

# Simulation verschiedener akustischer Transferpfade an einem Dieselmotor unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze

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

<sup>1</sup> Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mobile Systeme, 39106 Magdeburg,

E-Mail: karsten.hintz@ovgu.de, tommy.luft@ovgu.de

## Einleitung

Der Analyse akustischer Kenngrößen wird heute bereits im Entwicklungsprozess eines Fahrzeuges große Bedeutung beigemessen. Bezüglich des Motorgeräuschs ist der Verbrennungsvorgang, speziell der Zylinderdruck, die wesentliche Komponente hinsichtlich der Geräusch-anregung. Aktuelle Untersuchungen [1, 2] zielen auf die Entwicklung eines Werkzeugs zur Simulation des Zylinderdrucks mit Hilfe von motorischen Messgrößen bzw. Körperschallsensoren. Ziel dabei ist die Bestimmung von Verbrennungsgrößen ohne die Verwendung von Zylinderdrucksensoren. Dieser Beitrag beschreibt einen Ansatz zur Simulation verschiedener akustischer Transferpfade ausgehend vom Zylinderdruck bzw. von der Oberflächenbeschleunigung bis hin zum Luftschall. Die Umsetzung erfolgt mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen. Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeiten und Grenzen der entwickelten Simulationsansätze auf und bewerten das Potential hinsichtlich einer Messaufwandsreduktion.

## Versuchsaufbau

Ein moderner Akustik-Motorprüfstand, ausgestattet mit schallabsorbierenden Wand- und Deckenverkleidungen, bietet eine optimale Grundlage akustische Untersuchungen bei verschiedenen stationären Betriebspunkten (1000-4000 min<sup>-1</sup>; Schleppen, 50 Nm, 160 Nm) des Versuchsmotors durchzuführen. Als Versuchsmotor diente ein 4-Zylinder Common-Rail-Dieselmotor. Zur Erfassung des Zylinderdrucks wurde der Motor mit einem Indiziersystem ausgerüstet. Zusätzlich wurden der Körper- und Luftschall an verschiedenen Positionen mit Hilfe von Beschleunigungssensoren bzw. Mikrofonen gemessen.

## Modellstruktur und Modelloptimierung

Die Modellgrundlage bilden künstliche neuronale Netze (speziell Feedforward-Netze), bestehend aus einem Eingangs- und Ausgangs-layer, sowie zwei Hidden-Layer mit jeweils 10 Neuronen. Die Modifizierung der Gewichte erfolgt mit dem Backpropagation-Verfahren und dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus [3]. Erste Versuche zeigten, dass eine Erhöhung der Neuronen- oder Layeranzahl im Rahmen dieser Untersuchungen keine signifikanten Verbesserungen, bezüglich der erzielbaren Simulationsergebnisse, lieferten. Eine Simulation im Zeitbereich ist prinzipiell möglich, hat jedoch den Nachteil des hohen analytischen Aufwandes. Zusätzlich können entstehende Amplitudenfehler aufgrund der notwendigen Bandpass-Filterung der Signale nur sehr schwer herausgerechnet werden.

Die Analysen dieser Arbeit beschränken sich daher vorrangig auf die Simulation im Frequenzbereich. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Simulationsergebnisse des Transferpfades vom Kurbelwellenhauptlager zur Schürzenoberfläche für die 1. Verifikationsstufe (Trainingsphase) bei 4000 min<sup>-1</sup>, 160 Nm und die 2. Verifikationsstufe bei 3000 min<sup>-1</sup>, 160 Nm. Trotz des großen Drehzahlsprungs von 1000 min<sup>-1</sup> und somit der Verschiebung der Zündfrequenz um 8,3 Hz wurde eine sehr gute Übereinstimmung erzielt.

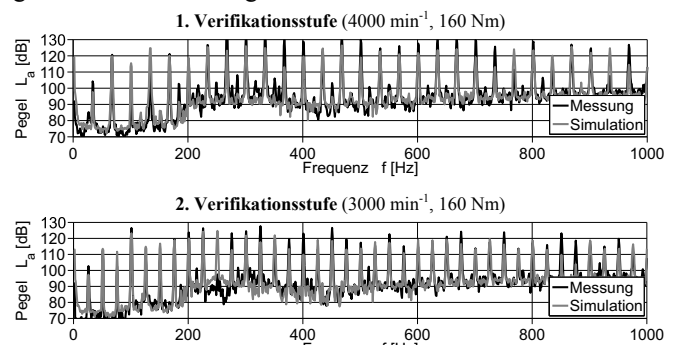


Abbildung 1: Frequenzspektren der gemessenen und simulierten Beschleunigungen.

Bei der Simulation größerer Frequenzbereiche wird das Simulationsergebnis zunehmend ungenauer. In diesem Fall konnten deutlich bessere Simulationserfolge mit der Unterteilung des zu simulierenden Frequenzbereiches in mehrere Teilbereiche erreicht werden. Jeder Frequenzbereich wurde dabei mit einem neuen Netz simuliert. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Simulationsergebnisse des äußeren Körperschalleitweges vom Zylinderdruck zur Oberflächenbeschleunigung für die 1. Verifikationsstufe (Trainingsphase). Zunächst wurde der komplette Frequenzbereich von 0-4000 Hz im Schmalband ( $\Delta f=1$  Hz) mit einem Netz gelernt (Methode 1). Anschließend wurde für jeweils 500 Hz ( $\Delta f=1$  Hz) ein einzelnes Netz verwendet (Methode 2).

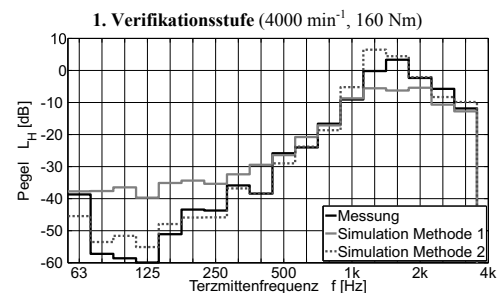


Abbildung 2: Übertragungsfunkt. aus gemessener bzw. simulierter Beschleunigung und gemitteltem Zylinderdruck.

Der vorbeschriebene Netzaufbau und die Frequenzbereichs-Simulation gemäß Methode 2 wurden anschließend auf die Simulation verschiedener Schalltransferpfade angewendet.

## Simulation von Körperschalltransferpfaden

Bei der Simulation des äußeren Körperschallleitweges wurden die vier Zylinderdrucksignale als einzelne Netzeingänge und ein Beschleunigungssignal am Wassermantel als Netzausgang definiert. Für die Berechnung der Übertragungsfunktion wurde anschließend der im Zeitbereich energetisch gemittelte Zylinderdruck aus den vier einzelnen Zylinderdrucksignalen verwendet. Abbildung 3 zeigt in diesem Fall ein gutes Trainingsergebnis (1. Verifikationsstufe). Die Anwendung des Netzes auf eine nicht gelernte Drehzahl (2. Verifikationsstufe) zeigt bei 1000 Hz deutliche Pegelabweichungen.

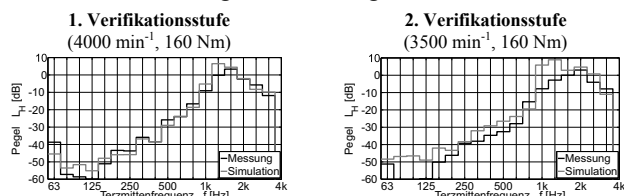


Abbildung 3: Übertragungsfunkt. aus gemessener bzw. simulierter Beschleunigung und gemitteltem Zylinderdruck.

Wird anstelle eines einzelnen Beschleunigungssignals die Mittelung der Beschleunigungsspektren aller Sensoren der Motorseite als Netzausgang definiert, kann das Simulationsergebnis verbessert werden. Abbildung 4 zeigt, dass die Pegelabweichungen bei 1000 Hz aufgrund der Mittelung der Beschleunigungssignale einer Motorseite deutlich geringer ausfallen.

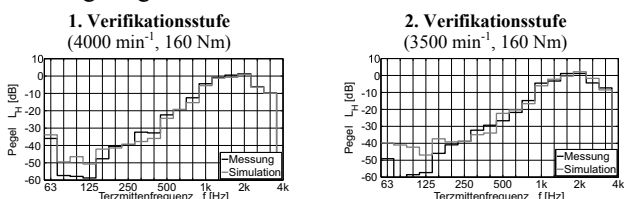


Abbildung 4: Übertragungsfunkt. aus gemessener bzw. simulierter gemittelter Beschleunigung und gemitteltem Zylinderdruck.

## Simulation von Luftschalltransferpfaden

Für die Untersuchung des kompletten Transferpfades vom Zylinderdruck zum Luftschall wurde ein Mikrophon an der Druck- und Gegendruckseite des Motors platziert. Abbildung 5 zeigt einen guten Trainingserfolg (1. Verifikationsstufe) bei 4000 min<sup>-1</sup>. Bei nicht gelernten Motorbetriebspunkten (2. Verifikationsstufe) wird der Frequenzbereich über 400 Hz gut simuliert. Für Frequenzen unter 400 Hz zeigen sich teilweise größere Abweichungen aufgrund der geringeren Anzahl von Zündharmonischen (Vielfachen der Zündfrequenz) pro Terz.

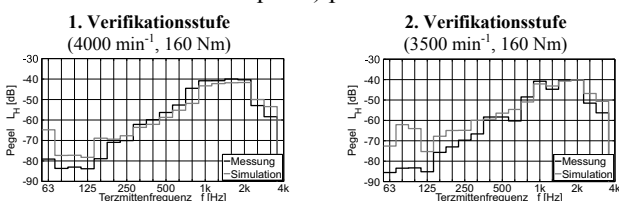


Abbildung 5: Übertragungsfunkt. aus gemessenem bzw. simuliertem Schalldruck und gemitteltem Zylinderdruck.

Zum Vergleich wurde der Transferpfad von der Oberflächenbeschleunigung zum Luftschall mit Hilfe von

acht Netzeingängen (Beschleunigungsspektren) simuliert. Für die Berechnung der Übertragungsfunktion wurden die Beschleunigungssignale im Frequenzbereich arithmetisch gemittelt. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für die Trainingsphase und für einen nicht gelernten Betriebspunkt. Aufgrund des kürzeren Transferpfades und der höheren Informationsdichte in den Beschleunigungssignalen ist das Simulationsergebnis besser als bei der Simulation ausgehend vom Zylinderdruck.

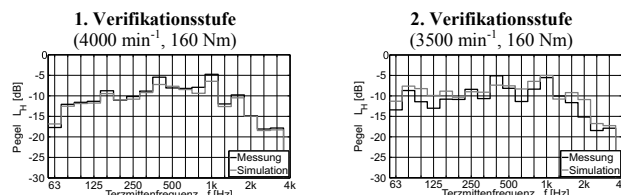


Abbildung 6: Übertragungsfunkt. aus gemessenem bzw. simuliertem Schalldruck und gemittelter Beschleunigung.

Die Schalldruckspektren in Abbildung 7 (links) verdeutlichen das sehr gute Trainingsergebnis für die Simulation des Transferpfades von der Oberflächenbeschleunigung zum Schalldruck bei 4000 min<sup>-1</sup>. Mit Hilfe dieses Netzes wurden alle Drehzahlen von 1000-3500 min<sup>-1</sup> simuliert und anschließend die Summenpegel des simulierten Spektrums mit dem gemessenen verglichen (Abbildung 7 rechts). Bei diesem Transferpfad zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den gemessenen und simulierten Pegeln. Hier können daher die Summenpegel verschiedener Betriebspunkte mit einem einzelnen Netz simuliert werden.

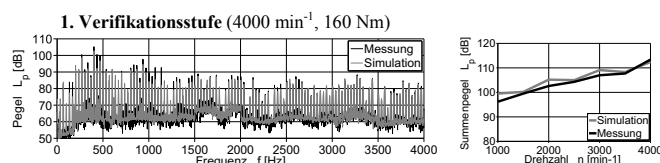


Abbildung 7: Frequenzspektren der gemessenen bzw. simulierten Schalldrücke (links) und Schalldruck-Summenpegel (rechts).

## Danksagung

Die Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „COmpetence in MObility“, das vom Land Sachsen-Anhalt und von dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstützt wird.

## Literatur

- [1] Weymann, H., Dinkelacker, F., Nelles, O.: Neuronales Berechnungsmodell zur Bestimmung des Brennraumdruckverlaufs. Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Dezember 2010, 898-903
- [2] Decker, M.; Hintz, K.; Nobis, J.; Joerres, M.; Gühmann, C.: Geräuschgeregelter Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift (MTZ), März 2011, 226-233
- [3] Rey, G. D.; Wender, K. F.: Neuronale Netze, Einführung in die Grundlagen und Datenauswertung. Hans Huber Verlag, 1990