Vergleich verschiedener Methoden zur Schallleistungsbestimmung von Maschinenkomponenten

Philipp Hall[1], Gert Herold[2], Thomas Geyer[1] und Ennes Sarradj[2]
[1] *BTU Cottbus - Senftenberg, Lehrstuhl Technische Akustik*
[2] *TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik*
philipp.hall@b-tu.de

Einleitung

In Kraftfahrzeugen stellt der Verbrennungsmotor vor allem bei langsamer Fahrt im Stadtverkehr eine wesentliche Schallquelle dar. Um wirkungsvolle Lärmminderungsmaßnahmen ergreifen zu können, ist es notwendig, die Stärke dieser Schallquelle zu ermitteln. Die charakteristische Größe der Schallentstehung und -abstrahlung einer Maschine ist die Schallleistung. Diese kann jedoch nicht direkt gemessen werden, sondern muss über geeignete indirekte Messverfahren bestimmt werden. Eine Möglichkeit ist die Messung des Schalldrucks auf einer die Maschine umgebenden Hüllfläche und die anschließende Berechnung der Schallleistung. Eine zweite Möglichkeit ist die Messung der Schallintensität, aus welcher sich ebenfalls die Schallleistung berechnen lässt. Ein weiteres Verfahren besteht in der Verwendung eines Mikrofonarrays, welches das Messobjekt umschließt. Mit diesem ist es möglich, neben der Schallleistung der kompletten Maschine auch die Schallleistung einzelner Maschinenkomponenten aus nur einer Messung zu ermitteln.

Im Rahmen einer an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg durchgeführten Untersuchung [1] wurden diese Verfahren zur Schallleistungsbestimmung exemplarisch an einer benzinbetriebenen Wasserpumpe getestet. Unter Anwendung der zugrundeliegenden Normen wurden dazu ein Schallpegelmesser und eine Schallintensitätssonde verwendet. Zusätzlich ist ein dreidimensionales Mikrofonarray konzipiert und aufgebaut worden. Abschließend erfolgte ein Vergleich der verschiedenen Messverfahren hinsichtlich der Genauigkeit und des Informationsgehalts der Ergebnisse sowie hinsichtlich des zu betreibenden Messaufwands.

Versuchsaufbau

Für den korrekten Betrieb der Wasserpumpe wurde diese in einen Wasserkreislauf, bestehend aus dem Wasserreservoir, Zulauf- und Ablaufschläuchen sowie der Wasserpumpe selbst, nach Abbildung 1 integriert.
Zur akustischen Untersuchung wurde die Pumpe in drei Betriebszuständen betrieben:

- „Choke“ (Kaltstart bei Vergasermotoren),
- „Low“ (geringste Gasstellung) und
- „High“ (höchste Gasstellung).

Die Drehzahlen der verschiedenen Betriebspunkte wurden akustisch bestimmt. Dazu erfolgte am Schallpegelmessgerät mit einem 1/2“-Mikrofon der Genauigkeitsklasse 1 die Ermittlung des jeweils ersten spektralen Maximums bei schmalbandiger Analyse.

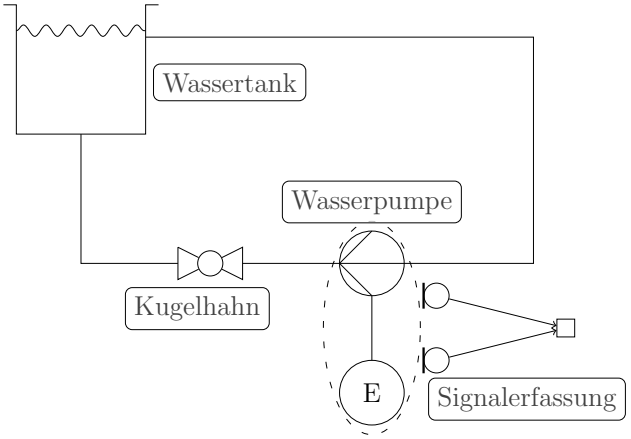

Abbildung 1: Plan der Versuchsanordnung mit Wasserpumpe (Motor & Pumpe) in einem geschlossenen Wasserkreislauf.

Zur Bestimmung der Schallleistung mittels Hüllflächenverfahren existieren verschiedene Normen. Dabei wird der Schallpegel an vorgeschriebenen Positionen auf einer quaderförmigen Hüllfläche um die Maschine herum gemessen. Für Übersichtsmessungen (Genauigkeitsklasse 3) werden fünf Mikrofone jeweils in den Mittelpunkten der fünf Quaderseiten nach ISO 3746 [2] verteilt. Durch weitere vier Messpositionen an den oberen Quaderecken kann ISO 3744 [3] als technisches Verfahren (Genauigkeitsklasse 2) genutzt werden. Aufgrund der gerichteten Schallabstrahlung war die Verteilung vier weiterer Mikrofonpositionen auf der abgasseitigen Fläche nötig. Beide Verfahren („5 Mikrofone“, „13 Mikrofone“) wurden mit Schallpegelmesser und 1/2“-Mikrofon in Terzspektren zwischen 100 Hz und 10 kHz zum Vergleich durchgeführt.

Entsprechend ISO 9614-2 [4] erfolgte die Schallintensitätsmessung mittels kontinuierlicher Abtastung einzelner Flächensegmente auf der Hüllfläche. Die Intensitätsonde wurde dazu in den Teilflächen bei konstanter Geschwindigkeit auf schlangenförmigen Abtastpfaden entlang geführt. Mit einem Abstandstandshalter von 25 mm zwischen den beiden 1/2“-Freifeldmikrofonen wurde der nach Norm vorgeschriebene Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 8 kHz abgedeckt.

Eine Vielzahl örtlich verteilter Mikrofone wird als

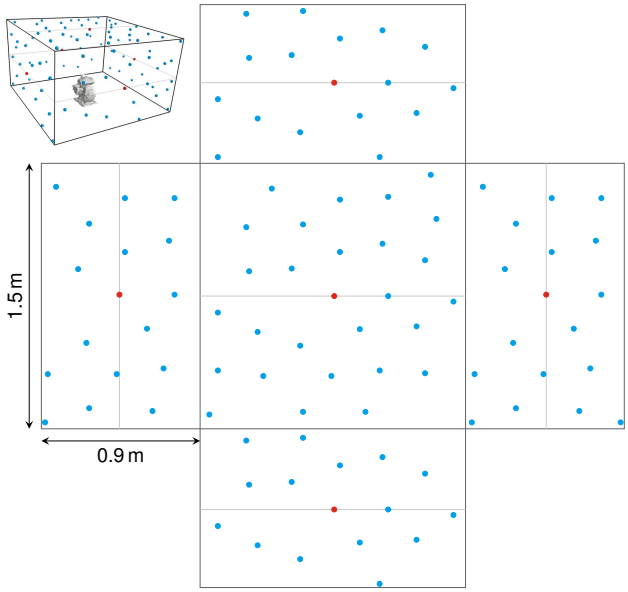

Abbildung 2: Anordnungsplan der 96 Mikrofone im Mikrofonarray. Darstellung im „aufgefalteten“ Zustand und zusätzlich als 3D-Ansicht. Auf jeder Seite befindet sich ein Mikrofon genau mittig (mit ● gekennzeichnet). (Quelle: [5])

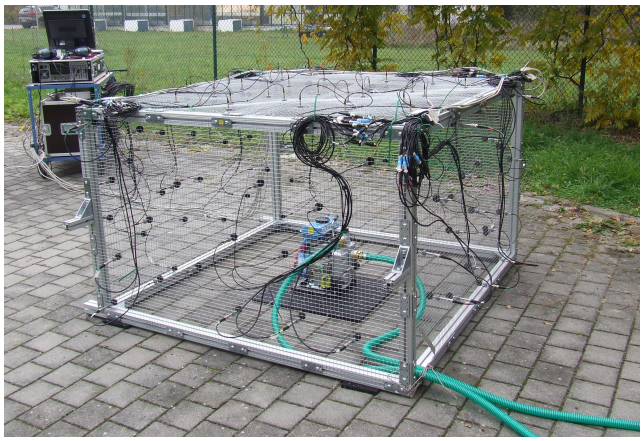

Abbildung 3: Die Wasserpumpe mit angeschlossenem Wasserkreislauf ist innerhalb des Mikrofonarrays positioniert.

Mikrofonarray bezeichnet, mit dessen Hilfe man die von der Quelle ausgesendeten Zeitsignale an vielen Messorten simultan aufzeichnen und im Nachgang unter Anwendung diverser Algorithmen auswerten kann. Schallquellen können geortet und die von ihnen emittierte Schallleistung bestimmt werden. Die Ortung von Schallquellen erfolgt dabei durch Auswertung von Laufzeitunterschieden zwischen allen möglichen Quellpositionen und den Mikrofonen. Abbildung 2 zeigt das konzipierte dreidimensionale Mikrofonarray. Mit einer Grundfläche von 1,5 m × 1,5 m sowie einer Höhe von 0,9 m umschließen die 96 gleichmäßig verteilten 1/4“-Freifeldmikrofone des Arrays die Pumpe. Zu sehen ist ebenfalls die zentrale Anordnung eines Mikrofons auf jeder Seite. Die Berechnung der Schallleistung aus den Messdaten erfolgte wie bei den Messungen mit dem Schallpegelmesser in Terzbändern zwischen 100 Hz und 10 kHz. Zur Ermittlung der Schallleistung aus den Array-Messungen wurden folgende Verfahren genutzt:

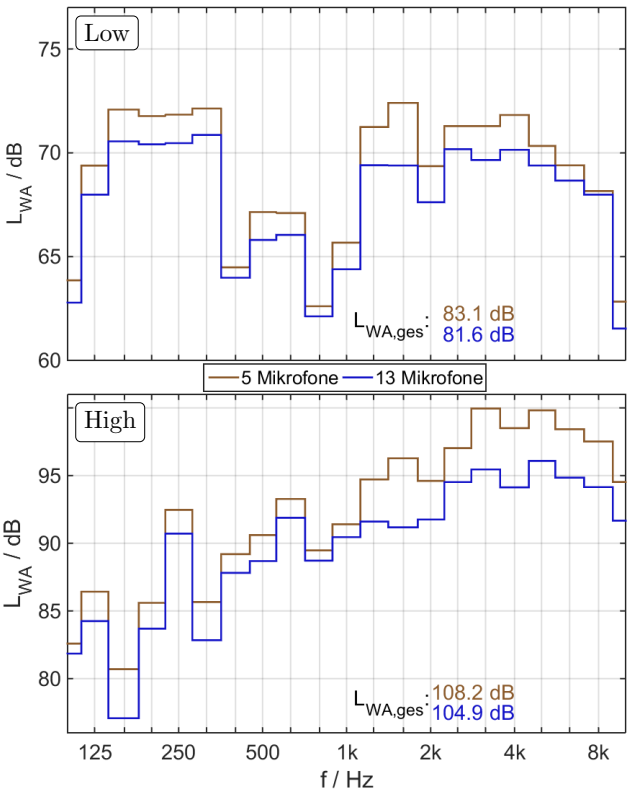

Abbildung 4: Schallleistungsspektren der Hüllflächenmessung nach Norm in Terzbändern: Vergleich verschiedener Mikrofonanzahlen für zwei Lastzustände.

- Hüllflächenverfahren nach ISO 3746 mit den Mittelpunktmikrofonen der fünf Seiten („Array 5“),
- Hüllflächenverfahren in Anlehnung an ISO 3746 mit Mittelung aller 96 Positionen („Array 96“) und
- Verwendung von Beamforming-Algorithmen, z.B. Orthogonales Beamforming [6] („Array OB“).

Das am Messort aufgebaute Mikrofonarray ist in Abbildung 3 gezeigt.

Ergebnisse

Die Schallpegelmessung nach dem Hüllflächenverfahren ist vergleichend für die Nutzung von 5 und 13 Mikrofonen in Abbildung 4 für die Betriebszustände „Low“ und „High“ zu sehen. Der Gesamtschallleistungspegel im betrachteten Frequenzband ist jeweils eingetragen. Die deutlich zu erkennende Abnahme der Schallleistungspegel bei der Verwendung von 13 Messpositionen liegt an den sinkenden Schallpegeln nach räumlicher Mittelung, da der dominante Anteil aus dem Abgasgeräusch zu einem jeweils geringeren Anteil in den Endwert eingeht. Folgend wird nur die mit 13 Mikrofonen ermittelte Schallleistung betrachtet.

Die aus den Array-Signalen berechneten Schallleistungspegelspektren sind in Abbildung 5 dargestellt. Es ist eine Abnahme der Schallleistungspegel bei Erhöhung der zur Mittelung verwendeten Mikrofonanzahl von fünf auf 96 zu erkennen. Nahezu identisch zur Mittelung über alle 96 Mikrofone verläuft das mittels orthogonalem Beam-

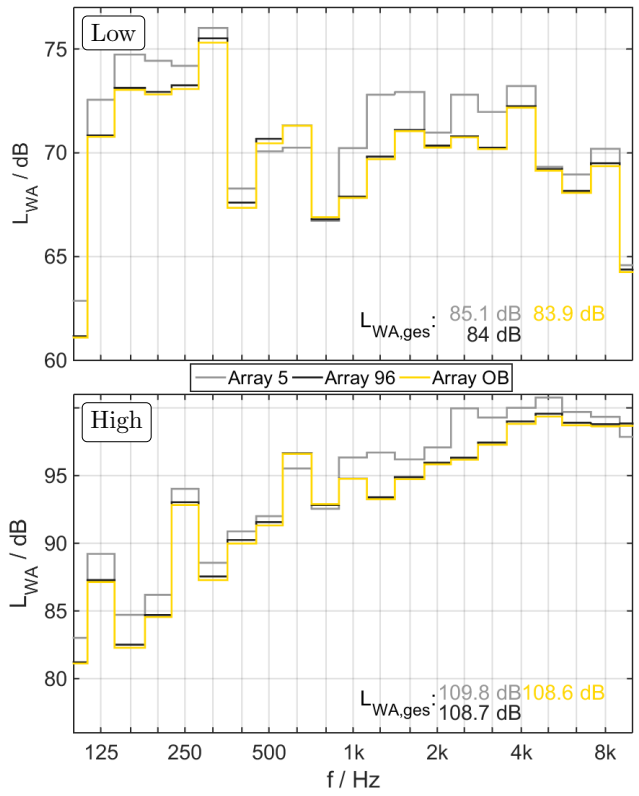

Abbildung 5: Schallleistungspegel der auf die Array-Signale angewendeten Methoden in Terzbändern für zwei Betriebszustände.

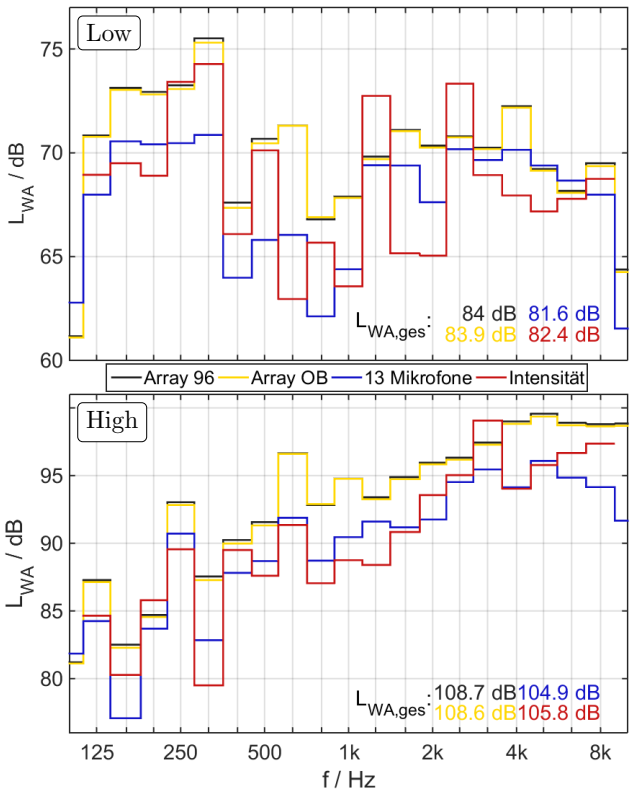

Abbildung 6: Vergleich der Schallleistungspegelspektren berechnet nach Hüllflächenverfahren (ISO 3744, 13 Messpositionen), Intensitätsverfahren (ISO 9614-2), Array-Mittelung (96 Messpositionen) und orthogonalem Beamforming.

forming erzeugte Spektrum. Für den folgenden Vergleich der verschiedenen Messmethoden wird die Mittelung über fünf Hauptmikrofone nicht weiter betrachtet.

Die drei ausgewählten Verfahren sind zusammen mit dem aus der Schallintensität berechneten Schallleistungspegel in Abbildung 6 gezeigt. Die Schallleistungsspektren der beiden Arraymethoden zur Bestimmung der Schallleistung liegen im Wesentlichen über denen aus der Messung mit Schallpegelmesser bzw. Intensitätssonde. Auffällig sind die Ausschläge der Pegelwerte aus der Intensitätsmessung gegenüber denen des Hüllflächenverfahrens. Tendenziell sind die Verläufe aber sehr ähnlich und die über das Frequenzband aufsummierten Gesamtschallleistungspegel liegen nah beieinander, etwa 3 dB unter den Gesamtpegeln der Arraymethoden. Im „Low“-Betrieb weisen die Kurven große Abweichungen voneinander auf, während bei hoher Drehzahl („High“) große Ähnlichkeit vorliegt. Den vom Hersteller angegeben Schallleistungspegel von 103 dB überschreiten alle Messverfahren im „High“-Betrieb deutlich.

Bei der Verwendung von Mikrofonarrays besteht neben der Berechnung von Schalllleistungsspektren die Möglichkeit, dreidimensionale Kartierungen der Schallentstehung („akustische Fotografie“) durch gezieltes Fokussieren zu erstellen. Durch Anwendung des orthogonalen Beamformings ergibt sich die in Abbildung 7 gezeigte Kartierung für zwei Betriebszustände in den drei Terzbändern mit den Mittenfrequenzen 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz.

Außerdem kann durch Integration über dreidimensionale Teilgebiete die in diesem Bereich entstandene Schallleistung quantifiziert werden. Unter Anwendung des orthogonalen Beamformings ist dies für die erwarteten Hauptschallquellen Abgasauslass, Ansaugfilter, Tank, Gehäuse und Pumpe in Abbildung 8 geschehen. Die akustischen Fotografien belegen die in Abbildung 8 dargestellten Verläufe mit dem Abgasgeräusch als wesentliche Hauptschallquelle der Maschine.

Zusammenfassung

Gegenstand der Untersuchung war die Bestimmung der Schallleistung einer benzinbetriebenen Wasserpumpe mit Schallpegelmesser, Intensitätssonde und Mikrofonarray. Die Schallentstehung der Wasserpumpe hängt stark von der eingestellten Drehzahl ab, wobei die Schallleistung mit steigender Drehzahl zunimmt.

Die Messung mit dem Schallpegelmesser gestaltet sich sehr einfach in der Handhabung und liefert schnell die gewünschten Schallpegelmesswerte zur Berechnung der Schallleistung. Besonders unter Anwendung der ISO 3746 mit fünf Mikrofonpositionen ist innerhalb kürzester Zeit eine Aussage über den Schallleistungspegel und dessen spektralen Verlauf möglich. Dieses Verfahren bietet sich daher als Werkzeug für Voruntersuchungen, Kontrollmessungen und den Alltag des Akustikingenieurs an. Aussagen zur Richtung der Schallabstrahlung und die Identifikation von Einzelschallquellen sind nicht möglich.

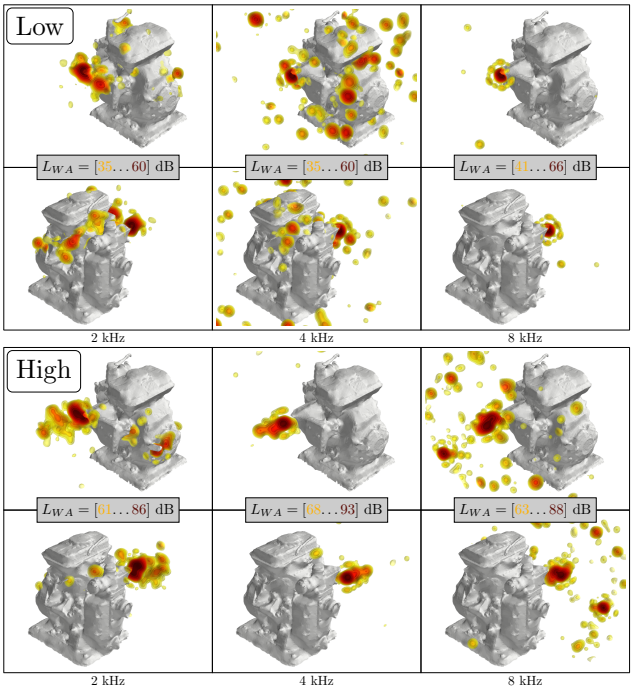

Abbildung 7: Mittels orthogonalem Beamforming erstellte akustische Fotografie der Schallentstehung in Terzbändern mit 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz als Mittenfrequenzen. Dreidimensionale Darstellung der Wasserpumpe aus je zwei Perspektiven. Für den Dynamikumfang von 25 dB sind jeweils die kleinsten und größten abgebildeten Schallleistungspegel eingetragen.

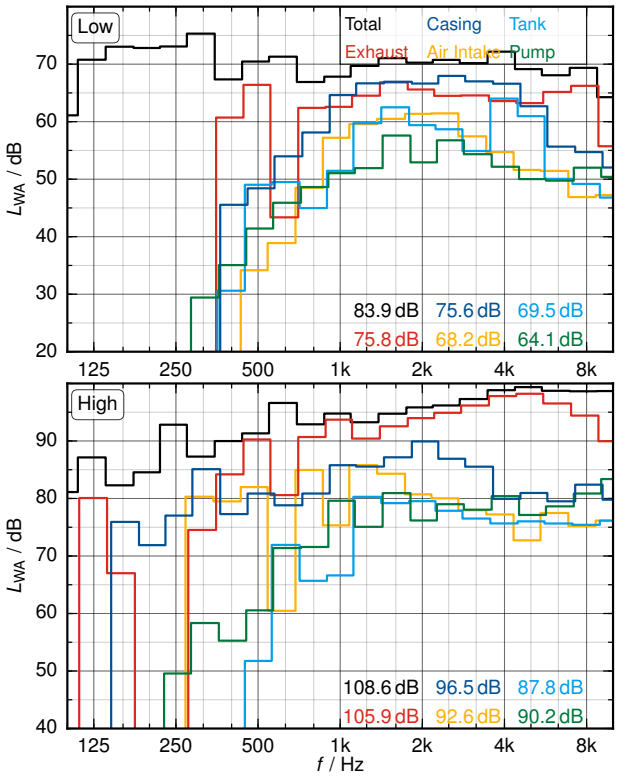

Abbildung 8: Schallleistungspegel einzelner Entstehungsorte (Abgasauslass, Ansaugfilter, Tank, Gehäuse und Pumpe) und gesamter Schallleistungspegelverlauf mittels orthogonalem Beamforming erstellt.

Durch Nutzung eines zweiten Schallsensors, z.B. mit einer Intensitätssonde, erhält man neben dem Betrag zusätzlich die Richtung der Schallwelle für jedes Frequenzband. Besonders unter Einwirkung von Fremdschall und bei der Notwendigkeit, nah an dem Messobjekt zu messen, ist die Intensitätsmessmethode vorteilhaft. Dabei können Teilschallquellen schnell durch manuelle Suche identifiziert werden.

Die weitere Erhöhung der Mikrofonanzahl führt zu einem Mikrofonarray. Dieses ermöglicht die Ortung von Schallquellen und die Bestimmung der von diesesn emittierten Schallleistung. Ist das Mikrofonarray am Messort installiert, gestaltet sich die Handhabung einfach und die Dauer einer Messkampagne ist wegen der simultanen Messung an allen Messorten sehr gering. Das Messobjekt muss dabei aber auf die Arraygröße passen und der Transport eines dreidimensionalen Arrays ist wegen Größe und Gewicht nur unzureichend möglich. Bei festinstallierten Anlagen, wie z.B. an Prüfständen, sind dies jedoch keine Nachteile.

Zusammenfassend können jeder der vorgestellten Methoden sowohl Vor- als auch Nachteile zugeschrieben werden. Daher muss die Auswahl des passenden Messverfahrens und zugehörigen Instrumentariums situationsabhängig erfolgen. Der geringe Messaufwand sowie die Möglichkeit zur Identifizierung von Teilschallquellen stellen die Messung mit Mikrofonarrays als das geeignetste Mittel vor.

Literatur

[1] Markus, P.: Vergleich verschiedener Methoden zur Schallleistungsbestimmung von Maschinenkomponenten. Bachelorarbeit, Lehrstuhl Technische Akustik, BTU Cottbus-Senftenberg, 2016

[2] DIN EN ISO 3746: Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene. 2011

[3] DIN EN ISO 3744: Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene. 2011

[4] DIN EN ISO 9614-2: Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen – Teil 2: Messung mit kontinuierlicher Abtastung. 1996

[5] Herold, G.; Geyer, T.; Markus, P.; Sarradj, E.: Simultaneous Sound Power Measurement of Engine Components. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems 9(3):974-979, 2016

[6] Sarradj, E.: A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements. Journal of Sound and Vibration, Vol. 329, pp. 1553-1569, 2010