

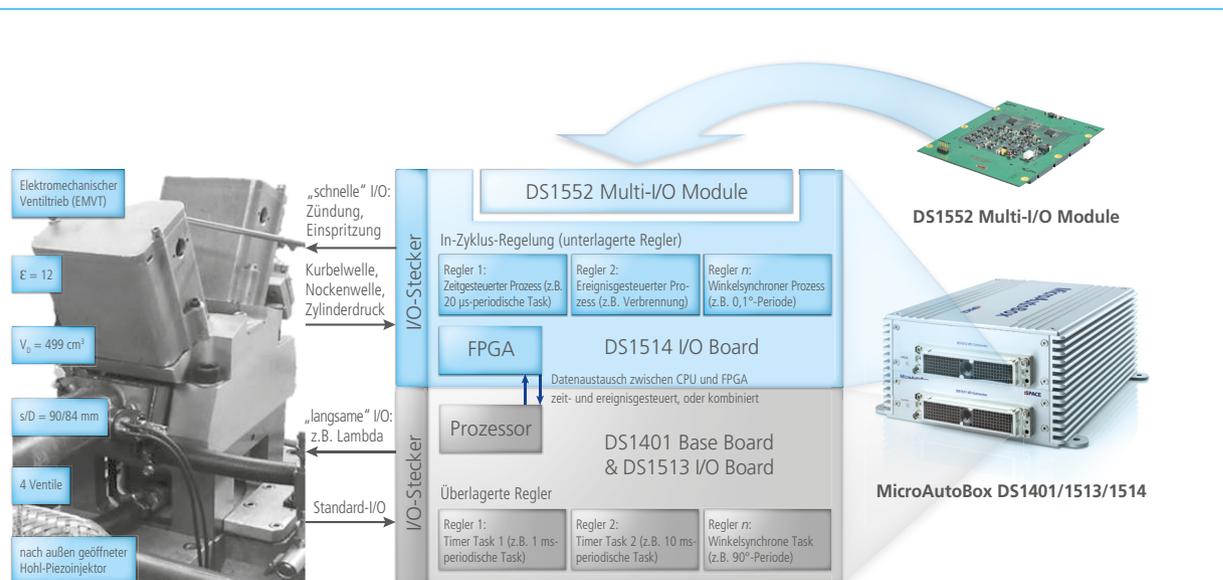
Die Entwicklung innovativer Brennverfahren für Motoren erfordert oft extrem schnelle Regelkreise, mit denen sogar in einen laufenden Verbrennungszyklus eingegriffen werden kann. Eine MicroAutoBox half damit der RWTH Aachen bei der Regelung einer stabilen, kontrollierten Selbstzündung für Ottomotoren.

Wer heutzutage an alternative Antriebe denkt, hat nicht selten allein die Elektromobilität im Blick. Doch das ist in der Regel zu kurz gedacht, denn auch die Entwicklungspotenziale der oft schon zum „alten Eisen“ gezählten Verbrennungsmotoren sind noch lange nicht ausgereizt. Neue und innovative Brennverfahren versprechen hier eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades. Ein Beispiel ist die Übertragung der von Dieselmotoren bekannten Selbstzündung auf die bislang stets fremdgezündeten Ottomotoren. Von der sogenannten Gasoline Controlled Auto-Ignition (GCAI) erhoffen sich Motorenentwickler eine signifikante Reduktion der Kohlendioxid-, Stickoxid- und Partikelemissionen.

Für ihre Realisierung sind jedoch komplexe Steuerungs- und Regelungsverfahren notwendig. Als besonders vielversprechend haben sich daher Ansätze gezeigt, die einen geschlossenen Regelkreis mit dem indizierten Brennraumdruck als Eingangsgröße verwenden. Durch eine direkte thermodynamische Analyse des Druckverlaufs kann die Verbrennung unmittelbar bewertet und im Falle von Sollwert-Abweichungen noch im laufenden Zyklus korrigiert werden. Mit dem Rapid Control Prototyping derart schneller In-Zyklus-Regelungen mit integrierter Indizieranalyse und Ansteuerung mit minimaler Latenzzeit beschäftigen sich auch Forscher am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen University.

**Hochvariabler Forschungsmotor**  
Für die Forschungsarbeiten am VKA wird ein direkteinspritzender Einzylindermotor mit außenöffnendem, piezoelektrisch betätigtem Hohlkegelinjektor in zentraler Position verwendet (Abbildung 1). Weiterhin ist der Forschungsmotor mit einem vollvariablen elektromechanischen Ventiltrieb (EMVT) ausgestattet. Durch die vollständige Entkopplung des Ventiltriebs vom Kurbeltrieb kann der für die Selbstzündung benötigte, hohe interne Restgasanteil betriebspunktabhängig und zyklusindividuell eingestellt werden. Als ideales Entwicklungssteuergerät für die geplanten Arbeiten hat sich die dSPACE MicroAutoBox II in Kombination mit ihrem frei programmierbaren Xilinx® Kintex®-7 FPGA herausgestellt. Auf diesem setzte der Lehr-

Abbildung 1: Einzylinder-Forschungsmotor mit elektromechanischem Ventiltrieb (links); Entwicklungssteuergerät MicroAutoBox II mit Kintex-7 FPGA (rechts)



stuhl erstmals die neue Advanced Engine Control Solution ein. Hierbei handelt es sich um eine offene Bibliothek zum modellbasierten FPGA-Design direkt aus Simulink®, aufbauend auf dem Xilinx System Generator (XSG).

### Echtzeit-Indizierung

Ein Hauptmerkmal der Solution ist die echtzeitfähige Auswertung der Zylinderdruck-Indizierung (CPI, Cylinder Pressure Indication). Kurbelwellen-, Nockenwellen- oder Encoder-Signale werden zunächst von einer Angular Computation Unit (ACU) auf FPGA-Basis ausgewertet und ein Winkelsignal mit 0,1° Auflösung als Basis für die weiteren Echtzeit-Berechnungen generiert. Die Signale des Zylinderdrucks werden mit 1 MHz abgetastet und dann winkelsynchron weiterverarbeitet. Dabei werden die für die In-Zyklus-Regelung benötigten thermodynamischen Größen bestimmt, beispielsweise der Verlauf der Wärmeabfuhr, indizierte Mitteldrücke während der Hochdruck-Schleife und des Ladungswechsels sowie Spitzen drücke oder Druckgradienten. Um Echtzeitfähigkeit zu garantieren, werden dabei ausschließlich kausale Algorithmen verwendet. Eine Validierung der verwendeten Algorithmen der CPI erfolgte im Vergleich mit dem etablierten Indizierwerkzeug "Combustion Analysis System" (CAS) der FEV GmbH. Die dabei auftretenden Abweichungen fielen mit unter einem Prozent vernachlässigbar gering aus, sodass die für eine In-Zyklus-Regelung benötigten Kenngrößen mit dem FPGA-Takt zur Verfügung stehen. Auch die Ansteuerung der schnellen Aktuatoren (EMVT, Einspritzung) erfolgt direkt über die Advanced Engine Control Solution und ermöglicht so einen Regeleingriff innerhalb weniger Nanosekunden. Dieser kann damit innerhalb eines Verbrennungszyklus erfolgen und stellt eine Korrekturgröße der langsamen globalen Regelung dar, die auf dem Prozessorteil der MicroAutoBox implementiert wurde. >>

# Motor- innovation neu befeuert

In-Zyklus-Verbrennungsregelung  
für selbstzündende Ottomotoren

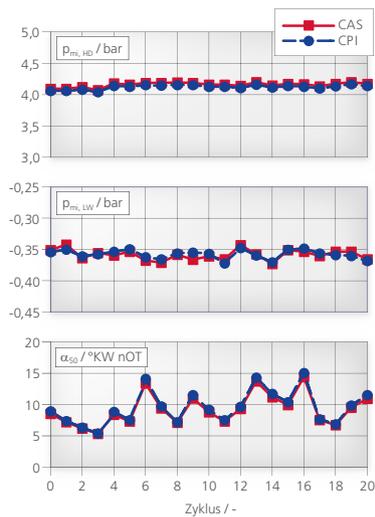


Abbildung 2: Exemplarischer Vergleich der Zylinderdruckindikation (CPI) der Advanced Engine Control Solution und des Vergleichswerkzeugs „Combustion Analysis System“ (CAS). Die Abweichungen für den indizierten Mitteldruck  $p_{mi, HD}$  und  $p_{mi, LW}$  sowie für die Lage 50 % freigesetzter Wärme ( $\alpha_{50}$ ) sind vernachlässigbar gering.

### In-Zyklus-Regelungskonzept

Der für die Selbstzündung benötigte hohe interne Restgasanteil wird bei den experimentellen Untersuchungen über die sogenannte Brennraumrückführung realisiert. Dabei wird das Auslassventil früh geschlossen und das Einlassventil öffnet symmetrisch zum oberen Totpunkt des Ladungswechsels spät. Während dieser Unter-

scheidung wird das im Brennraum verbleibende Abgas komprimiert. Durch den darin enthaltenen unverbrannten Kraftstoff folgt dabei tendenziell eine frühe Verbrennung mit einem hohen Druckanstieg einer späten, unvollständigen Verbrennung. Hier lässt sich eine Korrelation zwischen dem Druckniveau während der Zwischenkompression und der darauffolgenden Verbrennungslage erkennen. Im Falle der sehr späten Verbrennungen führt dies zu einem signifikanten Kraftstoffumsatz während der Zwischenkompression (Abbildung 3). Diese Korrelation wurde für die Anwendung einer In-Zyklus-Regelung verwendet. Dazu wird zunächst das Maximum des Zylinderdrucksignals während der Zwischenkompression über die Advanced Engine Control Solution bestimmt und dient als Eingang in den Regelkreis. Der Kurbelwinkel, bei dem das Einlassventil

schließt, steht als Stellgröße ES zur Verfügung (Abbildung 4). Eine Verschiebung dieses Zeitpunkts in Richtung „spät“ bewirkt eine Reduktion des effektiven Verdichtungsverhältnisses, die Bedingungen zur Selbstzündung und damit die Verbrennungslage verschieben sich ebenfalls in Richtung „spät“. Eine Frühverstellung begünstigt die Selbstzündung und resultiert so in einer frühen Verbrennungslage. Ergibt die Echtzeit-Zylinderdruckanalyse während der Zwischenkompression einen niedrigen Spitzendruck beim oberen Totpunkt des Ladungswechsels, wird noch im selben Zyklus die Stellgröße ES in Richtung „früh“ verschoben, um so eine späte Schwerpunktlage zu vermeiden, und umgekehrt. Der Regelkreis schließt sich folglich zwischen dem oberen Totpunkt des Ladungswechsels und der Betätigung des Einlassventils innerhalb von etwa 90°

„Durch die extrem schnelle In-Zyklus-Regelung mit den von uns verwendeten dSPACE Werkzeugen rücken neuartige innovative Brennverfahren erstmals in den Bereich der technischen Umsetzbarkeit.“

Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert, RWTH Aachen

#### Dipl.-Ing. Bastian Lehrheuer

Dipl.-Ing. Bastian Lehrheuer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) an der RWTH Aachen University.



#### Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert

Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert ist Juniorprofessor für das Fachgebiet Mechatronische Systeme am Verbrennungsmotor der RWTH Aachen University.



#### M.Sc. Maximilian Wick

M.Sc. Maximilian Wick ist wissenschaftlicher Mitarbeiter für Mechatronische Systeme am Verbrennungsmotor an der RWTH Aachen University.



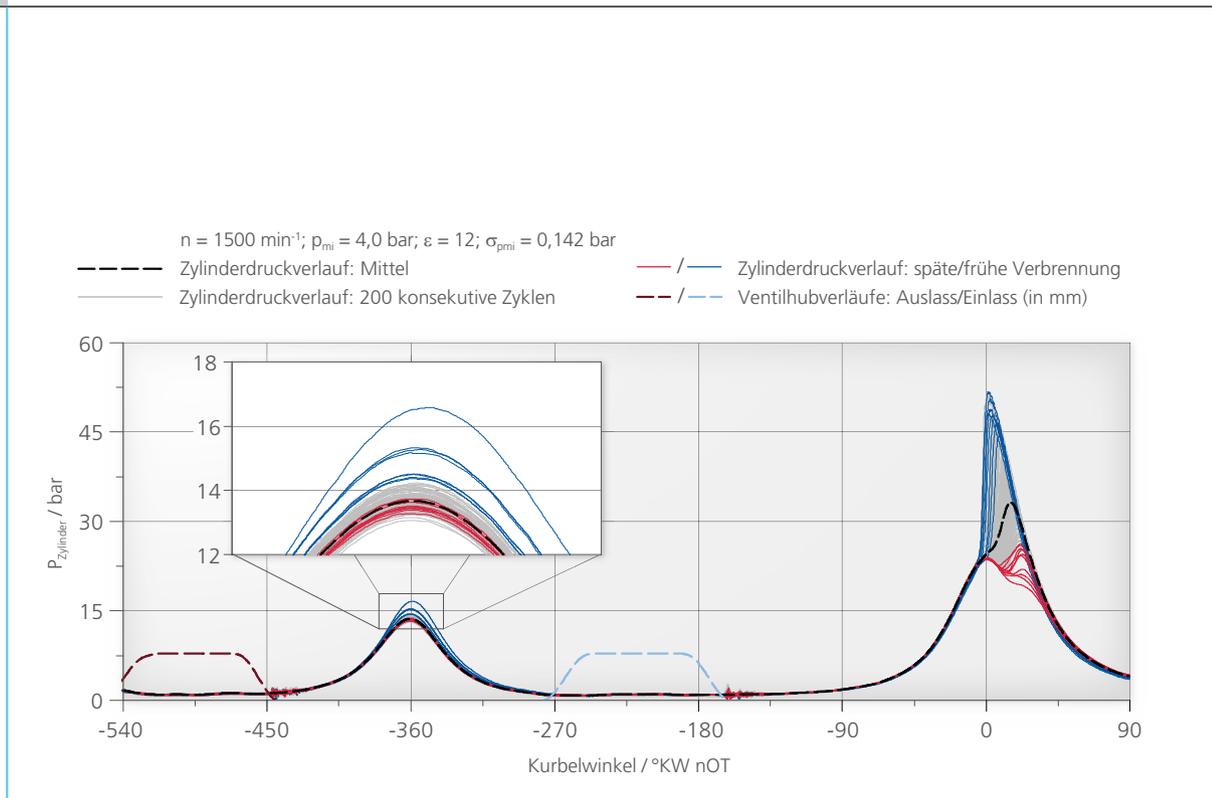


Abbildung 3: Darstellung der Druckverläufe bei besonders später (rot) und früher Verbrennung (blau). Die zyklischen Schwankungen, quantifiziert durch eine hohe Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks  $\sigma_{p_{mi}} = 0,142 \text{ bar}$ , sind deutlich erkennbar.

Kurbelwinkel, was bei einer Drehzahl von  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  einem verfügbaren Zeitfenster von 10 ms entspricht.

### Überzeugende Ergebnisse

In den Resultaten der beschriebenen In-Zyklus-Regelung ist deutlich zu erkennen, dass die besonders tiefen Abweichungen in der Last mit einer aktiven Regelung vermieden werden können und somit die Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks mit aktiver Regelung deutlich sinkt (Abbildung 4). Auch die Schwerpunktlage weist eine deutliche Verbesserung auf. Sowohl besonders frühe als auch späte Lagen können zuverlässig unterbunden werden. Durch Nutzung der Korrelationen von Zwischenkompression und anschließender Verbrennung konnte die angestrebte In-Zyklus-Regelung erfolgreich implementiert und am Forschungsmotor angewendet werden. Dabei wurde das Potenzial eines schnellen Regeleingriffes klar aufgezeigt. In weiteren Arbeiten der RWTH Aachen sollen die Ressourcen des FPGA der MicroAutoBox II auch für komplexere Regelalgorithmen genutzt und damit insbesondere die Prädiktion des Brennverlaufs über eine Echtzeit-Zylinder-

druckanalyse optimiert werden. Auch im Bereich der Stellgrößen, die einen Regeleingriff innerhalb eines Zyklus erlauben, besteht weiterhin Forschungsbedarf. In diesem Kontext werden momentan am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen insbesondere Mehrfach-Einspritzstrategien

und Wassereinspritzung untersucht. Die Chancen stehen also gut, dass Verbrennungsmotoren auch zukünftig nicht so schnell zum „alten Eisen“ gehören werden. ■

Dipl.-Ing. Bastian Lehrheuer, Prof. Dr.-Ing. Jakob Andert, M.Sc. Maximilian Wick, RWTH Aachen

Abbildung 4: ES (Stellgröße),  $\alpha_{50}$  und  $p_{mi}$  für 1000 konsekutive Zyklen ohne und mit aktiver In-Zyklus-Regelung. Mit aktiver Regelung sinkt die Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks deutlich von  $\sigma_{p_{mi}} = 0,142 \text{ bar}$  auf  $\sigma_{p_{mi}} = 0,088 \text{ bar}$  (unten). Sowohl besonders frühe als auch späte Lagen können zuverlässig unterbunden werden (Mitte).

