berechnung der Differenz wird aus dem Schalldruck der Schalldruckpegel (Sound Pressure Level, SPL) abgeleitet und jeweils punkt- und koeffizientenweise voneinander abgezogen. Der sich daraus ergebende Differenzschalldruckpegel (Difference Sound Pressure Level, DSPL) ist positiv, wenn der SPL für diesen Punkt in der Minuend-Karte höher ist und negativ, wenn die Subtrahend-Karte den höheren SPL ausweist. Für Punkte,



**Abbildung 3:** Differenzkarte berechnet aus Abb. 1 und Abb. 2, Frequenzbereich 7.1 - 8.0 kHz

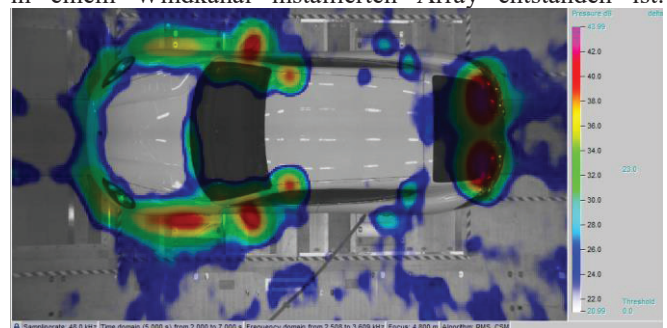
die in beiden Ausgangskarten den gleichen Schalldruck darstellen, ergibt sich ein DSPL von 0.

In der Ergebniskarte werden die Differenzschalldruckpegel für die Koeffizienten, die den darzustellenden Frequenzen entsprechen, durch Bildung des arithmetischen Mittels zusammengefasst. Zur Visualisierung wird eine symmetrische Farbskala verwendet, die die Werte von -a bis +a auf entsprechende Farbtöne abbildet. Dabei ist a der maximale absolute in der Ergebniskarte vorkommende Differenzschalldruckpegel. Der mittlere Bereich der Skala um Null wird weiß oder transparent dargestellt. Positive und negative Werte werden durch zwei verschiedene Farbgradienten visualisiert.

Die Differenzkarte in Abb. 3 zeigt den geöffneten Schieberegler als positive Differenz in rot-gelben Farbtönen. Das Schließen des Reglers führt zu einer Erhöhung der Saugleistung und somit einer höheren Geräuschentwicklung an der Bodendüse. Dies ist als negative Differenz in grün sichtbar. Die von Motor und Auffangbehälter emittierten Schallquellen sind in beiden Messungen identisch, weshalb sie in der Differenzkarte nicht erscheinen.

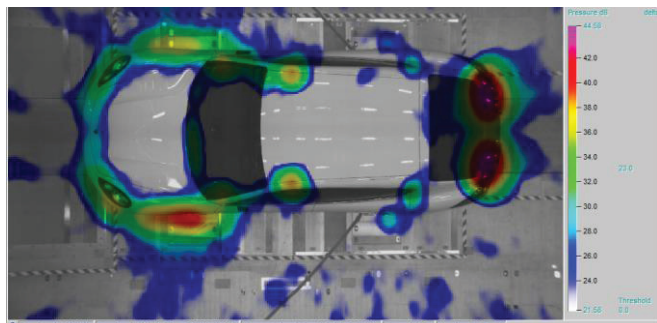
### Beispiele aus der Fahrzeugakustik

Zur Evaluierung der Anwendbarkeit des Verfahrens in der Fahrzeugakustik wurden verschiedene Messungen in Windkanälen durchgeführt und miteinander verglichen. In Abb. 4 ist eine akustische Karte zu sehen, die mit einem fest in einem Windkanal installierten Array entstanden ist.



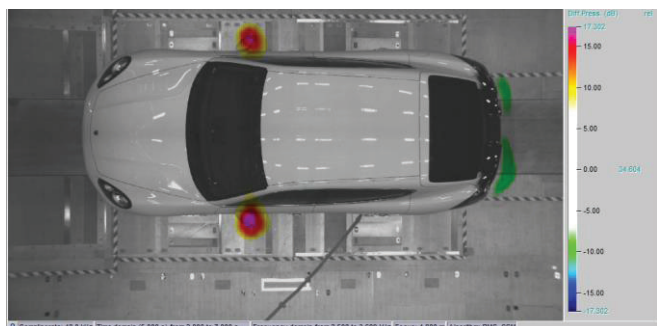
**Abbildung 4:** Akustische Karte eines Fahrzeugs im Windkanal, mit CSM und Blocklänge 4096 Samples, Messung aus Porsche Windkanal Weissach

Dabei treten unter anderem die Außenspiegel als starke Quellen hervor, weil sie als große Objekte in der Luftströmung stehen. Für eine zweite Vergleichsmessung wurden die Spiegel anschließend entfernt, wobei der restliche Messaufbau unverändert geblieben ist. In der akustischen Karte in Abb. 5 sind daher, bis auf die Spiegel, die gleichen Quellen zu finden.



**Abbildung 5:** Akustische Karte eines Fahrzeugs im Windkanal, ohne Außenspiegel, mit CSM und Blocklänge 4096 Samples, Messung aus Porsche Windkanal Weissach

Die Differenz aus beiden Karten ist in Abb. 6 dargestellt. Weil die Messung mit Außenspiegeln als Minuend verwendet wurde, sind die Spiegel als positive Differenz von 17 dB zu sehen. Während dieses Ergebnis durch den rein visuellen Vergleich der beiden Ausgangskarten zu erwarten war, zeigt das Ergebnis auch eine negative Differenz, die auf den ersten Blick nicht zu erkennen ist. Die Geräuschentwicklung hinter dem Fahrzeug war in der zweiten Messung ca. 10 dB lauter.

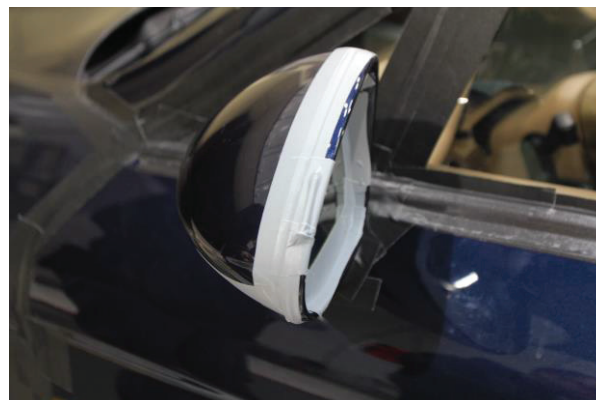


**Abbildung 6:** Differenzkarte berechnet aus Abb. 4 und Abb. 5, Frequenzbereich 2.5 - 3.6 kHz, Messung aus Porsche Windkanal Weissach

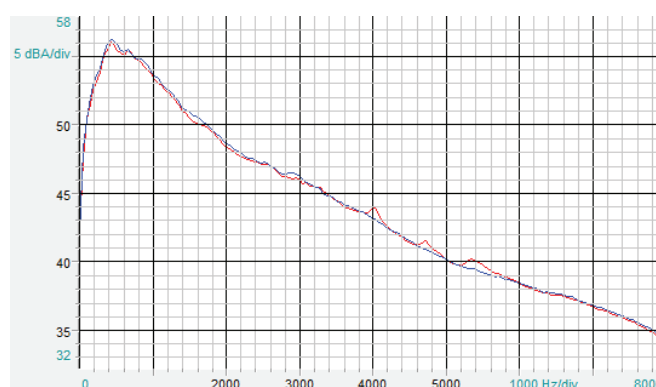
Um zu überprüfen, ob mittels Differenz-Beamforming auch sehr kleine Unterschiede erfasst werden können, wurde das Fahrzeug für eine weitere Windkanalmessung nur noch geringfügig modifiziert. Dafür wurde eine Schraube so auf den linken Außenspiegel geklebt, dass sie sich in der Windströmung befand (Abb.7). Somit wurden die aerodynamischen und aeroakustischen Eigenschaften des Spiegels verändert. Weitere Änderungen zwischen den Einzelmessungen wurden erneut nicht vorgenommen.

Abb. 8 zeigt für beide Messungen jeweils die Mittelung der Frequenzspektren über alle Mikrofonkanäle. Beim Vergleich beider Frequenzverläufe fällt auf, dass es nur kleine Abweichungen in bestimmten Frequenzbereichen gibt. Die rote Linie enthält 3 Peaks bei 4.0 kHz, 4.7 kHz und 5.3 kHz, die vermutlich durch die Schraube verursacht werden. Um

diese Annahme zu bestätigen, wurden für diese 3 Frequenzen akustische Differenzkarten berechnet.

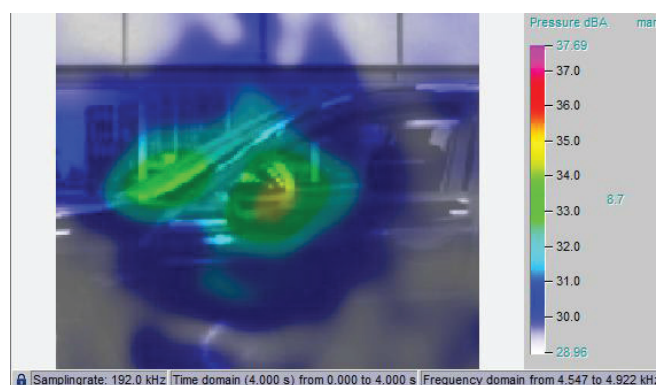


**Abbildung 7:** Am Außenspiegel befestigte Schraube

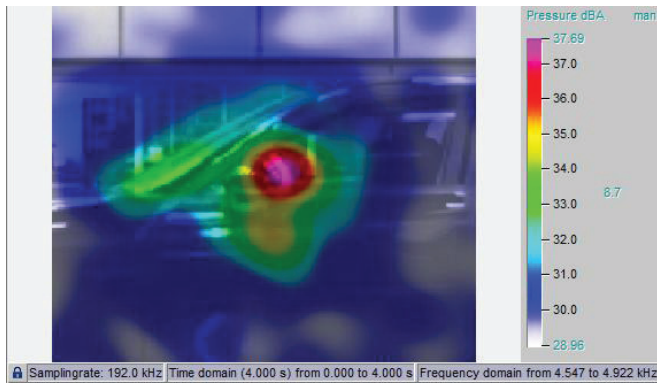


**Abbildung 8:** Gemittelte Frequenzspektren der Messungen ohne Modifikation (blau) und mit aufgeklebter Schraube (rot)

Die nachfolgend abgebildeten Beispiele wurden für den Frequenzbereich von 4.5 kHz bis 4.9 kHz berechnet und enthalten somit den Peak bei 4.7 kHz. Die Karte in Abb. 9 zeigt die Windgeräusche im Bereich der A-Säule mit dem nicht modifizierten Spiegel. Darauf sind zwei Hauptquellen zu erkennen: die Scheibenwischer auf der Frontscheibe und der Spiegel. Bei der Messung mit der aufgeklebten Schraube (Abb. 10) tritt der Spiegel als lauteste Quelle hervor. Der Scheibenwischer ist als Quelle auch vorhanden, aber nicht so deutlich sichtbar, weil der Schalldruckpegel unter dem des Spiegels liegt.

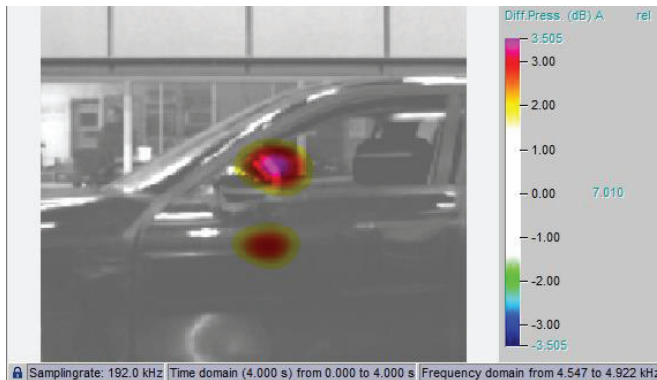


**Abbildung 9:** Akustische Karte der A-Säule mit unverändertem Außenspiegel, mit CSM und Blocklänge 4096 Samples



**Abbildung 10:** Akustische Karte der A-Säule mit aufgeklebter Schraube auf Außenspiegel, mit CSM und Blocklänge 4096 Samples

In der Differenzkarte in Abb. 11 ist die Position der Schraube sehr genau zu erkennen. Der Differenzschalldruckpegel beträgt an dieser Stelle 3,5 dBA. Außerdem ist auf der Fahrertür eine Reflektion dieser Quelle zu sehen. Der vom Scheibenwischer und dem Spiegelgehäuse emittierte Schall wird durch die Subtraktion entfernt und ist dadurch in der Ergebniskarte nicht sichtbar. Die Analyse der anderen Peak-Frequenzen von 4,0 kHz und 5,3 kHz ergibt ähnliche Ergebnisse, in denen ebenfalls die Schraube als Hauptdifferenz hervortritt. Sogar für Frequenzbereiche, für die keine Unterschiede im Spektrum erkennbar sind, ist sie in der Differenzkarte zu sehen (Abb. 12).



**Abbildung 11:** Differenzkarte berechnet aus Abb. 9 und Abb. 10, Frequenzbereich 4,5 - 4,9 kHz

Alle gezeigten Beispiele wurden mit einer Kurzzeit-FFT mit der Blocklänge 4096 Samples berechnet, woraus sich eine spektrale Auflösung von 46,88 Hz bei einer Samplingfrequenz von 192 kHz ergibt. Wie oben beschrieben, wird die Subtraktion koeffizientenweise durchgeführt. Um den Einfluss der Frequenzauflösung auf die Qualität der Differenzkarte bewerten zu können, wurden die akustischen Karten aus den Abb. 9-11 zusätzlich mit Blocklängen von 2048 bis 32768 Samples berechnet. Die Ergebnisse waren in allen Fällen nahezu identisch und zeigten die Schraube auf dem Spiegel als Differenz.



**Abbildung 12:** Differenzkarte der A-Säule, Frequenzbereich 7,0 - 7,4 kHz

## Zusammenfassung

Die vorgestellten Beispiele belegen, dass Differenz-Beamforming-Karten gut geeignet sind, um Unterschiede zwischen ähnlichen akustischen Messungen zu visualisieren. Mit Hilfe des Verfahrens ist es möglich, sehr kleine Modifikationen zu lokalisieren und mit dem Differenzschalldruckpegel zu bewerten. Weil stationäre Quellen, die in beiden Messungen vorkommen, dabei eliminiert werden ist dieses Verfahren besonders gut zur Anwendung in Windkanälen geeignet. Der Schall der unveränderten Fahrzeugteile wird ausgelöscht, so dass kein zusätzliches Abdecken und Verkleben der Karosserie notwendig ist.

Um das Verfahren weiterzuentwickeln, kann in weiterführenden Arbeiten untersucht werden, ob als alternative Berechnungsmethode die Kreuzspektralmatrizen der beiden Einzelmessungen von einander abgezogen werden können. Außerdem könnte Differenz-Beamforming mit anderen Algorithmen wie der Korrelationsanalyse[4] kombiniert werden.

## Literatur

- [1] J.-L.Mergny, J.Li, L.Lacroix, S.Amrane, J.Chaires, "Thermal difference spectra: a specific signature for nucleic acid structures", Nucleic Acids Research, Volume 33, Issue 16 (2005)
- [2] S.Bennett and E.Ash, "Differential Imaging with the Acoustic Microscope", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-28, No.2 (1981)
- [3] D.H.Johnson, D.E.Dudgeon, "Array Signal Processing", PTR Prentice Hall (1993)
- [4] S.Neugebauer, R.Rösel, D.Döbler: "Correlation of parallel car interior and exterior beamforming measurements in a wind tunnel", Proceedings of Internoise 2014 (2014)