

© Etas

Optimierung von Ottomotoren Automatisierung und maschinelle Lernverfahren in der Applikation

Für Emissions- und Verbrauchstests von Kraftfahrzeugen gelten in Europa ab September 2017 im Rahmen der Typprüfung die Vorschriften WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) und RDE (Real Driving Emissions). Um die strengen neuen Prüfbedingungen zu erfüllen, muss das Verhalten von Motoren im kompletten Drehzahl-Last-Bereich („global“) optimiert werden. Etas nutzt dabei unter anderem maschinelle Lernverfahren.

AUTOREN



Yooshin Cho

ist leitender Ingenieur, verantwortlich für Benzinmotoren-Entwicklungsprojekte, bei der Hyundai Motor Company in Hwaseong (Südkorea).



Thorsten Huber

ist Produktmanager, verantwortlich für das Werkzeug Etas Ascmo, bei der Etas GmbH in Stuttgart.



Dr. Ulrich Lauff

ist Senior Marketing Communication Expert für Test- und Applikationslösungen bei der Etas GmbH in Stuttgart.



Rajesh Reddy

ist Produktmanager, verantwortlich für das Werkzeug Inca-Flow, bei der Etas GmbH in Stuttgart.

GRÜNDE FÜR EFFIZIENTE APPLIKATIONSPROZESSE

Um den hohen Anforderungen in Bezug auf Leistung, Kraftstoffverbrauch und Schadstoff-Emissionen zu entsprechen, werden immer effizientere Motoren entwickelt. Aktuelle Otto-Motoren von Hyundai sind mit Systemen wie doppeltem, kontinuierlich verstellbarem Ventiltrieb, kontinuierlich verstellbarem Ventilhub, Benzindirektspritzung, variablem Ansaugsystem sowie elektrisch angesteuerter variabler Turbinengeometrie ausgerüstet. Die große Anzahl von Freiheitsgraden, die mit der Menge an Systemen einhergeht, spiegelt sich in einer Vielzahl von Parametern wieder, die im Zuge der Applikation angepasst und optimiert werden müssen. Gleichzeitig müssen verschiedenartigste Kundenwünsche erfüllt werden, um im internationalen Wettbewerb zu bestehen. Die Hersteller bringen deshalb mit zunehmendem Tempo neue Fahrzeugmodelle und Motorenvarianten auf den Markt. Um die komplexen Motoren in ihrer Variantenvielzahl in Bezug auf Serienanlauftermine, verfügbare Motoren-prüfstände und vertretbaren Arbeitsaufwand effizient zu applizieren, reicht eine konventionelle Vorgehensweise nicht mehr aus.

Die Hyundai Motor Cooperation (HMC) führte in ihrem Forschungs- und Entwicklungszentrum in Namyang in Südkorea aus diesem Grund einen neuen, modellbasierten Applikationsprozess ein, der zum einen effizient ist und zum anderen den Betriebsbereich des Motors global abdeckt. Der neue Prozess fußt auf fortschrittlichen Modellierungs- und Automatisierungsmethoden, welche von den Software-Tools „ETAS ASCMO“ [1] und INCA-FLOW“ [2] unterstützt werden. Etas stellt den neuen Applikationsprozess von Hyundai, die Funktionsweisen der eingesetzten Methoden und die Vorteile der verwendeten Tools vor.

AUFGABENSTELLUNG

Die Einsparung des Messaufwands im Vergleich zum bisherigen Prozess und die Qualität der Ergebnisse wurden von Hyundai anhand üblicher Applikationspakete für Otto-Motoren bestimmt. Gegenstand der Untersuchungen war ein direkteinspritzender 3-l-V6-Saugmotor

mit dreistufigem Ansaugsystem, doppelter, kontinuierlich verstellbarer Ventilsteuerung und einem Motorsteuergerät von Continental. Dafür wurden

- die Steuerzeiten von Ein- und Auslassnockenwelle
- die Einspritzzeiten
- und der Zündwinkel

optimiert sowie die Modelle für

- die Füllung
- das Moment
- und die Abgastemperatur

im Steuergerät bedatet.

KONVENTIONELLES VORGEHEN

Zur Grundbedatung der einzelnen Modelle und Funktionen wurde der Motor auf dem Prüfstand bisher für alle Kombinationen relevanter Parameterwerte an einer Vielzahl von Drehzahl-Last-Punkten vermessen. Zum Beispiel mussten zur Bedatung des Füllungsmodells Messungen bei 16 Motordrehzahlen, zehn Motordrehmomenten, acht Einstellungen der Einlass- und sechs der Auslassnockenwelle sowie drei Einstellungen des Ansaugsystems durchgeführt werden.

Aus dem Produkt dieser Einstellungen ergeben sich abgerundet insgesamt 23.000 einzelne Messungen. Bei einer Dauer der Einzelmessung von ungefähr 2 min. hatte bisher also alleine die Grundbedatung des Füllungsmodells eine Gesamtmesszeit von ungefähr 800 Stunden beziehungsweise 80 Messtagen in Anspruch genommen.

NEUER APPLIKATIONSPROZESS

Mit der Umgestaltung des Applikationsprozesses hat Hyundai zwei neue Methoden eingeführt, nämlich die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE), sowie die vollautomatisierte Vermessung des Motors am Prüfstand.

Mit maschinellen Lernverfahren werden Modelle, die das Verhalten von Motoren mit hoher Genauigkeit am Computer nachbilden, auf Basis der Messergebnisse generiert. Die Versuchspläne und die messdatenbasierten Modelle werden mit dem Werkzeug Etas Ascmo erzeugt. Die Messpunkte der Versuchspläne lassen sich am Prüfstand mithilfe einer auf Basis des Werkzeugs Inca-Flow neu entwickelten Messsteuerung vollautomatisch abfahren.

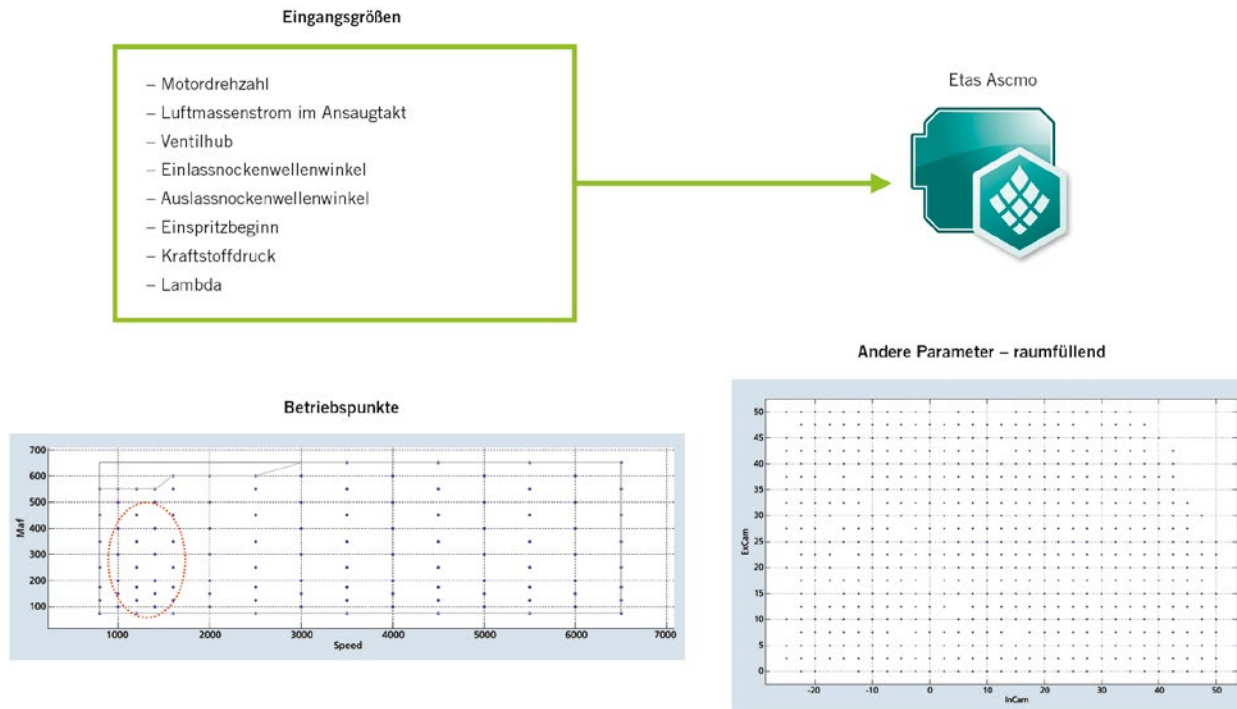


BILD 1 Versuchsplanung mit Etas Ascmo; relevante Eingangsgrößen (oben links); Verteilung der Messpunkte für die Drehzahl und Last, die zu einer reduzierten Anzahl an Betriebspunkten zusammengefasst und im Bereich niedriger Drehzahlen (rot markierte Ellipse) verdichtet sind (unten links); gleichmäßige Verteilung der Messpunkte über zwei weitere Eingangsgrößen (unten rechts) (© Etas)

„DESIGN OF EXPERIMENTS“

Mit einem Versuchsplan, der mit der DoE-Methode generiert wird, lässt sich die maximale Information aus einer möglichst geringen Zahl von Einzelmessungen gewinnen. Zu diesem Zweck werden die Messpunkte im Raum, der durch die Messparameter aufgespannt

wird, statistisch optimal verteilt. **BILD 1** zeigt die DoE-Eingangsgrößen sowie zweidimensionale Projektionen des Versuchsplans, der mit Etas Ascmo generiert wurde.

Zur Beschleunigung des Prüflaufs lassen sich Drehzahl-Last-Messpunkte mit Etas Ascmo zusammenfassen („clustern“), wobei die Verteilung der Mess-

punkte in Bezug auf die übrigen Parameter nicht verändert wird.

MESSAUTOMATISIERUNG

Eine leistungsfähige Messautomatisierung ist der Schlüssel zur effizienten Vermessung von Motoren am Prüfstand. Die neue, Inca-Flow-basierte Automati-

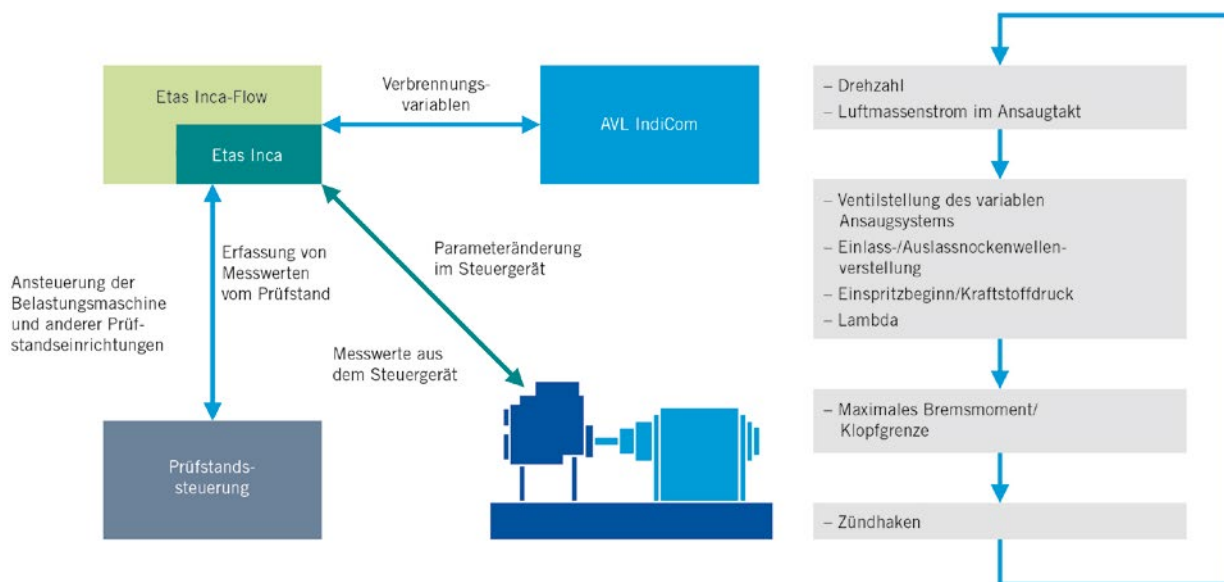
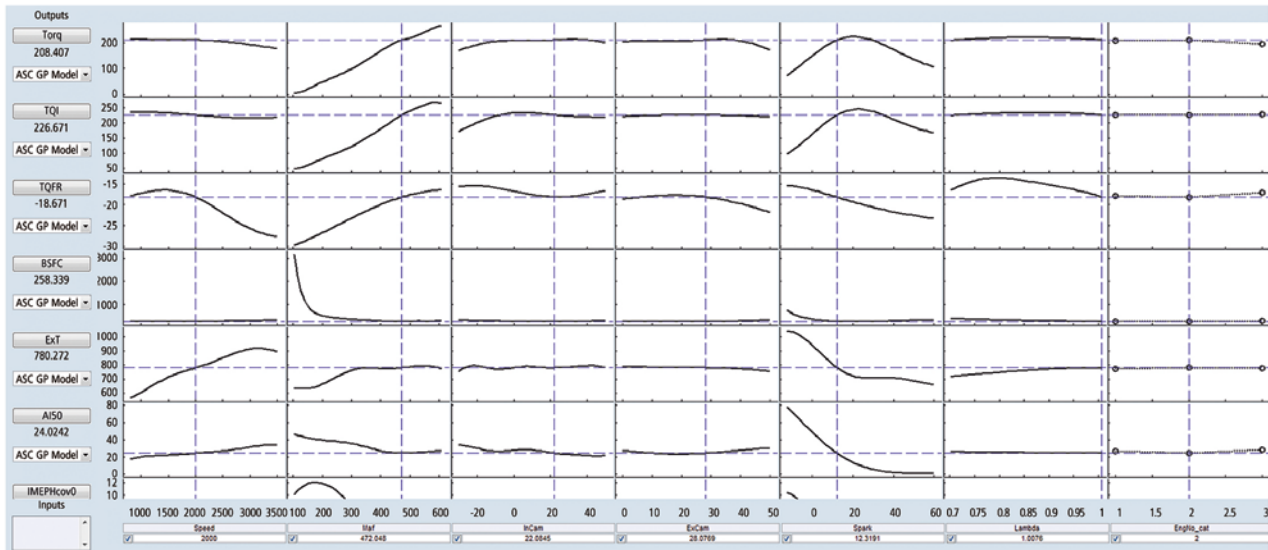


BILD 2 Schematische Darstellung der Messautomatisierung (links) und der Ablaufsteuerung mit Inca-Flow (rechts) (© Etas)

Globales Motormodell



Abkürzung	Bedeutung
Global Engine Model	Globales Motormodell
Model Error (RMSE, R2)	Modellgüte (RMSE, R2)
Torq (Nm)	Drehmoment (Nm)
Map (hPa)	Saugrohrdruck (hPa)
BSFC (g/kWh)	Spezifischer Kraftstoffverbrauch (g/kWh)
ExT (°C)	Abgastemperatur (°C)
IMEPcov (%)	Variationskoeffizient des effektiven Mitteldrucks im Brennraum (%)

BILD 3 Grafische Darstellung der Abhängigkeiten der Ausgangs- von den Eingangsgrößen; das Etas-Ascmo-Modell gibt die Abhängigkeiten im gesamten Parameterraum sehr gut wieder (© Etas)

sierungslösung von Hyundai ist in **BILD 2** dargestellt. Dort wird das Zusammenspiel zwischen Motorsteuergerät, Prüfstands-Steuerung, der Verbrennungsanalyse AVL IndiCom, Etas Inca und Inca-Flow gezeigt.

Das Flussdiagramm von Inca-Flow, eine grafisch programmierbare Ablaufsteuerung, legt die Messprozedur am einzelnen Messpunkt und die Reihenfolge fest, in der die Messpunkte des Versuchsplans am Prüfstand abgefahren werden. Während des Messlaufs werden die Werte der relevanten Applikationsparameter und Messgrößen mit Hilfe von Inca automatisch eingestellt beziehungsweise erfasst. Die Automatisierung schützt den Motor vor Klopfen und zu hohen Abgastemperaturen. Das Klopfen wird dabei durch Anpassung des Zündzeitpunkts verhindert. Die Abgastemperatur wird durch die Anpassung der eingespritzten Kraftstoffmasse beschränkt.

MASCHINELLES LERNVERFAHREN ZUR GLOBALEN MOTORMODELLIERUNG: GAUSSPROZESSE

Aus den am Motorenprüfstand gemessenen Daten wird durch ein maschinelles Lern-

verfahren ein mathematisches Modell bestimmt, welches das Motorverhalten im gesamten Betriebsbereich abbildet. Dabei kommen in Etas Ascmo Gaußprozesse zum Einsatz. Die Grundidee von Gaußprozessen ist es, die Messdaten durch ein probabilistisches Modell mit maximaler Wahrscheinlichkeit abzubilden. Anders als bei konventionellen Verfahren, die auf der Minimierung von Fehlerquadraten basieren, sind die Werte der Größen, die mit dem Modell berechnet werden, durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung gegeben. Darum verhält sich das Verfahren in Bezug auf Ausreißer sehr robust und eignet sich in der Praxis sehr gut zur Modellierung veräuschter Motormessdaten [3] [4]. Die Modellstruktur ist durch die Anzahl der Messdaten bestimmt (das heißt von außen), durch den Anwender sind keine Modellparameter vorzugeben. Mit steigender Anzahl der Messdaten wächst die Fähigkeit von Gaußprozessen, komplexe nichtlineare Zusammenhänge abzubilden. Die Modellstruktur passt sich an die Anzahl der Messdaten an. Anders als traditionelle Methoden ist das Verfahren deshalb frei von der Gefahr des Auswendiglernens („Overfitting“). So gewähr-

leistet es immer eine optimale Modellqualität und erzeugt selbst für kleine Datensätze plausible Modelle. Der Rechenaufwand für das Modelltraining von Standard-Gaußprozessen skaliert mit der dritten Potenz der Anzahl der Messpunkte, sodass der Einsatz von Gaußprozessen für Datenmengen > 8000 nicht mehr praktikabel ist. Aus diesem Grund wurde in Etas Ascmo eine Weiterentwicklung von Gaußprozessen implementiert. Mit Hilfe spezifischer Näherungen lassen sich auch sehr große Datensätze schnell mit diesen Algorithmen modellieren. Die mathematischen Grundlagen von Gaußprozessen sind in der Literatur ausführlich dargestellt [5].

APPLIKATION AUF BASIS DES MOTORMODELLS

Das aus den Messungen am Prüfstand erstellte Motormodell gibt das Verhalten des Motors im gesamten Parameterraum mit hoher Genauigkeit wieder, **BILD 3**. Auf Basis des Modells wurden sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch das Volllastdrehmoment optimiert, **BILD 4**. Die Klopfgrenze und die maximale Abgastemperatur wurden dabei eingehalten. Die Beda-

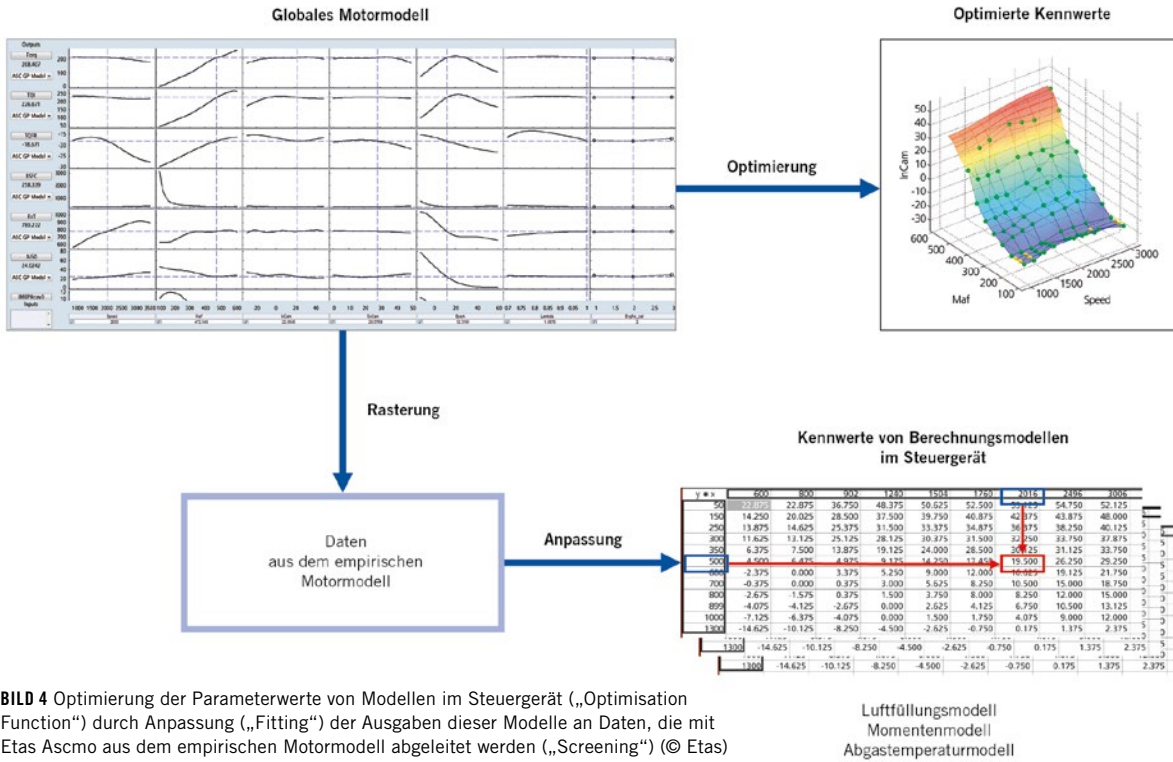


BILD 4 Optimierung der Parameterwerte von Modellen im Steuergerät („Optimisation Function“) durch Anpassung („Fitting“) der Ausgaben dieser Modelle an Daten, die mit Etas Ascmo aus dem empirischen Motormodell abgeleitet werden („Screening“) © Etas

Die Erfassung der Füllungs-, Momenten- und Abgastemperaturmodelle im Steuergerät erfordert große Mengen an Daten. Diese wurden nicht, wie beim konventionellen Vorgehen üblich, aufwendig am Motoren-

prüfstand gemessen, sondern von Etas Ascmo aus dem empirischen Motormodell abgeleitet („Screening“). Beim Vergleich mit Validierungsmessungen betragen die Abweichungen der Ergebnisse,

die mit den so bedateten Modellen berechnet wurden, beim Füllungsmodell weniger als 5 %, beim Momentenmodell weniger als 5 % oder maximal 5 Nm und beim Abgastemperaturmodell weniger als 15 °C. Das physikalische Verhalten wird also durch die Modelle im Steuergerät in jedem Fall sehr gut wiedergegeben,

BILD 5. Die TABELLE 1 zeigt die Güte der Wiedergabe des Verlaufs ausgewählter physikalischer Größen durch die Modelle des Steuergeräts. In der zweiten Spalte ist die Varianz (RMSE), in der dritten das Bestimmtheitsmaß (R²) der Modellberechnungen angegeben. R² ist ein relatives Maß, welches den Anteil der Messpunkte angibt, die durch das Modell erklärt werden.

FAZIT

Durch die Einführung des globalen, modellbasierten Prozesses im Forschung- und Entwicklungszentrum in Namyang in Südkorea konnte Hyundai eine drastische Effizienzsteigerung bei der Applikation von Motoren erreichen. In einem konkreten Applikationsprojekt ließ sich der Messaufwand am Motorenprüfstand mit dem neuen Prozess im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise um 75 % verringern, **BILD 6.** Gleichzeitig wurden die zu Beginn definierten

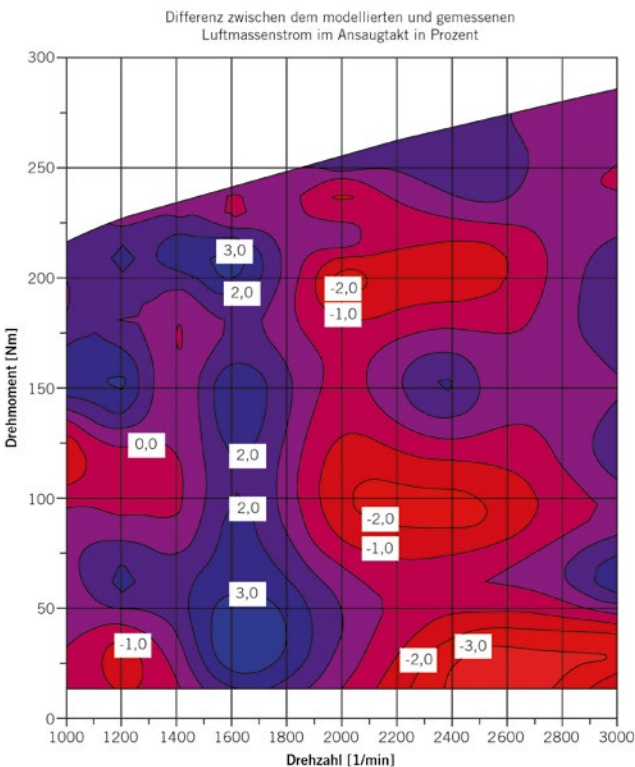


BILD 5 Der Unterschied zwischen dem modellierten und gemessenen Luftmassenstrom im Ansaugtakt beträgt im gesamten Betriebsbereich weniger als ± 5 % © Etas

Messgröße	RMSE	R ²
Drehmoment [Nm]	0,679	0,999
Ansaugdruck (MAP) [hPa]	0,854	0,999
Spezifischer Kraftstoffverbrauch (BSFC) [g/kWh]	2,445	0,999
Abgastemperatur (ExT) [°C]	1,885	0,999
Variationskoeffizient des effektiven Mitteldrucks im Brennraum (IMEP COV) [%]	0,171	0,990

TABELLE 1 Güte der Wiedergabe des Verlaufs ausgewählter physikalischer Größen durch die Modelle des Steuergeräts; in der zweiten Spalte ist die Varianz (RMSE), in der dritten das Bestimmtheitsmaß (R²) der Modellberechnungen angegeben; R² ist ein relatives Maß, welches den Anteil der Messpunkte angibt, die durch das Modell erklärt werden

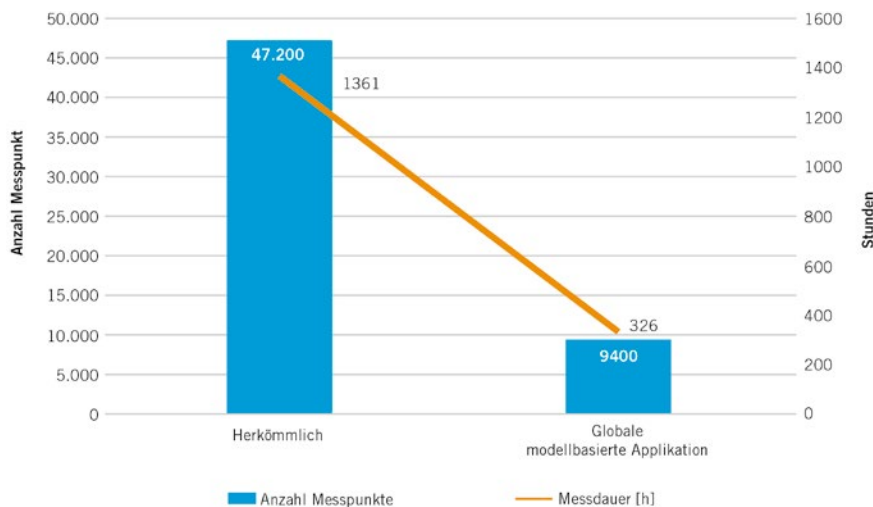


BILD 6 Mithilfe der statistischen Versuchsplanung lässt sich die Gesamtzahl der Messpunkte und die Gesamtmesszeit um 75 % verringern (© Etas)

Projektziele erreicht. Ein neues Messautomatisierungssystem, welches auf Grundlage von Etas Ascmo und Inca-Flow realisiert worden war, ermöglichte die schnelle und einfache Durchführung der Messungen am Prüfstand. Das empirische Modell des Otto-Motors, welches mit Etas Ascmo mit Hilfe von Gaußprozessen aus den Prüfstandsmessdaten generiert wurde, gibt die Abhängigkeiten der Messungen von den Eingangsgrößen sehr gut wieder. Das Gleiche gilt für die Modelle zur Berechnung physikalischer Größen im Steuergerät, deren Parameter anhand des Motormodells sehr effizient optimiert werden konnten. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der globale, modellbasierte Prozess eine effiziente Applikation komplexer Motoren mit hoher Qualität ermöglicht.

LITERATURHINWEISE

[1] Huber, T.; Kruse, T.; Lauff, U.: Modellbasierte Applikation. Hanser automotive, Nr. 10, pp. 33-35, 2013

[2] Lauff, U.; Meyer, S.; Reddy, R.: Geführte und automatisierte Applikation und Validierung von Antriebsstrangsystemen. Elektronik automotive, Nr. 6/7, pp. 38-41, 2016

[3] Hoffmann, S.; Schrott, M.; Huber, T.; Kruse, T.: Modellbasierte Methoden zur Applikation moderner Verbrennungsmotoren. MTZ 78 (2015), Nr. 4

[4] Klar, H.; Klages, B.; Gundel, D.; Kruse, T.; Ulmer, H.: Neue Verfahren zur effizienten modellbasierten Motorapplikation. 5. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2013

[5] Rasmussen, C. K.; Williams, C. E.: Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press, 2006

DANKE

Wir danken Wonseok Chang und Wongeun Yoo, unseren Field Application Engineers für die modellbasierte und automatisierte Applikation bei Etas Korea, für die Unterstützung des Projekts vor Ort sowie Dr. Thomas Kruse und Dr. Holger Ulmer für ihre Beratung.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelektronik-worldwide.com

ENGINEERING 4.0: DIGITAL, VERNETZT, LEISTUNGSSTARK



Berner & Mattner und Assystem sind jetzt Assystem Germany. Als globaler Projekt- und Outsourcingpartner entwickeln und testen wir Automotive Software, Elektronik und mechanische Speziallösungen – von der technologischen Idee bis zur Serie.

▲ Engineering,
Beratung & Produkte

▲ 15 Standorte in
Deutschland

▲ 12.500 Mitarbeiter
in über 20 Ländern

www.assystem-germany.com

assystem