



Aufbau eines Closed-Loop-Testsystems für präzise geregelte Kraftstoffinjektoren

# Exakt dosiert

Bei Benzinmotoren ist eine optimale Gemischaufbereitung die Voraussetzung für eine effiziente Verbrennung. Mit einem neuen geregelten Einspritzverfahren stellt Continental sicher, dass über die gesamte Lebensdauer des Motors immer die exakt benötigte Kraftstoffmenge dosiert wird. Ein Testsystem von dSPACE ermöglicht eine präzise Prüfung im Labor.



Schärfere Emissionsgesetze führen zu neuen Herausforderungen bei der Entwicklung von Ottomotoren. Daher sind neue innovative technische Ansätze erforderlich, um einen wesentlichen Beitrag zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten zu leisten. Ein für die optimale Gemischaufbereitung und damit für die effiziente Verbrennung besonders relevanter Aspekt ist die exakte Dosierung der benötigten Kraftstoffmenge. Verwendet werden dafür elektrisch angesteuerte Injektoren, über deren Öffnungs- und Schließzeiten sich die Kraftstoffmenge bestimmt. Über die Zeitdauer und die Stromstärke der Injektoransteuerung wird der Einspritzverlauf beeinflusst. Auch der Kraftstoffdruck trägt zum Heben der angesteuerten Injektornadel bei. Die bisherigen klassischen Einspritzverfahren setzen auf eine vorgesteu-

erte Einspritzung, bei der Öffnungs- und Schließzeitpunkt der Injektoren vom Motorsteuergerät vorgegeben sind. Mechanische Fertigungstoleranzen und Alterungsprozesse lassen sich damit jedoch nicht erfassen und korrigieren. Dadurch variieren mit der Zeit die tatsächlichen Öffnungszeiten der Injektoren, wodurch Zumesvarianzen entstehen. Beim Automobilzulieferer Continental wurde nun ein Verfahren entwickelt, mit dem sich die Öffnungszeiten und damit die Einspritzmengen exakt messen und auch regeln lassen.

#### Präzise Einspritzung mit COSI

Das sensorlose Auswerteverfahren Controlled Solenoid Injection (COSI) dient insbesondere dazu, den Schließzeitpunkt des Injektors zu detektieren. Grundlage dafür ist die positionsabhängige Induktivität, gebildet von der Injektorspule und der ein- und ausfahr-

renden Injektornadel. Beim Anschlag der Nadel in den Nadelsitz lässt sich an der Spule ein charakteristischer Stromverlauf messen. Die Differenz zwischen gewünschter und gemessener Schließzeit dient einem Regler als Regeldifferenz zur Festlegung der Öffnungszeit im nächsten Arbeitsspiel. Diese Regelung ermöglicht selbst kleinste Einspritzmengen mit minimalen Toleranzen. Dadurch wird die Präzision der Benzineinspritzung signifikant verbessert und das Brennverfahren stabilisiert. Beide Aspekte bleiben per adaptiver Regelung über die gesamte Lebensdauer der Bauteile erhalten.

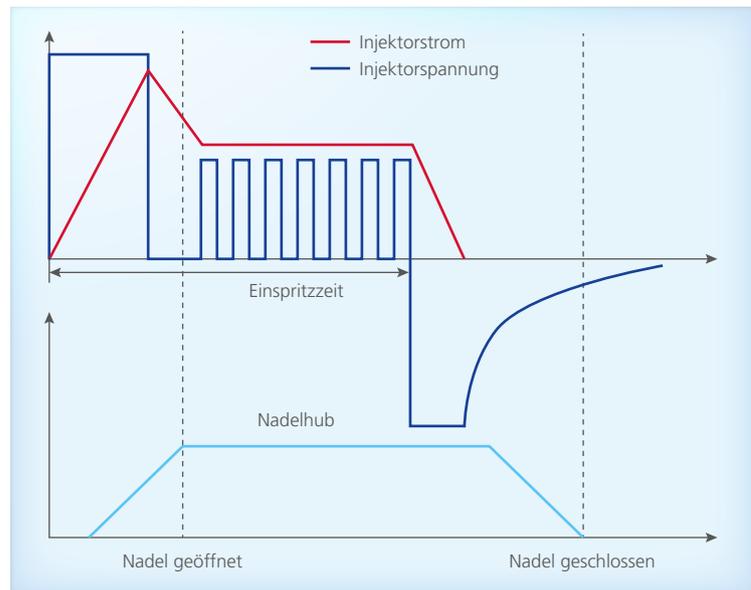
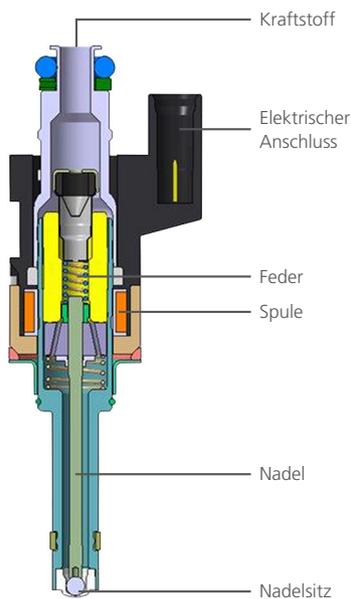
#### Anforderungen an die Absicherung

Bei der Validierung der Steuergeräte mit COSI-Funktion sind funktionale Software-Tests in Bezug auf die Erkennung der Injektor-Öffnungszeiten erforderlich. Dazu müssen die charakteristischen Spannungs- und Stromkurven eines sich unter Druck befindlichen Injektors nachgebildet werden. Der Einsatz von Ersatzlasten oder Echtteilen ist dafür nicht hinreichend, da diese üblicherweise trocken, das heißt ohne Kraftstoff betrieben werden und dabei keine durch die Kraftstoffeinspritzung verursachten Druckschwankungen im Ansaugrohr beziehungsweise im Zylinder auftreten. Es bedarf also einer Lösung, die das Verhalten des Injektors unter Berücksichtigung des Betriebsdrucks zu jedem Arbeitspunkt des Motors in Echtzeit nachbildet. Die besondere Herausforderung sind hierbei die extrem kurzen Öffnungszeiten der Injektoren von nur wenigen Millisekunden. Da im Kleinstmengenbereich auch geringe Varianzen der eingesetzten Bauteile relevant sind, muss die Testlösung bezüglich deren Abbildung hinreichend flexibel, aber auch einfach handhabbar sein.

#### Test mit virtuellen Injektoren

Die Validierung von Motorsteuergeräten erfolgt typischerweise mit Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulatoren. Daher war es naheliegend, für den Test der COSI-Funktion eine Er-

>>



Links: Aufbau eines Hochdruckmagnetinjektors: Die Spule und die sich darin bewegende Nadel (Eisenkern) bilden eine variable Induktivität. Rechts: Idealisierte Darstellung von Injektoransteuerung, Nadelhub und Einspritzzeit.

weiterungslösung für HIL-Simulatoren anzustreben. Aufgrund der kurzen Zeiten, in denen sich hochdynamische Vorgänge abspielen, kann das Injektorverhalten nur mit einem Field Programmable Gate Array (FPGA) hinreichend schnell berechnet werden. Für die im Testfeld aufgebauten dSPACE SCALEXIO-HIL-Systeme bot sich daher eine Lösung an, die aus einem FPGA-Board (DS2655) und je einer elektronischen Last (EV1139) pro Injektor besteht. Die elektronische Last ist als galvanisch getrennte und damit von der Betriebsspannung unabhängige Schnittstelle zum Steuergerät ausgelegt. Zusammen mit dem per FPGA-Modell berechneten Injektorverhalten mit induktiver elektrischer Charakteristik emuliert sie so die Ströme und Spannungen des Injektors, der an das Steuergerät angeschlossen ist. Dabei

lässt sich das offene Modell von dSPACE exakt an die Injektoreigenschaften anpassen. Dieser Aufbau unterstützt unter anderem Tests zur elektrischen Fehlersimulation wie Kurzschlüsse und Kabelbrüche. Mit ihm können aber auch funktionale Fehler generiert und dabei das Systemverhalten bis hin zu den Emissionswerten untersucht werden. Dazu lassen sich beispielsweise auch die Zeitpunkte für zu frühes oder zu spätes Öffnen und Schließen manipulieren. Darüber hinaus ist es möglich, die Einflüsse von Bauteilvarianzen und -alterung durch die Parametrierung der entsprechenden Modellbestandteile schnell per Simulation zu überprüfen.

#### Der Einsatz im Projekt

Der Aufbau des Testsystems wurde gemeinsam von Continental und dSPACE

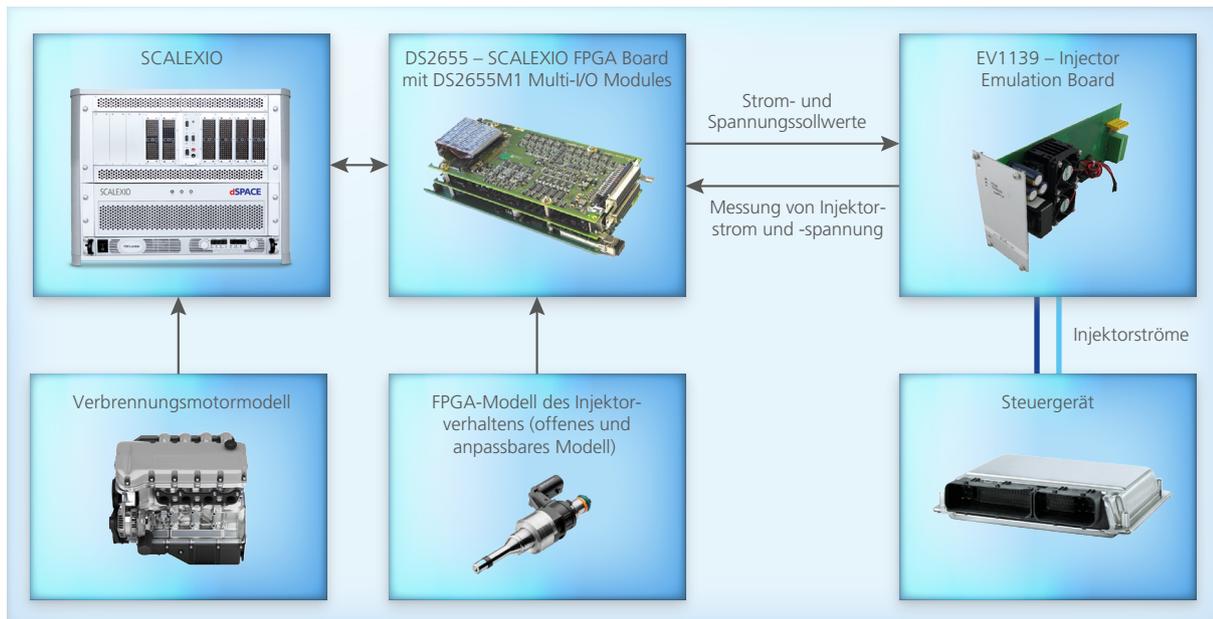
vorangetrieben. Am Anfang standen die Informationsbeschaffung, die Klärung patentrechtlicher Fragen und die Erstellung eines Lastenheftes. Auf dieser Basis konnte ein leistungsfähiger Prototyp entwickelt werden. Dabei erhielten die Entwickler von dSPACE Zugriff auf vollständig eingerichtete SCALEXIO-Simulatoren und Steuergeräte, um die neue COSI-Testlösung zu integrieren. Während der Inbetriebnahme wurde das Testsystem für weitere Testaufgaben optimiert:

- Präzise Einfach- und Mehrfacheinspritzungen
- Exakte Verschiebung der Schließzeitpunkte
- Parallele Einspritzungen auf zwei Zylinderbänken

Das erfolgreich abgestimmte Testsystem ist mittlerweile fest in den Absi-

„Das sensorlose Auswerteverfahren Controlled Solenoid Injection führt zu hohen Anforderungen an den Steuergerätestest. Mit dem Simulator SCALEXIO und seinen Erweiterungslösungen können wir die hochdynamischen Vorgänge präzise darstellen und so die Steuergeräte zuverlässig absichern.“

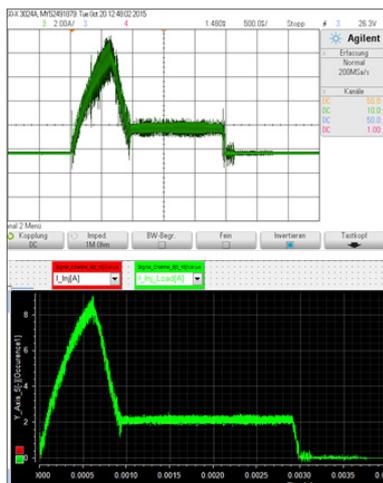
Michael Mench, Continental



Prinzipaufbau des SCALEXIO-HIL-Simulators für die Injektorsimulation: Der Verbrennungsmotor wird auf der SCALEXIO Processing Unit gerechnet, die Simulation des Injektors erfolgt mit einem FPGA-Board, das berechnete und gemessene Signale mit der elektronischen Last EV1139 austauscht. Für das Motorsteuergerät verhält sich die Last exakt wie ein realer Injektor.

cherungsprozess für Motorsteuergeräte integriert. Es verfügt über die erforderliche Flexibilität und Leistungsfähigkeit, um die korrekte Funktion der Motorsteuergeräte mit COSI-Funktion im geschlossenen Regelkreis zu verifizieren und Anforderungen an die Steuergeräte-Software zu validieren.

Abbildung 4: Vergleich von gemessener (oben) sowie simulierter und mit dSPACE ControlDesk dargestellter Injektorspannung (unten). Die hohe Übereinstimmung der beiden Kurvenverläufe ist auf Anhieb zu erkennen.



Dabei können auch Diagnosefunktionen der Steuergeräte geprüft werden.

### Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von geregelten Kraftstoffinjektoren führt zu neuen Herausforderungen bei der Validierung der Steuergeräte. Um die Regler zu testen und abzusichern, haben Continental und dSPACE eine neue Testlösung konzipiert. Dabei wird das Verhalten des Injektors simuliert und seine realen Ströme werden emuliert. Die Basis dafür bilden eine schnelle FPGA-basierte

Recheneinheit und eine elektronische Last. Sie ermöglicht den Betrieb der Steuergeräte im geschlossenen Regelkreis und damit eine flexible Untersuchung im Labor. Aktuell dient das Testsystem bei Continental zur Validierung der aktuellen Motorsteuergerätegeneration. Aufgrund der hohen Flexibilität des Aufbaus kann es aber auch mühelos zur Entwicklung zukünftiger Steuergerätefunktionen eingesetzt werden. ■

Michael Mench, Alexander Zschake, Continental

#### Michael Mench

Michael Mench ist zuständig für die Validierung von Einspritzsystemen bei Continental in Regensburg, Deutschland.



#### Alexander Zschake

Alexander Zschake ist zuständig für die Validierung von Einspritzsystemen bei Continental in Regensburg, Deutschland.

