

Mikrofonarrayverfahren zur Messung der abgestrahlten Schalleistung von Motorkomponenten

Gert Herold, Ennes Sarradj

BTU Cottbus - Senftenberg, Lehrstuhl Technische Akustik, E-Mail: herold@b-tu.de, sarradj@b-tu.de

Einleitung

Zur Minderung der Schallabstrahlung an Maschinenkomponenten ist eine genaue Charakterisierung der Schallquellen von Interesse. Oft ist es jedoch nicht möglich, diese isoliert zu betrachten. Beim Betrieb eines Motors etwa strahlen mehrere Komponenten gleichzeitig Schall unterschiedlicher Stärke ab. Im Folgenden wird ein auf Mikrofonarray-Messungen basierendes Beamforming-Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, die Schalleistung einzelner Motorkomponenten aus einer einzigen Messung zu ermitteln. Das Verfahren wird auf Messdaten aus Experimenten mit einem 4-Takt-Verbrennungsmotor angewendet und die Ergebnisse mit denen aus einem klassischen Hüllflächenverfahren zur Schalleleistungsbestimmung nach Norm verglichen.

Beamforming mit CLEAN-SC

Für das klassische Delay-and-Sum-Beamforming wird der Schalldruck synchron an mehreren Mikrofonpositionen aufgenommen. Die Signale werden in den Frequenzbereich transformiert und die Phase so verschoben, dass die Schalllaufzeit zu beliebig gewählten Fokuspunkten ausgeglichen wird. Die Summation der phasenverschobenen Signale ergibt den von diesen Fokuspunkten auf eine Referenzposition (z.B. die Arraymitte) jeweils abgestrahlten Schalldruck, überlagert mit einem Fehler durch die Abbildungseigenschaften des Arrays und Ungenauigkeiten im Schallausbreitungsmodell. Um diesen Fehler zu korrigieren, wird die erhaltene Quellkarte mithilfe des CLEAN-SC-Algorithmus [2] entfaltet.

Beamforming-Hüllflächenverfahren

Das vorgestellte Verfahren orientiert sich an der Bestimmung des Schalleleistungspegels aus Schalldruckmessungen in DIN EN ISO 3746 [1]. Für dieses Hüllflächenverfahren (HFV) werden die Schalldruckpegel auf den Mittelpunkt von fünf Seiten eines gedachten, das Messobjekt umschließenden Quader gemessen. Der Schalleleistungspegel L_{WA} berechnet sich wie folgt:

$$L_{WA} = \overline{L_{pA}} + 10 \lg \frac{S}{1 \text{ m}^2} \text{ dB} . \quad (1)$$

$\overline{L_{pA}}$ enthält die gemittelten Schalldruckpegel sowie Korrekturfaktoren abhängig von der Messumgebung (reflektierende Flächen und Fremdgeräusche). S ist die Summe der Messflächen.

Das angepasste HFV verwendet ein Array aus auf der Quaderoberfläche verteilten Mikrofonen, um an den Seitenmittelpunkten Schalldrücke zu bestimmen. Im Gegensatz zur klassischen Methode liefert das Verfahren jedoch

nicht nur einen Schalldruckwert pro Seite, sondern den jeweils von allen gewählten Fokuspunkten auf die Seitenmitte abgestrahlten Schalldruck. Diese Schalldruckwerte werden wiederum entsprechend über die fünf Seiten gemittelt und nach Beaufschlagung der Korrekturfaktoren in Schalleleistungspegel umgerechnet. Das Ergebnis besteht aus einer Kartierung der Quellen, die für jeden Fokuspunkt den von dort abgestrahlten Schalleleistungspegel enthält.

Messungen

Zur Validierung des Verfahrens wurden Messungen an einem Vertikutierer durchgeführt, der mit einem einzylindrigen 4-Takt-Verbrennungsmotor betrieben wird (siehe Abb. 1). Die 68 um das Gerät angeordneten Mikrofone



Abbildung 1: Benzinvertikutierer mit dem ihn umschließenden Mikrofonarray (insgesamt 68 Mikrofone).

befinden sich auf einem Quader mit den Ausdehnungen ($L \times B \times H$) $1,5 \text{ m} \times 0,9 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$. Dies entspricht nicht vollständig den Anforderungen der Norm, da der darin geforderte Mindestabstand der Seiten des Quaders zum Messobjekt konstruktionsbedingt nicht eingehalten werden konnte. Auf den kurzen Seiten befinden sich 13, auf den langen jeweils 14 Mikrofone. In Abb. 2 ist die Anordnung der Mikrofone auf dem Quader dargestellt. Die gemessenen Schalldrücke können ohne weitere Korrektur gemittelt werden, da die Messungen im Freien stattfanden und der Schalldruckpegel der Umgebungsgeräusche mehr als 10 dB unter dem des Vertikutierers liegt.

Die Auswertung findet auf einem ebenfalls quaderförmigen Fokusgitter mit regelmäßig angeordneten Gitterpunkten statt. Im Folgenden wird die Auswertung der Messung des Vertikutierers im Leerlaufbetrieb vorgestellt. Weitere Parameter von Messung und Auswertung können aus Tabelle 1 entnommen werden.

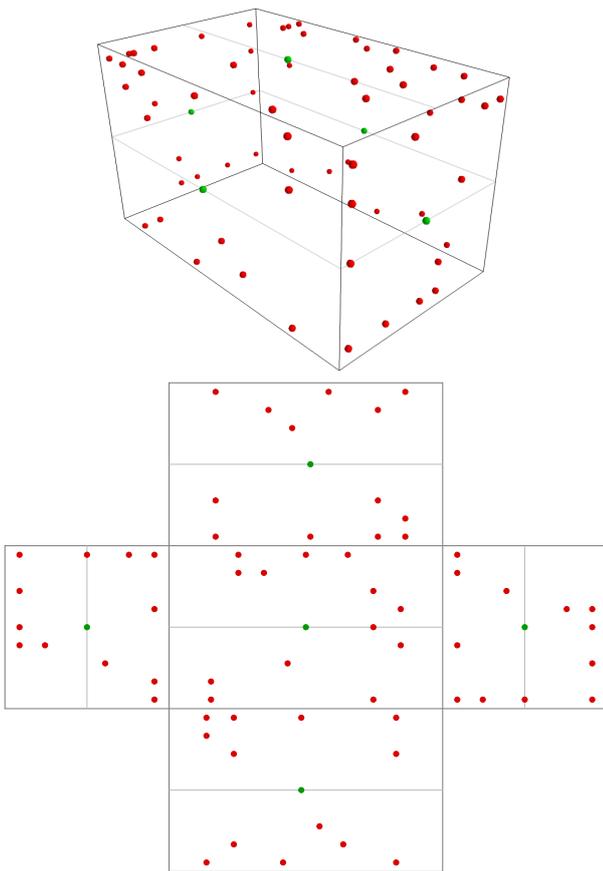


Abbildung 2: Verteilung der Mikrofone auf den Quaderflächen (unten in „aufgeklappter“ Projektion). Die jeweils mittig liegenden Mikrofone sind grün gekennzeichnet.

Ergebnisse

Die Messdaten wurden mit der am Lehrstuhl für Technische Akustik der BTU Cottbus-Senftenberg entwickelten Software Acoular [4] ausgewertet.

In Abb. 3 sind die Schalleistungsspektren, wie sie sich

- mit dem HFV aus den mittig auf den Quaderflächen liegenden Mikrofonen
- mit dem HFV aus allen 68 Mikrofonen
- nach dem Beamforming-HFV mit Aufsummierung der Pegel an den Fokuspunkten

berechnen. Der Vergleich der Spektren zeigt, dass der mit dem Beamforming-HFV berechnete Schalleistungs-

Tabelle 1: Mess- und Auswerteparameter.

Messdauer	80 s
Abtastrate	51200 Hz
Fokusgitter (L×B×H)	1 m × 0,8 m × 0,8 m
Fokusgitter Auflösung	2,5 cm
FFT-Fenstergröße	4096 Samples
FFT-Fensterfunktion	Hanning
Beamforming	DAS + CLEAN-SC [2]
Steering-Vektor	Variante IV aus [3]
Hauptdiagonale der Kreuzspektralmatrix entfernt	

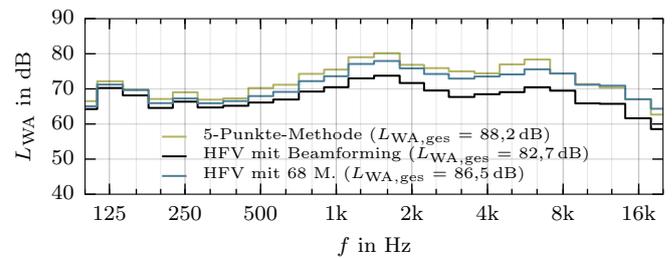


Abbildung 3: Vergleich des berechneten Schalleistungsspektrums nach dem Hüllflächenverfahren (mit 5 bzw. 68 Mikrofonen) mit dem aufsummierten Schalleistungsspektrum aus dem angepassten Verfahren.

pegel (82,7 dB) stets unter dem durch das klassische Verfahren mit 5 Mikrofonen ermittelten Pegel (88,2 dB) liegt. Auch der mit allen Mikrofonen nach klassischem HFV ermittelte Schalleistungspegel liegt mit 86,5 dB noch darüber. Für die Abweichung der absoluten Pegelwerte kann es mehrere Gründe geben:

- Das verwendete Mikrofonarrayverfahren wertet nur Quellen im angegebenen Fokusbereich aus (z. B. werden Reflexionsquellen vom Boden ignoriert).
- Es treten Abweichungen durch die Wahl des Steering-Vektors auf (vgl. [3]).
- Die Entfernung der Hauptdiagonale der Kreuzspektralmatrix für einen besseren Signal-Rausch-Abstand beim Beamforming kann auch Einfluss auf den Gesamtpegel haben.

Der qualitative Verlauf der Spektren ist hingegen sehr ähnlich, d. h., die Frequenzbänder mit den jeweils höheren bzw. niedrigeren Pegeln sind in allen Fällen die gleichen.

Zur Veranschaulichung einer möglichen qualitativen Auswertung der Position und Ausdehnung der auftretenden Quellen sind in Abbildung 4 Quellkarten für die Gesamtschalleistung sowie drei exemplarische Terzbänder aufgetragen. In den Abbildungen wurden Punkte mit einem Schalleistungspegel von bis zu 15 dB unter dem Maximum eingefärbt und es ergibt sich ein Bild mit den Positionen der leistungsstärksten Quellen.

Wird die Gesamtschalleistung betrachtet (Abb. 4a), zeichnen sich zwei Hauptquellgebiete ab: zum einen im Bereich der Abgasanlage (die auch während des Betriebs subjektiv gut als Quelle ausgemacht werden kann) und zum anderen der Bereich des Zylinderkopfes.

Im Terzband um 500 Hz (Abb. 4b) ist keine so eindeutige Zuordnung mehr möglich. Neben Quellen an der Abgasanlage wird auch am Luftfilter und vom Tank Schall abgestrahlt.

Bei Betrachtung des tieffrequenten 125-Hz-Terzbands wird der Zylinderkopf als Hauptquelle identifiziert (Abb. 4c), wohingegen bei 6300 Hz die Abgasanlage dominiert (Abb. 4d).

Ein differenzierteres Bild zeigt sich, wenn die Schalleistungsspektren einzelner Komponenten betrachtet werden. Dazu wird die Schalleistung derjenigen Gitterpunkte aufaddiert, die im Bereich der interessieren-

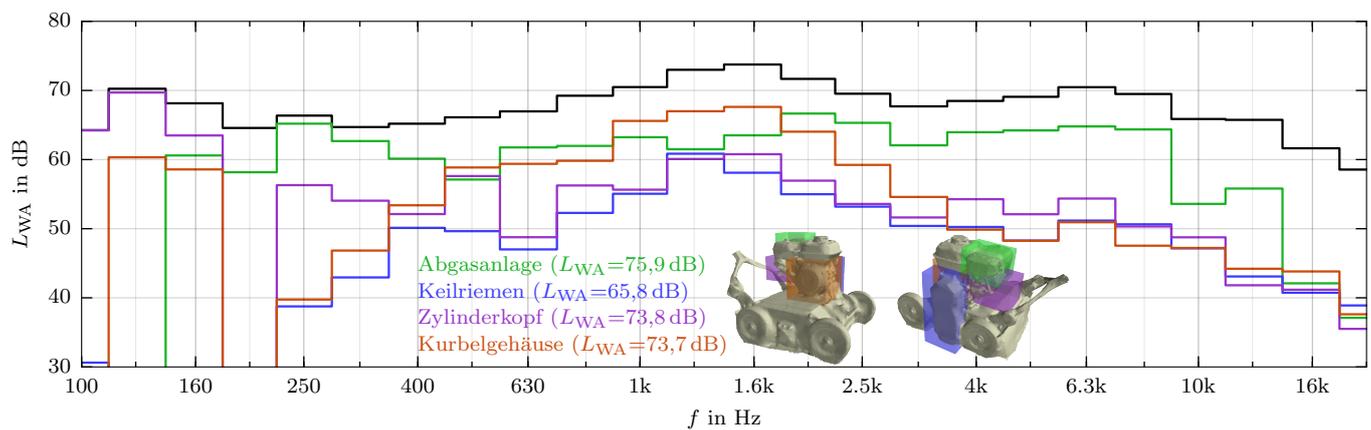


Abbildung 5: Mit dem Beamforming-Hüllflächenverfahren ermittelte Schalleistungsspektren, integriert über Einzelkomponenten des Vertikutierers (farbig) bzw. den gesamten Auswertebereich (schwarz).

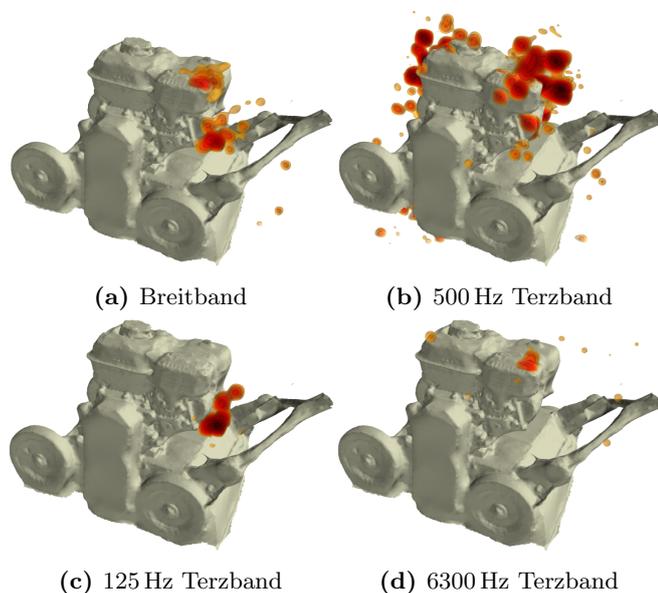


Abbildung 4: Quellkarten des berechneten Schalleistungspiegels für verschiedene Frequenzbänder. Dynamik: 15 dB.

den Komponente liegen. Hier wurden beispielhaft quaderförmige Bereiche definiert, die jeweils die Abgasanlage, das Keilriemengehäuse, den Zylinderkopf sowie das Kurbelgehäuse umschließen. Die sich ergebenden Spektren sind in Abb. 5 aufgetragen.

Auch hier ist erkennbar, dass der Auspuff in weiten Teilen die Hauptquelle darstellt. Insbesondere im Bereich um 250 Hz sowie im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 10 kHz liegt der Schalleistungspegel deutlich über den Pegelanteilen der anderen betrachteten Quellen und prägt die Charakteristik des Gesamtspektrums. Der Keilriemen liefert keinen signifikanten Beitrag zum Spektrum, was beim Leerlaufbetrieb des Motors auch zu erwarten ist.

Der Zylinderkopf zeigt ebenfalls über einen großen Frequenzbereich keine signifikante Schallabstrahlung. Erst bei niedrigen Frequenzen unter 200 Hz ist er die Hauptquelle.

Das Spektrum des Kurbelgehäuses hat in weiten Bereichen einen ähnlichen Verlauf wie das des Keilriemens,

zeigt jedoch im mittleren Frequenzbereich um 1 kHz sogar höhere Pegelwerte als der Auspuff und bestimmt hier die Gesamtcharakteristik des Schalleistungsspektrums.

Zusammenfassung

Das Beamforming-Hüllflächenverfahren ist geeignet für die differenzierte Charakterisierung gleichzeitig betriebener Motorkomponenten. Neben der 3D-Lokalisierung der Quellbereiche mit der insgesamt höchsten Schallabstrahlung können auch die Positionen der Hauptquellen einzelner Frequenzbereiche räumlich bestimmt werden.

Im quantitativen Vergleich mit dem Hüllflächenverfahren nach Norm zeigt sich, dass bei qualitativ vergleichbarem Verlauf des Spektrums die ermittelten Pegel unterschätzt werden. Mögliche Ursachen wurden benannt und können durch Auswertungen mit geänderten Parametern sowie weitere Experimente gezielt untersucht werden.

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es jedoch bereits jetzt möglich, mit einer Messung diejenigen Komponenten des Motors zu bestimmen, die den Verlauf des Gesamtschalleistungsspektrums charakterisieren. Darüber hinaus erlaubt es das Verfahren, zu überprüfen, bei welchen Frequenzen der Beitrag einzelner Komponenten vernachlässigbar ist.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 3746:2011-03, Akustik – Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:2010)
- [2] P. Sijtsma: CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics* (2007), 6(4), 357–374, 2007
- [3] E. Sarradj: Three-Dimensional Acoustic Source Mapping with Different Beamforming Steering Vector Formulations. *Advances in Acoustics and Vibration* (2012), 1–12
- [4] Acoular – Acoustic testing and source mapping software, URL: <http://www.acoular.org/>