

# Potenziale von Luftpfadvariabilitäten für zukünftige Nfz-Gasmotoren zur Effizienzsteigerung und Emissionsabsenkung

Bei Nutzfahrzeugen dominiert nach wie vor der Dieselantrieb. Erdgas bietet durch das verringerte Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis ein hohes Potenzial zur Minderung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Beim stöchiometrischen Brennverfahren existieren einige Nachteile, denen mit einem geeigneten Technologiemix begegnet werden kann. Im FVV-Forschungsvorhabens (Nr. 1346) wurde an der TU Braunschweig an einem Nutzfahrzeugmotor eine Evaluierung der Technologiekombinationen AGR, Miller-Brennverfahren sowie Wassereinspritzung durchgeführt.

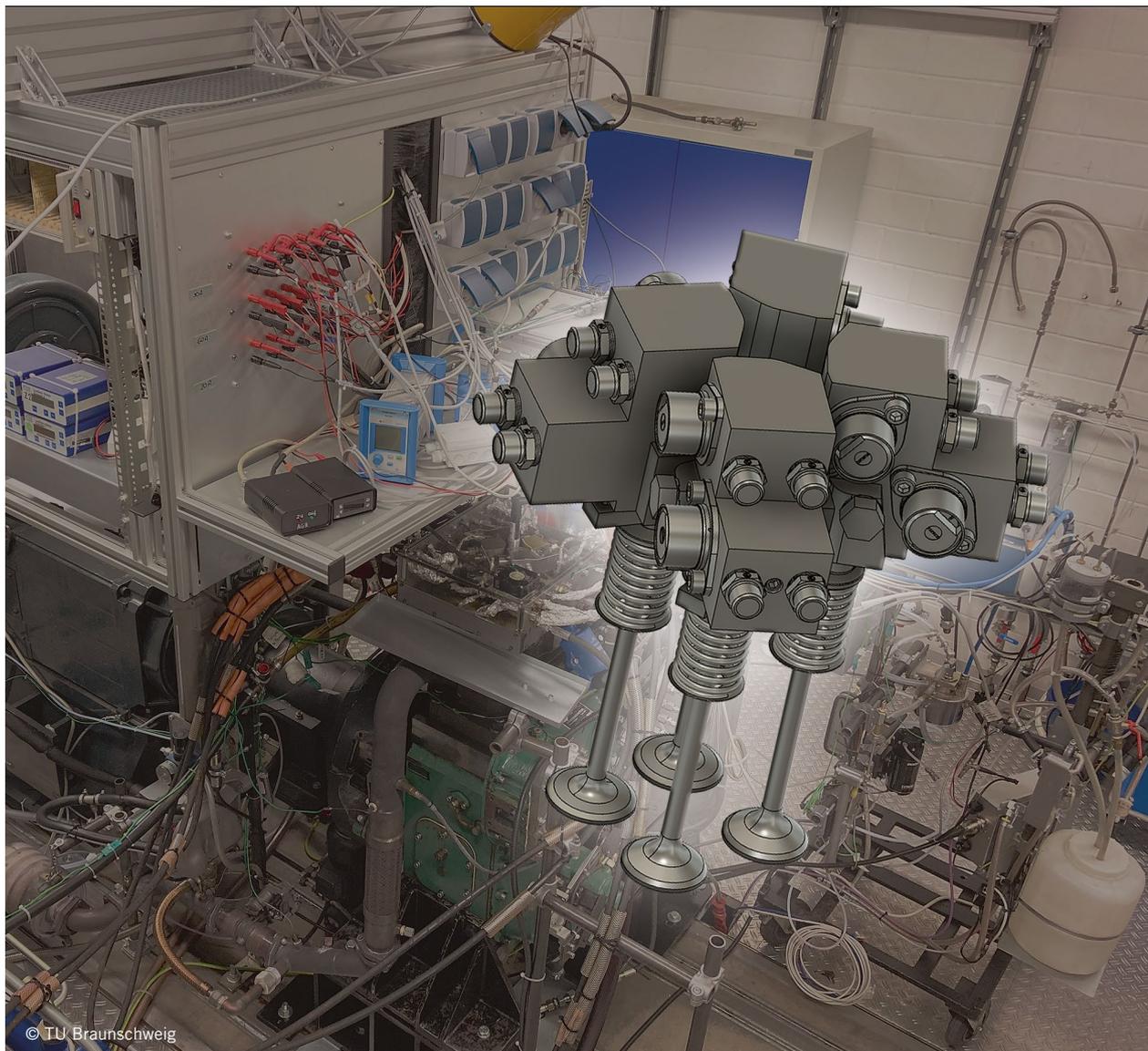
VERFASST VON



**Marius Betz, M. Sc.** war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Brennstoffzellen (ivb) der TU Braunschweig.



**Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts** ist Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Brennstoffzellen (ivb) der TU Braunschweig.



© TU Braunschweig

## 1 MOTIVATION

## 2 ZIELSETZUNG UND METHODIK

## 3 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

## 4 EINFLUSS VON AGR UND MILLERN

## 5 OPTIMIERTE APPLIKATION

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

### 1 MOTIVATION

Die stöchiometrische Erdgasverbrennung bietet mit der Abgasnachbehandlung durch einen Dreiwegekatalysator hohes Potenzial zur angestrebten CO<sub>2</sub>-Emissionsreduzierung. Zum einen wird durch das geringere Kohlenstoff-Wasserstoff(C/H)-Verhältnis im Vergleich zum herkömmlichen Kraftstoff weniger CO<sub>2</sub> emittiert, zum anderen können damit auch die derzeit strengsten NO<sub>x</sub>-Gesetzgebungen eingehalten werden. Jedoch bietet dieses Brennverfahren Nachteile, wie zum Beispiel die Klopfbegrenzung und Drosselverluste. Als bekannte Gegenmaßnahmen sind insbesondere nachfolgende Schlüsseltechnologien zu nennen:

- Abgasrückführung (AGR)
- Miller-Steuerzeiten (Early Intake Valve Closure, EIVC)
- Wassereinspritzung (Water Injection, WI).

Durch die Minderung der Klopfneigung kann neben der Frühverstellung der Verbrennung auch das Verdichtungsverhältnis weiter erhöht werden, was zu einem Wirkungsgradanstieg beiträgt und damit das CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungspotenzial erhöht. Die verlängerten Brenndauern können durch potente Zündsysteme oder verbesserte Ladungsbewegung verringert werden. Der resultierende Ladedruckbedarf muss durch ein geeignetes Aufladesystem zur Verfügung gestellt werden.

### 2 ZIELSETZUNG UND METHODIK

Ziel des Vorhabens war es, das genannte Maßnahmenpaket zu evaluieren. Ein Einzylinder-Nfz-Dieselmotor mit variablem Ventiltrieb [1, 2] wurde in einen stöchiometrischen Nfz-Gasmotor umgebaut und mit Hochdruck(HD)-AGR, WI und einem turbulenzgenerierenden Kolben ausgestattet, **TABELLE 1**. Zu Beginn der Untersuchungen wurden wichtige Betriebspunkte eines Nfz-Motors identifiziert. Um die Versuchsmatrix zu minimieren, fanden Voruntersuchungen zum Dralleinfluss und zu verschiedenen Zündkerzen statt. In den Hauptuntersuchungen wurden die AGR-Raten, die Einlassventilschließzeiten, die WI-Einspritzmenge und das Verdichtungsverhältnis variiert. Die Versuche fanden sowohl isoliert als auch in Kombination statt, um Effekte und mögliche Quereinflussungen herausarbeiten zu können.

Im Anschluss wurden die Messdaten einer Druckverlaufsanalyse unterzogen. Mittels Verlustanalyse konnten die thermodynamischen Vor- und Nachteile quantifiziert werden. Auch wurden die Ergebnisse der Druckverlaufsanalyse verwendet, um ein prädiktives Verbrennungsmodell (SI Turb) und das Klopfmodell nach Urban [3] zu kalibrieren und zu validieren. Dadurch konnte die Verbrennung des Einzylindermotors simulativ auf einen Vollmotor übertragen werden. MAN Truck & Bus hatte dazu ein Vollmotormodell des MAN E18 mit serienmäßiger Aufladegruppe zur Verfügung gestellt, **TABELLE 1**. Das Vorgehen ist in **BILD 1** und die Validierung des Verbrennungsmodells in **BILD 2** dargestellt.

Einzylindermotor		Einheit
Basismotor	AVL FM520	-
Aufbau	MAN D20	-
Anzahl Zylinder	1	-
Bohrung	120	mm
Hub	140	mm
Hubraum/Zylinder	1583	cm <sup>3</sup>
Geometrisches Verdichtungsverhältnis	12,2; 13,2 ; 14,2	-

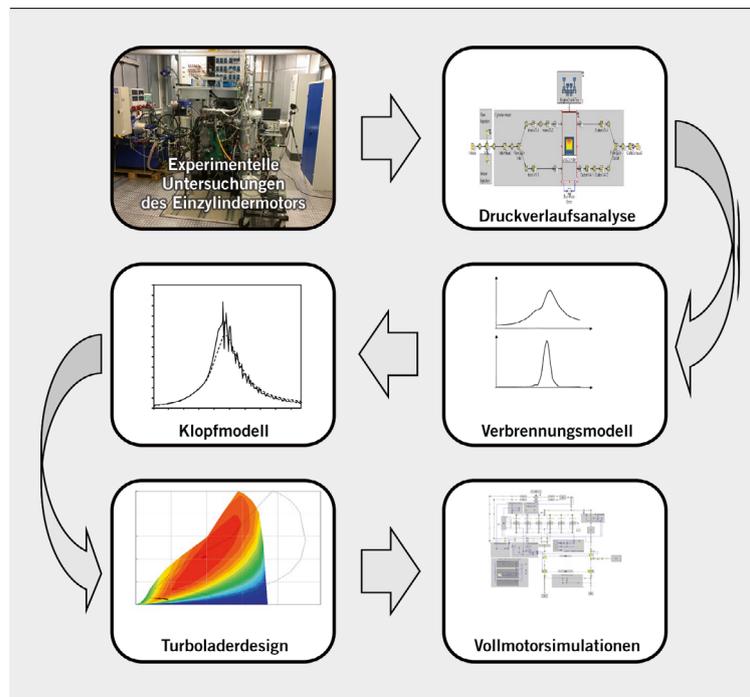
  

Vollmotor		Einheit
Aufbau	MAN E18	-
Anzahl Zylinder	6	-
Bohrung	118	mm
Hub	145	mm
Hubraum/Zylinder	1586	cm <sup>3</sup>
Geometrisches Verdichtungsverhältnis	13	-

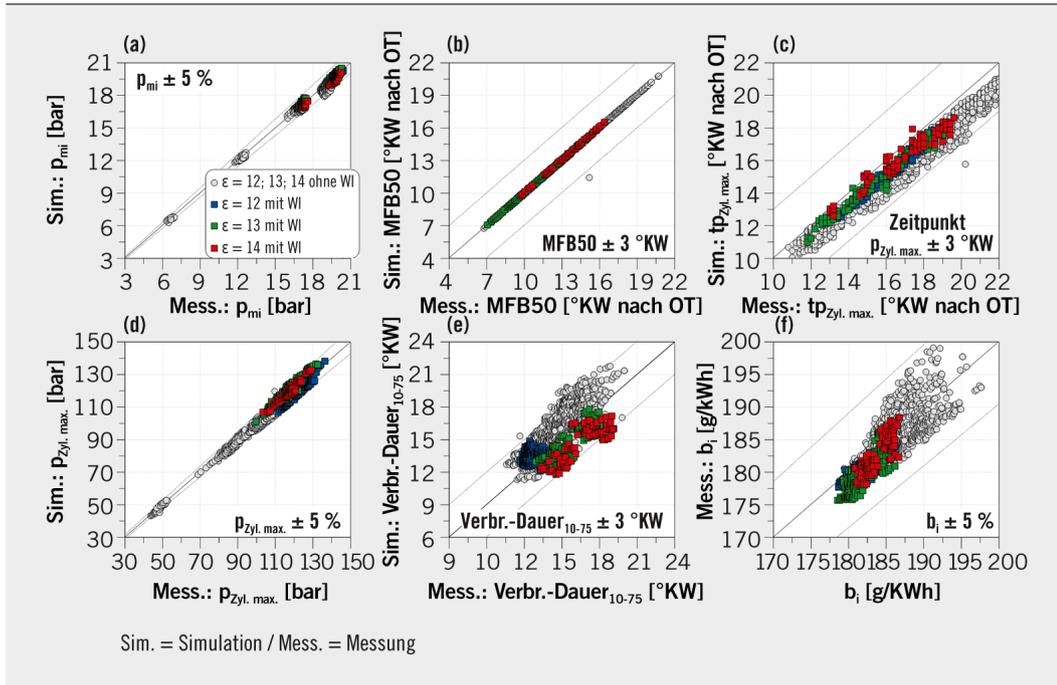
**TABELLE 1** Technische Daten des Einzylindermotors und des untersuchten Vollmotors [4] © TU Braunschweig

### 3 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

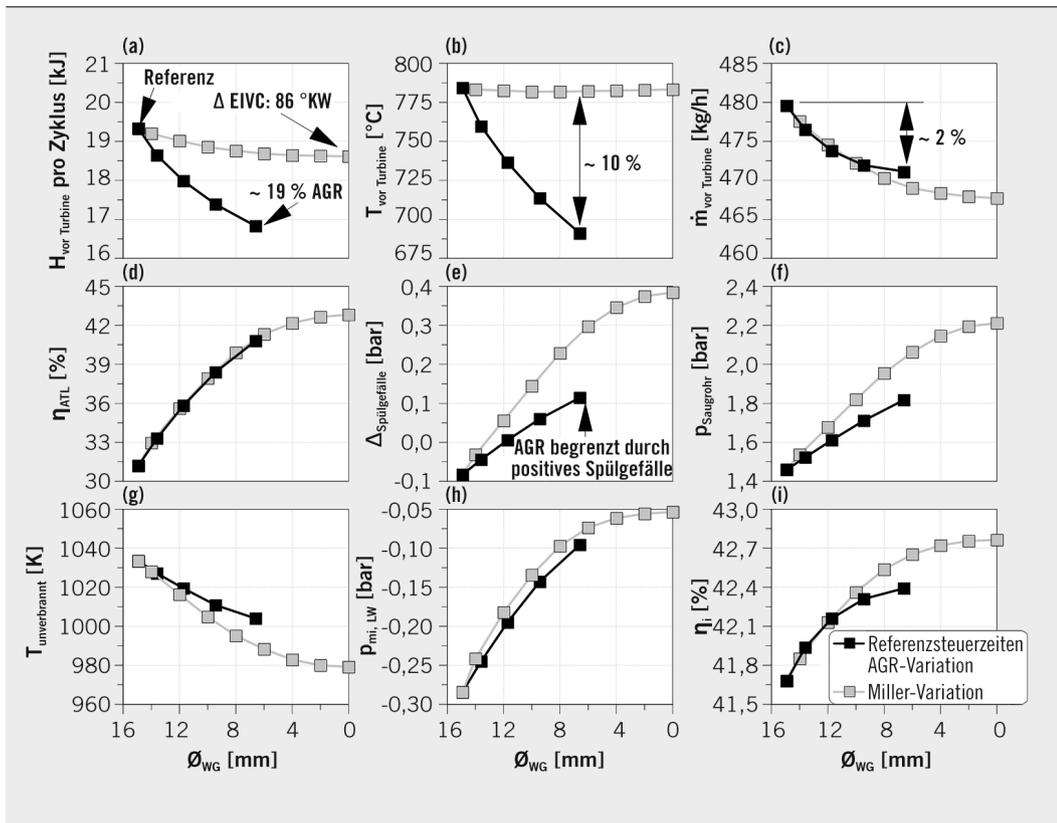
Die experimentellen Ergebnisse – ausführlicher in [5, 6] – spiegeln die Erkenntnisse aus der Literatur wider: Es konnte festgestellt werden, dass eine Vorkammerzündkerze zur Vorentflammung führt und eher für Niedriglastanwendungen geeignet ist. Auch zeigte sich, dass hoher Drall und eine intensive Quetschströmung zu höheren



**BILD 1** Schematische Darstellung der Methodik im umgesetzten Projekt © TU Braunschweig



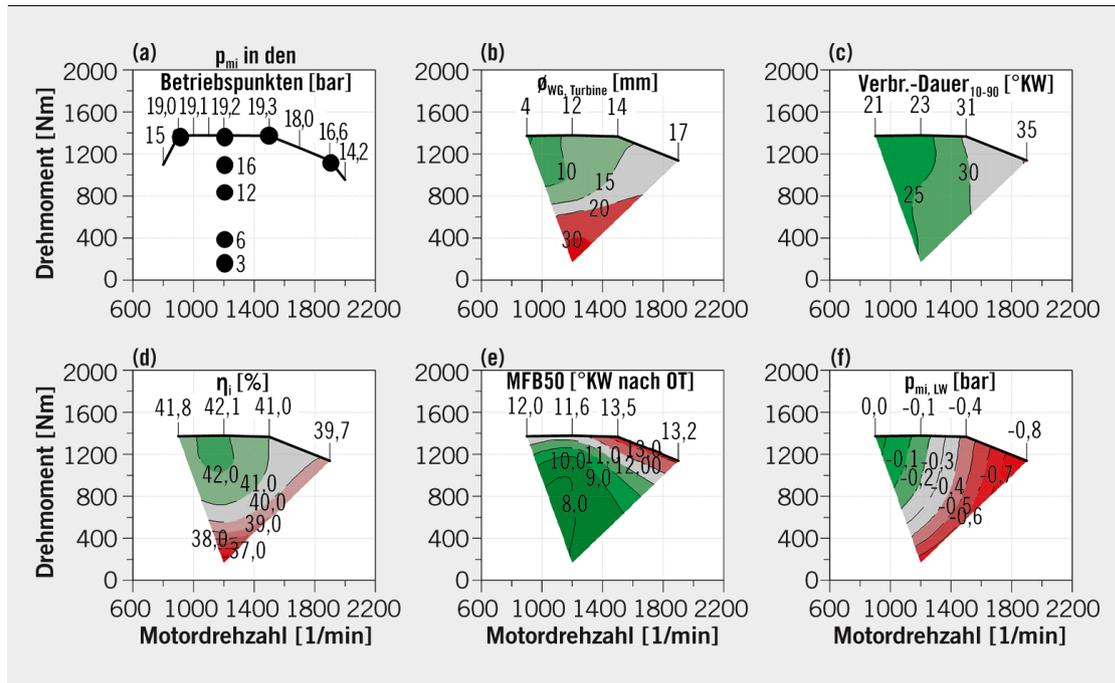
**BILD 2** Validierung des prädiktiven Verbrennungsmodells durch Messung und Simulation: (a)  $p_{mi}$ ; (b) MFB50; (c) Kurbelwinkel bei maximalem Zylinderdruck ( $tp_{Zyl.max}$ ); (d) maximaler Zylinderdruck ( $p_{Zyl.max}$ ); (e) Verbrennungsdauer von MFB10 bis MFB75 (Verbr.-Dauer<sub>10-75</sub>); (f) indizierter spezifischer Kraftstoffverbrauch ( $b_i$ ) © TU Braunschweig



**BILD 3** Simulative Variation der externen HD-AGR-Rate (Referenzsteuerzeiten) und Miller-Steuerzeiten (EIVC) mit serienmäßiger Aufladung bei 1200/min;  $p_{mi} = 16$  bar;  $\epsilon = 13$ ;  $\lambda = 1$ ; (a) Enthalpie (H), EIVC- und AGR- Variation; (b) Temperatur vor der Turbine ( $T_{vor Turbine}$ ); (c) Massenstrom vor der Turbine ( $\dot{m}_{vor Turbine}$ ); (d) Wirkungsgrad des ATLs ( $\eta_{ATL}$ ); (e) Spülfälle ( $\Delta p_{Spülfälle}$ ); (f) Druck im Saugrohr ( $p_{Saugrohr}$ ); (g) Temperatur im Unverbrannten ( $T_{unverbrannt}$ ); (h) Ladungswechselarbeit ( $p_{mi, LW}$ ); (i) indizierter Wirkungsgrad ( $\eta_i$ ) © TU Braunschweig

Wandwärmeverluste führt. Sowohl AGR als auch eine variable Ventilsteuerung sind notwendig, um eine komplette Entdrosselung im frequentierten Autobahnpunkt (mit indiziertem Mitteldruck  $p_{mi} \sim 6$  bar) zu erreichen. AGR ist hier aufgrund der verbesserten Fluideigenschaften und geringeren Wandwärmeverluste effizienz-

mäßig leicht im Vorteil, weist allerdings höhere Kohlenwasserstoffemissionen auf. Millern hat einen nicht so großen Einfluss auf Abgastemperatur und Emissionen und ist deshalb vermutlich in Hinblick auf zukünftige Gesetzgebungen insbesondere beim Kaltstart von Interesse.



**BILD 4** Simulative Ergebnisse der Basiskonfiguration ( $\epsilon = 13$ ) mit Referenzsteuerzeiten (Einlassschluss bei 550 °KW nach OT) und serienmäßiger Aufladung: (a)  $p_{mi}$  in den Betriebspunkten; (b) WG-Durchmesser; (c) Verbrennungsdauer von MFB10 bis MFB90 (Verbr.-Dauer $_{10-90}$ ); (d) indizierter Wirkungsgrad ( $\eta_i$ ); (e) MFB50; (f) Ladungswechselarbeit ( $p_{mi, LW}$ )  
© TU Braunschweig

Im oberen Lastbereich konnten sowohl durch AGR, durch den Miller-Zyklus als auch durch WI die Schwerpunktlagen der Verbrennung verbessert und dadurch das Verdichtungsverhältnis erhöht werden. Hier zeigte sich, dass die WI den größten Einfluss auf die Schwerpunktlagen, aber den geringsten Ladedruckmehrbedarf hat. Der Miller-Zyklus weist ebenfalls im Vergleich zur AGR einen Vorteil bei der Verschiebung der Klopfgrenze auf, was auf geringere Temperaturen im Unverbrannten zurückgeführt werden kann. AGR zeigt verbesserte Fluideigenschaften, geringere Wandwärmeverluste und geringere  $NO_x$ -Emissionen.

#### 4 EINFLUSS VON AGR UND MILLERN

Auch der Einfluss von AGR und Miller-Steuerzeiten auf den Abgas-turbolader (ATL) wurde simulativ untersucht. Der Ladedruck muss

jeweils erhöht werden. Dies geschieht durch das Schließen des Wastegates (WG), das in der Basiskonfiguration zur Laststeuerung herangezogen wird. Es ist ersichtlich, dass die Abgasenthalpie an der Turbine aufgrund der sinkenden Abgastemperatur mit steigender AGR-Rate abnimmt, **BILD 3** (a). Dementsprechend steht im Vergleich zum Millern weniger Enthalpie für einen Ladedruckaufbau zur Verfügung.

Mit Schließen des WGs steigt der Turbinenwirkungsgrad und damit der Gesamtwirkungsgrad der Aufladung an, **BILD 3** (d). Daraus resultiert ein geringerer Abgasgegendruck, der wiederum zu reduzierten Ladungswechselverlusten führt. Das Spülgefälle wird somit mit zunehmendem Schließen des WGs in großen Teilen des Kennfelds positiv, sodass externe HD-AGR nicht mehr möglich ist, **BILD 3** (e). Dies ist bei 19 % AGR beziehungsweise 6 mm WG-Öffnung der Fall. Beim Millern hingegen kann das WG komplett

## BRANCHEN- VERBUNDEN

Jetzt registrieren:

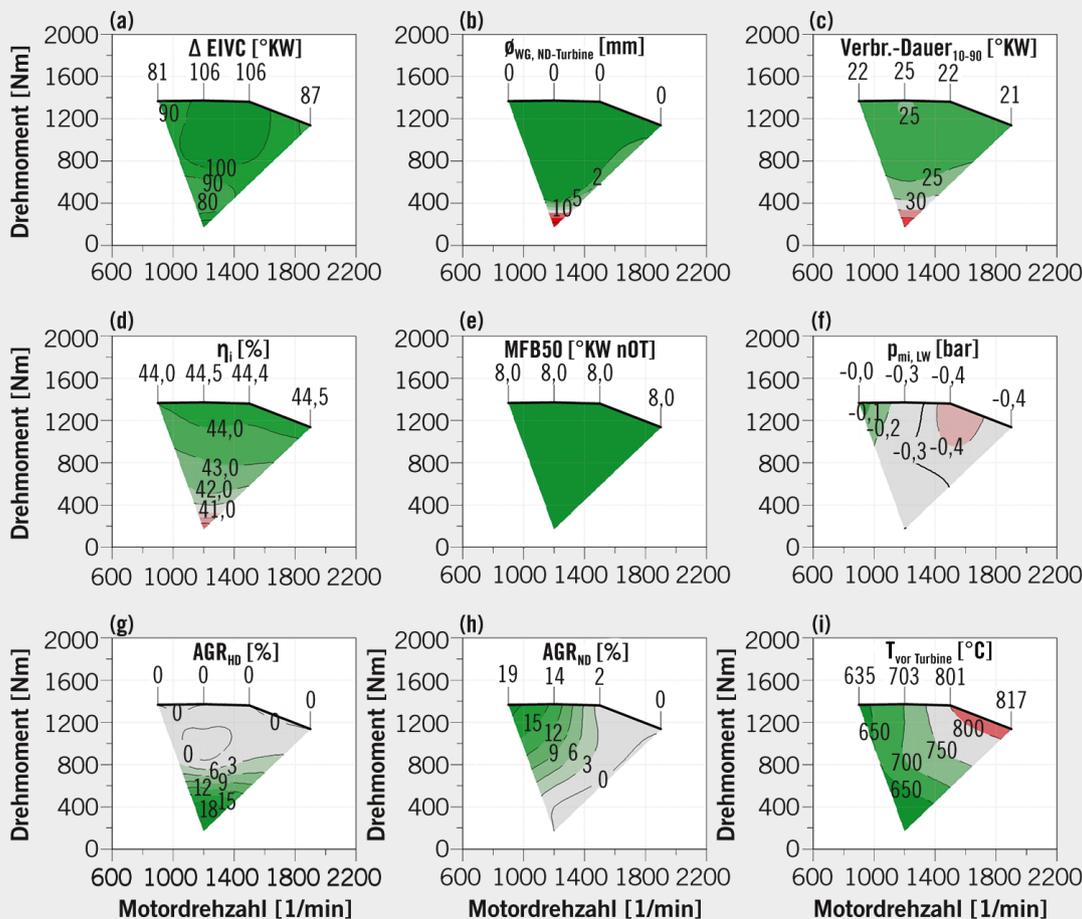
[www.springerprofessional.de/mynewsletters](http://www.springerprofessional.de/mynewsletters)



Der neue Newsletter  
„Kleb- und Dichttechnik“  
von **adhäsion**

Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen Newsletter.

**adhäsion** KLEBEN+  
DICHTEN



**BILD 5** Simulative Ergebnisse der optimierten Konfiguration ( $\epsilon = 15,6$ ) mit Miller-Steuerzeiten, HD- und ND-AGR und zweistufiger Aufladung: (a) Anpassung des EIVCs (im Vergleich zur Referenz); (b) Öffnung des WG der ND-Turbine; (c) Verbrennungsdauer von MFB10 bis MFB90 (Verbr.-Dauer<sub>10-90</sub>); (d) indizierter Wirkungsgrad ( $\eta_i$ ); (e) MFB50; (f) Ladungswechselarbeit ( $p_{mi, LW}$ ); (g) HD-AGR; (h) ND-AGR; (i) Temperatur vor der Turbine © TU Braunschweig

geschlossen werden. Dies führt im Vergleich zur AGR zu einem höheren positiven Spülgefälle, **BILD 3** (e), und damit geringeren Ladungswechselverlusten, aber auch zu niedrigeren Temperaturen im Unverbrannten, **BILD 3** (g). Dies kann wiederum einen positiven Einfluss auf die Klopfneigung haben. Es ist daher vorteilhaft, die Lastregelung vom WG auf das Einlassschließen zu übertragen.

**5 OPTIMIERTE APPLIKATION**

Die Basiskonfiguration, **BILD 4**, wurde hinsichtlich AGR, Miller-Steuerzeiten und Verdichtungsverhältnis optimiert. Bei serienmäßiger Aufladung konnte das Verdichtungsverhältnis durch die Verminderung der Klopfneigung mithilfe des Miller-Verfahrens um zwei Einheiten auf 15 erhöht werden. Hier zeigte sich, dass eine Grenze im Low-End-Torque (LET) existiert, da nicht genügend Ladedruckreserven für das Miller-Verfahren zur Verfügung stehen. Das Resultat sind späte Verbrennungslagen, sodass hier lediglich die Verwendung einer WI in Frage kommt (die hier nicht dargestellt ist).

Ausgehend von der serienmäßigen Aufladung wurde unter Einbeziehung einer Niederdruck(ND)-AGR ein zweistufiges Aufladesystem anhand von Ähnlichkeitsregeln nach Beineke [7] ausgelegt. Dabei wurde die HD- beziehungsweise ND-Stufe im Vergleich zum Original um 14 % verkleinert beziehungsweise vergrößert. Insbeson-

dere durch die kleinere HD-Stufe konnte eine Miller-Früherstellung von  $> 81$  °KW erzielt und damit die Limitierung des Miller-Brennverfahrens im LET aufgehoben werden, **BILD 5** (a). Das geometrische Verdichtungsverhältnis konnte somit auf 15,6 erhöht werden. Im gesamten Kennfeldbereich wurden mit herkömmlichem Erdgas (Methanzahl  $\sim 81,5$ ) optimale Schwerpunktlagen von 8 °KW erzielt, **BILD 5** (e). Die Ladungswechselverluste konnten im Vergleich zur Basiskonfiguration durch die Anhebung des ATL-Wirkungsgrades gesenkt werden, **BILD 5** (f).

Durch die Anhebung des Verdichtungsverhältnisses und durch die frühen Schwerpunktlagen wird im High-End-Torque selbst ohne AGR eine unkritische Abgastemperatur für die Turbine erreicht, **BILD 5** (i). Insbesondere bei hohen Drehzahlen konnte so bei optimalem MFB50 die AGR-Rate reduziert werden. Dies hat im Vergleich zur Basiskonfiguration einen positiven Einfluss auf die Brenndauern und damit den Wirkungsgrad, **BILD 5** (c und d). Auffallend ist die Verteilung der HD- und ND-AGR, **BILD 5** (g und h). Während im oberen Kennfeldbereich die kühlere ND-AGR durch eine Betriebspunktverschiebung im Verdichterkennfeld den ATL-Wirkungsgrad verbessert und einen positiven Effekt auf die Fluideigenschaften sowie Wandwärmeverluste hat, trägt die heißere HD-AGR im unteren Kennfeldbereich zur thermischen Entdrosselung bei. Der Wirkungsgrad kann so im Vergleich zur Basiskonfi-

guration um bis zu 4,8 %-Punkte angehoben werden, was einer relativen Verbesserung von 12 % entspricht. Aber auch im frequentierten Autobahnpunkt kann eine Verbesserung von fast 7 % erzielt werden.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Durch die gesammelten Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Anwendung von AGR, Miller-Steuerzeiten und WI in Kombination möglich ist und damit der Wirkungsgrad bei stöchiometrisch betriebenen Nfz-Gasmotoren signifikant erhöht werden kann. Schon eine einstufige Aufladung bietet mit Miller-Steuerzeiten ein gutes Potenzial zur Steigerung des Wirkungsgrads, das durch eine zweistufige Aufladung nochmal erhöht werden kann. Es wurde gezeigt, dass sich die Technologien abhängig vom Kennfeldbereich teils ergänzen und daher eine Kombination der Maßnahmen nötig ist. Eine variable und möglichst schnelle Ventilsteuerung kann dazu beitragen, die betriebspunktabhängigen Kompromisse aus Fluideigenschaften, Wandwärmeverluste, Schwerepunktlagen und Ladungswechselerluste herauszuarbeiten.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Eilts, P. (Hrsg.): Berichte aus dem ivb. Band 5. Gehrke, S.: Beitrag zum gaspfadseitigen Abgasmanagement an Nutzfahrzeugmotoren. Braunschweig, Technische Universität, Dissertation, Düren: Shaker Verlag, 2015
- [2] Kovács, D.; Eilts, P.: Potentials of the Miller Cycle on HD Diesel Engines Regarding Performance Increase and Reduction of Emissions. SAE Technical Paper Nr. 2015-24-2440, 2015
- [3] Urban, L.; Grill, M.; Hann, S.; Bargende, M.: Simulation of Autoignition, Knock and Combustion for Methane-Based Fuels. SAE Technical Paper Nr. 2017-01-2186, 2017
- [4] Steinert, R.; Köllner, O.; Weidner, M.; Karg, J.; Schallenberg, M.: The New Man Euro VI Gas Engine For City Buses. 13. Tagung Gasfahrzeuge FKFS, Stuttgart, 2019
- [5] Betz, M.; Höweling, N.; Kühne, U.; Eilts, P.: Effects of EGR, Variable Valve Timing, High Turbulence and Water Injection on Efficiency and Emissions of a HD Stoichiometric Natural Gas Engine. SAE Technical Paper Nr. 2021-24-0048, 2021
- [6] Betz, M.; Eilts, P.: Potenziale von Luftpfadvariabilitäten am Nfz-Gas-Motor. Abschlussbericht Nr. 1306, FVV e. V., Frankfurt am Main, 2022
- [7] Beineke, E.: Rechnerische Untersuchung der ein- und zweistufigen Abgas-turboaufladung mittelschnellaufender Viertakt Dieselmotoren. Braunschweig, Technische Universität, Dissertation, 1975

## DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1346) wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen (ivb) der Technischen Universität Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts durchgeführt. Es wurde von der FVV e. V. mit Eigenmitteln finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dipl.-Ing. Dirk Weberskirch (MAN Truck & Bus) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Ein weiterer Dank gilt MAN Truck & Bus für die Bereitstellung des Simulationsmodells und der Zylinderköpfe. Auch Mahle, Motortech und IAV gebührt ein Dank für die Bereitstellung von Prüfstandshardware und -software (Kolben, Zündsystem, Klopfalgorithmus).



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

## ANTRIEB. EFFIZIENZ. LEISTUNG.

Die Automobilbranche steht vor neuen Herausforderungen – die Mobilitätswende erfordert konsequentes Umdenken und technologieoffenes Entwickeln. Als international führendes technisch-wissenschaftliches Fachmagazin für Entscheider in der Antriebsentwicklung und -produktion versteht sich die MTZ als eine Informationsplattform zukünftiger Antriebe – elektrisch und verbrennungsmotorisch. Die MTZ fördert den Informationstransfer zwischen Herstellern, Zulieferern, Dienstleistern sowie Forschungs- und Entwicklungszentren in aller Welt. Nutzen Sie zusätzlich zu den **Printausgaben** das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der **einzigartigen Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

# MTZ



[www.mein-fachwissen.de/mtz/probe](http://www.mein-fachwissen.de/mtz/probe)