

Wasserstoff-Direkteinspritzung für mittelschnellaufende Verbrennungsmotoren

In mittelschnellaufenden Großmotoren gilt die Wasserstoff-Direkteinblasung als besonders aussichtsreiche Lösung zur Realisierung eines nahezu CO₂-freien Betriebs. ITAZ und DUAP entwickeln dafür eine neue pilotgesteuerte und modulare Wasserstoffinjektor-Familie für unterschiedliche Motorgrößen.

© ITAZ





Bernd Niethammer
ist Inhaber und Geschäftsführer der ITAZ GmbH in Königsfeld.



Christian Mayer
ist Inhaber der Managementberatung MCM für Thermodynamik und Motorsysteme in Königsfeld im Schwarzwald.



Erich Vogt
ist Geschäftsführer der DUAP AG in Herzogenbuchsee (Schweiz).



Marco Poletti
ist Senior Project Manager bei der DUAP AG in Herzogenbuchsee (Schweiz).

Die maritime und stationäre Energie- und Antriebstechnik befindet sich in einer Phase des tiefgreifenden strukturellen Wandels. Getrieben durch globale Klimaziele, verschärfte regulatorische Vorgaben und zunehmenden gesellschaftlichen Druck zur Dekarbonisierung verändern sich die technologischen Grundbedingungen für große Verbrennungsmotoren grundlegend. Fossile Energieträger dominieren heute noch die weltweite



BILD 1 Einzylinder-Motorenprüfstand (© DUAP)

zur Realisierung eines nahezu CO₂-freien Betriebs.

MOTIVATION FÜR WASSERSTOFF UND DIREKTEINBLASUNG

Energieversorgung und tragen damit maßgeblich zur Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei. Der internationale Schifffahrtssektor verursacht etwa 3 % der globalen CO₂-Emissionen. Die MEPC-83-Ziele der International Maritime Organization (IMO) sehen vor, dass die Emissionen des Seeverkehrs zeitnah drastisch reduziert werden respektive die Treibhausgase bis 2050 auf netto Null sinken sollen.

Da Schiffsmotoren und stationäre Aggregate mit Leistungen von mehr als 2000 kW pro Zylinder häufig 30 Jahre und länger im Einsatz sind, ist ein vollständiger Technologiewechsel kurzfristig weder wirtschaftlich noch logistisch umsetzbar. Die Umrüstung bestehender Plattformen auf kohlenstofffreie/-neutrale Kraftstoffe (etwa Wasserstoff, Ammoniakgas oder E-Methan) und wasserstofffähige Einblaskonzepte bieten einen gangbaren Weg für eine schnelle und massive Reduktion der Emissionen, ohne die vorhandene Infrastruktur vollständig ersetzen zu müssen. Die Wasserstoff-Direkteinblasung (H₂-DI) in mittelschnelllaufenden Großmotoren gilt dabei als besonders aussichtsreiche Lösung

Erste Anwendungen von Wasserstoff-Gasmotoren arbeiten überwiegend mit einem homogenen Vormischen im Ansaugtrakt. Dieses Verfahren ist jedoch mit hoher Klopfneigung, Rückbrennrisiken und begrenzten Lastfähigkeiten verbunden, da der Wasserstoff im Saugrohr die Luft verdrängt und somit weniger Gesamtgas zur Verfügung steht, insbesondere bei hohen Lastpunkten. Bei der Direkteinblasung von Wasserstoff in den Brennraum ist kein Wasserstoff im Ansaugsystem vorhanden und somit kein Rückbrennen in das Saugmodul möglich. Dies ermöglicht eine optimale Füllung des Brennraums mit Luft sowie hohe Leistungsdichten und verbessert den Wirkungsgrad sowie die regelbare Verbrennungscharakteristik deutlich.

Befeuerte Motorversuche im Labor der Universität Rostock, **BILD 1**, zeigen zudem, dass die zentral angeordnete Mitteldruck-Direkteinspritzung eine besonders gleichmäßige Gemischbildung zur Folge hat und Gasansammlungen an den Zylinderwänden vermieden werden, wodurch der Schmierölfilm geschützt und Emissionen verringert werden. Durch eine definierte Strahlführung kann das Gas gezielt eingeblasen und sehr homogen im Brennraum verteilt werden.

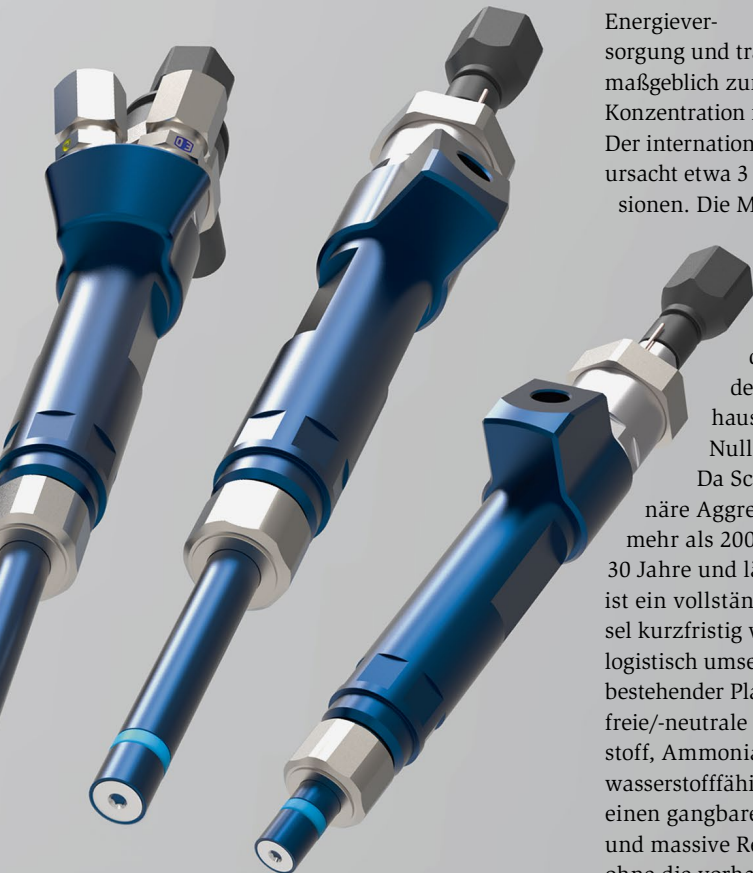




BILD 2 Mögliche Einsatzgebiete für die Gasinjektoren (© DUAP)

ANFORDERUNGEN AN DIE INJEKTORTECHNIK

Die Einspritzung gasförmigen Wasserstoffs stellt hohe Anforderungen an Injektoren und deren Aktorik. Die Düse hat in mittelschnelllaufenden Motoren (300 bis 1000/min) extrem kurze Öffnungs- und Schließzeiten sowie hohe Massenströme. Die Bauteile müssen bei trockener Schmierung einen ausreichenden Widerstand gegen Verschleiß und Wasserstoffversprödung aufweisen und eine hohe thermische Robustheit gewährleisten. Die Trockenlauffähigkeit ist durch entsprechende Oberflächensysteme erreichbar. Sie ist wichtig, da bei einem ölgeschmierten Injektor Öl in den Motor gelangen könnte, das bei der Verbrennung zusätzlich CO₂ erzeugen würde.

Die hier dargestellte pilotgesteuerte Injektorfamilie erfüllt diese Anforderungen durch ein modulares Konzept für unterschiedliche Motorgrößen. Es umfasst präzise steuerbare Nadelhübe, Einspritzmengen von wenigen Milligramm bis mehr als 1750 mg Wasserstoff pro Zyklus, einen flexibel nutzbaren Betriebsdruckbereich von 5 bis 80 bar, sehr geringe Steuerverluste von weniger als 1 % der eingeblasenen Menge sowie eine hohe Robustheit und lange Lebensdauer. In den Applikationen wird in der Regel ein Betriebsdruck von 20 bis 40 bar angewendet. Damit existiert ein skalierbares System, das sowohl in Hochleistungs-

tungsmotoren (mit Drehzahlen bis zu 10.000/min, etwa für Sportwagen) als auch in großen, mittelschnellen Marineantrieben und Kraftwerksmotoren einsetzbar ist, **BILD 2**.

EINSPRITZSTRATEGIEN UND VERBRENNUNGSPROZESSE

Der Betriebsdruck des Injektorkonzepts ist von 5 bis 80 bar flexibel adaptierbar. Bei typischen Applikationen werden Drücke im Bereich von 20 bis 30 bar verwendet, um die Wasserstofftanks weitgehend entleeren zu können. Typische Einblaszeiten für die Vollast liegen hier bei 20 bis 24 ms.

Um auch bei höheren Zylinderdrücken noch eine gute Einblastiefe des Wasserstoffs zu gewährleisten, kann dieser auch mit 30 bis 80 bar eingeblasen werden. Dies wird durch eine flexible Kraftstoffdosierung realisiert, die sowohl eine präzise Einblasung der genau benötigten Kraftstoffmenge in sehr kurzer Zeit ermöglicht als auch eine weitere späte Einblasung im Bereich bereits erhöhter Kompressionsdrücke.

Die späte Einblasung kurz vor OT erzeugt ein nicht komplett homogenes, aber lokal zündfähiges Gemisch. Die späte Einblasung kurz vor OT kann insbesondere im transienten Bereich dabei helfen, die Dynamik und Leistung des Motors zu verbessern, um hohen Lastanforderungen zu genügen.



BILD 3 CFD-Einblassimulation (oben) und Lambdawerte im Gemisch (unten) (© ITAZ)

Eine gestufte Mehrfacheinblasung wiederum kann die Gasvermischung im Brennraum positiv beeinflussen und die NO_x-Bildung mindern. Eine Nacheinblasung kann zudem bei der Abgasnachbehandlung dafür sorgen, das NO_x im Katalysator effektiver zu reduzieren.

SIMULATIONSERGEBNISSE UND STRÖMUNGMECHANIK

Die zentrale Einblasung von Wasserstoff in den Brennraum wurde mit CFD-Simulationen untersucht, **BILD 3**. Die konzentrierte Strahlform erlaubt einen Start der Einblasung bereits bei noch geöffnetem Einlassventil und bietet somit mehr Zeit für den Homogenisierungsprozess. Zusätzlich sorgt eine gezielte Strahlführung mit Einblasgeschwindigkeiten von mehr als 2000 m/s für ein tiefes Eindringen des Wasserstoffs in den Brennraum. Dadurch löst die Aufwärtsbewegung des Kolbens sehr früh die Vermischung des Wasserstoffs mit der Luft aus, wodurch Lambdawerte zwischen 2 und 2,5 erreichbar sind. Eine optionale Schichtladung mit entsprechender Kolbenmulde zentriert das Wasserstoffgas weiter, vermeidet Kraftstoffanlagerungen in der Nähe der Zylinderwand und somit Leckagen in Richtung Kurbelgehäuse.

Die Ermittlung der Lambdawerte erfolgt erst kurz vor Zündung des Gemischs, da die NO_x-Bildung stark von diesem Parameter abhängt. Eventuell

vorhandene magere oder fette Regionen können gezielt in der Motorapplikation berücksichtigt werden.

PRÜFSTANDS- UND MOTORERGEBNISSE

Der Injektor kann bei 5 bis 30 bar Einblasdruck und von kleinsten Einblasmengen bis hin zur Volllast kontinuierlich betrieben werden. Auch bei höheren Drücken ist eine gute Linearität vorhanden, was eine Motorapplikation sehr erleichtert, **BILD 4** (links). Um eine hohe Stabilität zu erreichen, wurde während der Entwicklung des Injektors auf die gute Wiederholbarkeit der Einblasungen geachtet. Die Shot-to-Shot-Messungen zeigen eine beeindruckende Überdeckungsgenauigkeit. Die Abweichungen innerhalb der Einblaseignisse bei 30 bar Einblasdruck betragen unter 2 %. Auch bei niedrigeren und höheren Drücken sind solche minimalen Abweichungen darstellbar, siehe die kontinuierliche Nadelhubcharakteristik äquivalent zur Einblasmenge, **BILD 4** (rechts).

Motorversuche mit Methan und Wasserstoff haben im Vergleich zur Dieselanwendung reproduzierbare Ergebnisse ergeben. Somit können Gasanwendungen existierende Applikationen gut ersetzen. Studien mit unterschiedlichen Zündwinkelpositionen ergeben trotz großer Zeitpunktunterschiede bei Wasserstoff über einen großen Bereich eine sehr stabile Verbrennung. Der Wasserstoff scheint in allen Lagen gut zu verbrennen.

Am Motor wurden vier Lastpunkte erfolgreich mit Methan gefahren. Der Brennverlauf war in allen Punkten stabil und wiederholbar, **BILD 5**. Im Umkehrschluss bedeutet dies für den Injektor ebenfalls eine hohe Stabilität für die Einblasung sowie gute Shot-to-Shot-Resultate. Auch die Emissionswerte sind gut und kontrollierbar.

EMISSIONEN UND UMWELTASPEKTE

Die Verbrennung von Wasserstoff in großen Schiffsmotoren ist im Hinblick auf CO₂-, NO_x- und Partikelemissionen besonders vorteilhaft. Da Wasserstoff keinen Kohlenstoff enthält, entstehen praktisch keine CO₂-Emissionen, abgesehen von minimalen Anteilen durch Schmierölverbrennung. Partikelemissionen sind nahezu vollständig eliminiert, da ohne Kohlenstoff keine nennenswerte Ruß- oder Feinstaubbildung stattfindet. Herausfordernd bleibt hingegen die NO_x-Bildung, vor allem bei Lambda 1. Mit Lambdawerten um 2,3 lässt sich der Motor nahezu ohne Abgasnachbehandlung betreiben. Eine sehr homogene Kraftstoff-Luft-Gemisch ist die Voraussetzung für stabile NO_x-Werte und vermindert so den Bedarf an Abgasnachbehandlungsmaßnahmen signifikant.

INTEGRATIONS- UND SYSTEMASPEKTE

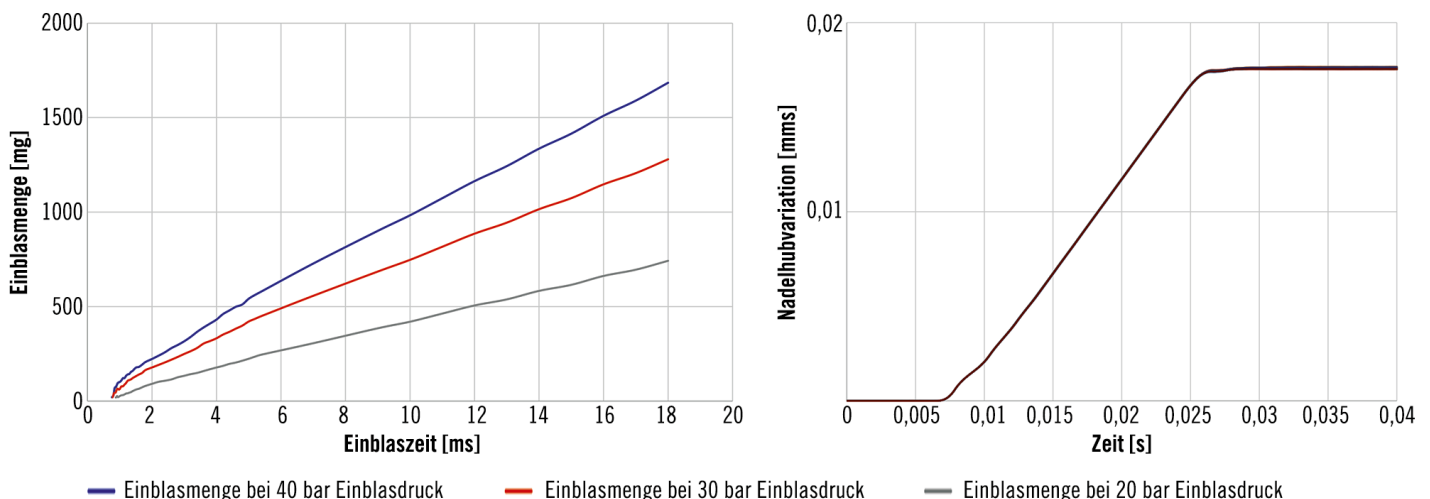
Der Einsatz von Wasserstoff als CO₂-freier Energieträger in der maritimen

Antriebstechnik und der stationären Energieerzeugung stellt hohe Anforderungen an die Systemintegration und -gestaltung. Dazu gehören die Qualität des Wasserstoffs, die Transport- und Betankungslogistik, Sicherheitsrichtlinien und die Abstimmung mit hybriden Energiesystemen. In der Schifffahrt und bei anderen mobilen Großmotorenanwendungen stehen geeignete Wasserstoffspeicher – entweder in Form kryogener Tanks oder als Hochdrucksysteme mit 350 bis 700 bar – sowie die Sicherheitsarchitektur im Fokus. Antriebe mit Wasserstoff-Direktinblasung eignen sich besonders für Fähren, Offshore-Versorger, Küsten- und Binnenschiffe.

Stationäre Anlagen können direkt an Gaspipelines angeschlossen werden. In stationären Energieanlagen, Inselnetzen oder Notstromaggregaten stehen vor allem Flexibilität, Lastwechselverhalten und Netzdienlichkeit im Vordergrund. Hier bietet die Wasserstoff-Direktinblasung hohe Wirkungsgrade, ermöglicht schnelle Lastwechsel und nutzt weitgehend bestehende Gas- oder Dieselpattformen, was die Umrüstung erheblich vereinfacht. Die Einbindung in lokale oder regionale Wasserstoffinfrastrukturen – etwa Elektrolyse, Speicherung und Transportketten – wird zunehmend zum entscheidenden Faktor für die Wirtschaftlichkeit.

Im Vergleich zu Brennstoffzellen mit ähnlicher Leistung sind Motoren mit Wasserstoff-Direktinblasung deutlich kostengünstiger in der Beschaffung und benötigen weniger hochreine Wasserstoffquali-

BILD 4 Einblasmengen bei unterschiedlichen Einblasdrücken (links) und Nadelhubvariation bei 20 Einblasungen (rechts) (© ITAZ)



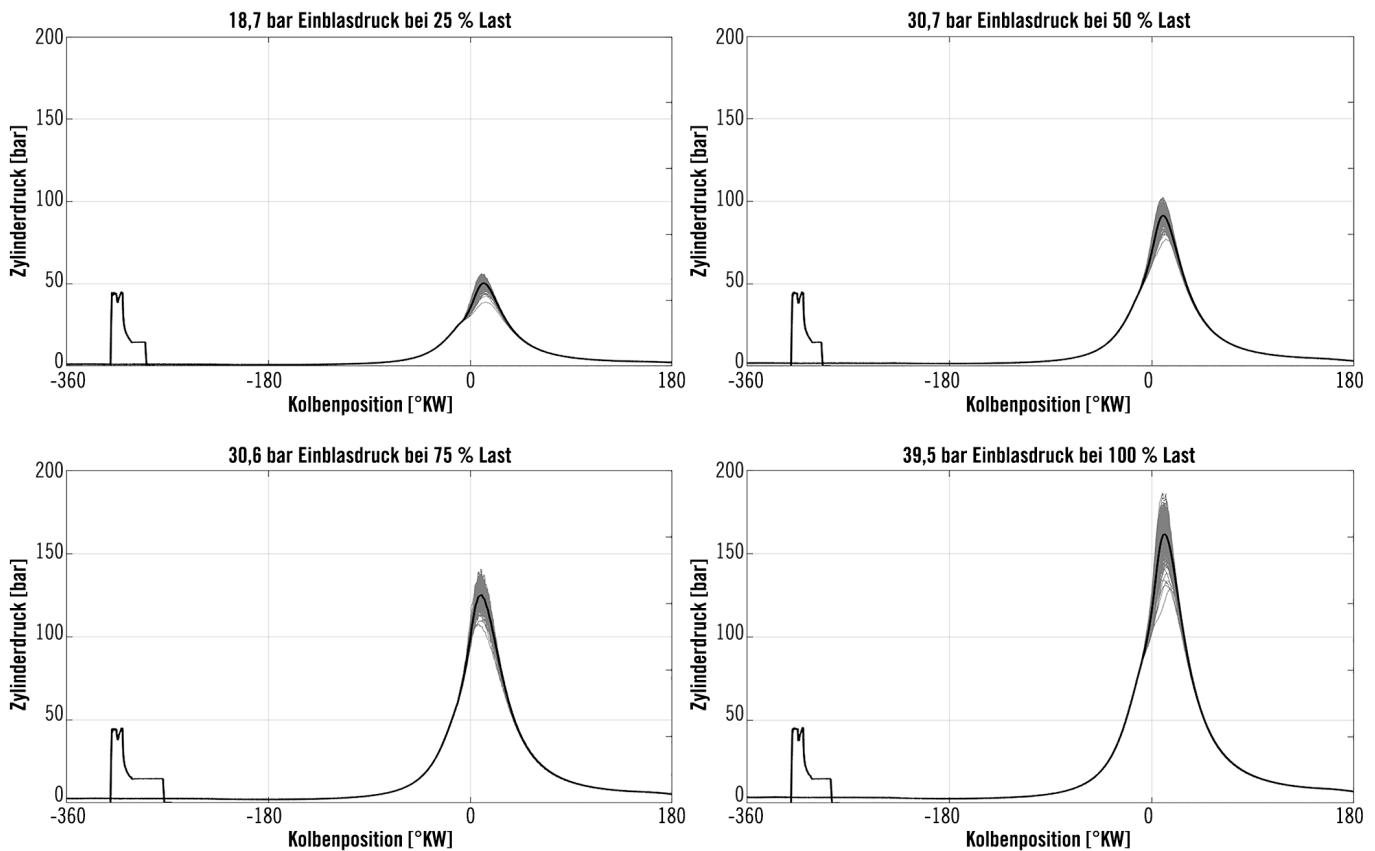


BILD 5 Motordruckverläufe mit Methan bei verschiedenen Betriebspunkten (© Universität Rostock)

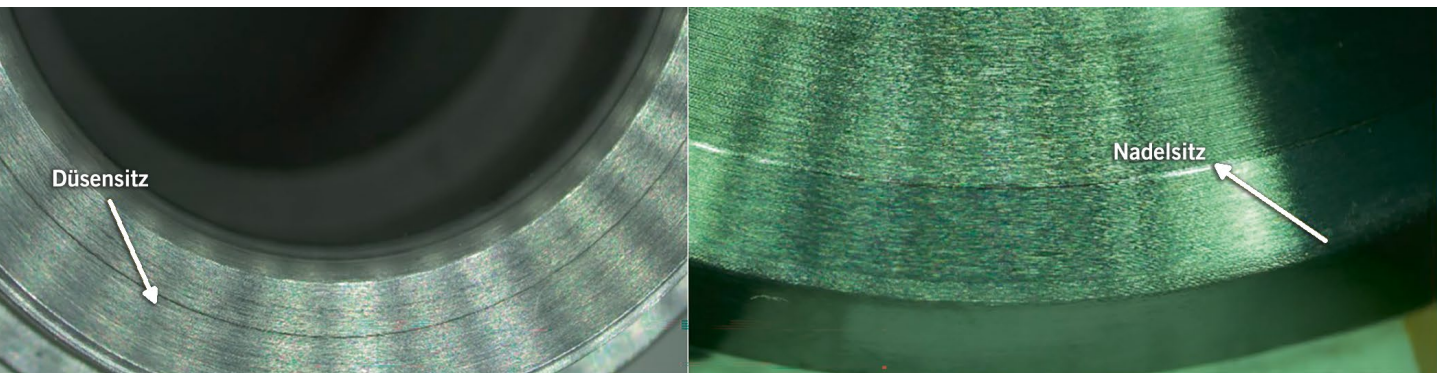


BILD 6 Düsen- und Nadelsitz nach etwa sechs Millionen Zyklen, respektive etwa 280 Betriebsstunden (© ITAZ)

täten. Dank ihrer hohen Robustheit und langen Lebensdauer ergibt sich eine gute Ökobilanz, insbesondere bei Verwendung von „grünem“ Wasserstoff, BILD 6.

AUSBLICK

Es ist damit zu rechnen, dass innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre erste kommerzielle Motoren mit Wasserstoff-Direkteinblasung für maritime Antriebssysteme und stationäre Kraft-Wärme-Kop-

pelungs-Anlagen auf den Markt kommen. Nicht zuletzt, weil sich zunehmend Standards und regulatorische Rahmenbedingungen für Anwendungen und Emissionen etablieren. Parallel wird sich die Technologie weiterentwickeln: noch robustere Einblassysteme, höhere Einblasdrücke bis 400 bar, optimierte Zünd- und Verbrennungsstrategien, Materiallösungen und Schmierstoffe. Dadurch werden sich die technischen Risiken verringern, und die Wirtschaftlichkeit wird allmäh-

lich steigen. Langfristig werden Motoren mit Wasserstoff-Direkteinblasung eine stabile Technologie sein – besonders dort, wo besondere Anforderungen an Leistung, Dauerlast und Infrastruktur weder durch Brennstoffzellen noch durch Batterien erfüllt werden können.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.

Advertisement placeholder

Hier steht eine Anzeige.

Hier staat een advertentie.