

# Anforderungen an Einspritzsysteme für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren

## Teil 1

Dieser Beitrag der Robert Bosch GmbH befasst sich mit den Anforderungen an Dieseleinspritzsysteme bei schweren On- und Off-Highway-Anwendungen, wobei das letztgenannte Segment durch geringes Wachstum und spätere Einführung strengerer Emissionsgesetze gekennzeichnet ist. Der vorliegende Teil 1 beschreibt die technische Ist-Situation und zukünftige Trends sowie den Einfluss von Kraftstoffen und Schmiermitteln.

## 1 Einleitung

Die weltweite Produktion von Dieselmotoren wird auch zukünftig weiter steigen. Dies gilt insbesondere für den gesamten On-Highway-Bereich, das heißt für Pkw sowie leichte und schwere Nkw. Für den Off-Highway-Sektor werden zwar keine wesentliche Steigerungsraten im Zeitraum von 2001 bis 2005 erwartet, in allen anderen Marktsegmenten jedoch betragen die Steigerungsraten schätzungsweise 30 % innerhalb der nächsten fünf Jahre, **Bild 1**.

Bei der weltweiten Emissionsgesetzgebung sind große Unterschiede feststellbar. **Bild 2** zeigt in verschiedenen Schattierungen Industrieländer, die momentan strenge Gesetze haben und solche Länder, für die innerhalb von fünf beziehungsweise zehn Jahren ähnliche Emissionsgrenzwerte zu erwarten sind. Die Schwellenländer versuchen, den zeitlichen Abstand zu den Industrieländern immer weiter zu reduzieren.

Die Anforderungen der Emissionsstandards an Off-Highway-Motoren folgen den On-Highway-Standards mit Verzögerung. Im Off-Highway-Bereich werden, mit einer Verzögerung von schätzungsweise drei bis fünf Jahren, die gleichen Einspritztechniken wie bei On-Highway-Anwendungen benötigt. Der Unterschied zwischen Off-Highway- und On-Highway-Technik wird jedoch immer geringer. Bosch ist seit 75 Jahren Partner der Automobilhersteller und bietet heute für alle Marktsegmente und für jede Anwendung, On- und Off-Highway, das geeignete Einspritzsystem an.

Die Anforderungen in der „Dieselwelt“ sind sehr komplex. Die Marktanforderungen steigen ständig und die unterschiedlichen Rahmenbedingungen verschärfen sich. Die global tätigen Motorenhersteller erwarten aber, dass die Einspritzsysteme ohne länderspezifische Maßnahmen weltweit eingeführt werden können.

Im Folgenden stellt der Artikel ausschließlich schwere Nkw- und Off-Highway-Anwendungen detailliert dar.

## 2 Schwere Nkw

Während in anderen Marktsegmenten verschiedene Antriebssysteme diskutiert werden, sind Dieselmotoren bei schweren Nkw durch die hohe Wirtschaftlichkeit praktisch konkurrenzlos. Strenge, weltweit gültige Emissionsgrenzwerte erfordern anspruchsvolle technische Lösungen. Trotz bedeutender Verminderung der Rohemissionen wird zukünftig eine Abgasnachbehandlungen erforderlich sein. Ein Überblick der weltweiten Testverfahren für schwere Nkw zeigt, dass die Schwellen-

länder den Industrienationen folgen, **Bild 3**. Dementsprechend decken die europäischen, amerikanischen und japanischen Testverfahren die ganze Welt ab.

**Bild 4** zeigt die heute gültigen Zertifizierungszyklen für schwere Nkw in den Industrieländern, sowie die aktuellen und zukünftigen Emissionsgrenzwerte. Die Emissionsgrenzwerte sind festgelegt bis Euro V (2008), Modelljahr 2010 in USA und 2003 in Japan – ein Vorschlag 2005 in Japan liegt vor.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass in den letzten 15 Jahren eine Reduzierung der relevanten Emissionen von 72 % bis 86 % erreicht wurde, **Bild 5**. Dieser wichtige Erfolg wurde in erster Linie durch motorinterne Maßnahmen, wie zum Beispiel durch Motor- und Einspritzsystem-Verbesserungen sowie durch die Reduzierung des Schwefelgehalts im Dieselmotoren erreicht.

**Bild 6** bietet einen Überblick über die Maßnahmen, die notwendig waren, um die Euro-I-, Euro-II- und die heute gültigen Euro-III-Grenzwerte zu erreichen. **Bild 6** zeigt auch die zu erwartenden Maßnahmen für die zukünftigen Euro-IV- und Euro-V-Werte.

Es ist wahrscheinlich, dass ab Euro IV eine Abgasnachbehandlung in größerem Maße notwendig wird. Gleichzeitig müssen die Rohemissionen ausreichend reduziert werden. Haupt-Entwicklungsziel ist weiterhin die Senkung des Kraftstoffverbrauchs, bedingt durch die Forderung nach hoher Wirtschaftlichkeit der Motoren.

## Die Autoren



Dr.-Ing. Rudolf Maier ist Leiter des Produktbereichs Nutzfahrzeuge im Geschäftsbereich Dieselsysteme der Robert Bosch GmbH.



Dr.-Ing. Ulrich Projahn ist Leiter der Systementwicklung für Nutzfahrzeuge im Geschäftsbereich Dieselsysteme der Robert Bosch GmbH.



Dipl.-Ing. Klaus Krieger war bis 31. März 2002 Leiter der Entwicklung im Geschäftsbereich Dieselsysteme der Robert Bosch GmbH.

**Bild 7** zeigt, wie das Entwicklungsziel für schwere Nkw realisiert werden kann. Die Formung des Einspritzverlaufs ermöglicht eine weitere Verbesserung des Tradeoffs zwischen Partikel- und NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Motoren mit Abgasrückführung sowie Kraftstoffverbrauch und NO<sub>x</sub>-Emissionen für Motoren ohne AGR. Mit Abgasrückführung lassen sich weitere Verbesse-

## 1 Einleitung

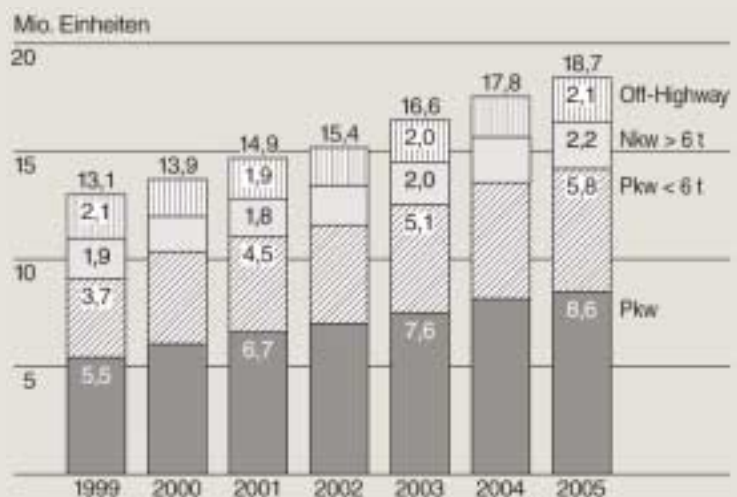


Bild 1: Weltweite Dieselmotorenproduktion  
Figure 1: World Diesel engine production

1 Einleitung



Bild 2: Weltweite Emissionsgesetzgebung – aktuelle Gesetzgebung  
 Figure 2: Worldwide emissions regulations – present regulations

2 Schwere Nkw



Bild 3: Weltweite Emissionsgesetzgebung – Testverfahren  
 Figure 3: Worldwide emissions regulations – test procedures

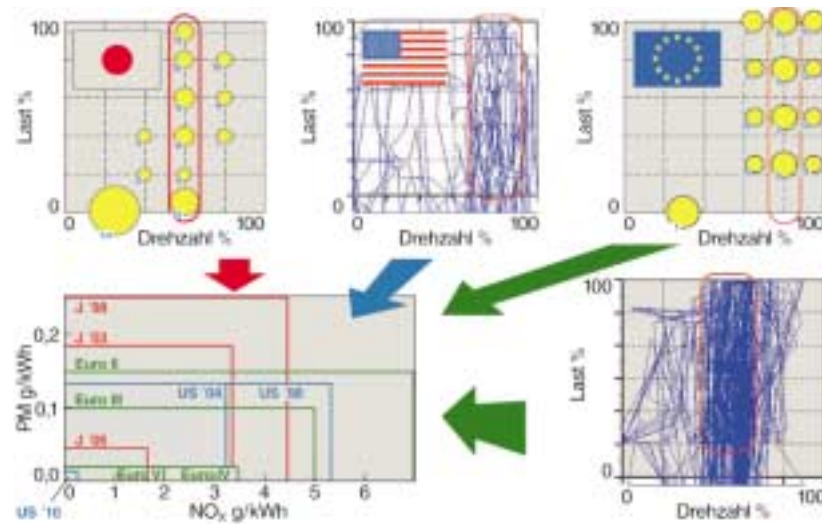


Bild 4: Schwere Dieselmotoren – Vielfalt der Testverfahren  
 Figure 4: Heavy-duty Diesel engines – complexity of test procedures

rungen erreichen, da die Einspritzung des Kraftstoffs in der Regel früher beginnen kann. Die Euro-IV- und Euro-V-Grenzwerte können mittels Abgasrückführung und eventuell durch den Einsatz von Partikelfiltern beziehungsweise DeNO<sub>x</sub>-Katalysatoren, **Bild 8**, erreicht werden.

Bei Abgasnachbehandlung gilt: Je geringer die Menge der Rohemissionen, umso einfacher kann das benötigte Nachbehandlungssystem ausfallen.

3 Off-Highway-Motoren

Off-Highway-Motoren werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt, unter anderem in Geländefahrzeugen, in Generatoren, in Schiffen, in Lokomotiven und in Nutzgeräten wie Rasenmähern sowie Bau- und Gartengeräten. Abhängig vom Anwendungsbereich werden diese Motoren nach verschiedenen Test-Zyklen zertifiziert, **Bild 9**.

Im Weiteren wird für den Vergleich zwischen On- und Off-Highway-Anwendungen der Fokus auf Off-Highway-Fahrzeugen gelegt. Unter anderem handelt es sich hier um Baufahrzeuge, Flughafenfahrzeuge und Fahrzeuge für Forst- und Landwirtschaft, **Bild 10**.

Off-Highway-Fahrzeuge werden weltweit nach dem Achtstufentest entsprechend ISO 8178-4 C1 zertifiziert, **Bild 11**.

Die Motoren der Off-Highway-Fahrzeuge sind in Leistungsklassen aufgeteilt, wobei bei steigender Motorleistung strengere Emissionsgrenzwerte gelten. Die japanischen Grenzwerte sind vergleichbar mit den europäischen Grenzwerten. Europäische NO<sub>x</sub>- und Partikel-Grenzwerte der Stufe 1 und 2 sind mit Tier 1 und 2 in den USA vergleichbar. Die Grenzwerte werden bedeutend strenger mit Einführung der amerikanischen Tier-3-Gesetzgebung, **Bild 12**, und der geplanten Tier-4-Gesetzgebung.

Für Tier 3 (Einführung zwischen 2006 und 2008; NO<sub>x</sub> = 4 g/kWh, PM = 0,2 g/kWh) sind Gemischoptimierung, Standard-Einspritzsystem und zum Teil AGR (Abgasrückführung für geringen Kraftstoffverbrauch) erforderlich.

Beim Tier-4-Szenario wird mit einer weiteren Verschärfung der Emissionsgrenzwerte (NO<sub>x</sub> ≤ 0,7 g/kWh, PM ≤ 0,05 g/kWh) und der Einführung eines „Transient Cycle“ gerechnet. Zur Erreichung dieser Grenzwerte würden zusätzlich Abgasnachbehandlung und schwefelfreie Dieselmotoren erforderlich. Eventuell kann Tier 4 mit Abgasrückführung, kombiniert mit einem DeNO<sub>x</sub>-Katalysator, erreicht werden, **Bild 13**.

#### 4 Vergleich zwischen On- und Off-Highway-Fahrzeugen

Schwere Nkw nehmen eine Vorreiterrolle in Bezug auf die Emissionsgesetzgebung und die erforderlichen Technologien ein. Ein direkter Vergleich zwischen den Grenzwerten für On- und Off-Highway Fahrzeuge ist jedoch wegen der verschiedenen Rahmenbedingungen schwierig. Der existierende Vorschlag für Tier 3 ist grob vergleichbar mit den Grenzwerten für schwere Nkw nach Euro III und dem US Modell-Jahr 2004. Das Erreichen des Tier-4-Ziels scheint fast so schwierig zu sein wie die Erfüllung der Grenzwerte US-Modell Jahr 2010 für schwere Nkw, **Bild 14**. **Bild 15** zeigt den Vergleich verschiedener Zertifizierungsmerkmale von schweren Nkw und Off-Highway-Fahrzeugen. Die bedeutenden Unterschiede in den Testzyklen und im Bereich der Motorleistung sind offensichtlich.

#### 5 Technische Trends der Einspritzsysteme

Im On-Highway-Einsatz war in Europa vor allem bei schweren Fahrzeugen die Reihenpumpe über viele Jahrzehnte das dominierende Einspritzsystem. Forciert durch die Emissionsgesetzgebung gab es seit Anfang der 90er Jahre eine schrittweise Umstellung auf elektronisch geregelte Hochdruckeinspritzsysteme wie Unit Injector (UIS) und Unit-Pump-System (UPS), **Bild 16**. Seit drei Jahren läuft auch die erste Common-Rail-Anwendung (CRS) in einem schweren Nkw in Serie.

Bei Leistungsklassen im MD-Bereich bietet die magnetventilgesteuerte Radialkolbenverteilerpumpe VP44 eine interessante Alternative. In den USA hingegen sind Unit-Injector- und Common-Rail-Systeme bereits seit Mitte der 80er Jahre im On- sowie teilweise im Off-Highway-Bereich im Einsatz.

Die meisten Off-Highway-Motoren werden heute üblicherweise noch mit den mechanischen Systemen Reihenpumpe, Verteilerpumpe und mechanische Einzelpumpe ausgerüstet. Auch hier gibt es, forciert durch die Emissionsgesetzgebung, zunehmende Forderungen nach höherer Spritzbeginnflexibilität und gesteigerten Drücken. Spätestens mit Tier 3 werden auch in diesen Anwendungen elektronische Hochdruckeinspritzsysteme Einzug halten.

Hersteller, die gleichzeitig Motoren für On- und Off-Highway-Anwendungen anbieten, werden aus Standardisierungsgründen schon früher HD-Einspritzsysteme im Off-Highway-Einsatz haben.

## 2 Schwere Nkw

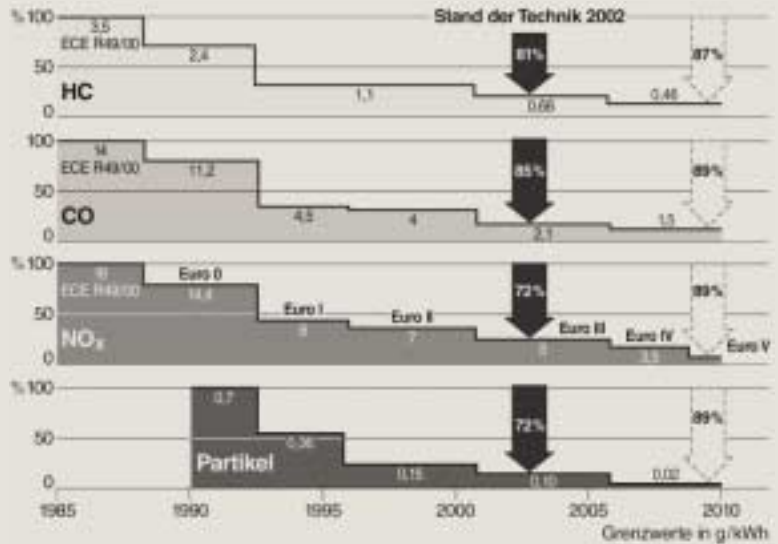


Bild 5: Schwere Nkw – Reduzierung der europäischen Emissionsnormen  
Figure 5: Heavy-duty vehicles – reduction of European emissions standards

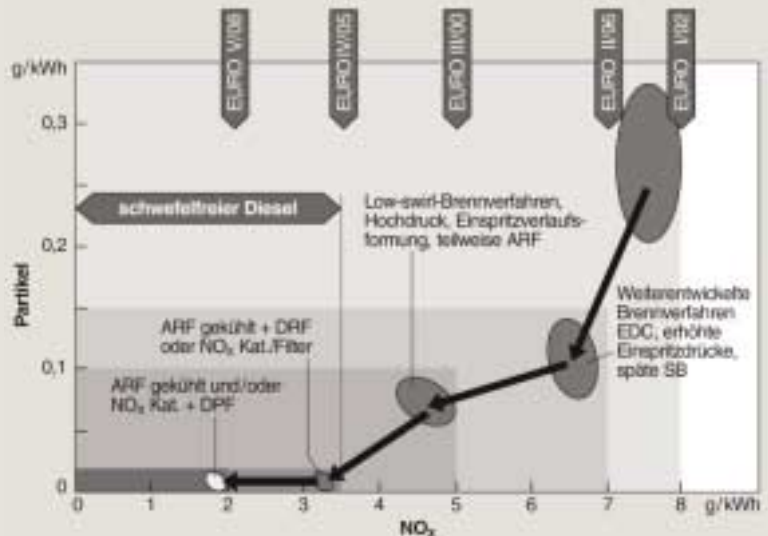


Bild 6: Emissionsreduzierung für schwere Nkw und Maßnahmen  
Figure 6: Emissions reduction for heavy-duty engines and measures

Die Herausforderung für Hersteller von Einspritzsystemen liegt darin, die primär für den Straßeneinsatz entwickelten Einspritzsysteme auch für den Einsatz in Off-Highway-Anwendungen abzustimmen.

#### 6 Vergleich Einsatzbedingungen Off- und On-Highway

Die Anforderungen von Off-Highway-Anwendungen an das Einspritzsystem sind äußerst vielschichtig, **Bild 17**.

Der Betrieb mit alternativen Kraftstoffen oder mit Diesel-Kraftstoff schlechter Qualität ist bei allen Off-Highway-

Anwendungen ein wesentliches Merkmal, während besonders anspruchsvolle Lastkollektive oder extreme Schüttelbeanspruchungen hauptsächlich bei Bau- und Landmaschinen auftreten. Auch spezielle Umweltbedingungen oder extreme Stillstandszeiten sind charakteristisch für Off-Highway-Anwendungen.

##### 6.1 Lastkollektive

Lastkollektive, das heißt die im Praxisbetrieb über der Zeit auftretenden Last- und Drehzahlanteile, bestimmen in hohem Maße die zu erwartende Lebensdauer des Einspritzsystems.

# So hart

**AUTO**  
*creative*

Innovative  
Systemlösungen  
für den  
Automobilbau

»Ja, ich möchte mehr über DURETHAN® BKV 330 H2.0 wissen. Bitte schicken Sie mir ausführliche Produktinformationen.« FAX: +49 214/30-7 26 66 oder [www.plastics.bayer.de](http://www.plastics.bayer.de)

<input type="text"/>
<input type="text"/>
<input type="text"/>
<input type="text"/>
<input type="text"/>
<input type="text"/>

Firma, Funktion

Name, Vorname

Straße

Ort

Telefon, Fax

E-mail



Machen Sie sich stark  
mit DURETHAN!  
Als Dankeschön erhalten  
die ersten 100  
Interessenten einen  
Ergoflexor-Krafttrainer.

# wie Durethan®!



**Durethan® BKV 330 H2.0** Optimierte Verschweißbarkeit und extreme Berstdruckfestigkeit

Kfz-Ansaugrohre müssen im harten Auto-Alltag extreme Dauer- und Höchstbelastungen aushalten. Mit DURETHAN BKV 330 H2.0 gibt es jetzt einen Werkstoff, mit dem Sie alles sicher im Griff haben. Bei der Verarbeitung ist die Viskosität von DURETHAN BKV 330 H2.0 optimal auf die unterschiedlichen Anforderungen abgestimmt – sowohl beim Spritzgießen als auch beim Vibra-

tions- oder Heizelemente-Schweißen. Das ermöglicht eine hohe Prozesssicherheit und extreme Berstdruckfestigkeit des Bauteils. Auch bei Spitzentemperaturen von bis zu 170 °C, die bei Hightech-Motoren leicht erreicht werden können, haben Sie mit DURETHAN BKV 330 H2.0 beruhigende Sicherheitsreserven. DURETHAN – neuer Stoff für Ihre Ideen.

Geschäftsbereich Kunststoffe

**Bayer** 

Im On-Highway-Bereich sind die Last-/Drehzahlvariationen vor allem bei Langstreckenfahrzeugen verhältnismäßig gering. Bei Verteilerfahrzeugen treten in vergleichbaren Zeiträumen hingegen schon erheblich mehr Lastwechsel auf, **Bild 18**.

Wesentlich kritischer ist die Situation bei Baumaschinen. Bei Baggern zum Beispiel wird die Belastung im Sekundentakt sprunghaft zwischen Voll- und Null-Last variiert. Dies stellt sowohl für das Fahrzeug als auch für die Einspritzausrüstung eine extreme Belastung dar.

6.2 Stillstandszeiten

Lange Stillstandszeiten sind bei vielen Off-Highway-Anwendungen ebenfalls charakteristisch. Beispiele hierfür sind Notstromaggregate in Industrieanlagen oder öffentlichen Gebäuden, Erntemaschinen wie Mähdrescher, oder allgemeine Saison-Arbeitsmaschinen wie Pistenbullys oder Schneeräumgeräte.

Derartige Applikationen benötigen eine besonders sorgfältige Wartung, um den aus der Stillstandszeit resultierenden Risiken wie Korrosion oder Kraftstoffalterung begegnen zu können.

6.3 Kraftstoffe

6.3.1 Dieselkraftstoff

Im Hinblick auf Funktionstüchtigkeit und Lebensdauer der Einspritzausrüstung nimmt die Art und Güte des Kraftstoffs eine Schlüsselstellung ein. Die sorgfältige Spezifikation der Kraftstoffe und die Gewährleistung der definierten Eigenschaften sind mit entscheidend bei der Auslegung neuer Einspritzsysteme und deren Betrieb im Fahrzeug. Die Einführung neuer Kraftstoffe setzt Kompatibilität mit den bereits in Millionenstückzahlen in Serie gefertigten Einspritzsystemen voraus.

Die unterschiedlichen Grundeigenschaften des Rohöls erfordern entsprechend angepasste Raffinationsverfahren, um die jeweiligen Kraftstoffnormen im Hinblick auf die Einhaltung der darin spezifizierten Werte wie Schwefelgehalt, Cetanzahl etc. zu gewährleisten. Die dazu notwendigen Verfahren können Schmier-eigenschaften und Oxidationsstabilität negativ beeinflussen. Die korrekte und umfassende Normung der Kraftstoffe ist aus diesem Grund zwingend notwendig. Die am weitesten reichende Spezifikation von Dieselkraftstoff, die unter Beteiligung der Association des Constructeurs Européen d'Automobiles (ACEA) entwickelte wurde, ist in der „World-Wide Fuel Charter“ niedergelegt. Dieser auch von Bosch getragene Vorschlag geht über

2 Schwere Nkw

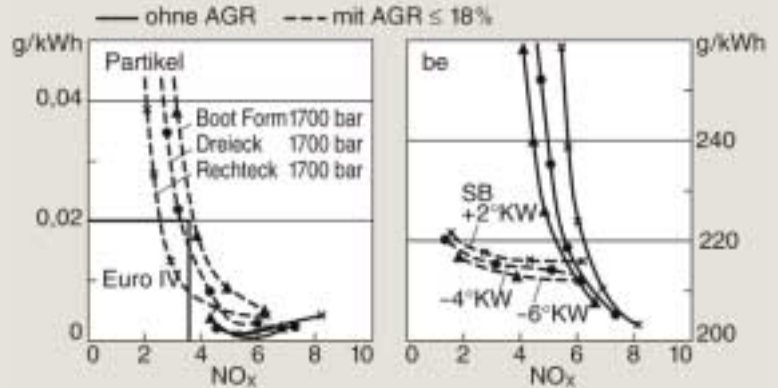


Bild 7: Einfluss der Einspritzverlaufsformung und AGR auf die Emission  
Figure 7: Effect of rate shaping and EGR on emissions

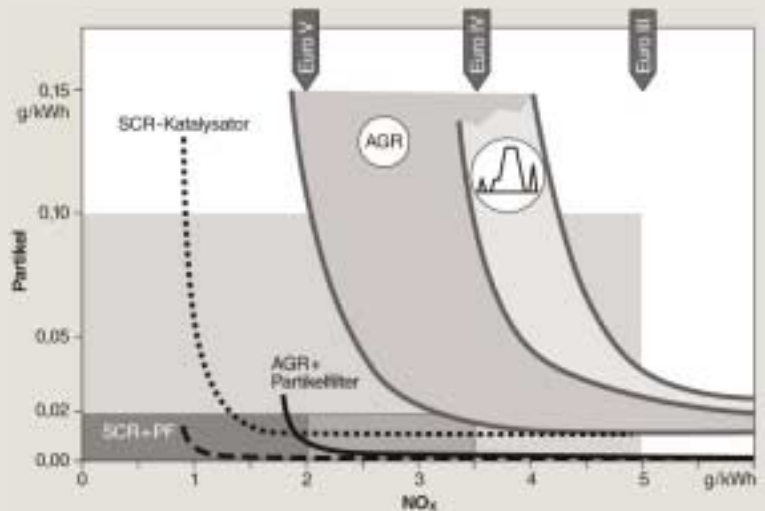


Bild 8: Maßnahmen zur Erreichung der Euro-III-, Euro-IV- und Euro-V-Grenzwerte  
Figure 8: Measures to meet emissions legislation of Euro III ... V

3 Off-Highway-Motoren

Anwendungen*	ISO 6178 Testverfahren	Charakteristiken
Off-Highway Fahrzeuge	C1 (C2: Benzin)	6 Stufen: Nenn-, Zwischendrehzahl, LL
Konstante Drehzahl (Generatoren)	D1	3 Stufen: Nennendrehzahl
	D2	5 Stufen: Nennendrehzahl
Schiffsanwendungen	E1, E2, E3, (E4: Benzin), E5	4-5 Stufen: unterschiedliche max. Nenn-, Zwischendrehzahl, LL
Lokomotiven	F	3 Stufen: Zwischendrehzahl, LL
Hilfsantriebe, Gartengeräte	G1	6 Stufen: Zwischendrehzahl, LL
	G2	6 Stufen: Nennendrehzahl, LL
	G3	2 Stufen: Nennendrehzahl

\*Anwendungen gemäß ISO 6178: Pelletaggregaten (Off-Highway), stationäre und transportable Anwendungen, ausgenommen Motoren für on-Highway Pelletaggregat.

Bild 9: Testzyklen für Zertifizierung und Charakteristiken  
Figure 9: Test cycles for certification and characteristics

die in den heute gültigen nationalen und internationalen Normen festgelegten Anforderungen hinaus. In **Bild 19** ist ein Vergleich zwischen dem ACEA-Vorschlag und der europäischen, japanischen und amerikanischen Normung wiedergegeben. Speziell die Haupteinflussgrößen wie Schmierfähigkeit, Partikel- und Wassergehalt, die für eine einwandfreie Funktion des Einspritzsystems eine Grundvoraussetzung sind, werden in den Normen von Industrienationen wie Japan und USA nur unvollständig berücksichtigt. Bild 19 zeigt, dass es bereits bei den Normwerten erhebliche Unterschiede gibt. Die in den verschiedenen Märkten erhältlichen beziehungsweise verwendeten Kraftstoffe weisen zum Teil noch wesentlich größere und kritischere Abweichungen auf. Neben unvollständiger Definition hängt die Qualität beim Endverbraucher auch noch von anderen Faktoren ab. Berücksichtigt man die Umstände, unter denen Off-Highway-Anwendungen betrieben werden, dann muss in diesem Sektor zwangsläufig mit schlechteren Rahmenbedingungen hinsichtlich der Kraftstoffqualität gerechnet werden.

### 6.3.2 Aviation Turbine Fuel (Kerosin)

Kraftstoffgeschmierte Verteilerpumpen und Hochdruckpumpen für Common-Rail-Systeme enthalten eine Vielzahl von Kontaktstellen zwischen beweglichen Teilen, die auf eine gute Schmierfähigkeit des Kraftstoffs angewiesen sind. Ist eine ausreichende Mindestschmierfähigkeit des Kraftstoffs nicht gegeben, dann treten Adhäsiv- und Schwingungsverschleiß auf [1]. Dies führt anfänglich zu Funktionsbeeinträchtigungen, mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Abgaszusammensetzung [2], später zum Totalausfall der Pumpe. Je nach Kraftstoffqualität kann es innerhalb weniger Kilometer beziehungsweise Betriebsstunden zum Ausfall von Einspritzkomponenten kommen. Dies war bei der Einführung stark entschwefelter Dieseldieselkraftstoffe in Schweden und Kalifornien Anfang der 90er Jahre der Fall, als vermehrt Ausfälle bei Verteilereinspritzpumpen aller Hersteller auftraten. Für alle Dieseleinspritzsysteme, speziell für die mehr als 40 Millionen im weltweiten Einsatz befindlichen Systeme, ist es deshalb unabdingbar, dass der angebotene Kraftstoff über ausreichende Schmiereigenschaften verfügt. In Off-Highway-Anwendungen werden, wegen guter Verfügbarkeit (zum Beispiel Flughäfen), Aviation Turbine Fuel (zum Beispiel Jet A, F35, JP4) verwendet, beziehungsweise Dieseldieselkraftstoffe mit Aviation Turbine

## 3 Off-Highway-Motoren

	Norm	Testverfahren	Anwendungen
EU	Stage 1, Stage 2 (97/68/EC)	ISO 8178-4 C1	Baufahrzeuge, Straßenbaufahrzeuge, Mobilkräne, usw.
	Gleiche Norm, spätere Einführung (2000/25/EC)	ISO 8178-4 C1	Land & Forstwirtschaft
USA (EPA+CARB)	Tier 1, Tier 2, Tier 3, Tier 4	ISO 8178-4 C1, Tier 4 (möglich Transient Cycle)	Baufahrzeuge, Industrieanwendung, Land & Forstwirtschaft
Japan	MOT/EA	ISO 8178-4 C1	Off-Highway Fahrzeuge ohne Baufahrzeuge
	MOC	ISO 8178-4 C1	Baufahrzeuge

Bild 10: Emissionsgesetzgebung – Norm für Diesel-Off-Highway-Fahrzeuge  
 Figure 10: Emissions legislation standards for Diesel off-highway vehicles

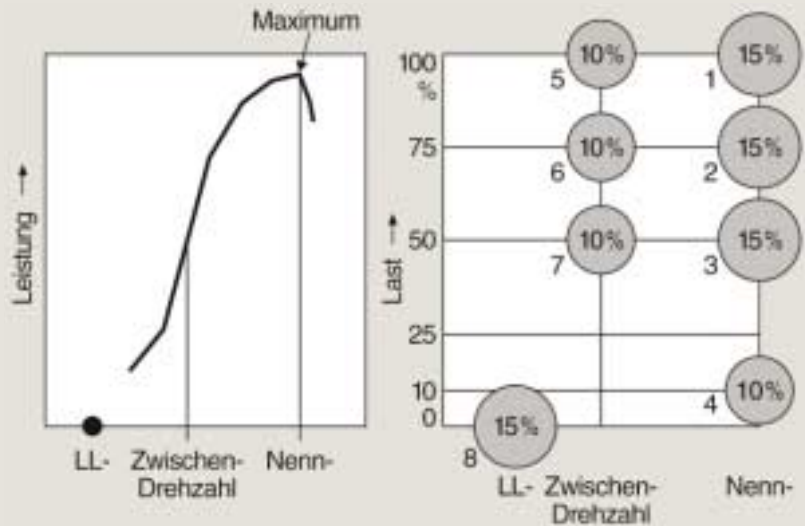


Bild 11: Testzyklus für Off-Highway-Fahrzeuge – Achtstufentest  
 Figure 11: Test cycle for off-highway vehicles 8-mode cycle, according to ISO 8178-4 C1

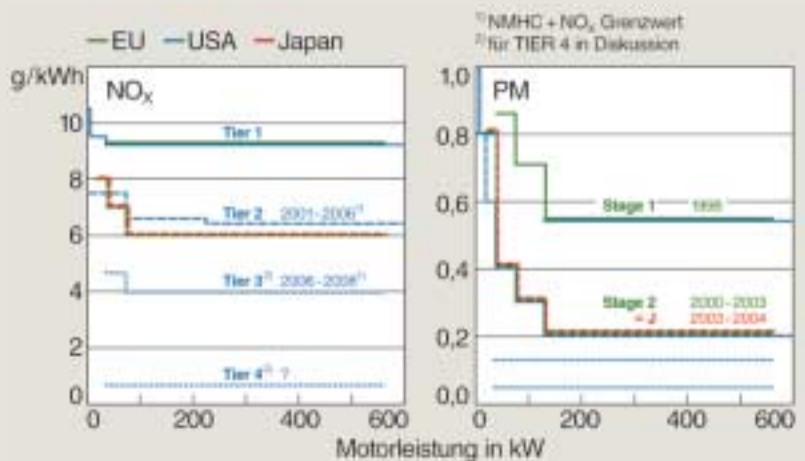


Bild 12: Emissionsgesetzgebung – Diesel-Off-Highway-Fahrzeuge  
 Figure 12: Emissions legislation Diesel off-highway vehicles



3 Off-Highway-Motoren

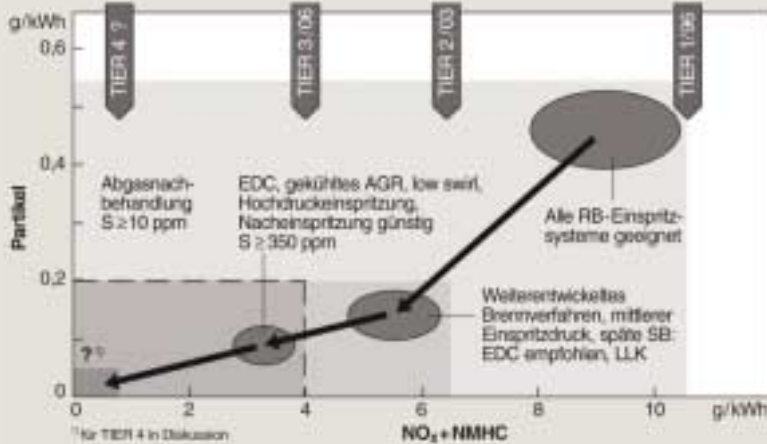


Bild 13: Emissionsreduzierung und Maßnahmen für Diesel-Off-Highway-Fahrzeuge  
 Figure 13: Emissions reduction and measures for Diesel off-highway vehicle USA (EPA), engine output range 130-225 kW

4 Vergleich zwischen On- und Off-Highway-Fahrzeugen

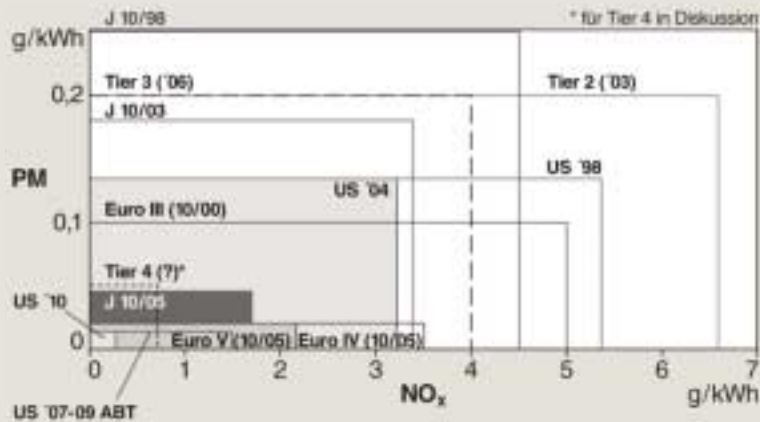


Bild 14: Emissionsgesetzgebung – Grenzwertvergleich On- und Off-Highway  
 Figure 14: Emissions legislation Diesel HDV vs. US off-highway (130-225 kW)

	On-Highway schwere Nkw	Off-Highway Fahrzeuge
Zertifizierung	Motor	Motor
Test Zyklus	stationär 13-Stufen-Test ECE R49, ESC, J 13M	8-Stufen-Test ISO 8178-4 C1
	transient ETC, USTC, (JTC), (WHDC) <sup>1</sup>	möglich Tier 4 (unterschiedlich zum Nkw-Test)
Leistungsbereich	≥ 90 kW	bis zu kleinen Motoren < 8 kW
Strengste Regelung	USA MJ 2010	USA Tier 4

Bild 15: Vergleich On-/Off-Highway-Fahrzeuge  
 Figure 15: Comparison certification methods on-highway/off-highway vehicles

Fuel versetzt, um das Fließverhalten bei niedrigen Außentemperaturen zu verbessern. Bedingt durch die sehr geringe Schmierfähigkeit des unadditivierten Aviation Turbine Fuels kann es, wie Laborversuche zeigen, innerhalb weniger Betriebsstunden zu raschem Verschleiß und Totalausfall des Aggregats kommen. Bild 20 zeigt – nach lediglich 189 h Betrieb mit Kerosin F35 – die durch Verschleiß zerstörten Bauteile einer kraftstoffgeschmierten CR-Hochdruckpumpe.

6.3.3 Fatty Acid Methyl Ester (FAME)

Pflanzenöle wurden in Verbrennungsmotoren bereits kurz nach deren Erfindung eingesetzt [3]. Bedingt durch die rasch einsetzende Entwicklung der Erdölindustrie und die Verfügbarkeit billiger Kraftstoffe waren derartige Produkte nicht konkurrenzfähig und spielten demzufolge bis zur so genannten „Energiekrise“ Anfang der 70er Jahre und dem gleichzeitig aufkommendem Umweltbewusstsein keine Rolle. Kraftstoffe auf Pflanzenölbasis bieten aufgrund des molekular gebundenen Sauerstoffs hinsichtlich des Emissionsverhaltens (insbesondere Ruß) Vorteile gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen. Daneben fördern agrarpolitische Aspekte den Anbau regenerativer Energien, zum Beispiel als Alternative zu prämiengünstigter Flächenstilllegung beziehungsweise hochsubventioniertem Export landwirtschaftlicher Produkte.

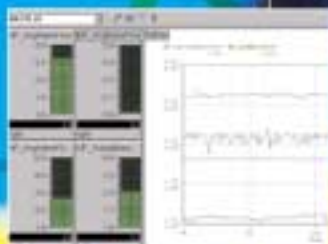
FAME (Fatty Acid Methyl Ester)-Kraftstoffe können tierische oder pflanzliche Fette und Öle als Ausgangsbasis haben. Rapsmethylester (RME) ist dabei der in Europa bekannteste und am weitesten verbreitete Kraftstoff auf Pflanzenbasis. Derartige Kraftstoffe sind für das Einspritzsystem sehr kritisch, da sie Elastomere und Kunststoffe angreifen. Freie Fettsäuren, Essig- und Ameisensäure sowie Methanol haben Korrosion zur Folge, freies Glycerin und Glyceride greifen NE-Metalle an und können zu Ablagerungen, Bild 21, und zum Verstopfen des Kraftstofffilters führen. Aufgrund des hohen Elastizitätsmoduls ergeben sich, im Vergleich zu Dieselmotoren, teilweise höhere Einspritzdrücke, was zu einer Verminderung der Lebensdauer führen kann.

Die Verwendung von FAME-Kraftstoff ist besonders im Agrarbereich weit verbreitet. Kritisch aufgrund der im Vergleich zu Dieselmotoren geringeren Oxidationsstabilität sind die im diesem Sektor oftmals langen Stillstandszeiten (zum Beispiel bei Mähreschern). Bei einer Verteilereinspritzpumpe waren wenige Tage nach Beendigung eines Dauerlaufs sämt-

# Lösungen auf die man vertrauen kann



Motorenhaus III von DaimlerChrysler



Im Auftrag der DaimlerChrysler AG errichtet AVL das modernste Test- und Prüfstandscenter der Welt. Für das „Motorenhaus III“ werden insgesamt 60 Prüfmodule sowie Schlüsselssysteme in den Bereichen Automatisierung, Indizierung und Kraftstoffmesstechnik geliefert.

Das rasante Tempo der Motorenentwicklung erfordert effiziente Messsysteme, um Prüfstandszeiten zu sparen. AVL hat diesen Trend erkannt und mit der Innovation **Fuel Mass Flow Meter** in der Verbrauchsmesstechnik neue Standards gesetzt:

- Messgenauigkeit 0.12% unter realen Einsatzbedingungen
- Langzeitstabile Kalibrierung
- Eingebaute Genauigkeitsprüfung nach ISO9001
- Hochgenaue Messung dynamischer Kraftstoffverläufe
- Geringste Messwertstreuung bei kurzen Messzeiten
- Hohe Wiederholbarkeit der Messergebnisse durch präzise Kraftstofftemperaturregelung

Unsere Kunden können sich darauf verlassen, dass wir bei der Umsetzung unserer Aufgaben immer innovative und brauchbare Lösungen schaffen:

[www.avl.com/consumption](http://www.avl.com/consumption)

AVL DEUTSCHLAND GMBH  
PETER-SANDER-STRASSE 32  
85050 NAINZ-KASTEL  
TEL: + 49 8124 7179-0  
FAX: + 49 8124 3588  
EMAIL: [AVL.DEUTSCHLAND@AVL.COM](mailto:AVL.DEUTSCHLAND@AVL.COM)

TECHNISCHE BÜROS:  
BERLIN, KÖLN, MANNHEIM,  
MÜNCHEN, STUTTGART, WOLFSBURG

5 Technische Trends der Einspritzsysteme

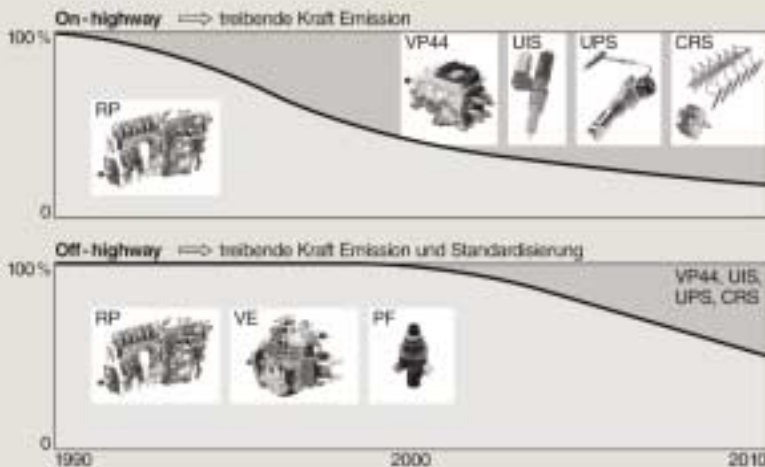


Bild 16: Einspritzsysteme für On-Highway- und Off-Highway-Hochdruck-Kraftstoff-Einspritzsystem  
 Figure 16: Injection systems for on-highway and off-highway high pressure fuel injection system

6 Vergleich Einsatzbedingungen Off- und On-Highway

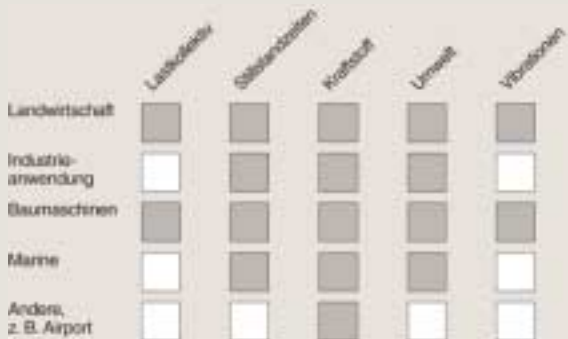


Bild 17: Anforderung an die unterschiedlichen Off-Highway-Anwendungen  
 Figure 17: Requirements of different off-highway applications

6.1 Lastkollektive



Bild 18: Vergleich von typischen On-highway-/Off-Highway-Lastkollektiven  
 Figure 18: Comparison of typical on-highway/off-highway load maps

liche, in direktem Kontakt stehende Bauteile miteinander „verklebt“ und nur unter Einsatz entsprechender Lösungsmittel wieder zu lösen. Um dies zu verhindern, ist rechtzeitig vor der Außerbetriebnahme der gesamte Kraftstoffkreislauf mit Dieseldieselkraftstoff zu spülen.

Problematisch ist auch die wechselnde Betankung mit FAME und Dieseldieselkraftstoff (Diesel-FAME-Mischungen). Probleme, die im Dauerlaufbetrieb mit reinem Kraftstoff auftreten, stellen sich mit Mischungen in etwas abgeschwächter Form und nach etwas längerer Betriebszeit ebenfalls ein [4]. Darüber hinaus hat zum Beispiel RME ein deutlich höheres Lösungsvermögen für Wasser als Dieseldieselkraftstoff (1000 ppm zu 200 ppm). Unterschiedliche Mischungsverhältnisse durch Zugabe von Dieseldieselkraftstoff führen zur Entmischung und damit zur Bildung freien Wassers und der damit verbundenen Probleme.

6.3.4 Motoröl

Die vor allem im Off-Highway-Bereich ausgeübte Praxis, beim Ölwechsel angefallenes Motoröl durch Zugabe zum Kraftstoff im Motor zu verbrennen und so zu „entsorgen“ ist für das Einspritzsystem ebenfalls problematisch. Die im Altöl dispergierten Feinstpartikel (Metallabrieb, Oxide, Silikate, Ruß) können erhöhten Abrasiv- beziehungsweise Erosivverschleiß und Ablagerungen hervorrufen. Truhan et al. [5] berichten von einer merklichen Anzahl von Injektorausfällen, die bei Fahrzeugflotten innerhalb von 160.000 km auftraten, bei denen dem Kraftstoff Altöl beigemischt wurde und die nicht durch ausreichende Filtration geschützt waren. Weiterhin besteht die Gefahr, dass sich der Kraftstofffilter vornehmlich durch den im Altöl dispergierten Ruß zusetzen kann. Abgesehen von den möglichen Folgen für das Einspritzsystem ist die Zugabe von Motoröl zum Kraftstoff bedenklich, da sich der Schwefelgehalt erhöht. Unter Umweltsicht ist die Verbrennung der zahlreichen im Motoröl vorhandenen chemischen Verbindungen ebenfalls fraglich.

6.3.5 Feststoffteilchen

Die zum Teil in Dieseldieselkraftstoff enthaltenen Verunreinigungen setzen sich aus harten, verschleißauslösenden Partikeln, Rost und organischen Bestandteilen zusammen. In Agraranwendungen treten Gras, Laub etc. als zusätzliche Verschmutzung auf. Auch visuell reine Kraftstoffe enthalten zahlreiche Feststoffteilchen mit unterschiedlichem Größenspektrum und Schädigungspotenzial. Neben metallischen beziehungsweise metalloxidischen

### 6.3.1 Dieselkraftstoff

	ACEA* Category 4	EN590	ASTM D 975 No. 2-D	JIS K 2204 Special No. 1
Cetanzahl	≥ 55	≥ 51	≥ 40	≥ 48
Dichte	820-840 kg/m <sup>3</sup>	820-845 kg/m <sup>3</sup>	–	–
Aromate	≤ 15 Vol-%	–	–	–
Polizykl. Aromate	≤ 2 Vol-%	≤ 11 Vol-%	–	–
95% Siedepunkt	≤ 340 °C	≤ 360 °C	≤ 338 °C*	≤ 360 °C
Siedeende	≤ 350 °C	–	–	–
Schwefelgehalt	≤ 10 ppm	≤ 350 ppm	≤ 500 ppm	≤ 500 ppm
Schmierfähigkeit	≤ 400 µm	≤ 460 µm	Vorläuf. Richtlinie	–
Partikel	≤ 24 mg/kg	≤ 24 mg/kg	≤ 0,05 Vol-%	–
Wassergehalt	≤ 200 mg/kg	≤ 200 mg/kg		–

\*ACEA World-Wide Fuel Charter    \*90% Siedepunkt

Bild 19: Vergleich „World-Wide Fuel Charter“, EN 590, ASTM D 972 and JIS K 2204

Figure 19: Comparison “world-wide fuel charter”, EN 590, ASTM D 972 and JIS K 2204

Bestandteilen sind vor allem die sehr harten, in mineralischem Staub vorkommenden Silikate wegen ihrer großen Härte (> 1100 HV) für das Einspritzsystem gefährlich. Um das mögliche Ausmaß dieser Primärverschmutzung zu ermitteln, führte Bosch Analysen von Tankstellenkraftstoffen aus verschiedenen Ländern Europas und Südamerikas durch.

Diese und andere Untersuchungen zeigen, dass der Anteil dieser unerwünschten Bestandteile im Kraftstoff regional und lokal sehr unterschiedlich sein kann. Partikelkonzentrationen, die einige Millionen Teilchen pro 100 ml Kraftstoff aufweisen, waren dabei keine Seltenheit. Einen Eindruck über die unterschiedlichen Verunreinigungs-niveaus vermitteln die in



Bild 22 eingebetteten Mikroskopaufnahmen. Neben der teilweise erheblichen Primärverschmutzung kann es bei der Betankung und über die Tankentlüftung zu einem weiteren Staubeintrag in den Kraftstoff kommen. Davon sind insbesondere Geräte betroffen, die unter staubhaltigen Umgebungsbedingungen betrieben werden, wie sie in Minen, im Agrarbereich und bei Erdbewegungsmaschinen anzutreffen sind. Andere Verschmutzungsquellen sind Fässer und Kanister, die im Off-Road-Bereich häufig zum Auffüllen des Kraftstofftanks eingesetzt werden.

Die schwereren Feststoffteilchen sedimentieren während Stillstandszeiten und Leerlaufphasen aus und sammeln sich am Tankboden an. Beim Betanken werden diese aufgewirbelt und für geraume Zeit in Suspension gehalten. Untersuchungen zeigten eine deutlich höhere Partikelkonzentration in Fahrzeugtanks [6].

In Versuchen mit verschiedenen Einspritzsystemen zeigte Bessee et al. [7,8], dass die kritische, verschleißauslösende Korngröße im Bereich von 6-7 µm liegt.

### 6.3.2 Aviation Turbine Fuel (Kerosin)



Bild 20: Verschleiß und Fresser an Exzenterwelle und Rolle einer Common-Rail-Hochdruckpumpe nach 189 h Dauerlauf mit Aviation Turbine Fuel F35  
Figure 20: Wear and seizure on the eccentric shaft and roller of a Common-Rail high-pressure pump after only 189 hours endurance test with F35

### 6.3.3 Fatty Acid Methyl Ester (FAME)

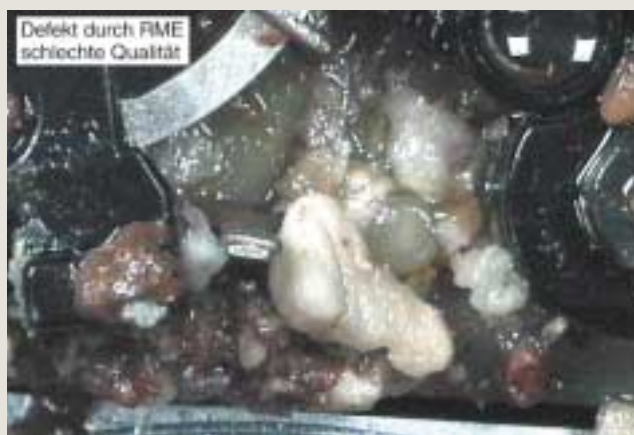


Bild 21: Ablagerungen in einer Verteilerpumpe, die mit RME (Rapsmethylester) schlechter Qualität betrieben wurde  
Figure 21: Deposit in a distributor pump operated with poor-quality RME

6.3.5 Feststoffteilchen

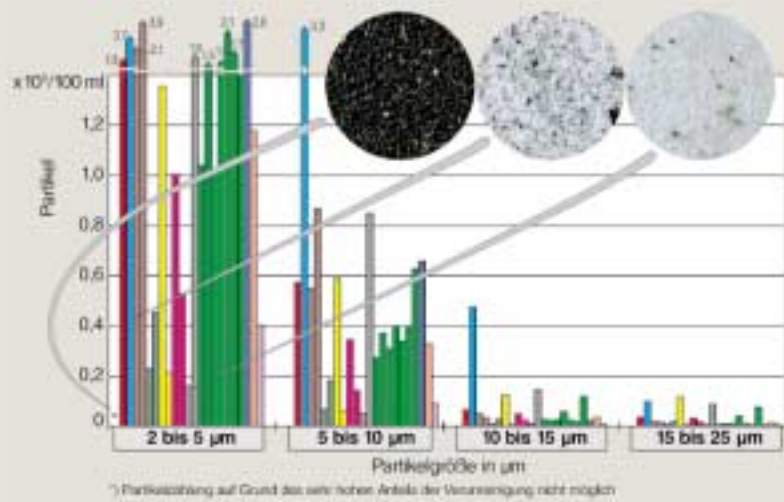


Bild 22: Partikelverteilung in Dieseldieselkraftstoff von Tankstellen (MERCOSUR) und Mikroskopaufnahmen ausgewählter Filtrate  
 Figure 22: Particle distribution of Diesel fuel from filling stations (Mercosur) and corresponding microscope photographs

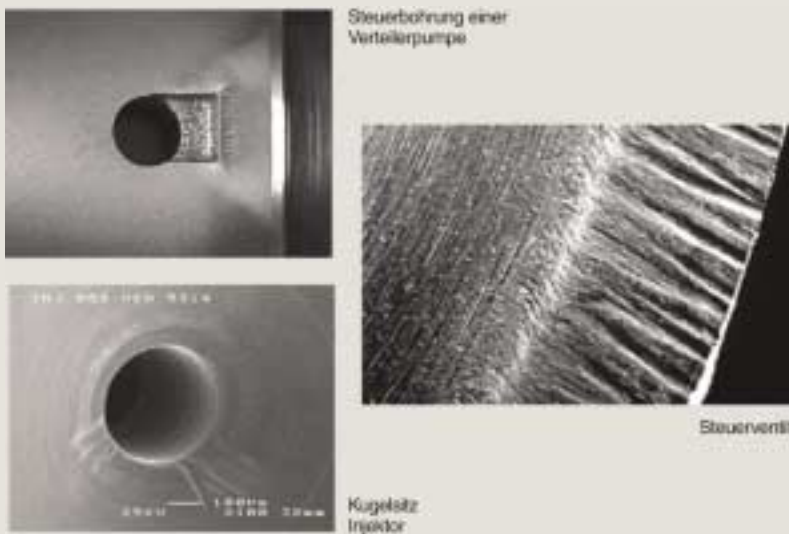


Bild 23: Erosivverschleiß infolge harter Partikel  
 Figure 23: Erosive wear due to insufficient filtration

Zum Schutz der Einspritzanlage vor erosivem und/oder abrasivem Verschleiß muss das Eindringen dieser feinen Partikel in das System verhindert werden, da es praktisch kaum konstruktive und/oder werkstoffseitige Maßnahmen gibt, um den Verschleiß zu verhindern beziehungsweise zu reduzieren. Die häufigsten Schäden durch harte Teilchen sind Riefenbildung an Pumpenkolben und Flügeln der Flügelzellenpumpe in Verteilereinspritzpumpen sowie Verschleiß an hochpräzisen Steuer- und Zumesseinrichtungen, Ventilnadeln und Ventilsitzen. **Bild 23** zeigt die Ver-

schleißspuren infolge Partikelerosion, wie sie an verschiedenen Bauteilen von Einspritzsystemen gefunden wurden. Jeder Verschleiß in den zuvor genannten Bereichen führt sofort zu Funktionseinbußen und letztendlich zu untragbaren Betriebsbedingungen beziehungsweise zum Totalausfall des Einspritzsystems.

6.3.6 Freies Wasser

Bei einer Temperatur von 60 °C kann Dieseldieselkraftstoff etwa 200 ppm Wasser in gelöster Form aufnehmen. Übersteigt der Wasseranteil diesen Wert, oder wird mit

Wasser gesättigter Kraftstoff abgekühlt, dann enthält der Kraftstoff freies Wasser, das zu erheblicher Schädigung kraftstoffgeschmierter Einspritzsysteme führen kann. Das Problem von Wasser im Kraftstoff ist im Off-Highway-Bereich stärker ausgeprägt. Besonders betroffen sind Baumaschinen und Marine-Applikationen.

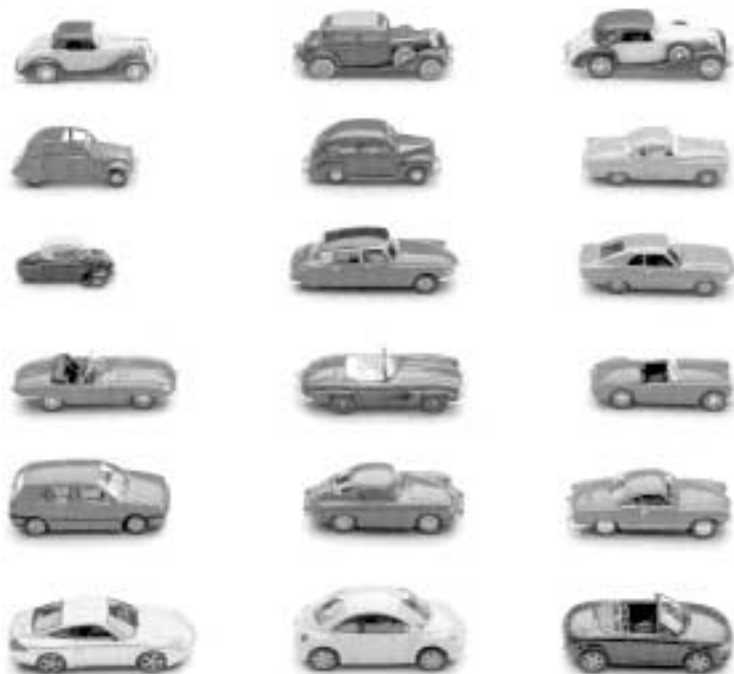
Die Folgen bei Betrieb mit wasserhaltigem Kraftstoff reichen von Funktionsstörungen infolge schwergängiger Funktionsgruppen bis hin zu Totalausfällen, hervorgerufen durch Verschleiß, oder Fresser aufgrund losgelöster Rostpartikel. **Bild 24** zeigt verschiedene Bauteile von Einspritzsystemen, die durch Rostbefall stark geschädigt sind.

Aufgrund geänderter tribologischer Eigenschaften führen schon geringe Mengen freien Wassers innerhalb kurzer Laufzeit zu erhöhtem Verschleiß und folglich zu Funktionsbeeinträchtigungen des Einspritzsystems. Prüfbankversuche zeigen, dass ein Gehalt von wenigen Zehntel Prozent freien Wassers genügt, um an Hub- scheinbe und Laufrollen einer Verteilereinspritzpumpe innerhalb weniger Betriebsstunden starke Abnutzung mit Materialausbrüchen infolge Wasserstoffverschleiß hervorzurufen.

Diese Erkenntnis deckt sich auch mit Erfahrungen aus der Wälzlagerindustrie. Auch in diesen Anwendungen führen geringe Wasseranteile zu einer drastischen Herabsetzung der Lebensdauer. Folgeschäden, hervorgerufen durch die dabei freigesetzten Partikel, sind Verteilerkolbenfresser und klemmende Spritzversteller. Das in Prüfbankversuchen erzeugte Schadensbild entspricht demjenigen aus Feldbeanstandungen, **Bild 25**. Hinsichtlich der Kavitationsneigung sind die Eigenschaften von Wasser kritischer als jene von Dieseldieselkraftstoff. Wasserhaltiger Kraftstoff begünstigt daher die Ausbildung von Kavitation und die Zerstörung der betroffenen Bauteile.

Neben den zuvor beschriebenen Problemen fördert freies Wasser die Bildung von Mikroorganismen [9]. Das in Vorratsbehältern durch Kondensationsvorgänge stets enthaltene Wasser setzt sich am Tankboden ab und bildet so ideale Bedingungen für deren Wachstum. Umgebungsbedingungen, wie sie in tropischen Ländern vorherrschen, begünstigen die Wachstumsrate. Innerhalb von zehn Stunden kann sich ein einziger Mikroorganismus zu einer Population von einer Milliarde vermehren. Dabei entstehen durch die Zellteilung Eiweißstoffe, die sowohl Wasser als auch Dieseldieselkraftstoff binden und eine trübe, schleimige Emulsion bilden. Gelangt diese schleimige Masse in den

# [Automotivation]



**Auf kaum einem anderen Feld wurden so rasante Fortschritte erzielt wie bei der Entwicklung von Automobilen.** Diese Vorwärtsbewegung macht dann auch die „Faszination Auto“ aus. Für Techniker und Ingenieure genauso wie für Autofahrer. Diese Faszination treibt uns von MANN+HUMMEL dazu an, immer von Neuem nach den besten Lösungen zu suchen. Eine Automotivation, die uns weltweit zum Systementwicklungspartner der Automobilindustrie gemacht hat. Wir sind überzeugt, wir können auch Sie motivieren.

**Weitere Informationen erhalten Sie unter dem Stichwort Automotivation.**



*Wir denken automotive*

FILTERWERK MANN+HUMMEL GMBH · Bereich AV · 71631 Ludwigsburg, Germany  
 Telefon +49 (71 41) 98-23 73 · Fax +49 (71 41) 98-25 97  
 Internet: [www.mann-hummel.com](http://www.mann-hummel.com) · E-Mail: [info@mann-hummel.com](mailto:info@mann-hummel.com)

### 6.3.6 Freies Wasser



Bild 24: Rost und Korrosion an Bauteilen von Verteilereinspritzpumpe und Common-Rail-Injektor  
 Figure 24: Rust and corrosion on components from distributor pump and Common Rail injector

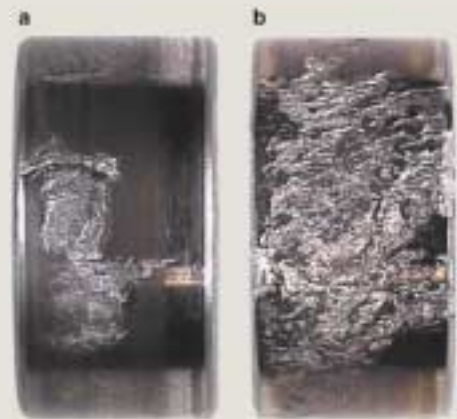


Bild 25: Rollenverschleiß einer Verteilerpumpe infolge wasserhaltigem Dieseldieselkraftstoff.

a) aus Fahrzeug; Laufzeit etwa 5600 km  
 b) aus Dauerlauf Dieseldieselkraftstoff +0,5 % Wasser; Laufzeit 136 h

Figure 25: Distributor-pump roller wear due to Diesel fuel containing water  
 a) from a vehicle after approx. 5600 km  
 b) from an endurance run with Diesel fuel containing 0.5 % water; running time 136 h

Fahrzeugtank, führt dies zu raschem Verstopfen des Kraftstofffilters und kleinen Strömungsquerschnitten [10]. Bestimmte Arten dieser Mikroorganismen bilden säurehaltige Stoffwechselprodukte, die zu korrosivem Angriff im Kraftstoffsystem führen [11]. Bei einem Flottenversuch fielen die Einspritzsysteme aller Fahrzeuge, die an einer bestimmten Tankstelle betankt worden waren, innerhalb kurzer Zeit aus. Eine Analyse des Kraftstoffs aus den betroffenen Fahrzeugen zeigte neben hohem Wasseranteil eine starke Belastung mit Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Hefe). Um die Bildung und Ausbreitung dieser Mikroorganismen zu verhindern, ist eine sorgfältige Wartung der Tankbehälter unumgänglich. Die Zugabe antibakterieller Additive sollte sich auf einen kurzzeitigen Einsatz beschränken, da diese negative Auswirkung auf die Kraftstoffqualität (unverhältnismäßig starke Düsenverkokung) haben. Biodiesel sagt man eine höhere Neigung zur Verkeimung nach, wobei sich Mischungen aus herkömmlichem Dieseldieselkraftstoff und Biodiesel besonders kritisch zeigen.

### 6.4 Umgebungsbedingungen

Off-Highway-Applikationen sind oft extremen Umweltbedingungen ausge-

### 6.5 Schüttelfestigkeit

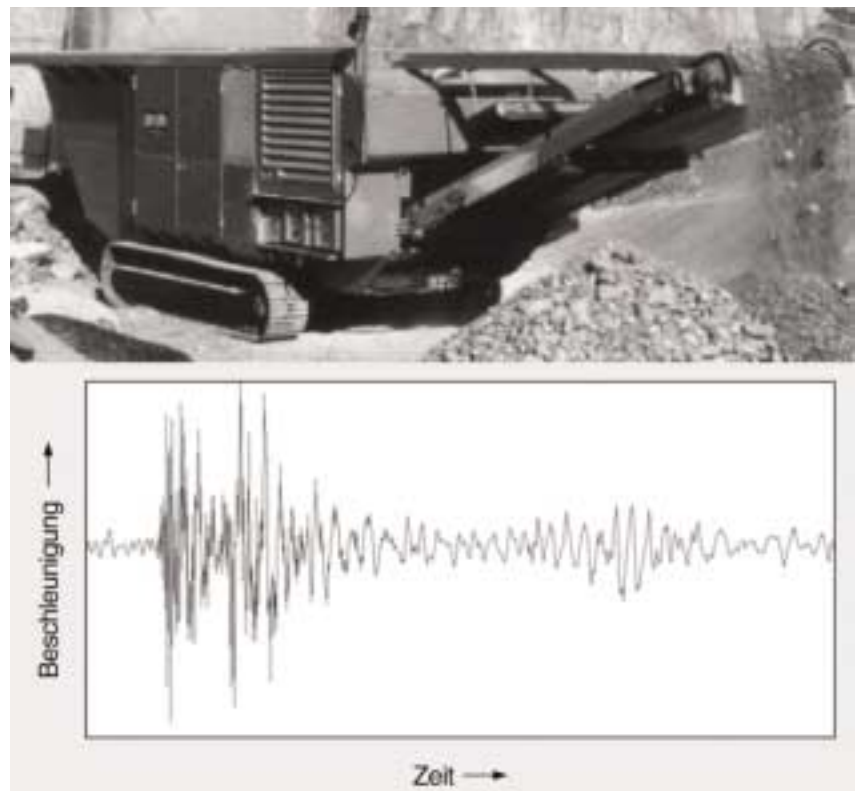


Bild 26: Vibration  
 Figure 26: Vibrations

# VIBRATION

setzt. Extreme Staubbelastungen treten zum Beispiel bei Baumaschinen, Landmaschinen oder bei Minenfahrzeugen im Unter- oder Übertagebau auf. Diese Einsätze stellen hohe Anforderungen an die Qualität der Luft- und Kraftstofffilter. Anwendungen auf hoher See oder in extrem feuchter Umgebung stellen besondere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit und die Dichtheit verschiedener Baugruppen.

Aber auch der Einsatz unter besonderen Temperaturbedingungen oder kritischer noch, bei extremen Temperaturwechseln, kann eine hohe Belastung zum Beispiel für das Steuergerät darstellen.

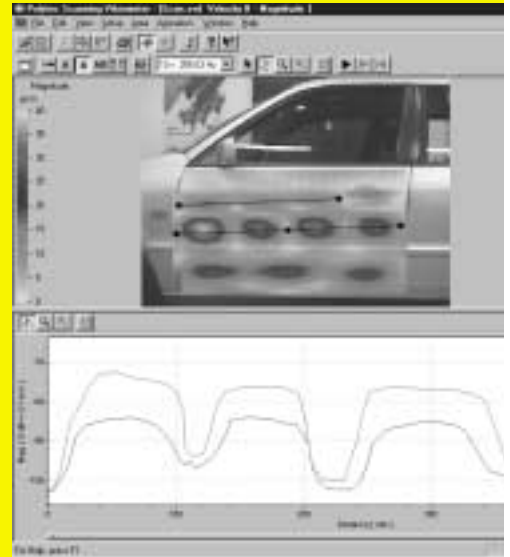
## 6.5 Schüttelfestigkeit

Off-Highway-Applikationen wie Baumaschinen oder Landmaschinen stellen oft auch enorme Anforderungen an die Schüttelfestigkeit von Einspritzkomponenten. Besonders gefährdet sind hierbei Steuergeräte und Steckverbindungen, aber auch extrem angeordnete mechanische Baugruppen, **Bild 26**.

## Literaturhinweise

- [1] Meyer, K.: Eine tribologische Betrachtung der Schmierfähigkeit von Dieseldieselkraftstoff. Bosch Technische Berichte, Heft 57, 1996, 36-52
- [2] Grieshaber, H.: Einspritzpumpenverschleiß mit schwefelarmem Dieseldieselkraftstoff. Mineralöltechnik, 5, 1996
- [3] Handbuch Dieselmotoren, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997
- [4] Weidmann, K.: Anwendung von Rapsöl in Fahrzeug-Dieselmotoren. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 97, 1995, 5
- [5] Truhan, J. J.; Stehouwer, D. M.; Covington, C. B.; Wood, L. M.: The Effect of Filtration on Fuel Injector Wear in Heavy Duty Engines. Proceedings 1st International Conference „Filtration and Transportation“, Stuttgart, 1997
- [6] Kaldonki, T.; Wachal, A.: The Influence of Diesel Fuel Cleanliness on Abrasive Wear of Precision Element of Diesel Engine Injection Apparatus. Proceedings 3rd International Tribology Congress 1981, Warsaw, Poland
- [7] Bessee, G. B. et al.: Filtration Requirements and Evaluation Procedure for a Rotary Injection Fuel Pump. SAE 972872
- [8] Bessee, G. B. et al.: High-Pressure Injection Fuel System Wear Study. SAE 980869
- [9] N. N.: Are You Growing Fuel Problems? Publication G.U.D. Filters Ltd., South Africa
- [10] Geiger, J., Wolf, A., Hartmann, H.: Lust auf Diesel. lastauto omnibus, 10, 2001, 36/37
- [11] Passman, F. J.: Microbially Influenced Corrosion and Filter Plugging – Don't you wish they were Easy to Diagnose? Proceedings 4th International Filtration Conference 2001, San Antonio, Texas, USA

## Schwingungen sehen



Das ganze Spektrum der Laser-Vibrometrie für: ■ Forschung  
■ Entwicklung  
■ Produktion

Berührungslose Schwingungsanalyse an einzelnen Punkten, kompletten Flächen oder jetzt auch dreidimensional.

(072 43) 604-178  
laser-mess@polytec.de

 **Polytec**

Polytec GmbH  
Polytec-Platz 1-7 · D-76337 Waldbronn  
Tel. (072 43) 604-0 · Fax (072 43) 6 99 44  
<http://www.polytec.de>

Wir stellen aus: MessComp 2002, Halle 1, Stand 5-7

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.



**MTZ** Vieweg Verlag · Postfach 1546 · D-65173 Wiesbaden  
Hotline 06 11778 78-151 Fax 06 11778 78-423  
email: [vieweg.service@bertelsmann.de](mailto:vieweg.service@bertelsmann.de)