

# ■ Nachhaltige Antriebssysteme – Forschung für die Mobilität der Zukunft

Bei der vorwettbewerblichen Gemeinschaftsforschung verfolgt die FVV einen technologieoffenen Ansatz, der alle nachhaltigen Antriebssysteme und Energieträger gleichermaßen berücksichtigt. In der Mischung können die einzelnen Konzepte ihre spezifischen Vorteile für die jeweiligen Anwendungen und Einsatzgebiete voll ausspielen. Zur schnellen Erreichung der klima- und energiepolitischen Ziele wird die Forschung für die nachhaltige Mobilität der Zukunft parallel in mehreren Vorhaben vorangetrieben.

## 1 SPEZIFISCHE VORTEILE DER ANTRIEBSKONZEPTE NUTZEN

Klimaschutz und schrumpfende Ressourcen fossiler Energien machen die rasche Einführung nachhaltiger Antriebe erforderlich. Diese Herausforderung lässt sich allerdings nicht mit einem ausschließlichen Fokus auf die Antriebstechnologie bewältigen, denn nicht der Antrieb an sich entscheidet über die Nachhaltigkeit eines Mobilitätskonzepts, sondern die Nachhaltigkeit der gesamten Energiebereitstellungskette. Zur Erreichung der Klimaziele ist es von entscheidender Bedeutung, den Einsatz fossiler Energien so schnell wie möglich zu beenden.

Um die Nachhaltigkeitspotenziale der unterschiedlichen Antriebskonzepte auf wissenschaftlich fundierter Basis miteinander vergleichen zu können, wurden in der 2021 veröffentlichten FVV-Studie zur „Transformation der Mobilität im klimaneutralen und post-fossilen Zeitalter“ (Kraftstoffstudie IV) [1, 2] sieben verschiedene Fahrzeugantriebstechnologien für den europäischen





© Nadine van der Schoot | ZBT

## STIMMEN AUS DER FVV



© FVV

**Dietmar Goericke ist Geschäftsführer der FVV e. V.**

„Mit unserem technologieoffenen Forschungsansatz schaffen wir die Grundlage für die flächendeckende Einführung CO<sub>2</sub>-neutraler Antriebe und damit nachhaltiger Mobilitätslösungen.“



© Stefan Kaimer

**Dr.-Ing. Stefan Kaimer ist Research Engineer im Bereich Research & Analysis Propulsion Systems Engineering bei der Ford-Werke GmbH.**

„Die Kaltstartfähigkeit von Brennstoffzellensystemen bildet eine Grundvoraussetzung für den Einsatz in Fahrzeuganwendungen.“



© IFS

**Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer ist Inhaber des Lehrstuhls Fahrzeugantriebssysteme und Geschäftsführender Direktor des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart.**

„Nachhaltige Antriebssysteme werden auf Basis elektrochemischer und molekularer Speicher CO<sub>2</sub>-neutral angetrieben.“



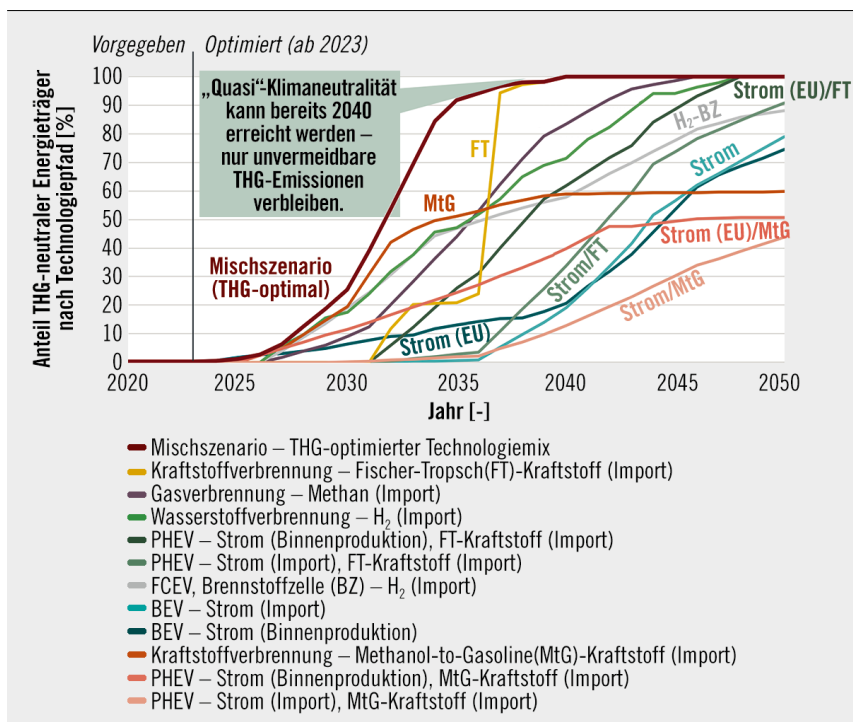
**Science for a moving society**

Verkehrssektor inklusive ihres gesamten Infrastrukturbedarfs, ihrer Kosten und sämtlicher Treibhausgas(THG)-Emissionen von der Erzeugung bis zum Endverbrauch (Cradle-to-Grave) untersucht. Wie sich zeigte, variieren die kumulierten THG-Gesamtemissionen zwischen den verschiedenen Antriebsarten wie zum Beispiel zwischen Elektroantrieb und Verbrennungsmotor kaum – die Verwendung THG-neutraler Energie vorausgesetzt.

Viel wichtiger als die Wahl des Technologiepfads ist die Geschwindigkeit, mit der nachhaltige Lösungen eingeführt werden: Je schneller eine defossilisierte Fahrzeugflotte verfügbar ist, desto geringer sind die kumulierten THG-Emissionen und damit deren negativer Einfluss auf das Klima. Wie zudem in der Studie nachgewiesen wurde, verlangsamt die starke Konzentration auf nur wenige oder sogar nur einen nachhaltigen Mobilitätspfad den Ausstieg aus fossilen Energien erheblich und führt daher zu einer unnötigen Belastung des Klimas.

## 2 ERWEITERTE KRAFTSTOFF-STUDIE FÜR EINE SCHNELLE DEFOSSILISIERUNG

In der kürzlich abgeschlossenen FVV-Kraftstoffstudie IVb [3, 4] wurden die Ergebnisse aus [1, 2] für den Übergang des europäischen Straßenverkehrssektors zur Klimaneutralität bis 2050 vertiefend untersucht. Die Forscherinnen und Forscher berücksichtigten dabei so realitätsnah wie möglich insbesondere maximal erreichbare Hochläufe (Ramp-ups) neuer Fahrzeugtechnologien, die dafür notwendigen Stromerzeugungskapazitäten, die Infrastruktur der Wertschöpfungskette bis zum Endverbraucher sowie die quantitative Verfügbarkeit von Rohstoffen. Unter Federführung von FVV und Frontier Economics ermittelten über 50 Experten aus mehr als 40 Unternehmen und Organisationen die maximal technisch erreichbaren Hochläufe für die Produktion und Installation von THG-neutralen Mobilitätspfaden – jeweils für die entsprechende Fahrzeugantriebsart einschließlich der Wertschöpfungskette des Fahrzeugbaus (inklusive Recycling) als auch der erforderlichen Energieinfrastruktur für den Fahrzeugbetrieb. Unter Berücksichtigung dieser Hochlaufpotenziale führte Frontier Economics eine Analyse durch, die unter anderem eine

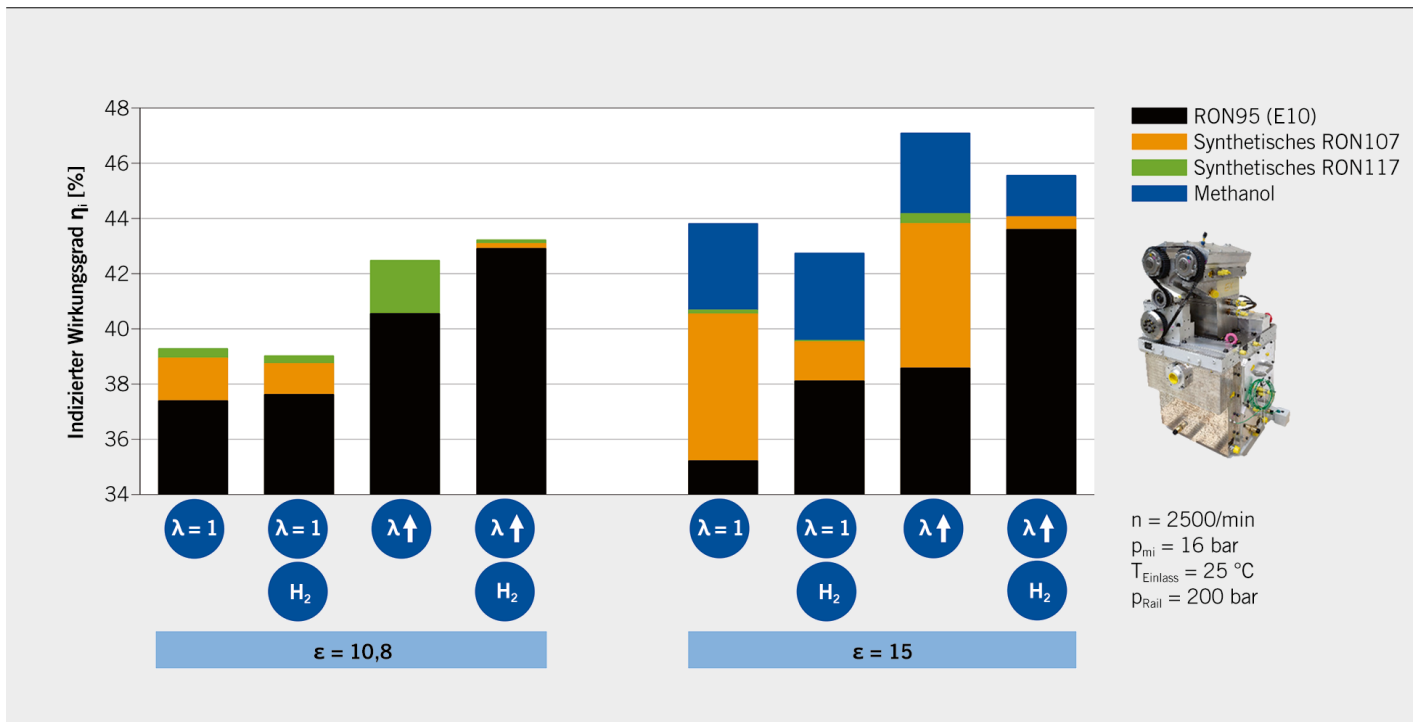


**BILD 1** Unter idealen regulatorischen Rahmenbedingungen maximal möglicher Anteil THG-neutraler Energieträger im EU-Straßenverkehr bis 2050; unter anderem betrachtete Pfade: Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs), Battery Electric Vehicles (BEVs), Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) (© Frontier Economics)

Kombination verschiedener Technologiepfade beinhaltet, um so früh wie möglich THG-Neutralität zu erreichen und technische Hemmnisse einzelner Mobilitätspfade zu umgehen. Die Analyse umfasst sowohl Einzeltechnologieansätze als auch ein THG-optimiertes Mischtechnologieszzenario, in dem alle THG-neutralen Lösungen für die Optimierungssimulation zur Verfügung standen, **BILD 1**. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ein Technologiemix beschleunigt den Übergang zur THG-Neutralität deutlich und reduziert damit die kumulierten THG-Emissionen bis 2050 erheblich, da die technischen Engpässe (Bottlenecks) beim Hochlauf von Einzeltechnologiepfaden in der Kombination wesentlich entschärft werden. Beispielsweise weist ein Szenario, das sich ausschließlich auf batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) als alternativen Mobilitätspfad konzentriert, bis 2050 um 39 % höhere kumulierte THG-Emissionen auf als ein idealer Mix aus THG-neutralen Antriebs-technologien. Zudem erreicht der reine BEV-Transformationspfad bis 2050 nur eine Defossilisierungsrate von 76 %

- des Fahrzeugbestands, während es mit einem Mischtechnologieszzenario bereits im Jahr 2039 möglich ist, THG-Neutralität (100 % Defossilisierungsrate) im europäischen Verkehrssektor zu erzielen – jeweils ideale regulatorische Rahmenbedingungen vorausgesetzt. Gegen den reinen BEV-Pfad spricht auch die für die nachhaltige Energieversorgung nicht schnell genug verfügbare Infrastruktur: Selbst unter idealen regulatorischen Bedingungen ist der Stromnetzausbau kaum wie benötigt vorantreibbar.
- Entscheidend für die Minimierung der THG-Emissionen ist der schnellstmögliche Ausstieg aus fossilen Energieträgern. Dazu müssen hemmende Infrastruktur- und Rohstoffengpässe durch Schaffung idealer regulatorischer Rahmenbedingungen umgehend behoben werden.
- E-Fuels bieten durch ihre Rückwärtskompatibilität eine einzigartige technologische Option für den klimaneutralen Betrieb der Bestandsflotte und können die THG-Reduktion daher deutlich beschleunigen.
- Ein EU-weites Verbot von Verbrennungsmotoren ab 2035 würde zu



**BILD 2** Indizierter Wirkungsgrad verschiedener Kraftstoffe bei einem Verdichtungsverhältnis von 10,8 (links) und 15 (rechts) im Betrieb  $\lambda = 1$  und im Magerbetrieb – jeweils mit und ohne  $H_2$ -Zudosierung (© TME)

höheren THG-Emissionen führen als nötig, da die Abhängigkeiten von Hochläufen spezifischer Infrastruktur verstärkt und die Möglichkeiten zur Nutzung klimaneutraler E-Fuels eingeschränkt würden.

### 3 HOCHEFFIZIENTER VERBRENNUNGSMOTOR IM HYBRIDSYSTEM

Wie ein künftiger Verbrennungsmotor in einem Hybridsystem für Pkw-Anwendungen aussehen könnte, wurde im Forschungsprojekt „ICE2030: Grenzen der ottomotorischen Wirkungsgradsteigerung in hybridisierten Antriebssträngen“ [5] untersucht. Ziel der Forschung war, die Effizienzpotenziale von Fremdzündungsmotoren in einem optimierten Hybridantriebsstrang auszuloten, indem unterschiedliche konventionelle und alternative Kraftstoffe zusammen mit Wasserstoff zur Steigerung der Verbrennungsleistung bei gleichzeitiger Minimierung der  $CO_2$ -Emissionen eingesetzt wurden. Dabei wurde ein Gesamtwirkungsgrad von 50 % und mehr angestrebt. Des Weiteren wurden Simulationsmodelle für eine extrem magere

Verbrennung ( $\lambda \geq 2$ ) kalibriert. An dem Projekt beteiligten sich insgesamt vier Forschungsstellen: das Institut für Verbrennungskraftmaschinen (vkm) der Technischen Universität Darmstadt, das Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart, das Institut für Verbrennungskraftmaschinen (IVB) der Technischen Universität Braunschweig und der Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen.

Als Grundlage der weitergehenden Untersuchungen führte das vkm umfangreiche Gesamtfahrzeugsimulationen durch. Dabei wurden unter anderem im Rahmen einer Benchmark-Analyse die unterschiedlichen Hybridkonfigurationen und Verbrennungsmotortechniken verglichen. Als Paarung mit besonderem Potenzial zur weiteren  $CO_2$ -Reduzierung bei hohem Wirkungsgrad kristallisierte sich dabei ein System mit P2-Hybrid (Elektromotor zwischen Getriebe und Verbrennungsmotor), Hochvoltbatterie und einem Verbrennungsmotor mit zweistufiger Aufladung heraus.

Die bei einer extrem mageren Ottomotorverbrennung ablaufenden Prozesse beinhalten eine Vielzahl sehr komplexer

Vorgänge. Da derzeit noch keine vollständig validierten Modelle für die Wasserstoffverbrennung oder für Benzinbeziehungsweise Methanol-Wasserstoffgemische existieren, wurde am IFS ein entsprechender Ansatz entwickelt und in das bestehende Simulationswerkzeug der FVV implementiert.

Einzyklindermotortests am IVB und am TME rundeten das Forschungsprojekt ab. Am IVB wurde dabei die Zugabe von Wasserstoff zum Verbrennungsprozess unter Variation unterschiedlicher Effizienzsteigernder Technologiebausteine untersucht. Die Analyse der Kombination aus Wasserstoffsaugrohrreinblausung und verschiedenen direkteingespritzten Flüssigkraftstoffen am Einzyklindermotor erfolgte am TME. Wie sich zeigte, wirkt die Zudosierung von Wasserstoff bei einem wenig klopfhellen Flüssigkraftstoff klopfhemmend, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirkt, **BILD 2**. Bei klopfhellen Kraftstoffen entstehen dadurch allerdings nur geringfügige Wirkungsgradvorteile. Bei einem erhöhten Verdichtungsverhältnis vergrößern sich die Vorteile durch Wasserstoffzudosierung zu normalem Ottokraftstoff, bei klopfhellen Kraftstoffen ist dadurch

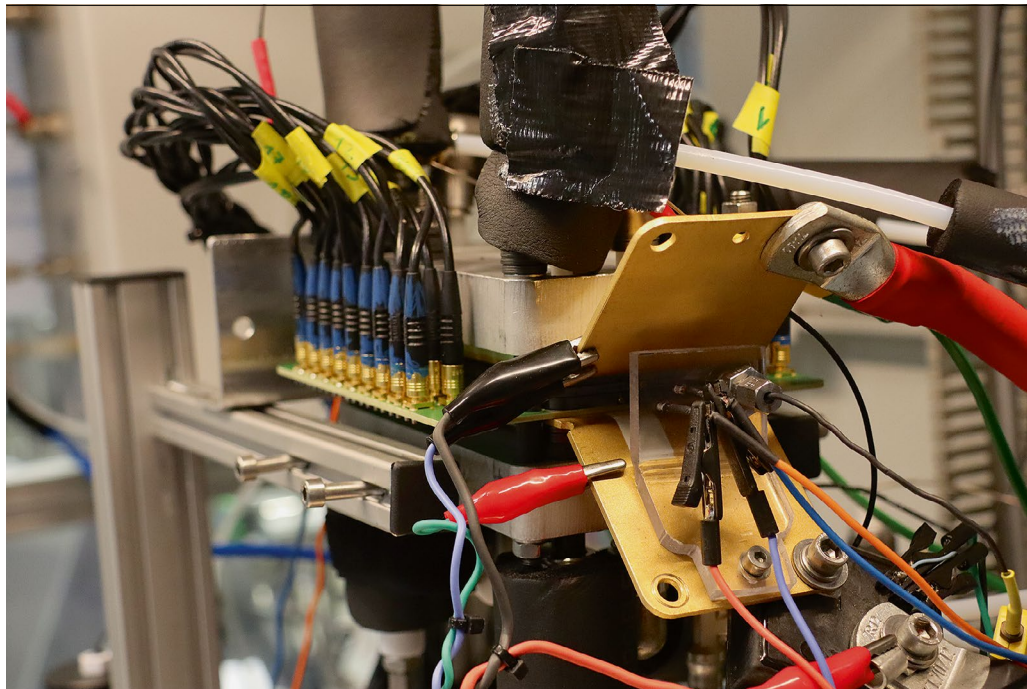
jedoch keine Wirkungsgradverbesserung festzustellen.

#### 4 OPTIMALER KALTSTART DER BRENNSTOFFZELLE

Wasserstoff ist auch als Energieträger für Brennstoffzellen eine vielversprechende Option für künftige Pkw, Nutzfahrzeuge und Off-Highway-Anwendungen. Eine der aktuellen Herausforderungen der Brennstoffzellentechnik ist der Start bei niedrigen Umgebungstemperaturen. Der bei der Reaktion im Brennstoffzellenstack entstehende Wasserdampf kann in den Zellen kondensieren und gefrieren, wodurch sich die Leistungsfähigkeit reduziert. Im Rahmen des Forschungsprojekts „PEM-FC-Kaltstartsimulation“ [6] wurde am TME und am Zentrum für Brennstoffzellen Technik (ZBT) in Duisburg ein Simulationsmodell für den Kaltstart einer Brennstoffzelle entwickelt. Dazu wurden ein vorhandener Modellbaukasten und das integrierte 1-D/2-D-Stackmodell [7] derart erweitert, dass simulative Untersuchungen des Kaltstarts erfolgen können. Zur Verifizierung der Zusatzfunktion führte das TME Computational-Fluid-Dynamics(CFD)-Untersuchungen durch, die wiederum durch Messungen an segmentierten Testzellen auf dem Prüfstand des ZBT validiert wurden, **BILD 3**. Dabei zeigte sich, dass das Zell-/Systemmodell das reale Verhalten einer Brennstoffzelle sehr gut nachbildet. Abschließende Kaltstartsimulationen machten deutlich, dass sich das neue Entwicklungswerkzeug für detaillierte Untersuchungen der Kaltstartfähigkeit verschiedener Brennstoffzellensysteme eignet. Die FVV stellt damit insbesondere kleineren und mittleren Unternehmen ein Werkzeug zur effizienten Weiterentwicklung von Brennstoffzellenstacks zur Verfügung.

#### 5 FAZIT UND AUSBLICK

Für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft müssen alle Optionen, sowohl die unterschiedlichen Antriebskonzepte als auch die verschiedenen Energieträger, parallel weiter erforscht werden. Die einseitige Bevorzugung einzelner Technologien hemmt den Prozess der Defossilisierung und verlangsamt die dringende Dekarbonisierung des gesamten Verkehrssektors. Dies zeigt sich unter anderem an den Ergebnissen der



**BILD 3** Prüfzelle mit Sensorik für lokal auflösende Messungen auf dem Brennstoffzellenprüfstand (© ZBT)

umfangreichen Kraftstoffstudie IV beziehungsweise IVb. Die FVV leitet daraus einen klar strukturierten Forschungsfahrplan ab, bei dem die Potenziale aller auf regenerativen Ressourcen basierenden Energiewandler und -träger im Zentrum der Aktivitäten stehen. Beispiele sind Hybridantriebe für Pkw, die eine Systemeffizienz von mehr als 50 % aufweisen, sowie kaltstartoptimierte Brennstoffzellen, die einen zuverlässigen Alltagsbetrieb ermöglichen. Die FVV leistet damit einen entscheidenden Beitrag für den ergebnisoffenen Wettbewerb zwischen Lösungen für eine nachhaltige Mobilität, die zum Wohl der Umwelt schnellstmöglich umgesetzt werden kann.

#### LITERATURHINWEISE

- [1] FVV-Forschungsvorhaben „FVV-Kraftstoffstudie IV: Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter“. Fördergeber: FVV (1378). Projektleitung: Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Dr. David Bothe (Frontier Economics Ltd.)
- [2] FVV (Hrsg.): FVV-Kraftstoffstudie IV: Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter. Online: [https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/020.50\\_Sechs\\_Thesen\\_zur\\_Klimaneutralitaet\\_des\\_europaeischen\\_Verkehrssektors/FVV\\_Future\\_Fuels\\_StudyIV\\_The\\_Transformation\\_of\\_Mobility\\_H1269\\_2021-10\\_EN.pdf](https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/020.50_Sechs_Thesen_zur_Klimaneutralitaet_des_europaeischen_Verkehrssektors/FVV_Future_Fuels_StudyIV_The_Transformation_of_Mobility_H1269_2021-10_EN.pdf), aufgerufen: 20. Januar 2023
- [3] FVV-Forschungsvorhaben „FVV-Kraftstoffstudie IVb: Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter“. Fördergeber: FVV

- (1452). Projektleitung: Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Dr. David Bothe (Frontier Economics Ltd.)
- [4] FVV (Hrsg.): FVV-Kraftstoffstudie IVb: Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter. Online: [https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/Wie\\_schnell\\_geht\\_nachhaltig/FVV\\_H1313\\_1452\\_Future\\_Fuels\\_FVV\\_Fuel\\_Study\\_IVb\\_2022-12.pdf](https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/Wie_schnell_geht_nachhaltig/FVV_H1313_1452_Future_Fuels_FVV_Fuel_Study_IVb_2022-12.pdf), aufgerufen: 20. Januar 2023
- [5] FVV-Forschungsvorhaben „ICE2030: Grenzen der ottomotorischen Wirkungsgradsteigerung in hybridisierten Antriebssträngen“. Fördergeber: FVV (1434). Projektleitung: Arndt Döhler (Stellantis Opel Automobile GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (TME, RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts (IVB, TU Braunschweig), Prof. Dr. Christian Beidl (vkm, TU Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende und Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer (IFS, Uni Stuttgart)
- [6] FVV-Forschungsvorhaben „PEM-FC-Kaltstartsimulation“. Fördergeber: FVV (1411). Projektleitung: Dr.-Ing. Stefan Käimer (Ford-Werke GmbH). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (TME, RWTH Aachen), Dr.-Ing. Peter Beckhaus (ZBT GmbH)
- [7] FVV-Forschungsvorhaben „Brennstoffzellen-Systemsimulation – Membran Befeuchtungsmanagement“. Fördergeber: FVV (1298). Projektleitung: Dr.-Ing. Helge Tielbörger (Siemens Industry Software GmbH) und Dr. Volker Formanski (BMW AG). Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger (TME, RWTH Aachen), Dr.-Ing. Peter Beckhaus (ZBT GmbH)



**READ THE ENGLISH E-MAGAZINE**  
Test now for 30 days free of charge:  
[www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)

# EFFIZIENZ. ÖKONOMIE. MOBILITÄT.

**Sicher in die Zukunft** – die Herausforderung bei der Entwicklung von Mobilien Maschinen und Straßennutzfahrzeugen ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Moderne Nutzfahrzeuge langfristig robust und kostengünstig bei einem hohen Wirkungsgrad zu betreiben, gewährleistet einen optimalen Investitionsschutz. ATZheavyduty bietet neuestes Wissen aus Forschung und Entwicklung und berichtet einzigartig über das gesamte Spektrum der Nutzfahrzeugtechnik auf und abseits der Straße. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

# ATZ heavyduty

ON- UND OFFHIGHWAY-NUTZFAHRZEUGE



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