

VERFASST VON



**Andreas Schneider, M. Sc.**  
ist Softwareentwicklungsingenieur im Bereich autonomes Fahren bei der Robert Bosch GmbH in Leonberg.



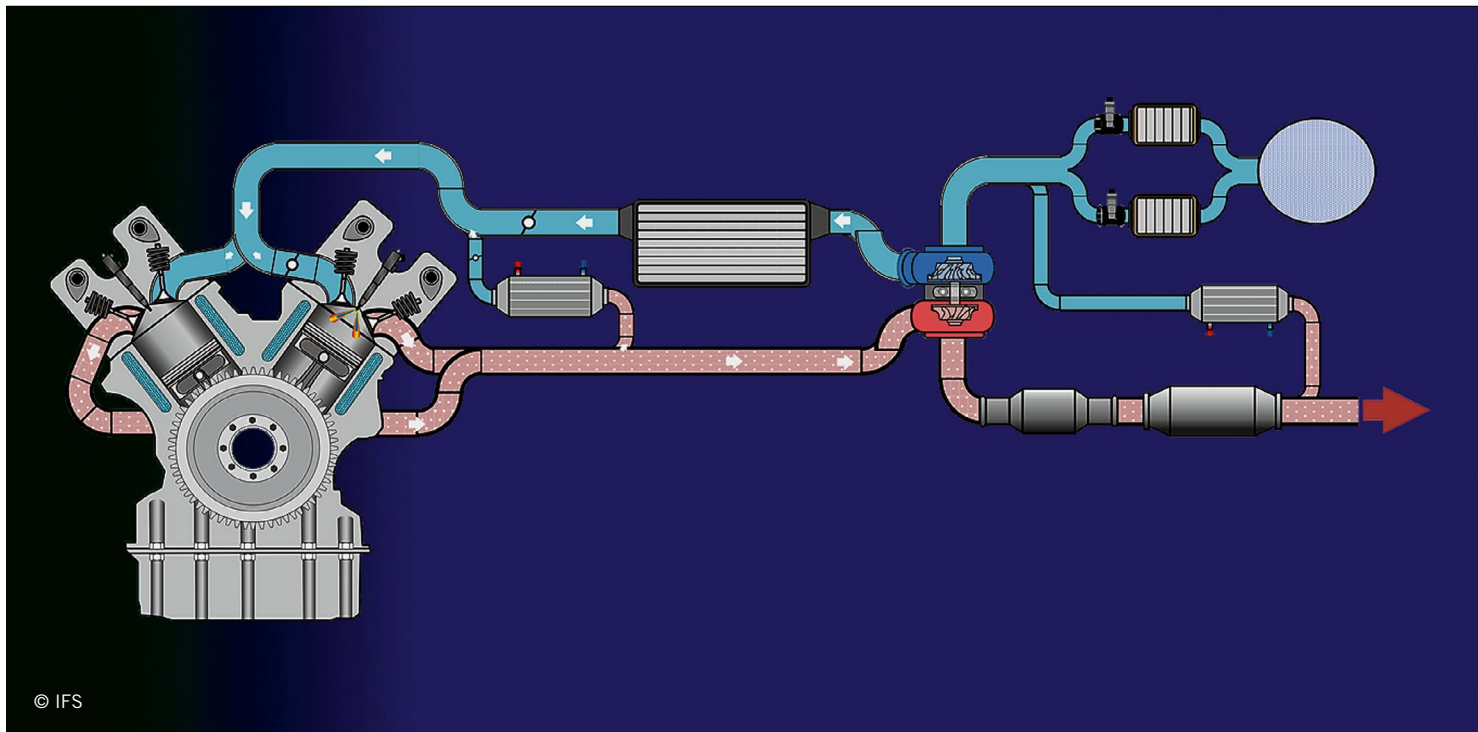
**Jan Klingenstein, M. Sc.**  
ist Funktions- und Softwareentwicklungsingenieur im Bereich autonomes Fahren bei der Robert Bosch GmbH in Abstatt.



**Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende**  
war Inhaber des Lehrstuhls Fahrzeugantriebssysteme am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart.

## Elektrifizierung des teilhomogenen Dieselmotors

Die Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe birgt großes Potenzial, um den Ausstoß von Schadstoffen und Treibhausgasen zu verringern. Im Rahmen des FVV-Forschungsvorhabens Nr. 1312 wurde an der Universität Stuttgart die Kombination aus einem partiell teilhomogenen dieselmotorischen Brennverfahren und einer zusätzlichen Hybridisierung an einem Fahrzeugkonzept untersucht. Das modifizierte Brennverfahren kann dabei in großem Maße von der erhöhten Bordnetzspannung eines Hybridantriebsstrangs profitieren.



© IFS

1	MOTIVATION
2	SIMULATION UND MODELLIERUNG DES FAHRZEUGKONZEPTS
3	ERGEBNISSE
4	ZUSAMMENFASSUNG

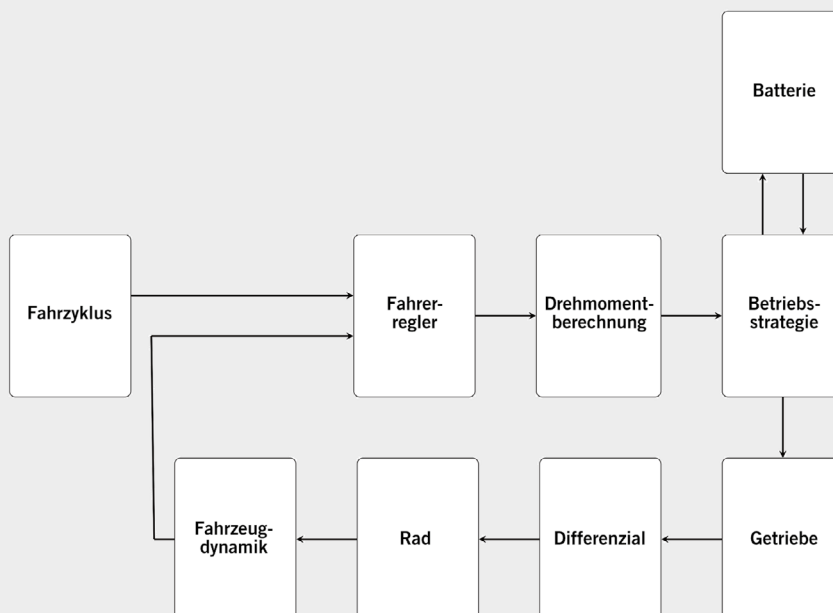
## 1 MOTIVATION

Die partiell teilhomogene Dieselverbrennung (Partial Homogeneous Charge Compression Ignition, PHCCI) ermöglicht zwar die Entschärfung der Ruß-NO<sub>x</sub>-Schere, ein optimaler Betrieb kann jedoch nur in einem engen Kennfeldbereich und bei geringen Drehmomentgradienten gewährleistet werden. Die durch die homogene Verbrennung ansteigenden Kohlenstoffmonoxid(CO)- und Kohlenwasserstoff(HC)-Emissionen stehen im direkten Konflikt zu den strengen Grenzwerten [1]. Durch den zusätzlichen Freiheitsgrad dank der Elektrifizierung des Antriebsstrangs kann sowohl die Betriebsdauer im partiell teilhomogenen Bereich erweitert als auch eine Entschärfung der Drehmomentgradienten erreicht werden. Die erhöhte Bordnetzspannung und der zweite Energiespeicher ermöglichen den Einsatz eines elektrisch beheizten Katalysators zur Reduktion der CO- und HC-Emissionen. Das am Institut für Fahrzeugtechnik (IFS) durchgeführte Forschungsprojekt soll mithilfe einer speziell auf den Anwendungsfall angepassten Betriebsstrategie neben der Emissionsreduzierung zusätzlich eine Verbrauchsreduzierung erzielen, wodurch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Antriebsstrangkonzpts sinkt.

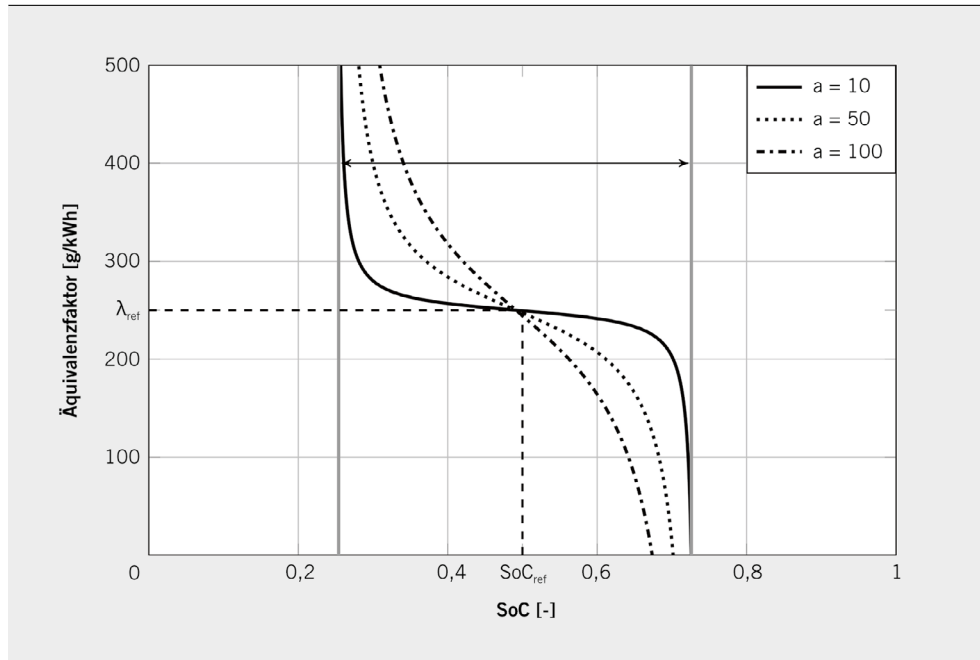
## 2 SIMULATION UND MODELLIERUNG DES FAHRZEUGKONZEPTS

Um die Emissionierung des Antriebskonzepts experimentell bestimmen zu können, wird eine vollständige Modellierung und Simulation benötigt. Dadurch können die benötigten Drehmoment-/Drehzahlkurven am Prüfstand erzeugt werden. Um realitätsnahe Lastanforderungen zu gewährleisten, wird ein sogenanntes Vorwärtsmodell eingesetzt, bei dem die Drehmomentanforderung durch einen Fahrerregler aus der Differenz zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit berechnet wird. Mit einem Modul werden im Fahrzyklus dieses Modells verschiedene Drehmomentkombinationen zwischen elektrischer Maschine (EM) und Verbrennungsmotor (VM) berechnet, die der durch den Fahrerregler gestellten Lastanforderung genügen. In der Betriebsstrategie muss automatisiert entschieden werden, mit welcher Drehmomentkombination und in welchem Gang das Hybridfahrzeug bewegt wird. Nicht nur hierfür muss der Ladezustand der Batterie simulativ bestimmbar sein, sondern auch für die elektrische Katalysatorsbeheizung. Das dafür speziell entwickelte Temperaturmodell kann die Abgastemperatur des Antriebskonzepts und die Zuheizperioden und die damit aufzubringende elektrische Energie präzise abbilden [2]. Aus der von der Betriebsstrategie ausgewählten Drehmoment-/Drehzahlkombination wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs über Getriebe, Differenzial, Rad und Längsdynamikmodell bestimmt und erneut mit der geforderten Geschwindigkeit des Zyklus im Fahrerregler verglichen, **BILD 1**.

Da der eingesetzte Motor über einen Kennfeldbereich sowohl mit teilhomogener Verbrennung als auch mit diffuser Dieselverbrennung verfügt, werden zwei Optimierungsansätze verfolgt. Im normalen diffusiven dieselmotorischen Betrieb wird eine Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) eingesetzt. Die ECMS entspricht einem klassischen mathematischen Optimie-



**BILD 1** Schematische Darstellung des Vorwärtsmodells (© IFS)



**BILD 2** Mit Tangensansatz modulierter Äquivalenzfaktor (© IFS)

rungsalgorithmus, der im vorgestellten Anwendungsfall den Verbrauch des Fahrzeugs minimiert. Dafür wird ein Gesamtverbrauch aus dem Energiebedarf der EM und dem Kraftstoffverbrauch des VMs berechnet. Den zuvor berechneten Drehmomentkombinationen kann damit ein kumulierter Verbrauch zugeordnet und der Bestpunkt ausgewählt werden. Der elektrischen Energie  $P_{EM}$  wird mittels eines Umrechnungsfaktors  $\lambda$  ein Kraftstoffverbrauch zugeschrieben, Gl. 1.

$$\text{Gl. 1} \quad \dot{m}_{total} = \dot{m}_{VM} + \lambda \cdot P_{EM}$$

Ein konstanter Umrechnungsfaktor führt entweder zu einer geringen Ausnutzung der Batteriekapazität oder zu einer simulativen Entladung über die physikalisch möglichen Grenzen hinaus. Im Simulationsmodell wird der Proportionalitätsfaktor deshalb über eine Tangensfunktion moduliert. Nähert sich die Batterieladung den vorher definierten Grenzen an, so strebt der Faktor gegen plus oder minus unendlich. Für die ECMS folgt daraus, dass ein Betrieb der EM bei annähernd voller Batterie sehr günstig und bei annähernd leerer Batterie sehr teuer wird. Die Simulation zeigt durch die Modulierung eine weit verbesserte Ausnutzung des Ladebands sowie eine konsequente Einhaltung der Ladungsgrenzen. In Gl. 2 ist die Tangensfunktion dargestellt [3]. Die Konstante  $SoC_{ref}$  steht für die Referenzbatterieladung, also 50 % State of Charge (SoC), und  $SoC_{sma}$  für den gemittelten Ladungszustand der letzten 10 s. Die Faktoren  $\lambda_{ref}$ ,  $K_p$ ,  $\alpha$  und  $b$  können variiert werden, um die Gestalt der Tangensfunktion zu beeinflussen, wobei  $b$  die Bandbreite definiert, in der die Batterie eingesetzt wird.

$$\text{Gl. 2} \quad \lambda(t) = \lambda_{ref} + K_p \cdot (SoC_{ref} - SoC_{sma}) - \alpha \cdot \tan\left(\frac{\pi}{b+0,02} \cdot (SoC(t) - SoC_{ref})\right)$$

**BILD 2** zeigt den Verlauf des mittels des Tangensansatz modulierten Umrechnungsfaktors und das Verhalten an den Grenzen beispielhaft auf.

Beim zweiten Ansatz der Phlegmatisierung wird der VM mit möglichst geringer Schadstoffemission betrieben. Bei Lastanforderung im teilhomogenen Bereich, also zwischen 850 und 2400/min und einem Drehmoment zwischen 0 und 55 Nm, wird die Drehmomentanforderung phlegmatisiert. Die dadurch geringeren Gradienten im Luftpfad des VMs führen zu einem reduzierten Ausstoß von HC und CO. Liegt das angeforderte Drehmoment in einem engen Band oberhalb der teilhomogenen Betriebsgrenze, wird der VM bei einem konstanten Drehmoment von 55 Nm betrieben und die EM bringt das zusätzlich geforderte Moment auf, was ebenfalls einen geringeren Ausstoß an Schadstoffen sicherstellt.

### 3 ERGEBNISSE

Die Messungen werden an einem modifizierten V6-Dieselmotor (OM642) mit Forschungssteuergerät durchgeführt. Der Luftpfad ist um eine Niederdruckabgasrückführungsstrecke erweitert worden. Das reduzierte Verdichtungsverhältnis von  $\epsilon = 15,5$  kommt der teilhomogenen Verbrennung zugute, da geringer Zylinderdruck und -temperatur in der Verdichtungsphase vorherrschen, wodurch sich die Zündverzugszeit und die damit verbundene Homogenisierung erhöht. Durch das Steuergerät wird eine teilhomogene Verbrennung für den unteren Lastbereich (mit indiziertem Mitteldruck bis 4 bar und Drehzahlen von 850 bis 2400/min) umgesetzt. Oberhalb des PHCCI-Bereichs schließt sich die konventionelle diffusive Verbrennung an. Bei der PHCCI-Verbrennung führt die reduzierte Abgastemperatur im Vergleich zur diffusiven Verbrennung zu höheren HC-/CO-Emissionen. Für ein schnelleres Erreichen der Light-off-Temperatur wird der Serienkatalysator durch einen elektrisch beheizten Katalysator ersetzt. Motor- und Katalysatordaten sind in **TABELLE 1** aufgeführt.

Motordaten		
Beschreibung	Kenndaten	Einheit
Bauform/Bankwinkel	V6/72	-/°
Hubraum	2987	cm <sup>3</sup>
Bohrung × Hub	83 × 92	mm
Zylinderabstand	106	mm
Pleuellänge	168	mm
Verdichtung	15,5 : 1	-
Nennleistung	68	kW
bei Drehzahl	2400	1/min
Max. Drehmoment	270	Nm
bei Drehzahl	2200-2400	1/min
Katalysatordaten		
Beschreibung	Kenndaten	Einheit
Zelldichte	400	cpsi
Matrixdurchmesser	143	mm
Außendurchmesser	146	mm
Länge der Matrix	90	mm
Querschnittsfläche	160	cm <sup>2</sup>
Wandstärke des Mantels	1,50	mm
Folienstärke	40	µm
Aktive Metallschicht	10	g/ft <sup>3</sup>
Heizleistung	4,5	kW

TABELLE 1 Kenndaten des Motors und des elektrisch beheizten Katalysators (© IFS)

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen werden am Auslass der Turbine und die HC- und CO-Emissionen am Auslass des Dieselpartikelfilters gemessen. Die Rußemissionen werden mit einem AVL Micro Soot Sensor gemessen, der zwischen dem Turbolader und dem Katalysator angebracht ist. Das Konzept des Hybrid Electric Vehicle (HEV) besteht aus einem 48-V-System mit einer EM, einem elektrisch beheiztem Katalysator, der PHCCI-Verbrennung im unteren Lastbereich und diffusiver Verbrennung im darüber liegenden Lastbereich sowie der Phlegmatisierung des VMs. Die für den Prüfstand notwendigen Drehmoment- und Drehzahlprofile werden durch die eigens entwickelte Antriebsstrangsimulation mit den parallel agierenden Betriebsstrategien ECMS und Phlegmatisierung erzeugt. Das Drehzahl-/Drehmomentprofil des VMs wird auf dem Prüfstand nachgefahren. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen am Worldwide harmonized Light-duty vehicle Test Cycle (WLTC) Class 3 für das HEV-Konzept und für ein konventionelles Fahrzeug mit diffusiver Dieselerverbrennung erläutert.

In BILD 3 ist der Vergleich der VM-Betriebspunkte des konventionellen Fahrzeugs und des HEVs dargestellt. Die Mehrzahl der Betriebspunkte des HEVs werden durch die Unterstützung der EM und der Phlegmatisierung in den PHCCI-Bereich verschoben. Der hohe Anteil des elektrisch unterstützten Fahrens wirkt sich in einem höheren Drehmomentbedarf für das Aufladen der Batterie aus: Die meisten Betriebspunkte außerhalb des PHCCI-Bereichs liegen zwischen 100 und 200 Nm. Im Drehmomentbereich zwischen 60 und 100 Nm befinden sich hingegen nur wenige Betriebspunkte. Das konventionelle Fahrzeug weist eine deutlich stärkere Streuung über das gesamte Motorkennfeld auf.

Die Drehmomentprofile in BILD 4 zeigen den Einfluss der EM und der Phlegmatisierung. Für den Fall des konventionellen Fahrzeugs arbeitet der VM stark transient. Im HEV-Konzept kann der VM mithilfe der EM phlegmatisiert und somit weniger transient betrieben werden. Im Zeitabschnitt zwischen 1200 und 1350 s

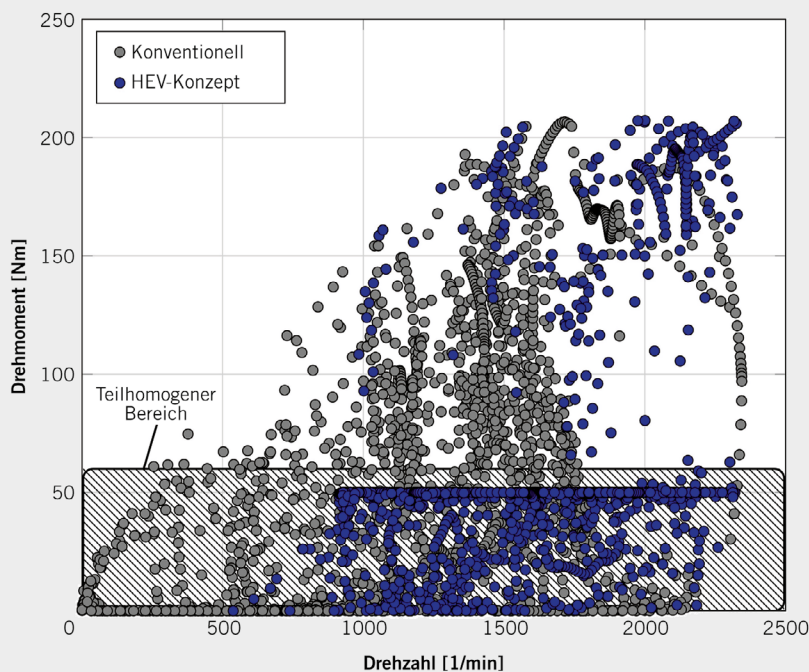
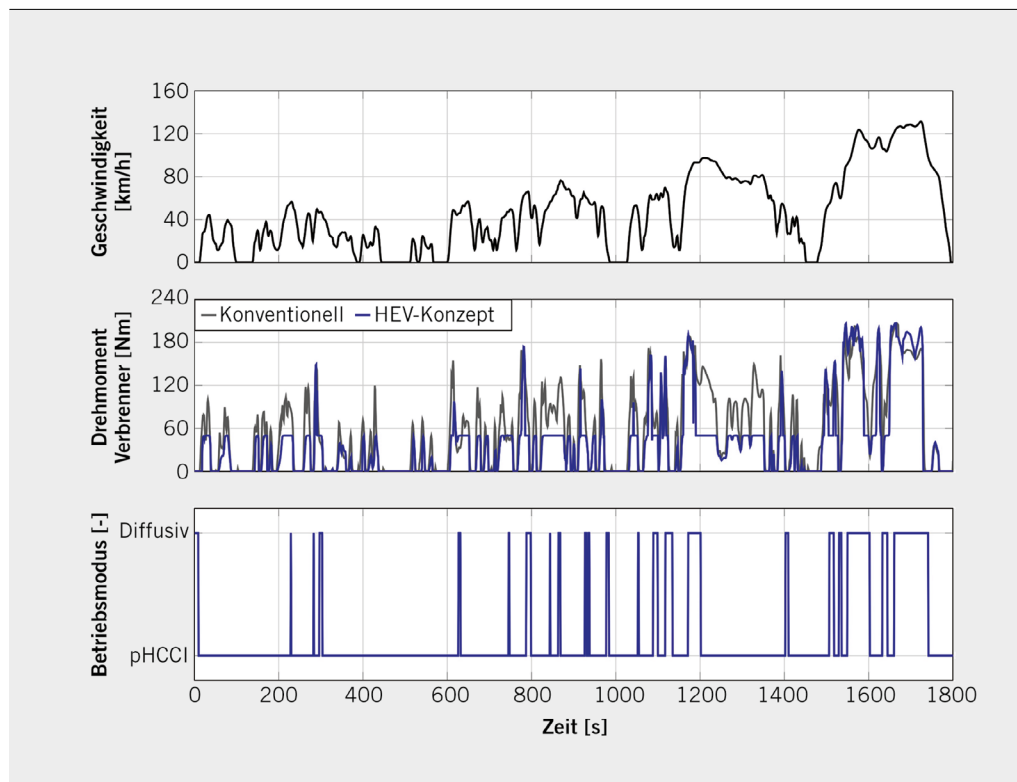


BILD 3 Betriebspunkte des VMs am WLTC: konventionelles Fahrzeug versus HEV-Konzept (© IFS)



**BILD 4** Geschwindigkeiten (oben) und Betriebsmodi (unten) des VMs am WLTC mit Gegenüberstellung der Drehmomente des konventionellen Fahrzeugs und des HEV-Konzepts (Mitte) (© IFS)

zeigt sich beispielhaft die deutliche Ausbildung von Plateaus im Drehmomentenprofil. Der VM arbeitet über einen langen Zeitraum auf demselben Drehmomentniveau, was zu weniger Eingriffen der Druckgradientenregelung und damit zu einer geringeren Verschiebung der Verbrennung in die Expansionsphase führt. Im unteren Diagramm der **BILD 4** ist der höhere Anteil des PHCCI-Verfahrens gegenüber dem diffusiven zu erkennen. Der VM kann über lange Zeiträume im PHCCI-Modus betrieben werden, ohne dass dieser in den diffusiven Modus wechselt.

In **TABELLE 2** werden die spezifischen Emissionen für NO<sub>x</sub>, Ruß, CO und HC des konventionellen Fahrzeugs mit diffusiver Dieselverbrennung und die des HEV-Konzepts gegenübergestellt. Die Auswertung zeigt, dass alle vier Emissionsarten im WLTC deutlich reduziert werden konnten. Durch den elektrisch beheizten Katalysator wird eine drastische Reduktion der CO- und HC-Emissionen von 97,86 beziehungsweise 42,48 % erzielt. Die EM und die Phlegmatisierung reduzieren die Emissionen von Ruß um 74,89 % und von NO<sub>x</sub> um 14,71 %. Werden die NO<sub>x</sub>-Emissionen

ohne Berücksichtigung der Hochgeschwindigkeitsphasen betrachtet, emittiert das HEV-Konzept 51,0 gegenüber 224,25 mg/km des konventionellen Fahrzeugs. Dies entspricht einer Reduktion von 77,26 %.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswertung der Messungen am WLTC zeigen, dass durch die Phlegmatisierung der Drehmomentenbedarf an den VM sinkt und die Verbrennungsregelung weniger oft eingreifen muss. Es bilden sich Drehmomentplateaus aus, wodurch geringere Lastgradienten des VMs resultieren. Dadurch reduzieren sich die Zylinderdruckgradienten und eine weniger starke Verschiebung des Brennbeginns in Richtung der Expansionsphase ist die Folge. Durch die Phlegmatisierung kann eine erhöhte Betriebszeit innerhalb des teilhomogenen Bereichs festgestellt werden.

Das HEV-Konzept kann mit Phlegmatisierung und elektrisch beheiztem Katalysator eine deutliche Senkung aller Schadstoff-

Fahrzeugkonzept	NO <sub>x</sub>	Ruß	CO	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (Total Hydrocarbons, THC)	Einheit	Kraftstoffverbrauch	Einheit
Konventionelles Fahrzeug	508,87	145,51	462,97	75,78	mg/km	6,65	l/100 km
HEV	434	36,54	9,93	43,59	mg/km	6,13	l/100 km
Änderung	-14,71	-74,89	-97,86	-42,48	%	-7,82	%

**TABELLE 2** Spezifische Emissionen und Kraftstoffverbrauch am WLTC (© IFS)

emissionen erzielen. Besonders in Bereichen niedriger Geschwindigkeit werden durch hohe Phlegmatisierung Ruß und NO<sub>x</sub> signifikant reduziert. Durch den Einsatz des elektrisch beheizten Katalysators werden die CO- und HC-Emissionen bei geringem elektrischem Bedarf drastisch minimiert. Das HEV-Konzept kann nicht nur alle Emissionen über den WLTC reduzieren, es spielt seine Stärken vor allem in städtischen Phasen aus. Die Verlagerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hochgeschwindigkeitsphasen begünstigt die selektive katalytische Reduktion, da in diesen Phasen die notwendigen heißen Betriebstemperaturen bereits erreicht werden. Zudem kann der Kraftstoffverbrauch des HEV im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug um 7,82 % gesenkt werden konnte, **TABELLE 2**.

#### LITERATURHINWEISE

- [1] Skarke, P.; Auerbach, C.; Bargende, M.; Berner, H.-J.: Multivariable air path and fuel path control for a Diesel engine with homogeneous combustion. 17. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 2017
- [2] Schneider, A.; Klingenstein, J.; Berner, H.-J.; Bargende, M.: Empirical Temperature Modelling of the Diesel Oxidation Catalyst. 22. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 2022
- [3] Peid, D.; Leamy, M. J.: Dynamic Programming-Informed Equivalent Cost Minimization Control Strategies for Hybrid-Electric Vehicles. In: Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions 135 (2013), Paper Nr. DS-12-1246

## DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1312) wurde am Lehrstuhl Fahrzeugantriebe des Instituts für Fahrzeugtechnik (IFS) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende und Prof. Dr.-Ing André Casal Kulzer sowie am Lehrstuhl Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik des IFS unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. (IGF-Fördernr. 19784 N) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Achim Lechmann (IAV GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



#### READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)



Die digitale  
Unternehmenslizenz



**NEU!**  
Direkt online  
bestellen  
und bis zu  
60% Rabatt  
sichern.

# Fundiertes Fachwissen für Ihr Team!

Wir beraten Sie gern:

Ramona Wendler

Tel. 0611 7878-126 | [magazinlizenzen@springernature.com](mailto:magazinlizenzen@springernature.com)



# MTZ