

Schallortung an Motorprüfständen über Grad-Kurbelwinkel

Philipp Grams¹, Dejan Arsic¹, Hugo Fastl²

¹ Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, 82152 Planegg, Deutschland, Email: PGrams@muellerbbm-vas.de

² Technische Universität München, 80333 München, Deutschland, Email: hugo.fastl@tum.de

Einleitung

Der Einsatz von Beamforming als Schallortungsverfahren erfolgt häufig im Bereich von akustischen Motorprüfständen. Ein Motorprüfstand dient dazu, einen Motor außerhalb seines normalen Einsatzumfeldes zu untersuchen. Um störende Reflexionen zu vermeiden, sind akustische Motorprüfstände als reflexionsarme Räume realisiert, in denen der Motor in verschiedenen Drehzahl- und Lastzustandsbereichen gefahren werden kann. Eine Schallortungsaufgabe besteht darin, störende und ungewöhnliche Geräusche zu bestimmen und zu lokalisieren, um entsprechende Maßnahmen einleiten zu können. Da es sich bei einem Motor um ein drehendes System handelt, sind viele entstehende Schalle und damit auch die Schallquellen abhängig von der Winkelstellung der Kurbelwelle [1]. Die Schallortung am Motorprüfstand soll dahingehend optimiert werden, dass diese für bestimmte Winkelbereiche oder sogar diskrete Winkelstellungen möglich gemacht wird, um Schallquellen unabhängig von der momentanen Drehzahl bewerten zu können. Ein weiterer Vorteil besteht in der einfacheren Zuordnung von Schallquellen zu ihrer Winkelstellung als zu ihrer absoluten Zeit in einem drehenden System.

Versuchsaufbau

Für die Messung wurde ein Vierzylinder Dieselmotor in einem reflexionsarmen Raum aufgebaut. Da die maximalen Abmessungen des Arrays $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ betragen sollen, um dem begrenzten Platzangebot eines Motorprüfstandes gerecht zu werden, ist die untere Grenzfrequenz auf 500 Hz festgesetzt [2]. Um innerhalb dieser Grenzen Nebenkeulenstrukturen zu minimieren und kontinuierlich alle Frequenzen abzudecken, wurde eine Spirale mit fünf Armen eingesetzt. 36 Mikrofone wurden auf den Armen mit logarithmisch wachsendem Abstand angebracht. Die Anzahl wurde auf 36 Mikrofone begrenzt, um einerseits die teure Sensorik zu berücksichtigen, andererseits dennoch einen ausreichenden Frequenzbereich abzudecken. Die obere Grenzfrequenz des Arrays berechnet sich, ähnlich dem Abtasttheorem im Frequenzbereich, durch ein räumliches Abtasttheorem. Sie ist mittels $d_{\min} < \frac{\lambda_{\min}}{2}$ zu 5000 Hz festgesetzt [3]. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 zu erkennen. Ein Drehzahlsensor wurde zur Bestimmung der aktuellen Winkelstellung eingesetzt. Dieser wurde so angebracht, dass er pro Drehung der Kurbelwelle um 3° eine Drehzahlflanke ausgibt. Das entspricht 120 Impulsen, die pro Umdrehung der Kurbelwelle erfolgen. Ein weiterer Drehzahlsensor wurde verwendet, um den Beginn eines Arbeitsspieles zu erkennen. Ein Arbeits-

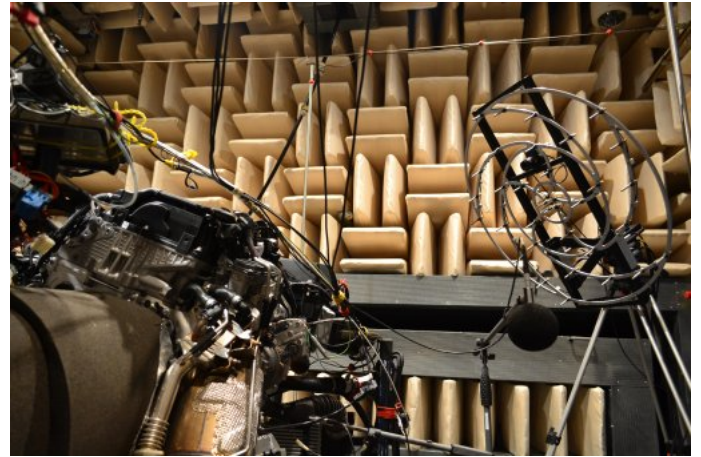


Abbildung 1: Versuchsaufbau

spiel bezeichnet die Periode, nach der sich alle Vorgänge des Motors wiederholen. Diese Drehzahlflanke lag immer dann an, wenn der vierte Zylinder seinen oberen Totpunkt erreichte. Das Signal dieses Sensors wird im Folgenden als *Zünd-OT* bezeichnet.

Algorithmus

Im Folgenden werden die Schalldruckdaten der Mikrofone als $p_m(t)$ bezeichnet. Die einzelnen Gitterpunkte der Schallortungsebene werden als n referenziert. Um mittels der Verzögerung der einzelnen Mikrofonensignale einen Gitterpunkt n zu fokussieren, muss die Laufzeit der Schallwellen vom entsprechenden Gitterpunkt zu jedem Mikrofon ausgerechnet werden. Die Laufzeit Δt_{nm} von Gitterpunkt n zu Mikrofon m beträgt dabei

$$\Delta t_{nm} = \frac{\Delta r_{nm}}{c_0}$$

Δr_{nm} stellt den Abstand von Gitterpunkt n zu Mikrofon m dar. Ein Schalldrucksignal für diesen Gitterpunkt $p_n(t)$ erhält man nach folgender Formel:

$$p_n(t) = \frac{\sum_m (p_m(t - \Delta t_{nm}))}{m_0}$$

Hierbei handelt es sich nicht um absolute Schalldruckwerte, sondern um Schalldruckwerte, welche die Pegeländerung relativ zu den Werten der Schallkarte darstellen [4]. Ein entscheidender Faktor für die Weiterverarbeitung der Daten mittels der Grad-Kurbelwinkel Analyse ist die absolute Verzögerung der Mikrofondaten. Um Delay-and-Sum-Beamforming durchzuführen, wäre es ausreichend, die Daten um ihren Unterschied in der Laufzeit vom fokussierten Gitterpunkt zu den

Mikrofonen zu verzögern. Allerdings sollen die Daten in einem weiteren Schritt auf ein Drehzahlsignal bezogen werden. Da das Drehzahlsignal instantan vorliegt, darf die absolute Laufzeit nicht vernachlässigt werden. Nach der Durchführung dieser Schritte liegt für jeden Abtastpunkt n ein Schalldrucksignal synchron zum Drehzahlsignal vor. Um einen bestimmten Frequenzbereich auszuwählen, der analysiert werden soll, wäre es nun möglich, diese Zeitdaten mit einem entsprechenden Bandpass zu filtern. Um die Schalldrücke im Zeitbereich nun in den Winkelbereich zu überführen, wird eine Grad-Kurbelwinkel-Analyse (GradKW-Analyse) angewandt. Diese ist bei rotierenden Systemen besonders sinnvoll, um winkelabhängige Größen besser erkennen, verstehen und einschätzen zu können[1]. Diese Analyse erfolgt mittels den im Abschnitt Versuchsaufbau definierten Drehzahl-Signalen. Nach der Grad-KW Analyse liegen die Schalldruckdaten im Winkelbereich für jeden einzelnen Gitterpunkt n vor. Abbildung 2 zeigt den Al-

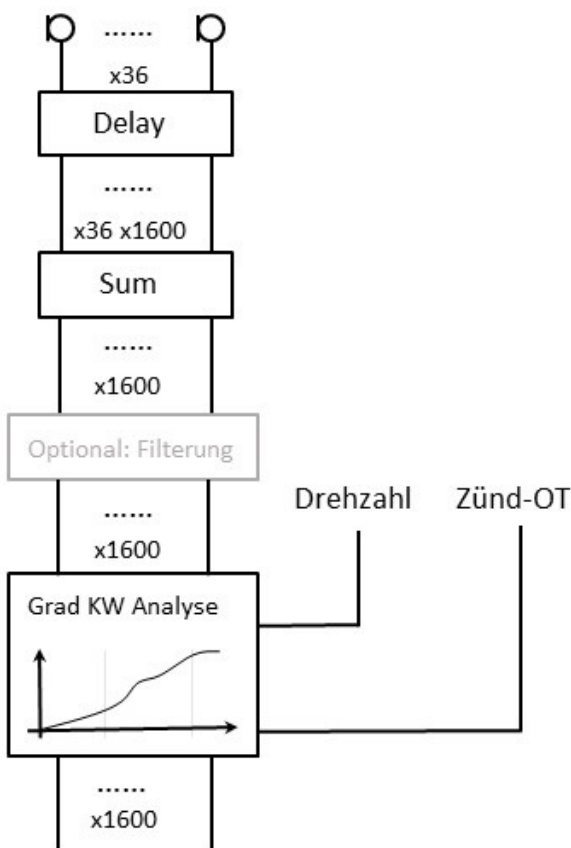


Abbildung 2: Grafische Darstellung des Algorithmus

gorithmus für 36 Mikrofone im Array, die eine Schallortungsebene mit 40×40 - also 1600 Gitterpunkten - abtasten.

Auswertung

In Abbildung 3 ist der Schalldruck im Winkelbereich eines Arbeitsspielles gemittelt über alle Arbeitsspiele aufgetragen. Deutlich zu erkennen sind vier Maxima, die für jedes Arbeitsspiel im selben Winkelbereich auftreten. Bei diesen Maxima handelt es sich um die Explosionen

in den vier Zylindern. Da diese impulshafte, breitbandige Schalle darstellen, wird die optionale Filterung nicht angewandt, der Frequenzbereich der Schallortung ergibt sich somit aus den für das Array bekannten Grenzen.

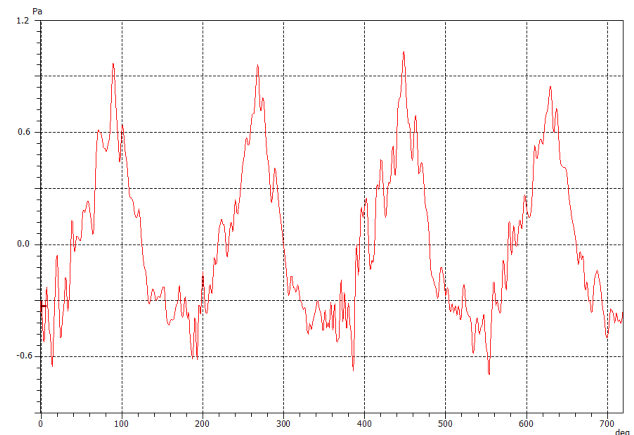


Abbildung 3: Schalldruck im Winkelbereich gemittelt über alle Arbeitsspiele

Das Ergebnis der Schallortung für den Winkelbereich zwischen 265° und 271° ist in Abbildung 4 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass dem zweiten Maximum

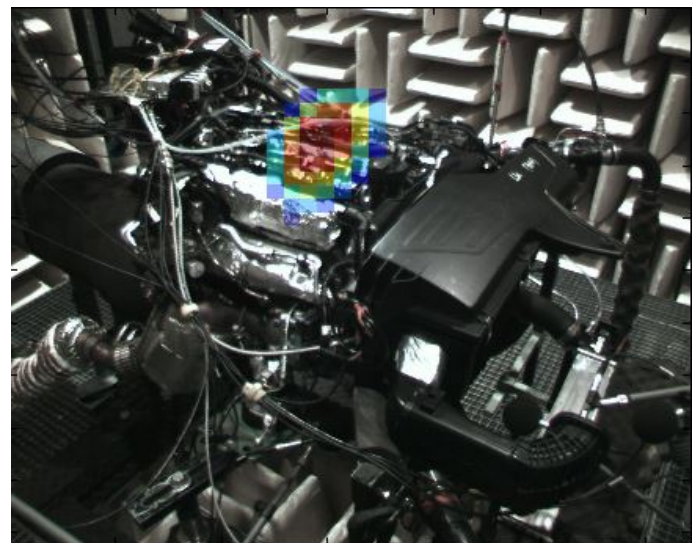


Abbildung 4: Schallortung für den Winkelbereich 265° - 271° (Zylinder 3), dargestellter Dynamikbereich: 1 dB

der dritte Zylinder zugeordnet werden kann. Ein weiterer Vorteil der Schallortung über die Winkelstellung ist die Ortung einer Schallquelle und ihre Zuordnung zu einem Winkelbereich, der für bestimmte spektrale Komponenten im abgestrahlten Schall verantwortlich ist. Ist eine solche Komponente zu erkennen, so können die Schalldrucksignale, die für jeden Gitterpunkt vorliegen, vor dem Übersetzen in den Winkelbereich gefiltert werden. Nachdem die gefilterten Signale für alle Gitterpunkte winkelabhängig dargestellt wurden, kann der Winkelbereich erkannt werden, der für diese Komponente verant-

wortlich ist. Die Erstellung einer Schallkarte für eben diesen Bereich liefert Aufschluss über die Schallquelle. Abbildung 5 zeigt die Schallkarte für eine Schallquelle, die maßgeblich für eine spektrale Komponente bei 4 kHz verantwortlich ist. Besonders bemerkenswert ist hierbei,

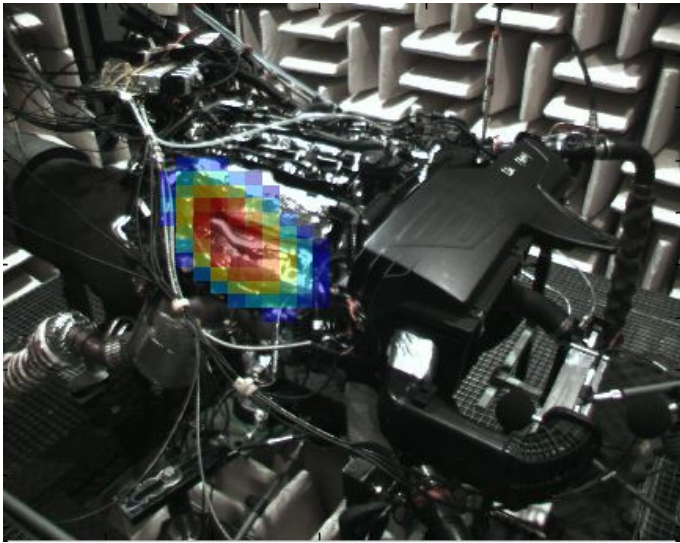


Abbildung 5: Schallortung für 4 kHz , 1 dB Dynamik

dass dieses Bauteil zwischen 20° und 40° vor jedem Maximum im Schalldruckpegel geortet werden kann. Dies lässt auf den Zusammenhang zu Vorgängen, die mit allen vier Zylindern zu tun haben, schließen.

Zusammenfassung

Die Schallortung an einem akustischen Motorprüfstand wurde dahingehend optimiert, dass die Lokalisation von Schallquellen im Winkelbereich ermöglicht wurde. Da die bei Motoren auftretenden Schallquellen und ihre Schallabstrahlung meist winkelabhängige Phänomene sind, ist dieses Verfahren hier besonders sinnvoll. Es beruht auf einem Delay-and-Sum Algorithmus im Zeitbereich und der Grad-Kurbelwinkel Analyse, die außerhalb der Schallortung eine Interpretation winkelabhängiger Signale bei drehenden Systemen zulässt. Mit Hilfe dieser Studie wurde dieses Verfahren nun auch für die Schallquellenlokalisierung nutzbar gemacht.

Literatur

- [1] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Springer-Verlag, Berlin, 2009
- [2] Michel, U.: Schallquellenlokalisierung (Schlussbericht). Forschungsbericht, Forschungsverband Leiser Verkehr, 2003
- [3] Dmochowski, J., Benetsy, J, Affes, S.: On Spatial Aliasing in Microphone Arrays, IEEE Transactions on Signal Processing 57, 1383-1395, 2009
- [4] Brandenstein, M., Ward, D.: Microphone Arrays - Signal Processing Techniques and Applications. Springer-Verlag, Berlin, 2001