

# Untersuchung von Motorengeräuschen mit Hilfe von Kurzzeitanalysen im Winkelbereich

Dejan Arsić<sup>1</sup>, Matthias Pohl<sup>1</sup>, Steffen Tröbst<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: [darsic@muellerbbm-vas.de](mailto:darsic@muellerbbm-vas.de),  
[mpohl@muellerbbm-vas.de](mailto:mpohl@muellerbbm-vas.de),

<sup>2</sup> MAN SE, 90441 Nürnberg, E-Mail: [steffen.troebst@man.eu](mailto:steffen.troebst@man.eu)

## Einleitung

Die Quelle Verbrennungsmotor beeinflusst sowohl das Geräusch im Innenraum als auch das Außengeräusch eines Fahrzeugs maßgeblich. Wie bereits hinlänglich in der Fachpresse diskutiert wurde, korrespondieren hierbei die Geräuschregungen mit der Drehzahl primärer und sekundärer Motorkomponenten. Für bestimmte Frequenzbereiche kann außerdem auf typischerweise abstrahlende Baugruppen des Motors rückgeschlossen werden.

Diese Phänomene werden gewöhnlich mittels standardisierter Frequenz- und Rotationsanalysen untersucht. Für das sehr kurze Ereignis einer einzelnen Verbrennung sind diese jedoch wenig geeignet, da der Zielkonflikt zwischen hoher zeitlicher und ausreichender Frequenzauflösung hier voll zum Tragen kommt. Um die Anregungsmechanismen besser zu verstehen, erscheint es daher sinnvoll, das Einzelereignis „Verbrennung“ mittels sogenannter Kurzzeitanalysen genauer zu untersuchen. Verfahren, wie Wavelet-Analysen oder eine FFT mit Zero-Padding, bieten sich hierfür an. Dabei kann eine gute Trennung der für das Geräusch entscheidenden Frequenzbereiche bei einer hohen zeitlichen Auflösung realisiert werden.

Stand der Technik ist ebenfalls die Analyse von dynamischen Daten im Winkelbereich. Mittels der Grad-Kurbelwinkelanalyse können zwar die Anregungsmechanismen klar getrennt werden, jedoch fehlt dieser Betrachtung jegliche Frequenzinformation. Eine Kombination beider Betrachtungsweisen, sprich eine Darstellung von Pegel über Grad-Kurbelwinkel und Frequenz, scheint für die Erhöhung des Systemverständnisses sinnvoll zu sein. [1]

## Vorgehen

Um die Aussagekraft der einzelnen Analysemethoden zu bewerten, wurden für diese Arbeit ausgewählte Kurzzeitanalysen für einen bekannten Motor gegenübergestellt: FFT mit Zero-Padding, Digitale n-tel Oktavfilter, Laplace-Wavelet, Morlet-Wavelet, Wigner-Ville und Choi-Williams-Verteilung.

In einer ersten Evaluierung wurde dabei festgestellt, dass für ungefilterte Zeitrohdaten die Wigner-Ville und Choi-Williams-Verteilung wegen der auftretenden Kreuzterme für die Analyse einer einzelnen Verbrennung schwer interpretierbare Ergebnisse liefern. Die Analyse mittels 24-tel

Oktaven unterliegt durch ein Filtern im Zeitbereich nicht den Restriktionen einer FFT. Sie liefert theoretisch eine gute Frequenzauflösung bei möglicher hoher zeitlicher Auflösung. Jedoch schwimmt die zeitliche Zuordnung der Ereignisse für die einzelnen Terzmittenfrequenzen aufgrund der Einschwingzeit für die digitalen Terzfilter, so dass in der Praxis keine eindeutige Quellbestimmung bei definierten Winkelstellungen möglich ist. Die FFT-Analyse mit Zero-Padding und die Wavelet-Analysen hingegen scheinen die Textur des Verbrennungsgeräuschs in den bestimmenden Frequenzbereichen, als auch in der Kürze der einzelnen Teilereignisse, gut abzubilden.

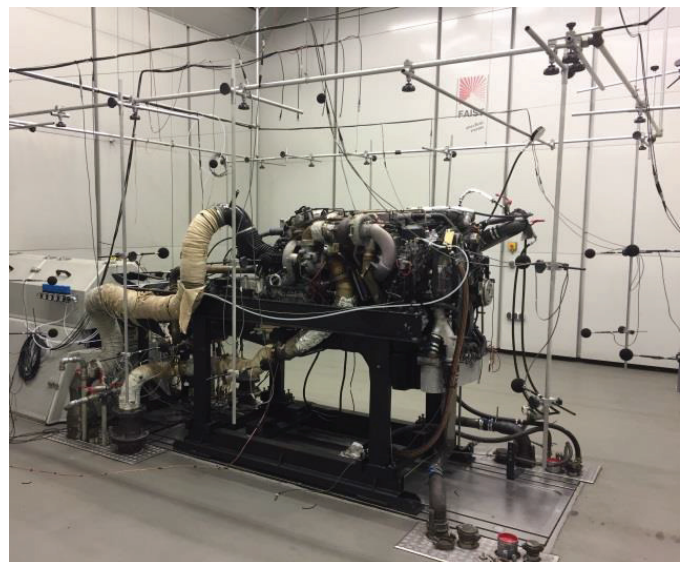


Abbildung 1 Versuchsmotor am Akustikprüfstand

## Versuchsdurchführung

Die Daten wurden an einem Serien-Nutzfahrzeugmotor auf einem Akustikmotorprüfstand erhoben. Dabei konnten die Steuerparameter des Motors, der im Teillastbereich mit geringer Drehzahl betrieben wurde, variiert werden. Die dynamischen Daten der Beschleunigungsaufnehmer, Mikrofone und Drehzahlsensoren wurden mit dem PAK-System erfasst, mit den jeweiligen Analysen ausgewertet und dabei mit einer 0.1 Grad-Auflösung über dem Kurbelwinkel aufgetragen.

## FFT mit Zero-Padding

Durch Zero-Padding wird eine feinere Frequenzauflösung unter Beibehaltung des ursprünglich gewählten Analyse-Zeitrohdaten-Intervalls erreicht. Diesem Zeitintervall werden Abtastwerte mit der Amplitude 0 beigefügt. Mit einem Zero-Padding-Faktor von 64 und einem ursprünglichen Zeitintervall von 128 Abtastwerten entsteht ein Analyse-Intervall von  $128 + (64 - 1) \cdot 128$  Nullwerten = 8192 Abtastwerten. Im Frequenzbereich wird dadurch eine 64-fach feinere Auflösung erreicht.

## Wavelet-Transformation

Die Wavelet-Transformation nutzt zeitlich begrenzte und variable Basisfunktionen, sogenannte Wavelets. Bei niedrigen Frequenzen werden zeitlich lange Wavelets verwendet. Dies führt zu einer guten Frequenzauflösung bei gleichzeitig geringerer Zeitauflösung im niedrigen Frequenzbereich. Bei hohen Frequenzen werden kurze Wavelets verwendet, was zu einer guten Zeitauflösung bei gleichzeitig geringerer Frequenzauflösung führt.

In Abbildung 2 ist dieses reziproke Verhalten von Frequenz- und Zeitauflösung durch die Rechtecke symbolisiert, in denen jeweils ein Morlet-Wavelet abgebildet ist.

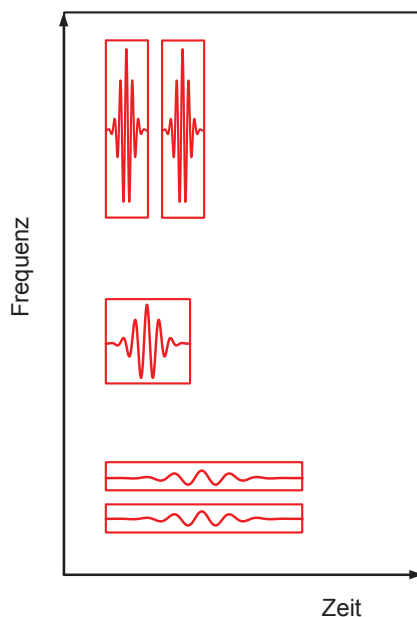


Abbildung 2: Zeit-Frequenz-Ebene der Wavelet-Transformation.

Die Wavelet-Transformation ist wie die Fourier-Transformation eine Integral-Transformation und kann als Projektion (Skalar-Produkt) des zu analysierenden Signals  $x(t)$  auf das frequenzabhängig mit Faktor  $a$  skalierte und zeitlich mit  $b$  verschobene Wavelet  $\Psi_{(a,b)}(t)$  verstanden werden:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Dies hat u. a. die Konsequenz, dass die Werteachse des Spektrums, wie bei der Fourier-Transformation, dieselbe Messgröße wie das Zeitsignal besitzt. Für die Wavelet-Transformation stehen verschiedene Mutter-Wavelets zur Verfügung, die für unterschiedliche Anwendungen entwickelt

wurden. In der vorliegenden Untersuchung wurden für einen Vergleich ein Morlet- und ein Laplace-Wavelet verwendet. [2][3]

## Ergebnisse

Die Verbrennung induziert eine breitbandig strukturierte Anregung. Die daraus resultierende Geräuschreaktion zeigt sich daher in allen Frequenzbereichen. Das Morlet-Wavelet bildet das Verbrennungsgeräusch subjektiv am besten ab.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen einen beispielhaften Arbeitspunkt und das Verbrennungsgeräusch mittels FFT- und Wavelet-Transformation.

Für das Morlet-Wavelet lassen sich für den Kernbereich des direkten Verbrennungsgeräuschs zwischen 1000 Hz-3000 Hz und das indirekte Verbrennungsgeräusch zwischen 100 und 1500 Hz sehr gut einzelne, pegelbestimmende Bereiche separieren (siehe Abbildung 5).

Im Bereich zwischen 100 und 500 Hz sind die Biege- und Torsionsmoden des Motor-Getriebe-Verbandes zu finden und für die Schall-Abstrahlung relevant. Darüber hinaus ist bis 1500 Hz die Abstrahlung von Teilflächen und Anbauteilen dominant. Auch im mittleren Frequenzbereich von 3000 Hz bis 8000 Hz, in dem sich bei harter Verbrennung direkte und indirekte Geräuschanteile überlagern, werden durch das Morlet-Wavelet mit stimmigen Pegelwerten und guter Trennung in Frequenz und Zeit dargestellt. Die FFT-Analyse mit Zero-Padding schafft es erst ab diesem mittleren Frequenzbereich die Information im Vergleich zu einer klassischen FFT mit kurzer Blocklänge zu erhöhen (siehe Abbildung 4).

Das Laplace-Wavelet liefert ähnlich gute Ergebnisse wie das Morlet-Wavelet, jedoch scheinen im Vergleich zu den anderen betrachteten Analysetypen, über den gesamten Frequenzbereich die Amplitudenwerte des Schalldrucks etwas geringer (Abbildungen 4 und 5).

Über die Anregung aus dem über das Motorgehäuse wandernden Körperschalls wird im mittleren als auch im hohen Frequenzbereich die Abstrahlung von kleineren leichten Bauteilen angeregt und über einzelner Anbauteile und Teilflächen der Motor-Oberflächenstruktur abgestrahlt.

Ab einer Frequenz von 8 kHz strahlt der Motor den Schall zum einen über sehr kleine und dünne Segmente einzelner Bauteile ab; zum anderen fungieren extrem kleine Bauteile, welche eine Fußpunktanregung erfahren, wie beispielsweise Halter und Klammern, als abstrahlende Elemente. Sie schwingen in einer Starkörperbewegung und geben den Schall vergleichbar mit einem Kalotten-Lautsprecher ab. Diese hochfrequenten Signalanteile lassen sich sowohl mit den beiden verwendeten FFT-Algorithmen und extrem kurzer Blocklänge, als auch mittels der beiden genutzten Wavelets gut abbilden.

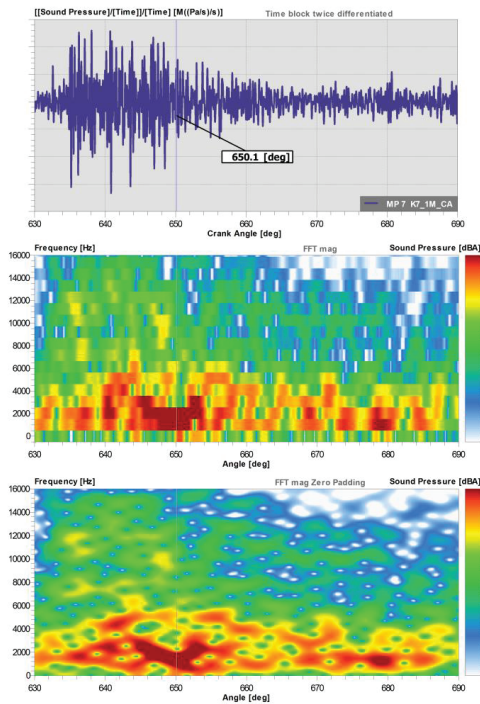


Abbildung 4 Rohdaten, FFT und FFT mit Zero-Padding.

Das Morlet-Wavelet bildet über den gesamten geräuschrelevanten Frequenzbereich die Textur des Verbrennungsgeräusches am besten ab. Darüber hinaus erlaubt es einen qualitativen Vergleich einzelner Messpunkte an unterschiedlichen Quellen des Motors (siehe Abbildung 6). Die unterschiedliche Textur im Vergleich der beiden Messpunkte verdeutlicht, dass mit dem Verfahren klar trennbare, eindeutige Vergleiche in der Entwicklung des Verbrennungsgeräusches möglich sind. So ließe sich beispielsweise bei der Voreinspritzvariation der Einfluss der sich ändernde Ganghärte auf das Verbrennungsgeräusch identifizieren.

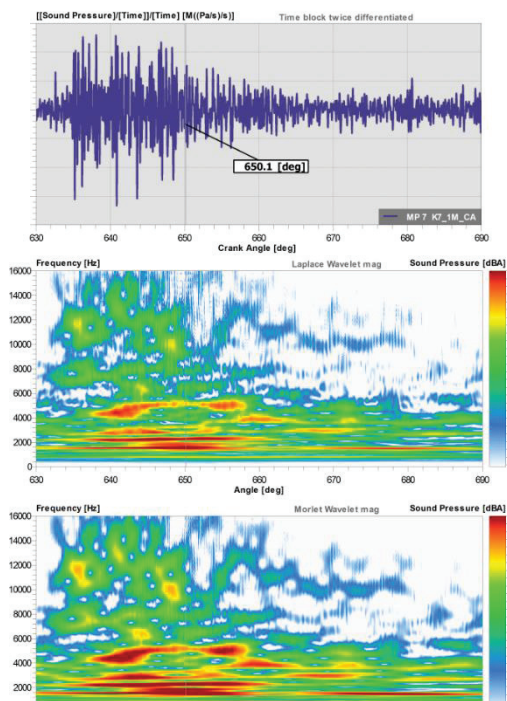


Abbildung 5: Rohdaten, Laplace- und Morlet-Wavelet.

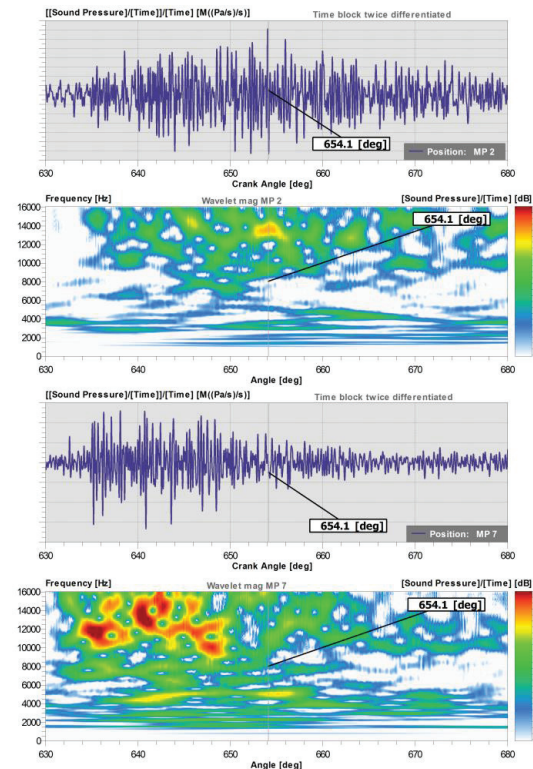


Abbildung 3 Messpunktvergleich Morlet-Wavelet.

## Zusammenfassung

Eine Darstellung des Verbrennungsgeräusches ausgewählter Kurzeitanalysen im Grad-Kurbel-Winkelbereich liefert qualitativ eine umfassendere Aussage, als eine klassische FFT-Analyse oder eine herkömmliche Grad-Kurbelwinkel-Analyse. Dem Motor-Akustiker steht damit ein Werkzeug zur Verfügung, welches die komplexen Zusammenhänge bezüglich der Anregungsmechanismen und der maßgeblich beteiligten Frequenzbereiche im Signal darstellbar macht.

Die variablen Basisfunktionen der Wavelets lösen für die betrachteten Analysen, simultan die tieffrequenten Moden, das hoch strukturierte Verbrennungsgeräusch im mittleren Frequenzbereich sowie die zeitlich sehr lokalen Abstrahlungen leichter Bauteile bei hohen Frequenzen am besten auf.

## Literatur

- [1] Hrdina, D. Untersuchung des Schwingungs- und Geräuschverhaltens des Kurbeltriebs eines Verbrennungsmotors. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016
- [2] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer: Digital Signal Processing, Prentice-Hall, 1975.
- [3] U. Kiencke, M. Schwarz, T. Weickert: Signalverarbeitung. Zeit-Frequenz-Analyse und Schätzverfahren, Oldenburg 2008