

Präzision-in-the-Loop



Neue Entwicklungswerkzeuge sorgen für saubere Motoren

Mechatronische Echtzeit-Regelung ersetzt in modernen Einspritzsystemen fest definierte Einspritzintervalle. Dafür überwacht das Motorsteuergerät das Öffnen und Schließen jeder einzelnen Injektornadel und regelt bei Abweichungen vom Soll sofort nach. Neue hochpräzise Entwicklungswerkzeuge ebnen den Weg zur Serienreife. Darunter eine Hardware-in-the-Loop-Lösung von ETAS. Sie ist in der Lage, die Be- und Entladekurven der Magnetventile in den Injektoren in bisher nicht gekannter Genauigkeit nachzubilden.

Moderne Downsizing-Motoren verbrauchen erstaunlich wenig Kraftstoff und sind dabei überraschend agil. Ein Schlüssel dazu sind ihre Einspritzsysteme. Deren Injektoren leiten im ausgefeilten Millisekunden-Stakkato aus Vor-, Haupt- und Nachspritzung bis auf Milligramm genau bemessene Kraftstoffvolumina in die Brennräume, die im Idealfall beinahe rückstandsfrei verbrennen. Doch Alterungseffekte und Fertigungstoleranzen an den Injektoren können die Präzision aushebeln. Voreingestellte Einspritzintervalle stoßen an Grenzen, wo Öffnungs- und Schließzeiten der Injektoren variieren. Darum trimmen Entwickler Motorsteuergeräte nun darauf, charakteristische Strom- und Span-

nungssignale beim Öffnen und Schließen der elektromagnetisch angesteuerten Injektoren zu deuten. Denn von ihnen lassen sich der Einspritzzeitpunkt und die eingespritzte Kraftstoffmenge präzise ableiten. Weichen sie vom Soll ab, kann die Steuerung sofort nachregeln. Das Einspritzsystem kann verändertes Injektorverhalten also kompensieren. Auch mit Blick auf künftige On-Board-Emissionskontrollen hilft das, Verbrauch und Abgaswerte dauerhaft zu stabilisieren.

Präzise Einspritzstrategie braucht hochgenaue Entwicklungswerkzeuge

Einspritzventile arbeiten elektromagnetisch. Zum Anheben der Na-

del fließt Strom in eine Spule im Injektor. Das dabei erzeugte Magnetfeld hebt die Nadel gegen den Druck einer Schließfeder an (Bild 1). Der unter Druck stehende Kraftstoff im Rail kann in den Brennraum strömen. Die Einspritzung endet, sobald kein Strom mehr fließt und die Feder die Nadel wieder herabdrückt.

Doch wie viel Zeit vergeht zwischen Anlegen der Spannung und Öffnen des Ventils? Wie schnell schließt es, sobald kein Strom mehr fließt? Antworten finden sich in Merkmalen des Spannungs- und Stromverlaufs in Abhängigkeit von Induktivität und ohmschen Widerständen im Injektor. Sie schlagen sich in Be- und Entladekurven nieder.

AUTOREN

Robert Geiselmann ist Produktarchitekt und Hardware-Entwickler für Test und Validierung bei der **ETAS GmbH**.

Henrik Jakoby ist Gruppenleiter des Produktmanagements für den Bereich Test und Validierung bei der **ETAS GmbH**.

Frank Ruschmeier ist Projektleiter in der Hardware-Entwicklung und unter anderem verantwortlich für Lastsimulationshardware bei der **ETAS GmbH**.

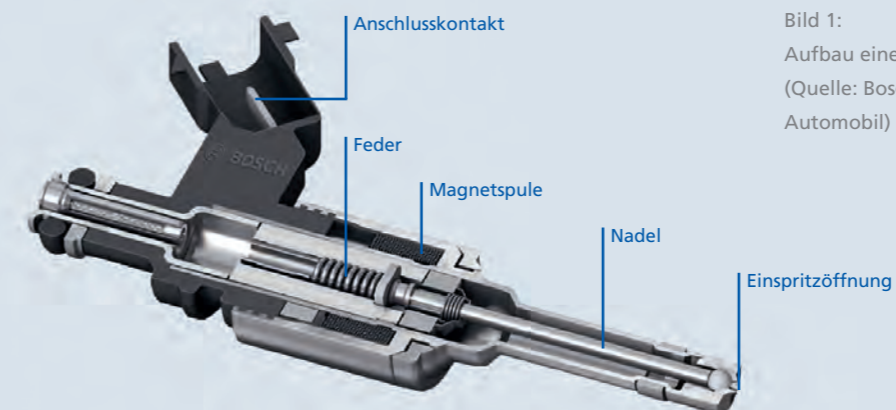


Bild 1:
Aufbau eines Injektors.
(Quelle: Bosch Fachinformation
Automobil)

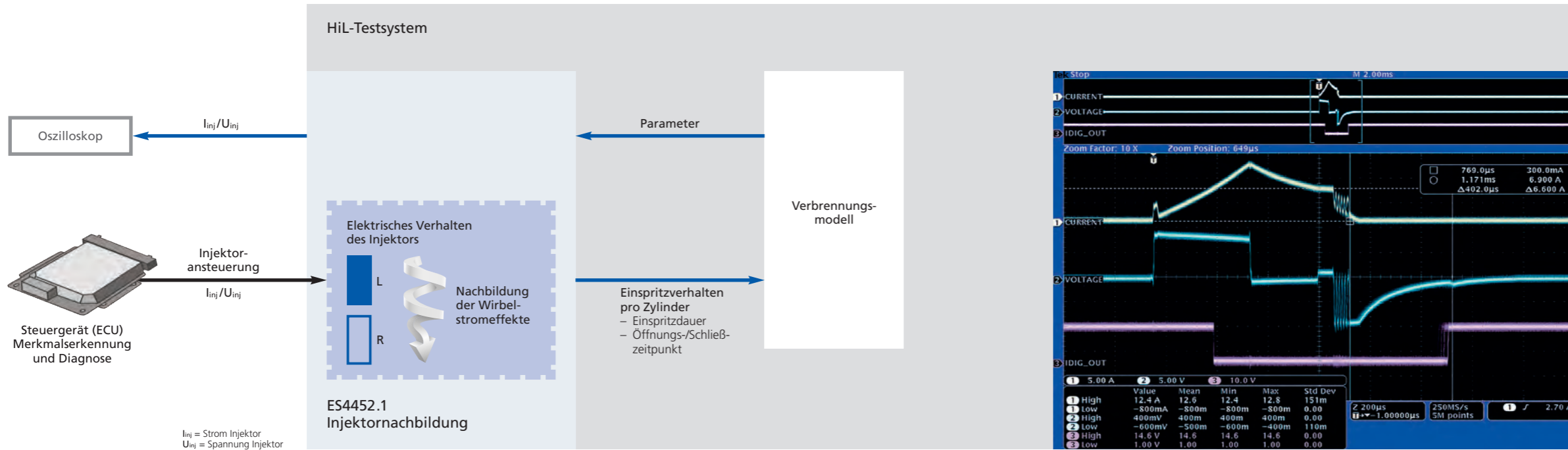


Bild 2: Schematischer Aufbau der Lastnachbildung im HiL-System.

Aufgrund dieser Informationen kann das Steuergerät die Einspritzung im festgelegten Turnus an veränderte Reaktionszeiten des jeweiligen Injektors anpassen. Dieser Vorgang folgt festen Software-Routinen.

Auf dem Weg zur Serienreife muss dieser Teil der Steuergerätesoftware getestet und in allen erdenklichen Betriebszuständen erprobt werden. Vieles spricht dafür, bei diesen Tests auf Simulation beziehungsweise Emulation der Komponenten zu setzen. So starten die Softwaretests üblicherweise lange, bevor Prototypen von Motor, Steuergerät und Injektoren vorliegen. Zudem ist der entscheidende Faktor – die Alterung der Injektoren – am Motorenprüfstand nur mit hohem Aufwand zu testen. Gleiches gilt für Prüfstandtests, in denen das Verhalten der Software bei Funktionsstörungen des Einspritzsystems erprobt werden soll. Und das Erproben der Injektoren würde voraussetzen, sie rund

um die Uhr in flüssigen Medien bei realistischen Drücken zu betreiben, da sie sonst festlaufen und ihr Öffnungs- und Schließverhalten ändern. Softwaretests im virtuellen Umfeld umgehen diese Probleme. In Hardware-in-the-Loop(HiL)-Aufbauten lässt sich die Betriebsstrategie eines Steuergeräts mit allen erdenklichen Parameterverschiebungen erproben – ob alternde Injektoren oder herbeigeführte Störfälle. Doch gab es bisher keine HiL-Lösung, die das Injektorverhalten exakt genug nachbildet, um die neue Regelstrategie im geschlossenen Regelkreis von Steuergerät und Einspritzsystem zu erproben. Eine solche Lösung muss vor allem die Be- und Entladekurven der Injektoren exakt wiedergeben.

Neue HiL-Lösung bildet das Injektorverhalten exakt nach

Um die Regelstrategie in-the-Loop zu überprüfen, muss das Steuergerät über die unterschiedlichen Betriebszustände hinweg mit realis-

tischen Spannungs-, Strom-, Induktivitäts- und Widerstandswerten versorgt werden, um davon jeweils auf das Öffnen und Schließen der virtuellen Injektoren und somit die eingespritzte Kraftstoffmenge schließen zu können. Dafür sind die Be- und Entladekurven so gleichmäßig nachzubilden, dass das Steuergerät die nachgebildeten Signalausschläge erkennt. Hier liegt die eigentliche Herausforderung der Simulation in der Hardware: Die beim Umschalten aktiver Elektronik üblichen Unstetigkeiten im Strom- und Spannungsverlauf sind so zu begrenzen, dass das zu testende Steuergerät sie nicht als Bewegung der Nadel oder als Injektorfehlfunktion missinterpretiert. Obendrein gilt es, Wirbelstromeffekte in der Injektorspule exakt und zum richtigen Zeitpunkt nachzubilden, da auch diese die Entladekurve beeinflussen. ETAS hat nun eine HiL-Lösung entwickelt, die diese Herausforderungen meistert. Sie bildet einzelne



Bild 3: Signalverlauf einer Einspritzung.

Einspritzventile mittels Widerstand und Induktivität nach und lässt auch Wirbelstromeffekte einfließen, ohne Störungen und Unstetigkeiten in den Lade- und Entladekurven zu generieren. Bisherige HiL-Systeme konnten das nicht.

Mehrmonatige Tests in Kooperation mit einem Tier 1-Zulieferer haben gezeigt, dass die Hard- und Software-basierte Modellierung das Injektorverhalten auch bei variablen Randparametern realistisch nachbildet. Auch Injektoralterung wird simulierbar. Zentraler Bestandteil der Lösung ist die Einschubkarte ES4452.1 für die Plattform ETAS LABCAR mit Field Programmable Gate Array (FPGA).

Schnelle Reaktionszeiten

Das Öffnen und Schließen der Injektornadeln ist für die neuen Regelstrategien bis auf wenige Mikrosekunden genau zu ermitteln. In der neuen ETAS-Lösung treten darum

maximal zwei bis drei Mikrosekunden Verzögerung auf.

Zum Vergleich: Die kürzesten Einspritzungen dauern gut 50 mal länger. Um das zu erreichen, wird ein digitales Ausgangssignal bereitgestellt, das die Einspritzdauer sowie den Öffnungs- und Schließzeitpunkt des virtuellen Injektors simuliert. Diese Signale sind für bis zu vier Injektornachbildungen zueinander im Kurbelwellenwinkel synchron.

Der Befehlssatz für die Karte ist offengelegt. Standardisierte Schnittstellen, 100-Megabit-Ethernet; SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments), gewährleisten eine reibungslose Integration der HiL-Lösung in bestehende Entwicklungsumgebungen. Daneben verfügt sie über einen präzisen, dynamischen analogen Ausgang, um den Strom- oder Spannungsverlauf der simulierten Injektoren u.a. per Oszilloskop darzustellen –

und Veränderungen in der Konfiguration auch ohne teure, hochgenaue Stromzange sichtbar zu machen. Konfigurationseinstellungen – etwa in Abhängigkeit vom Raildruck, Verschieben der Öffnungszeiten, Kraftstofftemperatur oder die Schwellwerte von Spannung und Strom – lassen sich im Vorfeld und während der Simulation über das SCPI-Protokoll vornehmen und verändern. In der ersten, seit Mitte 2015 verfügbaren Version der ES4452.1 ist die Lösung auf Benzin-Direkteinspritzung zugeschnitten. Eine Lösung für Dieselsysteme wurde vor kurzem mit der ES4457.1 realisiert.

Ausblick

Moderne Einspritzsysteme dosieren Kraftstoffe im Sinne effizienter, abgasarmer Verbrennung auf Milligramm genau. Nun werden durch den Abgleich von Soll- und Ist-Zustand der arbeitenden Injektoren neue Regelstrategien machbar, die alterungsbedingte Veränderungen des Injektorverhaltens kompensieren. Der Weg zur Serienreife führt auch für die mechatronische Einspritzregelung über Funktionstests. Für deren Virtualisierung mit Hardware-in-the-Loop-Tests hat ETAS das hochpräzise LABCAR HiL-System mit den Einschubkarten ES4452.1 und ES4457.1 entwickelt. Als erstes HiL-System bildet es den Injektorbetrieb präzise genug ab, um Steuergerätesoftware für die neuen Regelstrategien zu trimmen. Sie erlernt das künftige Verhalten der Injektoren, ohne dass diese in-the-Loop integriert werden müssen.