

# Elektrohydraulische Ventilsteuerung mit dem „MultiAir“-Verfahren

Im letzten Jahrzehnt bedeutete die neue Common-Rail-Einspritzung (Speichereinspritzung) für Dieselmotoren einen Durchbruch auf dem Pkw-Markt. Um den Ottomotor zukunftsfest zu machen, entschied sich die Fiat-Gruppe für die gleiche Herangehensweise: Das Unternehmen bringt in diesen Wochen eine elektrohydraulische Ventilsteuerung namens „MultiAir“ in Serie. Diese Technologie verschafft Fiat-Fahrern einen erheblichen Vorteil in Sachen Kraftstoffverbrauch. Gleichzeitig geht der Spaß am Fahren nicht verloren, und die typischen Komfortparameter des Ottomotors bleiben erhalten.

## 1 Einleitung

Soll der Ottomotor Marktanteile zurückerobern, muss man sich darauf konzentrieren, einen technologischen Durchbruch zu erzielen, der Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch ermöglicht. Dabei soll der bessere Fahrkomfort im Vergleich zu modernen Dieselmotoren gleicher Bauart erhalten bleiben. Selbstverständlich müssen zukünftige Abgasvorschriften eingehalten werden. Entstehen durch eine neue Technik zusätzliche Kosten, so dürfen diese die Aufwendungen für die Schadstoffnachbehandlung bei Dieselmotoren nicht übersteigen. Außerdem muss die Möglichkeit, CO<sub>2</sub>-arme Kraftstoffe, beispielsweise auf Gasbasis, zu verbrennen, verbessert werden.

Die Schlüsselparameter für die Verbrennung im Ottomotor und damit von Wirkungsgrad, Schadstoffausstoß und Kraftstoffverbrauch sind Quantität und Charakteristika der Frischluftladung im Motorzylinder. Bei herkömmlichen Ottomotoren verschwendet die für die Luftansaugung verantwortliche Drosselklappensteuerung zirka 10 % der eingespeisten Energie, da Luft vom niedrigen Ansaugdruck auf den höheren atmosphärischen Abgasdruck gepumpt werden muss.

Ein fundamentaler Durchbruch in der Luftmengensteuerung kann nur auf einer Luftladungsüberwachung an den Zylindereinlässen beruhen. Dazu wird eine moderne elektronische Einlassventilsteuerung unter Beibehaltung eines

konstanten stromaufwärts steigenden Drucks benötigt.

## 2 Elektronische Ventilsteuerverfahren

Bei der Ventilsteuerung verfolgten Motorenhersteller und Forschungsinstitute in den letzten Jahren unterschiedliche Ansätze, **Bild 1**.

Anfangs konzentrierten sich Untersuchungen auf die elektromagnetische Ventilbetätigung, da diese theoretisch den Vorteil maximaler Flexibilität und dynamischen Ansprechverhaltens bietet. Trotz erheblicher Forschungsbemühungen konnten die wesentlichen Nachteile, vor allem hinsichtlich der Energieabnahme, aber nicht beseitigt werden.

Die meisten Motorenhersteller griffen auf die Weiterentwicklung einfacherer, robuster und bewährter elektromechanischer Konzepte zurück. Diese beruhen darauf, dass der Ventilhub mit speziellen Mechanismen und Nockenwellenverstellungssystemen (Phasenwandlern) verstellbar wird. Solche Systeme erlauben die gleichzeitige Steuerung von Ventilhub und Phase. Hauptnachteile sind niedrige Flexibilität und langsames dynamisches Ansprechverhalten. Außerdem besteht keine Möglichkeit, zylinderselektive Aktionen durchzuführen.

Mitte der 90er Jahre begann die Fiat-Gruppe, ihre Bemühungen auf eine elektrohydraulische Ventilbetätigung [1] zu konzentrieren und nutzte das durch die

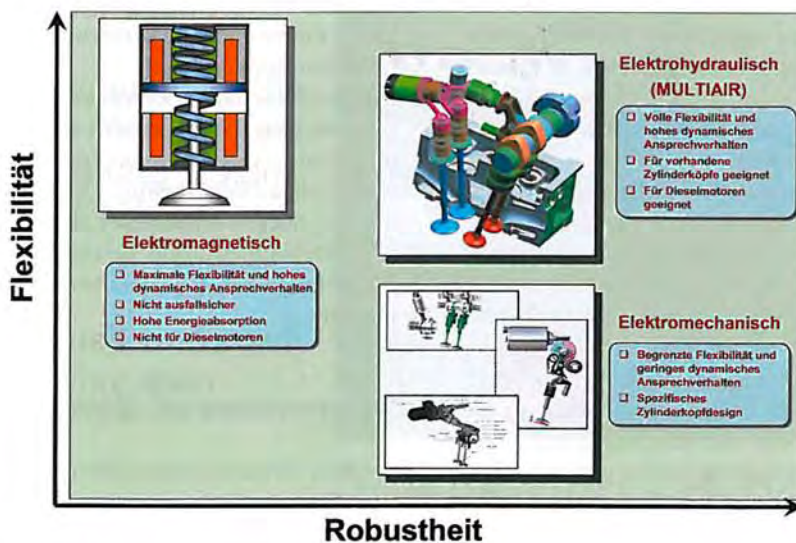


Bild 1: Vergleich verschiedener Ventilsteuerungsverfahren

## Die Autoren



**Dr. Lucio Bernard** ist Leiter Dieselmotorenforschung bei Fiat Powertrain Technologies – Research and Technology in Orbassano (Italien).



**Dr.-Ing. Andrea Ferrari** ist Leiter Experimentelle Motorenentwicklung bei Fiat Powertrain Technologies – Research and Technology in Orbassano (Italien).



**Dr.-Ing. Damiano Micelli** ist Leiter Maschinenbau und Verbrennungsmotorenforschung bei Fiat Powertrain Technologies – Research and Technology in Orbassano (Italien).



**Dr.-Ing. Aldo Perotto** ist Leiter Elektronische Steuersysteme bei Fiat Powertrain Technologies – Research and Technology in Orbassano (Italien).



**Dr. Rinaldo Rinolfi** ist Vizepräsident Research and Technology bei Fiat Powertrain Technologies in Orbassano (Italien).



**Dr. Francesco Vattaneo** ist Leiter Motorenentwicklung bei Fiat Powertrain Technologies – Research and Technology in Orbassano (Italien).

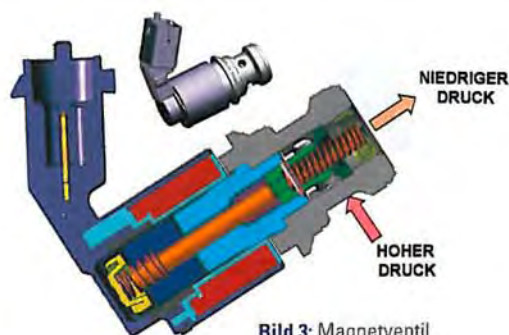
Common-Rail-Einspritzung erlangte Know-how. Wegen ihrer Einfachheit, des niedrigen Energiebedarfs, der Ausfallsicherheit und den Kostenvorteilen entschied sich Fiat für eine ventilelektive elektrohydraulische Steuerung.

### 3 Das Fiat MultiAir-System

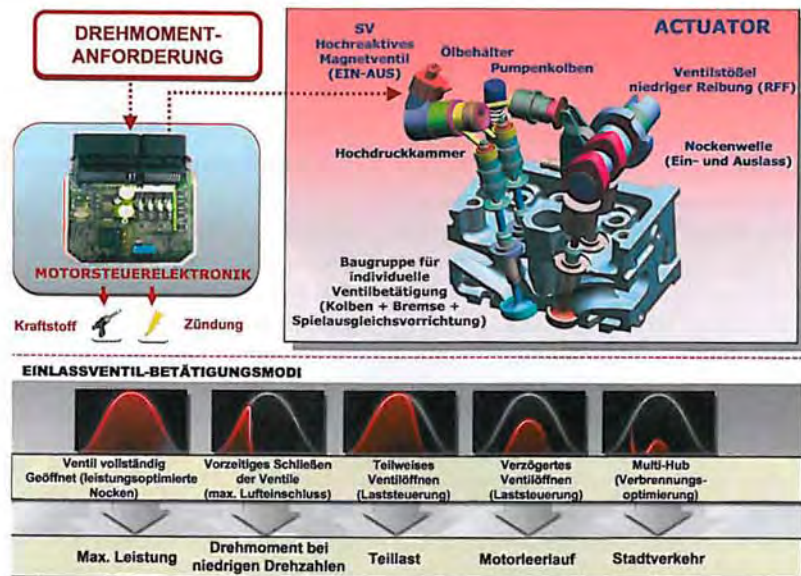
Das Funktionsprinzip von MultiAir zeigt **Bild 2**: Ein von einem mechanischen Einlassnocken bewegter Kolben ist über eine Hydraulikkammer mit dem Einlassventil verbunden. Die Steuerung erfolgt über ein in Ruhestellung offenes Magnetventil.

Bei geschlossenem Magnetventil verhält sich das Öl in der Hydraulikkammer wie ein fester Körper und überträgt die vom mechanischen Einlassnocken ausgeübte Hubkraft an die Einlassventile. Bei offenem Magnetventil werden Hydraulikkammer und Einlassventile entkoppelt, das heißt der vom Einlassnocken ausgeübte Hub wird nicht mehr an die Einlassventile übertragen. Die Ventile schließen dann aufgrund der Ventildruckkraftwirkung. Eine Ölkammer im Niederdruckteil des Ölkreislaufs hilft beim Wiederauffüllen der Hochdruckkammer für den nächsten Takt; dies minimiert Energieverluste. Der letzte Teil des Ventilschließtakts wird von einer speziellen Hydraulikbremse gesteuert, um unter allen Betriebsbedingungen des Motors eine problemlose und reguläre Abschlussphase zu gewährleisten.

Zeitgesteuertes Schließen und Öffnen des Magnetventils ermöglicht auf einfache Weise viele Programme zur Einlassventilöffnung [2]. Um die maximale Leistung zu erzielen, bleibt das Magnetventil geschlossen. Ein vollständiges Öffnen der Einlassventile wird erreicht, indem diese der Nockenbewegung vollständig folgen.



**Bild 3:** Magnetventil



**Bild 2:** Funktionsprinzip des MultiAir-Systems

Damit wird speziell bei hohen Drehzahlen eine maximale Leistung erzielt.

Um das Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen zu erhöhen, wird das Magnetventil kurz vor Ende des Nockenprofils geöffnet, was zu einem vorzeitigen Schließen der Einlassventile führt. Dies verhindert einen unerwünschten Frischluft-Rückfluss in das Ansaugrohr und maximiert die in den Zylindern eingeschlossene Luftmenge. Wenn der Motor nur auf Teillast läuft, wird das Magnetventil früher geöffnet. Dann öffnen die Einlassventile nur teilweise, sodass die eingeschlossene Luftmenge als Funktion des erforderlichen Drehmoments gesteuert werden kann. Alternativ dazu können die Einlassventile teilweise geöffnet werden, indem das Magnetventil bei Beginn der Nockenbewegung geschlossen wird. In diesem Fall strömt Luft schneller in den Zylinder, was eine höhere Luftturbulenz im Brennraum zur Folge hat.

Die letzten beiden Betätigungsmodi können im gleichen Einlasstakt zusammengefasst werden, sodass ein sogenannter „Mehrhubmodus“ entsteht, der bei sehr niedrigen Lasten Turbulenz und Brennrate erhöht.

Das MultiAir-System wurde mit spezifischen Richtlinien entwickelt, damit funktionelle Anforderungen und branchenübliche Vorgaben bei geringsten Kosten erfüllt werden. Großer Wert wurde auf Bauraumoptimierung, Gewichtsminimierung, Reibung, Auswirkungen auf

den Zylinderkopf und die Verwendung herkömmlichen Motorenöls gelegt.

Um in allen stationären und transienten Motorzuständen ein optimales Luft-Kraftstoff-Verhältnis zu gewährleisten, wurden für die optimale Konfiguration des Luftansaugsystems mehrere Anforderungen berücksichtigt:

- vollständige Steuerbarkeit im gesamten Drehzahlbereich (200 bis 7000/min)
- Funktionsfähigkeit auch bei widrigen Betriebsbedingungen (Öltemperaturbereich von -30 bis 150 °C)
- hochpräzise Steuerung der im Zylinder eingeschlossenen Luftmenge
- geringe Streuung bei takt- und zylinderweisen Schwankungen
- schnelles dynamisches Ansprechverhalten für die optimale Luftsteuerung bei Zustandsübergängen
- flexible Steuerung verschiedener Baugruppen, deren Verhalten sich auf die im Zylinder eingeschlossene Luft auswirkt (Abgasrückführung, Turbolader, VVT-Nockenwellensteuerung...)
- Softwarekompensation bestimmter Umwelteinflüsse (Höhe über NN, Temperatur, ...)

### 4 Systementwicklung und -optimierung

Damit diese Ziele auf optimale Weise und in der kürzesten Zeit erreicht werden konnten, erarbeitete Fiat eine Methodik, bei der Versuchsergebnisse in die Analy-

se und Berechnung mit geeigneten Modellen integriert wurden.

#### 4.1 Energieverbrauch des Systems

Mit systemanalytischen Mitteln wurden mehrere Lösungen zur Energieverbrauchsminimierung untersucht und implementiert, wobei man mechanische, hydraulische und elektrische Aspekte berücksichtigte. Insbesondere minimierten die Entwickler Energieverluste in der stationären Phase durch Optimierung der beweglichen Massen/Federkräfte beim Einlassventil-Bewegungsablauf und durch Anpassen der Rollenschlepphebel. Weiterhin wurde auch der elektrische Energieverbrauch optimiert. Gegenwärtig bewegt sich der Gesamtmaximalwert bei Vierzylindermotoren (einschließlich Magnetventilbetätigung und Steuerelektronik) bei Vollast zwischen 40 und 70 W; die Durchschnittswerte im normalen Fahrbetrieb liegen bei 20 bis 30 W.

#### 4.2 Präzision und Robustheit der Luftzirkulation

Um das Steuermoduldesign zu optimieren und geeignete Kompensationsstrategien

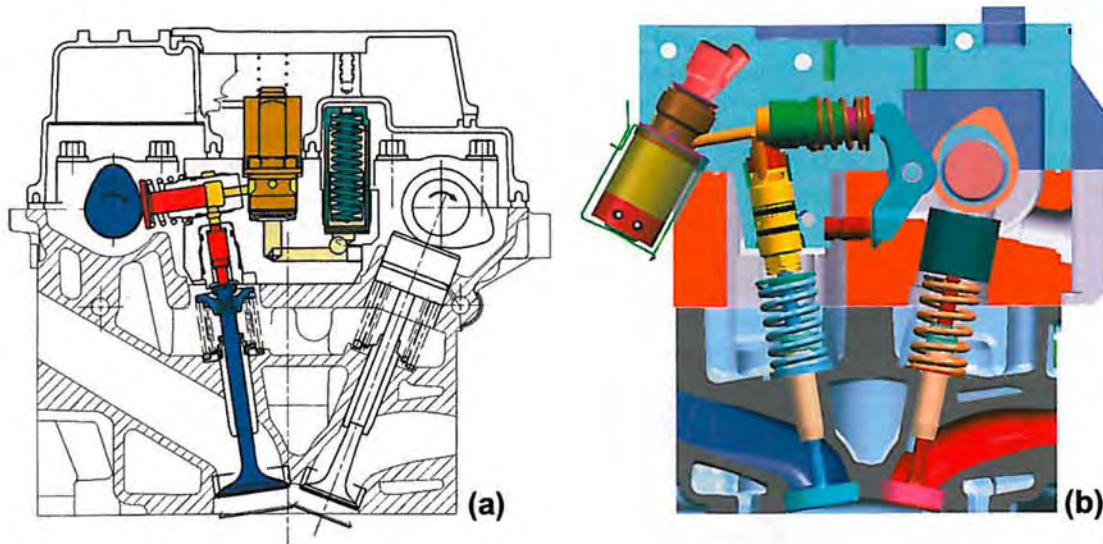
für die Motorsterelektronik zu finden, wurden Schwankungen in der Ventilbewegung bei unterschiedlichen Stellgliedern, taktweise Wiederholbarkeit und langfristige Stabilität in der Laufzeit berücksichtigt. Die Präzision eines Luftsteuersystems hängt von der Konstruktion der gesamten Betätigungskette ab. Das Hauptaugenmerk legten die Fiat-Ingenieure auf die Entwicklung des Magnetventils, **Bild 3**, da es für die Systemsteuerung eine wichtige Rolle spielt. Die auf einer selbstzentrierenden Ventilkegelarchitektur beruhende Konstruktion wurde zur Verbesserung der Durchlässigkeit und Schaltzeit angepasst. Darüber hinaus optimierte man Form, Abmessungen und Abstände interner Baugruppen, um auch bei Öl hoher Viskosität einen sicheren und präzisen Betrieb zu gewährleisten, sodass das Luftsteuersystem gut arbeitet und Kaltstarts bei bis zu -30 °C gewährleistet.

Außerdem wurde auch die Dauerfestigkeit des Magnetventils eingehend untersucht. Durch die Auslegung und die Verwendung hochwertiger Materialien konnte der Zielwert von 300 Millionen Takten erreicht werden.

Dauerfestigkeit und -stabilität wurden durch umfangreiche Tests des gesamten Steuermoduls auf automatisierten Prüfständen sichergestellt. Um die kritischsten Betriebsbedingungen für das Multi-Air-Ventilsteuermodul zu reproduzieren, kamen spezifische Drehzahl/Lastzyklusprofile zum Einsatz. Nach einem 600-Stunden-Test waren nur geringe Abweichungen feststellbar. Strategien zur Langzeitkompensation, die neben dem standardmäßig verwendeten Lambda-Sensor auf einer aktuellen Magnetventilanalyse beruhen, sind ohnehin Teil der Motorsterelektronik und verhindern eine Verschlechterung des Motorenverhaltens, wenn Öl und Baugruppen altern.

#### 4.3 Empfindlichkeit gegenüber Ölviskositäten

Temperaturabhängige Ölviskositätsschwankungen wirken sich hauptsächlich auf das Ventilhubprofil, insbesondere auf den Maximalhub und die Hubdauer sowie die Ventilschließgeschwindigkeit, aus. Eine spezielle Hydraulikflüssigkeit oder den Einsatz von Hubsensoren schloss Fiat wegen höherer Komplexität



**Bild 4:** Zylinderkopfarchitektur: a) zeigt ein Entwurfsstadium, b) die seriennahe Lösung

und Kosten von Anfang an aus. Physikalische Gesetze wurden in einen modellbasierten Steueralgorithmus der Motorsteuerelektronik integriert, der den für die Magnetventil deaktivierung erforderlichen Kurbelwinkel korrigiert. Dieser Algorithmus nutzt die Messwerte eines direkt in das Ventilsteuermodul integrierten Öltemperatursensors.

#### 4.4 Architektur des Zylinderkopfs und des Ventilsteuermoduls

In der Entwicklungsphase wurde der Raumbedarf des MultiAir-Moduls verbessert, um dessen Auswirkungen auf den Zylinderkopf zu minimieren. Der erste Schritt zielte auf die Vereinfachung der Zylinderkopfarchitektur ab, **Bild 4**. Statt einer Konfiguration mit zwei Nockenwellen entschied sich Fiat für eine Konfigura-

tion mit einer Nockenwelle. Jedes Einlassventil wird über das MultiAir-Modul durch einen zusätzlichen, auf der Auslassnockenwelle sitzenden Nocken gesteuert. Die Reduzierung der Nockenwellenlagerung trug zu einer geringeren Reibung bei.

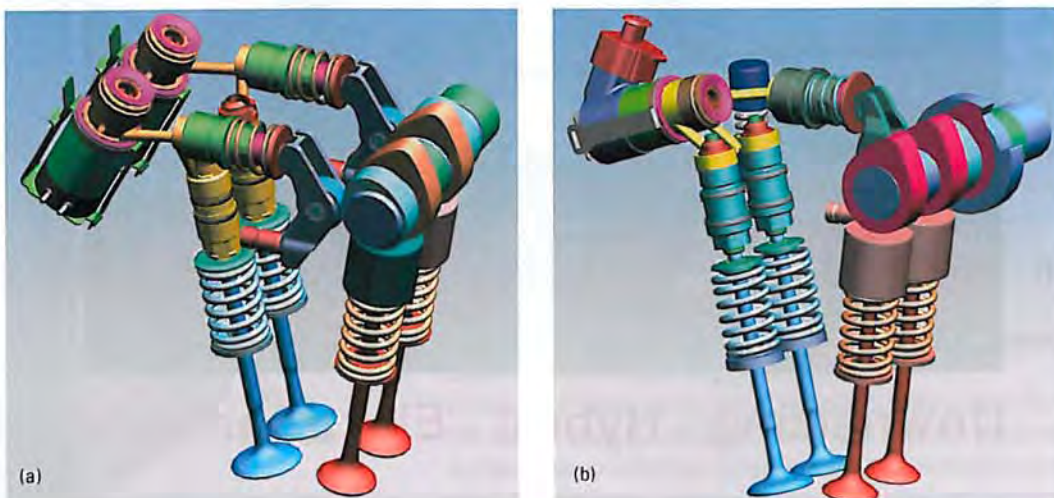
Im zweiten Schritt, dessen Ziel eine weitere Systemkostenreduzierung war, testeten wir ein vereinfachtes Stellglied, **Bild 5**. Die Grundarchitektur mit einem, nur ein Einlassventil ansteuerndem Magnetventil bot zwar eine maximale Flexibilität bei der Ventilsteuerung, war jedoch auch komplexer und teurer. Bild 5 zeigt rechts die neue Architektur: beide Einlassventile jedes Zylinders sind über die gleiche Ölkammer mit einem Pumpenkolben verbunden.

Mit dieser Architektur ließ sich die Anzahl der Magnetventile, Pumpenkolben,

Rollenschlepphebel und Einlassventilnocken halbieren. Die erforderliche Flexibilität bei der Einlassventilsteuerung wurde aber mit der Einführung der neuen Ventilsteuerstrategie (Multilift) beibehalten.

#### 4.5 Vorbereitung des Ventilsteuermoduls für die Massenproduktion

Nach Abschluss der Konzeptvalidierung unterzeichnete die Fiat Gruppe mit INA Schaeffler eine Partnerschafts- und Lizenzierungsvereinbarung zur Produktion des MultiAir-Moduls. Die aktuelle Lösung umfasst ein integriertes Modul mit allen wichtigen hydraulischen Baugruppen. Da die Komponentenstandardisierung für Kostenreduzierungen eine wichtige Rolle spielt, sind die teureren Hauptbaugruppen (Hydraulikkolben, Bremse, Magnetventil) für verschiedene Motoren



**Bild 5:** Vereinfachte Architektur des Ventilsteuermoduls

einheitlich, während das Layout je nach der spezifischen Zylinderkopfstruktur eines Motors anzupassen ist.

## 5 Steuerelektronik

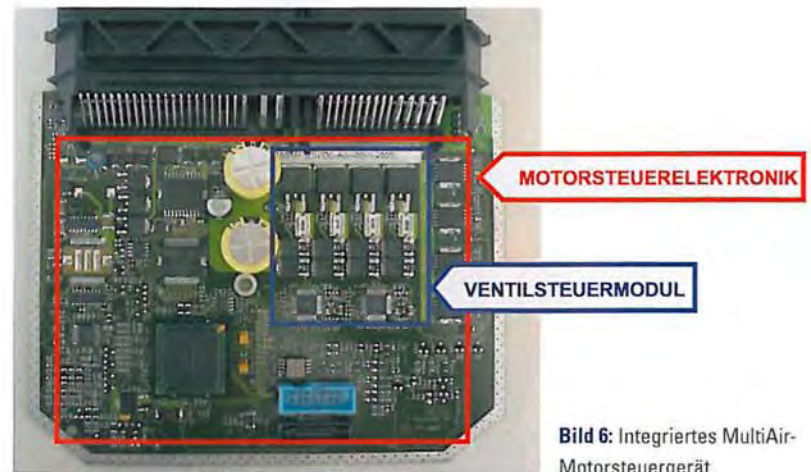
Damit das volle Systempotenzial ausgenutzt werden kann, wurde eine moderne und integrierte Motorsterelektronik entwickelt. Das MultiAir-Modul mit ASICs, Leistungsstufen und spezifischen Softwaremodulen ist im Motorsteuergerät enthalten. Die Standardsoftware zur Motorsteuerung integriert die komplexen Strategien zur Luftansaugung und Verbrennungssteuerung in die MultiAir-Technologie. Die Integration in einem einzigen Motorsteuergerät, **Bild 6**, führt zu wichtigen Vorteilen für die Massenproduktion des Systems und verbessert die Systemfunktionalität und Robustheit, was zu einer Gesamtkostenverringerung führt.

## 6 Einsatz von MultiAir in Fiat-Motoren

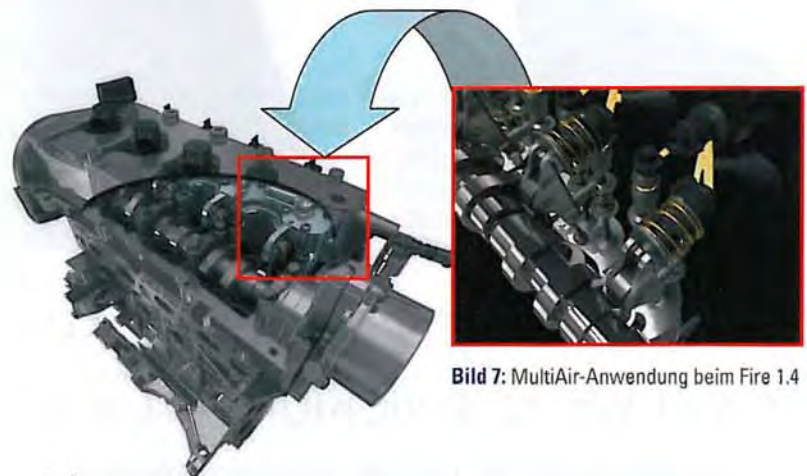
Die MultiAir-Technologie kommt erstmals im „Fire“-Vierventilmotor mit 1,4 l Hubraum zum Einsatz, **Bild 7**. Es werden sowohl freisaugende Motoren sowie Aggregate mit Turbolader ausgerüstet. Dabei kamen zwei verschiedene Turboladermodi zum Einsatz, damit Kraftstoffverbrauchs und Drehmomentverlauf parallel optimiert werden können.

Der 1,4-l-Motor stellt für Fiat Powertrain Technologies (FPT) eine sehr wichtige Ottomotor-Baureihe dar. Er ist häufig in Pkw der Segmente A, B und C, dem gegenwärtig wichtigsten Fahrzeugsegment der Fiat-Gruppe, anzutreffen. Die Implementierung der MultiAir-Technologie erforderte nur minimale Modifikationen. Dank der zweiteiligen Zylinderkopfarchitektur blieb der untere Zylinderkopf unverändert. Um das MultiAir-Ventilsteuermodul zu integrieren, wurde eine neue Nockenwelle entwickelt. FPT beginnt den Industrieinsatz bei Motoren mit Saugrohreinspritzung, die MultiAir-Technologie wird jedoch unter Berücksichtigung eines zukünftigen Einsatzes bei Motoren mit Direkteinspritzung weiterentwickelt werden.

Das zweite Anwendungsfeld der MultiAir-Technik liegt in einem neuen Zweizylindermotor mit 900 cm<sup>3</sup> Hub-



**Bild 6:** Integriertes MultiAir-Motorsteuergerät



**Bild 7:** MultiAir-Anwendung beim Fire 1.4



**Bild 8:** Kennfeldabhängige Ventilsteuermodi

raum für Benzin und komprimiertes Erdgas, dessen Zylinderkopfdesign speziell für die Integration des MultiAir-Ventilsteuermoduls optimiert wurde [3]. Sowohl die elektrohydraulische Architektur des Ventilsteuermoduls und seiner Baugruppen sowie die Hardware und

Software der Motorsterelektronik wurden mit relevanten Synergien aus Vierzylinderanwendungen übernommen. Dieser Motor soll sich – als fundamentaler Schritt in der Downsizing-Strategie von Fiat – für bestimmte Pkw des A-Segments eignen.

**Tabelle:** Vorteile der MultiAir-Technologie für Ottomotoren

<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß/Kraftstoffverbrauch (am Fahrzeug)</b>	Bis zu 25 % Reduzierung für abgerüstete Motoren mit Turbolader, 10 % bei NA/TC mit gleichem Hubraum
<b>Drehmoment bei niedriger Motordrehzahl</b>	15 % höher
<b>Maximales Motordrehmoment</b>	10 % höher
<b>Maximalleistung</b>	10 % höher
<b>Emissionen im NEFZ-Prüfzyklus</b>	60 % Reduzierung bei Stickoxiden (interne Abgasrückführung), 40 % bei Kohlendioxid/Kohlenwasserstoffen
<b>Fahrbarkeit Fahrkomfort</b>	Hohes dynamisches Ansprechverhalten bei Pedalbetätigung, höherer Fahrkomfort, verringerte Turboverzögerungen bei Motoren mit Turbolader

Die Ventilsteuermodi der MultiAir-Technologie wurden entsprechend optimiert, sodass über den gesamten Drehzahl- und Lastbereich des Motors hinweg optimale Effizienz und Leistung gegeben sind. **Bild 8** zeigt eine Übersicht verschiedener Steuermodi.

Die potenziellen Vorteile der MultiAir-Technologie für Benzinmotoren, bei denen dieses Verfahren bisher eingesetzt wurde, können wie folgt zusammengefasst werden, **Tabelle:** Aufgrund eines leistungsorientierten mechanischen Nockenprofils steigt die Maximalleistung um bis zu 10 %. Das Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen erhöht sich durch frühes Schließen der Einlassventile um bis zu 15 %, da die Luftmenge im Brennraum maximiert wird. Die Eliminierung von Pumpverlusten bringt bei freisaugenden wie aufgeladenen Motoren bei gleichem Hubraum eine 10%-ige Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Mit MultiAir-Technologie ausgestattete Motoren mit Turbolader, die im Hubraum entsprechend verringert werde, erzielen im Vergleich zu herkömmlichen freisaugenden Motoren auf dem gleichen Leistungsniveau Kraftstoffeinsparungen von bis zu 25 %. Optimale Ventilsteuerstrategien während des Motorwarmlaufs und eine durch Öffnen der Einlassventile während des Auslasstaktes erreichte interne Abgasrückführung resultie-

ren in einer Emissionsverringerung von 40 % für Kohlenwasserstoffe/Kohlenmonoxid und bis 60 % für Stickoxide. Ein konstanter stromaufwärtiger Druck in Verbindung mit der äußerst schnellen zylinder- und taktweisen Luftmengensteuerung führen zu einem überragenden dynamischen Ansprechverhalten des Motors.

## 7 Potenziale der MultiAir-Technologie

Für künftige Generationen der MultiAir-Technologie sind folgende Entwicklungslinien vorzusehen:

- Applikation der direkten MultiAir-Luftmengensteuerung am Motoren mit direkter Benzineinspritzung und damit weitere Verbesserung von Ansprechverhalten und Kraftstoffverbrauch
- Einführung komplexerer Mehrventil-Öffnungsstrategien zur weiteren Verminderung des Schadstoffausstoßes
- innovativer Motor-Turbolader-Abgleich, um die Luftmenge über eine Kombination aus optimalem Boost-Druck und Ventil-Öffnungsstrategien zu steuern.

Das ursprünglich für Ottomotoren entwickelte MultiAir-Verfahren bietet auch für die Verminderung des Schadstoffausstoßes von Dieselmotoren weit reichende Möglichkeiten. Durch eine interne Abgas-

rückführung wird bei Stickoxiden eine Reduktion von bis zu 30 % erzielt. Optimale Strategien für die Ventilsteuerung während des Kaltstarts und Warmlaufs verringern die Emissionen von Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid um bis zu 40 %. Weitere erhebliche Verminderungen des Ausstoßes werden dank der hochdynamischen Luftmengenflusssteuerung in den Übergangsphasen des Motorbetriebs aus der effizienteren Handhabung und Regeneration des Dieselpartikelfilters und Stickoxid-Speicherkatalysators erreicht.

In Zukunft könnte die Antriebsentwicklung möglicherweise zu einer zunehmenden Vereinheitlichung der Architekturen von Benzin- und Dieselmotoren führen. Somit ist die Konzipierung und Entwicklung eines MultiAir-Motorzylinderkopfs voraussehbar, bei dem beide Verbrennungssysteme ohne Zugeständnisse vollständig appliziert werden können. Darüber hinaus ist das elektrohydraulische Stellglied des MultiAir-Systems (mit einigen geringfügigen Fertigungsunterschieden) unter Umständen in der physikalisch gleichen Baugruppe realisierbar, während interne Teilkomponenten von anderen Anwendungen übernommen werden.

## Literaturhinweise

- [1] Rinolfi, R.; Piccone, A.: The potential of an advanced electronic valve control system for future spark ignition engine. 6. Aachener Kolloquium, 20.-22. Oktober 1997
- [2] Bernard, L.; Ferrari, A.; Rinolfi, R.; Vafidis, C.: Fuel economy improvement potential of Uniair throttleless technology". ATA International Symposium on "Spark Ignition Engine: the CO<sub>2</sub> challenge" – Paper 02A5012 – November 2002, Venedig
- [3] Bernard, L.; Ferrero, P. E.: CO<sub>2</sub> solutions for small powertrains. 20. Internationaler AVL-Kongress "Motor & Umwelt, September 2008, Graz