

Modellbasierte Entwicklungsmethoden

Schlüssel für die Applikation moderner Verbrennungsmotoren

Statistische Versuchsplanung und modellbasierte Parameteroptimierung sind Schlüssel zur Beherrschung komplexer Motormanagementsysteme. Im Folgenden zeigen Hyundai und ETAS, wie modellbasierte Entwicklungsmethoden die Applikation moderner Verbrennungsmotoren sinnvoll unterstützen können.

Die immer schärferen Vorgaben für CO₂- und Abgasemissionen erfordern immer komplexere Motormanagementsysteme. Damit nehmen die im Gesamtsystem zu optimierenden Bedatungsparameter stetig zu. Parallel verlangt der starke Wettbewerb eine Verringerung der Entwicklungszeiten und -kosten. Um unter diesen Voraussetzungen Motorabstimmungen mit hohem Fahrkomfort, großer Dynamik und niedrigen Emissionen darstellen zu können, müssen die klassischen Bedatungsverfahren um neue, computergestützte Methoden ergänzt werden¹.

Dies wurde im europäischen Entwicklungszentrum der Hyundai Motor Group in Rüsselsheim (Hyundai Motor Europe Technical Center GmbH, HMETC) früh erkannt: Seit 2005 setzt man in der Antriebsstrangentwicklung neben einem hohen Automatisierungsgrad verstärkt auf statistische Versuchsplanung (Design of Experiment, DoE) und modellbasierte Optimierungsverfahren. Die Akzeptanz der

anfangs eingesetzten Lösungen war jedoch durch geringe Nutzerfreundlichkeit und fehlende Abdeckung aller nötigen Prozessschritte der Motorentwicklung stark eingeschränkt. Die Einführung der Software ETAS ASCMO² konnte hier jedoch Abhilfe schaffen: Neben einer auf die modellbasierte Steuergerätebedatung zugeschnittenen Programmstruktur und Benutzeroberfläche werden hilfreiche Funktionen zur Unterstützung des unerfahrenen Anwenders angeboten. Im Folgenden wird exemplarisch die Anwendung dieser neuen Lösung bei einem seriennahen Motorenprojekt des HMETC-Bereichs Powertrain beschrieben.

Projektsituation

Als Versuchsträger diente ein 2,0-l-Vierzylinder-Dieselmotor mit seriennaher Motor-Hardware und ECU-Software (Abb. rechts). Die vorhandene Kalibrierung erfüllte bereits zu Versuchsbeginn die Euro-5-Norm. Mit Hilfe der DoE-Software sollte der Kraftstoffverbrauch des Motors weiter reduziert werden. Es galt

dabei, eine möglichst optimale Abstimmung für die folgenden Applikationsparameter zu finden:

- Luftmasse/AGR-Rate
- Beginn Haupteinspritzung
- Drallklappenstellung
- Position der Abgasgegendruckklappe für die Niederdruck-AGR-Regelung
- Ladedruck
- Raildruck

Die relevanten Zielgrößen waren:

- Kraftstoffverbrauch (CO₂)
- Partikelmasse (Soot)
- Stickoxide (NO_x)
- Kohlenwasserstoffe (HC)
- Kohlenmonoxide (CO)
- Verbrennungsgeräusch (dBA)

Alle Untersuchungen wurden am Motorenprüfstand durchgeführt und anschließend im Fahrzeug am Abgasrollenprüfstand verifiziert. Bei der Basisvermessung wurde der CO₂-Wert bestimmt, der als Referenz für die Optimierung diente. Aus den Verweildauern von Drehzahl und Last im Zyklus ergaben sich die in Bild 1 dargestellten, für die

Optimierung relevanten Betriebspunkte.

Planung der Messdatenerfassung am Prüfstand

Das zur Versuchsplanung verwendete Modul der DoE-Software „ExpeDes“ unterteilt den Arbeitsablauf übersichtlich in acht Schritte. Eine hilfreiche Funktion ermöglicht die Verdichtung der Messpunkte über ausgewählte Eingangsgrößen, Bild 2. Im konkreten Fall wurden die Messpunkte im Bereich kleiner Luftmassen verdichtet, da hier neben einer größeren Messgenauigkeit aufgrund der hohen AGR-Raten gleichzeitig eine unetere physikalische Abhängigkeit erwartet wurde. Eine weitere Funktion erlaubt die Unterteilung des Versuchsplans in eine variable Anzahl von Abschnitten („Blöcke“). Bei ausreichender Messpunktzahl bietet jeder Block für sich eine optimale Verteilung zur Modellbildung. So kann schon bei der Messung am Prüfstand nach jedem Block kurzfristig entschieden werden, ob die nötige Modellgüte bereits erreicht ist und der Versuchslauf vorzeitig beendet werden kann. Dies kann den benötigten Messaufwand enorm reduzieren. Bild 3 zeigt exemplarisch den Verlauf der Modellgenauigkeit für die Rauchzahl über der Anzahl der zur Modellbildung verwendeten Messpunkte.

Schlüsselpunkt Rohdatenanalyse

Nach der Messdatenerfassung erfolgt die Rohdatenanalyse, der oftmals wichtigste Schritt der Auswertung. Diese gibt neben der Bestimmung von Fehlmessungen und Driften bereits Aufschluss über das mögliche Optimierungspotential. Diesen Prozess unterstützt die DoE-Software sehr effizient. So

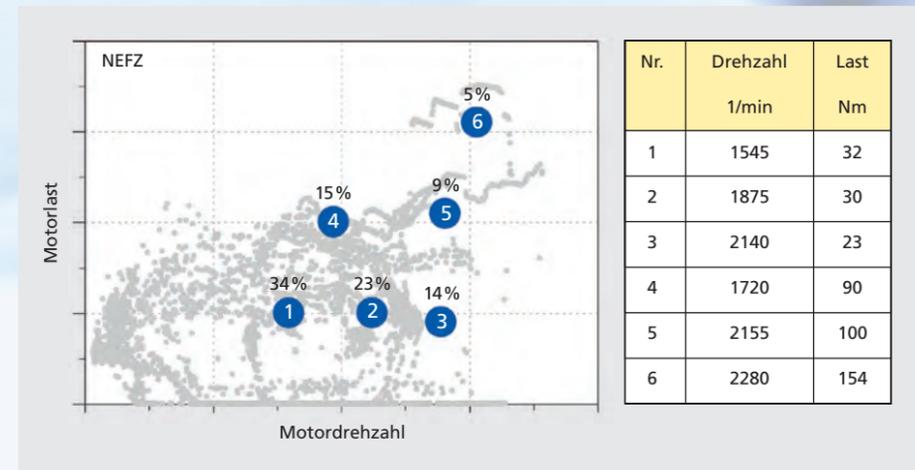
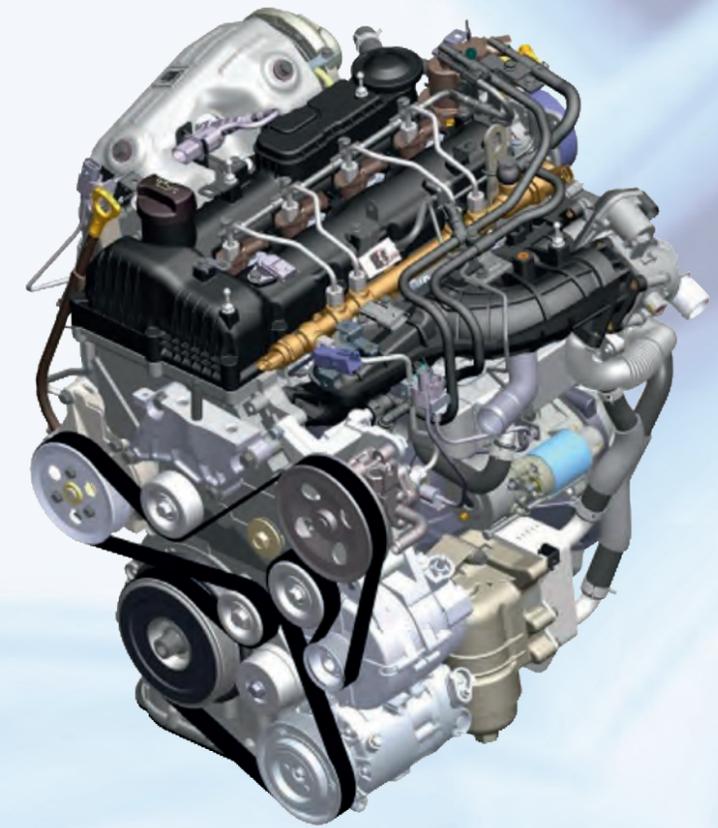
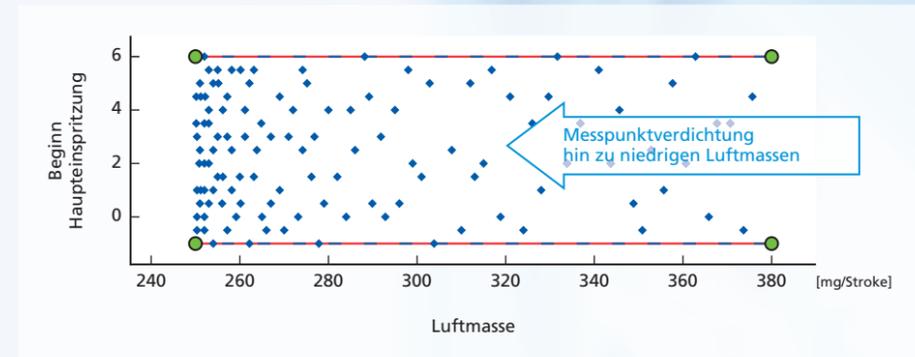


Bild 1: Verteilung und Gewichtung der Betriebspunkte im NEFZ.

Bild 2: Versuchsplanung mit lokaler Messpunktverdichtung.



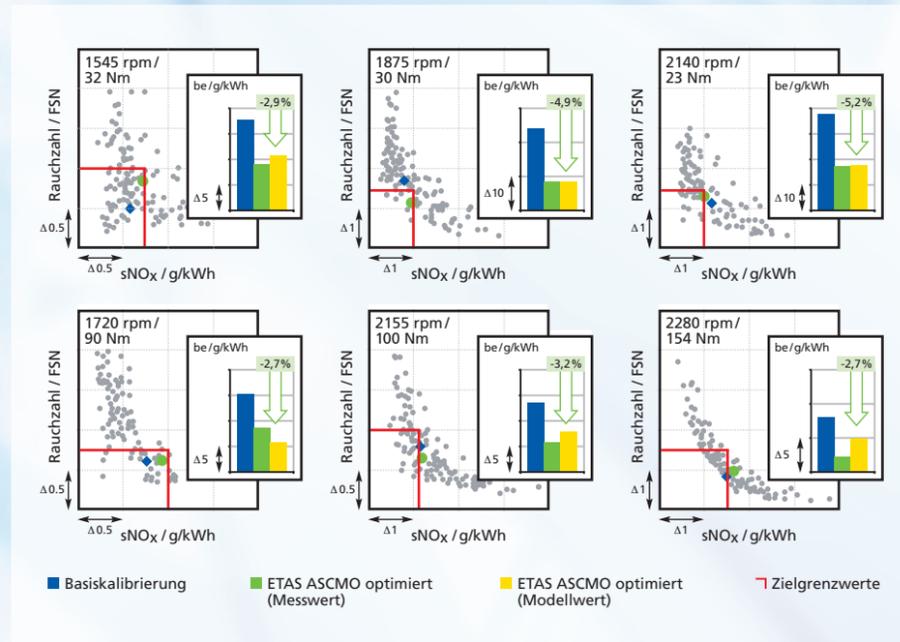
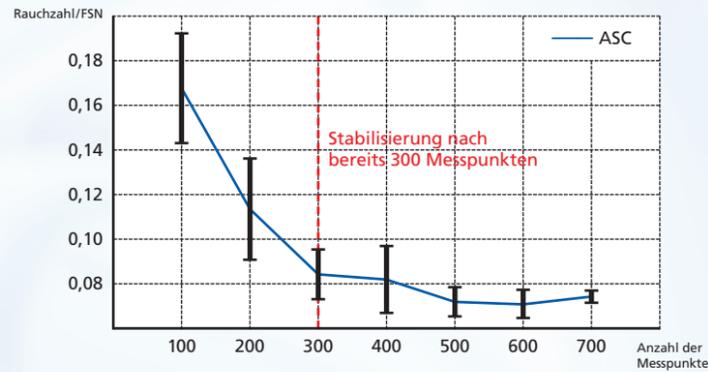
AUTOREN

Stefan Hoffmann
ist Teamleiter
Advanced Diesel
Combustion
Development bei der
**Hyundai Motor
Europe Technical
Center GmbH** in
Rüsselsheim.

Michael Schrott
ist Senior Engineer
Entwicklungsprojekte
Dieselmotorische
Verbrennung bei der
**Hyundai Motor
Europe Technical
Center GmbH** in
Rüsselsheim.

Thorsten Huber
und **Dr.-Ing.
Thomas Kruse**
sind Produktmanager
Model-based
Calibration bei der
ETAS GmbH.

Mittlerer Fehler globales Rauchzahlmodell
Fehlerbalken → Standardabweichung für fünf Wiederholungen



Prognose vor Optimierung
Werte angepasst entsprechend den Ergebnissen der Vorvermessung am Rollenprüfstand

Prognosis Results		
Extras		
Name	Prognosis	Change [%]
SOOT [g/km]	100 %	
NO _x [g/km]		
CO [g/km]		
CO ₂ [g/km]		
SFC [l/100km]		

Prognose nach Optimierung
Vorhersage auf Basis der getroffenen Gewichtungen und Anpassungsfaktoren

Prognosis Results		
Extras		
Name	Prognosis	Change [%]
SOOT [g/km]	92 %	
NO _x [g/km]	92 %	
CO [g/km]	107 %	
CO ₂ [g/km]	97.5 %	
SFC [l/100km]	97.6 %	

	NO _x /g/km	CO /g/km	Soot/g/km	CO ₂ /g/km	FC /l/100 km
Abweichung ETAS ASCMO-Fahrzeugmessung	-3,7 %	-4,0 %	-12,5 %	+0,2 %	+0,3 %
Tendenz	+	+	-	++	++

können in interaktiven Diagrammen Verstellparameter und/oder Zielgrößen gegenübergestellt und beispielsweise Bereiche optimaler Zielgrößenwerte eingegrenzt werden. Dadurch können Messdaten effektiv visuell ausgewertet und vorteilhafte Parameterkombinationen bestimmt werden.

Automatisierte Modellbildung

Der Kern von ETAS ASCMO ist die Modellbildung, die benutzerfreundlich und größtenteils automatisiert abläuft. Anders als bei bisher verfügbaren Werkzeugen zur modellbasierten Applikation muss der Anwender dabei keinen spezifischen Typ aus einer Menge unterschiedlicher Modelltypen auswählen.

Bild 3 (oben):
Modellgenauigkeit des in ETAS ASCMO verwendeten Modells (ASC) über der Datensatzgröße: mittlerer Fehler des globalen Rauchzahlmodells (bestimmt anhand von Verifikationsmessungen, Fehlerbalken = Standardabweichung für fünf Wiederholungen).

Bild 4 (Mitte):
Optimierungsergebnisse auf Basis von Messungen am Motorenprüfstand an sechs Betriebspunkten.

Bild 5 (unten):
Prognose basierend auf Zyklushochrechnungen, vor und nach der Optimierung (teilweise Screenshot).

Stattdessen wird ihm ein einziger, besonders flexibler und leistungsfähiger Modelltyp basierend auf Gauß-Prozessen (GP) vorgeschlagen. Dieser Ansatz ermöglicht, auch stark nichtlineares Verhalten sehr komplexer Systeme mit hoher Genauigkeit ohne Überanpassung (Overfitting) abzubilden. Dazu muss das Modell vom Anwender nicht parametrisiert werden.

Kritisch sind bei GP-Modellen oft Rechenzeit und Speicherbedarf zur Verarbeitung großer Messumfänge. Die realisierte effiziente GP-Implementierung erlaubt es, auf einem Standard-PC aus bis zu einigen Zehntausend Messpunkten noch in akzeptabler Zeit Modelle zu generieren. Die hohe Flexibilität der GP-Modelle erlaubt nun die Erstellung globaler Motormodelle mit Drehzahl und Last als zusätzlichen Eingangsgrößen. Um die maximal erreichbare Qualität zu beurteilen, wurden im vorliegenden Fall aus den Messdaten der sechs Betriebspunkte sowohl lokale Modelle als auch ein globales Modell erstellt. Die Qualität der Modelle war in beiden Fällen zufriedenstellend und die physikalischen Abhängigkeiten wurden weitestgehend richtig dargestellt. Das globale Modell zeigt teilweise sogar bessere statistische Kennwerte als die lokalen Pendanten. Lediglich die Modellierung der CO-Emissionen ist bei einem Wertebereich von bis zu 16 g/kWh

mit einer Standardabweichung von 0,57 g/kWh etwas zu ungenau. Die Tabelle unten zeigt die statistischen Gütemaße der globalen Modelle auf Basis von Verifikationsmessungen.

Optimierungsergebnisse

Während der Funktionsumfang von ETAS ASCMO zur lokalen Optimierung mit dem anderer Lösungen vergleichbar ist, liegt die Stärke in der globalen Modellbildung und Auswertung, die es erlauben, ganze Kennfelder automatisch in Bezug auf Fahrzyklen zu optimieren. Mit Hilfe einer Liste gewichteter Betriebspunkte wird für jede Kennfeldänderung online eine aktuelle Zyklusprognose berechnet. So kann mit einem leistungsfähigen Optimierer automatisch eine Bedatung erzeugt werden, die unter Einhaltung der Zyklusgrenzwerte den minimalen Kraftstoffverbrauch erzielt sowie lokale Grenzwerte und Kennfeldglätte berücksichtigt. Die so erreichten Optimierungsergebnisse auf Basis der Untersuchungen sind in Bild 4 links zusammengefasst. Bei der Verifikation am Rollenprüfstand erreichte das Fahrzeug mit der optimierten Kalibrierung eine Verbrauchsverbesserung von circa 2,5 % im Vergleich zur Basis bei gleichzeitig geringfügig verbesserten Rauch- und Stickoxidemissionen. Da mit einem bereits ausgeprägten Datenstand gestartet wurde, ist dies eine durchaus nennenswerte

Größenordnung. Zudem liegt der Wert sehr dicht an der Prognose des DoE-Modells. Bild 5 links zeigt die Ergebnisse der Zyklushochrechnungen vor und nach der Optimierung.

Zusammenfassung

Insgesamt fiel die Bewertung von ETAS ASCMO sehr positiv aus. Speziell im Bereich der Motorapplikation wurde wegen der aufgabenbezogenen Leistungsfähigkeit und einfachen Bedienbarkeit schnell eine hohe Akzeptanz bei den Entwicklungsingenieuren erreicht. In vielen Publikationen zur modellbasierten Optimierung wird vor allem die Zeit- und Kostenersparnis hervorgehoben. Bei HMETC liegt dagegen das Hauptaugenmerk stärker auf der messbaren Steigerung der Qualität und der verbesserten Dokumentation der Applikationsergebnisse.

Literaturhinweise

- ¹⁾ Klar, H.; Klages, B.; Gundel, D.; Kruse, T.; Huber, T.; Ulmer, H.: Neue Verfahren zur effizienten modellbasierten Motorapplikation. 5. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2013
- ²⁾ Huber, T.; Kruse, T.; Lauff, U.: Modellbasierte Applikation komplexer Systeme. In: Hanser automotive, 10/2013, S. 33-35

Qualität des globalen Modells anhand von Verifikationsmessungen.

	sNO _x /g/kWh	sCO/g/kWh	Rauch/FSN	CO ₂ /FSN	Verbrennungsgeräusch/dBA	be/g/kWh
Modellbereich	0,4-2,5	0,7-16	0-6	4-13	75-95	210-460
RMSE	0,058	0,57	0,089	0,059	0,23	5,32
R ²	0,97	0,98	0,97	0,99	0,98	0,99