

# Partielle Analyse und Simulation von Körperschalleitwegen an einem Dieselmotor unter Nutzung neuronaler Algorithmen

Tommy Luft<sup>1</sup>, Wilfried Henze<sup>1</sup>, Karsten Hintz<sup>1</sup>, Helmut Tschöke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Mobile Systeme, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106 Magdeburg,  
E-Mail: tommy.luft@ovgu.de, wilfried.henze@ovgu.de

## Einleitung

Die Geräuschanalyse spielt im Entwicklungsprozess eines Fahrzeuges mittlerweile eine bedeutende Rolle. Ausgehend vom Motor als wesentliche Geräuschquelle bei Kraftfahrzeugen, wird in diesem Beitrag ein 4-Zylinder-Dieselmotor hinsichtlich seiner Körperschalleitwege untersucht. Neben gebräuchlichen signalanalytischen Werkzeugen, wie der Kohärenz, finden neuronale Modelle zur Simulation akustischer Transferpfade im Zeit- und Frequenzbereich Anwendung. Das Ziel der Arbeit ist es, gemessene Brennraumdruckverläufe hinsichtlich ihrer akustischen Auswirkungen zu beurteilen, ohne bei jedem Betriebspunkt aufwändige Körper- und Luftschallmessungen durchführen zu müssen.

## Indirektes Motorgeräusch

Das indirekt erzeugte Motorgeräusch setzt sich aus einem mechanischen Geräuschanteil und dem Verbrennungsgeräusch zusammen. Das mechanische Geräusch ist drehzahlabhängig und wird als lastunabhängig angesehen; zur Bestimmung eignet sich unter anderem der Schleppversuch [1]. Das Verbrennungsgeräusch lässt sich in eine direkte und indirekte Komponente unterteilen. Der direkte Anteil wird durch die Wirkung des Verbrennungsdrucks auf die Motorstruktur verursacht und über den äußeren und inneren Leitweg übertragen [1]. Der innere Leitweg ist mit einem ungefähren Anteil von 75 % dominant [2]. Das indirekte Verbrennungsgeräusch wiederum beinhaltet die zylinderdruckabhängige Stoßanregung von Kolben und Kurbelwelle.

## Motormessungen

Bei Messungen auf dem Akustik-Motorprüfstand wurden die 4 Zylinderdrücke mittels Drucksensoren, der Körperschall mittels Beschleunigungsaufnehmern (BA) auf der Druck- und Gegendruckseite des Zylinderkurbelgehäuses (ZKG) sowie am 5. Kurbelwellenhauptlager und der Luftschall mittels Mikrofonen im Nahfeld jeweils zentral vor den Seitenflächen des ZKG's aufgenommen. Die Aufzeichnung der Zeitrohdaten erfolgte für verschiedene stationäre Betriebspunkte: 4 Lastzustände (Schleppen, Leerlast, 50 Nm und 160 Nm) bei Drehzahlen zwischen 1000 und 4000 min<sup>-1</sup>.

## Einfache und multiple Kohärenzanalyse

Die gewöhnliche Kohärenz ist ein Korrelations- und Linearitätsmaß zwischen zwei Messsignalen. In der Motorakustik interessiert der Zusammenhang zwischen Zylinderdruckanregung  $p$  und diversen Empfangspunkten  $y$ . Diese einfache Kohärenzfunktion lautet

$$\gamma_{py}^2(f) = \frac{|\overline{G_{py}}(f)|}{\sqrt{\overline{G_{pp}}(f) \cdot \overline{G_{yy}}(f)}}, \quad [-] \quad (1)$$

wobei  $G$  die jeweiligen zu mittelnden Kreuz- und Autoleis-

tungsspektren beschreibt. Da die Anregung aus vier gleichartigen Einzelsignalen besteht, welche auf einen gemeinsamen Ausgang wirken, ergibt sich das in Abb. 1 dargestellte „Multiple Input / Single Output“ (MISO) - System [3]. Um den Einfluss aller Zylinderdrücke zu berücksichtigen, sind die Signale im Zeitbereich energetisch zu mitteln oder einer multiplen Kohärenzbetrachtung zu unterziehen.

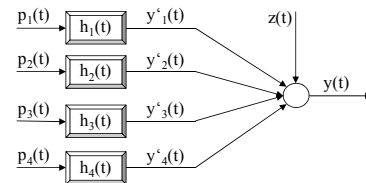


Abbildung 1: MISO-System mit Störgröße  $z(t)$ .

Bei einer zunehmenden Unabhängigkeit der Zylinderdrücke zueinander lautet die multiple Kohärenzfunktion

$$\gamma_{m,py}^2 = \frac{|\overline{H^*} \cdot \overline{G_{pp}} \cdot \overline{H^T}|}{\overline{G_{yy}}}, \quad [-] \quad (2)$$

wobei  $H$  die Übertragungsfunktions-Matrix charakterisiert [2]. Bei den Kohärenzbestimmungen wird die Frequenzauflösung gemäß der Zündfrequenz der entsprechenden Drehzahl festgelegt. Dies entspricht beim Viertaktmotor der halben Motorordnung. In Abb. 2 wird der einfachen Kohärenz, mit einem Zylinderdruck und dem gemittelten Druck, die multiple Kohärenz gegenübergestellt. Da es bei der multiplen Kohärenz signalanalytisch aufwändig ist, Unterordnungen bei der Betrachtung auszuschließen, wodurch u. a. Kohärenzwerte größer 1 entstehen können, genügt für die Analyse der akustischen Pfade die kohärente Beziehung des gemittelten Zylinderdrucks zu einem Empfangspunkt [2].

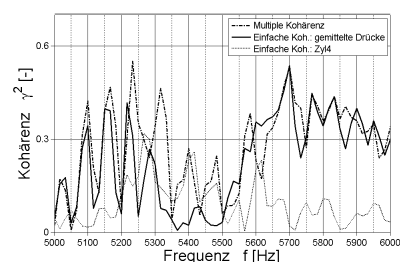
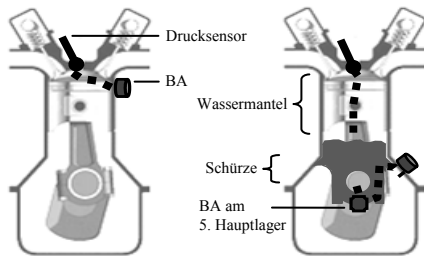


Abbildung 2: Kohärenzvergleich am äußeren Körperschalleitweg (Zylinder 4) bei 2000 min<sup>-1</sup> und 160 Nm.

## Analyse akustischer Transferpfade

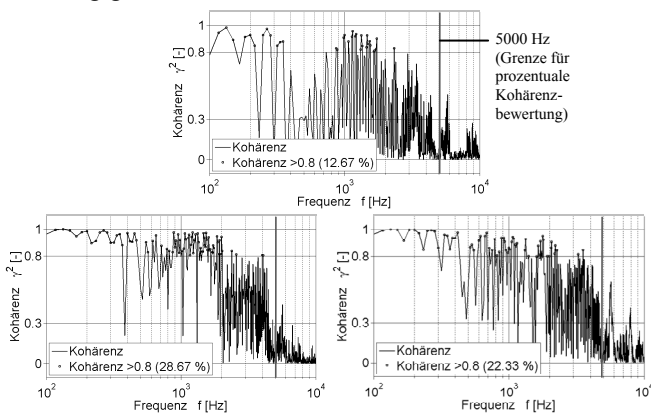
Wie Abb. 3 darstellt, wurde bei den vorliegenden Untersuchungen speziell die Übertragung über den äußeren und inneren Leitweg mithilfe der Kohärenz analysiert. Das direkte Verbrennungsgeräusch zeichnet sich durch ein lineares Übertragungsverhalten aus und ist bei niedrigen und mittleren Lasten aufgrund des hohen Zündverzugs bei Teillasten dominierend [1]. Das indirekte Verbrennungsgeräusch hat durch Stoßvorgänge zwischen den spielbehafteten Teilen

und den vorhandenen Schmierfilmen ein nichtlineares Übertragungsverhalten und nimmt mit der Last stetig zu. Aufgrund des abnehmenden direkten Verbrennungsgeräusches im Hochlastbereich wird das indirekte dominierend [2].



**Abbildung 3:** Äußerer (links) und innerer (rechts) Körperschallleitweg des 4. Zylinders.

Die Kohärenzen aus Abb. 4 belegen den erläuterten Lasteinfluss. Die linearen Anteile ( $\gamma > 0.8$ ) des Verbrennungsgeräusches nehmen im Teillastbereich zu. Bei Annäherung an die Volllast treten die nichtlinearen Anteile stärker hervor. Die Motormessungen zeigten über 5000 Hz betriebspunktunabhängig keine linearen Anteile mehr.



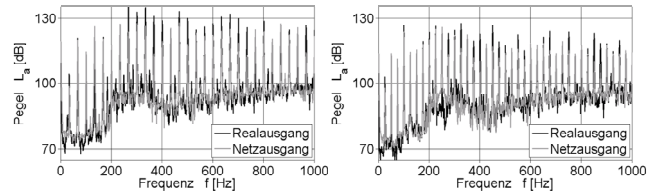
**Abbildung 4:** Kohärenzverläufe des kompletten inneren Leitweges bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  und bei verschiedenen Lasten (oben: Leerlast, unten links:  $50 \text{ Nm}$ , unten rechts:  $160 \text{ Nm}$ ).

Der Einfluss der Drehzahlvariation auf die Motorgeräuschtrennung ist wesentlich komplexer. Generell lässt sich sagen, dass, wie bekannt, bei niedrigen Drehzahlen das gesamte Verbrennungsgeräusch und bei hohen Drehzahlen das mechanische Geräusch als dominant einzustufen ist.

### Simulation von Körperschallleitwegen

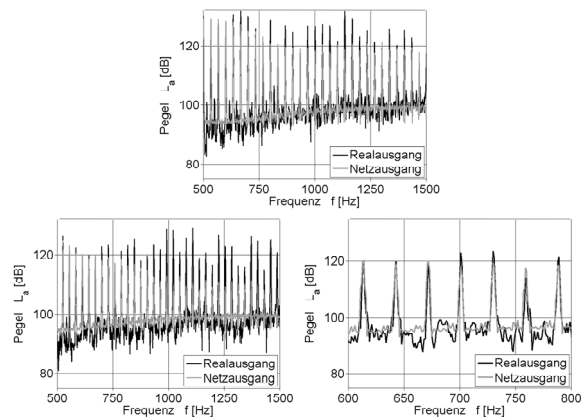
An dieser Stelle wurde exemplarisch die Simulation des direkten Verbrennungsgeräusches (lineare Anteile) am inneren Leitweg vollzogen. Modellgrundlage bilden neuronale Netze, die über experimentelle Daten mithilfe diverser Lernalgorithmen reale Systeme durch Adaption der trainierbaren Parameter (Gewichte) abbilden können [4]. Ein Modell besitzt 4 Eingänge (= Drücke), die durch ein Feedforward-Netz, bestehend aus 3 Schichten und 10 Neuronen, mithilfe der Lernmethode Backpropagation die Beschleunigung  $a$  an der Schürze abbilden sollen. Eine Aufspaltung des inneren Leitweges in zwei Teilpfade ist durch das BA-Signal am 5. Hauptlager möglich. Diese Simulationen wurden im Frequenz- und Zeitbereich durchgeführt und jeweils auf nicht gelernte Drehzahlen angewendet. In Abb. 5 lässt sich die Güte des bei  $4000 \text{ min}^{-1}$  bis  $1000 \text{ Hz}$  im Frequenzbereich gelernten Netzes in der 1. und 2. Verifikationsstufe ableiten. Das Modell bildet die bei  $3000 \text{ min}^{-1}$  gemessene Beschleunigung ab.

Dabei werden Zündfrequenz und Beschleunigungsamplituden mit geringen Abweichungen gut simuliert.



**Abbildung 5:** Modellierung eines Teilpfades (BA-Hauptlager → BA-Schürze) des inneren Leitweges (links: Verifikation mit Lerndaten bei  $4000 \text{ min}^{-1}$  und  $160 \text{ Nm}$ , rechts: Verifikation bei  $3000 \text{ min}^{-1}$  und  $160 \text{ Nm}$ ).

Es zeigte sich, dass für die Simulationen aller stationären Betriebspunkte eine drehzahl- und frequenzbereichsabhängige Modellmatrix erstellt werden muss. Dazu sollte stets bei höherer Drehzahl gelernt werden, um auf niedrigere Drehzahlbetriebspunkte zu schließen. Bis zu einer Drehzahlspanne von  $1000 \text{ min}^{-1}$  und einer Frequenzspanne von  $1500 \text{ Hz}$  erzeugen die entsprechenden Modelle gute Ergebnisse. Die Simulationen auf Grundlage von Zeitbereichsdaten liefern ähnliche Resultate, wobei der analytische Aufwand durch notwendige Filterung und Rückrechnung in den Frequenzbereich größer ist. Abb. 6 zeigt abschließend die Simulationsergebnisse des gesamten inneren Körperschallleitweges. Mithilfe dieser neuronalen Modelle, sind akustische Vorhersagen stationärer Motorbetriebspunkte möglich.



**Abbildung 6:** Modellierung des inneren Leitweges (oben: 1. Verifikationsstufe bei  $4000 \text{ min}^{-1}$ , unten links: 2. Verifikationsstufe bei  $3500 \text{ min}^{-1}$ , unten rechts: Ausschnitt aus 2. Verifikationsstufe).

### Danksagung

Die Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „Competence in MObility“, das vom Land Sachsen-Anhalt u. d. Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstützt wird.

### Literatur

- [1] Heuer, S.: Verbrennungsgeräusch des direkteinspritzenden Hubkolbenmotors. Diss., RWTH Aachen, 2001
- [2] Göhringer, V.: Beitrag zur experimentellen Bestimmung des Strukturübertragungsmaßes von Dieselmotoren. Expert Verlag, Renningen, 2008
- [3] Lee, M.; Bolton, J S.; Suh, S.: Estimation of the combustion-related noise transfer matrix of a multi-cylinder diesel engine. Measurement S. and T. 20 (2009), 13pp
- [4] Scherer, A.: Neuronale Netze - Grundlagen und Anwendungen. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1997