

FEV-Spectrum

Technologie - Highlights aus dem FEV-Arbeitsspektrum

Ausgabe 15 / Sept. 2000



Struktur- berechnung

Der Zeit- und Kostendruck in der modernen Produktentwicklung erfordert fortschrittliche Entwicklungsmethoden mit schnellen Analysen und hoher Präzision. In diesem Umfeld, wo „time to market“ zum treibenden Faktor wird, gewinnt die modell-basierende Strukturanalyse zunehmend an Bedeutung. Dort wo traditionell die Produkte aufwendigen Testverfahren unterworfen wurden, setzen die Entwicklungsingenieure heute routiniert und zeitgemäß moderne CAE-Werkzeuge zur Strukturanalyse ein.

Bereits in der frühen Entwicklungsphase kann mit Hilfe von Finite-Elemente-Analysen (FEA) die neue Struktur hinsichtlich thermischer und mechanischer Belastungen, Deformationen, Gewicht und Material untersucht und optimiert werden. Diese Systematik setzt eine genaue Kenntnis aller relevanten Randbedingungen voraus. So kombiniert die FEV den geometrischen Input des Konstrukteurs mit den belastungsspezifischen Informationen, welche unsere Prozesssimulation liefert, zu einem hochwertigen FE-Modell. Darüber hinaus pflegt die FEV moderne Datenbanksysteme mit umfangreichen Testdaten aus Motoren- und Komponentenversuchen, welche zur Verifikation und somit auch zur kontinuierlichen Qualitätssicherung der Vorausberechnungen herangezogen werden.

Die FEV hat langjährige Erfahrungen in thermo-mechanischen Struktur-berechnungen speziell von Zylinderköpfen und -kurbelgehäusen sowie in der Auslegung und dynamischen Berechnung von Kurbelwellen, Pleuelstangen und Ventiltriebskomponenten. Die Modellqualitäten profitieren hierbei von der weiten praktischen Erfahrung, welche unsere Spezialisten in zahlreichen Serienentwicklungen von Verbrennungsmotoren gewinnen konnten. Nicht zuletzt um unseren weltweiten Kundenkreis Kompatibilität gewährleisten zu können, verfügt die FEV über ein breites Spektrum an technischen Software-Paketen. Wir unternehmen jede Anstrengung, um für unsere Kunden anspruchsvolle Berechnungen auch nach deren eigenen Spezifikationen durch-

2 Technologien für Diesel SULEV

4 Moderne Strömungs-Messmethoden

6 Partnerschaft: FEV und Mechanical Dynamics

Willkommen zum
9. Aachen Kolloquium
4.-6. Okt. 2000
Eurogress Aachen
FEV-Stand: E-12

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

FEV

führen zu können. Die FEV investiert kontinuierlich in ihre Infrastruktur damit unsere leistungsstarken Computer-Plattformen auch weiterhin modernster Technik entsprechen und den hohen Anforderungen der heutigen Berechnungstechniken genügen.

In der heutigen Pkw-Motorenentwicklung geht der Trend eindeutig in Richtung der Verwendung von modernen Leichtbaumaterialien, wie z.B. Aluminium. Gleichzeitig ist ein Anstieg der spezifischen Motorleistungen zu verzeichnen. In der Kombination münden beide Trends in z.T. erheblich

Zum Geleit



Liebe Leserinnen und Leser,

das populärste und ertragreichste PKW-Marktsegment in USA sind SUVs (Sport-Utility-Vehicle). Dieser Trend folgt aus der Prioritätensetzung „nicht beschränkt sein“ insbesondere in den „Outdoor“ Freizeitaktivitäten. Daraus folgt der Wunsch nach großem Innenraum, hoher Fahrleistung, Geländegängigkeit, aber auch nach großer Reichweite. Daher sind Diesel-SUVs für den US-Markt geplant. Diese Planung wird aber durch die Abgasgesetzgebung in Frage gestellt. Alle PKWs müssen ab 2007 bis 3856 kg zulässigem Gesamtgewicht nach den extrem verschärften Abgas- und Verbrauchsvorschriften zugelassen werden. Aus Überlegungen zum Modellmix ist es vorteilhaft, wenn Diesel-SUVs angeboten werden, die auch die SULEV (Super-Ultra-Low-Emission-Vehicle) Grenzwerte unterschreiten. Diese Grenzwerte ($NOx < 0,02g/mile$, $PM < 0,01g/mile$) sind so niedrig, daß alle Register gezogen werden müssen.

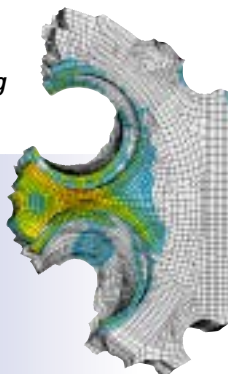
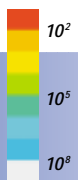
Ein System mit folgenden Komponenten muß entwickelt werden:

1. Brennverfahren: Homogene Verbrennung die durch den Einspritzverlauf gesteuert wird. Die FEV hat ein solches Verfahren (ACCP) vorentwickelt, mit dem extrem niedrige Ruß- und NOx -Werte gemessen wurden.

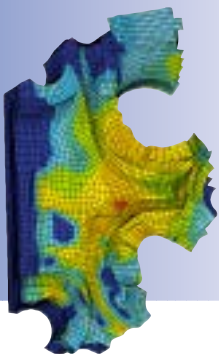
2. Einspritzung: Eine extrem schnelle und flexible Hochdruckeinspritzung wie das von der FEV entwickelte Piezosystem.
3. Hohe Abgasrückführrate ($>60\%$) bei gleichzeitiger optimaler Luftzahl (>2).
4. Rußfilter: Ruß-Reduktionen von 90 bis 95% angestrebt.
5. Stickoxid-Reduzier-System: SCR und NOx Speicherkat sind die beiden konkurrierenden Systeme an denen die FEV sehr intensiv arbeitet. Welches System sich letztendlich durchsetzt, wird auch von der Kraftstoffqualität mitentschieden, da der NOx Speicherkat einen sehr niedrigen Kraftstoffschwefelgehalt erfordert.

Alle diese Technologien werden zur Zeit sehr intensiv bei der FEV entwickelt, wobei die Erfüllung der EPA TIER II Emissionsgrenzwerte ($NOx < 0,07 g/mile$; $PM < 0,01 g/mile$) auch für SUVs machbar erscheint. Zur Einhaltung der CARB SULEV Standards sind jedoch weitere Anstrengungen erforderlich.

Low-Cycle Versagen Lebensdauerberechnung



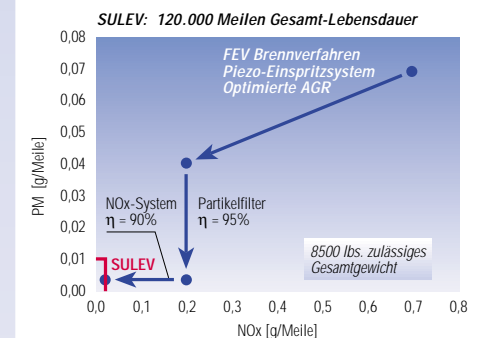
High-Cycle Versagen Sicherheitsfaktoren



gesteigerten thermischen und mechanischen Bauteilbelastungen – dies gilt in besonderem Maße für den Zylinderkopf. Durch die hohen Belastungen treten dort verstärkt Risse in der Struktur auf, welche im fortgeschrittenen Stadium oftmals zum Ausfall des Bauteils führen. Solche Risse können zumeist auf klassische Low- oder High-Cycle Versagensmechanismen zurückgeführt werden.

Nach den ersten Belastungszyklen können auf der Flammdeck-Oberfläche des Zylinderkopfes oftmals plastische Deformationen beobachtet werden. Die hohen Materialtemperaturen unter hoher Last führen zu Druckspannungen auf der Zylinderkopfunterseite, welche lokal die Fließgrenze des im heißen Zustand weniger festen

Materials überschreiten. In diesen plastifizierten Zonen schlagen die Druckspannungen nach der Auskühlung des Motors in lokale Zugspannungen um, welche im ungünstigen Fall nun die Zugstreckgrenze lokal überschreiten können. Für diesen Fall stellt sich eine zyklisch-wiederkehrende plastische Dehnungsamplitude ein, welche die Grundlage für den Low-



Notwendige Technologien zur Erfüllung der SULEV Emissions-Standards bei Dieselmotoren

Mit freundlichen Grüßen

Ihr

Prof. Dr. Peter Hofbauer

Cycle Versagensmechanismus darstellt. Nach einer bestimmten Anzahl von thermischen Belastungszyklen, der Bruchlastzahl, ist das (gealterte) Material nicht mehr imstande die hohen Zugspannungen zu ertragen – es treten Spannungsrisse aufgrund thermischer Ermüdung (Low-Cycle) im Bauteil auf. Die hierfür gefährdeten Gebiete im Zylinderkopf sind typischer-

weise die heißen Stege zwischen den Ventilsitzen, dem Injektor/Zündkerze und dem Glühstift.

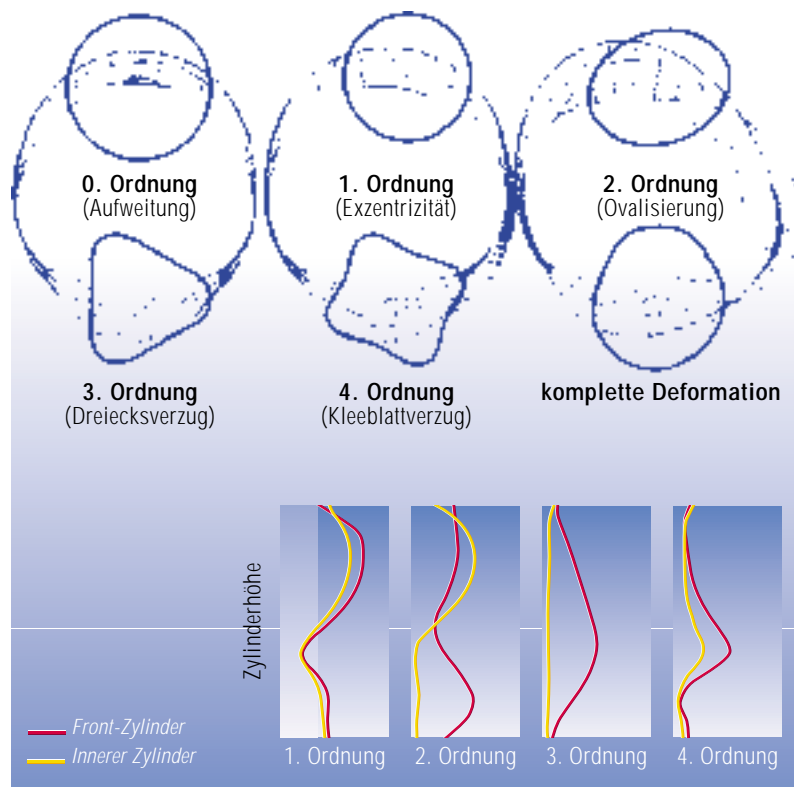
Der klassische High-Cycle Versagensmechanismus, auf der anderen Seite, wird verursacht durch dauerhaft kritische Kombinationen aus Mittel- und Ausschlagspannung. Hierbei kommt ferner den lokalen Spannungsgradienten, der Orientierung der Spannungen (Zug/Druck) und verschiedenen materialspezifischen Parametern (Oberfläche, Porosität, etc.) Bedeutung zu. Die Unterspannung der alternierenden Last bilden im wesentlichen die Belastungen aus Eigenspannungen (Gießprozess, Wärmebehandlung), Montage (Verschraubung und Presssitze) und Temperatur (Verbrennung); für die Oberspannung wird dem die hochfrequent-zyklische Belastung infolge Gasdruck überlagert. Unter Berücksichtigung der veränderlichen lokalen Spannungstensoren sowie der Material- und Geometrie Kennwerte können die lokalen Sicherheitsfaktoren gegen Dauerbruch (High-Cycle) berechnet werden. Dauerbruchkritische Gebiete von modernen Zylinderköpfen sind typischerweise die Übergangsradien von den Kanälen (Ein-/Auslass) zum Flammdeck unten bzw. Öldeck oben, wo oftmals sprunghafte Steifigkeitsunterschiede in der Struktur vorzufinden sind.

Um solche High- und Low-Cycle verursachte Spannungsrisse im Motorbetrieb dauerhaft zu vermeiden sind FEA-Vorausrechnungen und -optimierungen für die heutigen komplexen Motorstrukturen (insbesondere dem Top-End) dringend notwendig. Aus diesem Grunde führt die FEV schon in der frühen Konstruktionsphase, sobald ein erstes Layout von Kanälen, Injektor-/Glühstift-Position (Diesel) und Flammdeck verfügbar ist, erste thermische FE-Berechnungen durch. Die hieraus gewonnenen Informationen versetzen den Konstrukteur in die Lage, schon frühzeitig etwaige Schwachstellen in der Struktur eindeutig zu erfassen und zu eliminieren. Diesem interaktiven Prozess folgend, verfeinert der Berechner sein Modell simultan zur konstruktiven Detaillierung bis schließlich ein komplettiertes FE-Modell für umfassende Analysen vorliegt. Dieses Modell erlaubt schon belastbare

Lebensdauer- bzw. Dauerfestigkeitsaussagen, lange bevor der erste Prototyp in den Dauerlauf- bzw. Thermoschock-Test geht.

Neben der oben erläuterten Vorausberechnung von Spannungen und Sicherheitsfaktoren ist die Berechnung und Optimierung der Zylinderrohrdeformationen eine der

berechnet werden. Die lokalen wasserseitigen Wärmeübergangsbedingungen werden bei der FEV zeitgemäß mit modernen CFD-Programmen ermittelt. Nicht-lineare Effekte wie Blasensieden an lokal heißen Oberflächen werden in die thermische Strukturanalyse interaktiv dynamisch einbezogen. Im Block-Kopf-Verbund der



Rohrverzugsanalyse mit Fourier-Ordnungen

wichtigsten Bestandteile der heutigen Kurbelgehäuseentwicklung. Geringe Rohrdeformationen eröffnen Potenziale zur Reduzierung der Kolbenringvorspannung und somit zur Verminderung der Motorreibung (Ringanteil an Motorreibung: 20-25%) bzw. bei unveränderter Ringvorspannung Potenziale zur Reduzierung von Ölverbrauch und Blowby-Gasaufkommen. Auch aus NVH-Sicht basiert eine Kolbenschlagoptimierung in der Regel auf einen zuvor optimierten Rohrverzug.

Für eine akkurate Vorausberechnung des Rohrverzugs ist eine präzise Kenntnis der thermischen und mechanischen Randbedingungen unabdingbar. Mittels moderner Prozesssimulation können die mittleren Verbrennungsgastemperaturen und gasseitigen Wärmeübergangsbedingungen lokal, d.h. über der Höhe des Zylinders,

FEA wird die Steifigkeitscharakteristik der Zylinderkopfdichtung für die Be-/Entlastung nichtlinear-hystereseebehaftet mit speziellen Gasket-Elementen in ihren einzelnen Funktionslagen modelliert. Die verwendeten Materialmodelle beinhalten alle Temperaturabhängigkeiten und Plastizitätskennwerte.

Die mit diesen präzisen FE-Modellen berechnete Rohrdeformation wird zur weiteren Auswertung mittels Fourier-Analyse numerisch in ihre Einzelordnungen zerlegt. Mittels der zahlreichen Rohrdeformationsrechnungen und -messungen (FEV-Messsystem für gefeuerte Motoren, bis 5000 rpm) können die berechneten Werte im Streufeld von Vergleichsmotoren aus unserer Datenbank vergleichend bewertet bzw. zielorientiert optimiert werden. ◆

Dr. Franz Maassen

Einsatz moderner Strömungsmessmethoden in der FEV

Moderne Brennverfahren stellen zunehmend höhere Ansprüche an Beherrschung und Formung einer bedarfsgerechten Ladungsbewegung. Als aktuelles Beispiel kann hier der direkt einspritzende Ottomotor genannt werden. Gerade die Tumble-basierten Konzepte lösen den Wunsch nach Strömungsmessungen unter „Live“-Bedingungen aus. Aus diesem Grund stellt die FEV zur zielführenden Kanalentwicklung den bekannten, stationären Messverfahren für Drall und Tumble mit der Particle Image Velocimetry (PIV) eine räumlich hochauflösende Lasermesstechnik zur Seite. In diesem Beitrag wird das PIV-Messprinzip kurz erläutert, als Entwicklungstool in das Umfeld der etablierten Verfahren eingeordnet und der FEV-spezifische Einsatz am FLOTEC-Prüfstand beschrieben.

Die Aufgabenstellung

Bild 1 ordnet die bekannten, in der FEV seit Jahren erfolgreich eingesetzten Tools der Strömungsanalyse in einer durch die jeweils erreichbare Zeit- und Ortsauflösung aufgespannten Ebene an.

Auf den ersten Blick erscheint die geringe Auflösung der klassischen Drall- und Tumble-Messverfahren gerade im Vergleich mit den wachsenden Möglichkeiten der numerischen Verfahren kaum noch zeitgemäß. In der Praxis stellt sich jedoch gerade der skalare Charakter der Ergebnisse als Vorteil dar, da Strömungskennwerte und Brennverhalten in einprägsamer Weise korreliert werden können. Darüber hinaus wird die Zeit zwischen Modifikation und Ergebnis auch zukünftig unerreicht bleiben.

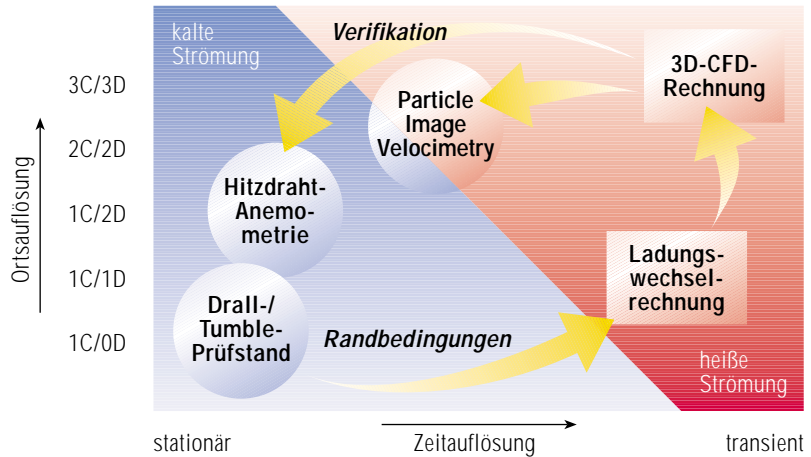


Bild 1: Strömungsanalyse

Bild 1 macht gleichzeitig deutlich, dass sich die Rechnung immer weiter der Möglichkeit einer experimentellen Verifikation entzieht. Diese Lücke wird durch die PIV in idealer Weise geschlossen. Gleichzeitig kann PIV als logische Ergänzung der stationären Messungen angesehen werden.

Das Messprinzip

PIV ist ein planares, nicht-invasives Teilchenspurverfahren zur zeitdiskreten, zweidimensionalen Geschwindigkeitsmessung mit hoher räumlicher Auflö-

schiebungen werden beide in der Lichtschnittebene liegenden Geschwindigkeitskomponenten durch Kleinfeldkorrelationen schrittweise nach Betrag und Richtung abgeleitet.

Nach diesem Messprinzip können sowohl Strömungsfelder in stationärer, als auch unter transienten Bedingungen gemessen werden. Voraussetzung ist eine hohe optische Zugänglichkeit des Messgebietes und ein entsprechendes Tracer-Seeding.

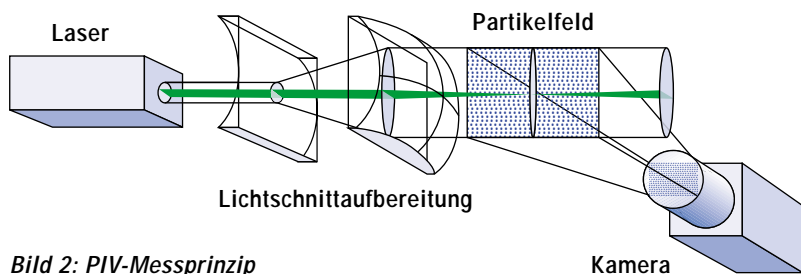


Bild 2: PIV-Messprinzip

sung. Die Ansaugluft wird mit kleinsten Tracerteilchen dotiert, die der Strömung schlupffrei folgen. Ein gepulster Laserstrahl wird zu einem ebenen Laserlichtschnitt geformt (Bild 2).

Die momentanen Positionen der sich in der Lichtschnittebene bewegenden Tracer wird durch zwei kurz aufeinanderfolgende Laserpulse in zwei getrennten Aufnahmen erfasst.

Aus den damit im Bildvergleich dokumentierten, lokalen Partikelbildver-

Stationäre PIV-Messungen: Der FEV Tumble-Prüfstand

Im realen Motorbetrieb stellt der Kolben für die Tumbleströmung eine Umlenkstelle mit veränderlichem, durch das Verhältnis von momentaner Kolbenkomponente zur auflaufenden Tumblekomponente geprägten Reflexionsgrad dar. Diese Verhältnisse können im stationären Versuch naturgemäß nur teilweise nachgebildet werden. Beim bekannten FEV Tumble-Messverfahren (Bild 3) wird die Luft aus dem Wirbel- ➤



► zentrum in Richtung der Flügelachse abgezogen. Hierdurch wird es möglich, den Kolben als Reflexionsstelle beizubehalten.

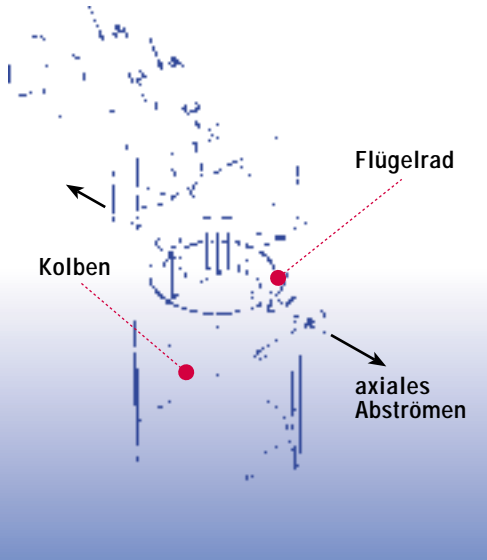


Bild 3: FEV Tumble Messverfahren

Welche Auswirkungen die gewählte Anordnung auf das Strömungsfeld hat, kann durch PIV-Messungen aufgedeckt werden. Bild 4 vergleicht hierzu das Strömungsfeld bei verschiedenen Abströmbedingungen.

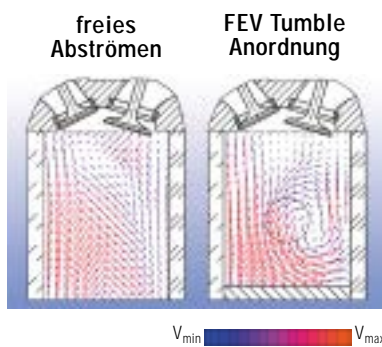


Bild 4: stationäre PIV-Messungen

Zwar ist die den Tumble auslösende Asymetrie der Ventilumströmung auch schon bei der üblichen Absaugung durch das Zylinderrohr erkennbar. Eine globale Erfassung des Impulseintrags dürfte jedoch schwierig sein. In der FEV-Anordnung stellen sich dagegen eindeutige Verhältnisse ein. Die seitlichen Absaugöffnungen zwingen den Tumble in eine definierte Lage, so dass die Wirbelstärke in einfacher Weise durch ein Flügelrad abgetastet werden kann. Darüber hinaus wird erst durch

die Reflektion am Kolben die selbstverstärkenden Tumble-Rückwirkung auf die Ventilumströmung nachvollzogen.

Instationäre PIV-Messungen: Der FEV FLOTEC-Prüfstand

Die positiven Erfahrungen mit der PIV-Messtechnik und der Wunsch, ohne umfangreiche Umbauten und ohne Verzögerungen im thermodynamischen Versuchsprogramm transiente Strömungsuntersuchungen in schneller und einfacher Weise durchführen zu können, führten bei FEV zur Realisierung eines als FLOTEC bezeichneten Konzepts. Der Name löst zum einen Assoziationen zum Einsatzgebiet aus. Zum anderen steht der Name als Akronym für **F**lexible **L**aser **O**ptical **T**est **E**ngine **C**oncept.

FLOTEC ermöglicht in schneller Weise in einer konstant hochwertig ausgerüsteten Messumgebung PIV-Messungen unter geschleppten Bedingungen. FLOTEC kann verschiedene Zylinderköpfe aufnehmen. Der Hub ist variabel einstellbar. Eine separate Ventilbetätigung ermöglicht es, den Zylinderkopf medienfrei zu betreiben. Modifikationen am Zylinderkopf sind daher nicht notwendig. Hierdurch wird es auch möglich, bereits in der Konzeptphase Untersuchungen an Strömungsmessmodellen durchzuführen.

Ein gegen den Zylinderkopf stoßender Glasring schafft eine optimale, optische Zugänglichkeit. Zusätzlich können Lichtschnitte durch einen transparenten Kolben eingekoppelt und/oder beobachtet werden.

Bei transienten Fragestellungen demonstriert die PIV-Messtechnik ihre beson-



Bild 5: FLOTEC (Ansicht)

dere Stärke. Bild 6 zeigt typische FLOTEC-Ergebnisse, die das Verständnis der Tumblegenerierung und konservierung vertiefen.

In jedem Messzeitpunkt werden mehrere Strömungsfelder aufgenommen und gemittelt. Hierdurch werden auch Aussagen zur Stabilität der Wirbelströmung möglich. Im Vergleich zu Bild 4 wird offensichtlich, dass die FEV-Messanordnung zur stationären Tumblemessung die realen Bedingungen in hohem Maße abbildet.

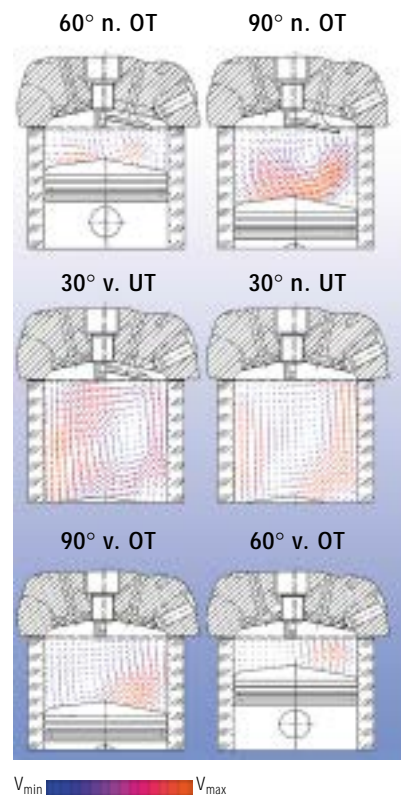


Bild 6: transiente FLOTEC-Messungen

Aussagen zur Wirbeldissipation können allerdings nur unter motorischen Bedingungen ermittelt werden. Hierzu bietet FLOTEC einen neuen, effektiven Zugang. Natürlich erlaubt FLOTEC auch den effizienten Einsatz weiterer optischer Messverfahren (z.B. LDA, PDA, LIF, Schlierenverfahren). ♦

Michael Breuer

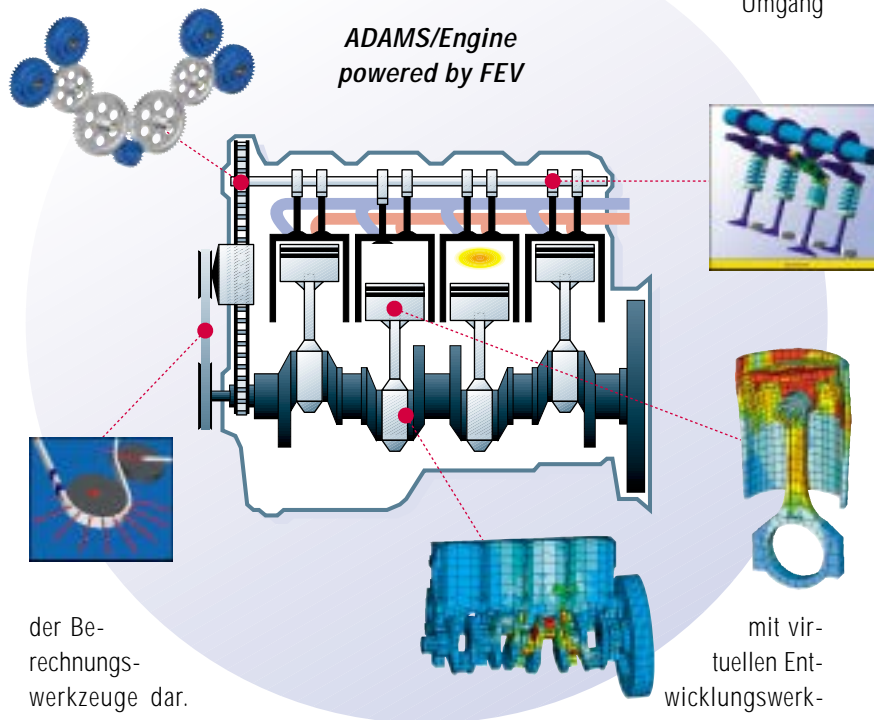


Strategische Partnerschaft: FEV und Mechanical Dynamics

Die FEV und Mechanical Dynamics (MDI) vereinbaren eine strategische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Motorensimulation. Ziel dieser Kooperation ist die gemeinsame Bündelung der Aktivitäten, um leistungsfähige Simulationswerkzeuge für den Motorenbau zu entwickeln und global zu vertreiben. Dabei bringt FEV die langjährige Entwicklungserfahrung und die umfangreichen Forschungsergebnisse für modernste Motorentechnik in die Partnerschaft ein. MDI steuert ihre langjährige und umfangreiche Erfahrung in der Entwicklung von Software für die virtuelle Produktentwicklung bei.

Motorenindustrie sowie die zahlreichen Forschungsprojekte, welche oft in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen durchgeführt werden, stellen eine hervorragende Grundlage für die Entwicklung

möglichst engen Verknüpfung mit den allgemein üblichen Verfahren der Versuchs- und Messtechnik bei der Gestaltung neuer Programmmodule herbeizuführen. Es besteht Einigkeit zwischen den Partnern, dass in Zukunft die Arbeitsabläufe im Umgang



der Berechnungswerkzeuge dar. Darüber hinaus kommen deren spezifische Anpassung und Erprobung unter Berücksichtigung der aktuellen Anforderungen des Marktes zukünftig allen Benutzern zu Gute. Weiterhin ist das deutlich gewachsene Entwicklungsteam zu nennen. Zukünftig können neue Programmmodule sehr viel schneller entwickelt beziehungsweise bestehende erweitert werden, um den aktuellen Marktanforderungen gerecht zu werden.

mit virtuellen Entwicklungswerkzeugen stark an den etablierten Gegebenheiten des jeweiligen Versuchsfeldes ausgerichtet werden müssen. Dies ist im Hause FEV bereits durch den Geschäftsbereich Mess- und Prüftechnik sichergestellt, welcher neben motorspezifischen Messinstrumenten auch komplette Prüfstände anbietet. Diese Kombination wird dem Ziel einer verstärkten Kopplung von Berechnung und Prüfstandsmessungen zugute kommen.

Zum Zwecke einer deutlichen Darstellung der neuen Kooperation zwischen beiden Unternehmen, tragen alle motortechnischen Softwaremodule der ADAMS Familie zukünftig den Namen

ADAMS/Engine powered by FEV.

Die Entwicklung moderner Verbrennungsmotoren erfolgt in immer kürzeren Zeiteinheiten und stützt sich zunehmend auf virtuelle Verfahren. Das hat zu einem weiten Anwendungsfeld für computergestützte Simulationswerkzeuge geführt, welches sich von der frühen Konzeptphase über die detaillierte Konstruktion bis hin zum Versuchsablauf erstreckt. Die umfangreichen Projektarbeiten der FEV für die weltweite Automobil- und

Aufgrund der zugrunde liegenden Datenstruktur dient die Software auch als CAE-Plattform für den Daten- und Modellaustausch. Somit wird der zunehmenden Globalisierung in den Entwicklungsprozessen Rechnung getragen, indem weltweit zusammenarbeitende Entwicklungsteams sowie beteiligte Zulieferer effizient kommunizieren können. Beide Unternehmen verfolgen die Philosophie einer

Erstes Ergebnis dieser neuen Zusammenarbeit wird das neue Kurbeltriebsmodul sein, welches sich bereits in der Entwicklung befindet. Weitere Module wie z.B. Rädertrieb, Kolbendynamik und Nebenaggregate sollen rasch folgen. ♦

Philipp Kley

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: A. Wittstamm
Layout: Der Design Pool, Aachen