

AUTOREN



Sebastian Schneider, M. Sc.

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen (EMA) des Instituts für Mobile Systeme (IMS) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.



Dr.-Ing. Jan Hendrik Carstens

war zum Zeitpunkt des Forschungsvorhabens Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Berlin und ist heute bei der W.O.M. World of Medicine GmbH in Berlin tätig.



Dipl.-Ing. Jürgen Nobis

ist tätig im Bereich Software and Algorithms Powertrain and Power Engineering der IAV GmbH in Gifhorn.

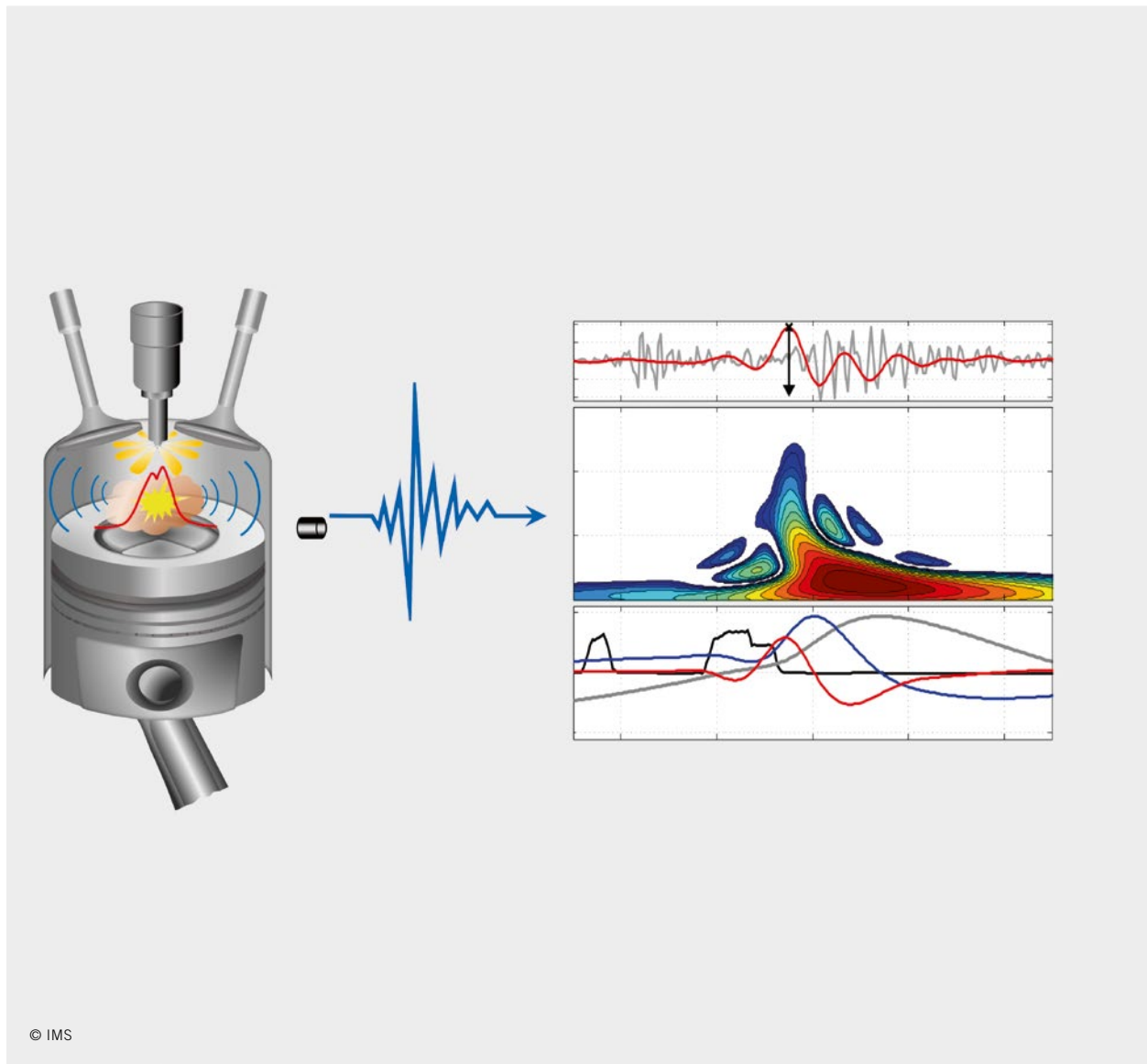


Dipl.-Ing. Michael Joerres

ist Technical Specialist im Bereich Powertrain NVH Product Development Europe der Ford-Werke GmbH in Köln.

Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung

Moderne Pkw zeichnen sich durch niedrige Geräuschemissionen aus. Im unteren Last- und Drehzahlbereich entstehen insbesondere in der Start- und Warmlaufphase des Motors jedoch durch den erhöhten Verbrennungsverzug dominierende Verbrennungsgeräusche. An der Universität Magdeburg und der Technischen Universität Berlin konnte nun in einem FVV-Vorhaben nachgewiesen werden, dass die in Vorgängervorhaben entwickelten körperschallbasierten Methoden zur Regelung der Verbrennungsschwerpunktlage auch in einem umfassenden Drehzahl-Lastbereich und bei dynamischer Anregung gut funktionieren sowie für andere Dieselmotoren anwendbar sind. Eine Regelung der Verbrennungsschwerpunktlage ist ebenfalls möglich.



© IMS

1	MOTIVATION
2	ENTWICKLUNG EINES VIRTUELLEN ZYLINDERDRUCKSENSORS
3	ENTWICKLUNG EINES VIRTUELLEN GERÄUSCHSENSORS
4	ZYLINDERSELEKTIVER GERÄUSCHGEREGELTER DIESELMOTOR
5	OPTIMIERUNGS-ALGORITHMUS ZUR GERÄUSCHREGELUNG
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Heutige Dieselmotoren für Pkw zeichnen sich durch niedrige Abgasemissionen und geringen Kraftstoffverbrauch aus. Im unteren Last- und Drehzahlbereich entstehen insbesondere in der Start- und Warmlaufphase des Motors jedoch durch den erhöhten Verbrennungsverzögerung dominierende Verbrennungsgeräusche. Zur Reduzierung derartiger Verbrennungsgeräusche werden heutzutage zwar mehrfache Voreinspritzungen eingesetzt, jedoch besteht dabei ein direkter Konflikt zu den Abgasemissionen, die eine höhere Priorität haben. In den abgeschlossenen FVV-Projekten Geräusch geregelter Dieselmotor I und II [1] konnte das Geräuschverhalten durch die Veränderung der Haupteinspritzung auf vorgegebene Werte der Dieselnote eingeregelt werden. In dem Folgeprojekt Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung [2] wurden nunmehr Körperschallsignale genutzt, um einerseits die Emissionsreduzierung einer zylinderdruckbasierten Motorregelung zu erhalten und gleichzeitig ohne die Nutzung von Zylinderdrucksensoren die Verbrennungsgeräusche zu bewerten.

2 ENTWICKLUNG EINES VIRTUELLEN ZYLINDERDRUCKSENSORS

Für die Untersuchungen wurde am Akustikprüfstand des IMS ein Serien-Vierzylinder-Dieselmotor mit 1,6 l Hubraum aufgebaut. Die notwendigen Algorithmen zur Datenverarbeitung der Drehzahl-, Strom-, Körperschall- und Mikrofonsignale wurden mit dem Rapid Prototyping System IAV-MPEC (Modular Prototyping Engine Controller) von IAV realisiert, **BILD 1**.

Für die Applikation einer zylinderdruckbasierten Motorregelung, die an der TU Berlin am Fachgebiet Mess- und Diagnosetechnik entwickelt wurde, sind Informationen über den Zylinderdruckverlauf unerlässlich. Im Gegensatz zu Drucksensoren sollten die charakteristischen Kenngrößen indizierter Mitteldruck p_{mi} , maximaler Zylinderdruck p_{max} und Verbrennungsschwerpunktlage α_{q50} , über einen virtuellen Zylinderdrucksensor ermittelt werden.

Eine Kohärenzanalyse [2] für den Projektmotor hatte ergeben, dass im Frequenzbereich bis 3 kHz zwischen Zylinderdrucksignal und Körperschallsignal eine lineare Abhängigkeit besteht. Zur Bestimmung der Frequenzbänder im Körperschallsignal, die durch die Verbrennung angeregt werden, bedarf es einer Zeit-Frequenz-Analyse, **BILD 2**. Hierzu wurde mittels der Smoothed-Pseudo-Wigner-Ville-Verteilung (SPWV-Verteilung) eine winkelsynchrone Darstellung zwischen Körperschall- und Zylinderdrucksignal erstellt. Im Anschluss wurden die zeitlichen Zusammenhänge von Ursache und Wirkung beziehungsweise Anregung durch Zylinderdruck und Signaleinträge im Körperschall analysiert. Ziel dieser Untersuchung war es, ein Lageinformationsmerkmal aus dem Körperschall zu extrahieren, das mit der Verbrennungslage korreliert.

3 ENTWICKLUNG EINES VIRTUELLEN GERÄUSCHSENSORS

Zur Bewertung des Dieselnagels wurde die Berechnungsmethode der Dieselnote aus dem FVV-Projekt Objektivierung subjektiver Beurteilung [3] genutzt, **BILD 3**. Die Berechnung der Dieselnote basiert dabei auf Luftschallsignalen, die über Mikrofone aufgezeichnet wurden. Auf Basis des Körperschallsignals war nun ein Modell zu erstellen, das die Dieselnote des Luftschalls abbildet (virtueller Geräuschsensor). Die Dieselnote basiert auf der Bestim-

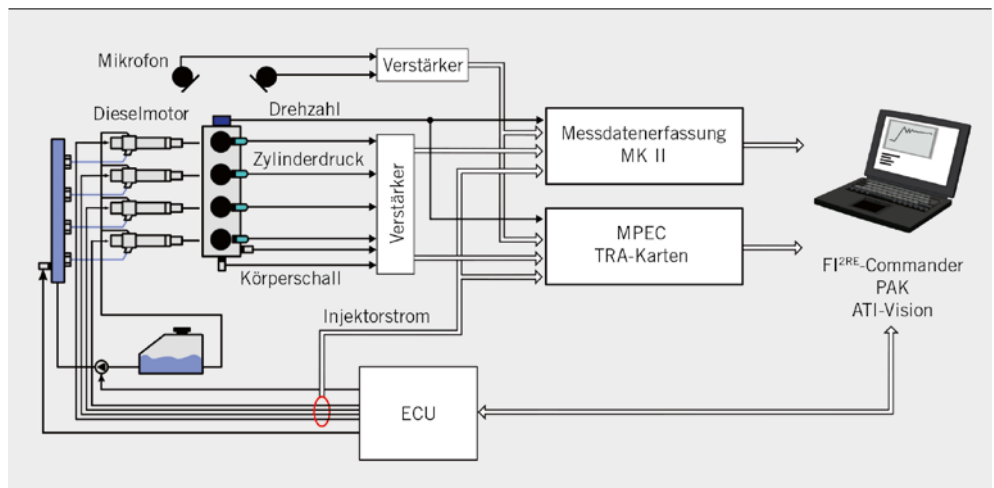


BILD 1 Schematische Darstellung der Konfiguration des Prüfstands (© IMS)

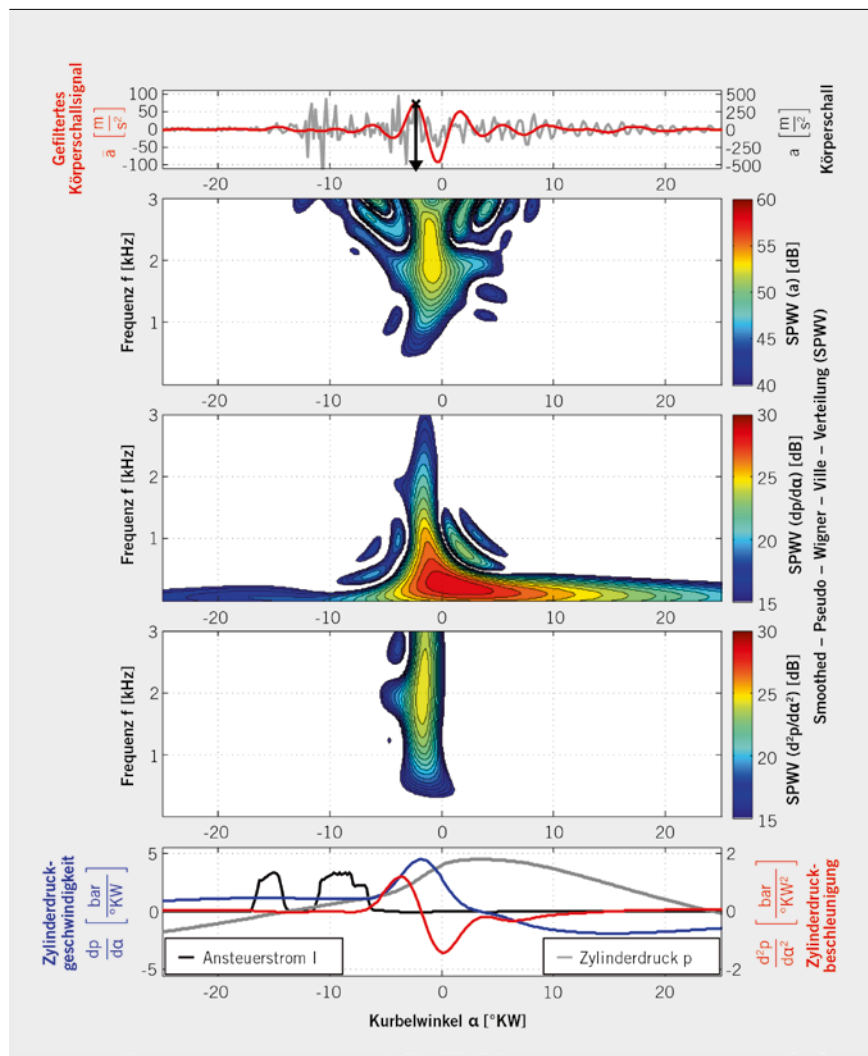


BILD 2 Zeit-Frequenz-Analyse des Körperschallsignals a des Sensors O₁ im Vergleich zum Zylinderdruck p des 1. Zylinders, Zylinderdruckgeschwindigkeit dp/da und Zylinderdruckbeschleunigung d²p/da² (1250/min, 25 Nm) (© IMS)

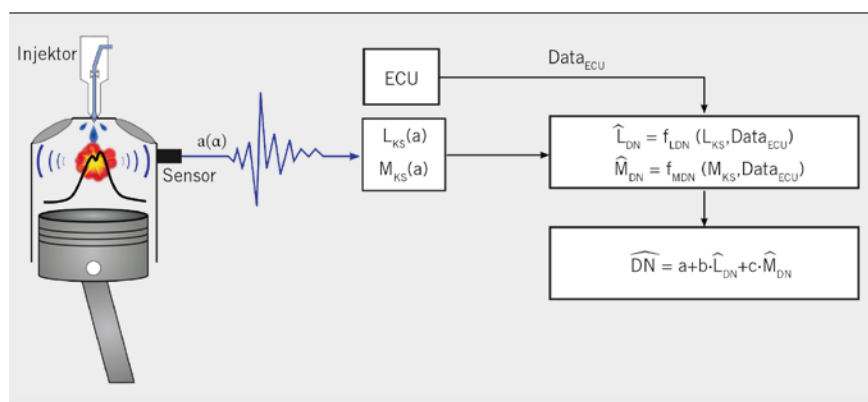


BILD 3 Darstellung der Methoden zur Dieselnotenbestimmung (© IMS)

mung der Lautheit und der Modulation. Durch die Notwendigkeit von Luftschallsignalen ist jedoch die Bestimmung der Dieselnote auf akustische Prüfstände limitiert, da beim Einsatz im Fahrzeug Störgeräusche, wie zum Beispiel Fahrgeräusche, die Signale überlagern. Mittels der Abschätzung der Dieselnote konnte eine Echtzeit-Bewertung der Lästigkeit der Verbrennung erfolgen und in die zylinderdruckbasierte Regelung des Motors eingefügt werden.

In [2] ist eine hohe Korrelation zwischen Luft- und Körperschallsignalen beziehungsweise der Lautheit, Modulation und Dieselnote nachgewiesen worden. Im nächsten Schritt sollte der Wertebereich der Dieselnote mittels Luftschall auch durch die Körperschallsignale abgebildet werden. Hierzu diente die Idee, ein Regressionsmodell zu erstellen, das auf Grundlage der Körperschallsignale die Luftschallkennwerte bestimmt. Dieses Modell wird als virtueller

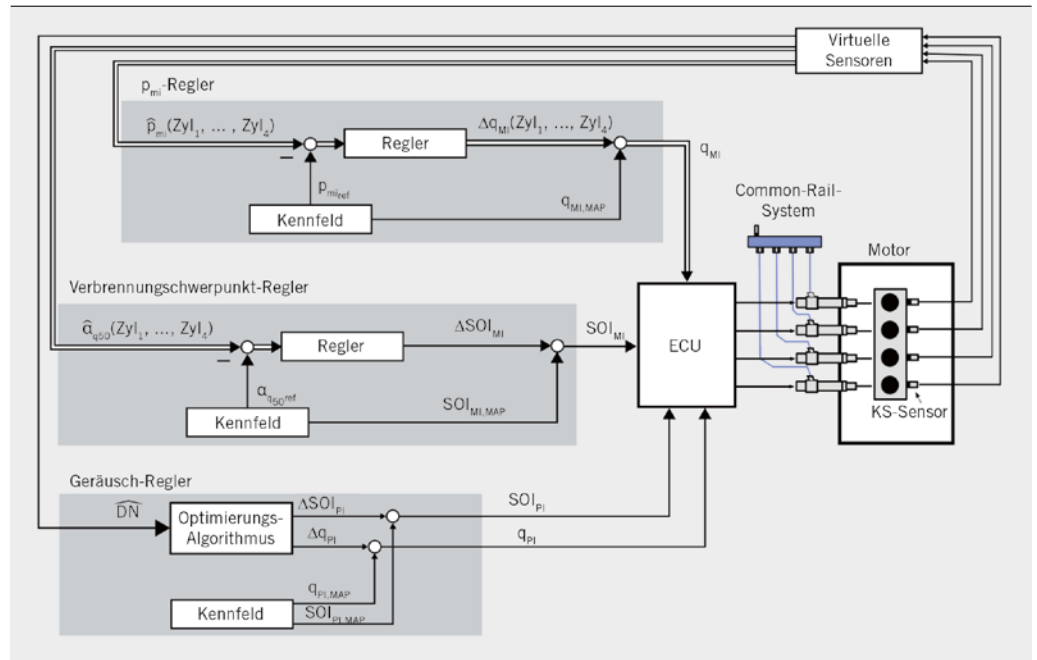


BILD 4 Prinzipdarstellung der Regelstruktur (© IMS)

Geräuschsensor bezeichnet. Der Ansatz deckt sich mit dem Konzept für die virtuellen Drucksensoren. Die Dieselnote kann indirekt durch Abschätzung der Lautheit L_{KS} und der Modulation M_{KS} aus dem Körperschall bestimmt werden. Hierzu wurden Regressionsmodelle für diese beiden Größen ermittelt. Die Dieselnote \hat{DN} lässt sich dann folgendermaßen errechnen:

$$\text{Gl. 1} \quad \hat{L}_{DN} = f_{LDN}(L_{KS}, \text{Data}_{ECU})$$

$$\text{Gl. 2} \quad \hat{M}_{DN} = f_{MDN}(M_{KS}, \text{Data}_{ECU})$$

$$\text{Gl. 3} \quad \hat{DN} = a + b \cdot \hat{L}_{DN} + c \cdot \hat{M}_{DN}$$

Für die Bestimmung der Regressionsmodelle f_{LDN} und f_{MDN} konnten die Steuergerätedaten (Data_{ECU}) genutzt werden.

4 ZYLINDERSELEKTIVER GERÄUSCHGEREGELTER DIESELMOTOR

Die entwickelten Modelle zur Ermittlung der zylinderselektiven Verbrennungsgrößen $\hat{\alpha}_{q50}$, \hat{p}_{mi} und \hat{p}_{max} sollten genutzt werden, um eine zylinderselektive Verbrennungsregelung umzusetzen. Die Regelstrategie umfasste dabei die Gleichstellung aller Zylinder bezüglich des indizierten Mitteldrucks und die Regelung der Verbrennungsschwerpunktlage, **BILD 4**. Als Stellgrößen dienten dabei die Einspritzmenge der Haupteinspritzung q_{mi} und der Einspritzwinkel der Haupteinspritzung SOI_{mi} .

Der indizierte Mitteldruck stellt ein direktes Maß für die Motorarbeit dar. Aus diesem Grund sollte im ersten Ansatz eine Regelung des indizierten Mitteldrucks umgesetzt werden. Hierbei sollte der indizierte Mitteldruck zylinderselektiv erfasst und über die Haupteinspritzmenge individuell korrigiert werden. Dies ist notwendig, da die Einspritzmenge je nach Zustand der Magnetventil-

injektoren variieren kann. Insbesondere ist dies zu erwarten, wenn Alterungseffekte oder eine Beschädigung der Injektoren vorliegen. Insbesondere bei der Minimierung der Abgasemissionen war die Einhaltung der Verbrennungsschwerpunktlage essenziell wichtig. Die Bestimmung der Verbrennungsschwerpunktlage konnte kommerziell durch Zylinderdrucksensoren realisiert werden. Jedoch bieten die entwickelten virtuellen Drucksensoren in Abschnitt 2 die Alternative, auf Basis von Körperschallsensoren die aktuelle Verbrennungsschwerpunktlage zu ermitteln.

Auf Grundlage der erstellten Regressionsmodelle wurden die jeweiligen Verbrennungsschwerpunktlagen $\hat{\alpha}_{q50}(Zyl_1, \dots, Zyl_4)$ jedes Zylinders arbeitsspielsynchron geschätzt. Zur Adaption der Verbrennungsschwerpunktlage bedurfte es einer Regelung der Einspritzwinkel. Zur Regelung wurde ein PI-Regler ausgelegt. Zur Verifikation der Regelstruktur wurde eine Sprungmessung um 1 bar ($p_{mi}(Zyl_1) = 2,8$ bar) um den Betriebspunkt 1250/min, 25 Nm durchgeführt, **BILD 5**. Es war zu erkennen, dass die stationären Endwerte nach circa 40 Arbeitsspielen erreicht werden.

5 OPTIMIERUNGS-ALGORITHMUS ZUR GERÄUSCHREGELUNG

Das Ziel war, dass die Dieselnote unabhängig vom gewählten Betriebspunkt optimiert werden soll. In den vorangegangenen Untersuchungen ließ sich feststellen, dass durch die kombinatorische Wahl der Winkellage und der Einspritzmenge der Voreinspritzung ein globales Optimum der Dieselnote erreicht werden kann. Die Idee der Optimierung bestand in der Nutzung eines Suchalgorithmus, der die Aufgabe hatte, die maximale Dieselnote zu detektieren. Dieser sollte eine schrittweise Variation der Einspritzparameter vornehmen. Beim Gradienten-Abstiegsverfahren wurde dabei der aktuelle Einspritzparameter um eine feste Schrittweite erhöht. Wenn sich die Dieselnote erhöht, wurde auch der Einspritzparameter weiter erhöht, solange, bis der Gradient der Dieselnote zwischen altem und neuem Einspritzparameter

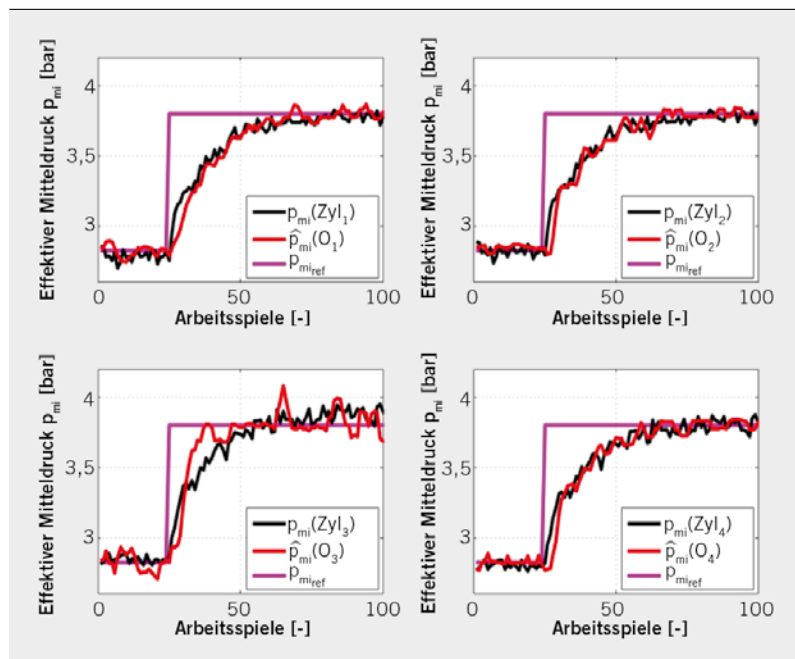


BILD 5 Sprungantwort der p_{mi} -Regelung bei positiver Sollwertvorgabe, aufgetragen über den Arbeitsspielen (AS) (dargestellt ist der Referenzwert, der jeweilige gemessene und geschätzte p_{mi} -Wert in Relation zu den einzelnen Zylindern und Körperschallsensoren © IMS)

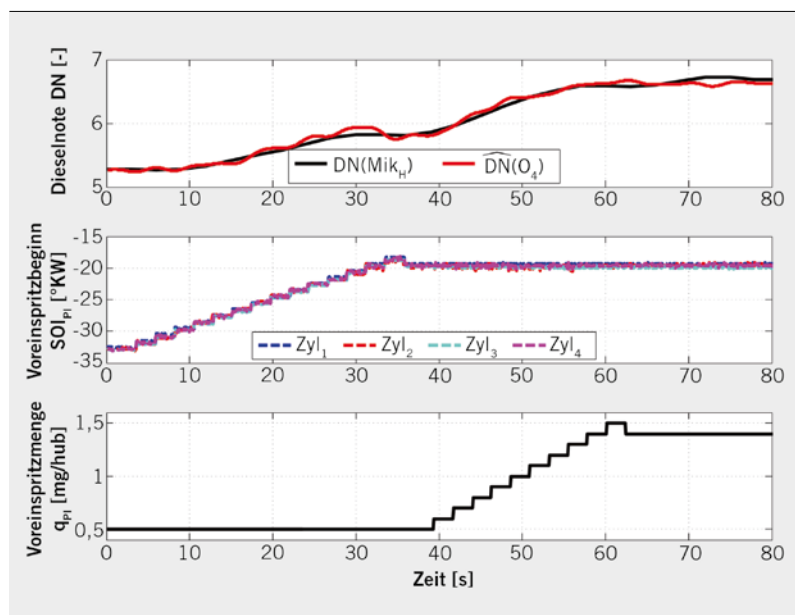


BILD 6 Zeitlicher Verlauf der Dieselnote (DN) und der Voreinspritzparameter bei Ausführung des Optimierungs-Algorithmus © IMS)

null ist. Wurde der Gradient negativ, so wurde der letzte Einspritzparametersatz an der Stelle übernommen, wo der Gradient einen positiven Wert ergeben hatte. In **BILD 6** ist der Verlauf der iterativen Optimierung der Dieselnote dargestellt. Der Algorithmus verschob nach der Initialisierung den Voreinspritzwinkel von spät nach früh. Dabei erhöhte sich die Dieselnote von circa 5,2 auf 5,8. Ab einem Voreinspritzwinkel von -19°KW nahm die Dieselnote wieder ab. Im Anschluss wurde die Voreinspritzmenge erhöht, wodurch die Dieselnote nahezu proportional anstieg. Ab $1,5\text{ mg/hub}$ verharrte die Dieselnote bei circa 6,9. Eine Maximierung der Dieselnote durch die Erhöhung der Voreinspritzung war nicht mehr auszumachen; ferner war die maximal zulässige Gesamteinspritzmenge erreicht. An dieser Stelle wurde der Algorithmus beendet.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für ein zylinderselektives, geräuschgeregeltes Motormanagement wurde eine arbeitsspielsynchrone Regelung des indizierten Mitteldrucks sowie der Verbrennungsschwerpunktlage entwickelt. Hierzu wurden die Regelgrößen über die Körperschallsignale beziehungsweise deren Merkmale und Steuergerätedaten mittels Regressionsmodellen erfolgreich geschätzt. Durch Sprungantworten der Regelkreise wurde nachgewiesen, dass die Modelle eine ausreichende Güte aufweisen, um den physikalisch tatsächlichen Wert darzustellen und sich somit für die Regelung eignen. Dies lieferte die Grundlage, um die Verbrennung bei einer Variation der Voreinspritzparameter in vordefinierten Arbeitspunkten nachzuführen.

Im Anschluss wurde mit den Regressionsmodellen zusätzlich die Dieselnote aus den Körperschallsignalen berechnet. Ziel war es, die Dieselnote durch die Voreinspritzparameter zu variieren und letztendlich zu optimieren. Durch Prinzipuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich insbesondere die Voreinspritzmenge sensitiv auf die Dieselnote auswirkt. Ferner lagen die maximalen Dieselnotenwerte in einem relativ engen Voreinspritzwinkelbereich, der abhängig vom Betriebspunkt des Motors ist. Zur Erreichung des Ziels, die Dieselnote zu optimieren, wurde ein heuristischer Algorithmus angewendet, der auf der Basis eines Gradientenverfahrens beruht. Ferner wurden die Emissionswerte der Stickoxide, der Kohlenwasserstoffe und der spezifische Kraftstoffverbrauch in diesem optimierten Arbeitspunkt reduziert. Grundlegend zeigten die umgesetzten Regelkonzepte das Potenzial der Reduzierung der akustischen Lästigkeit der Verbrennungsgeräusche auf.

Im Rahmen weiterführender Arbeiten gilt es, die Modellgüte der virtuellen Zylinderdrucksensoren durch die Integration weiterer Messgrößen wie zum Beispiel die Drehzahl, die ebenfalls in verschiedenen Forschungsprojekten direkt zur Schätzung des Zylinderdrucks genutzt wird, zu optimieren. Ferner könnten Drehzahl-signale eine Information über die Modulation im Luftschall enthalten und direkt dem Zylinder zugeordnet werden. Darüber hinaus stellt die weitere Analyse der Minimierung der Verbrennungsgeräusche durch die Voreinspritzparametrisierung Forschungspotenzial dar.

LITERATURHINWEISE

- [1] Decker, M.; Lucas, S.; Hintz, K.; Nobis, J.: Geräuscheregelter Dieselmotor I und II. FVV-Abschlussbericht 1003, 2013
- [2] Carstens, J.-H.; Schneider, S.; Nobis, J.; Gühmann, C.; Rottengruber, H.; Neumann, E.; Joerres, M.: Körperschallbasierte Dieselmotorenregelung – Optimierung und Adaption der Parameter. FVV-Abschlussbericht 1075, 2017
- [3] Hoppermann, J.: Objektivierung subjektiver Beurteilungen. FVV-Abschlussbericht, 2006

DANKE

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer abgeschlossenen Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV, Frankfurt) gestellt und am Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen der Universität Magdeburg unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber sowie am Fachgebiet für Elektronische Mess- und Diagnostik der TU Berlin unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann bearbeitet wurde. Die Arbeit wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) finanziell gefördert. Die Universitäten danken dem BMWi und der AiF für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Dipl.-Ing. Michael Joerres (Ford-Werke) begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com

ATZ live

Fahrerassistenz-Systeme



Von der Assistenz
zum automatisierten
Fahren

4. Internationale
ATZ-Fachtagung
Automatisiertes Fahren
18. und 19. April 2018
Wiesbaden

AKTUELLES TAGUNGSPROGRAMM

www.ATZlive.de