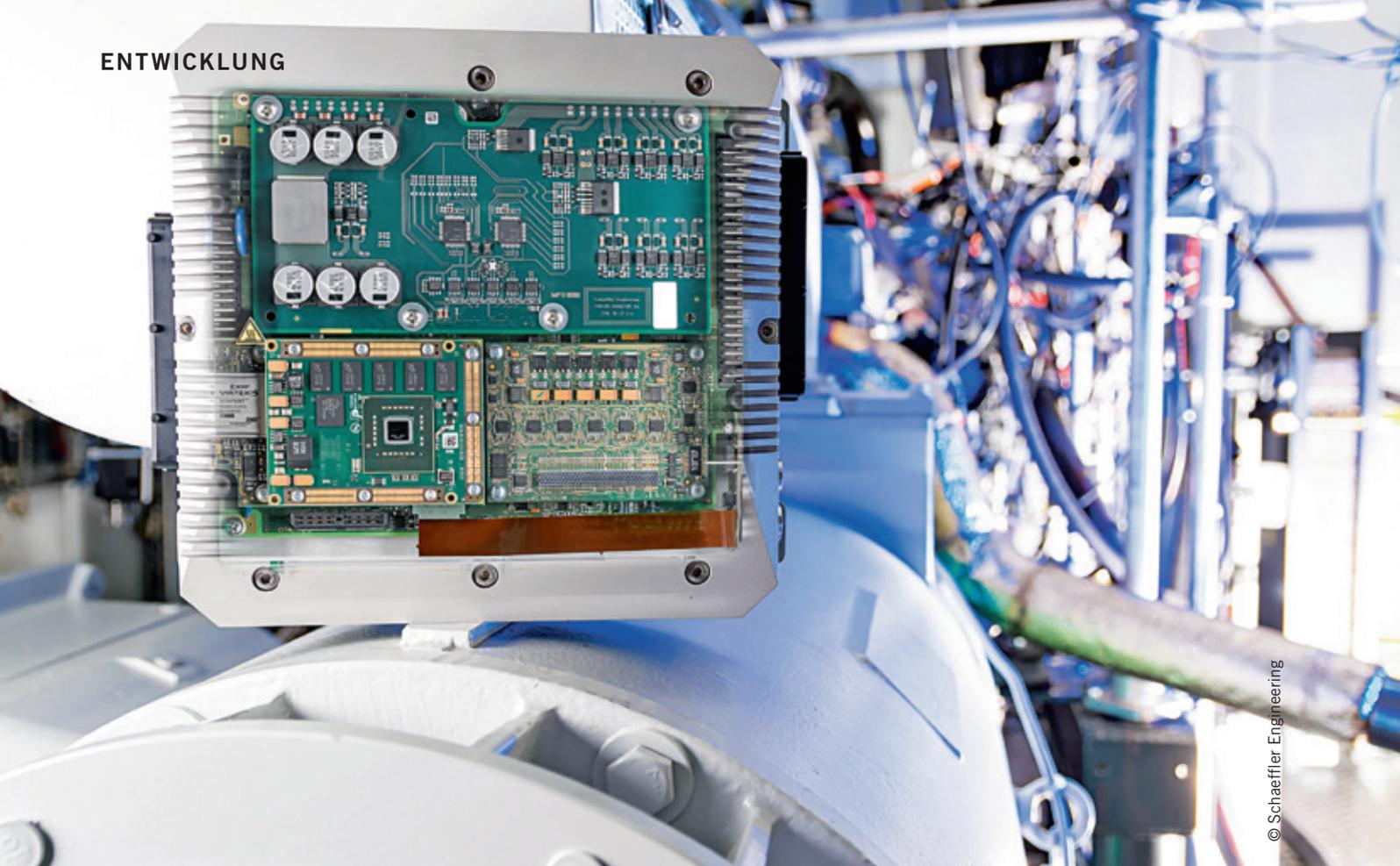


MTZ extra

H₂-Motoren

Steuergeräte-, Funktionsentwicklung
und Applikation

SCHAEFFLER
ENGINEERING



Steuergeräte-, Funktionsentwicklung und Applikation für Wasserstoff-Verbrennungsmotoren

Wasserstoff wird als künftigen Energieträger hohe Aufmerksamkeit zuteil. Dabei stellen Komplexität und Anforderungen von Wasserstoffmotoren sowie darauf basierende Antriebe besondere Herausforderungen für alle beteiligten Entwicklungspartner dar. Ausgehend von Projekterfahrungen zeigt Schaeffler Engineering, was es hinsichtlich Funktions- und Steuergeräteentwicklung, Inbetriebnahme und Prüfstandsuntersuchungen von H₂-Motoren zu beachten gilt.

Wasserstoff als alternativer Kraftstoff für Nutzfahrzeuge ist seit längerem in der Diskussion und Gegenstand zahlreicher Entwicklungs- und Serienprojekte. Wie so oft ist auch hier die Übertragbarkeit und im besten Fall der nahtlose Übergang von der Entwicklung in die Serie ein entscheidender Faktor dafür,

wie schnell diese CO₂-freie Antriebsart Alltag wird. Schaeffler Engineering setzt in Projekten eine Methode ein, die Kunden mit einer durchgängigen Application-Lifecycle-Management-Toolkette unterstützt und kontinuierlich begleitet. Die Toolkette reicht von Grundlagenuntersuchungen am Thermodynamik-Motoren-

AUTOREN



Dr.-Ing. Jens Steinmill
ist Systemspezialist Powertrain Engineering bei der Schaeffler Engineering GmbH in Werdohl.



Dipl.-Ing. Lars Pfützenreuter
ist Senior Manager Engineering Solutions bei der Schaeffler Engineering GmbH in Werdohl.

	Grundlagenuntersuchungen	Fahrzeugdemonstrator	Kleinserienanwendungen
Steuergeräte-Hardware	Protronic Topline	Protronic Topline/Targetline	Protronic Targetline
Steuergeräte-Werkzeugkette	Durchgängige Werkzeugkette zur Konfiguration und Programmerstellung aus Matlab/Simulink		
Funktionssoftware (FSW)	Durchgängiges Matlab/Simulink-Modell mit einzeln validierbaren Modulen und Komponenten		
Auswertung von Simulation	Durchgängiges Post-Processing zur Applikation und Messdatenauswertung in Interaktion mit der FSW		

BILD 1 Vereinfachte Darstellung der Projektphasen (© Schaeffler Engineering)

prüfstand über die Integration des Motors in einen Fahrzeugdemonstrator bis in die Kleinserienanwendung [1, 2].

TYPISCHE PROJEKTPHASEN

Viele Projekte mit H₂-Verbrennungsmotoren durchlaufen folgende Phasen:

- Entwicklung einer neuen oder angepassten Motorsteuerung mit H₂-spezifischen Funktionen
- Grundlagen-/Thermodynamikuntersuchungen am Motorenprüfstand
- dynamischer Betrieb am Motorenprüfstand im WHTC-Zyklus
- Integration des Antriebsstrangs in einen Fahrzeugdemonstrator
- Überführung des Fahrzeugdemonstrators in die Kleinserie.

In allen Projektphasen kann die Verantwortlichkeit für die Steuergerätehardware, die Funktionsentwicklung, die

Applikation auf den Wasserstoffprüfständen am Standort in Werdohl und im Fahrzeug übernommen werden, **BILD 1**.

DURCHGÄNGIGE WERKZEUGKETTE

Für Grundlagenuntersuchungen und die ersten Fahrzeugdemonstratoren kommt eine eigene, speziell für RCP-Anwendungen, konzipierte Entwicklungssteuergerätevariante zum Einsatz. Für den Betrieb des Fahrzeugdemonstrators sowie gegebenenfalls später folgende Kleinserienanwendungen kann eine andere, inhouse entwickelte Variante eingesetzt werden.

Die Protronic Topline, **BILD 2**, ist ein Rapid-Control-Prototyping-(RCP-)Steuergerät mit hoher Rechenleistung und einer hohen Zahl an Ein- und Ausgängen, die alle relevanten Bussysteme (SENT, CAN, Flexray, Broadr-Reach)

unterstützt. Die Hardwarekonfiguration wird über ein grafisches Tool angepasst. Die Eingangsbeschaltung kann bei Bedarf mit geringem Aufwand variiert werden. Die Protronic Targetline, **BILD 3**, ist als Seriensteuergerät einsetzbar. Dieses Steuergerät ist kostensensitiver ausgeführt, mit einem qualifizierten Gehäuse, Stecker aus der Großserie, validierten und qualifizierten Hardware-Funktionsblöcken sowie bereits im Feld erprobten Softwaremodulen mit hohem Reifegrad. Das Design ist bis zu ISO 26262 ASIL-D-Anforderungen für funktionale Sicherheit ausgelegt. Beide Steuergeräte vereint die identische, hochautomatisierte Toolkette auf Basis von Matlab/Simulink beziehungsweise Targetlink. Die Erstellung des Steuergeräteprogramms mit den für die Applikation benötigten Beschreibungsdateien (A2L) erfolgt direkt aus Matlab/Simulink und



BILD 2 Protronic Topline (© Schaeffler Engineering)

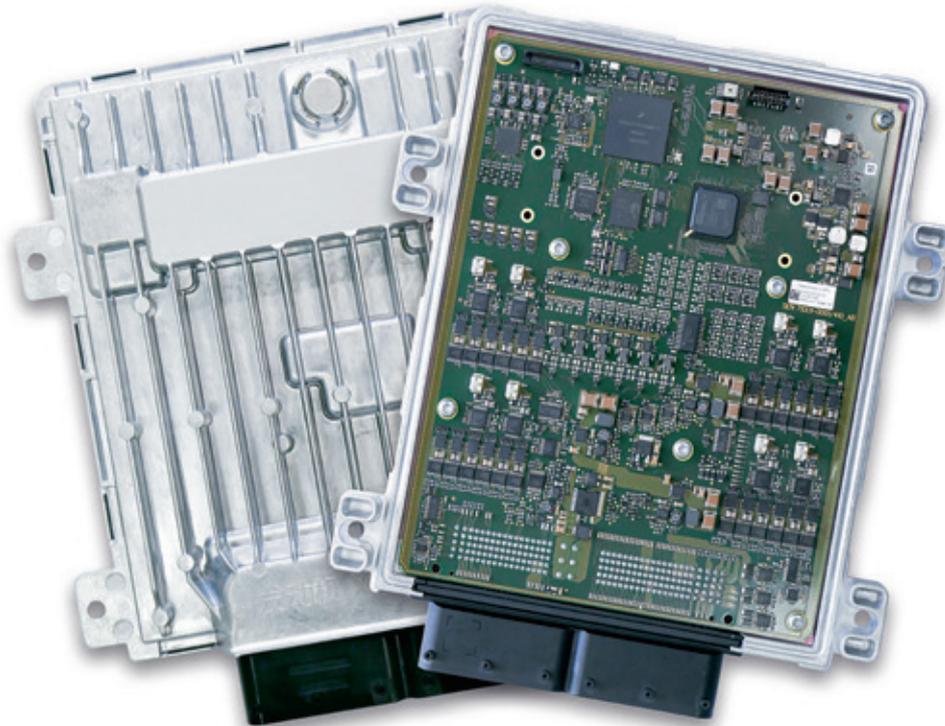


BILD 3 Protronic Targetline (© Schaeffler Engineering)

ist je nach Komplexität der Software in wenigen Minuten abgeschlossen.

Beim Wechsel zwischen beiden Steuergeräten kommt es zu keinem Bruch in der Toolkette. Auch die Anwendungssoftware, die die Motorsteuerungs- und bei Bedarf Hilfsfunktionen enthält, kann direkt übernommen werden. Die gesamte Toolkette, inklusive der Anwendungssoftware, kann an den Kunden weitergegeben werden.

OPTIMIERTES BASISMODELL

Passend zur eigenen Hardware wurde ein herstellerunabhängiges Basismodell entwickelt, das auf die Anforderungen von H₂-Verbrennungsmotoren angepasst ist und in Kundenprojekten eingesetzt wird. Das Basismodell nutzt den Embedded Coder von The Mathworks und ist als Multiratesystem in die Teilbereiche Drehmomentenmanagement, Energieumsetzung, Luft-, Kraftstoff- und Abgassystem gegliedert. Diagnose- und Hilfsfunktionen sind übergreifend implementiert. Momentenanforderungen können auf dem Luft-, Kraftstoff- und Zündungspfad umgesetzt werden. Spezifische, für den H₂-Betrieb notwendige Funktionen sind bereits enthalten, darunter eine angepasste Füllungserfassung, ein Partial-

druckmodell zur Bestimmung der Gasgemischzusammensetzung im Saugrohr, optimierte Lambdaerler und Funktionen zur Ansteuerung von H₂-Druckreglern.

Die Dokumentation des Modells wird automatisch generiert. Durch die Architektur des Modells eignet es sich vom RCP- bis zum Serieneinsatz und ist durch die Abstraktionsebenen, **BILD 4**, unabhängig von der im vorliegenden Fall genutzten firmeneigenen Hardware nutzbar.

Die äußerste Schicht der Motorsteuerungssoftware umfasst Blöcke des Application Controller Interface (ACI) der eigenen Entwicklungs-Toolkette und stellt die Verbindung zur Basissoftware beziehungsweise zur Steuergeräteschnittstelle dar, **BILD 5**.

In den App-In- beziehungsweise App-Out-Modellen sind alle Funktionalitäten

enthalten, die je nach Steuergerätefamilie zur Basissoftware gehören. Die Anwendungssoftware (ASW) ist klassisch in Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe unterteilt. Sowohl die Module der Motorsteuerung als auch die Hilfsmodule sind als referenzierte Subsysteme ausgeführt und einzeln mittels eigener Testumgebungen verifizierbar und anschließend validierbar. Hierdurch ist auch der Einsatz von Versionierungswerkzeugen, wie IBM Synergy, Subversion oder Git zur Abbildung von einer verteilten Entwicklung in großen Teams umsetzbar.

PRÜFSTÄNDE FÜR H₂-VERBRENNUNGSMOTOREN

Für den Betrieb von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren wurden eigene Prüf-

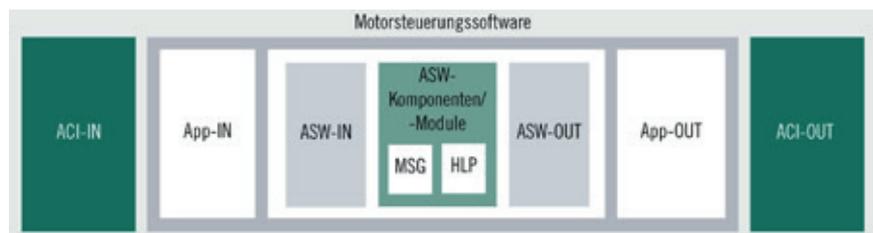


BILD 4 Softwarearchitektur-Basismodell (© Schaeffler Engineering)

Application Controller Interface

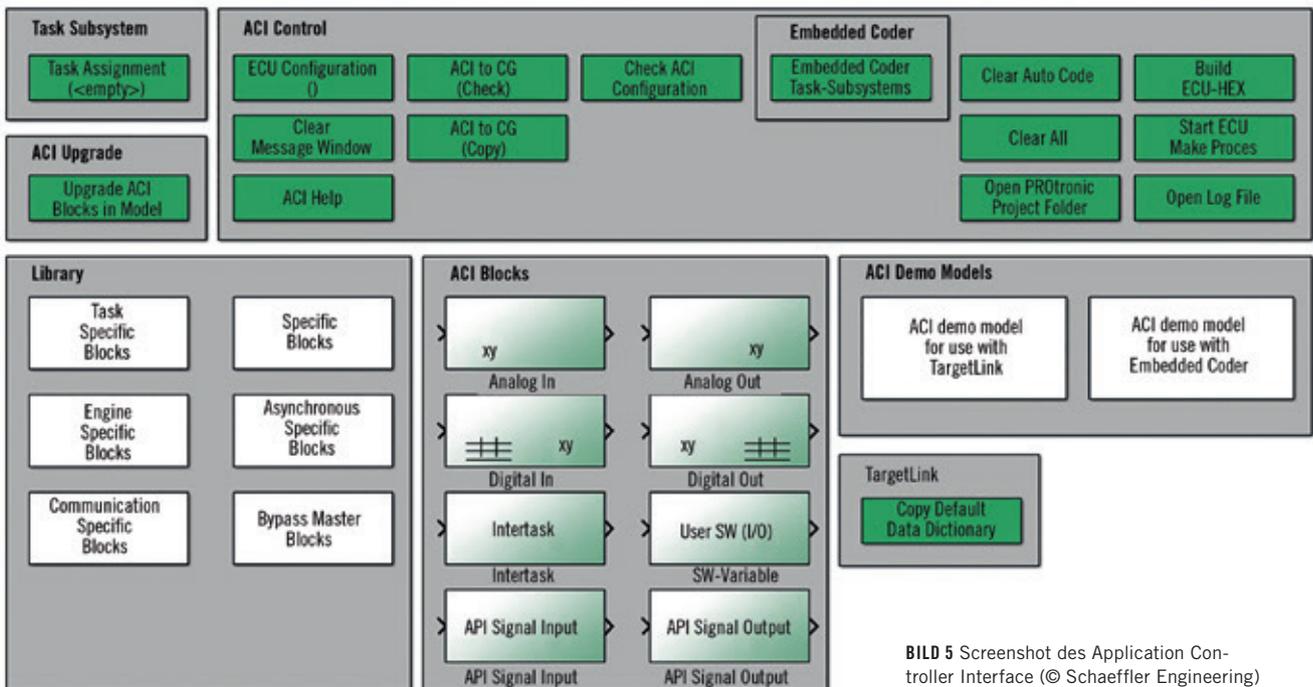


BILD 5 Screenshot des Application Controller Interface (© Schaeffler Engineering)

stände um die notwendige H₂-Infrastruktur mit entsprechender Sicherheitstechnik erweitert. Je nach Projekt kann die Versorgung mit Wasserstoff entweder mittels Flaschenbündel oder H₂-Trailern umgesetzt werden. Der Wasserstoffdruck kann bis zu 100 bar am Motor und der Wasserstoffmassenstrom bis zu 45 kg/h betragen. In Kombination mit Belastungsmaschinen, die bis zu 560 kW bei 3000 Nm und einer Maximaldrehzahl von 6000 beziehungsweise 8000/min leisten, lassen sich breite Anwendungsfelder bis in den Heavy-Duty-Bereich abdecken. Zur Messung der typischen Abgasbestandteile wird eine angepasste AMA i60 von AVL genutzt.

APPLIKATIONSHILFEN

Die Motorsteuerungs-(MSG-) und Hilfsmodule zur Applikation am Prüfstand und im Demonstrator-Fahrzeug befinden sich in einem Matlab/Simulink-Modell. Im vorliegenden Ansatz wird die Schnittstelle durch ein Integrationsmodell dargestellt, das sowohl die Kommunikation der Module untereinander als auch die Einbindung der Hilfsmodule ermöglicht. Externe Schnittstellen zwischen den Hilfs- und MSG-Modulen entfallen. Letz-

tere bleiben unverändert und behalten somit auch nach Entfernen der Hilfsfunktionen ihre Integrität. Wurde bei der Grundlagenuntersuchung am Motorenprüfstand in der frühen Projektphase ein Softwaremodul bereits nach dem Entwicklungsprozess abgebildet und validiert, kann dieses bis in die Serie beibehalten werden.

Latenzzeiten beim Datenaustausch zwischen den Hilfs- und den MSG-Modulen sind bei diesem Ansatz nicht relevant. Der Datenaustausch mit dem Prüfstandssystem erfolgt mit einer Maximalfrequenz von 10 kHz. Die Systemarchitektur am Motorprüfstand, wie sie in aktuellen Projekten zum Einsatz kommt, zeigt **BILD 6**.

Mit dieser Architektur wurden schnelle Hilfsfunktionen zur Applikation und Performancebewertung von H₂-Verbrennungsmotoren abgebildet, die alternativ nur durch den aufwendigen Einsatz weiterer externer Systeme umsetzbar sind.

KLOPF- UND GLÜHZÜNDUNGSKENNUNG

Das Klopfverhalten von Wasserstoffverbrennungsmotoren unterscheidet sich von dem konventioneller Ottomotoren, weil die Entflammungstemperatur höher,

da die notwendige Zündenergie des Wasserstoff-Luft-Gemischs jedoch deutlich niedriger ist. Des Weiteren werden die meisten konventionellen Ottomotoren mit einem stöchiometrischen Gemisch betrieben. Die in frühen Entwicklungsphasen eventuell auftretenden Abweichungen in Richtung eines fetteren Gemischs bleiben bei diesen Brennverfahren bis zur Brenngrenze am Motorenprüfstand beherrschbar.

Bei Wasserstoffmotoren, die mit einem deutlichen Luftüberschuss betrieben werden, bedeuten Gemischabweichungen in Richtung eines fetteren Gemischs einen unmittelbaren Drehmomentanstieg, der von signifikanten Klopfereignissen begleitet werden kann. Daher ist eine schnelle Klopfkennung und -reaktion während der Applikation am Motorprüfstand von elementarer Bedeutung.

Hilfsmodule werten die vom Indiziersystem in Echtzeit bestimmten Klopfpeaks und Integrale aus. Wird auf einem Zylinder ein signifikantes Klopfereignis erkannt, stoppt die Eingassung des Wasserstoffs unmittelbar. Da bei Mehrzylindermotoren auf den folgenden Zylindern sehr wahrscheinlich bereits Wasserstoff eingegast wurde, kann für diese aus den folgenden Strategien gewählt werden:

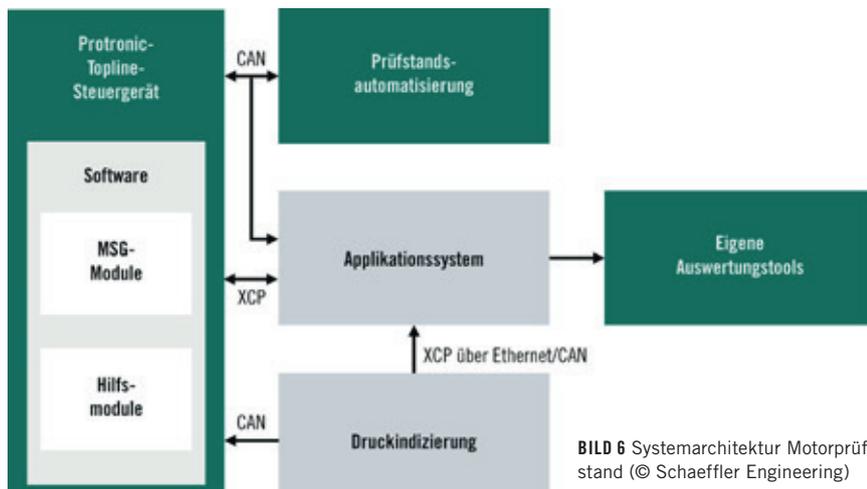


BILD 6 Systemarchitektur Motorprüfstand (© Schaeffler Engineering)

- Verbrennung des Wasserstoffs mit sehr spätem Zündwinkel: Hierbei wird je nach Betriebspunkt und Motorverhalten ein Klopfen meist verhindert. Der eingebrachte Wasserstoff wird nahezu vollständig umgesetzt.
- Deaktivieren der Zündung: Unverbrannter Wasserstoff wird aus dem Zylinder wieder ausgeschoben. Hierbei ist die Gefahr von weiteren Klopfereignisse ausgeschlossen. Glühzündungen können weiterhin auftreten. Allerdings müssen sowohl die Komponenten der Abgasanlage des Motors als auch der Prüfstands Aufbau unverbrannte Wasserstoffanteile im Abgas tolerieren.

TIME-TO-TORQUE-BEWERTUNG

Die zurzeit erfolversprechendsten Brennverfahren für Wasserstoffverbrennungsmotoren werden meist mager ($\lambda > 2$) und mit hohen AGR-Raten ausgeführt. Zur gleichzeitigen Darstellung von hohen spezifischen Drehmomenten sind hohe Ladedrücke bei gleichzeitig geringen Abgastemperaturen erforderlich. Das stellt hohe Anforderungen an die Aufladegruppe und einen Zielkonflikt zum schnellen Aufbau von Drehmoment dar. Daher besteht in der Entwicklung häufig der Wunsch, Motoren und Aufladegruppen auch ohne abgeschlossene Applikation der Motor-

steuerung inklusive des Momentenmodells bei variierenden Betriebsstrategien zu bewerten.

Hierzu wurden Hilfsmodule implementiert, die vorgesteuert beliebig definierte Last- und Drehzahl sprünge mit Steuerung beziehungsweise Regelung des Luft-, Kraftstoff-, Zündungs- und AGR-Pfads abbilden können. So kann bereits in frühen Entwicklungsphasen die spätere Performance des Systems im Hinblick auf die Dynamik des Drehmomentenaufbaus und den dabei entstehenden Stickoxidemissionen bewertet und das Risiko einer Projektverzögerung durch weitere Iterationschleifen bezüglich der Auslegung der Aufladegruppe oder des Gesamtsystems minimiert werden.

ONLINE-REGELUNG

Die eingesetzten Hilfsmodule können in Kombination mit dem Prüfstandssystem automatische Variationen des Kraftstoff-Luftgemischs, des Zündwinkels oder der AGR-Rate durchführen. Hierbei werden Grenzen durch Momenten-, Mittelwert-, Standardabweichung oder Varianz beliebiger Größen der Motorsteuerung, der Indizierung oder des Prüfstandssystems definiert. Daraus können Größen wie Verbrennungsstabilität, Laufruhe und Klopfintensität abgeleitet werden.

Bei Durchführung der automatisierten Messungen durch Regelung des effektiven Moments und der Verbrennungsschwerpunkt-lage im Sinne von Closed Loop Combustion Control wird die Identifikation von optimalen Betriebspunkten hinsichtlich Wirkungsgrad, Emissionen und Verbrennungsstabilität deutlich optimiert.

Ergänzt werden die Methoden durch Post Processing Tools, die die kontinuierlich aufgenommenen Messdaten statistisch auswerten.

ZUSAMMENFASSUNG

Das vorgestellte Verfahren für H_2 -Entwicklungsprojekte beruht auf der langjährigen Erfahrung mit Prototypen- und Serienentwicklungen im Gasmotorenkontext. Dadurch lassen sich unterschiedlichste Szenarien von thermodynamischen Untersuchungen am Motorprüfstand bis zur Kleinserie für Wasserstoffverbrennungsmotoren darstellen. Die eingesetzte und auf unterschiedliche Anforderungen flexibel anpassbare Kombination aus Hardware, Software und Prüfstand unterstreicht den Systemgedanken, der für diese anspruchsvollen, zukunftsorientierten und innovativen Projekte erforderlich ist.

LITERATURHINWEISE

- [1] Ibing, C.; Witt, B.: Angepasstes Diesel-Großseriensteuergerät für Erdgasmotor. In: ATZ Offhighway 8 (2015), S. 40-47
- [2] Sechtenbeck, C.: Capability Maturity Model Integration (CMMI) auf Basis einer durchgängigen IBM Rational Toolkette. Innovate, The IBM Technical Summit, 2013

DANKE

Die Prüfstands-, Hard- und Softwareentwicklung ist das Ergebnis der hervorragenden Teamarbeit aller Projektbeteiligten und Entwicklungspartner, bei denen sich die Autoren an dieser Stelle bedanken möchten.

IMPRESSUM:

Sonderausgabe 2021 in Kooperation mit Schaeffler Engineering GmbH, Gewerbestraße 14, 58791 Werdoh; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE811484199

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

PROJEKTMANAGEMENT:

Anja Trabus

TITELBILD: © Jorg Greuel



Was morgen die Welt bewegt,
bewegt uns schon heute.

Leistungsportfolio für die Verwendung von Wasserstoff im Antriebsstrang

Auf Basis unseres Mechatronik-Know-hows setzen wir technische Innovationen in zukünftige Antriebssysteme um. Bei den Themen H_2 -Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle bieten wir unseren Kunden und Partnern eine einzigartige Kombination aus eigenen Softwaremodellen und Steuergeräten, H_2 -fähigen Prüfständen und fachlicher Expertise. Mit unserem umfassenden Systemverständnis tragen wir so dazu bei, die Welt von morgen sauberer zu machen.

www.schaeffler-engineering.com

SCHAEFFLER
ENGINEERING