

FEV-Spectrum

Technologie - Highlights aus dem FEV-Arbeitsspektrum

Ausgabe 12 / Aug. 1999



Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen – Elektro-mechanischer Ventiltrieb im Fahrzeug

Durch den Aufbau eines Fahrzeuges mit elektromechanischem Ventiltrieb (EMVT) konnte die FEV die Umsetzbarkeit der Verbrauchs- und Emissions-Vorteile im Fahrzeugeinsatz nachweisen. Hierbei erzielte das EMVT-Fahrzeug im Vergleich zu seiner Nockenwellen-Basis eine Verbrauchseinsparung von über 15 % im NEFZ bei gleichzeitiger Erfüllung der EURO IV Grenzwerte.

5 **Strahlausbreitung und Gemisch-aufbereitung im FEV DISI Motor**

Vollvariable Ventiltriebe bieten deutlich mehr Vorteile, als nur die Vermeidung von Drosselverlusten in der Teillast. Mit zunehmender Anzahl der Freiheitsgrade steigen die Möglichkeiten, um bei jeder Anforderung und in jedem Betriebspunkt des Motors ein optimales Verhalten des Motors hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu erzielen.

Wahl der Steuerzeiten für Ein- und Auslass und damit die größte Nutzung des Verbrauchs- und Schadstoff-Reduktionspotentials.

Die hierzu benötigten Aktuatoren sowie eine spezielle Steuerelektronik wurden von der FEV entwickelt. Die Anforderungen für einen modernen 4-Ventilmotor sind dabei nicht unerheblich. Die Ventile müssen innerhalb von 3 ms über einen Hub von 8 mm geöffnet bzw. geschlossen werden. Neben der Erfüllung der Dauerfestigkeit unter allen Umgebungsbedingungen muss das akustische Verhalten eines EMVT-Motors genauso gut sein, wie bei einem modernen Benzinmotor mit Nockenwelle. ▶

6 **Geschäftsbereich Großmotoren**

Bekannte Bauarten des vollvariablen Ventiltriebs sind hydraulische, mechanische (MVVT) und elektromechanische Ventiltriebe (EMVT). Sowohl MVVT als auch EMVT befinden sich derzeit in der Entwicklung zur Serienreife. Beim EMVT bieten die neuartigen magnetgesteuerten Ventile eine völlig individuelle

Vorankündigung
8. Aachener Kolloquium
4.-6. Okt. 1999
Eurogress Aachen

Besuchen Sie unsere Web-site jetzt unter
<http://www.fev.com>

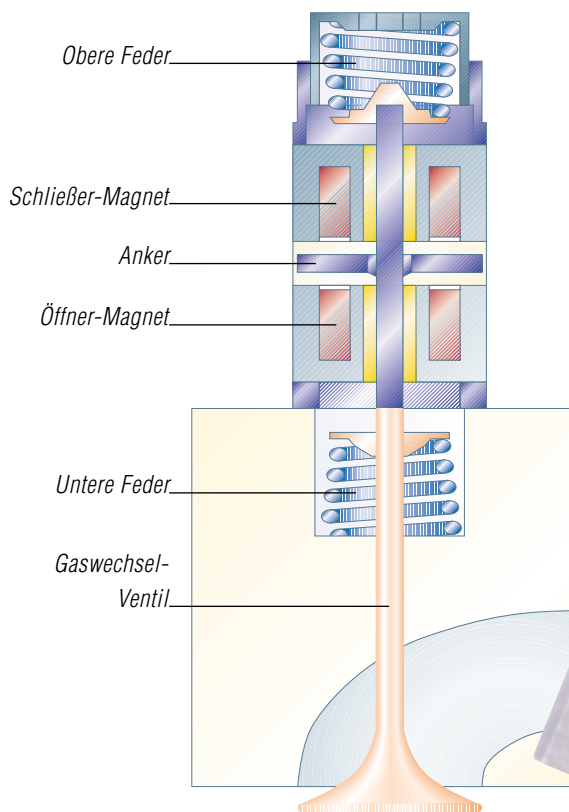


FEV

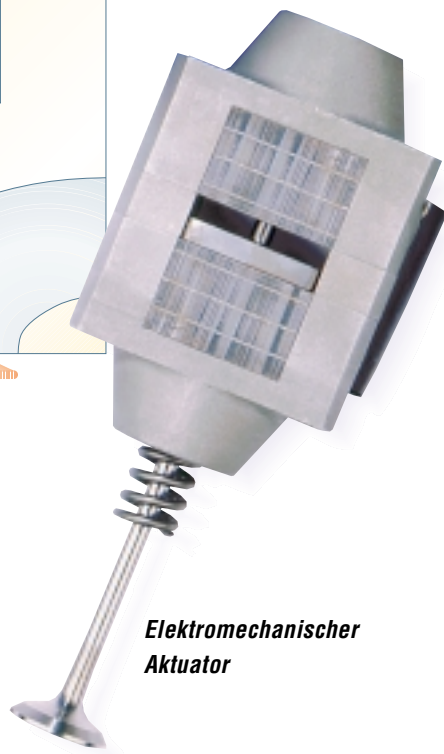
Die Aktuatoren arbeiten nach dem elektromechanischen Prinzip. Ein Magnet-Anker wird zwischen einem oberen und einem unteren Magneten beweglich geführt. Wenn keine Magnetkräfte aufgebracht werden, wird der Anker durch eine obere und eine untere Feder in der Mittelposition zwischen den beiden Magneten gehalten. Dieser Zustand tritt bei abgeschaltetem Motor auf, wobei die Ventile halb geöffnet sind. Bei laufendem Motor wird durch Bestromung des oberen Magneten das Ventil geschlossen gehalten, während der Anker am oberen Magneten anliegt. Zum Öffnen des Ventils wird der Strom unterbrochen und der Anker wird durch die Federkräfte zum unteren Magneten be-

wegt. Durch Bestromung des unteren Magneten werden die Verluste während der Bewegung kompensiert und das Ventil im geöffneten Zustand gehalten. Zum Schließen des Ventils wird der Strom im unteren Magneten unterbrochen. Nun muss der obere Magnet zur Kompensation der Verluste und zum Halten des Ventils bestromt werden.

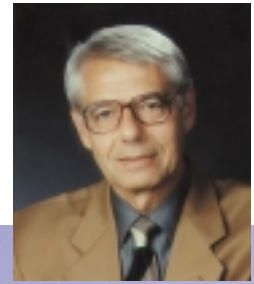
Die Aufsetzgeschwindigkeit des Ventils in den Sitz und des Ankers auf den Magneten wirkt sich entscheidend auf den Verschleiß und das akustische Verhalten aus. Die Aufsetzgeschwindigkeit wird durch die Bestromung während der Fangphase bestimmt. Durch die Entwicklung einer Closed-Loop-Regelung der FEV wurde es möglich, Aufsetzgeschwindigkeiten unterhalb von 0,05 m/s zu erreichen. ▶



Prinzip des elektromechanischen Aktuators



Zum Geleit



Liebe Leserinnen und Leser,

zu den Entwicklungen, mit denen Ottomotoren verbessert werden können, zählen Downsizing mit Aufladung, Direkteinspritzung mit Schichtladung und variable Ventilsteuerung absenken.

In der vorliegenden Ausgabe des Spectrums wird ein elektromechanischer Ventiltrieb beschrieben. Dieser ermöglicht es, in jedem Betriebszustand des Motors die Steuerzeit jedes einzelnen Ventils individuell anzupassen. Daraus ergeben sich beträchtliche Verbesserungen der motorischen Eigenschaften: Das maximale Drehmoment wird bereits bei niedrigen Drehzahlen erreicht, der Verbrauch bei Teillast wird erheblich abgesenkt, die Rohemissionen reduziert und der bekannte 3-Wege-Katalysator kann weiterhin eingesetzt werden.

Wir sind bei der FEV überzeugt, daß dieses System nach vielen Jahren intensiver Entwicklung jetzt eine technische Reife erreicht hat, die es ermöglichen wird, diese Vorteile auch bei Serienmotoren zu nutzen.

Ich grüße Sie sehr herzlich
Ihr

Peter Walzer

Peter Walzer, Geschäftsführer

◆ In der Vergangenheit konnten durch zahlreiche Untersuchungen an Prototypmotoren die Potentiale der Motoren mit elektromechanischen Ventiltrieben nachgewiesen werden. Dabei zeigte sich, dass der EMVT neben der Entdrosselung noch wesentlich mehr Potentiale bietet. Die wichtigsten Potentiale sind im folgenden kurz aufgelistet:

- Potential durch Restgassteuerung
- Potential durch Steuerung der Ladungsbewegung
- Potential durch Zylinderabschaltung
- Potential durch Absenkung der Leerlaufdrehzahl
- Potential durch zyklussynchrone Steuerung der Ladungsmenge, des Restgasgehaltes, des Zündzeitpunktes und der Einspritzung
- Verbessertes Kaltstart- und Warmlaufverhalten durch spezielle Ventilsteuerung

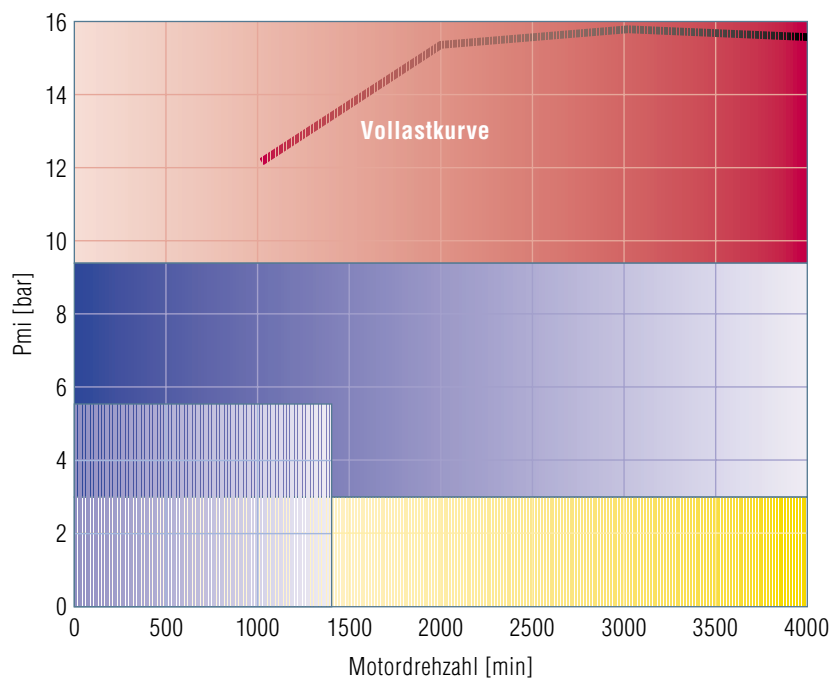
Ein wichtiger Schritt war es, diese Potentiale im Fahrzeug zu demonstrieren. Außerdem sollte nachgewiesen werden, dass eine Kombination des EMVT mit einer Aufladung ein sinnvolles Konzept darstellt. Da die Laststeuerung eines EMVT-Motors nicht mehr über eine Drosselklappe, sondern über die Ventilsteuerzeiten erfolgt, wurde unter Berücksichtigung der zusätzlichen Freiheitsgrade und Variabilitäten eine komplett neue Fahrzeugelektronik aufgebaut, wobei eine drehmomentbasierte Struktur der Motorsteuerung verwirklicht wurde. Für die Funktionsentwicklung spezifischer Funktionen zur Ansteuerung des Ventiltriebs und der übrigen Steuersignale wurde das Funktionsentwicklungssystem ASCET SD der Firma ETAS an die eigene Motorsteuerungselektronik angebunden. Wesentliche neue Funktionen sind ein Luftmassenmodell, ein Restgasmodell sowie die Leerlauf- und Lambda-Regelung.

Nach der Integration der EMVT-spezifischen Komponenten und der am Stationärprüfstand vorkalibrierten Motorsteuerung in das Versuchsfahrzeug

erfolgte eine Abstimmung der fahrbarkeitsrelevanten Funktionen unter Fahrbedingungen sowie eine Bewertung und Optimierung des Verbrauchs- und Emissionsverhaltens im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Dabei wurde ein Betriebsartenkennfeld verwendet, das in Abhängigkeit der Drehzahl und Last festlegt, ob der Motor mit 2 Ventilen,

Die Aufteilung der EMVT-spezifischen Verbrauchspotentiale kann dem Balkendiagramm entnommen werden. Die Vermeidung der Drosselverluste und Nutzung der Restgassteuerung alleine bewirkt eine Verbrauchsabsenkung von ca. 8,5 % im Gesamttest. Die verbesserte Verbrennungsstabilität des Motors bei niedrigen Lasten kann zu einer

Kennfeld der Betriebsarten zur Ventil- und Zylinderdeaktivierung



Betriebsarten:

- 4 Zylinder, 4 Ventile
- 4 Zylinder, 3 Ventile
- 4 Zylinder, 2 Ventile
- 2 Zylinder, 3 Ventile

3 Ventilen oder 4 Ventilen betrieben wird, und, ob Zylinder deaktiviert werden sollen. Im innerstädtischen Fahrzyklus stellte sich ein Verbrauchsvorteil des Fahrzeuges mit EMVT-Technologie gegenüber dem baugleichen Fahrzeug mit konventioneller Motorentechnik von ca. 23 % und im NEFZ-Gesamttestergebnis von ca. 16 % ein. Dabei wurden das Getriebe und die Schaltdrehzahlen nicht verändert, so dass der Turbolader nicht für ein Downsizing genutzt wurde und die Kraftstoffeinsparung nur auf den Einsatz des EMVT zurückzuführen ist.

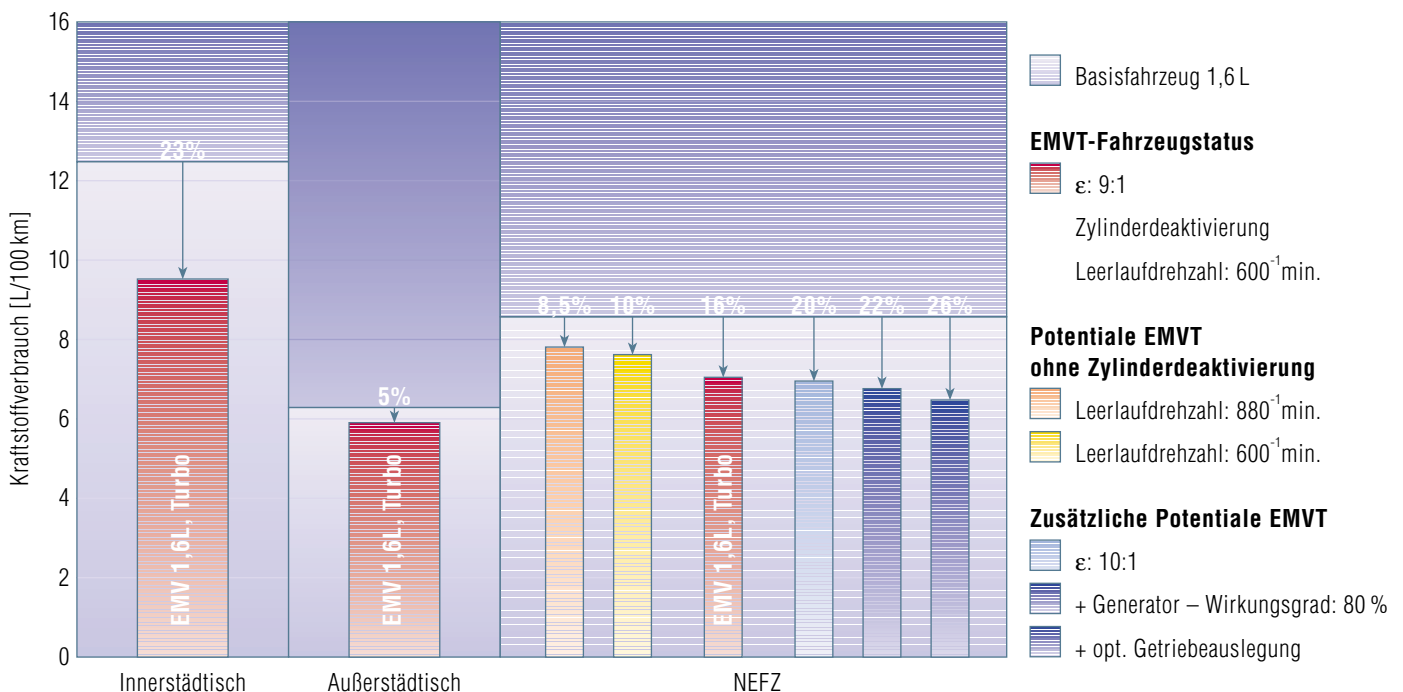
zusätzlichen Absenkung der Leerlaufdrehzahl genutzt werden. Hierdurch ergibt sich eine weitere Kraftstoffeinsparung in der Größenordnung von 1,5 %. Die Nutzung der zuvor gezeigten Betriebsartenstrategien erhöht diesen Wert auf 16 % und konnte im Fahrzeug bereits nachgewiesen werden. Dieses enorme Potential ist hauptsächlich auf die Nutzung der Zylinderabschaltung zurückzuführen, die jedoch nur bei niedrigen Lasten verwendet wurde, so dass keine Nachteile im Fahrkomfort auftraten. ◆

◆ Zusätzliches Einsparungspotential ergibt sich aus dem derzeit noch nicht optimal angepassten Verdichtungsverhältnis. Hier erlaubt insbesondere die exakte Steuerung des Restgasanteils und des effektiven Verdichtungsverhältnisses bei höherer Motorlast (Millerverfahren) eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses auf den ursprünglichen Wert des Basis-Fahrzeuges, wodurch der Kraftstoffverbrauch um weitere 4 % reduziert werden kann. Naturgemäß ist bei einem elektromechanischen Ventiltrieb die Minimierung des Primärenergiebedarfs aus dem Ventiltrieb von großer Bedeutung. Alleine durch Verbesserung des Generatorwirkungsgrades von derzeit ca. 50 % auf 80 % durch Einsatz eines verbesserten Generators ließen sich weitere 2 %

Gegenüber einer Strategie mit konventionellen Ventilsteuerzeiten kann durch spätes Öffnen der Einlassventile die Ladungsbewegung beim Kaltstart intensiviert und die Verbrennung leicht magerer Gemische beim Warmlauf stabilisiert werden. So verbrennt der erste Zyklus mit hohem Spitzendruck und auch nachfolgend treten keine Verbrennungsaussetzer oder Zyklen mit verschleppter Verbrennung auf. Weiterhin ist es möglich, durch sehr spätes Öffnen der Auslassventile, die Nachoxidation im Zylinder zu fördern und die Abgastemperatur bei niedrigem Rohemissionsniveau zu erhöhen. Dies resultiert in einer deutlichen Absenkung der HC-Startemissionen auf über 50 % des Motorstarts im Vergleich mit konventionellen Steuerstrategien. Gegenüber

Trotz der zuvor genannten Emissionsvorteile konnte im Fahrzeug auf die konventionellen Maßnahmen zur gezielten Erhöhung der Abgastemperatur nicht vollständig verzichtet werden. Gleichzeitig erfolgte die Applikation der EMVT-spezifischen Steuerverfahren über den Motorstartbereich hinaus. Mit dieser Betriebsstrategie und durch die Katalysatorheizmaßnahmen ist die Abgastemperatur um über 200°C höher und das Light-Off des Katalysators erfolgt bereits vor dem Ende des ersten Fahrprofils. Die kumulativen Emissionsverläufe zeigen, dass trotz des Einsatzes einer Abgasturbine bei allen Schadstoffkomponenten ein Niveau von 50 % der EU IV - Grenzwerte sicher eingehalten werden kann.

Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges mit EMVT-Technologie im NEFZ



Kraftstoff einsparen. Die Anpassung der Getriebeauslegung an die bessere Vollastcharakteristik des Motors erlaubt bei gleichen Fahrleistungen nochmals eine Einsparung von ca. 4 %, so dass das Verbrauchspotential mit über 25 % angegeben werden kann.

einem gedrosselten Motorkonzept werden die Startemissionen durch die exakt mögliche Vorsteuerung der Ladungsmenge und somit der Startkraftstoffmenge bei einem EMVT-Motor deutlich reduziert.

Somit stellt der elektromechanische Ventiltrieb ein äußerst interessantes Konzept zur Verminderung des Kraftstoffverbrauchs und gleichzeitiger Erfüllung zukünftiger Niedrigstmissionsgrenzwerte dar. ◆

Strahlausbreitung und Gemischaufbereitung im FEV DISI Motor

Einer der vielversprechendsten Ansätze zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von Ottomotoren ist der Einsatz der Direkteinspritzung. Im Teillastbetrieb verbinden DISI (**D**irect **I**njection **S**park **I**gnition) Motoren die Vorteile eines mageren Verbrennungsablaufs mit einer nahezu drosselfreien Laststeuerung. Damit können prinzipielle Nachteile im Vergleich zum Dieselfahren weitgehend ausgeglichen werden. Bei Vollastbetrieb wird die Zylinderladung durch die Kraftstoffverdampfung im Brennraum gekühlt. Dies führt zu einer Steigerung des Luftaufwands und reduziert die Klopfempfindlichkeit, so daß die spezifischen Vollastkennwerte gegenüber konventionellen Ottomotoren gesteigert werden können.



FEV hat ein luftgeführtes DISI Brennverfahren entwickelt, das die Ladungsbewegung im Zylinder sowohl zur Gemischaufbereitung als auch für den Gemischtransport zur Zündkerze nutzt. Die Steuerung der Ladungsbewegung erfolgt dabei mittels eines kontinuierlich variablen TumbleSystems (CVTS). Das Brennverfahren vermeidet eine ausgeprägte Wandfilmbildung und ermöglicht die Realisierung einer kompakten, zentralen Kolbenmulde. Wesentliche Vorteile sind eine effiziente Verbrennungsführung bei gleichzeitiger Reduktion der Schadstoffemissionen.

Die Vorteile moderner DI Ottomotoren führen andererseits zu einem Anstieg der Systemkomplexität. Zur Verbesserung des Verständnisses der ablaufenden Vorgänge oder zur Untersuchung verschiedener Einspritzparameter auf das Motorverhalten, wie beispielsweise Einspritzzeitpunkt, Düsentyp und -position, helfen u.a. CFD Strömungsberechnungen.

StarCD kommt zur Simulation der Zylinderinnenströmung sowie der Gemischaufbereitung im geschichteten Betrieb zum Einsatz. Die instationären Berechnungen umfassen den gesamten Ansaug- und Kompressionsvorgang, wobei sowohl Ventil- als auch Kolbenbewegung berücksichtigt werden. Das Berechnungsgitter besteht hierbei aus mehreren Teilbereichen, die über sogenannte „arbitrary sliding interfaces“ miteinander verbunden werden. Die Netzbewegung wird über ProStar Events realisiert.

Zur Simulation des Einspritzvorgangs und der Gemischaufbereitung werden die in StarCD implementierten Modelle zur Beschreibung der Tropfenbewegung, -verdampfung, Tropfenzerfall sowie -kollision verwendet. Darüber hinaus wurden FEV eigene Modellerweiterungen zum Strahlerfall bei DISI Einspritzdüsen vorgenommen. Diese Modelle beschreiben den Primärzerfall der Flüssigphase direkt an der Düse und liefern als Ergebnis die Größen- und Geschwindigkeitsverteilung der Primärtropfen.

Diese detaillierte Beschreibung der Strahlcharakteristik ist wesentlich für eine exakte Simulation des Impuls- sowie Wärme- und Stoffaustauschs zwischen Tropfen- und Gasphase im Brennraum. Aus diesem Grund wurden die Modelle intensiv mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Es wurden Untersuchungen an einer Einspritzkammer mit Optikzugang durchgeführt, die unter motorischen Druck- und Temperaturrandbedingungen betrieben werden kann.

Abb. 1 zeigt einen Vergleich der StarCD Berechnungsergebnisse der Strahlentwicklung und Tropfenverdampfung mit Schlierenaufnahmen zu verschiedenen

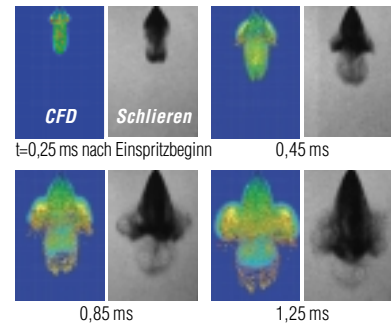


Abb. 1:
Vergleich CFD Einspritzsimulation mit experimentellen Schlieren Strahluntersuchungen

Zeitpunkten nach Einspritzbeginn. Das FEV Strahlmodell berücksichtigt die zeitliche Verzögerung der Drallströmung in der Düse, so daß unmittelbar nach Einspritzbeginn ein kompakter Vorstrahl und im weiteren Verlauf die bekannte Hohlkegelcharakteristik auftritt.

Diese validierten Einspritzmodelle werden auf weiterführende Untersuchungen am Motor mit dem Ziel übertragen, die Interaktion zwischen Tumbleströmung und Strahlausbreitung näher zu untersuchen. Berechnungsergebnisse eines optimierten Brennraumdesigns, Abb. 2, zeigen die Tropfen- und Gemischverteilung zu drei verschiedenen Zeitpunkten im Brennraum des DISI Motors.



Abb. 2:
DISI Strahlausbreitung und Gemischbildung bei Teillastbetrieb (2000 1/min, pme = 2 bar)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß der Einsatz von StarCD das Verständnis der Interaktion zwischen Strömungsfeld, Strahlausbreitung und Gemischaufbereitung fördert. Hierdurch wird eine gezieltere Steuerung der Ladungsbewegung und eine Vorhersage optimierter Einspritzrandbedingungen ermöglicht.

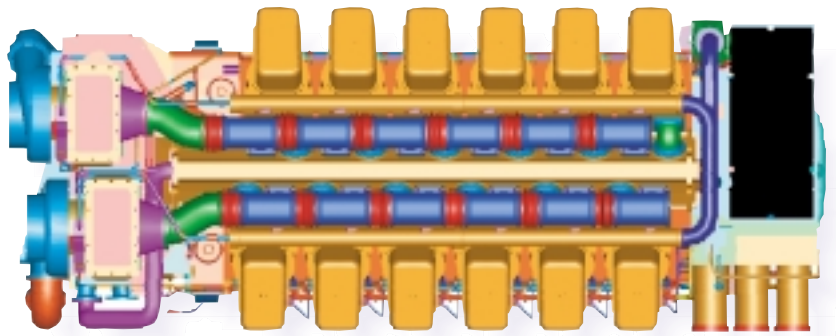
Geschäftsbereich Großmotoren

Großmotoren dienen vornehmlich zum Antrieb von Schiffen, Lokomotiven und Generatoren. Nahezu der gesamte globale Gütertransport wird von Großmotoren bewegt. Dieselkraftwerke erfahren weltweit eine zunehmende Verbreitung als Stromerzeuger. Beide Anwendungsfelder kennzeichnen die hohe wirtschaftliche Bedeutung dieser Motorengattung.

Großmotoren sind oberhalb der schweren Nutzfahrzeugmotoren angesiedelt. Man unterscheidet sie in drei Klassen:

- Langsamlaufende 2-Takt-Motoren, die direkt mit dem Propeller gekoppelt über 70% der heutigen Schiffsantriebsleistung darstellen. 12 Zylinder 2-Takt-Reihenmaschinen mit über 68.000 KW bei Drehzahlen unter 100 1/min und einem Gewicht von nahezu 2.000 Tonnen verdeutlichen diese beeindruckende Motorentechnik.
- Mittelschnelllaufende 4-Takt-Motoren mit 1.000 bis 30.000 KW bei Drehzahlen von 350 bis 1.200 1/min, die über Getriebe große Schiffe oder direkt gekoppelt Generatoren für Kraftstationen antreiben.
- Schnelllaufende Hochleistungsmotoren, 500 bis 7.500 KW bei 1.000 bis 2.300 1/min für kleinere, oft sehr schnelle Schiffe, Generatoren und Spezialfahrzeuge.

Ein rasch wachsendes Anwendungsfeld für große 4-Takt-Motoren sind schwere Diesellokomotiven. In Verbindung mit modernster elektronischer Antriebs-



FEV Entwicklung: V12/V16 Lokomotivmotor
Bohrung: 255 mm, Leistung: 3.180/4.240 kh,
Hub: 310 mm, Drehzahl: 1.000 1/min

technik erreichen diese bereits bis zu 5.000 KW starken Maschinen höchste Traktionsleistungen bei überlegener Wirtschaftlichkeit.

Zunehmende Bedeutung gewinnen auch große, zumeist von den Dieselvarianten abgeleitete Gasmotoren für umweltfreundliche Kraft-Wärme-Koppelungsanlagen.

Die zukünftige Großmotorenentwicklung ist neben einer weiteren Effizienzverbesserung bei unverändert hohem Kostendruck vor allem durch zunehmend verschärfte Emissionsbestimmungen gekennzeichnet, wie sie z.B. im Fahrzeugmotorenbau seit langem schon gesetzlich geregelt sind. Vorrangig werden Motoren für Binnen- und Küstenschiffe, Lokomotiven und Kraftwerke, d. h. die mittel- und schnelllaufenden 4-Takt-Motoren hiervon betroffen sein. Soll die hohe Wirtschaftlichkeit dieser Motoren unter dem „Emissionsdruck“ nicht preisgegeben werden, so sind deutliche Verbesserungen der bereits heute sehr hohen thermischen und mechanischen Wirkungsgrade notwendig. Dies erfordert eine bauteilübergreifende Gesamtoptimierung der Motoren in jeder Hinsicht. Vielfach sind einzelne Firmen diesen komplexen Entwicklungsaufgaben aus eigener Kraft nicht mehr gewachsen. Zu groß wäre allein schon die Zahl der hier vorzuhaltenden und noch dazu

wohl auf Dauer schlecht ausgelasteten Spezialisten. Auch die Zulieferindustrie mit ihren Produktspezialisten, auf die zunehmend Entwicklungsarbeit verlagert wird, kann diese übergreifenden Aufgaben nicht leisten.

Vor diesem Hintergrund hat FEV die bisher in den verschiedenen Bereichen abgewickelten Großmotorenprojekte in einem eigenen Geschäftsbereich zusammengefaßt. Diesem steht eine erfahrene Konstruktionsmannschaft zur Verfügung, die in bewährter Weise mit den Berechnungs-, Versuchs- und Grundlagenabteilungen der FEV kooperiert.

Gleichzeitig wurde mit einem erheblichen Investitionsaufwand ein völlig neuer Großmotorenprüfstand errichtet, in dem Vollmotoren bis zu einer Leistung von 4.000 KW sowie Einzylinder-Versuchsmotoren bis zu einem Gesamtgewicht von 8 Tonnen erprobt werden können. Basis für diese Einzylinderversuche ist ein von FEV entwickelter Grundmotor mit einem einteiligen, gegossenen Kurbelgehäuse aus GGG 50, in dem kundenspezifische Triebwerks- und Zylindereinheiten möglichst serienah eingebaut werden können.

IMPRESSUM

FEV Motorentechnik GmbH
Neuenhofstraße 181
D-52078 Aachen
Telefon: (0241) 5689-0
Telefax: (0241) 5689-119
<http://www.fev.com>
e-mail: marketing@fev.de

Redaktion: Dr. Speckens
Layout: Der Design Pool, Aachen