

VERFASST VON



Lukas Strauß, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) in Erlangen.



Dr.-Ing. Lukas Weiß
leitet die Arbeitsgruppe „Brennstoffzellen und innovative Antriebskonzepte“ der Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) in Erlangen.



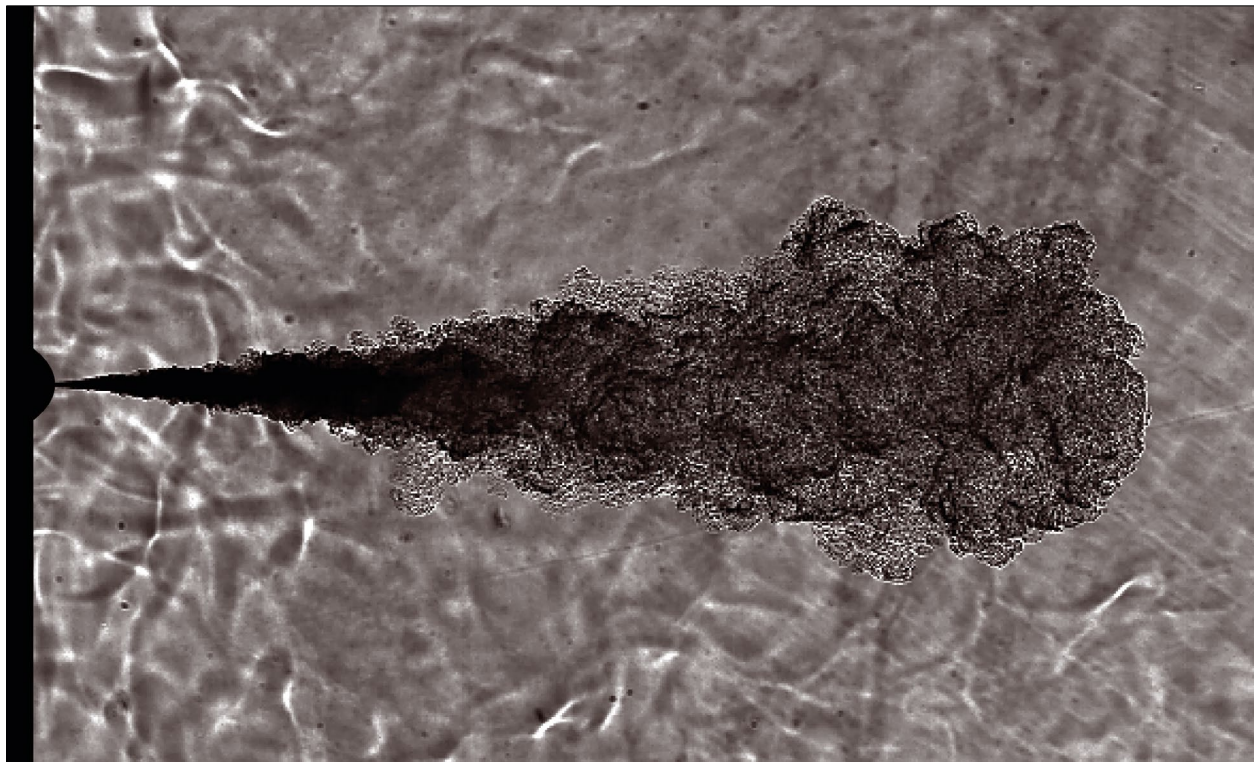
Dr.-Ing. Sebastian Rieß
leitet die Arbeitsgruppe „Thermodynamik und motorische Verbrennung“ der Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) in Erlangen.



Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing
ist Inhaber der Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) in Erlangen.

Einspritzung, Mischung und Selbstzündung von E-Kraftstoffen für kompressionsgezündete Motoren

Um beste Motorwirkungsgrade bei gleichzeitig minimierten Schadstoffemissionen zu erreichen, muss das physikalische und chemische Verhalten flüssiger Kohlenwasserstoffe aus erneuerbaren Energien bei deren Gemischbildung und Verbrennung verstanden werden. Im FVV-Projekt „eSpray“ (Nr. 1403) werden die Einspritzung, Gemischbildung und Zündung von OME₃₋₅ und 1-Octanol im Vergleich zu diesel-ähnlichem n-Dodekan untersucht. Im Rahmen des Projekts arbeiten mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) vier weitere internationale Forschungseinrichtungen zusammen.



1 FORSCHUNGSNETZWERK

Flüssige Kohlenwasserstoffe aus erneuerbaren Energien werden einen Beitrag zur kohlenstoffneutralen Mobilität leisten und eine wichtige Rolle in der zukünftigen Energieversorgung spielen. Wegen ihrer hohen Energiedichten haben die sogenannten E-Fuels in Kombination mit effizienten kompressionsgezündeten Motoren vor allem in mobilen Anwendungen ein großes Potenzial. Dabei versprechen sauerstoffhaltige E-Fuels wie beispielsweise OME_{3,5} oder 1-Octanol eine saubere Verbrennung. Ihr physikalisches und chemisches Verhalten im Verbrennungsmotor muss verstanden und in Simulationswerkzeugen umgesetzt werden, um bei der Entwicklung und Anpassung von Motoren eine optimale Effizienz bei minimiertem Schadstoffausstoß zu erreichen.

Im Forschungsprojekt geht es darum, ein detailliertes Verständnis des Verhaltens von sauerstoffhaltigen E-Fuels in kompressionsgezündeten Motoren zu schaffen. Insgesamt fünf Einrichtungen bilden das internationale Forschungsnetzwerk: die Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), die Combustion Research Facility an den Sandia National Laboratories (SNL), das Institut für Energie- und Materialprozesse (EMPI) an der Universität Duisburg-Essen (UDE), das Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik (IFA) der Technischen Universität Wien (TUW) und das Institute of Advanced Energy and Powertrain Technology der Shanghai Jiao Tong University (SJTU). Durch die Beteiligung dieser Institute mit ihren unterschiedlichen Methoden und Ressourcen sowie deren enge Kooperation gelingt es, einen tiefen Einblick und neue Erkenntnisse zu erlangen.

2 METHODIK

Die grundlegenden Freistrahlexperimente werden am optischen Verbrennungsprüfstand der FAU mit zwei unterschiedlichen Forschungsinjektoren der Größe für Pkw vorgenommen. Hier können Experimente unter konstanten, dieselmotorähnlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, allerdings ohne Ladungsbewegung. Bei inerten Bedingungen werden mit der Schlieren- und Mie-Streulichtmesstechnik die Gas- beziehungsweise Flüssigphase des Sprays aufgezeichnet. Die mit High-Speed-Kameras aufgenommenen Bilder werden mithilfe eigens entwickelter Software ausgewertet und liefern Informationen über die geometrischen Abmessungen des Kraftstoffsprays. Im reaktiven Fall wird über die Chemielumineszenz des Hydroxylradikals (OH*) der Zündverzögerung der Hochtemperaturverbrennung ausgewertet. Um das Rußverhalten der untersuchten Kraftstoffe qualitativ zu bewerten, wird das sichtbare Flammensignal aufgenommen. Zusätzlich werden am Institut die Massenraten der Forschungsinjektoren bestimmt. Basierend auf diesen Daten können mit Modellen die Gemisch- und Temperaturverteilung im inerten Spray berechnet werden.

Die SNL führen ebenfalls Freistrahlexperimente durch – mit einem konzeptionell anderen Prüfstand und mit anderen optischen Techniken. Sowohl die Flüssigphase als auch der Ruß werden hier mittels eines Lichtextinktionsverfahrens (Diffuse Backlight Illumi-

nation Extinction Imaging) detektiert. Die Gasphase kann über die Rayleigh-Streuung charakterisiert werden. Damit wird auch das Kraftstoff/Umgebungsgas-Gemisch quantitativ messtechnisch erfasst. Zusätzlich wird mit laserinduzierten Fluoreszenzmessungen Formaldehyd detektiert, das den Zündverzögerung der Niedertemperaturverbrennung kennzeichnet. Die Hochtemperaturzündung wird, wie auch an der FAU, mittels OH*-Chemielumineszenz bestimmt.

Der Abgleich der Ergebnisse beider Institute zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, wodurch sich die experimentellen Unsicherheiten reduzieren. Da die Freistrahlexperimente nur bedingt auf den realen Motorbetrieb übertragbar sind, werden weitere Messungen durchgeführt. Die UDE untersucht im Rahmen des Projekts die Gemischbildung und Verbrennung der E-Fuels in einem optisch zugänglichen Einzylindermotor. Mit multispektralen Aufnahmen werden der Zündverzögerung, Zündort und die Ausbrandphase charakterisiert. Mithilfe verschiedener Bandpassfilter können unterschiedliche Gase und damit auch die Eindringtiefe des Kraftstoffs bestimmt werden. Parallel zu den Untersuchungen am Motor und an den Einspritzkammern wird an der SJTU die Reaktionskinetik der OME_{3,5}-Verbrennung analysiert. In einem Rührreaktor werden die verschiedenen auftretenden Spezies und der Zündverzögerung analysiert und ein in der Literatur vorhandener Mechanismus für OME_{1,6} wird auf den untersuchten Kraftstoff angepasst. Der neu entwickelte Reaktionsmechanismus wird in ein Computational-Fluid-Dynamics(CFD)-Simulationsmodell implementiert, das anhand der experimentell ermittelten Spray- und Motordaten validiert wird. Sowohl die Freistrahlexperimente als auch die Triebwerksuntersuchungen werden in AVL Fire simuliert. Alle numerischen Arbeiten werden von der TUW durchgeführt.

3 ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE

Bei den grundlegenden Sprayuntersuchungen zeigt sich, dass sich die Gaseindringtiefe der unterschiedlichen Kraftstoffe bei ansonsten gleichen Umgebungsbedingungen nicht unterscheidet. Bei der flüssigen Phase sind allerdings deutliche Unterschiede zu verzeichnen. OME_{3,5} und 1-Octanol benötigen, lokal gesehen, im Vergleich zu n-Dodekan deutlich länger, um vollständig in die Gasphase überzugehen. In **BILD 1** (links), ist dieses Verhalten beispielhaft für den vom Engine Combustion Networks (ECN) definierten Spray-A-Betriebspunkt [1] dargestellt. Zusätzlich zu diesem standardisierten Arbeitspunkt werden an der FAU auch Mehrfachinjektionen unter-

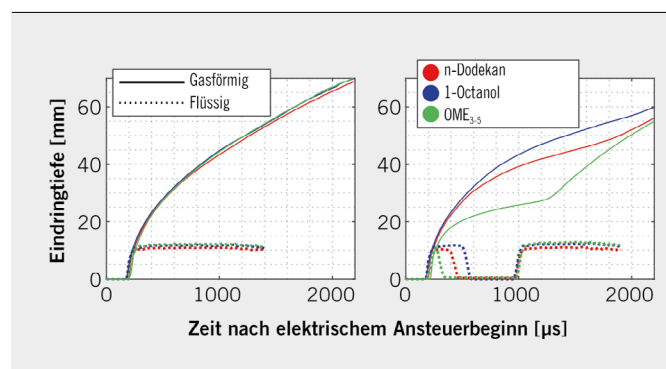


BILD 1 Flüssige und gasförmige Eindringtiefe bei ECN-Spray-A-Bedingungen: Kraftstoffdruck 1500 bar; Umgebungsdruck 62 bar; Umgebungstemperatur 627 °C, für Einfach- (links) und Mehrfacheinspritzung (rechts) (© FAU)

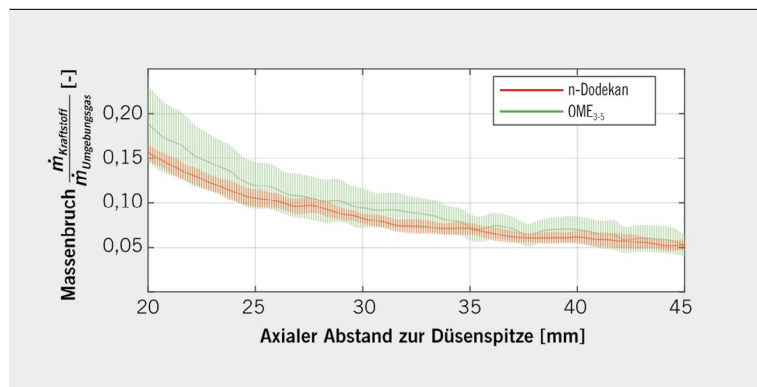


BILD 2 Quasistationäres Mischungsverhältnis entlang der Sprayachse bei ECN-Spray-A-Bedingungen (© SNL)

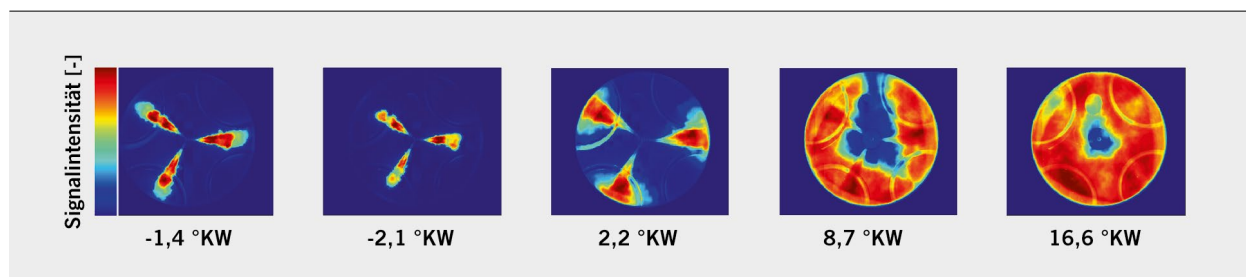


BILD 3 Intensitätsverteilung einer inertem OME_{3,5}-Einspritzung im optischen Motor, aufgenommen durch einen Bandpassfilter mit einem Durchlassbereich von 3365 ± 160 nm (zur Detektion von Kohlenwasserstoffen) (© UDE)

sucht. Insbesondere hier kann der Einfluss der E-Fuels auf die Hydraulik der Injektoren beobachtet werden. Bei den sehr kurzen Voreinspritzungen, bei denen der Injektor im ballistischen Bereich betrieben wird, ist das Öffnungs- und Schließverhalten zum Dieselerersatz n-Dodekan abweichend, was bei gleicher Ansteuerdauer zu unterschiedlichen Einspritzdauern führt, **BILD 1** (rechts) [2].

Die von der FAU mit den Modellen von Naber und Siebers [3] sowie von Musculus und Kattke [4] berechneten Massenverteilungen der E-Fuels im Spray für einen stationären Zustand zeigen, dass sich keine Änderungen im Vergleich zu n-Dodekan oder Diesel ergeben. Allerdings stellt sich wegen der unterschiedlichen stöchiometrischen Luftbedarfe ein anderes Verbrennungsluftverhältnis ein. Messtechnisch werden die Modelle von in den SNL durchgeführten Experimenten bestätigt. In **BILD 2** ist das quasistationäre Kraftstoff/Umgebungsgas-Mischungsverhältnis für OME_{3,5} und n-Dodekan entlang der Sprayachse dargestellt. Die Abweichungen liegen innerhalb des experimentellen Messfehlers.

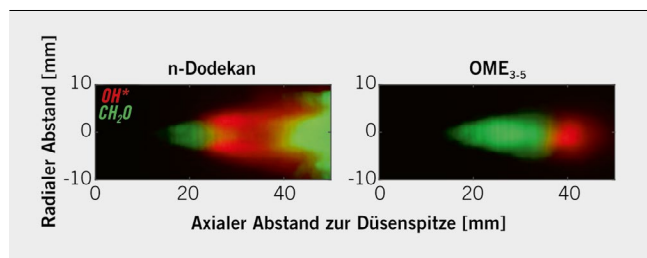


BILD 4 Laserinduziertes Fluoreszenzsignal von Formaldehyd und PAK (grün) und OH*-Signal (rot): n-Dodekan (links) und OME_{3,5} (rechts) bei ECN-Spray-A-Bedingungen (© SNL)

Nicht nur bei den Freistrahlexperimenten der FAU, sondern auch bei den Messungen im Motor der UDE ist zu beobachten, dass die untersuchten E-Fuels weiter entfernt von der Düsen Spitze brennen. OME_{3,5} zeigt außerdem eine stärkere Reaktion auf der Sprayachse als n-Dodekan. Für den Einsatz in bestehenden Dieselmotoren bedeutet dies, dass Kolben mit einer angepassten Muldengeometrie verwendet werden müssen, um die Wärmebelastung zu reduzieren. OME_{3,5} weist zudem eine kürzere Zündverzugszeit als n-Dodekan auf, und die Ausbrandphase bei gleicher Kraftstoffmasse ist im Vergleich zu n-Dodekan ebenfalls kürzer. Daher muss bei einem bestehenden Motor der Beginn der Einspritzung angepasst werden.

Als ein wichtiges Ergebnis des Projekts ist auch der erfolgreiche Einsatz der Infrarotmesstechnik im optischen Motor zu nennen. Mit einem entsprechenden Filter kann die gasförmige Kraftstoffeindringtiefe im inertem Fall viel einfacher als mit konventionellen Messtechniken bestimmt werden. In **BILD 3** sind die Spraykeulen zu verschiedenen Zeitpunkten der Einspritzung durch ein Kolbenfenster aufgenommen dargestellt. Weitere Ausführungen zu den Motorenexperimenten und -simulationen können in [5] gefunden werden.

Alle Versuche zeigen, dass OME_{3,5} unter allen hier untersuchten Betriebsbedingungen rußfrei verbrennt. Rußvorläufer wie Polyzyklische Aromatenringe (PAK) werden bei der Verbrennung dieses Kraftstoffs nicht gebildet, da es keine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen gibt. PAK fluoreszieren nach Anregung mit einem Laser bei einer ähnlichen Wellenlänge wie Formaldehyd. Nur durch die Lage im Spray beziehungsweise bei Hochgeschwindigkeitsmessungen durch den Zeitpunkt ist eine Unterscheidung möglich: Das näher an der Düsen Spitze auftretende Signal kann dem Formaldehyd zugeordnet werden, wohingegen das weiter ent-

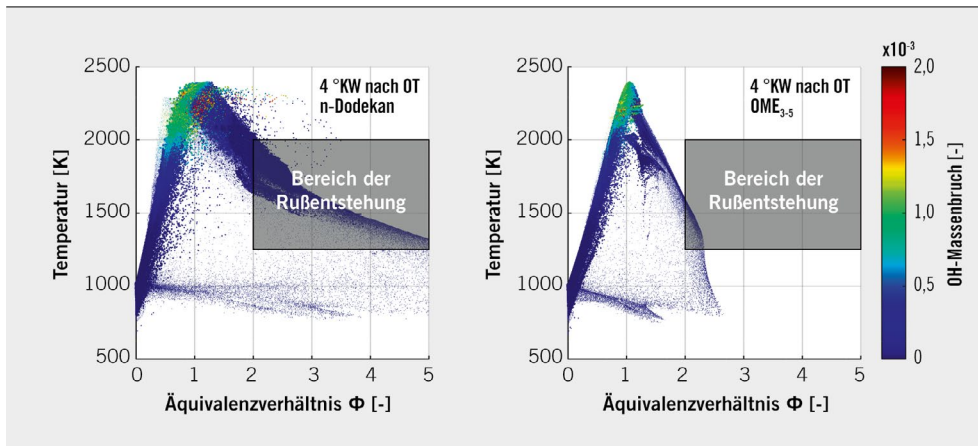


BILD 5 Simulierte reaktive Gemischbildung im Motorbrennraum: n-Dodekan (links) und OME_{3,5} (rechts) © TUV

fernte Signal von den Rußvorläufern stammt. **BILD 4** stellt die Formaldehyd- und PAK-Fluoreszenz (grün) und die OH*-Chemilumineszenz (rot) bei der Verbrennung von OME_{3,5} und n-Dodekan gegenüber. Es zeigt sich, dass bei der Verbrennung von OME_{3,5} im Bereich einer potenziellen Rußentstehung – stromabwärts vom OH* (nach rechts) – keine PAK detektiert werden.

Auch zeigt die CFD-Simulation, dass der gesamte Verbrennungsprozess von OME_{3,5} sehr eng um das stöchiometrische Verbrennungsluftverhältnis stattfindet. Bei Mischungsverhältnissen, die zur Rußbildung führen könnten, finden kaum Reaktionen statt [6]. In **BILD 5** sind die Temperaturen aller in der CFD-Simulation berechneten Zellen des Motorbrennraums über dem Verbrennungsluftverhältnis (Äquivalenzverhältnis) dargestellt. Die Datenpunkte sind farblich nach dem OH-Massenanteil gekennzeichnet, der als ein Indikator für die Verbrennung, das heißt für die lokale Wärme-freisetzung verstanden werden kann.

Die Projektergebnisse geben einen physikalischen Einblick in die motorische Verbrennung und können als Auslegungshilfe für zukünftige kompressionsgezündete Motoren verstanden werden, die das volle Potenzial der untersuchten E-Fuels nutzen. Aufgrund der rußfreien Verbrennung von OME_{3,5} sind hohe Abgasrückführungs-raten möglich, was die Emission von Stickoxiden deutlich reduziert. So lassen sich mit E-Fuels Antriebsstränge realisieren, die nicht nur kohlenstoffneutral sind, sondern auch extrem niedrige Schadstoffemissionen aufweisen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Engine Combustion Network (ECN) (Hrsg.): „Spray A“ and „Spray B“ Operating Condition: <https://ecn.sandia.gov/diesel-spray-combustion/target-condition/spray-ab/>, aufgerufen: 5. Dezember 2023
- [2] Strauß, L. et al.: Mixture formation of OME_{3,5} and 1-Octanol in comparison with diesel-like Dodecane under ECN Spray A conditions. In: *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9 (2023), Artikel 9:1083658
- [3] Siebers, D.: Scaling Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays Based on Mixing-Limited Vaporization. SAE Technical Paper 1999-01-0528
- [4] Musculus, M.; Kattke, K.: Entrainment Waves in Diesel Jets. In: *SAE International Journal of Engines*, 2 (2009), Nr. 1, S. 1170-1193
- [5] Wiesmann, F. et al.: Ignition and Combustion Characteristics of OME_{3,5} and n-Dodecane: A Comparison Based on CFD Engine Simulations and Optical Experiments. SAE Technical Paper 2023-01-0305
- [6] Wiesmann, F. et al.: Numerical and Experimental Investigations on the Ignition Behavior of OME. In: *Energies*, 15 (2022), Artikel 6855

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projekt Nr. 1403) wurde an der Professur für Fluidsystemtechnik (FST) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Wensing, der Combustion Research Facility der Sandia National Laboratories (SNL) unter der Leitung von Dr. Lyle Pickett, dem Institut für Energie- und Materialprozesse (EMPI) an der Universität Duisburg-Essen (UDE) unter der Leitung von Prof. Dr. Sebastian Kaiser, dem Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik (IFA) der Technischen Universität Wien (TUW) unter der Leitung von Prof. Dr. Thomas Lauer und am Institute of Advanced Energy and Powertrain Technology der Shanghai Jiao Tong University (SJTU) unter der Leitung von Prof. Dr. Dong Han durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. (IGF/CORNET-Nr. 274 EN) im Rahmen des internationalen Förderprogramms CORNET (Collective Research Networking) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages finanziell gefördert. Die Arbeiten der TUW wurden vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) über die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) (Fördernr. 874418) gefördert. Die in den SNL durchgeführten experimentellen Arbeiten wurden vom U.S. Department of Energy (DOE), Office of Vehicle Technologies, unterstützt. Das Projekt wurde von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Uwe Leuteritz (Liebherr Components Deggendorf GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Besonderer Dank gilt Esra Bauer, M. Sc. (UDE), Dipl.-Ing. Frederik Wiesmann (TUW) und Dr. Julien Manin (SNL).



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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