

VERFASST VON



Anne Beyer, M. Sc.
ist Wissenschaftliche
Mitarbeiterin am Institut
für Fahrzeugtechnik (IFS)
der Universität Stuttgart.



**Michelangelo Balmelli,
M. Sc.**
ist Doktorand an der
Eidgenössischen Material-
prüfungs- und For-
schungsanstalt (Empa)
und der Eidgenössischen
Technischen Hochschule
Zürich (ETH) (Schweiz).



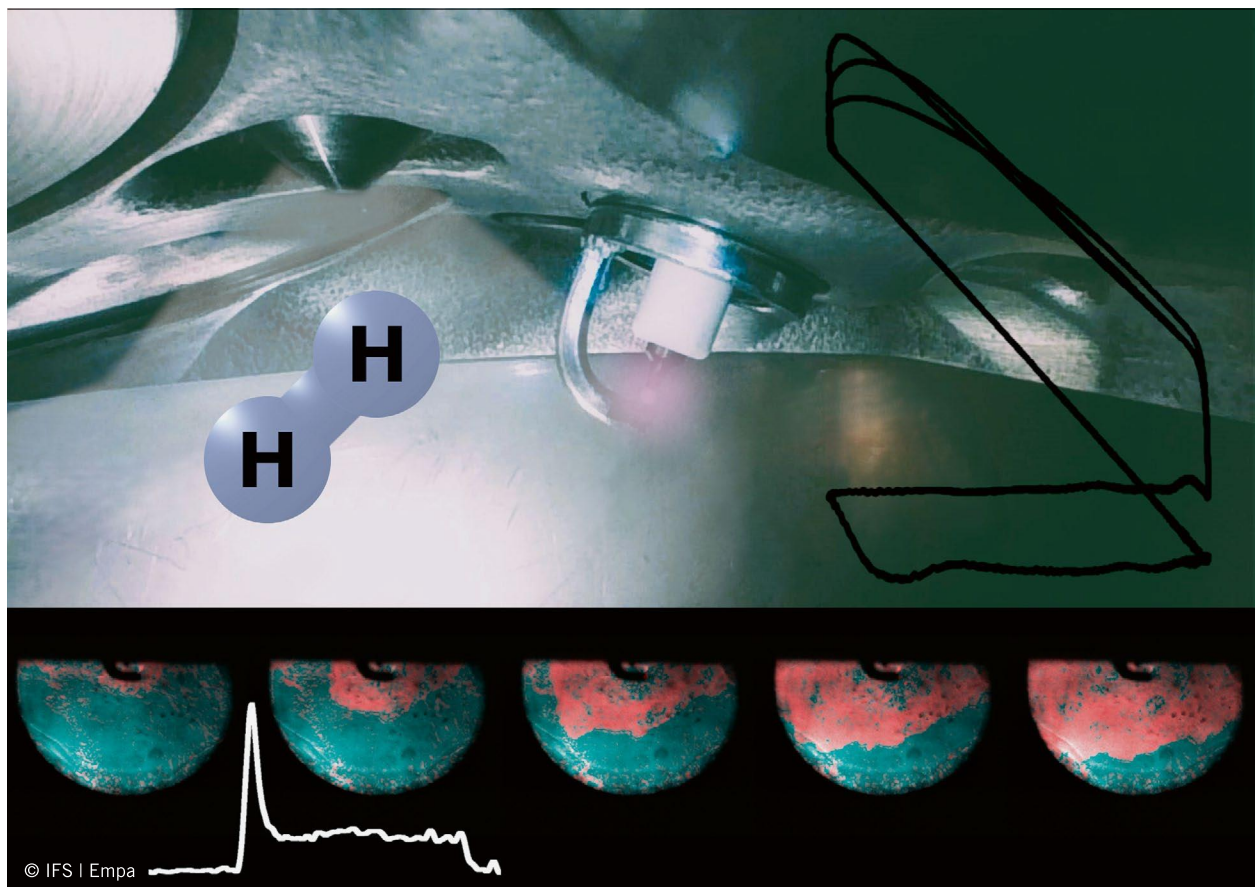
Dr. Laura Merotto
ist Wissenschaftliche
Mitarbeiterin an der
Eidgenössischen Material-
prüfungs- und For-
schungsanstalt (Empa) in
Zürich (Schweiz).



**Prof. Dr.-Ing.
André Casal Kulzer**
ist Inhaber des Lehrstuhls
Fahrzeugantriebssysteme
am Institut für Fahr-
zeugtechnik (IFS) der
Universität Stuttgart.

Strahlgeführte funkengezündete Wasserstoffverbrennung

In schwer zu elektrifizierenden Sektoren rücken kohlenstofffreie Kraftstoffe zur Energiewandlung in den Fokus. Verbrennungsmotoren sind zwar zuverlässig, sie stoßen jedoch insbesondere im mageren Homogenbetrieb auf Einschränkungen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „DIH₂jet“ (FVV-Nr. 1446) wurde an der Universität Stuttgart und an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Zürich ein strahlgeführtes stöchiometrisches Brennverfahren mit Wasserstoff-Hochdruck-direkteinblasung untersucht.



1	MOTIVATION
2	METHODEN
3	STRAHLGEFÜHRTE VERBRENNUNG
4	VARIATION DER EINBLASUNG
5	VARIATION DES SOI
6	EMISSIONEN
7	ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSRICHTUNGEN

1 MOTIVATION

Verbrennungsmotoren zeichnen sich durch Robustheit, Kosteneffizienz und Langlebigkeit aus. Sie weisen eine hohe Toleranz gegenüber Kraftstoff- und Luftverunreinigungen auf und eignen sich daher insbesondere für raue Umgebungsbedingungen, die im Nfz- und Offroadsektor anzutreffen sind. Wasserstoff stellt mit seiner hohen Selbstzündtemperatur einen vielversprechenden Kraftstoff für fremdgezündete Motoren dar – so können hier CO₂-Rohemissionen nahezu vermieden werden. Aufgrund der geringen benötigten Mindestzündenergie und der weiten Zündgrenzen werden jedoch für viele Anwendungen niedrigere Verdichtungsverhältnisse und magere Homogenbetriebe angestrebt, um Verbrennungsanomalien wie Klopfen und Vorentflammung zu vermeiden. Außerdem tragen die geringen Löscharstände zu erhöhten Wandwärmeverlusten bei. Die genannten Gründe führen zu Einbußen in der Leistungsdichte oder hohen Anforderungen an den Ladedruck und nicht zuletzt zu Wirkungsgradnachteilen [1].

Das Forschungsprojekt DIH₂jet (DI-Wasserstoff-Brennverfahren) fokussiert die Entwicklung einer effizienten Wasserstoffverbrennung mit hoher Leistungsdichte: Wasserstoff wird mit überkritischem Druckverhältnis direkt in den Brennraum eingeblasen (Direct Injection, DI) und am Randbereich des Strahls gezündet. Bei weiterhin aktivierter Einblasung findet die Verbrennung überwiegend strahlgeführt statt. Ziel ist ein stöchiometrisches Brennverfahren zur Erreichung hoher Leistungsdichten unter der Vermeidung von Verbrennungsanomalien.

2 METHODEN

Die Umsetzbarkeit und Reproduzierbarkeit des Brennverfahrens lässt sich mit Versuchen am Einzylindermotor(EZ)-Prüfstand und einer sogenannten Rapid Compression Expansion Machine (RCEM) beurteilen [2, 3]. Die RCEM ermöglicht optische und thermodynamische Untersuchungen. Sie ist eine pneumatisch-hydraulische Prüfvorrichtung mit frei fliegendem Kolben und kann einen einzelnen Kompressions- und Expansionshub darstellen. Die thermodynamischen Bedingungen können ähnlich dem Motorbetrieb variieren, jedoch entfällt hier die aus dem Ladungswechsel resultie-

Prüfstand	RCEM	EZ
Untersuchungsziel		
Motortypischer Druck- und Volumenverlauf	Gut, aber die Expansion wird von der Verbrennung beeinflusst (frei fliegender Kolben)	Hervorragend (Kurbeltrieb)
Turbulenz	Laminares Strömungsfeld (Turbulenz nur durch Einblasung und Verbrennung)	Entsteht durch den gesamten Prozess, inklusive Gaswechsel
Qualität der Daten für CFD-Simulationen in 3-D	Sehr gut (initialer Zustand bekannt)	Begrenzt (komplexe Geometrie, Turbulenz)
Motortypische Drücke und Temperaturen	Begrenzt durch den maximalen Energieeintrag	Gut ($p_{max} = 140$ bar)
Emissionsanalyse	Nicht möglich	Sehr gut
Bewertung von thermodynamischen Größen	Hervorragend	Gut
Anpassung an unterschiedliche Geometrien	Gut	Begrenzt bis keine Anpassung möglich
Statistische Analyse (VarK)	Begrenzt	Hervorragend
Einblasung	$p_{Einblasung} = 105$ bar mit Einlochmagnetinjektor HDEV1 von Bosch	$p_{Einblasung} = 80-190$ bar mit Ringspalt-Piezoinjektor HDEV4 von Bosch
CFD: Numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics)		

TABELLE 1 Untersuchungsziele zur strahlgeführten Wasserstoffverbrennung und Eignung der Prüfstände mit der RCEM und dem EZ (© IFS | Empa)

rende Turbulenz. Der frei fliegende Kolben limitiert die maximal mögliche Energiefreisetzung, weshalb die Versuche unter global mageren Bedingungen mit $\lambda = 2,9$ durchgeführt werden. Die RCEM besitzt ein Hubvolumen von 790 cm³ bei einem eingestellten Fülldruck von 1,1 bar und einem Verdichtungsverhältnis von 6,2. Der EZ-Forschungsmotor mit 500 cm³ Hubraum basiert auf dem Vierzylinderbenzinmotor M 254 von Mercedes-Benz und wurde für die Schichtladung entwickelt. Der Zylinderkopf mit dachförmigem Brennraum, einem Tumblekonzept, einer annähernd zentralen Injektorposition sowie einer Zündkerzenposition zwischen den Auslassventilen ist ausreichend gut für die strahlgeführte Wasserstoffverbrennung ausgelegt. Die Versuchsumgebung wird in [4] beschrieben. Die für die Versuche relevanten Untersuchungsziele und die Eignung der beiden Prüfstände sind in **TABELLE 1** gegenübergestellt.

3 STRAHLGEFÜHRTE VERBRENNUNG

Die Ergebnisse eines RCEM-Experiments mit strahlgeführter Verbrennung sind in **BILD 1** zusammengefasst. In **BILD 1** (oben) sind sogenannte OH*-Chemilumineszenz-Aufnahmen zu sehen, die durch das Saphirfenster des Kolbens erfasst wurden. Die Schlieren-Aufnahmen, **BILD 1** (Mitte), zeigen die Perspektive senkrecht zum Brennraum. Das Diagramm in **BILD 1** (unten) stellt den Zylinderdruckverlauf über der Zeit in Blau und den Heizverlauf in Rot dar. Die roten und blauen Kreise entsprechen den Aufnahmezeitpunkten der obigen Bilder, und der Stern stellt den Zündzeitpunkt dar. Die schwarze Linie entspricht der durch den Kraftstoff zugeführten Leistung ($P_{Kraftstoff}$), die mit Gl. 1 definiert wird:

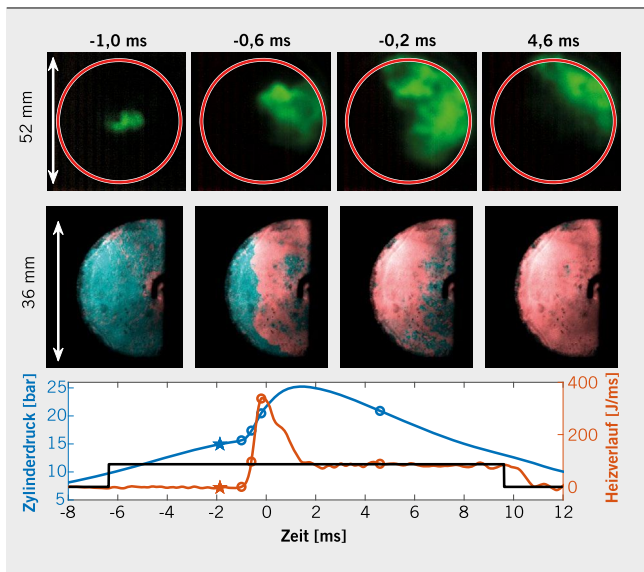


BILD 1 Strahlgeführte Verbrennung in der RCEM: OH*-Chemilumineszenz (oben), Schlieren-Visualisierung (Mitte) sowie Druck- und Heizverläufe (unten) © Empa

mungsphase bestimmt. Nach dem Zündverzug reagiert der bereits vorgemischte Kraftstoff in beiden Fällen schnell, was zum vorgemischtem Maximum im Heizverlauf führt.

Die Differenz in **BILD 1** beträgt zwischen dem SOI und dem Zündzeitpunkt circa 4 ms – bei einem Zündverzug von 1 ms. Sowohl die OH*- als auch die Schlieren-Methode zeigen 1 ms vor dem oberen Totpunkt (OT) einen deutlichen Flammenkern an der Zündkerzenposition. Nach der Zündung breitet sich die Flamme schnell aus und bildet den vorgemischten Anteil der Verbrennung, der sich durch einen Anstieg des Heizverlaufs und signifikante OH*-Signale auszeichnet. Nach der vorgemischten Phase wird der Heizverlauf durch die Einblaserate des Kraftstoffs begrenzt (die rote und die schwarze Linie liegen aufeinander), was der mischungskontrollierten Verbrennung entspricht. Der verbleibende Wasserstoff reagiert nach dem EOI in der späten Verbrennungsphase.

4 VARIATION DER EINBLASUNG

Der Massendurchsatz des Injektors erhöht sich durch einen größeren Raildruck. **BILD 2** zeigt die Auswirkungen am EZ unter stöchiometrischen Bedingungen mit zusätzlicher Variation des Nadelhubes. Ähnlich den Ergebnissen der RCEM zeichnet sich eine vorgemischte und eine anschließende mischungskontrollierte Phase im Heizverlauf ab. Der Zündzeitpunkt und der Wasserstoffmassenstrom bestimmen das Luft-Kraftstoff-Gemisch vor dem Brennbeginn und beeinflussen das Maximum im Heizverlauf, **BILD 2** (links oben). Nach diesem Maximum entspricht der Heizverlauf bis zum Ende der Einblasung der zugeführten Kraftstoffleistung, wodurch die Brenndauer bestimmt wird, **BILD 2** (links unten).

Die vorgemischte Verbrennungsphase wirkt sich erheblich auf den Zylinderdruckgradienten aus, was sich in den unterschiedli-

Gl. 1
$$P_{\text{Kraftstoff}}(t) = \frac{m_{\text{Kraftstoff}}}{\Delta t_{\text{Einblasung}}} H_i [u(t - t_{\text{SOI}}) - u(t - t_{\text{EOI}})]$$

Dabei ist u die Einheitssprungfunktion, $m_{\text{Kraftstoff}}$ die gesamte Kraftstoffmasse, H_i der Heizwert sowie t_{SOI} und t_{EOI} die Zeitpunkte zu Beginn und Ende der Einblasung (Start/End of Injection, SOI/EOI), $\Delta t_{\text{Einblasung}}$ gibt die Einspritzdauer an.

Der Heizverlauf der strahlgeführten Verbrennung ähnelt dem einer Dieselerverbrennung. Der Zündverzug wird in Dieselmotoren typischerweise durch die Verdampfung des Kraftstoffs und den chemischen Verzug bestimmt. Bei der strahlgeführten Verbrennung wird dieser Verzug vom Zündzeitpunkt und der Entflam-

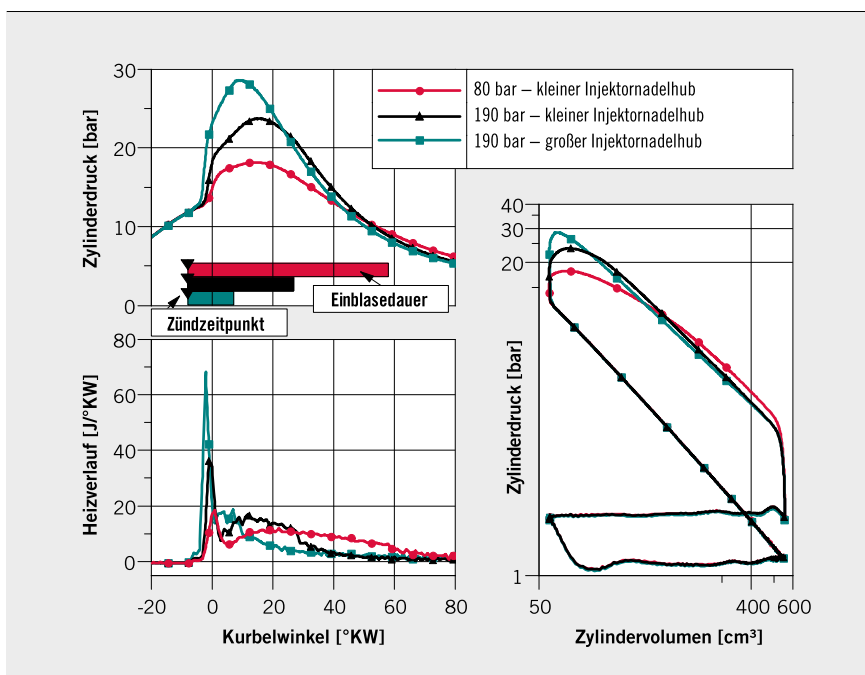


BILD 2 Variation des Kraftstoff-Raildrucks und des Injektornadelhubes im EZ für die strahlgeführte Verbrennung mit $n = 1500/\text{min}$; $p_{mi} = 5 \text{ bar}$; $\lambda = 1$: Zylinderdruck in Abhängigkeit des Zündzeitpunkts und der Einblasdauer (links oben); Heizverlauf (links unten); pV-Diagramm (rechts) © IFS



» Die Zukunft gehört denen, die an die Kraft der Kollaboration glauben, um die Herausforderungen unserer Zeit zu lösen. Wissen und der Austausch von Informationen sind unabdingbar miteinander verknüpft – hier ist ATZ das Medium der Fachleute. «

MARIA ANHALT
Elektrobit Automotive GmbH

Jetzt
kostenlos
testen



www.meinfachwissen.de/ATZ



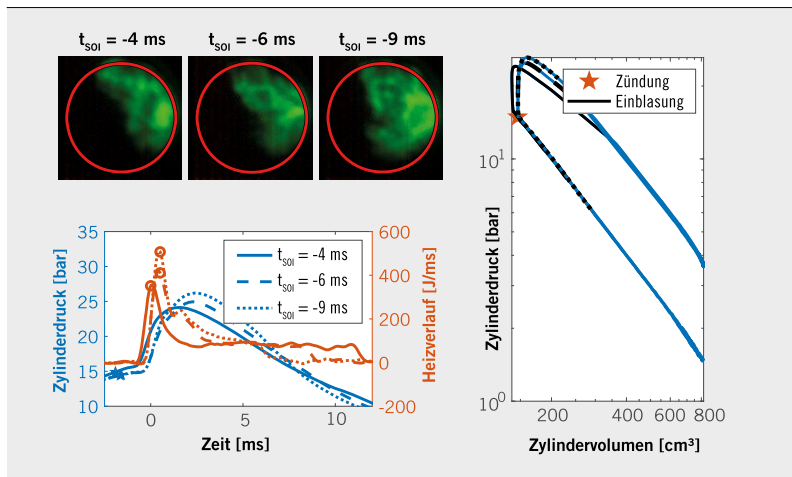


BILD 3 Strahlgeführte Verbrennung in der RCEM mit Auswirkung der unterschiedlichen SOI: OH*-Chemilumineszenz (links oben); Druck-, Heizverlauf (links unten); pV-Diagramm (rechts) (© Empa)

chen isochoren Anteilen im Druck-Volumen(pV)-Diagramm widerspiegelt, **BILD 2** (rechts). Durch Anpassung des Zündzeitpunkts und des Einblasemassenstroms kann die Verbrennung derart gesteuert werden, dass entweder die Brenndauer kurz und effizient gehalten wird oder der maximale Zylinderdruck und der Druckgradient begrenzt werden.

5 VARIATION DES SOI

Zwei weitere Variablen beeinflussen die Verbrennung im strahlgeführten Betrieb: der SOI und der Zündzeitpunkt. Letzterer beeinflusst den Brennbeginn entscheidend und liegt in der RCEM konstant kurz vor dem OT.

Die Diagramme in **BILD 3** (links oben) zeigen die OH*-Chemilumineszenz-Aufnahmen zum Zeitpunkt des Maximums der vorgemischten Verbrennung für drei Experimente mit einem SOI von 4 ms, 6 ms und 9 ms vor dem OT, wobei die Einblasedauer und damit die eingebrachte Kraftstoffmasse konstant gehalten wurde. **BILD 3** (links unten) stellt den zugehörigen Druck- und Heizverlauf

dar, während **BILD 3** (rechts) das doppellogarithmische pV-Diagramm beinhaltet. Ein früherer SOI führt dabei zu einem größeren Verzug zwischen SOI und konstant gehaltenem Zündzeitpunkt. Die verlängerte Gemischbildungsdauer erzeugt eine längere Phase der vorgemischten Verbrennung mit höherem Maximalwert. Entsprechend nimmt das OH*-Signal zum Zeitpunkt des Maximums der vorgemischten Verbrennung mit zunehmendem Verzug einen größeren Bereich ein. Die mischungskontrollierte Verbrennungsphase wird mit zunehmendem Verzug entsprechend kürzer und damit auch die gesamte Brenndauer.

Das lokale Luft-Kraftstoff-Verhältnis wurde mit einer funkeninduzierten Plasmaspektroskopie gemessen. Es nimmt mit einem späteren Zündzeitpunkt ab [3], was die Entflammungsphase und die Zykelschwankungen beeinflusst. Diese Auswirkung als Verzug zwischen SOI und Zündzeitpunkt wurde im EZ mit $n = 1500/\text{min}$, $p_{mi} = 5 \text{ bar}$ und $\lambda = 1$ untersucht. Bei einem konstanten 50%-Umsatzpunkt (MFB50) von 8° nach Zünd-OT wird die Verzögerung zwischen SOI und Zündzeitpunkt variiert. **BILD 4** zeigt pV-Diagramme von 200 aufeinanderfolgenden Zyklen sowie den mittlere-

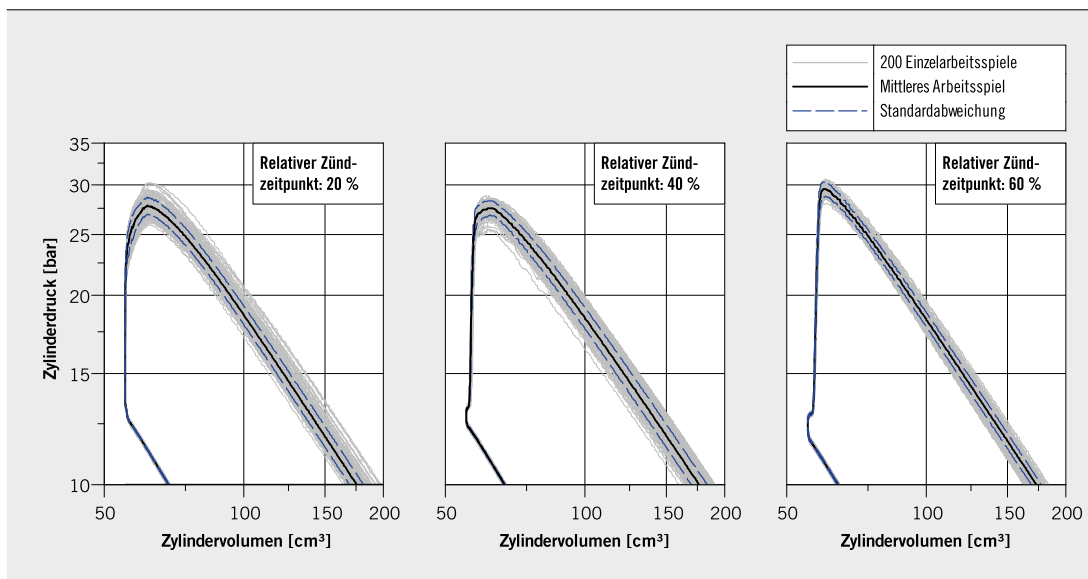


BILD 4 pV-Diagramme von 200 Einzelarbeitsspielen mit jeweils drei relativen Zündzeitpunkten: Einfluss auf die zyklischen Schwankungen des EZ im strahlgeführten Betrieb bei $n = 1500/\text{min}$; $p_{mi} = 5 \text{ bar}$; $\lambda = 1$ (© IFS)

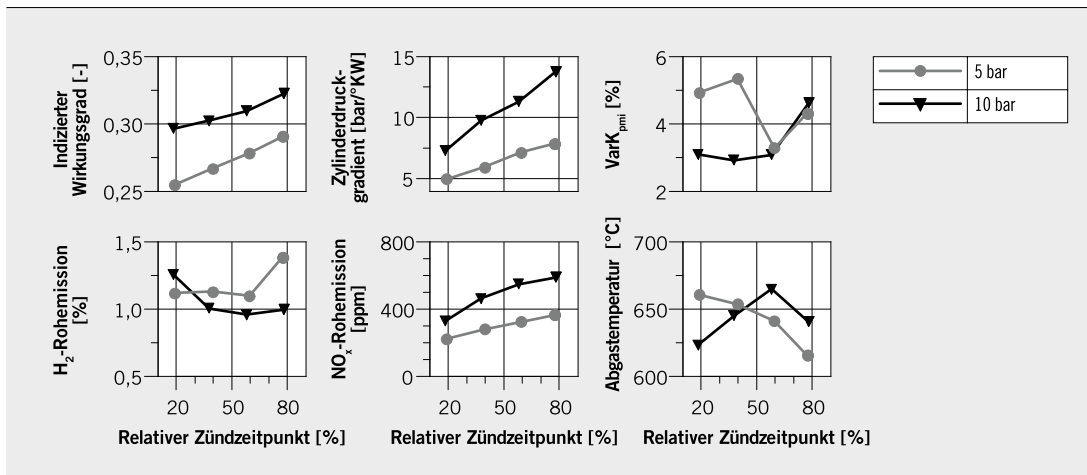


BILD 5 Verschiedene Messungen im EZ bei stationärem Motorbetrieb mit $p_{mi} = 5$ bar beziehungsweise 10 bar und $n = 1500/\text{min}$; $\lambda = 1$ (© IFS)

ren Zyklus und die Standardabweichung für drei verschiedene relative Zündzeitpunkte (Zündung nach 20 %, 40 % beziehungsweise 60 % der Einblasedauer). In diesem Betriebspunkt reduziert ein größerer Verzug zwischen SOI und Zündung den Variationskoeffizienten (VarK) des p_{mi} .

6 EMISSIONEN

BILD 5 zeigt verschiedene Messergebnisse einer Variation des relativen Zündzeitpunkts im stationären Motorbetrieb mit $p_{mi} = 5$ bar beziehungsweise 10 bar. Längere Verzugszeiten verbessern den indizierten Wirkungsgrad, **BILD 5** (links oben), aber gleichzeitig steigen die Zylinderdruckgradienten und die NO_x-Rohemissionen, **BILD 5** (Mitte oben und unten). Im Vergleich zum Motorbetrieb mit $p_{mi} = 5$ bar ist der VarK_{pmi} der 20- und 40%-Varianten bei $p_{mi} = 10$ bar geringer, **BILD 5** (rechts oben). Das lässt sich auf den unterschiedlichen vorgemischten Anteil der Verbrennung zurückführen, der das lokale Gemisch beeinflusst (die absolute Differenz zwischen SOI und Zündung variiert) sowie auf die lange anschließende mischungskontrollierte Phase mit einer stabilisierenden konstanten Kraftstoffzufuhr. Durch den Übergang von der mischungskontrollierten zur überwiegend vorgemischten Verbrennung steigt der VarK_{pmi} bei beiden Motorlasten für den 80%-relativen Zündzeitpunkt an.

7 ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSRICHTUNGEN

Das Projekt verfolgt einen Ansatz zur mischungskontrollierten dieselähnlichen Wasserstoffverbrennung, die Klopf- und Vorentflammungsphänomene wirksam unterdrückt. Zukünftige Forschungsaktivitäten im Bereich Nfz-Anwendungen sollten sich vorwiegend auf die Optimierung des Einblasevorgangs mit wasserstoffspezifischen Injektoren sowie die CFD-Untersuchung zur Wechselwirkung zwischen Wasserstoffstrahl und Zündquelle konzentrieren. Entscheidend sind außerdem Untersuchungen von Methoden zur Verringerung des Wasserstoffschlupfs sowie die Anwendung dieselähnlicher Maßnahmen, zum Beispiel Abgasrückführung und höhere Verdichtungsverhältnisse zur Verbesserung der Motoreffizienz und -leistung. Die gemessene hohe H₂-Konzentration im Abgas im stöchiometrischen strahlgeführten Betrieb, **BILD 5** (links unten), könnte auch bei leicht mageren

Bedingungen zur Reduktion der NO_x-Emissionen im Abgasnachbehandlungssystem verwendet werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Yip, H. L.; Srna, A.; Yuen, A. C. Y.; Kook, S.; Taylor, R. A.; Yeoh, G.H.; Medwell, P. R.; Chan, Q. N.: A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion. In: Applied Sciences 9 (2019), Nr. 22, Artikel 4842
- [2] Merotto, L.; Balmelli, M.; Soltic, P.: Hydrogen direct injection: Optical investigation of premixed and jet-guided combustion modes. In: International Journal of Hydrogen Energy 61 (2024), S. 284-295
- [3] Balmelli, M.; Merotto, L.; Wright, Y.; Bleiner, D.; Biela, J.; Soltic, P.: Optical and thermodynamic investigation of jet-guided spark ignited hydrogen combustion. In: International Journal of Hydrogen Energy 78 (2024), S. 1316-1331
- [4] Beyer, A.; Balmelli, M.; Merotto, L.; Wright, Y. M.; Soltic, P.; Kulzer, A. C.: DIH₂jet (DI Hydrogen Combustion Process). Online: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-45010-6_4, aufgerufen: 11. Oktober 2024

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Nr. 1446) wurde am Institut für Fahrzeugtechnik (IFS) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Prof. André Casal Kulzer und von der Gruppe Antriebssysteme von Dr. Patrik Soltic an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (IGF/CORNET-Nr. 307 DE) im Rahmen des internationalen Förderprogramms CORNET (Collective Research Networking) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestags finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Stephan Liebsch (IAV GmbH) begleitet. Darüber hinaus wurde es vom Schweizer Bundesamt für Energie (SI/502205 01) und von der FVV e. V. (Fördernummer 6014462) finanziell unterstützt. Die Autoren und Autorinnen bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Weiterer Dank gilt Dr. Patrik Soltic (ETH) und Dr. Yuri Wright (Empa) für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieses Artikels.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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