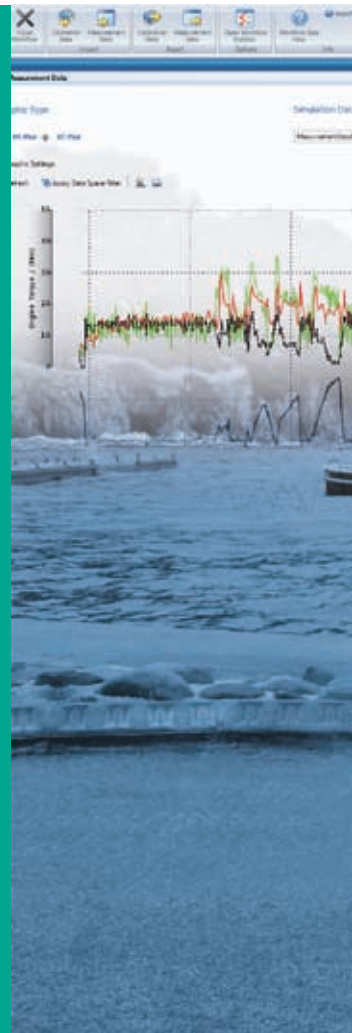


MOBILE INDIZIERMESSTECHNIK UND OFFLINE-KALIBRIERUNG AN VERBRENNUNGSMOTOREN

Auf einer mehr als 11.000 km umfassenden Rundreise in 18 Tagen – von Graz bis zum Nordkap und zurück – wurde das Indiziermessgerät IndiMicro von AVL im Sommer 2009 intensiv getestet. Nach diesem Härteeinsatz folgten in Kooperation mit dem italienischen Motorradhersteller Aprilia weitere Roadtests. Für diese Tests wurde das IndiMicro in Kombination mit dem Kalibrierwerkzeug AVL Fox eingesetzt, das eine effiziente Offline-Kalibrierung von Motorsteuergeräten ermöglicht.



OPTIMIERUNG VON STEUERGERÄTEN

Die elektronischen Steuergeräte von Verbrennungsmotoren und Antriebstrangkomponenten verfügen heutzutage über eine Vielzahl von Eingriffsmöglichkeiten zur Anpassung an die jeweils vorliegenden Fahranforderungen. Um die Entwicklungsziele bei der Bedatung von Motorsteuergeräten in immer kürzeren Zeitintervallen erreichen zu können, bietet es sich an, mobile Datenerfassung und Kalibrierungsmethoden miteinander zu verknüpfen. Die Optimierung von Steuergeräte-Modellen kann dabei in einem iterativen Prozess anhand des realen Motorverhaltens „auf der Straße“ und einer anschließenden Modellanpassung erfolgen. Um diesen Vorgang möglichst effizient zu gestalten, ist der Einsatz von Kalibrierwerkzeugen wie zum beispielsweise AVL Fox (function opti-

mization XCU) sinnvoll, die eine Simulation der ECU(engine control unit)-Funktionsmodelle in Abhängigkeit der Eingangsgrößen ermöglichen. Zunächst sind die verfügbaren Messdaten der Fahrzeugversuche geeignet aufzubereiten, um danach die ECU-Kennfelder offline mit Datensätzen ausstatten zu können. Durch diese Methodik wird der Kalibrieraufwand am Prüfstand oder für Versuchsfahrten deutlich vermindert

Im Folgenden wird exemplarisch anhand einer Steuergerätekalibrierung für ein Serienmotorrad dargestellt, wie durch den kombinierten Einsatz mobiler Messtechnik und Kalibrierwerkzeuge eine ECU-Funktionalität zur Drehmomentschätzung des Motors offline verifiziert und kalibriert werden kann. Dieses Beispiel dient zur Erläuterung der grundsätzlichen Vorgehensweise, ist aber auch für weitere Steuergerätekfunktionen anwendbar.

ZIELSETZUNG

Bei der Bedatung von Motorradsteuergeräten werden häufig iterative Prozesse angewendet, in denen der Kalibrieringenieur nach den Testfahrten die Daten im Büro manuell auswertet und dabei häufig allein aufgrund individueller Erfahrungen die neuen Messfahrten plant. Die zeitaufwändigen Messfahrten werden durch diese Vorgehensweise jedoch nicht mit optimaler Effizienz genutzt, und oftmals lassen sich die erzielten Ereignisse nur schwer reproduzieren.

Viele der Steuergerätekfunktionalitäten lassen sich alternativ jedoch offline bedaten, sofern eine ECU-Funktionsumgebung mitsamt den benötigten Messdaten vorhanden ist. Damit können die Ergebnisse einer Messfahrt mehrfach für unterschiedliche Aufgaben und reproduzierbar genutzt werden. Insbesondere



AUTOREN



DR.-ING. KYUNG-MAN HAN
ist Teamleiter für den Bereich Indizierung, Drucksensorik und optische Verbrennungsmesstechnik bei der AVL Deutschland GmbH in Mainz-Kastel.



DIPL.-ING. GIANNI REINAUDO
ist Application Team Leader bei AVL Italia srl in Xxxxxxxx (Italien).



DIPL.-ING. GIANLUCA VITALE
ist Group Product Manager für den Bereich Powertrain Calibration Technologies bei der AVL List GmbH in Graz (Österreich).



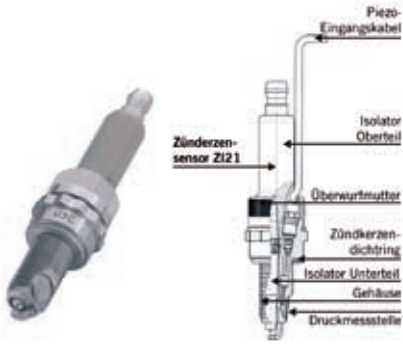
DR.-ING. THOMAS WINSEL
ist Research Manager für den Bereich Powertrain Calibration Technologies bei der AVL List GmbH in Graz (Österreich).

kann der Umfang der auf diese Weise kalibrierbaren ECU-Funktionen deutlich erweitert werden, wenn eine Onboard-Messtechnik zur Verfügung steht: Diese kann Referenzdaten aufzeichnen, die über die übliche ECU-onboard-Sensorik nicht messbar sind. Hierzu zählen zum Beispiel die zylinderindividuellen Druckverläufe des Motors beziehungsweise die daraus abgeleiteten Indizierkenngrößen. Die vorgestellte Methodik erlaubt eine analytische Evaluierung nicht nur von Kalibrierdatenbeständen, sondern auch von Softwarefehlern, die hiermit frühzeitig erkannt und angepasst werden können.

MOBILES INDIZIERGERÄT FÜR DEN FAHRZEUGEINSATZ

Basis der Erfassung thermodynamischer Kenngrößen ist die Zylinderdruckindizierung unmittelbar am Testfahrzeug unter

realen Fahrbedingungen. Gerade für den Einsatz im Fahrzeug werden erhöhte Anforderungen an das Indiziersystem hinsichtlich der Baugröße und Robustheit gestellt. Dies gilt selbstverständlich umso mehr für die Adaption an Motorrädern. AVL hat speziell für den Fahrzeugeinsatz das kompakte 4-Kanal-Indiziergerät Indi-Micro mit integrierten Ladungsverstärkern entwickelt [1]. Die geringen Außenmaße von lediglich einer Höheneinheit und 9,5 Zoll Breite, das niedrige Gewicht von gerade einmal 3 kg sowie Haltebügel und Gewindevorbereitungen bieten vielfältige Installationsmöglichkeiten. An die frontseitigen Eingänge können bis zu vier piezoelektrische Drucksensoren über integrierte Ladungsverstärker direkt angeschlossen werden. Alternativ kann jedem der vier Eingangskanäle über einen parallelen Anschluss anstelle des piezoelektrischen Drucksensors ein beliebiges Span-



1 Messzündkerze Z121 (links), Installation des IndiMicro im Topcase (rechts)



nungssignal im Bereich $\pm 10\text{ V}$ zugeführt werden. Die Messwerte werden mit einer Amplitudenaufösung von 16 bit und einer Messfrequenz von 1 MHz abgetastet.

Der Winkelbezug wird bereits während der Indiziermessung zum Beispiel über das Kurbelwinkelsignal der ECU hergestellt, das in der Regel über einen standardmäßig verbauten Hall- oder Induktivsensor erfasst wird. Über einen Signalaufbereitungsadapter können zusätzlich zum Kurbelwinkelsignal bis zu fünf Stromzangen für die Erfassung und Echtzeitauswertung von Einspritz- und Zündsignalen angeschlossen werden. Ein separater Winkel aufnehmen wird bei Verwendung von ECU-Winkelmarken nicht benötigt. Die Konvertierung der zeitbasierten Druckdaten auf eine Kurbelwinkelbasis erfolgt im IndiMicro über spezielle Prozessorkerne, die in ein FPGA (Field Programmable Gate Array) eingebettet sind. Für die Berechnung von Indizierkennwerten auf der Hardware (zum Beispiel 50%-Umsatzpunkt, indizierter Mitteldruck) sorgt ein zusätzlicher Signalprozessor, der darüber hinaus auch einen integrierten CAN-Bus verwaltet und die berechneten Kennwerte auf diesem in Echtzeit ausgibt. Über die eingebaute Gigabit-Ethernet-Schnittstelle können kontinuierliche Echtzeitdatenströme der Druckverläufe auf die Festplatte eines angeschlossenen Rechners realisiert werden. Dies erlaubt unter anderem sehr lange Messzeiten; eine Limitierung ist im Prinzip nur durch die Kapazität der Festplatte gegeben.

Für indiziernahe Applikationsaufgaben wurde für die weit verbreitete Software Inca der Etas GmbH eine Verbindungsmöglichkeit zur OHI (Open Hardware

Interface) entwickelt, um die Kommunikation zwischen Inca und der Indiziersoftware AVL IndiCom Mobile sicherzustellen. IndiCom Mobile wird in diesem Fall als eigenständiges Device in die Softwareoberfläche von Inca eingebunden. Indiziermessungen können auf diese Weise zeitsynchron zu Inca-Messungen vollautomatisch über die Applikationssoftware gesteuert werden. Applikationsingenieure erhalten somit die Möglichkeit, wichtige Kennwerte zur Verbrennungsgüte ohne zusätzlichen Bedienungsaufwand mit aufzeichnen zu können.

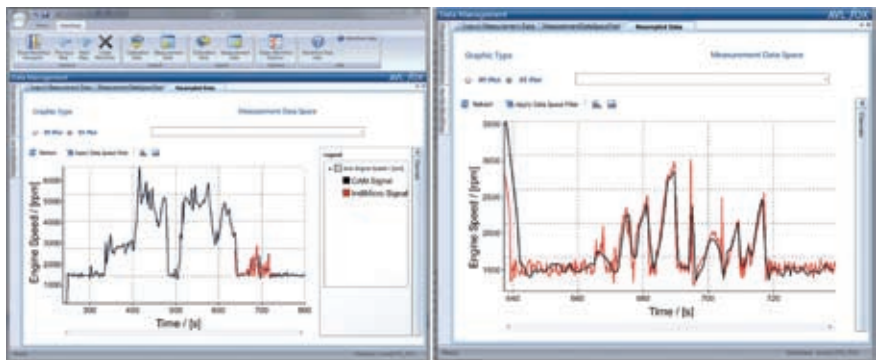
SOFTWARETOOLS FÜR DIE OFFLINE-KALIBRIERUNG

Die Auswertung von Prüfstands- beziehungsweise Fahrversuchsdaten und die anschließende Ermittlung optimaler Steuergeräteparameter (Kennfelder, Kennlinien, Kennwerte) gehören zu den zeitintensivsten Arbeitsschritten bei der Motor kalibrierung. In der Regel werden dabei langwierige Prüfungen bezüglich der

Datenplausibilität sowie diverse Umrechnungsschritte erforderlich. Voraussetzung hierfür ist eine vertiefte Kenntnis der Steuergerätesoftware. Aufgrund der sehr spezifischen Anforderungen, die sich aus den jeweiligen Aufgabenstellungen ergeben, werden auf Kundenseite oftmals selbst geschriebene Makros und Softwaretools eingesetzt. Solche Eigenentwicklungen bergen allerdings ab einem gewissen Komplexitätsgrad mehrere Risiken:

- : inkonsistente Gesamtwerkzeugkette
- : parallel laufende und unkoordinierte Entwicklung von Kalibrierwerkzeugen
- : Wartungsprobleme und mögliche Verschlechterung der Datenstandqualität
- : weder standardisierte noch zentral verwaltete Werkzeugumgebung.

Vor dem Hintergrund der geforderten Datenqualität in SOP (standard operating procedure)-Projekten stehen viele Antriebsstranghersteller vor folgendem Dilemma: Einerseits sind bei Weiterverwendung der Eigenlösungen die genannten Risiken zu tragen, andererseits bieten kommerziell erwerbbar Produkte nicht immer die erforderliche Flexibilität. Um diesem Dilemma zu begegnen hat AVL ein Software Framework entwickelt (OCF – offline calibration framework), das eine schnelle, flexible und professionelle Umsetzung von Kalibrierwerkzeugen erlaubt. Dieses Framework, auf dem auch AVL Fox basiert, beinhaltet Standardkomponenten, die grundsätzlich bei jedem Tool benötigt werden, zum Beispiel Makros für den Datenimport etc. Die Standardkomponenten können zusammen mit kundenspezifischen Skripten verwendet werden, um eine schnelle Umsetzung der Kalibrierprozedur zu erreichen.



2 Zeit- und winkeläquidistante Auto-Synchronisation zwischen CAN-Signalen vom Steuergerät und den Indiziermessdaten; Überprüfung in hoher Zoom-Auösung (rechts)

TESTPROZEDUR UND KALIBRIERUNGSMETHODE

Beim Testfahrzeug handelt es sich um eine Aprilia Shiver mit wassergekühltem 90°-V2-Ottomotor mit Vierventil- und DOHC-Technik. Die Erfassung des Brennraumdrucks erfolgte an beiden Zylindern mit Hilfe von speziellen Messzündkerzen vom Typ AVL ZI21 mit integrierten piezoelektrischen Brennraumdrucksensoren. Die Messzündkerzen wurden in ihren Eigenschaften an die der Serienkerze angepasst. Das IndiMicro konnte dank seines kleinen Formfaktors und geringen Gewichts im Deckel des Topcase untergebracht werden. Auf dem Gehäuse des Indiziergerätes wurden darüber hinaus ein CAN-Datenlogger sowie ein GPS-Empfänger installiert. In ❶ sind die Messzündkerze sowie das Setup des Indiziergerätes dargestellt.

Das IndiMicro enthält einen digitalen Speicherchip für Software und Betriebsparameter. Dadurch konnte es während des hier vorgestellten Projekts als autarke

Stand-alone-Einheit ohne PC betrieben werden. Dazu wurde das Gerät vor der Testfahrt entsprechend vorparametriert, so dass bei laufendem Motor zu jeder Zeit kontinuierlich Indizierkennwerte aus den beiden Brennräumen synchron zu ECU-Kenngrößen aufgezeichnet werden konnten. Sämtliche Daten wurden bei jedem Motorbetrieb über den CAN-Bus auf den Datenlogger geschrieben.

Für die offline durchgeführte Kalibrierung der ECU-Funktion „Drehmomentnachbildung“ wurde ein mit dem Kalibrierwerkzeug AVL Fox erstellter Workflow verwendet. Aus Gründen der Vertraulichkeit bezüglich der Kundendaten wird hier nicht die tatsächlich im Steuergerät implementierte ECU-Funktion, sondern ein Beispiel der AVL gezeigt. Nachfolgend werden die umgesetzten Arbeitsschritte zur Kalibrierung erläutert. Als Ausgangsseite Referenzgröße dienten die indizierten Mitteldrücke, die mit dem IndiMicro im Langzeitversuch aufgezeichnet wurden. Als wesentliche Eingangsgrößen fungierten die

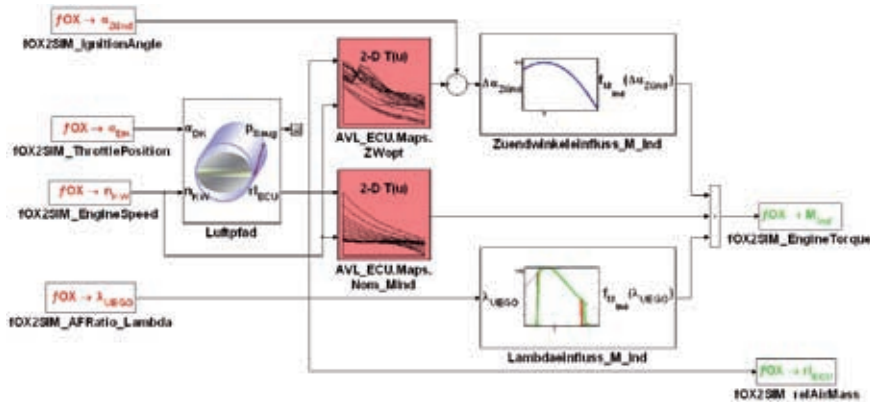
Ein- und Ausgangssignale des Motorsteuergerätes, die als zeitäquidistante Signale vom CAN-Bus aufgezeichnet wurden.

Aufgrund der unterschiedlichen Abtastraten (zyklusbasierte Indizierkennwerte, ECU-Zeitraster) war es zunächst erforderlich, alle Daten auf eine einheitliche Abtastzeitbasis zu synchronisieren. Für diese Aufgabe wurde die automatische Messdatenimportfunktion im Kalibrierwerkzeug verwendet, ❷. Insbesondere bei Offline-Standardaufgaben mit unterschiedlichem Messbeginn und -dauer hat sich diese Art der Zusatzunterstützung als hilfreich erwiesen. Als Synchronisationssignal wurde die Motordrehzahl zugrunde gelegt, deren Verlauf jeweils in beiden Datensätzen enthalten war. Sämtliche Kanäle beider Datensätze konnten so auf ein einheitliches, zeitlich äquidistantes Raster interpoliert werden.

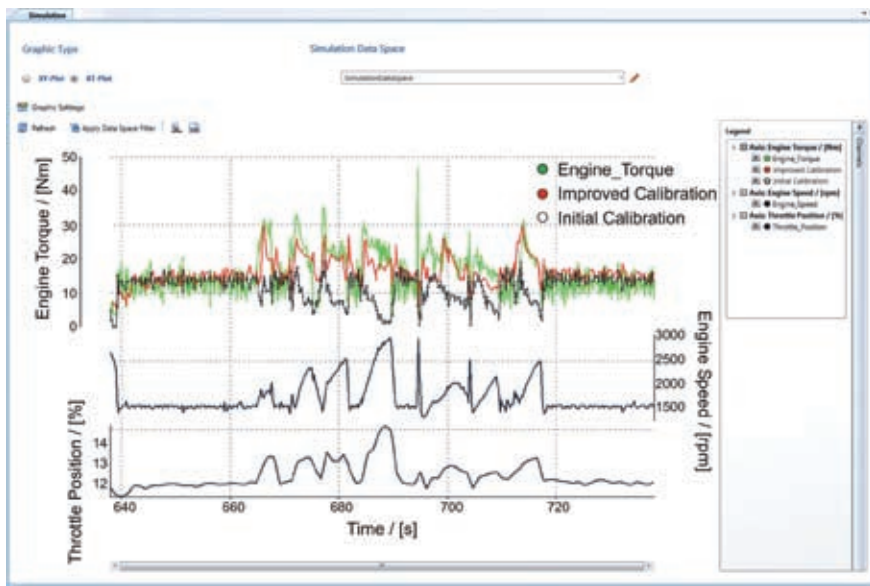
Im nächsten Schritt wurden die notwendigen Sollverläufe des Drehmomentes aus den indizierten Mitteldrücken mit Hilfe einer integrierten Formelfunktionalität



**Bild 3 bitte neuanfordern.
Zu geringe Auflösung. Am besten
Original Datei (Powerpoint?)**



3 Typische Struktur zur ECU-internen Drehmomentberechnung; die Ausstattung mit Datensätzen erfolgte offline



4 Offline-Kalibrierergebnis für eine Sequenz der Langzeit-Indizierung im unteren Teillast-Bereich

berechnet. Anhand dieser Referenz und basierend auf der in 3 dargestellten ECU-Struktur wurde die eigentliche Kalibrieraufgabe durchgeführt. Die ECU-Funktion „Drehmomentnachbildung“ kann beispielsweise als Simulink-Modell unter Matlab erstellt, mittels RT-Workshop kompiliert und von der Entwicklungsumgebung AVL Fox zur Parametrierung verwendet werden. Im Wesentlichen wurden hierbei die Steuergerätekenfelder (AVL_ECU.Maps) so ermittelt, dass bei Anlegen der Eingangsfolgen (unter anderem Drehzahl und Drosselklappenposition) die Ausgangsgröße Drehmoment möglichst gut mit der Referenz übereinstimmt. Die unmittelbaren ein- und ausgangsseitigen Sollwerte des Kennfeldes AVL_ECU.Maps.Nom_Mind wurden durch inverse Simulation bei postulierten

Komponenten zum Zündwinkel- und Lambdaeinfluss ermittelt.

In 4 ist das Kalibrierergebnis anhand eines exemplarischen Ausschnitts aus der Langzeiterfassung der indizierten Mitteldrücke beziehungsweise hieraus abgeleiteter Drehmomentwerte dargestellt. Diese gemessenen Referenzen sind im oberen Verlauf als grüne Kurve zu sehen. Ferner sind die mit der ECU-Struktur „Drehmomentnachbildung“ ermittelten Ausgaben dargestellt. Der schwarze Kurvenverlauf stellt die Ausgangssituation bei initialer Parametrierung dar, der rote Kurvenzug repräsentiert für diese Sequenz das Ergebnis der globalen Kalibrierung. In den unteren Diagrammen sind die Verläufe der maßgeblich anregenden ECU-Signale „Drehzahl“ und „Drosselklappenposition“ dargestellt.

FAZIT

Kalibrations- und Applikationsingenieuren steht mit dem IndiMicro von AVL ein leistungsfähiges Indiziergerät zur Verfügung, das durch seine unkomplizierte Installation und einfache Handhabung besticht. Verbrennungsrelevante Kennwerte können direkt und ohne großen Mehraufwand in den Kalibrierprozess mit einfließen. In Kombination mit Softwaretools wie dem Kalibrierwerkzeug AVL Fox (function optimization XCU) kann eine deutliche Effizienzsteigerung des Kalibrierprozesses erreicht werden.

Optimierungsschleifen sowie Änderungen an der ECU(engine control unit)-Software können auf Basis der vorhandenen Messdaten im Büro erfolgen, ohne dass zusätzliche Messfahrten erforderlich werden. Das Beispiel dient zur Erläuterung des generellen Kalibrierverfahrens und ist prinzipiell auf eine Vielzahl weiterer Funktionen ausdehnbar, zum Beispiel auf Zündaussetzererkennung, Motormodelle und sämtliche Überwachungsfunktionen der Onboard-Diagnostik.

LITERATURHINWEISE

[1] Gildemeister, S.; Hacker, G.; Moik, J.; Teichmann, R.: AVL IndiMicro – klein, flexibel, leistungsstark – getestet von Anfang an. In: ATZ Elektronik, Nr. 04, 2010
 [2] Martini, E.; Achten, J.; Keuth, N; Pfluegl, H; Wellers, M.: Von der Idee zum Produkt: Das Smart Calibration Konzept von AVL. 3. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, 2009
 [3] Hoetzendorfer, H.; Roeck, S.; Keuth, N.; Rajan, H. R.; Kelly, J.; Pfluegl, H.; Winsel, T.: Industrialization of Base Calibration Methods for ECU-Functions exemplary for Air Charge Determination. SAE-Paper, No. 2010-01-0331, World Congress & Exhibition, Detroit, USA, 2010
 [4] www.avl.com/roadtest

DANKE

Die Autoren danken Dr. Rinaldo Marengo für die Initiierung und Organisation des Projekts sowie für die standortübergreifende Koordination der Autorenbeiträge. Dr. Marengo ist Regional Business Unit Manager für den Bereich Measurement and Instrumentation bei AVL Europe, Wiesbaden. Des Weiteren gilt der Dank Marcello Fiaccavento, Piaggio & C., S.P.A., für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts.

