

MTZ

MOTORTECHNISCHE ZEITSCHRIFT

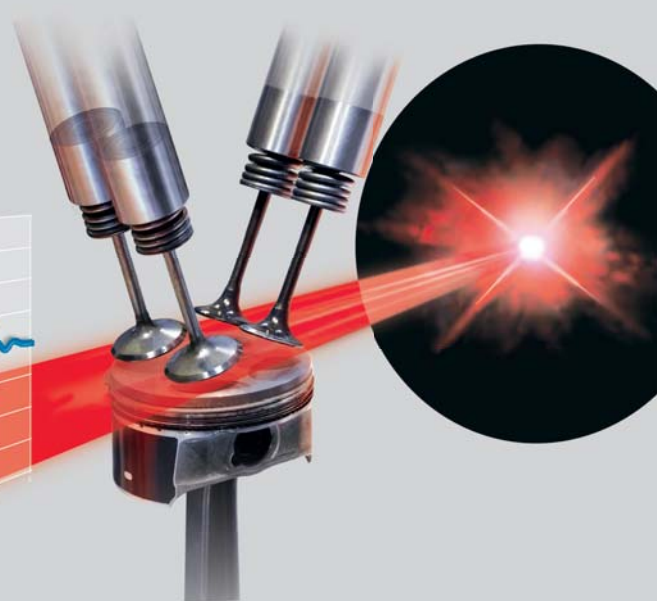
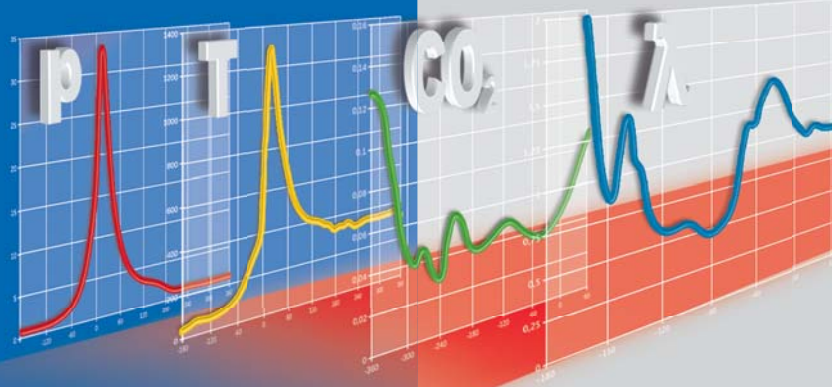
06 Juni 2013 | 74. Jahrgang

Sonderdruck

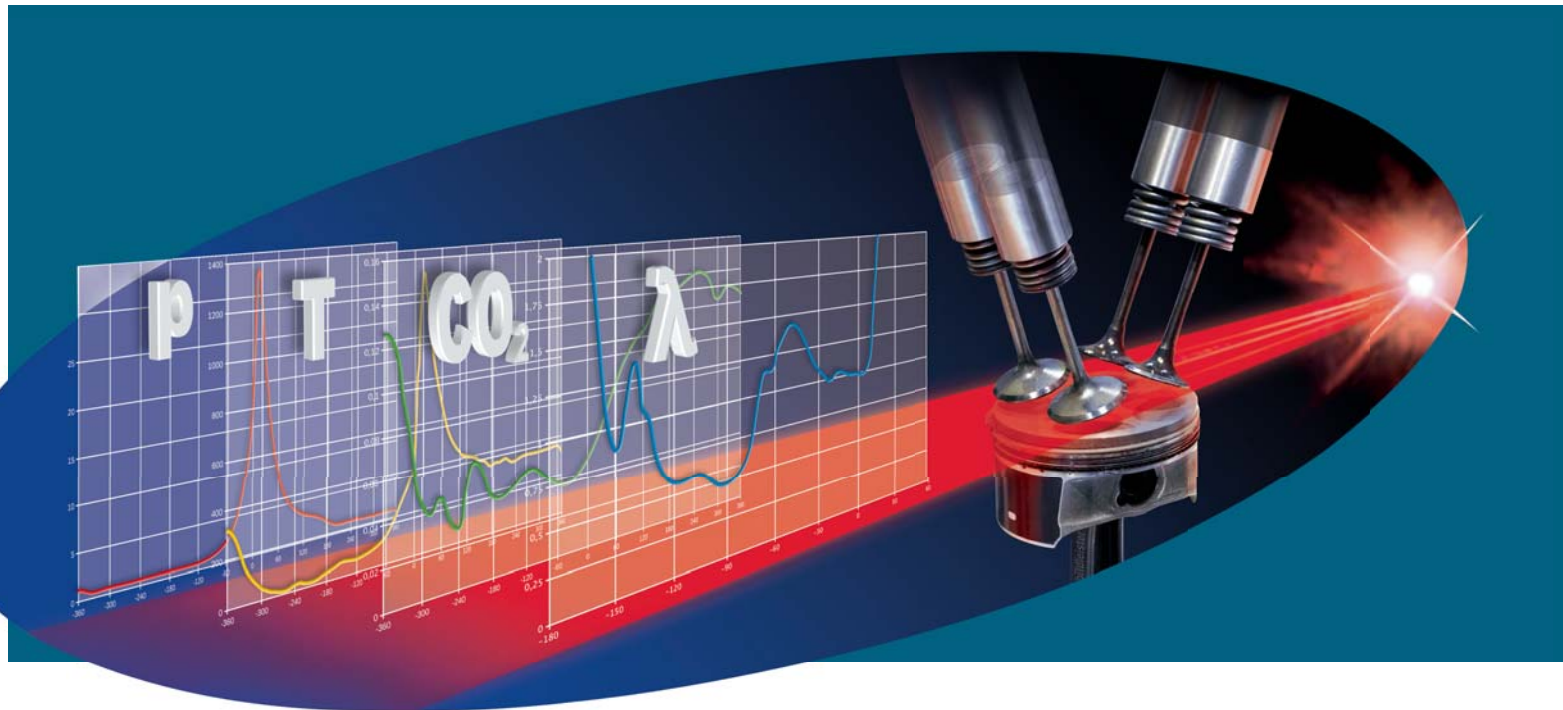
aus MTZ 06.2013

Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



BESTIMMUNG DER INNERMOTORISCHEN GEMISCHBILDUNG DURCH OPTISCHES INDIZIEREN



NEUES MESSVERFAHREN

Moderne Motorenkonzepte basieren auf komplexen Gemischbildungs- und Brennverfahren mit Direkteinspritzung, Abgasrückführung und Downsizing. Zur zielführenden Optimierung dieser Verfahren sowie spezieller Betriebsbedingungen wie dem Kaltstartverhalten ist eine Erweiterung der Druckindizierung um weitere motorrelevante Indiziergrößen erforderlich.

Die im Folgenden vorgestellte Sensorik ergänzt die etablierte Druckindizierung um die optisch erfassten innermotorischen

Kenngößen Kraftstoffdichte, Restgasgehalt und Gemischtemperatur sowie dem daraus abgeleiteten λ -Wert und der zyklus aufgelösten AGR-Rate. Die in Echtzeit messende optische Motorindizierung ermittelt diese Brennraumgrößen bei Serienmotoren sowohl lokal im Brennraum als auch räumlich gemittelt über den ganzen Zylinderquerschnitt mit hoher zeitlicher Auflösung [1]. Diese vollständige Charakterisierung der Gemischbildung und Verbrennung ermöglicht es, den erhöhten Anforderungen neuer Abgas- und CO₂-Grenzwerte für Otto-, Gas- und Dieselmotoren gerecht zu werden.

OPTISCHES INDIZIEREN

Die Druckindizierung kann prinzipiell keine direkten Aussagen über die Qualität der Gemischbildung bezüglich Zündfähigkeit (λ -Wert), Restgasanteil (interne AGR-Rate) sowie über die Gastemperatur im Zylinder vor der Entflammung liefern. Die Erfassung dieser Kenngrößen ist nur mit der optischen Indizierung möglich. Mit den hier vorgestellten Brennraumsonden erfolgt sie in-situ, das heißt direkt im Brennraum von Serienmotoren, ohne dass Gas entnommen werden muss. Im Gegensatz zur Druck-

AUTOREN



DIPL.-PHYS. THOMAS BERG
ist Entwicklungsleiter bei der LaVision GmbH in Göttingen.



DR. OLAF THIELE
ist Produktmanager Infrarotsensorik bei der LaVision GmbH in Göttingen.



DR. STEFAN SEEFELDT
ist Produktmanager Temperatursensorik bei der LaVision GmbH in Göttingen.



PROF. DR.-ING. ROBIN VANHAELST
arbeitet an der Fakultät Fahrzeugtechnik der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Wolfsburg.

BESTIMMUNG DER INNERMOTORISCHEN GEMISCHBILDUNG DURCH OPTISCHES INDIZIEREN

Das Unternehmen LaVision hat ein optisches Indizierverfahren entwickelt, mit dem hoch zeitaufgelöste Lambda-, Restgas- und Temperaturverläufe im Brennraum bestimmt werden können. Damit lässt sich der komplette zeitliche Verlauf der innermotorischen Gemischbildung in Echtzeit und kurbelwinkelaufgelöst über Hunderte von Einzelzyklen abbilden.

indizierung werden die optisch indizierten Größen lokal an vorbestimmten Orten im Brennraum gemessen, beispielsweise an der Zünd- oder Glühkerze. Dabei kann die Messstrecke auch auf den ganzen Zylinderdurchmesser ausgedehnt werden.

Die Kraftstoff- und CO₂-Konzentrationsverläufe können gleichzeitig kurbelwinkelaufgelöst mit derselben Sonde aufgezeichnet werden. Aus den gemessenen CO₂-Konzentrationen im Zylinder werden zyklusaufgelöste, interne AGR-Raten bestimmt. Dabei lässt sich mit

dem simultanen Betrieb mehrerer Sonden auch die Gleichverteilung der Abgasrückführung auf unterschiedliche Zylinder untersuchen.

Die Gastemperatur wird entweder direkt mit den identischen Sonden indiziert oder aus einer Gasdichtemessung, wie zum Beispiel dem CO₂-Verlauf, mithilfe thermodynamischer Annahmen indirekt ermittelt, ebenso wie der Zylinderdruck. Damit ist alleine mit dem CO₂-Sondensignal eine Multiparameter-Indizierung (Restgas, AGR-Rate, Druck und Temperatur) möglich.

MESSPRINZIP UND SONDENKONFIGURATIONEN

Die innermotorische Gasanalytik der optischen Motorindizierung basiert auf der Infrarot-Absorption (IR) von Kohlenwasserstoffen als Kraftstoffnachweis und auf der IR-Absorption von Kohlenstoffdioxid beziehungsweise Wasser als Restgasbestandteile. Alle drei relevanten Gaskomponenten absorbieren die eingeleitete IR-Strahlung auf unterschiedlichen Wellenlängen und können somit selektiv nachgewiesen werden. Zur Umsetzung des Messprinzips wird die Sonde am brennraumseitigen Ende mit einer kurzen Absorptionsstrecke, die vom IR-Licht durchlaufen wird, versehen. Die jeweilige Gaskomponente reduziert entlang der Messstrecke die Stärke des einstrahlenden Lichts, wobei die Absorptionsstärke direktproportional zur Gasdichte ist. Mit Kenntnis der Motorbedingungen bei Ventilschluss werden die gemessenen Gasdichten in Gaskonzentrationen beziehungsweise λ -Werte umgerechnet [2].

Wie ❶ zeigt, kann die optische Sonde in eine Zündkerze mit M12- oder M14-Gewinde oder in einen Glühstift inte-



❶ Sondenausführungen: Sonde in Zündkerze, M5-Sonde in Glühstift, M5-Sonde

INDIZIERTE MESSGRÖSSE	KRAFTSTOFF	RESTGAS (CO ₂ , H ₂ O)	GASTEMPERATUR
Datenrate	30 kHz	30 kHz	23 kHz
Datenaufnahme	Kurbelwinkelaufgelöste Mehrfachzyklen		
Genauigkeit	< 2 %	< 2 %	± 20 K bei 3 Vol.-% H ₂ O
Abgeleitete Größe	λ-Wert	interne AGR-Rate	–
Sonden	M12-/M14-Zündkerze, M5-Glühkerzenadapter, M5-Indizierbohrung, Transmissionssonde		
	Gemischaufbereitung, Stabilität des Brennverfahrens		
Anwendungen	: Direkteinspritzung : Kaltstart : Lastwechsel	: Zyklusaufgelöste AGR-Rate : Gleichverteilung auf Zylinder	: Validierung : Aufladung, AGR : HCCI

② Übersicht über die Systeme

griert werden, oder als M5-Einschraubsonde im Brennraum dort eingesetzt werden, wo sie die Kolbenbewegung durch ihren vorstehenden Sondenkopf nicht beeinträchtigt. Wird als Messstrecke der gesamte Zylinderdurchmesser gewählt, schließen die gegenüberliegenden Sondenköpfe mit der Zylinderwand bündig ab.

Die mit 30 kHz (23 kHz) aufgezeichneten Konzentrationsverläufe (Temperaturverläufe) werden von der Sensor Elektronik auf eine Kurbelwinkelskala übertragen und erlauben somit den direkten Vergleich mit anderen indizierten Kenngrößen wie dem Zylinderdruck. ② gibt eine Übersicht über die wichtigsten Sensorspezifikationen sowie typische Anwendungsfälle für die jeweilige Indiziergröße.

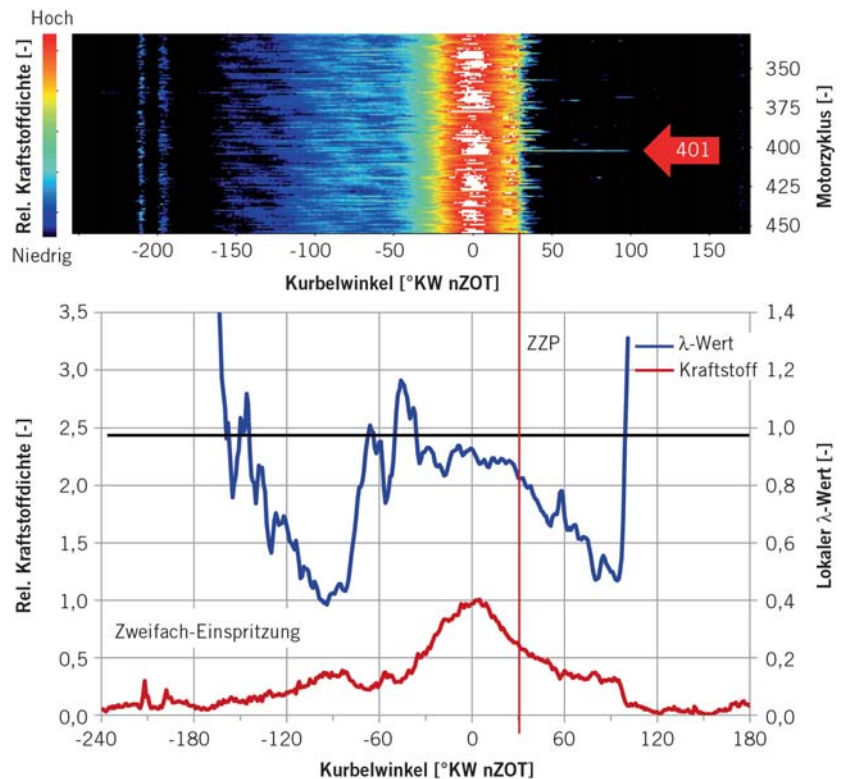
KRAFTSTOFFDICHTEVERLAUF UND LOKALER LAMBDAWERT

Beim Motorkaltstart ist die Variation der Kraftstoffdichte beziehungsweise des lokalen λ-Werts an der Zündkerze sehr hoch. Eine kurbelwinkelaufgelöste Messung dieser Kenngröße am Zündort liefert Aussagen über die Zündfähigkeit des Gemischs im anlaufenden Motor und ermöglicht damit eine Optimierung der Einspritz- und Zündstrategie. Schnelle Lastwechsel führen zu instationären Zuständen der Beladung und Strömung im Brennraum. Durch flexible Wahl der Einbaulage in M5-Indizierbohrungen, Zünd- oder Glühkerze kann der Verlauf der Gemischbildung an ausgesuchten Messorten aufgezeichnet werden.

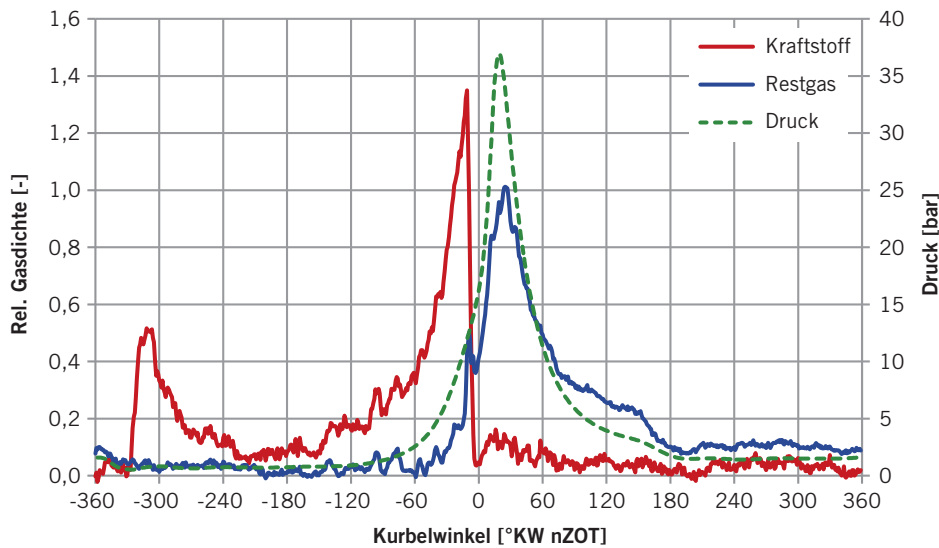
③ zeigt an der Zündkerze aufgenommene Kraftstoffdichteverläufe eines Katalysatorheizpunkts. Diese Verläufe

sind im oberen Teil des Bilds farbcodiert dargestellt, wobei jede Zeile einem Zyklus und jedes Pixel einem °KW entspricht. Nach der zweifachen Einspritzung erfolgt der Anstieg der Kraftstoffdichte während der Kompression zum OT. Der nicht gleichmäßige Verlauf ist auf die Ladungsbewegung zurückzuführen. Danach fällt die Kraftstoffdichte durch die beginnende Expansion wieder ab. Mit Einsetzen der Entflammung bei 30 bis 40 °KW nZOT verschwindet der Kraftstoff aus der Messstrecke. Die

ungleichmäßige Abrisskante im Kraftstoffsignal zeigt die zeitlich starke Schwankung der Entflammung von Zyklus zu Zyklus. Der markierte Zyklus 401 fällt durch seine sehr verspätete Entflammung auf, gekennzeichnet durch Abfallen der Kraftstoffdichte bei 100 °KW nZOT und damit deutlich nach dem Zündzeitpunkt. Für diesen einzelnen Zyklus sind der Kraftstoffdichte- sowie der dazugehörige λ-Wertverlauf in ③ (unten) dargestellt. Ist die Frischluftmenge zum Zeitpunkt des Ventilschlusses



③ Nichtstationäre Kraftstoffdichteverläufe eines Katalysatorheizpunkts und daraus abgeleitete Lambdawerte an der Zündkerze für den Motorzyklus 401



④ Simultane Einzelzyklusindizierung von Kraftstoff, Restgas und Druck in einem Ottomotor

ses bekannt, errechnet sich der Verlauf des λ -Werts unter Annahme eines thermodynamischen Modells aus dem Kraftstoffdichteverlauf, wobei die Kalibrierung bei einem bekannten Betriebspunkt erfolgt [3].

SIMULTANE KRAFTSTOFF- UND RESTGASMESSUNG

Beim Downsizing wird die sichere Entflammung des Gemischs durch erhöhte AGR-Raten immer schwieriger. Die zeit aufgelöste simultane Messung von Restgas und Kraftstoff am Ort der Zündkerze eröffnet hierbei gezielte Rückschlüsse

auf die Entflammbarkeit [4]. Das Beispiel in ④ zeigt einen einzelnen Zyklus mit simultaner Indizierung von Kraftstoff- und Restgasdichte durch die in eine Zündkerze integrierte Sonde sowie den Druckverlauf, gleichzeitig gemessen durch eine separate Indizierbohrung. Aus der Messung der Restgasdichte im Zylinder lässt sich durch den Vergleich des Verlaufs vor und nach der Verbrennung die AGR-Rate ableiten, die sich aus äußerer und interner AGR-Menge zusammensetzt.

CO₂, AGR-RATEN UND

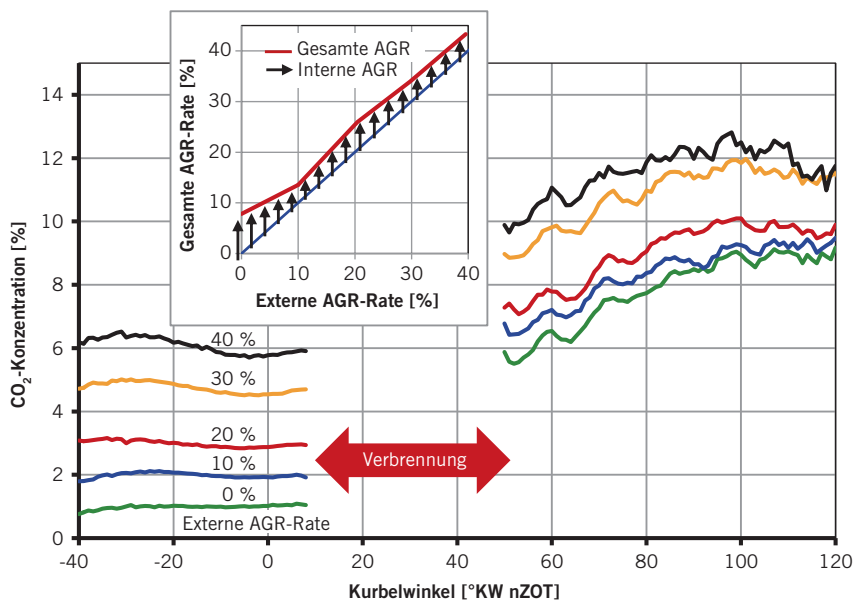
ABGELEITETE GRÖSSEN

Eine gute Gleichverteilung der AGR-Rate und eine gleichmäßige Restgasmasse in allen Zylindern, verbunden mit niedrigen zyklischen Schwankungen, sind Grundvoraussetzungen für ein serientaugliches Brennverfahren unter Einhaltung der Abgasgrenzwerte bei gleichzeitig geringem Verbrauch. Ähnlich der Ermittlung des λ -Werts lassen sich gemessene Restgasdichteverläufe in Konzentrationsverläufe von CO₂ umrechnen. Dieses ist

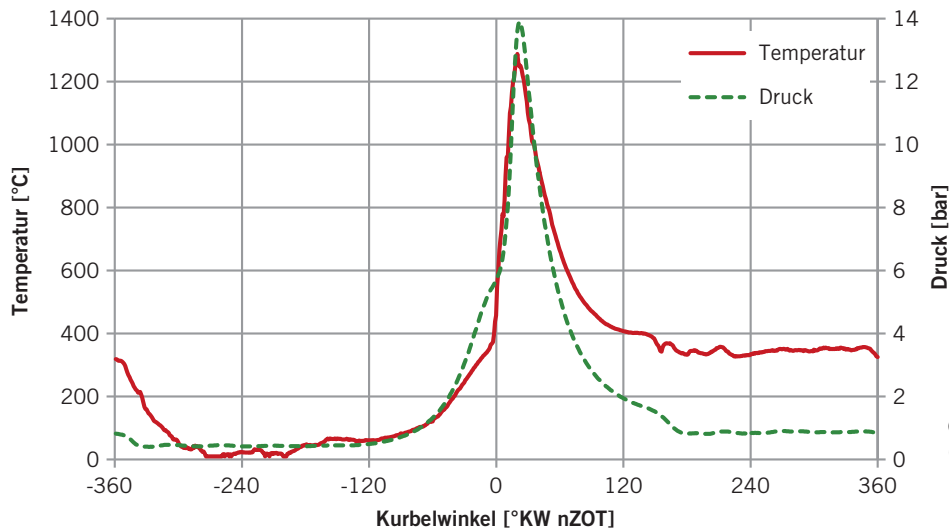
in ⑤ für einen Dieselmotor mit unterschiedlichen externen AGR-Raten dargestellt. Das anfängliche CO₂-Konzentrationsniveau vor der Entflammung setzt sich aus der externen AGR und dem intern rückgeführten Restgas zusammen. Die Staffelung der CO₂-Konzentrationsverläufe beruht auf der zunehmenden externen AGR-Rate. Selbst ohne externe AGR ist noch eine Restgasmenge nachweisbar, die intern zurückgeführt ist (interne AGR).

Aus dem Verhältnis der Restgaskonzentration vor und nach der Verbrennung wird die AGR-Rate bestimmt. Trägt man die extern eingestellte AGR-Rate gegen die gemessene gesamte AGR-Menge auf, erhält man als Differenz die zyklus aufgelöste interne AGR-Rate, ⑤ (oben), die nur mit dieser in-situ-Indizierung des Restgases direkt ermittelt werden kann.

Die Restgas- beziehungsweise CO₂-Dichtemessung ermöglicht die Ableitung weitergehender kurbelwinkel- und zyklus aufgelöster Kenngrößen [5]. So kann



⑤ Kurbelwinkelaufgelöster CO₂-Verlauf und Unterschied zwischen externer und gesamter AGR-Rate



6 Temperaturverlauf des Gemischs eines Ottomotors, gemessen nahe der Zündstrecke

aus dem CO₂-Dichtesignal der zugehörige Druck- und Temperaturverlauf ermittelt werden. Während eine thermodynamische Analyse darüber hinaus Aussagen über die Verbrennungsschwerpunkte liefert, folgt aus der Änderung der CO₂-Konzentration die Energieumsetzung.

VERLAUF DER GEMISCHTEMPERATUR

Die Temperatursonde erlaubt die direkte Messung des Temperaturverlaufs während der Gemischbildung und der Verbrennung. Wandnahe Temperaturverläufe können mit den in ① dargestellten Reflexionssonden gemessen werden, global über den Zylinderquerschnitt gemittelte Temperaturen mit einer in Transmission arbeitenden Sondenanordnung. ⑥ zeigt den Temperaturverlauf zusammen mit dem indizierten Druck in einem Ottomotor. Mit der Temperaturindizierung können beispielsweise die Einflüsse einer Abgasrückführung auf die Gastemperatur während der Kompressionsphase in Echtzeit verfolgt und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Brenn-

verfahren und Zündverhalten eindeutig zugeordnet werden.

FAZIT

Die optische Motorindizierung erweitert die etablierte Druckindizierung um die innermotorischen Kenngrößen Kraftstoffdichte, Restgasgehalt und Ladungstemperatur sowie um den daraus abgeleiteten lokalen λ -Wert beziehungsweise die zyklus aufgelöste interne AGR-Rate. Als innovatives Entwicklungswerkzeug ist diese Sensorik damit in der Lage, in Echtzeit und kurbelwinkelaufgelöst den kompletten zeitlichen Verlauf der innermotorischen Gemischbildung über Hunderte von Einzelzyklen abzubilden. Mit diesem Messwerkzeug für den Entwicklungsingenieur werden innermotorische Zusammenhänge schneller erkannt und damit Optimierungsschritte und Prüfstandszeiten verkürzt.

LITERATURHINWEISE

[1] Voges, H.; Thiele, O.; Berg, T.: Fiber Optics In-Cylinder Probe for Engine Indication. 8th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2012),

Fukuoka, Japan, 2012

[2] Berg, T.; Beushausen, V.; Thiele, O.; Voges, H.: Faseroptischer Zündkerzensensor zur Optimierung motorischer Brennverfahren. In: MTZ 67 (2006), Nr. 6, S. 440 – 445

[3] Grosch, A.; Beushausen, V.; Thiele, O.; Grzeszik, R.: Crank angle resolved determination of fuel concentration and air/fuel ratio in a SI-internal combustion engine using a modified optical spark plug. SAE Technical Paper 2007-01-644

[4] Berg, T.; Seefeldt, S.; Thiele, O.; Voges, H.: Optical Engine Indication: In-Cylinder AFR, EGR and Temperature Transients, 1st International Conference Advanced Ignition Systems for Gasoline Engines, Berlin, 2012

[5] Vanhaelst, R.; Thiele, O.; Hahne, B.; Stellet, H.-P.; Wildhagen, F.; Hentschel, W.; Joerdens, C.; Czajka, J.; Wislocki, K.; Pielecha, I.: Entwicklung eines innermotorischen optischen Infrarot-Sensors zur Bestimmung der AGR- und Restgasrate in Otto- und Dieselmotoren. 11. Tagung Motorische Verbrennung – aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze, Ludwigsburg, 2013



DOWNLOAD DES BEITRAGS

www.springerprofessional.de/MTZ



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com