

AUTOREN



Dipl.-Ing. Martin Kriek
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen University.



Dr.-Ing. Ulrich Kramer
ist Technischer Spezialist Advanced & Alternative Fuels, Research and Advanced Powertrain Engineering bei der Ford-Werke GmbH in Köln.



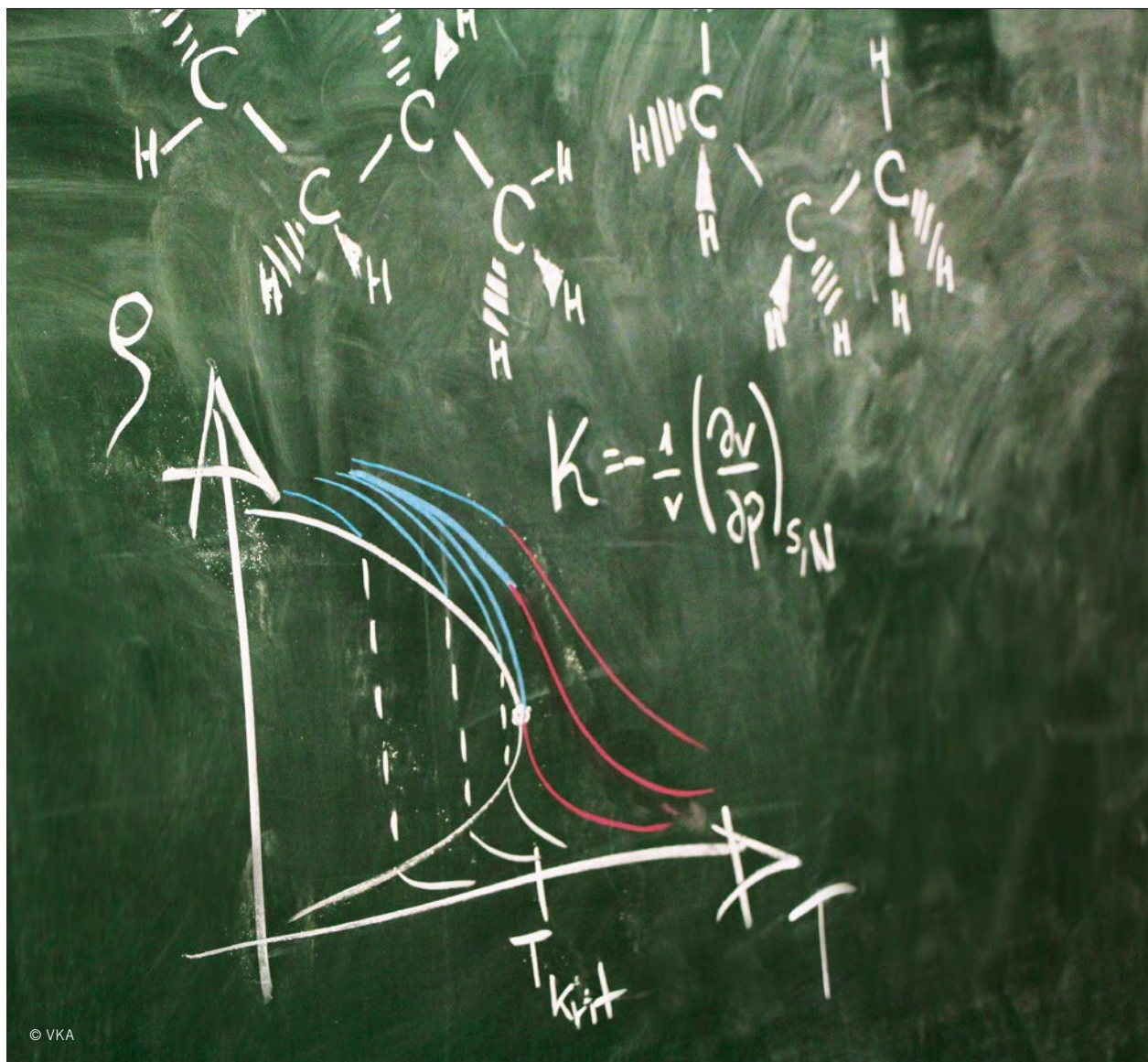
Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze
ist Leiter des Instituts Automotive Powertrain (IAP) an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) des Saarlandes.



Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger
ist Leiter des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen University.

Der überkritische Aggregatzustand von LPG als Lösung für die LPG-Direkteinspritzung bei modernen Ottomotoren

Der hohe Dampfdruck der C₃- und C₄-Kohlenwasserstoffe in Liquefied Petroleum Gas (LPG) kann zur Verdampfung des Kraftstoffs im Hoch- und Niederdruckteil des Kraftstoffsystems führen. Damit geht ein starker Dichteabfall einher, woraufhin der Motor zum Stillstand kommt. Im Rahmen des FVV-Vorhabens LPG-Systemvergleich II wurden am VKA der RWTH Aachen University und am IAP der HTW des Saarlandes Vordrücke der Hochdruckpumpe oberhalb des kritischen Drucks als eine mögliche Lösung für ein LPG-Direkteinspritzsystem ohne Kühlmaßnahmen für moderne Ottomotoren untersucht.



1	MOTIVATION
2	FORSCHUNGSMOTOR UND LPG-KRAFTSTOFFE
3	ERGEBNISSE
4	ZUSAMMENFASSUNG

1 MOTIVATION

In Europa ist LPG der meistgenutzte automotiv Alternativekraftstoff mit ausgeprägter Kerninfrastruktur [1]. Aus motorischer Sicht ist LPG aufgrund der hohen Klopffestigkeit im Vergleich zu Benzin-kraftstoffen eine interessante Alternative für moderne Ottomotoren [2]. Die LPG-Direkteinspritzung (LPG-DE) ermöglicht hierbei, verglichen mit LPG-Systemen zur äußeren Gemischbildung, hohe Drehmomente bei niedrigen Motordrehzahlen [3].

Die größte Herausforderung für die LPG-DE sind hohe Motor- und damit Kraftstofftemperaturen. Bei Nutzung einer modernen Benzin-Hochdruckpumpe zur Verdichtung von LPG-Kraftstoffen kann der hohe Dampfdruck, insbesondere jener von Propan und Propen, eine Verdampfung vor oder in der Hochdruckpumpe (HDP), aufgrund des Wärmeeintrags vom Motor, herbeiführen. Infolgedessen kommt der Motor zum Stillstand. Eine mögliche Lösung ist die Erhöhung des HDP-Vordrucks und die Nutzung des überkritischen Zustands zur Vermeidung von Kraftstoffsieden.

2 FORSCHUNGSMOTOR UND LPG-KRAFTSTOFFE

Für die Untersuchungen wurde ein 1,6-l-Vierzylinder-Turbo-Ottomotor mit Direkteinspritzung von Ford zur Verfügung gestellt [4]. Der Motor wird in einer Klimakammer im Leerlauf betrieben. Für die Direkteinspritzung der LPG-Kraftstoffe werden die Bauteile des serienmäßigen Benzin-Hochdruckeinspritzsystems verwendet. Das Einspritzsystem ist mit externen Heizbandagen und Thermoelementen ausgestattet, um Untersuchungen unter realistischen Wärmestaubedingungen durchzuführen. Eine zusätzliche Mitteldruckpumpe stromauf der HDP dient der Vorverdichtung der LPG-Kraftstoffe auf ein Druckniveau von 30 bis 60 bar.

Insgesamt wurden vier nach EN 589 [5] zulässige LPG-Kraftstoffe für die Untersuchungen mit überkritischem LPG ausgewählt, **TABELLE 1**. Der Kraftstoff LPG 1 besteht hauptsächlich aus Propan und Propen. Er weist den höchsten nach EN 589 [4] möglichen

	LPG 1	LPG 2	LPG 3	LPG 4
Motor-Oktanzahl (EN 589)	89,3	94,5	93,2	91,5
Methanzahl (AVL-Methode)	26	28	31	15
Dichte (20 °C) [(kg/m ³)] bei Druck [bar]	508	522	515	556
	9,4	7,1	7,9	4,5
Kritischer Druck [bar]	44,7	42,6	43,8	41,7
Kritische Temperatur [°C]	93,6	113,7	102,8	133,6
Propan [% (m/m)]	48,3	68,2	82,1	16,1
Propen [% (m/m)]	50,2	0,1	0,2	8,2
n-Butan [% (m/m)]	0,4	20,9	2,3	50,7
Isobutan [% (m/m)]	0,7	10,1	1,6	24,6
C ₄ -Olefine [% (m/m)]	–	0,1	12,9	0,2

TABELLE 1 Kraftstoffeigenschaften (© VKA)

C₃-Anteil sowie die niedrigste kritische Temperatur aller untersuchten Kraftstoffe auf. LPG 2 ist ein typischer LPG-Winterkraftstoff mit einem Propananteil von etwa 70 % (m/m), wohingegen LPG 3 und LPG 4 Homologationskraftstoffe nach R 83 [6] sind. Die Motor-Oktanzahlen aller LPG-Kraftstoffe werden nach EN 589 [5] berechnet, wohingegen die Methanzahlen nach FVV 2-235 (AVL-Methode) [7, 8] berechnet werden.

3 ERGEBNISSE

Um die Effekte von überkritischem LPG im Leerlauf zu evaluieren, werden Untersuchungen mit einem HDP-Vordruck oberhalb des kritischen Drucks von LPG 1 bis LPG 4 durchgeführt. Während heißer Leerlaufphasen wird ein Druckabfall im Kraftstoffzuteiler beobachtet, der abhängig vom LPG-Kraftstoff bei verschiedenen Kraftstofftemperaturen in der HDP auftritt. **BILD 1** zeigt beispielhaft die Aufheizphase mit LPG 1. Dieser LPG-Kraftstoff kann aufgrund seines hohen C₃-Gehalts als kritischster Fall bezüglich Wärmestau und heißem Leerlauf angesehen werden. **BILD 1** zeigt, dass hohe Öl- und Kühlwassertemperaturen um 110 °C während einer langen Leerlaufphase bei 800/min erreicht werden. Im Bereich der Spule des Hoch-

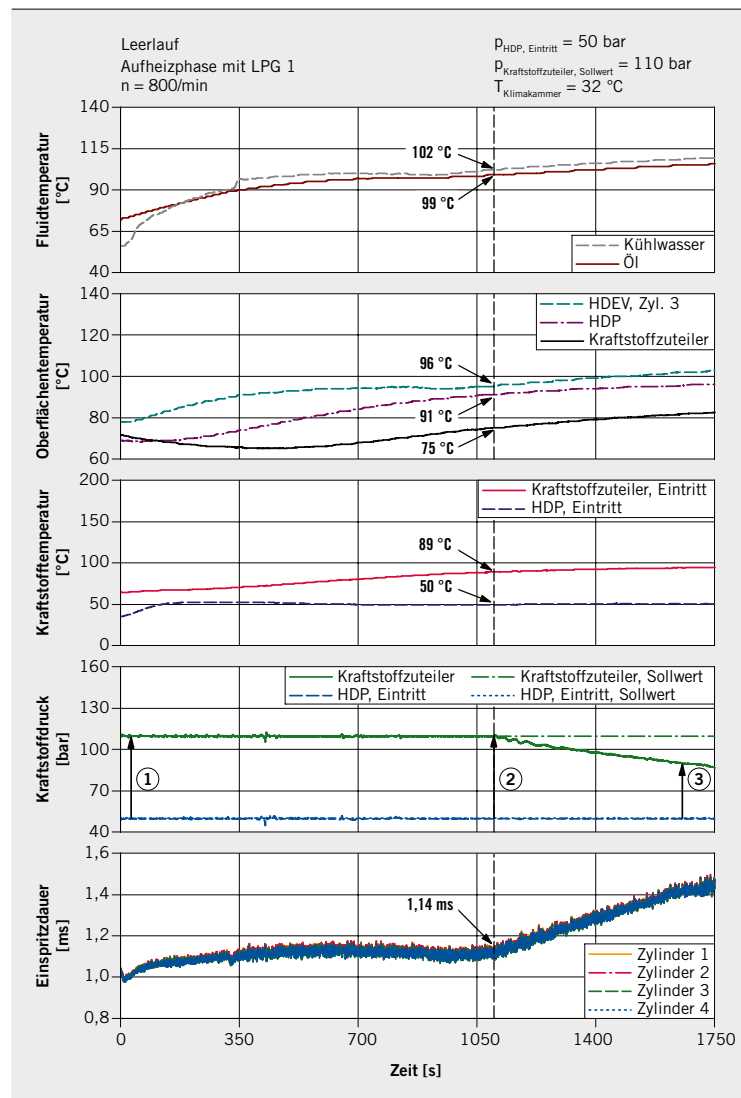


BILD 1 Aufheizphase mit LPG 1 (© VKA)

druckeinspritzventils (HDEV) werden Oberflächentemperaturen oberhalb von 100 °C erreicht. Am Eintritt der HDP werden die Kraftstofftemperatur auf 50 °C und der Kraftstoffdruck auf 50 bar konditioniert, weshalb in Abhängigkeit von der Kraftstofftemperatur entweder der

flüssige oder überkritische Aggregatzustand auftritt. Das Ausgasen kann somit unterbunden werden. Während der Kraftstoff stromab fließt, wird er durch den Wärmeeintrag vom Motor erhitzt, wodurch seine Temperatur stetig mit der Aufheizung des Motors steigt. Die Betrachtung der Kraftstofftemperatur am Eintritt des Kraftstoffzuteilers, die zum Ende der Messung 94 °C erreicht, verdeutlicht dies. Der Sollwert des Kraftstoffzuteilerdrucks wird auf 110 bar gesetzt.

In **BILD 1** ist die Kraftstoffverdichtung von dem Vordruck der HDP (50 bar) auf den Kraftstoffzuteilerdruck beispielhaft durch drei Pfeile in dem Kraftstoffdruckdiagramm dargestellt. Bis 1125 s kann die HDP den vorgegebenen Kraftstoffzuteilerdruck einstellen. Im Anschluss daran wird jedoch ein deutlicher Abfall des Kraftstoffzuteilerdrucks sichtbar. Dieser Abfall kann anhand des Dichte-Temperatur-Diagramms von Propen als Annäherung an LPG 1 in **BILD 2** erklärt werden. Neben den Isobaren und dem Zweiphasengebiet, das im kritischen Punkt bei 92,4 °C endet, sind Isentropen abgebildet. Isobaren mit Drücken oberhalb von 46,6 bar zeigen bis zu einer Temperatur von 80 °C eine nahezu konstante Steigung der Dichte. Zwischen 80 und 140 °C weisen die Isobaren von 46,6 bis 80 bar ein stark nichtlineares Verhalten auf.

Die nummerierten Pfeile 1 bis 3 in **BILD 2** entsprechen denen aus **BILD 1** und repräsentieren die Kompression des Kraftstoffs durch die HDP. Der Verlauf der Kompression wird dabei durch eine Isentrope angenähert. Der Zustand zu Beginn der Kompression wird durch den Druck am Eintritt der HDP und die abgeschätzte Kraftstofftemperatur in der HDP beschrieben. Diese Temperatur wird als Mittelwert aus Öl- und HDP-Oberflächentemperatur abgeschätzt, da die HDP der Temperatur der Klimakammer ausgesetzt ist und der Kolben der HDP von Nocken auf der Auslassnockenwelle angetrieben wird, die wiederum vom warmen Motoröl geschmiert werden. Aufgrund des daraus resultierenden Aufheizprozesses des Kraftstoffs wird die Temperatur von LPG 1 zu Beginn der Motoraufheizphase im Inneren der HDP auf 70,5 °C abgeschätzt. Die Zustandsänderung bei dieser Temperatur entspricht Pfeil 1 in **BILD 1** und **BILD 2**. Die HDP kann den vorgegebenen Kraftstoffzuteilerdruck von 110 bar halten. Pfeil 2 stellt die Zustandsänderung zu Beginn des Druckabfalls im Kraftstoffzuteiler bei einer abgeschätzten Kraftstofftemperatur in der HDP von 95 °C dar. Bei der von Pfeil 3 markierten Zustandsänderung (100,5 °C in HDP) kann die HDP den Kraftstoffdruck nur noch von 50 auf 89 bar erhöhen. Der Abfall des Kraftstoffzuteilerdrucks bei einer Temperaturerhöhung kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen resultiert die stark verringerte Dichte in einer reduzierten Füllung des HDP-Zylinders, was wiederum den maximalen Massenstrom in den Kraftstoffzuteiler reduziert. Andererseits steigt die isentrope Kompressibilität an. Dies wird anhand der größer werdenden Abstände zwischen den Isobaren bei Temperaturen oberhalb der kritischen Temperatur deutlich.

Eine Steigerung des HDP-Vordrucks ist eine mögliche Maßnahme, um den erreichbaren Kraftstoffzuteilerdruck zu vergrößern. Diese Möglichkeit wurde in einem Experiment analysiert, das in **BILD 3** für LPG 1 abgebildet ist. Dabei wird der HDP-Vordruck bei hohen Kraftstoff- und Motortemperaturen variiert, die vor dem Experiment durch die Aufheizphase bei 800/min eingestellt wurden, **BILD 1**. Ein Absenken des HDP-Vordrucks resultiert in einem starken Abfall der Dichte und einer erhöhten Kompressibilität. Die Steigerung des HDP-Vordrucks in der zweiten Phase des Experiments führt zu gasdynamischen Effekten und Schwankungen des Kraftstoffzuteilerdrucks.

Für die Bewertung eines LPG-DE-Konzepts mit einer modernen Benzin-HDP wird der nötige HDP-Vordruck bestimmt, um einen Kraftstoffzuteilerdruck von 100 bar mit LPG 1 bis LPG 4 im aufheizten Zustand zu erreichen. Im Fall von LPG 1 entspricht dies

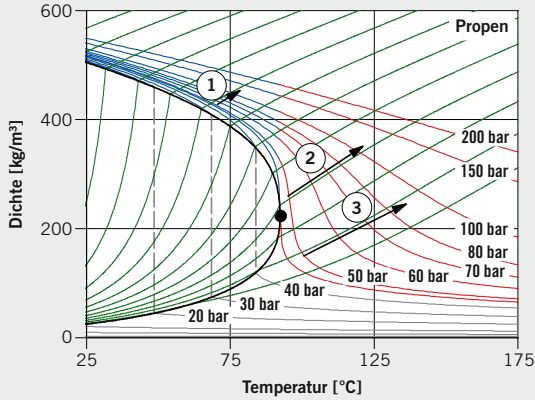


BILD 2 Isobare Dichte [9] und Isentropen von Propen [10] mit drei abgeschätzten Zustandsänderungen von LPG 1 (© VKA)

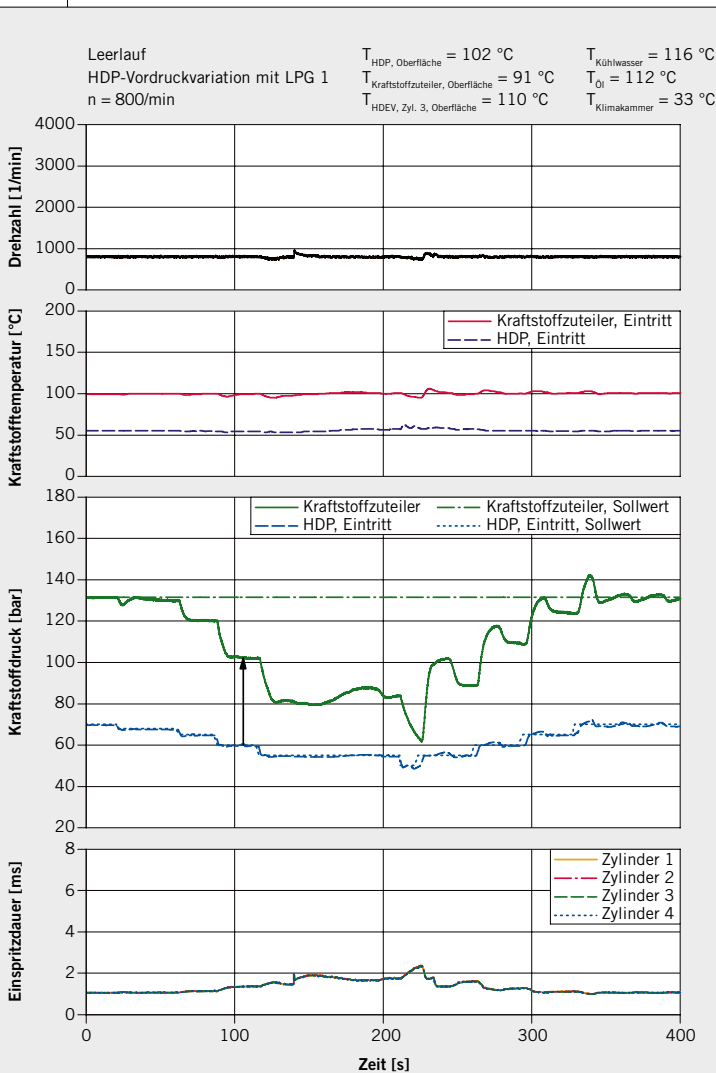


BILD 3 Variation des Vordrucks der Hochdruckpumpe mit LPG 1 (© VKA)

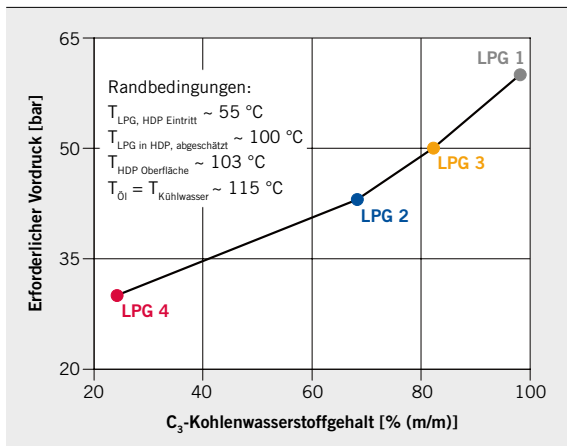


BILD 4 Korrelation des benötigten HDP-Vordrucks mit dem Propan/Propengehalt für alle untersuchten LPG-Kraftstoffe [11] © VKA

einem Druck von 60 bar, abgelesen am Pfeil im Kraftstoffdruckdiagramm in **BILD 3**. Der notwendige HDP-Vordruck ist stark vom C_3 -Anteil des LPG-Kraftstoffs abhängig, **BILD 4**. Je höher der Propan/Propengehalt ist, desto höher ist der benötigte Druck stromauf der HDP. Dies ist in dem Dichteabfall und der wachsenden Kompressibilität der C_3 -Kohlenwasserstoffe um $100 \text{ }^\circ\text{C}$ verglichen mit den Butanen/Butenen begründet. Daher kann unter den vorgegebenen Randbedingungen ein maximaler Propan/Propengehalt von $70 \text{ } \%$ (m/m) für ein LPG-DE-Konzept mit einer modernen Benzin-HDP empfohlen werden. Dem entspricht LPG 2 als typischer LPG-Winterkraftstoff. In diesem Fall muss der Vordruck auf $\sim 45 \text{ bar}$ eingestellt werden. Anzumerken ist, dass die Fähigkeit einer modernen, üblicherweise an benzinbetriebenen Motoren verwendeten HDP hohen Vordrücken standzuhalten, limitiert ist, wodurch ein optimiertes Pumpendesign für die LPG-DE empfehlenswert ist.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Für ein LPG-DE-System ohne Kühlmaßnahmen wurden HDP-Vordrücke oberhalb des jeweils kritischen Drucks von vier LPG-Kraftstoffen entsprechend der aktuellen Kraftstoffnorm EN 589 als mögliche Lösung für zukunftsweisende LPG-DE-Systeme untersucht. Bei einem maximalen Propan-/propengehalt von $70 \text{ } \%$ (m/m) kann die Verdichtung bei Kraftstofftemperaturen um $110 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einem HDP-Vordruck von etwa 45 bar gewährleistet werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] N. N.: Autogas in Europe, The Sustainable Alternative. European LPG Association. Brüssel, 2013
- [2] Kriek, M.; Günther, M.; Pischinger, S.; Kramer, U. et al.: Effects of LPG fuel formulations on knock and pre-ignition behavior of a DI SI engine. In: SAE International Journal of Engines 9 (2016), S. 237-251
- [3] Günther, M.; Nijs, M.; Pischinger, S.; Kramer, U.: Effects of LPG fuel formulations and mixture formation systems on the combustion system of a boosted SI engine. 22. Aachener Kolloquium, 2013
- [4] Weber, C.; Brumley, A.; Felipe, D.; Whiston, P. et al.: 1.6 SCTI: The New EcoBoost DI-Turbo Engine with Central Direct Injection for Ford's Volume Carlines. 19. Aachener Kolloquium, 2010
- [5] N. N.: DIN EN 589: Automotive fuels – LPG – Requirements and test methods. Beuth Verlag, Deutsche Version, EN 589:2008+A1:2012
- [6] N. N.: Regulation No 83 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements. In: Official Journal EU (2012)

- [7] List, H.; Taucar, G.; Cartellieri, W.; Leiker, M.: Erweiterung der Energieerzeugung durch Kraftgase – Teil 2 – Untersuchungen am CFR-Motor. FVV, 1968
- [8] List, H.; Cartellieri, W.; Pfeifer, U.; Leiker, M.: Erweiterung der Energieerzeugung durch Kraftgase – Teil 3 – Untersuchungen zur Übertragbarkeit der am CFR-Motor gefundenen Ergebnisse auf andere Motoren – Gültigkeitsbereich der Methanzahl. FVV, 1971
- [9] N. N.: NIST – National Institute of Standards and Technology, Thermophysical Properties. Chemistry WebBook, 2015 Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho. Allprops software, 2015
- [10] Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho. Allprops software, 2015
- [11] Kriek, M.; Günther, M.; Pischinger, S.; Kramer, U. et al.: Future Specification of Automotive LPG Fuels for Modern Turbocharged DI SI Engines with Today's High Pressure Fuel Pumps. In: SAE International Journal of Fuels and Lubricants 9 (2016), S. 575-592

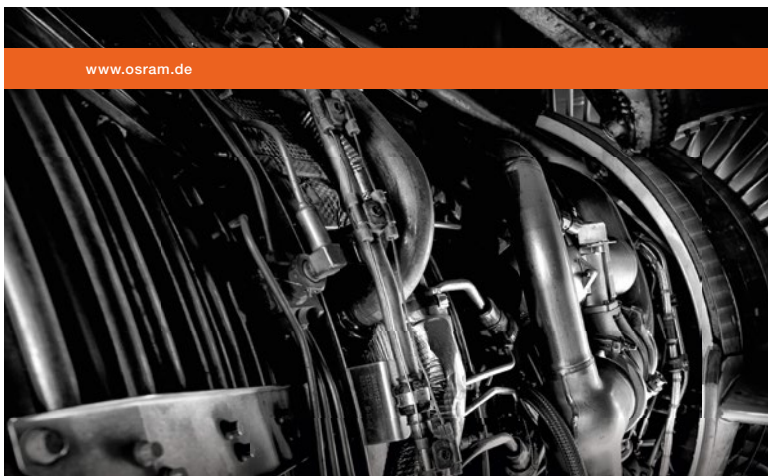
DANKE

Diese Arbeit wurde als Teil des Projekts Nr. 1151 erstellt, das von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. vergeben und am VKA der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger sowie dem IAP der HTW des Saarlandes unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Heinze bearbeitet wurde. Das Forschungsvorhaben wurde durch Eigenmittel der FVV finanziert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke) begleitet.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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



Von Automotive bis Aviation Air Heater für Teststände

- Maximale Energiedichte auf kleinstem Bauraum
- Extrem schnelles Aufheizen und Abkühlen
- Spitzenperformance von Kilowatt bis Megawatt
- Temperaturen bis zu $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ bei Toleranzen von $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ und Aufheizrampen bis $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Sekunde}$ oder höher
- Drücke von Null bis über 200 bar

Schreiben Sie uns, wir beraten Sie gern:

air-heater@osram.de

Licht ist OSRAM

OSRAM