

VERFASST VON



Dipl.-Ing.

Christopher Saupe

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) an der TU Dresden.



Dr.-Ing. Ronny Werner

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) an der TU Dresden.

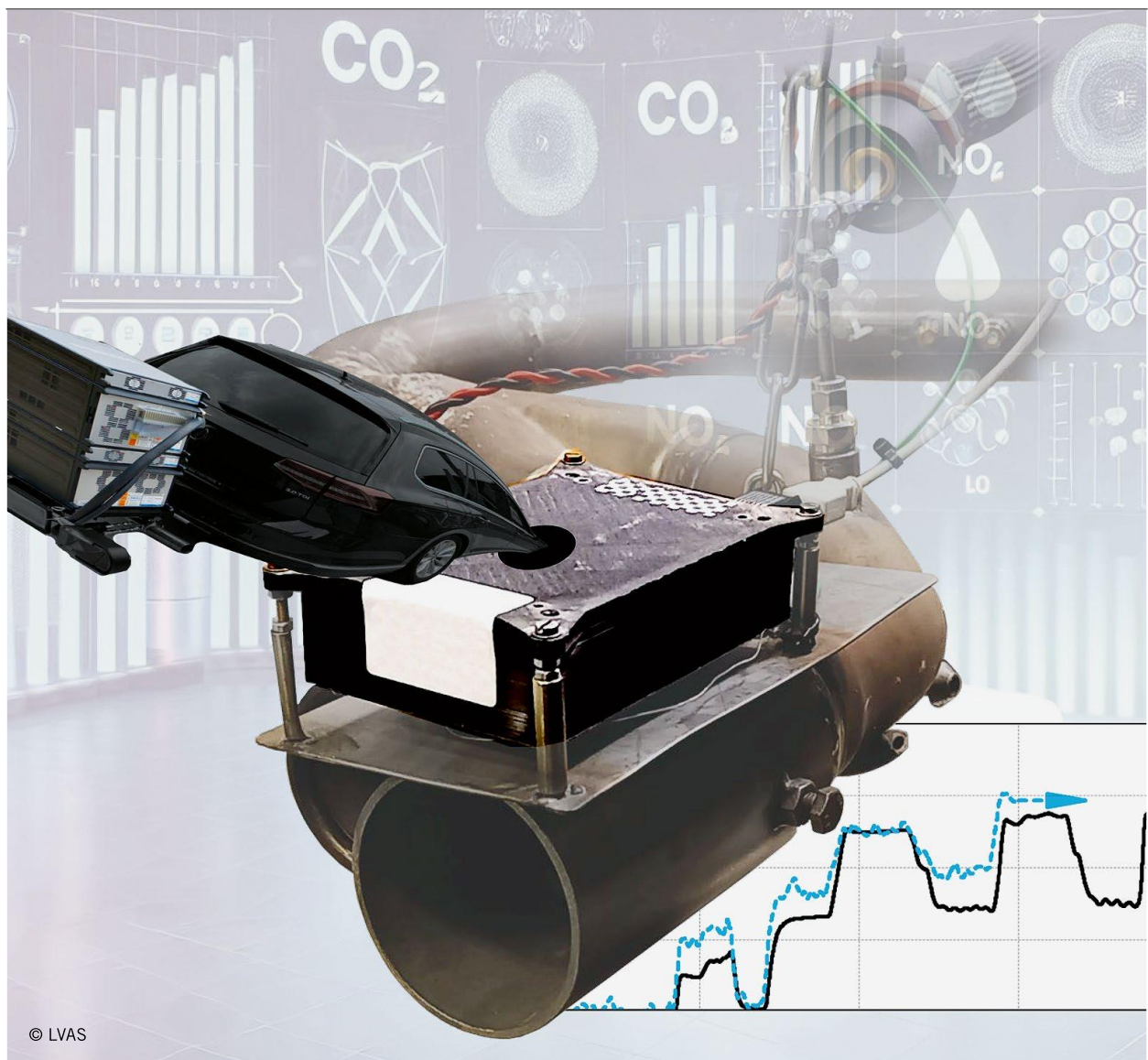


Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler

ist Leiter des Lehrstuhls für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) an der TU Dresden.

Kompaktes On-Board-Multigasmesssystem

Mit mobiler Messtechnik lassen sich Daten aus realen Fahrsituationen für die Forschung und Entwicklung von Motoren sammeln. Für einen breiten Einsatz sind die verwendeten Emissionsmesssysteme aufgrund ihrer Größe und Anschaffungskosten eher ungeeignet. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Technische Universität Dresden entwickeln im Forschungsprojekt OBECOM (FVV-Nr. 1460) ein Mikrosensorsystem, das die quantitative Datenerfassung erleichtert und dadurch die Qualität der Messdaten von Motoren in realen Anwendungen deutlich verbessert.



© LVAS

1	MOTIVATION
2	MULTIGAS-SENSORSYSTEM
3	CO ₂ -BERECHNUNG ANHAND VON LASTSPRUNGVARIATIONEN
4	BERECHNUNG WEITERER EMISSIONSGASE
5	FINALER SENSORTEST

1 MOTIVATION

Das im Projekt OBECOM (On-board Emission Conformity Monitoring) entwickelte Messsystem soll zur umfassenderen und genaueren Emissionsanalyse insbesondere mobiler Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können. Dadurch kann wesentlich besser verfolgt werden, inwieweit Normen zum Schutz der Umwelt und Gesundheit eingehalten werden. Im internationalen Verbund mit dem Tecnológico de Monterrey (TEC) arbeiten das Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des KIT und der Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) der TU Dresden daran, die Sensordaten für eine kontinuierliche Datenauswertungen zu befähigen. Im Folgenden wird das Projekt anhand der Ergebnisse der TU Dresden vorgestellt.

2 MULTIGAS-SENSORSYSTEM

Das OBECOM-Sensorsystem, **BILD 1**, ist lediglich 13 × 9 × 4 cm groß und kann im Abgasstrom installiert werden. Es besteht aus zwei einzelnen temperaturgesteuerten Tripel-Metalloxid-(TriMOx)-Sensoren, einem integrierten Feuchte-/Temperatur-Sensor, einem Setup von Nichtdispersiven Infrarot(NDIR)-Sensoren, die durch ein in Polytetrafluorethylen (PTFE) eingefasstes Saphirglas vor dem heißen Abgas geschützt werden, einem Luftdrucksensor, einer Uhr und einer 12-V-Gleichstromversorgung. Die Sensordaten werden im System vorverarbeitet und über eine serielle RS-232-Verbindung übertragen. Die gasempfindliche MOx-Sensorschicht ist eine feinkörnige Keramik. Deren Parameter wie der

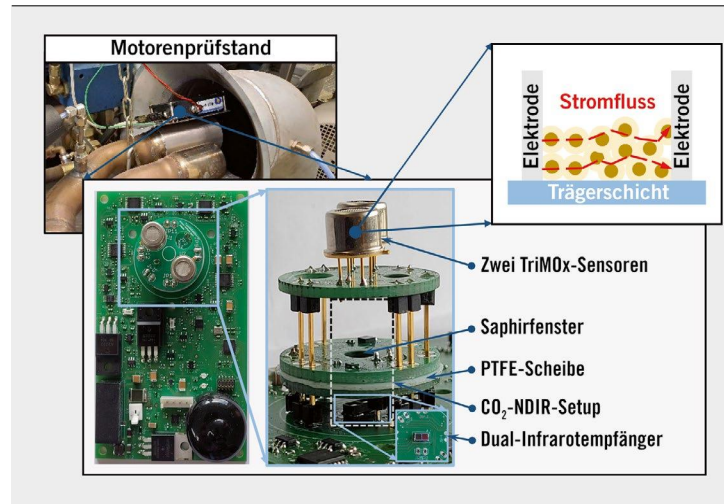


BILD 1 OBECOM-Sensorsetup (Mitte), Installation am Prüfstandsmotor (links oben) und TriMOx-Funktionsprinzip (rechts oben) © LVAS

Korndurchmesser haben einen großen Einfluss auf die spezifischen Gasempfindlichkeiten. Da die Zusammensetzung jedoch der Geheimhaltung der Hersteller unterliegt, muss an diese verwiesen werden. Im Abgas vorhandene Moleküle reaktiver Gase werden an der Keramikoberfläche adsorbiert und desorbiert, interagieren mit den Sauerstoffatomen der Keramik und induzieren beziehungsweise reduzieren Ladungsträger an der Keramikoberfläche. Die Änderung des Widerstands lässt auf die Gaskonzentration schließen: Ein oxidierendes Gas erhöht den Widerstand in der Regel [1]. Die TriMOx-Sensoren besitzen jeweils drei unterschiedliche MOx-Schichten (a, b, c), wodurch sich drei Gas sensitivitäten ergeben. Durch die Änderung der Betriebstemperatur des Sensors kann die Anzahl von drei auf sechs verschiedene Gase erweitert werden.

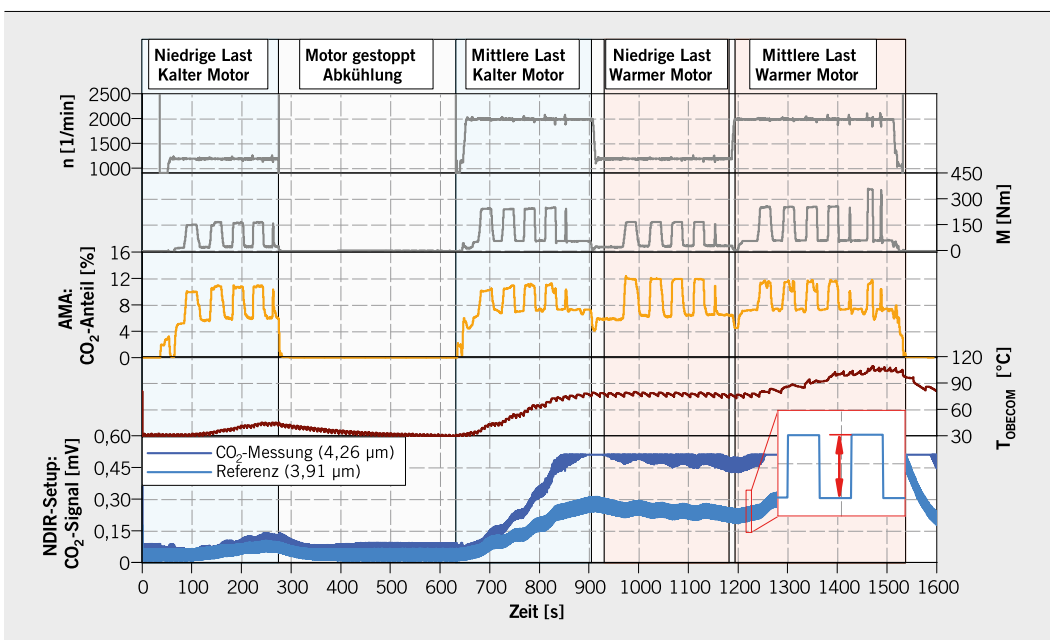


BILD 2 Lastsprungvariationen und Messungen des NDIR-Sets im Vergleich zur Abgasmessanlage © LVAS

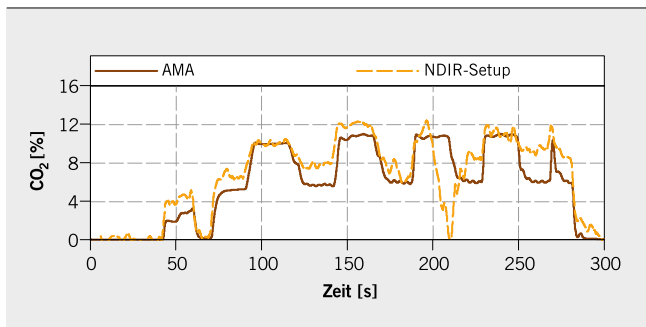


BILD 3 CO₂-Emissionsmessungen des NDIR-Setups im Vergleich zur AMA (© LVAS)

Das OBECOM-System wurde am Dieselvollmotorenprüfstand des LVAS in Betrieb genommen und durch Gasanalysen mit der Abgasmessanlage (AMA) des Prüfstands, dem Mexa-One von Horiba, evaluiert. Dabei wurde nicht nur die Messgenauigkeit des Sensorsystems untersucht, sondern auch seine Reaktionsgeschwindigkeit.

3 CO₂-BERECHNUNG ANHAND VON LASTSPRUNGVARIATIONEN

Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene Start- und Endpunkte zur Variation der Lastsprünge gewählt. Zudem wurde die Haltezeit der erhöhten Last und die Drehmomentanstiegszeit variiert. Das Diagramm in **BILD 2** zeigt die Motordrehzahl *n*, das Motor-

drehmoment *M*, die vom AMA gemessenen CO₂-Emissionen, die vom OBECOM-System gemessene Sensortemperatur *T*_{OBECOM} und die Rohdaten (CO₂-Signal) des integrierten NDIR-Setups. Mit dem NDIR werden CO₂-Emissionen mit einer Filterwellenlänge von 4,26 µm (dunkelblaue Kurve) und Referenzwerte dazu mit einer Filterwellenlänge von 3,91 µm (hellblaue Kurve) gemessen. Der jeweilige Verlauf ist eine zyklische Messung des Grundrauschens (niedriger Wert) und des Lichtabsorptionswerts (hoher Wert), **BILD 2** (Detailansicht). Der eigentliche Messwert ist die sich daraus ergebende Differenz.

Die Lastsprünge begannen mit dem Kaltstart, bei dem alle Motormedien eine Umgebungstemperatur aufweisen. Die Katalysatortemperatur musste unter der sogenannten Light-off-Temperatur liegen, damit das OBECOM-System ebenso von Motorrohmissionen erreicht werden konnte. Zu diesem Zweck wurde eine Pause nach dem bei niedriger Last durchgeführten Kaltlauf eingelegt (bei 300 s), um den Oxidationskatalysator abzukühlen. Erst danach wurde der nächste Kaltlauf bei mittlerer Teillast durchgeführt. Nach diesen Lastsprüngen konnte sich der Oxidationskatalysator bereits so weit aufheizen, dass die Konvertierung begann; die nächsten Start-/Endpunkte wurden im direkten Anschluss im Warmlauf durchlaufen.

Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des NDIR-Setups nehmen die Messwerte mit steigender Temperatur zu, sodass der obere Grenzwert nach circa 900 s Messdauer erreicht ist. Leider können mit dem Sensor darüber hinaus keine aussagekräftigen Daten gemessen werden. Für die Untersuchungen sind die Ergebnisse jedoch ausreichend. Das vorrangige Ziel der Lastsprungvariation war, die TriMOx-Sensoren zu kalibrieren und sie hohen Konzentrationen verschiedener Abgasbestandteile auszusetzen.

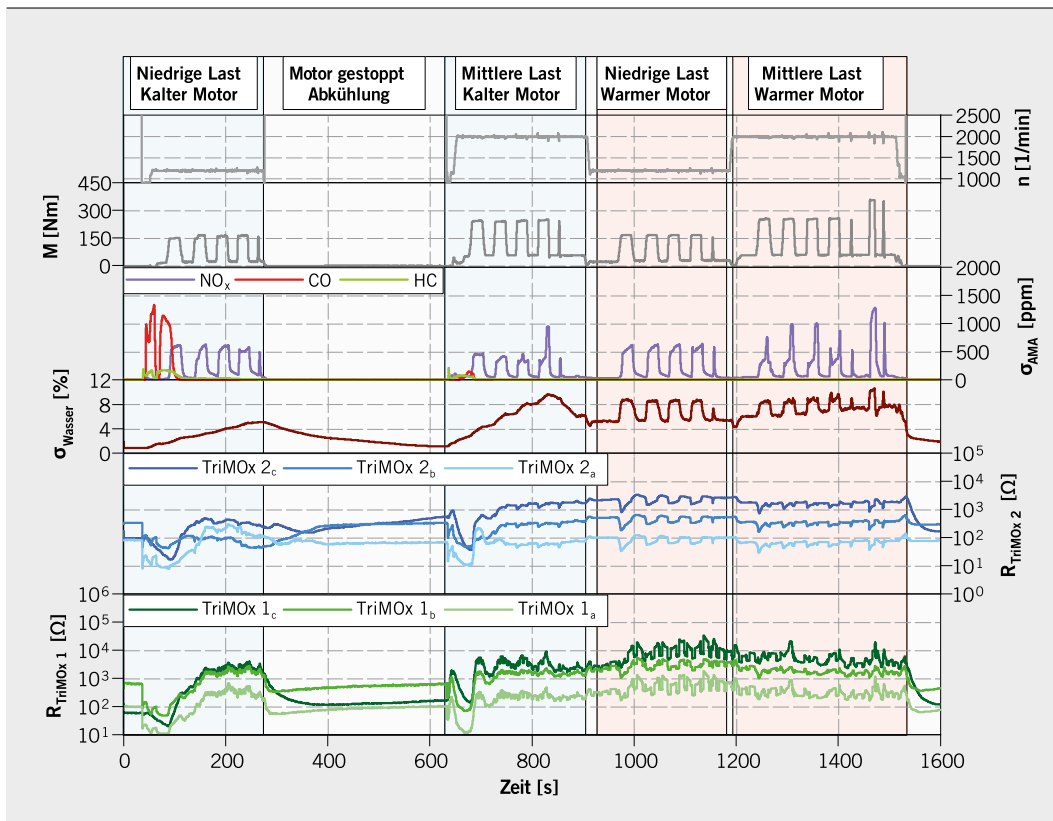


BILD 4 Lastsprungvariationen und Messungen der TriMOx-Sensoren im Vergleich zur AMA (© LVAS)

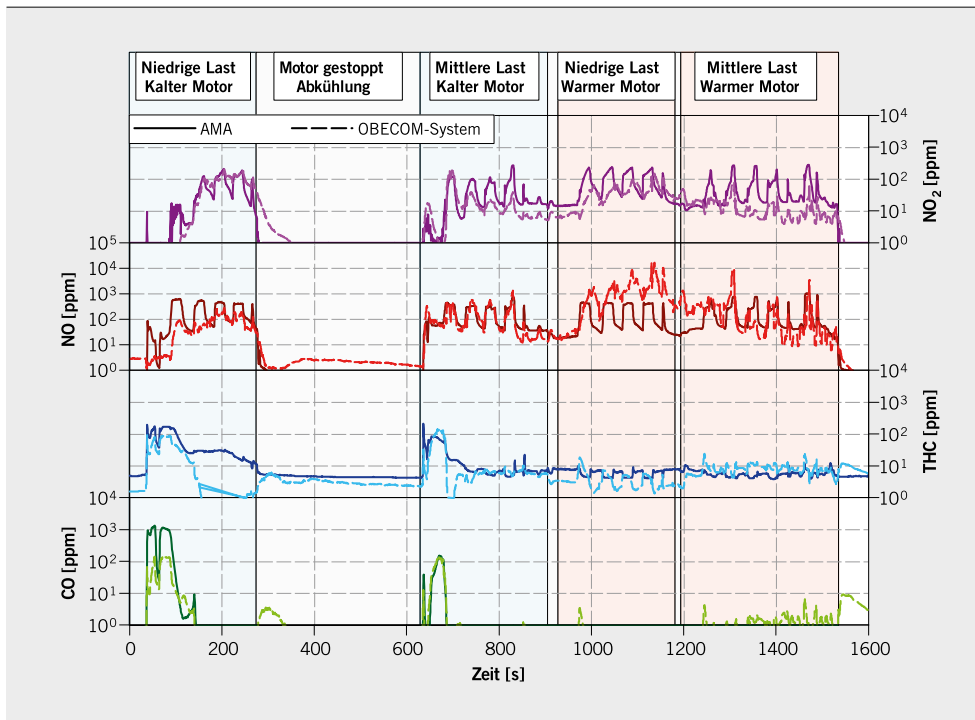


BILD 5 Lastsprungvariationen und CO-, NO-, NO₂- und THC-Emissionsmessungen des OBECOM-Systems im Vergleich zur AMA (© LVAS)

Für die CO₂-Kalibrierung reicht der erste Abschnitt bei niedriger Teillast aus.

In **BILD 3** sind die CO₂-Messwerte des OBECOM-Systems inklusive Temperaturkompensation und Skalierung der Rohdaten denen der AMA gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das OBECOM-System die Konzentrationsänderung genauso schnell erkennt wie die AMA und dass die Gesamtwerte eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Mit einer weiteren Optimierung des Sensorsystems und seiner Auswertung können auch die verbleibenden Abweichungen minimiert werden.

4 BERECHNUNG WEITERER EMISSIONSGASE

In **BILD 4** sind die Rohdaten der beiden TriMOx-Sensoren (1_a bis 1_c, 2_a bis 2_c) im Vergleich zu den von der AMA gemessenen Emissionen (σ_{AMA}) von NO_x, CO und HC dargestellt. Zu Beginn der gleichen Lastsprungvariationen wie in **BILD 2** bis etwa 100 s wurde von der AMA ein Anstieg der HC- und CO-Emissionen gemessen, der auf den Kaltstart und den ebenfalls noch kalten Oxidationskatalysator zurückzuführen ist. Die beiden TriMOx-Sensoren zeigen in diesem Zeitraum einen Rückgang in allen sechs Kurven, was darauf hindeutet, dass sie ebenfalls die HC- und CO-Emissionen gemessen haben. Ein starker Einfluss des Wassergehalts σ_{Wasser} auf die TriMOx-Sensoren ist zu beobachten: Auf einen Anstieg von σ_{Wasser} reagieren die Sensoren jeweils mit einer Abnahme des Widerstandswerts R_{TriMOx} und auf einen Anstieg der NO_x-Konzentration mit dessen Zunahme. Da sowohl die NO_x-Emissionen als auch σ_{Wasser} im Abgas mit zunehmender Motorlast steigen, arbeiten diese beiden Effekte gegeneinander und erschweren die Datenanalyse.

In den Verläufen der TriMOx-1-Messdaten (grün) in **BILD 4** sind im betriebswarmen Motor ab etwa 1000 s periodische Sprünge zu erkennen. Sie werden nach Angaben seines Sensorherstellers

durch die periodische Aktivierung der Sensorheizung verursacht und bei der Datenauswertung korrigiert. Der TriMOx 2 zeigt diese Auffälligkeit nicht. Wegen des NO_x-Speicher-katalysators (NSC) weicht der Kurvenverlauf leicht vom Verlauf des Lastprofils ab. Zu Beginn des Lastanstiegs werden die Stickoxide im NSC gespeichert, weshalb die am Ende der Abgasstrecke gemessenen Emissionen mit einer leichten Verzögerung ansteigen. Nach der Lastanstiegsphase sinkt der NO_x-Gehalt ebenfalls wieder ab und der NSC entlädt sich, wie es zum Beispiel im Verlauf der AMA in **BILD 4** beim Lastsprung bei 1000 s zu sehen ist.

Die TriMOx-Sensoren können dieses Verhalten genau nachbilden. Der erhöhte Wassergehalt kompensiert den erhöhten NO_x-Gehalt im Widerstandswert. Aufgrund des verzögerten Anstiegs ist der Widerstandswert jedoch zunächst niedriger und steigt mit zunehmendem NO_x-Gehalt an. Nach dem Ende des Lastanstiegs nehmen die Wasser- und NO_x-Konzentrationen ab, was zu einem leichten Anstieg des Widerstandswerts führt. Am Ende des Lastsprungs gibt der NSC die gespeicherten Stickoxide wieder ab, was in den AMA-Daten anhand des flachen Gradienten im Verlauf nach dem starken Abfall in den NO_x-Konzentration zu erkennen ist. Im Verlauf der TriMOx-Sensormessungen bildet sich genau das gleiche Verhalten ab, was sich mit einem sinkenden Widerstandswert im gleichen Bereich zeigt.

Die Abhängigkeiten der Widerstandswerte der Sensoren zu den Emissionen ist linear logarithmisch, Gl. 1:

$$\text{Gl. 1} \quad \log_{10}(R_{OBECOM,i}) = R_{Konstante,i} + A_{ij} * \log_{10}(\text{Abgaskomponente}_j)$$

Um die Faktoren A_{ij} zwischen den Widerstandswerten des OBECOM-Sensorsystems und den Emissionsdaten zu ermitteln, wurden zunächst die Schwankungen im Signalverlauf des TriMOx 1 bereinigt,

die durch die Pulsierung der Temperaturregelung entstehen. Dann wurden der Anstieg der Sensortemperatur T_{OBECOM} , der durch die über die Versuchsdauer heißer werdenden Abgase verursacht wird, und die Zunahme von σ_{Wasser} , **BILD 4**, kompensiert. Es folgte die logarithmische Umrechnung der Widerstandswerte und der Emissionsdaten und anschließend eine multivariable lineare Regression, bei der zunächst anhand der Emissionsverläufe die Widerstandskurven nachgebildet werden sollten. Nach erfolgreicher Ermittlung der Faktoren A_{ij} in Gl. 1 wurden die Abgas-komponenten als gesuchte Variablen und die Widerstände als gegebene Größen auf Basis der Werte der TriMOx-Sensoren festgelegt und die Gleichungen nach den gesuchten Variablen aufgelöst. Nach abschließender Feinabstimmung konnten die in **BILD 5** dargestellten Emissionsverläufe mittels der daraus gewonnenen Berechnungsvorschrift aus den Widerstandswerten des OBECOM-Systems ermittelt werden.

Die Verläufe von NO und NO_2 , **BILD 5**, können mit einer hohen AMA-Übereinstimmung vom OBECOM-System widergespiegelt werden. Gradienten und abschnittsweise auch Absolutwerte zeigen einen deckungsgleichen Verlauf. Im Bereich des warmen Motorlaufs wird vermutet, dass bisher noch unbekannte Querein-

flüsse vorhanden sind und deshalb in diesem Abschnitt der Untersuchung stärker abweichen. Bei den Kohlenwasserstoffen (Total Hydrocarbon Content, THC) tritt ein sensorbegründetes Problem auf. Die TriMOx-Sensoren reagieren erst ab einer Konzentration > 10 ppm mit einem signifikanten Widerstandsrückgang auf THC, weshalb der in **BILD 5** dargestellte Verlauf < 10 ppm keine Berücksichtigung findet. Sowohl im Verlauf der Emissionen von CO als auch von THC zeigen die berechneten Verläufe des OBECOM-Systems in **BILD 5** im Moment des Kaltstarts bei 40 bis 150 s und bei 630 bis 690 s ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den Werten des AMA.

5 FINALER SENSORTEST

Um eine Allgemeingültigkeit der Emissionsberechnung zu belegen, wurde das OBECOM-Sensorsystem im Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) getestet. Im Gegensatz zu der Lastsprunguntersuchung überschreitet das NDIR-Setup im OBECOM-System im WLTC nicht die $80^\circ C$ -Grenze und zeigt während des gesamten Zyklus plausible Werte an. Im WLTC sind die durchschnittliche Lastanforderung an den Prüfstandsmotor deutlich

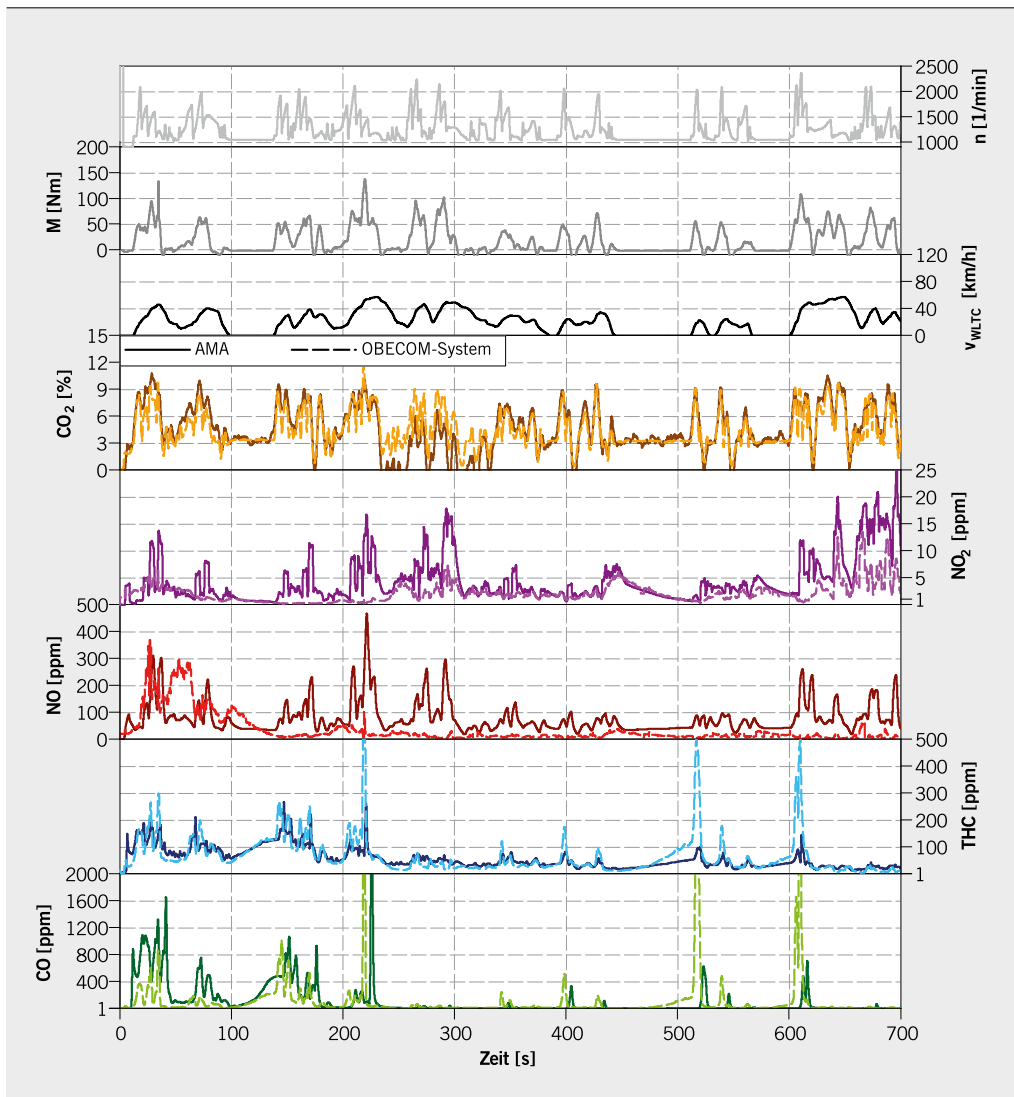


BILD 6 Multigasmessungen des OBECOM-Systems im WLTC (© LVAS)

geringer und die Phasen hoher Lasten kürzer, was im Durchschnitt zu niedrigeren Abgastemperaturen führt.

Zur besseren Übersicht werden in **BILD 6** nur die ersten 700 s des Zyklus dargestellt. Zunächst kann positiv festgestellt werden, dass die in den Lastsprüngen ermittelten Berechnungsvorschriften sowohl für das NDIR-Setup als auch für die TriMOx-Sensoren Emissionsverläufe mit einer hohen Übereinstimmung ergeben. Daraus kann eine Allgemeingültigkeit der Kalibrierung für das am LVAS verwendete OBECOM-Sensorsystem festgelegt werden. Die größten Abweichungen zeigt der Verlauf der NO-Emissionen, die durch Optimierung der Berechnungsfaktoren verringert werden können.

Beim Einsatz des OBECOM-Sensorsystems am Prüfstand konnte weiteres Entwicklungspotenzial im allgemeinen Aufbau identifiziert werden. Mit einer Optimierung der Zu- und Ableitung des Abgases sowie der Integration einer aktiven Sensorkühlung ist eine deutliche Erweiterung des Arbeitsbereichs sowie eine Reduzierung der Quereinflüsse umsetzbar.

Mit Abschluss des Projekts steht ein kompaktes Multigasmesssystem zur Verfügung, das sowohl stationär als auch während realer Fahrten in Serie eingesetzt werden kann. Fahrzeughersteller können mit dem OBECOM-Sensorsystem auf einfache Weise umfangreiche Emissionsdaten ihrer Flotten sammeln und analysieren. Sie erhalten damit auch ein kompaktes und kostengünstiges Werkzeug zur Weiterentwicklung emissionsarmer Motoren.

LITERATURHINWEIS

[1] Ponzoni, A.; Comini, E.; Concina, I.; Ferroni, M.; Falasconi, M.; Gobbi, E.; Sberveglieri, V.; Sberveglieri, G.: Nanostructured Metal Oxide Gas Sensors, a Survey of Applications Carried out at SENSOR Lab, Brescia (Italy) in the Security and Food Quality Fields. In: Sensors 2012 (12), S. 17023-17045

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1460) wurde am Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren und Antriebssysteme (LVAS) der TU Dresden unter der Leitung von Prof. Dr. Frank Atzler, am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter der Leitung von Prof. Dr. Thomas Koch und am Tecnológico de Monterrey (TEC) unter der Leitung von Prof. Dr. José Ignacio Huertas durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. (IGF/CORNET-Nr. 313 EBG) im Rahmen des internationalen Förderprogramms CORNET (Collective Research Networking) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags und durch Eigenmittel der FVV finanziell gefördert. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Besonderer Dank geht an Rafaela Tunze und Axel Schmidt (Deckma Hamburg) für den Aufbau des OBECOM-Sensorsystems, an Dr. Manuel Montoya (Cluster Automotriz de Nuevo León) und an Prof. Dr. habil. Michael Palocz-Andresen (TEC) für die Organisation im Projekt.

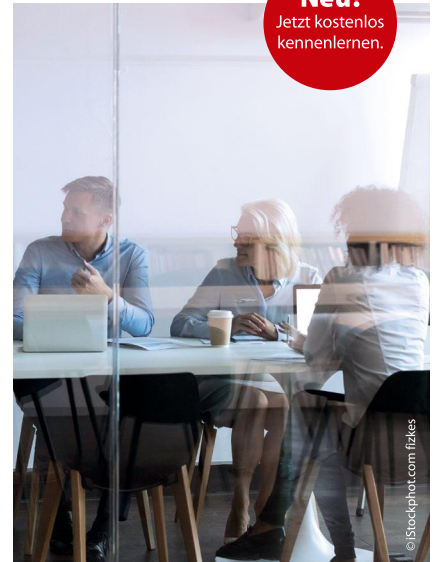


READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

IT-Mittelstand

Neu!
Jetzt kostenlos
kennenlernen.



IT-Prozesse optimieren.

Die digitale Transformation erfordert zielgerichtete, innovative Lösungen, um Unternehmen noch produktiver zu machen. IT-Mittelstand ist das Fachmagazin rund um die Digitalisierung in kleineren und mittelständischen Unternehmen. Praxisnahe Einblicke, Reportagen, Fachbeiträge und Interviews mit Branchenexperten liefern wertvolles Know-how auf dem neuesten Stand der Technologie – von der Planung, über die Einführung bis zum Betrieb von ITK-Infrastrukturen. Nutzen Sie die umfassenden Informationen und das Wissen für den Erfolg Ihres Unternehmens!



www.meinfachwissen.de/itm