

# FEV-Spectrum

Technologie - Highlights aus dem FEV-Arbeitsspektrum

Ausgabe 13 / Jan. 2000



## Benzindirekteinspritzung

*Benzindirekteinspritzung ist eines der vielversprechendsten Konzepte zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs zukünftiger otto-motorischer Fahrzeugantriebe. Aus der Berücksichtigung der ständig steigenden Anforderungen hinsichtlich Umweltverhalten, Komfort und Zuverlässigkeit resultieren bei der Entwicklung von Serien-Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung neue Herausforderungen für die FEV Motorentchnik.*

### 4 End-of-Line Heißtest

### 5 CAE-Unterstützung bei der Rädertriebsentwicklung

**U**nseren Lösungen beruhen auf dem Ansatz Simultaneous Engineering, bei dem die Motorkonstruktion, die Brennverfahrensentwicklung sowie die Entwicklung der katalytischen Abgasreinigung und der elektronischen Motorsteuerung Hand in Hand gehen.

Für die Brennverfahrensentwicklung gilt das Erreichen minimaler Rohemissionen bei maximaler Betriebsstabilität als wesentliches Kriterium. FEV's luftgeführtes Tumble-Brennverfahren erfüllt diese Anforderungen in einem weiten Bereich des Drehzahl-Last-Kennfeldes bei geschichteter Zylinderladung.

Verglichen mit den heute verfügbaren GDI Serienmotoren zeigt das FEV-Verfahren beträchtliche Vorteile im spezifischen Kraftstoffverbrauch und insbesondere hinsichtlich der Kohlenwasserstoff- und Rußemis-

sionen. Im geschichtet betriebenen Kennfeldbereich wird eine Rußkonzentration von durchschnittlich 0,2 Bosch-Einheiten mit Spitzenwerten nicht größer als 0,4 erreicht. Im Vergleich dazu wurden im Rahmen von Benchmarking-Untersuchungen an GDI-Serienmotoren bei niedriger Drehzahl Werte bis zu 1,9 Bosch-Einheiten ermittelt. Dieses Ergebnis deutet auf eine mangelhafte Abstimmung des Gemischbildungsprozesses hin.

Der Schlüssel für dieses günstige Betriebsverhalten des FEV-Verfahrens liegt in der konsequenten Grundauslegung auf eine weitgehend freie, nicht von Wandeffekten behinderte Strahlausbreitung im Brennraum. Mit Hilfe der variablen Abstimmung der Tumbleintensität kann der Gemischbildungs- und Schichtungsprozess in weiten Kennfeldbereichen gesteuert werden. ▶

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

**FEV**

Daneben weist das luftunterstützte Tumble-Brennverfahren auch eine hohe Betriebsstabilität auf. Der bereits erwähnte Vergleich mit den GDI-Serienmotoren zeigt im geschichteten betriebenen Kennfeldbereich Aussetzerraten bis zu 8 ‰, während die FEV-Entwicklungsziele keine Aussetzer tolerieren, dargestellt in einem ausreichend großen Betriebsfenster hinsichtlich Zünd- und Einspritzzeitpunkt. Dies wird durch eine sorgfältige Abstimmung der Zylinderinnenströmung, der Brennraumform sowie der Position und Ausrichtung des Kraftstoffinjektors und der Zündkerze erreicht.

Unter der Annahme heute üblicher Fahrzeug-Getriebe-Kombinationen zeigen Simulationsrechnungen, dass im Neuen

Fahrbetrieb auftretenden Bedingungen zu nutzen.

Hinsichtlich der Einhaltung zukünftiger Emissionsbestimmungen ist die Toleranz des Brennverfahrens gegenüber hohen Abgasrückführaten von Bedeutung. Hiermit lassen sich die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen signifikant reduzieren. Im Interesse eines guten instationären Motorbetriebsverhaltens ist der dynamischen Optimierung des AGR-Systems besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Das FEV-Verfahren beruht auf einem Tumble-Konzept. Das damit verbundene Einlasskanalkonzept ermöglicht einerseits hohe Durchflusskapazitäten, was sich

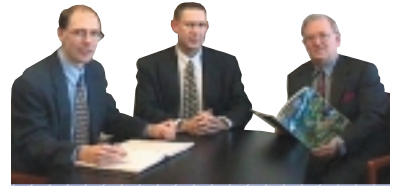
in einem exzellenten Vollastbetriebsverhalten niederschlägt. Andererseits ermöglicht diese Konfiguration, dass das FEV-Verfahren an einer Vielzahl existierender Ottomotoren-Familien, ohne tiefgreifende Einschnitte in die Motorarchitektur, applizierbar und auf vorhandenen Fertigungseinrichtungen herstellbar ist.

Die Entwicklung der Abgasreinigung für Ottomotoren mit Ben-

zindirekteinspritzung konzentriert sich auf die NO<sub>x</sub>-Adsorbertechnologie. Aber auch den Kohlenwasserstoffemissionen muss in diesem Zusammenhang besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Es besteht eine Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Speicherfähigkeit vom HC/NO<sub>x</sub>-Molenverhältnis im Rohabgas. Dies ist mit konkurrierenden katalytischen Reaktionen an den Pt-Kontakten des NO<sub>x</sub>-Adsorbers zu erklären. Darum hat sich heutzutage die Forderung nach niedrigen HC-Rohemissionen als gleichrangiges Entwicklungsziel

Europäischen Fahrzyklus der Motor überwiegend mit Drehzahlen bis zu 3.000 1/min und effektiven Mitteldrücken von bis zu 5 bar in einem Bereich betrieben wird, der mit dem luftgeführten FEV-Tumble-Brennverfahren mit geschichteter Zylinderladung dargestellt werden kann. Bei höheren Mitteldrücken wird ein zusätzlicher Betriebsmodus appliziert, der weitere Vorteile des Betriebes mit magerem, jetzt aber homogenem Gemisch realisiert. Damit ist es möglich, die Vorteile der mageren Verbrennung unter den meisten im realen Teillast-

## Zum Geleit



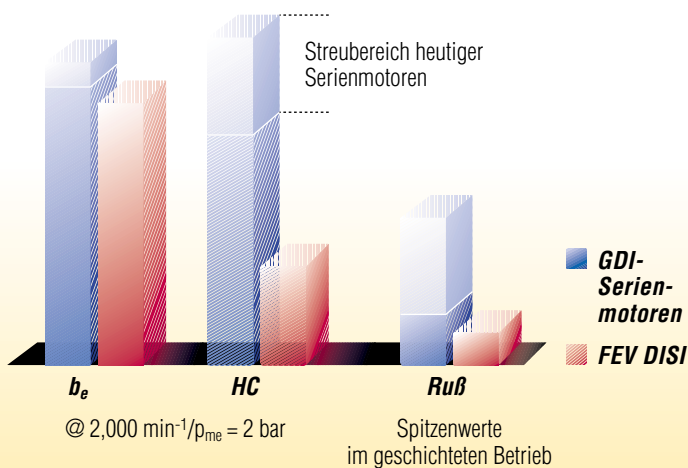
Liebe Leserinnen und Leser,

mit dieser Ausgabe des Spectrums begrüßen wir ein neues Jahrhundert und den SAE Kongress 2000. Dieser Kongress beleuchtet schwerpunktmässig die Entwicklung zukunftsweisender Technologien in der PKW- und LKW-Industrie, insbesondere im Bereich der Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs, der Abgasemissionen, der Integration von Elektronik- und Regelsystemen, der Dauerhaltbarkeit und der Kostenreduzierung. Mit über 950 Mitarbeitern unterstützen wir unsere Kunden in aller Welt mit fortschrittlichsten Ingenieurdienstleistungen und Prüfstands-ausrüstungen, um diese Herausforderungen zu meistern, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Entwicklungszeitpläne sowie der Kosten- und Dauerhaltbarkeitsziele.

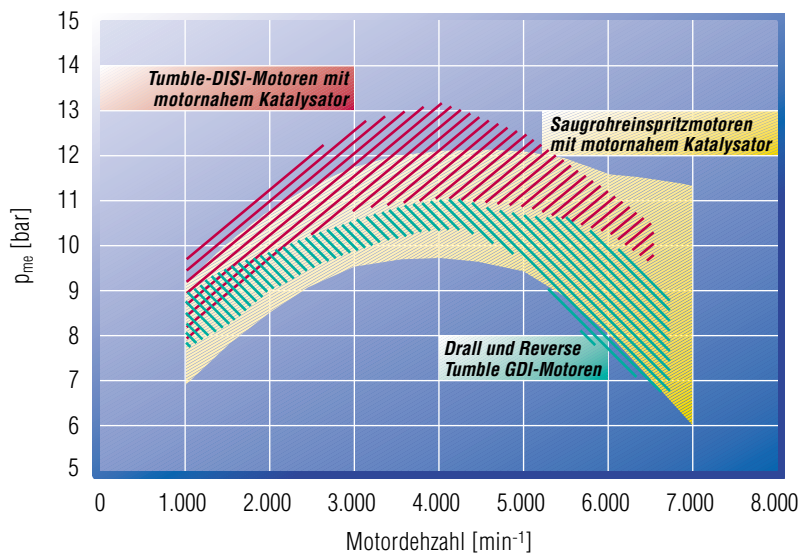
An unserem Standort in den USA verstärkt die FEV Engine Technology, Inc. ihre Leistungsfähigkeit durch die Expansion des Technischen Zentrums und mit der Beauftragung von anerkannten Experten. Wir sind deshalb stolz, die Ernennung von Prof. Dr. Peter Hofbauer als Executive Vice-President for Research & Development und von Dr. Joachim Wolschendorf als Vice-President of Engineering and Chief Technical Officer mitteilen zu können. Mit diesem Expertenteam nutzt die FEV Engine Technology, Inc. die langjährigen Erfahrungen im Bereich der Motorenforschung, -konstruktion und -entwicklung, um sich auf die wirtschaftlichen und umweltpolitischen Ziele der Kunden in den USA zu konzentrieren, ebenso wie die FEV Motorentechnik die Kunden in Europa und Asien unterstützt.

Gary Rogers, President and CEO,  
FEV Engine Technology, Inc.

### Vergleich mit Serien GDI-Motoren



### Vollastverhalten von 4-Zylinder-DISI-Motoren



etabliert. Gerade in dieser Hinsicht bietet das luftgeführte Arbeitsverfahren gegenüber den wandauftragenden Konzepten deutliche Vorteile.

Bei der Kalibrierung des Motors im Fahrzeug sind zusätzliche Aufgaben zu bearbeiten. Insbesondere aus der diskontinuierlichen Betriebsweise des NO<sub>x</sub>-Adsorbers ergeben sich neue Funktionalitäten, die von der Motorsteuerung bereitgestellt und vom Ingenieur appliziert werden müssen. In diesem Zusammenhang hat sich bei der FEV der Einsatz dynamischer Motorprüfstände bewährt, die gegenüber des Fahrzeugversuches in vielen Fällen eine höhere Flexibilität und Produktivität aufweisen. Diese Prüfstände verfügen über eine Modellierung der Fahrwiderstände, CVS-Verdünnungstunnel sowie eine Erfassung der Emissionen in Beuteln. Sie liefern überaus reproduzierbare Emissionsergebnisse, welche in einer Vielzahl von Entwicklungsprojekten bei der FEV nachgewiesen werden konnten. Wegen des fehlenden Fahrereinflusses lassen sich selbst die Auswirkungen kleinster Modifikationen auf die Emissionsergebnisse sicher bewerten. Mittels eines speziellen Rückkühlsystems können an dem Ver-

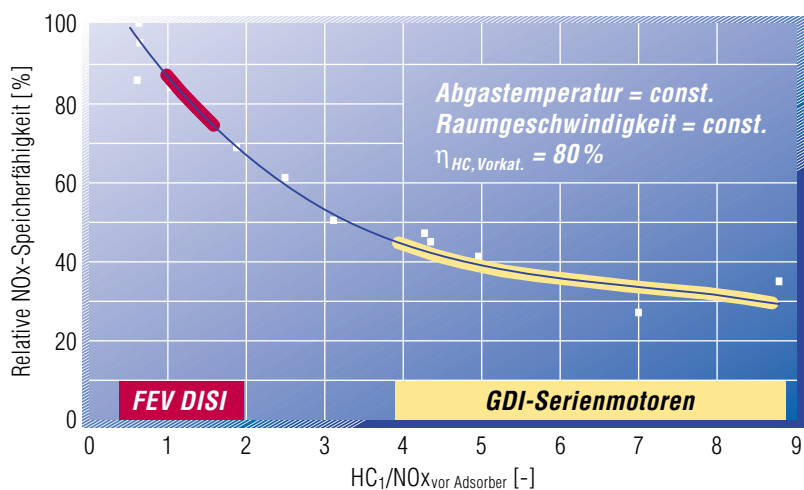
suchsträger bis zu vier Kaltstarttests je Schicht durchgeführt werden. Natürlich vereinfacht der Versuchsaufbau am dynamischen Motorprüfstand auch Änderungen der Hardware, die am Fahrzeug häufig mit Package-Kollisionen verbunden sind.

Die Elektronikentwicklung findet zunehmend in einer virtuellen Arbeitsumgebung statt, in welcher Motor- und Abgasreini-

gungssysteme modelliert sind. Auf diese Weise können die komplexen Motorsteuerungsprozeduren „off-line“ in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses vorab bedacht und beurteilt werden. Die Interaktionen der Motorsteuerungsfunktionen mit dem Betriebsverhalten des Motors einerseits und des Fahrers andererseits werden in Echtzeit simuliert. Das Motorsteuergerät ist mit der virtuellen Entwicklungsumgebung über Echtzeitschnittstellen verbunden („hardware in the loop“). Zur Implementierung neuer Regelstrategien und Algorithmen setzen die Spezialisten bei der FEV diverse Systeme ein, die sowohl off-line als auch im Bypass arbeiten, z.B. Matlab-Simulink und ASCET-SD.

Der gesamte Entwicklungsprozess von ottomotorischen Fahrzeugantrieben mit Benzindirekteinspritzung bedarf der engen Zusammenarbeit mit dem Motoren- und Fahrzeughersteller sowie mit deren Zulieferern. In diesem Kontext versteht sich die FEV als ein Mittler zwischen Forschung, die nach der besten Alternative strebt, und Serienentwicklung, die die maximalen Möglichkeiten bei begrenzten zeitlichen und finanziellen Ressourcen umzusetzen versucht. ♦ *Dr. Peter Wolters*

### HC/NO<sub>x</sub>-Trade-Off von NO<sub>x</sub> Adsorbern





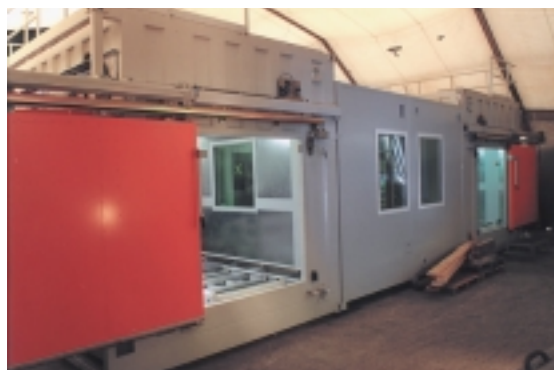
# End-of-Line Heißtest

Der Geschäftsbereich Mess- und Prüfsysteme der FEV ist bekannt für die hohe Qualität ihrer Produkte für Forschung und Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Diese Aktivitäten wurden nunmehr um ein zusätzliches Betätigungsfeld erweitert.

Neben der Durchführung von Entwicklungsprojekten, beginnend vom Konzept bis hin zur Fahrzeugapplikation, findet man die FEV nun auch am Ende Ihrer Motormontage.

Durch den Einstieg in den EOL-Heißtestbereich (End-Of-Line) und die damit einhergehenden Testphilosophien, ist die FEV nun in der Lage, einen Motor von der Konzeption bis zum Test am Ende der Motormontage als Gesamtlösung darzustellen.

Bei Einsatz eines FEV-Prüfstandes profitieren die Kunden von der langjährigen Erfahrung der FEV auf dem Gebiet der Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Mit diesem Hintergrundwissen wird jeder Produktionsprüfstand auf die individuelle Problematik eines Verbrennungsmotors ausgelegt. Bei der FEV weiß man, was gezielt überprüft und beleuchtet werden muß, damit kein Problem auftritt. Die FEV baut einen spezifischen Testzyklus so auf, dass ein kritisches Bauteil schon im EOL-Test auffällig wird und nicht erst beim Kunden.



**Beschickungsseite  
mit automatischer  
Schiebetür**

Im engen Zusammenhang mit diesem spezifischen Testzyklus steht die adäquate Hardware für eine Produktionsumgebung. Hardware,

- die kurze Taktzeiten bei geringen Investitionen sicherstellt,
- die der täglichen Beanspruchung einer Produktionsumgebung standhält – einer Umgebung, die gekennzeichnet ist durch Verschmutzung und geringste Wartung,
- die eine Verfügbarkeit von 95% und mehr erlaubt.

Die FEV fertigt komplette Prüfstandsmodule, entweder für Innen- oder Außenaufstellung, mit oder ohne integriertem Bedienraum; Prüfstandsmodule, die gemäß der jeweiligen Anforderungen ausgestattet sein können. Somit ist es nunmehr die Entscheidung eines jeden Kunden, welche Variante bzw. Teile des Gesamtsystems für die unterschiedlichsten Bedürfnisse eingesetzt werden sollen.

Hauptbestandteil des modularen Konzeptes ist die eigentliche Prüfstandshülle. Ihre primären Aufgaben sind Aufnahme der Prüfstandskomponenten, Schall- und Schwingungsdämmung, Brandschutz, Bediener-sicherheit, etc. Die Aufstellung kann auf jedem normalen Industrie-Hallenboden erfolgen.

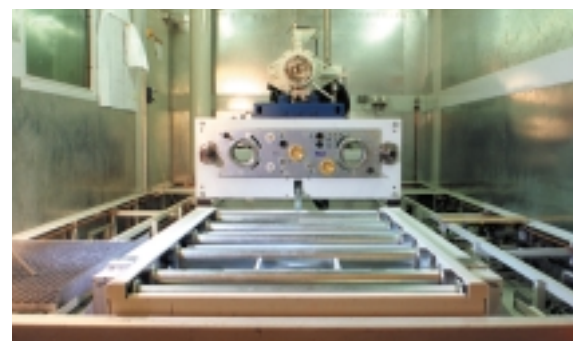
Diese Prüfstandsmodule sind spezielle Stahlkonstruktionen, die auf die Anforderungen eines EOL-Prüfstandes zugeschnitten werden. Eine Konstruktion, die die Herausforderungen der Gegenwart und der Zukunft abdeckt. Es ist ein weitestgehend eigenständiges Gewerk mit äußerst geringen Anforderungen an die Infrastruktur. Somit ein bequemer Weg beim Aufbau eines neuen Montagewerkes/EOL-Tests oder

bei der Renovierung eines bestehenden Prüffeldes.

Das Prüfstandskonzept zeichnet sich durch hohe Wirtschaftlichkeit, Flexibilität sowie extrem kurze Realisierungszeiten aus.

Die modulare Bauweise ermöglicht eine besonders einfache Erweiterung der Prüfkapazität durch Hinzufügen von zusätzlichen Einheiten, z.B. während des Produktionsanlaufes.

Das Auswechseln eines kompletten Prüfstandes ist ohne nennenswerte Beeinträchtigung des Betriebes von Nachbarprüfständen möglich.



Die Erweiterung der Prüfstands-ausrüstung durch Adaption von vorgefertigten Modulen, wie zum Beispiel Thermostatisierungsanlagen, ermöglicht eine schnelle Anpassung an neue Messaufgaben ohne hohe Zusatzkosten.

Die Module einschließlich ihrer Komponenten sind für eine Motorleistung bis zu 500 kW ausgelegt.

Bei der EOL-Prüfung kann ein Ablauf vollautomatisch erfolgen, nachdem der Motor die Wartestation verlassen hat. Der vorbereitete Aufbau wird in den Prüfstand eingebracht; der Prüfling ist dabei sicher auf der Heißtestpalette montiert.

Über vorkonfektionierte Rüstteile sind die Medienverbindungen zur Dockingplatte realisiert. Nach Einlauf in die Prüfzelle wird der Werkstückträger automatisch indexiert und arretiert. Das Dockingsystem inklusive der Wellenverbindung wird automatisch in Eingriff gebracht. ➔



Parallel dazu erfolgt die motorspezifische Programmierung der Prüfstands-ECU (Engine Control Unit). Während des folgenden Prüfzyklusses kann eine individuelle Kennfeldanpassung erfolgen.

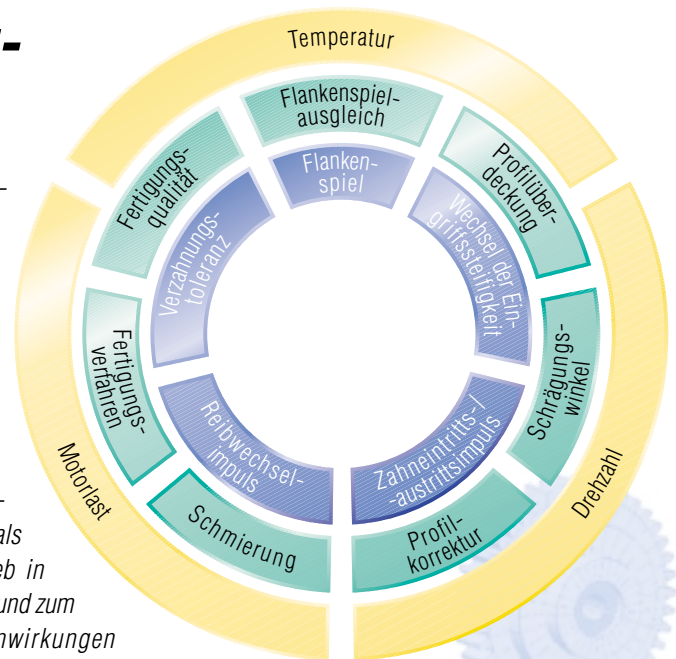
Nach Durchlaufen sämtlicher Sicherheitsüberprüfungen wird der Motor mit Kühlwasser, Kraftstoff, usw. befüllt. Der für diesen Motor spezifisch ausgearbeitete Prüflauf wird abgefahren. Dabei werden sämtliche sicherheitsrelevanten Daten permanent überwacht, alle bedeutenden Daten erfasst, berechnet, ausgewertet und gespeichert. Diese Abläufe erfolgen komplett automatisch. Der Prüflauf kann jedoch von einem autorisierten Anwender so gestaltet werden, dass ein manueller Eingriff jederzeit möglich ist. Abschließend wird der Motor abgekoppelt und verläßt die Station. Die relevanten Resultate (i. O. / n. i. O und andere) werden auf dem Datenträger der Palette festgehalten.

Mit dem nächsten Motor beginnt die gesamte Prozedur von neuem. ◆

Bernd Ansorge

## CAE-Unterstützung bei der Rädertriebsentwicklung

Aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und Dauerhaltbarkeit konnten sich Rädertriebe bisher in Nutzfahrzeug- und Industriemotoren zum Antrieb von Ladungswechselorganen, Einspritzpumpen und Nebenaggregaten etablieren. Wegen ihrer Drehzahlfestigkeit werden sie außerdem als Steuer- und Aggregatetrieb in Hochleistungsrennmotoren und zum Ausgleich freier Massenwirkungen 2. Ordnung in Ausgleichsgetrieben eingesetzt. Darüber hinaus ermöglichen sie eine für das Motorpackage wichtige, kompakte Steuertriebsanordnung. Aktuelle Entwicklungen, insbesondere von direkteinspritzenden PKW-Dieselmotoren mit Hochdruckeinspritzung, profitieren von diesen positiven Eigenschaften.



### Einflußgrößen auf das Rädertriebsgeräusch

#### Verzahnungsauslegung

Um den akustischen Anforderungen im Verbrennungsmotor zu genügen, ist neben der Dimensionierung einer Verzahnung die sorgfältige Gestaltung der Zahngeometrie der wichtigste Schritt bei der Auslegung. Der Anlagewechsel zwischen treibender Flanke und Rückflanke, der Ein- und Austrittsimpuls und der Wechsel der Eingriffssteifigkeit sind Ursachen für Geräuschemissionen. Diese und weitere Einflüsse müssen durch entsprechende Wahl der Verzahnung, Toleranzeinengung, Zahnkorrekturen und Überdeckung minimiert werden.

Bei der Verzahnungsauslegung werden unter Berücksichtigung von Werkstoffdaten, Fertigungsverfahren/-qualität, geometrischen Größen und den Belastungen folgende Beanspruchungen und die entsprechenden Sicherheiten gegen Versagen ermittelt:

- Zahnflankenpressung (Grübchenbildung)
- Zahnfußspannung (Zahnbruch) ◆

**D**urch den umfangreichen Einsatz von Simulationswerkzeugen kann das Betriebsverhalten von Rädertrieben vorausberechnet werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen in Konstruktion und Verzahnungsauslegung ein. Sie ermöglichen dadurch die optimale Gestaltung des Rädertriebes und der Zahngeometrie.



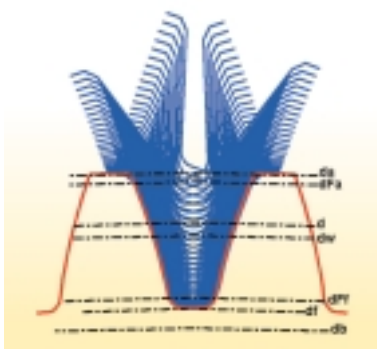
**Mehrkörper-Simulationsmodell: Steuertrieb eines DOHC V-Motors**

- Freßtemperaturen nach dem Integral- und Blitztemperaturverfahren (Fressen)
- Spezifisches Gleiten (Verschleiß)

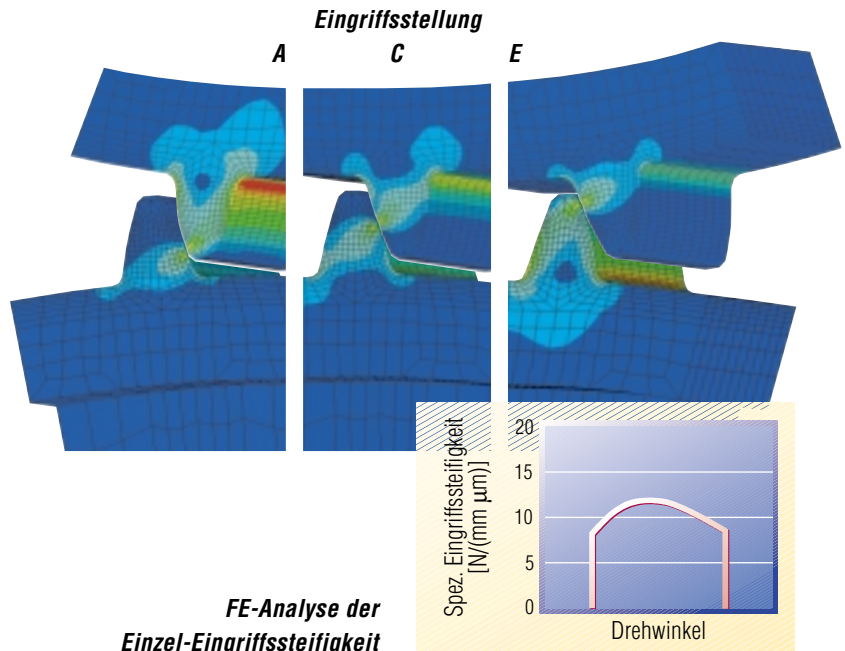
### Dynamiksimulation

Der Schwerpunkt im Entwicklungsprozess von Rädertrieben liegt in der Simulation des dynamischen Verhaltens mit Hilfe von Mehrkörpermodellen. Die dynamischen Belastungen eines komplexen Rädertriebes mit mehreren Getriebestufen sowie das Bewegungsverhalten der einzelnen Glieder werden innerhalb der Verzahnungsauslegung nur annähernd durch Einflußfaktoren erfaßt. Diese unterscheiden zwischen den individuellen Gegebenheiten im Verbrennungsmotor nur unzureichend oder gar nicht. Um Informationen über das dynamische Betriebsverhalten eines Rädertriebes zu erhalten, werden bei der FEV Simulationen mit Mehrkörpermodellen durchgeführt. Hierzu wird der Abwälzvorgang des Verzahnungswerkzeuges unter Berücksichtigung aller ausgeführten Profilkorrekturen nachgebildet und Koordinaten des Zahnprofils generiert. Mit Hilfe dieser Geometriedaten werden innerhalb einer FE-Analyse Steifigkeitsverläufe im Zahneingriff (Einzeleingriffssteife) ermittelt. Geometrie- und Strukturdaten dienen dann als Eingabegrößen für das physikalische Modell des Zahneingriffs in einem Mehrkörperssystem (MKS). Dort werden die Zahnflanken in diskrete Kontaktzonen mit den entsprechenden Dämpfungs- und Steifigkeitseigenschaften eingeteilt. Diese Art der Modellierung ermöglicht die last- und drehzahlabhängige Erfassung von:

- Profilüberdeckung
- Verlauf der Summen-Eingriffssteifigkeit
- Zahnein- und Zahnaustrittsimpuls
- Reibwechselimpuls



Simulation des Abwälzens eines Werkzeugprofils



FE-Analyse der Einzel-Eingriffssteifigkeit

Darüber hinaus werden:

- Flankenspiel und Toleranzen
- Dämpfungen im Spielbereich der Verzahnung
- Lager-/Struktursteifigkeit
- Antriebsmomente
- Kurbelwellenanregungen

im Modell berücksichtigt. FEV-eigene Software automatisiert dabei den Modellaufbau in der kommerziellen MKS-Softwareumgebung.

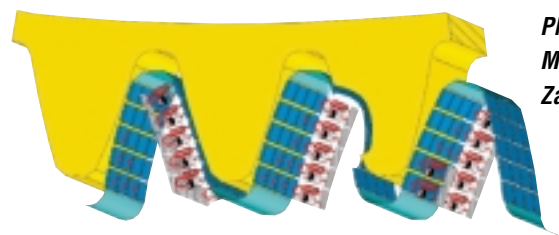
Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen geben Aufschluß über die Belastungen im Zahneingriff, Lastverteilung auf einzelne Zähne, Tragbild der Zahnflanken und Radkörperbewegungen (Drehschwingung, Kippen, axiale Bewegung) und fließen in eine optimierte Verzahnungsauslegung ein. Durch Analyse von Rädertriebsmodellen

- in verschiedenen Anordnungen
- mit verschiedenen Flankenspielen zur Simulation unterschiedlicher Wärmedehnungen oder Fertigungstoleranzen
- mit spielausgleichenden Elementen
- mit variierenden Struktursteifigkeiten

können Zahnflankenwechsel, dynamische Belastungen und unerwünschte Radkörperbewegungen minimiert und eine für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Konfiguration gefunden werden.

### Fertigung

Unter Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens werden Geometrie-/ Werkzeugdaten, Toleranzen, Korrekturen, Prüfmaße, Werkstoffkennwerte und radpaarungsspezifische Daten in einem Verzahnungs-



Physikalisches Modell des Zahneingriffs

datenblatt zusammengefaßt, welches den umfangreichen Layoutprozeß eines Rädertriebes abschließt. ♦

Stefan Trampert  
Markus Duesmann

## IMPRESSUM

FEV Motorentechnik GmbH  
Neuenhofstraße 181  
D-52078 Aachen  
Telefon: (0241) 56 89-0  
Telefax: (0241) 56 89-119  
<http://www.fev.com>  
e-mail: [marketing@fev.de](mailto:marketing@fev.de)

Redaktion: A. Wittstamm  
Layout: Der Design Pool, Aachen