

Systemoptimierung zur Applikation von Steuergerätefunktionen

© SGE

Die Design-of-Experiments-Methodik bildet eine wichtige Grundlage für die Modellierung komplexer Systeme. Die Übertragung der Modelle in echtzeitfähige Steuergeräte ist dabei eine große Herausforderung. Ein neuer Ansatz zur Systemoptimierung von SGE und BRP-Rotax erlaubt die automatisierte Applikation von Steuergerätefunktionen durch gleichzeitige Anpassung aller Applikationsparameter.

HERAUSFORDERUNG APPLIKATION

Moderne Entwicklungsmethoden bilden die Basis für technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Projekte. Design of Experiments (DoE) ist dabei eine wichtige Grundlage für die Modellierung komplexer Systeme mit dem Ziel der Effizienzsteigerung. Es bietet aber noch keine allgemeingültigen Antworten auf die Frage nach der Übertragbarkeit der Modelle in echtzeitfähige Steuergerätefunktionen. Diese werden häufig durch eine Vielzahl abhängiger Applikationsparameter implementiert, die in einem iterativen Prozess angepasst werden müssen.

Aufgabe der Applikation ist es, eine zuverlässige Funktion des Systems unter allen Umgebungsbedingungen über die Fertigungstoleranzen und das Alterungs-

verhalten hinweg sicherzustellen. Dabei werden oft anwendungsbezogene, empirische Methoden angewendet. Der erforderliche Aufwand für die Applikation steigt dabei etwa proportional mit der Anzahl der Varianten und Entwicklungsbaustufen, da jeweils auf identische Weise Daten generiert, ausgewertet und in Form von Applikationsparametern aufbereitet werden. Daher werden regelmäßig spezifische Softwaretools entwickelt, die auf die Applikation einer Funktion eines Steuergeräts zugeschnitten sind.

Die Applikation wird zudem erschwert, weil eine Steuergerätefunktion derzeit die chemisch-physikalischen Zusammenhänge eines Verbrennungsmotors noch nicht vollständig und echtzeitfähig abbilden kann. Somit werden oft nur Haupteffekte implementiert und eine exakte Bedienung der Applikationsparameter

AUTOREN



Dipl.-Ing. André Sell
ist Leiter Methodik bei der SGE
Ingenieur GmbH in Gräfelfing.



Dipl.-Ing. (FH) Tobias Gutmann
ist Leiter Applikation bei der SGE
Ingenieur GmbH in Gräfelfing.



Frank Gutmann, M. Eng.
ist Leiter Funktionsentwicklung bei der
SGE Ingenieur GmbH in Gräfelfing.



Dipl.-Ing. Stefan Leiber
ist Leiter Entwicklung Thermodynamik
bei der BRP-Rotax GmbH & Co KG
in Günskirchen (Österreich).

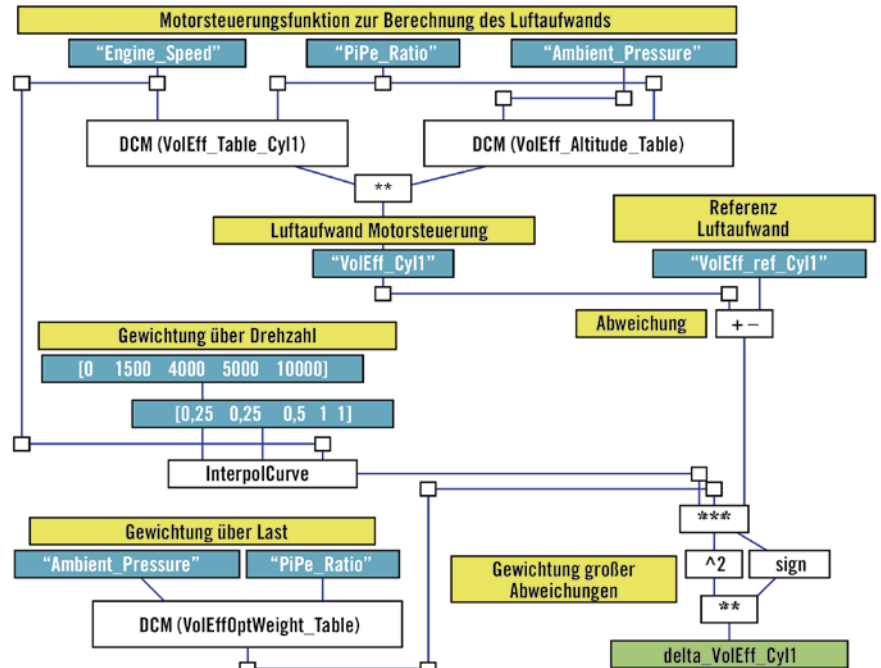
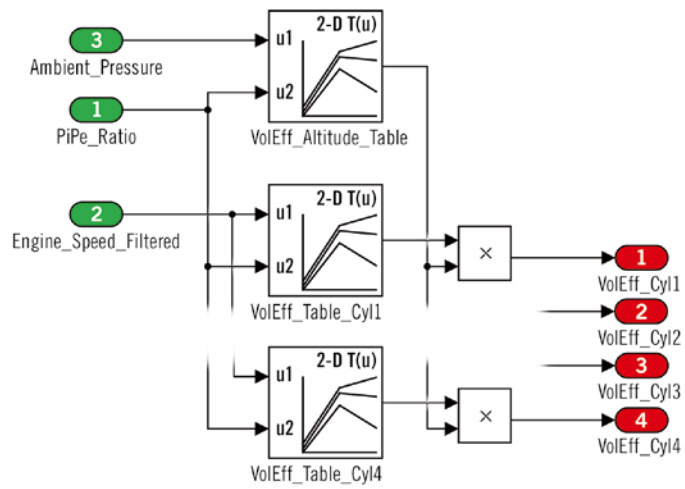


BILD 1 Serien-Motormanagementfunktion mit entsprechender Gütefunktion für die Optimierung (es werden die Variablen- und Parameterbezeichnungen der Motorsteuerung verwendet) © SGE

ist dann nicht mehr möglich, sodass durch Priorisierungen ein Kompromiss gefunden werden muss. Als letzte Herausforderung seien Applikationsparameter erwähnt, deren Ausgangswert nicht direkt oder nicht im gesamten Betriebsbereich bestimmbar ist, beispielsweise wenn diese aus Gründen der Klopfreiheit bei der Verbrennung oder des Bauteilschutzes nicht vermessen werden können. Somit ist nur eine mittelbare Festlegung möglich.

NEUER MOTOR ROTAX 915 IS

BRP-Rotax entwickelt auf Basis des bewährten Antriebskonzepts der 912-/914-Motorenfamilie von Rotax den neuen turboaufgeladenen Vierzylinder-Viertakt-Flugmotor Rotax 915 iS mit Ladeluftkühler. Er bietet mit 100 kW

mehr Leistung, das beste Leistungsgewicht seiner Klasse und volle Startleistung bis mindestens 4600 m (15.000 ft) sowie eine Dienstgipfelhöhe von 7000 m (23.000 ft).

Um die hohen Anforderungen bezüglich Betriebssicherheit an einen Flugmotor zu erreichen, ist das gesamte Steuerungssystem redundant ausgelegt. Das Steuergerät beinhaltet zwei unabhängige Einheiten (Lanes), die jeweils den Motor eigenständig betreiben können. Dazu ist auch die gesamte sicherheitskritische Sensorik und Aktorik redundant ausgeführt. Da sich die Positionierung der Aktorik beider Lanes unterscheidet, erfordern diese eine getrennte Basisapplikation – teilweise nochmals getrennt für verschiedene Betriebsmodi.

Diese Vielfalt der Varianten in Verbindung mit dem erweiterten Betriebs-

reich des Flugmotors hinsichtlich Umgebungsbedingungen führen zu einem steigenden Applikationsaufwand. Daher wurde dieses Projekt von der BRP-Rotax GmbH & Co KG in Zusammenarbeit mit der SGE Ingenieur GmbH ausgewählt, um eine neue Methode der Applikation zu erproben und zu bewerten.

SYSTEMOPTIMIERUNG

Ein neuer Ansatz der Systemoptimierung erlaubt die automatisierte Applikation von Steuergerätefunktionen durch gleichzeitige Anpassung aller Applikationsparameter. Ziel ist dabei, die Abweichung des Steuergeräte-Systemverhaltens von einer Referenz zu minimieren, **BILD 1**. Das Referenzverhalten beschreibt den Sollzustand, den die Steuergerätefunktion abbilden soll. Es kann in Form von gemessenen

beziehungsweise simulierten Daten oder eines datenbasierten Modells vorliegen.

Die zu applizierende Steuergerätfunktion beinhaltet mindestens einen, im Regelfall aber mehrere Applikationsparameter sowie jeweils ein oder mehrere Ein- und Ausgangssignale. Dieselben Signale bilden die Schnittstellen des Referenzsystems. Dabei ist es nur notwendig, die Ein- und Ausgänge der Funktion abzubilden. Informationen über Signale innerhalb der Funktion sind nicht notwendig, womit das oben genannte Problem der nicht direkt bestimmbar Signale nicht mehr relevant ist.

Zur Ermittlung der Abweichung zwischen Steuergerätfunktion und Referenzsystem wird die Steuergerätfunktion mit den Eingangssignalen des Referenzsystems beaufschlagt und die sich ergebenden Ausgangssignale mit denen des Referenzsystems verglichen. Im einfachsten Fall werden dabei die betragsmäßigen Differenzen für alle Ausgangssignale als Mittelwert zu einem skalaren Gütekriterium verrechnet, das durch die Optimierung minimiert wird. Da die Berechnung des Gütekriteriums frei definierbar ist, hat der Anwender die Möglichkeit, gezielt Einfluss zu nehmen. Er kann beispielsweise Gewichtungen abhängig von Betriebspunkt, dem Vorzeichen oder dem Betrag der Abweichung vornehmen. Ebenso können empirische Kriterien zur Bewertung der Applikation eingebracht werden, sofern sie sich aus den Ein- und Ausgangssignalen der Funktion berechnen lassen. Auf diese Weise wird eine definierte Applikation von Funktionen ermöglicht, die die physikalischen Zusammenhänge nicht exakt abbilden können und damit keine triviale Bewertung anhand der Abweichung erlauben.

Das Gütekriterium wird mittels eines Optimierungsalgorithmus durch gleichzeitige Variation aller in der Funktion enthaltenen Applikationsparameter minimiert. Eine bereits vorhandene Ausgangsapplikation kann als Startpunkt der Optimierung berücksichtigt werden und so den Zeitbedarf reduzieren.

Für die Applikationsparameter lassen sich Grenzen und Glattheitsanforderungen berücksichtigen. Grenzen sind auch anzuwenden, um bei unterbestimmten Funktionen zu einem reproduzierbaren Ergebnis zu kommen. Diese Notwendigkeit besteht, wenn Applikations-

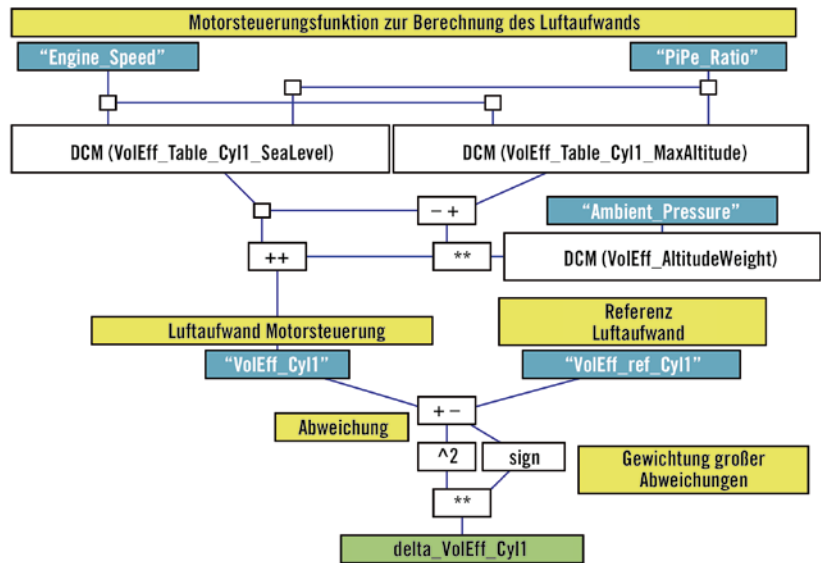
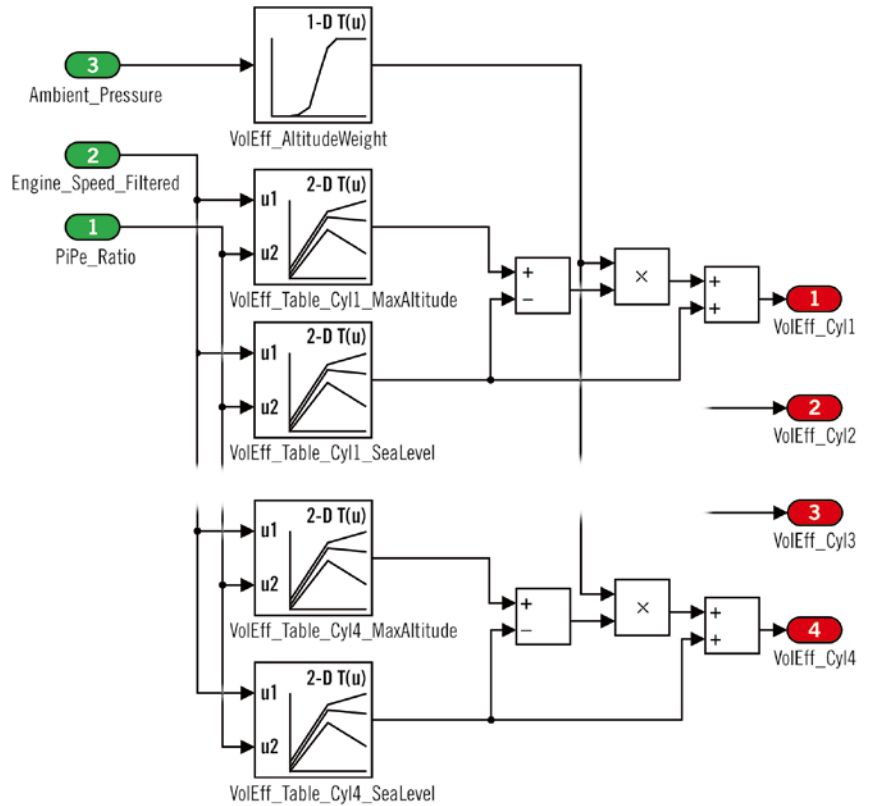


BILD 2 Alternative Motormanagementfunktion mit entsprechender Gütefunktion für die Optimierung (es werden die Variablen- und Parameterbezeichnungen der Motorsteuerung verwendet) © SGE

parameter addiert oder multipliziert werden und eine unendliche Anzahl von Kombinationen existiert, die das gleiche Ergebnis liefern.

IMPLEMENTIERUNG

Die beschriebene Methode der Systemoptimierung wurde für Serienanwendungen als Erweiterung des Softwaretools Model-Artist von SGE implementiert. Dieses Werkzeug zur Visualisierung,

Modellierung und Optimierung von komplexen Systemen bietet die Unterstützung diverser Datenformate sowie umfangreicher Rechenkanäle und damit direkter Zugang zu den Mess- und Simulationsdaten – in der Regel ohne Datenvorverarbeitung. Als Basis der Optimierungsfunktionen kommen anschließend Gauß-Prozess-Modelle zum Einsatz.

Die wesentlichen Komponenten der Systemoptimierung sind das Referenzsystem, die zu applizierende Steuerge-

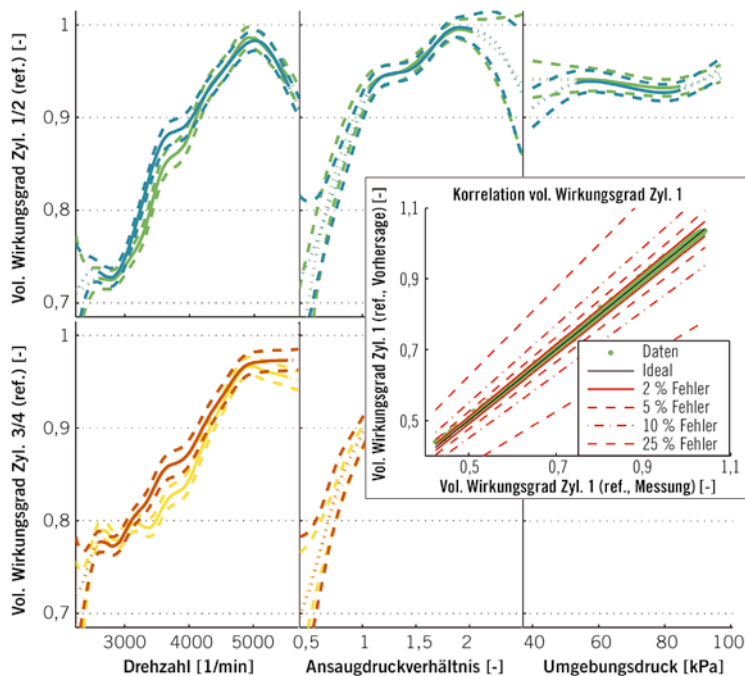


BILD 3 Modell des Luftaufwands zylinderindividuell und Korrelation für den ersten Zylinder (© SGE)

rätefunktion und die Gütefunktion. Das Referenzsystem kann wahlweise durch gemessene und simulierte Daten oder durch ein Modell repräsentiert werden. Während ein Modell in der Regel aufgrund seiner positiven Eigenschaften bezüglich Plausibilität zu bevorzugen ist, kann bei sehr großen, nicht modellierbaren Datenmengen direkt auf die Daten zugegriffen werden. Die zu applizierende Steuergerätefunktion wird in Form eines Flussdiagramms mit den Applikationsparametern und ihrer Ausgangsbedeutung abgebildet und ist damit einfach aus den gängigen Darstellungsweisen der Funktionsentwicklung abzuleiten. Mit der Software Simulink erstellte Systeme können ebenfalls eingebunden werden. Die Gütefunktion wird in gleicher Weise realisiert und erlaubt so die beschriebene Beeinflussung des Optimierungsergebnisses.

Vor Start der Optimierung konfiguriert der Anwender Glattheitskriterien und

Grenzen für die Applikationsparameter in Form fester Werte oder parameterabhängig, beispielsweise als Kennfeld. Eine Fortschrittsanzeige während der Optimierung ermöglicht die schnelle Beurteilung des Verlaufs und den Zugriff auf Zwischenergebnisse, die die Ansicht der zu optimierenden Applikationsparameter erlauben und gespeichert werden können.

ANWENDUNG

Für den Flugmotor 915 iS von Rotax wurde die Methode der Systemoptimierung angewendet, um die Funktion der Lasterfassung zu applizieren. Diese ermittelt den Luftaufwand des Motors zylinderindividuell, ausgehend von Motordrehzahl, Ansaugdruckverhältnis (PiPe_Ratio) und Umgebungsdruck. Da aus dem Vorgängerprojekt bekannt war, dass die Funktion den physikalischen Zusammenhang aufgrund fehlen-

der Abhängigkeit der Umgebungsdruckkorrektur von der Motordrehzahl nicht exakt abbilden kann, wurde in die Gütefunktion eine Gewichtung zur Priorisierung hoher Drehzahlen und Lasten integriert, um die Genauigkeit der Applikation in diesem Bereich zu erhöhen. Die in **BILD 1** gezeigte Gütefunktion des ersten Zylinders wurde analog für die restlichen Zylinder erstellt.

Neben der Serienfunktion wurde zusätzlich eine Alternative betrachtet, deren Eignung zur Abbildung der physikalischen Zusammenhänge zu bewerten war. Diese Erweiterung bedeutet einen geringen Aufwand, da lediglich die alternative Funktion in die Gütefunktion zu integrieren und die betriebspunktabhängige Gewichtung zu entfernen ist, **BILD 2**.

Als Referenzsystem wurde für jeden Zylinder ein Gauß-Prozess-Modell anhand von 3125 Messpunkten innerhalb des Parameterbereichs der Daten trainiert, **BILD 3**. Für die Serienfunktion mit fünf Kennfeldern und insgesamt 1440 zu applizierenden Einzelwerten benötigte die Optimierung 4 h Laufzeit. Das Ergebnis waren plausible Kennfelder, die nach Nachbereitung und Extrapolation in die nicht vermessenen Bereiche direkt in die Motorsteuerung übernommen werden konnten. Betrachtet man die verbleibende Abweichung der beiden optimierten Applikationen von den Messwerten, **TABELLE 1**, und die Ver-

	Serienfunktion, Ausgangsapplikation	Serienfunktion, optimierte Applikation	Alternative Funktion, optimierte Applikation
Mittlere Abweichung	0,016	0,010 (-38 %)	0,007 (-56 %)
Max. Betrag Abweichung	0,107	0,050 (-53 %)	0,037 (-65 %)

TABELLE 1 Übersicht der Optimierungsergebnisse bezüglich Abweichung des Luftaufwands für die Serien- und die alternative Motormanagementfunktion mit Ausgangs- und optimierter Applikation (für den ersten Zylinder) (© SGE)

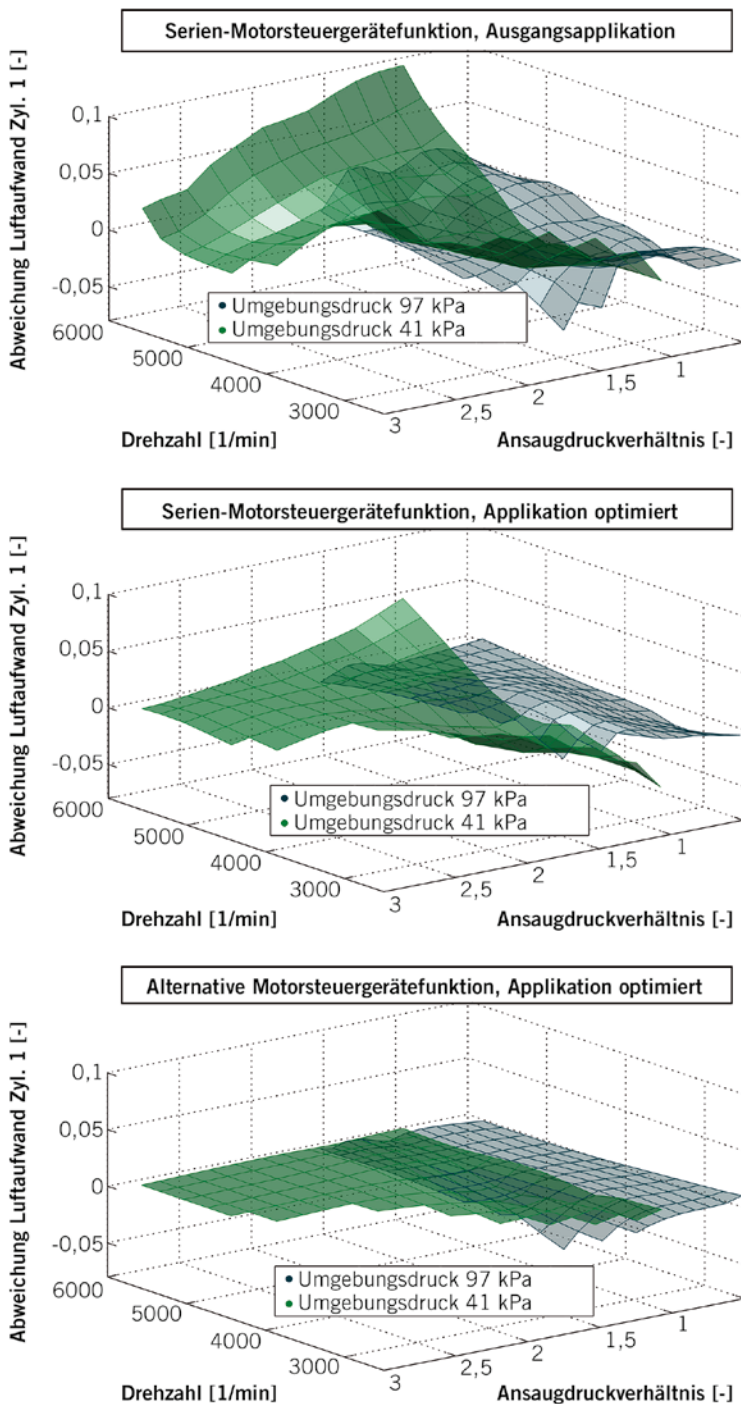


BILD 4 Visualisierung der Abweichung des Luftaufwands für die Serien- und die alternative Motormanagementfunktion mit Ausgangs- und optimierter Applikation (für den ersten Zylinder) © SGE

teilung der Abweichungen, **BILD 4**, findet man die erwünschten Auswirkungen der Priorisierung bei hohen Drehzahlen und Lasten für die Serienfunktion sowie die Bestätigung der deutlich besseren Eignung der alternativen Funktion, die sich in einer gleichmäßigeren Verteilung und betragsmäßig kleineren Werten der Abweichung zeigt.

Der Effizienzgewinn durch Anwendung der Systemoptimierung steigt

überproportional mit der Anzahl der Applikationsvarianten, da durch den Anwender jeweils nur Anpassungen des Referenzsystems und der Gütefunktion sowie eine eventuelle Nachbearbeitung der Applikationsparameter erforderlich sind. Die Optimierung erfolgt eigenständig ohne Zutun des Anwenders. Im vorliegenden Projekt des Flugmotors Rotax 915 iS konnten die für die Erreichung der hohen Qualitätsanfor-

derungen an die Applikation bezüglich Betriebssicherheit und Kraftstoffverbrauch notwendigen Entwicklungsressourcen mehr als halbiert werden. Gleichzeitig wurden durch die Bewertung der alternativen Funktion Potenziale für eine zukünftige Steuergeräteentwicklung aufgezeigt und durch die automatisierte und optimale Applikation belegt.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der vorgestellten Methode der Systemoptimierung steht dem Applikateur und Funktionsentwickler ein universelles Werkzeug zur automatisierten Parametrisierung von Steuergerätefunktionen zur Verfügung. Die Integration der Systemoptimierung in eine Toolkette zur modellbasierten Applikation gewährleistet eine nahtlose Verarbeitung der Messdaten bis hin zu den optimierten Applikationsparametern. Diese innovative Methode wurde erfolgreich von der BRP-Rotax GmbH & Co KG in Zusammenarbeit mit der SGE Ingenieur GmbH angewendet, um die Basisapplikation des neuen Flugmotors Rotax 915 iS mit deutlich reduziertem Aufwand an Ressourcen zu optimieren und Funktionsentwicklungspotenziale aufzuzeigen.

DANKE

Der Dank der Autoren gilt den Mitarbeitern der BRP-Rotax GmbH & Co KG, insbesondere Dr. Thomas Hametner, Director Design Engineering, Dipl.-Ing. Thomas Goigitzer, Thermodynamik und Kalibrierung Flugmotoren, Ing. Johannes Kliemstein, Kalibrierung Flugmotoren, und Dipl.-Ing. Christian Sulek, Test- und Kalibriermethodenentwicklung bei BRP, für die Mitwirkung und Unterstützung sowie Paul Schmaus, M. Eng., Applikation, der SGE Ingenieur GmbH.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

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

International, Digital, Interactive: The new eMagazine from MTZ

MTZworldwide – always in pole position when it comes to engine development & technology



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

MTZ eMagazine has 100 pages packed with information:

- ▶ company news and the latest products
- ▶ specialist articles from industry and research
- ▶ guest comment
- ▶ interview on the cover story



Keyword search: The search function enables you search for a keyword in the complete issue in a matter of seconds



Didactically prepared: Animations and editorial videos offer genuine added value and complement the specialist articles from the automotive industry



Responsive HTML5 implementation: This ensures that you have access to your eMagazine not only from desktops and laptops but also from smartphones and tablets



PDF downloads: The classic function for saving and downloading articles



Interactive contents: Jump immediately to your selected article with one click



User-friendly and direct without an app: HTML5 technology provides a direct link to the website, ensuring access without an app store