

# Kurzfassungen der Beiträge

## Book of Abstracts

### 2nd. Rostocker Großmotorentagung

Zukunft der Großmotoren im  
Spannungsfeld von Emissionen,  
Kraftstoffen und Kosten

17. – 18. September 2012



In Zusammenarbeit mit dem Haus der Technik e.V. Essen

*Hans-Joachim Götze, Germanischer Lloyd SE, Hamburg*

## **Treiber für die Entwicklung von Großdieselmotoren: Internationale Abgasgesetzgebung**

### **Major Driver on the Development of Large Diesel Engines: Exhaust Emission Legislation**

War bis in die 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts hinein die Steigerung der Wirtschaftlichkeit von großen Schiffsdieselmotoren das Hauptziel der Motorenentwickler, so ist spätestens mit der Verabschiedung der Anlage VI zur internationalen MARPOL-Konvention mit Zielen zur Vermeidung von Luftschadstoffen durch den Schiffsbetrieb die Reduzierung schädlicher Abgaskomponenten in den Vordergrund gerückt. Dieser Trend ist einerseits auf die breite Einführung von Emissions- und Immissionsvorschriften im Landbereich und in nicht-maritimen Transportsegmenten zurückzuführen sowie andererseits auf die mit Wirkungsgradverbesserungen von Dieselmotoren verbundene stärkere Bildung von schädlichen Stickoxiden. Verbunden mit der Verwendung von hochschwefeligen Rückstandsölen als Schifffahrtbrennstoff war die Einführung von Umweltstandards zur Vermeidung von Luftverschmutzung auch für die Schifffahrt unumgänglich. Hieraus folgt aber nicht notwendigerweise, dass wirtschaftlicher Schiffs- und effizienter Motorenbetrieb hinter Umweltschutzaspekten zurückstehen müssen. Im Gegenteil, die Herausforderung besteht nunmehr darin, die Umweltziele möglichst unter Beibehaltung der hohen Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu erreichen und somit auch weiterhin die Tatsache, dass Schifffahrt die effizienteste und umweltverträglichste Art des Warentransports darstellt, weiter ihre Gültigkeit besitzt.

Dieser Beitrag vermittelt noch einmal einen Überblick über die wichtigsten Luftschadstoffkomponenten aus Schiffsdieselmotoren und fasst die aktuellen Vorschriften und zukünftigen Gesetzesverschärfungen am Beispiel der IMO-Arbeit zusammen. Dabei wird der Schwerpunkt gelegt auf den Bogen, der zwischen Umweltzielen, den gesetzlichen Anforderungen, der möglichen technischen Umsetzung sowie der Überwachung der Einhaltung geschlagen werden muss.

#### **Abstract**

Main goal of the designers of large marine Diesel engines always has been the increase of thermal efficiency in order to improve the cost effectiveness of ship operation. However, at the latest from the adoption of Annex VI to the international MARPOL Convention on the prevention of air pollution from ships the reduction of harmful exhaust gas components became the major driver for modern engine design. Seeing air pollution prevention legislation for land-based power plants as well as in non-maritime transport sectors on the one hand, and increasing emissions of nitrogen oxides due to higher combustion efficiency on the other, combined with the capability to use high sulphur residual fuels, the drafting and implementation of environmental standards for the shipping sector was considered obligatory. For engine designers the consequential challenge arising from this situation is to achieve the emission reduction goals keeping the engine's high efficiency. By doing so, it will

remain matter of fact that shipping is the most efficient and most environmental friendly means of transport.

Based on the IMO's work this paper again provides an overview of the most relevant exhaust emission components and addresses actual legislation as well as future more stringent requirements. Emphasis is laid on encompassing pertinent issues ranging from environmental goals, environmental legislation, technical solutions and supervision of compliance.

*Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch, Stephan Schlüter, MAN Diesel & Turbo SE, Augsburg*

### **Future Emission and Efficiency Concepts for MAN Medium Speed Engines**

In 2015 / 2016 IMO Tier III regulations will come into force limiting exhaust gas emissions of sulfur- and nitrogen-oxides, respectively. While these limits will remain unchanged on open sea until 2020, vessels operating within the specifically designated so-called Emission Control Areas (ECA) will have to comply with an approx. 75% NO<sub>x</sub>-reduction compared to today's Tier II and a SO<sub>x</sub>-emission equivalent to a 0.1% fuel sulfur content. Furthermore, international regulatory bodies start to discuss possible future limits on smoke or particulate matter limitations, albeit no binding limits have been decided yet.

Based on technical as well as economical analyses from an operator's point of view, MAN Diesel & Turbo has decided to develop standard Tier III solutions based on an SCR catalytic converter for the entire medium speed engine portfolio. For this purpose MDT has built a one-of-a-kind emission test center "CentAur" at its Augsburg plant which is in operation since beginning of 2011. In this test facility SCR systems are optimized with respect to performance, installation space, system control, reliability and safety concepts. Additional focus is directed towards the interaction of engine and catalyst in order to ensure optimum overall system performance. Components such as catalyst stones of various sub-suppliers are tested and characterized such that all information necessary for the upcoming Tier III certification procedure is available.

Regarding upcoming sulfur oxides limitations within ECA's, three options will be possible for Medium Speed marine applications: operation on low sulfur (< 0.1% S) distillate fuel, or the exhaust gas cleaning of SO<sub>x</sub> by either dry or wet scrubbing. MAN Diesel & Turbo is investigating and developing both scrubbing options together with respective partners: the DryEGCS system on MDT's Augsburg CentAur facility while wet systems are running on field tests.

Even though no explicit limits for smoke or particulate matter emissions have been decided by IMO yet (US EPA regulation does include such limits for category 1 and 2 engines), these are anticipated for the future as well. Thus, MDT is investigating several methods to reduce these emissions today. Among these are both engine internal measures as well as different types of filter systems.

In addition to emission reducing measures, MDT is developing technologies to further reduce the specific fuel consumption. Among these are 2-stage turbocharging as well as advanced electronic control schemes which will help to improve efficiency in specific load ranges most important for the each applications.

*Carsten Rickert ,Klaus Wirth, Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, Kiel*

*Dr. Udo Schlemmer-Kelling*

### **Die Entwicklung der Baureihe M 32 - Eine Erfolgsgeschichte**

### **The development of the M32 engine family - a story of success**

Die Präsentation befasst sich mit der Entwicklung der Motorbaureihe M 32. Die Grundideen, die zur Auslegung des Motors im Jahre 1991 führten, werden dargelegt. Auf die über die Jahre geänderten Anforderungen von einer möglichst hohen Zylinderleistung über einen guten Wirkungsgrad bis zu niedrigen Emissionen wird eingegangen. Die damals zur Verfügung stehenden Entwicklungstools werden mit den heutigen verglichen.

Besonders wird auf die Anpassungsmöglichkeiten des Motorkonzepts an die kommenden Anforderungen bezüglich der zukünftigen Emissionsminderung und der „Total Cost of Ownership“ eingegangen. Ein modulares Baukastensystem ist die Grundlage, die jeweiligen Anforderungen der Kunden optimal zu erfüllen. Zu diesem Baukastensystem gehören die Module Abgasrückführung, IT-SCR Katalysator und Gas- (Dual Fuel) Betrieb. Sie lassen sich ohne Schwierigkeiten in das bestehende Motorkonzept integrieren.

Die Präsentation endet mit einem Ausblick in die weitere Zukunft.

*Dr. German Weisser, Christer Hattar, Wärtsilä Schweiz AG, Winterthur/Schweiz*

## **IMO Tier III – Entwicklung von Lösungen für die Wärtsilä Zweitakt-Grossdieselmotoren**

### **IMO Tier III – Development of Solutions for the Wärtsilä 2-Stroke Engines**

Die ab 2016 innerhalb sogenannter „Emission Control Areas“ (ECA) gültigen Tier III NO<sub>x</sub>-Grenzwerte stellen nur einen Aspekt der Entwicklungsanforderungen dar. Zwar werden parallel dazu auch die Anforderungen an die Brennstoffe (insbesondere in Bezug auf ihren Schwefelgehalt) sukzessive verschärft, gleichzeitig sind jedoch äquivalente Massnahmen zum Erreichen derselben SO<sub>x</sub>-Emissionen explizit erlaubt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass auch innerhalb von ECAs vorzugsweise Schweröl in Kombination mit nachweislich geeigneten Abgaswaschverfahren zum Einsatz kommen wird, was nicht ohne Konsequenzen für die Entwicklung von NO<sub>x</sub>-Reduktionstechnologien bleibt: Diese müssen sowohl mit Destillatkraftstoff als auch mit Rückstandsbrennstoffen zuverlässig betrieben werden können.

Hinzu kommen die globalen Trends hinsichtlich Verfügbarkeit und Qualität von Brennstoffen: Insbesondere ist zu erwarten, dass Gas auch im Schifffahrtsbereich eine zunehmend wichtigere Rolle spielen wird. Vor diesem Hintergrund verfolgt Wärtsilä eine dreigleisige Strategie: Erstens wird die Dual-Fuel (DF) Technologie als vielversprechende Lösung sowohl für die SO<sub>x</sub> als auch die NO<sub>x</sub> Emissionsproblematik angesehen und deren Adaptierung für Zweitaktmotoren mit Nachdruck vorangetrieben. Zweitens werden auf der Hochdruckseite integrierte Selective Catalytic Reduction (SCR) Anlagen angeboten, welche bei marginaler Anpassung der Abstimmung des Motors auch mit sehr hohen Schwefelgehalten im Brennstoff über den gesamten relevanten Betriebsbereich einsetzbar sind. Drittens befinden sich innermotorische Konzepte in der Entwicklung, wobei neben der Wirksamkeit für die NO<sub>x</sub>-Reduktion und den Auswirkungen auf andere Betriebskenngrößen auch wiederum die Anwendbarkeit in Kombination mit hochschwefeligen Brennstoffen im Fokus steht. Im folgenden Beitrag werden ausgewählte Aspekte der Entwicklung der drei genannten Lösungsansätze vorgestellt und aktuelle Resultate der experimentellen Untersuchungen diskutiert. Auf dieser Basis wird schliesslich eine Bewertung verschiedener Optionen für die Gesamtsystemoptimierung durchgeführt.

*Hartmut Schneider, Dr. Michael Willmann, Clemens Senghaas, L'Orange GmbH, Stuttgart*

## **Moderne Entwicklungswerkzeuge für Großmotoren-Einspritzsysteme**

### **Modern development tools for large bore engine fuel injection systems**

Waren bis vor einigen Jahren in der Entwicklung von Einspritzsystemen für niedrige Stückzahlen das „Probierens basierend auf Erfahrung“ und letztendlich Trial-and-Error im Feld durchaus gängige Entwicklungsmethoden, ist dies heute nicht mehr Stand der Technik.

Ein systematischer Entwicklungsprozess beginnt schon im Vertrieb mit standardisierten Methoden zur Erfassung aller Anforderungen an ein System. Darauf folgt eine methodische Konzepterstellung und Auswahl der auf Kundenwünsche optimal zugeschnittenen Variante. Die Eigenschaften des zukünftigen Produkts werden durch hochentwickelte Berechnungsmethoden vorausbestimmt. Während der konstruktiven Umsetzung sind die Randbedingungen der späteren Anwendung zu berücksichtigen. Die anschließende Validierung auf Komponentenprüfständen teilt sich in Funktions- und Haltbarkeits/Robustheitsumfänge auf. Der Betrieb auf Versuchsmotoren dient dadurch letztlich mehr der Verbrennungsentwicklung und Systemintegration durch den Motorenhersteller als der weiteren Validierung des Einspritzsystems. Trotzdem sind zur Bestätigung der Versuchsumfänge auch weiterhin Außenerprobungen unter realen Betriebsbedingungen der letzte Schritt der Entwicklung von Einspritzsystemen.

Vorge stellt werden der Entwicklungsprozess sowie einige Werkzeuge, die bei L'Orange zum Einsatz kommen und auf die besonderen Anforderungen bei der Entwicklung von Großmotoren-Einspritzsystemen abgestimmt sind.

#### **Abstract:**

In contrast to the near past, where the development of fuel injection systems for low number of pieces was dominated by the trial-and-error method, these development methods are not state-of-the-art anymore.

The systematic development process already starts in the sales department using standardized procedures to define the requirements of a system., followed by a concept phase and being completed by a methodical selection of the variant which fulfills the customer demands best. The definition of the future product features is supported by highly sophisticated simulation/calculation methods. During the design phase all boundary conditions of the later application have to be considered. The extensive validation on the component test rigs can be divided into two phases: checking correct functionality and proving the durability and robustness. The following tests on lab engines are thus more used for combustion process development and integration of the injection system in to the engine by the engine manufacturers themselves rather than further validation of the fuel injection system. However, field testing under real operating conditions still remains the last step in the development process of fuel injection systems.

The L'Orange development process and some selected development tools optimized for the very special process of injection system development for large engines will be shown in the presentation.

*Prof. Dr.-Ing. Andreas Wimmer, Dr. Michael Engelmayer, Dr. Gerhard Pirker, Dr. Franz Chmela, Gernot Hirschl, Technische Universität Graz/Österreich*

## **Die Einspritzrate als wesentlicher Faktor zur genauen Simulation von Verbrennung und Schadstoffbildung bei Großdieselmotoren**

### **The Injection Rate as a Key Factor in the Accurate Simulation of Combustion and Emission Formation in Large Diesel Engines**

Bei der Entwicklung von Großdieselmotoren erzwingen die steigenden Anforderungen von Seiten der Abgasgesetzgebung und des Wettbewerbs immer höhere Anstrengungen hinsichtlich der Prognose der Emissionen und des Wirkungsgrades mittels der Simulation. Eine wesentliche Grundlage für die genaue Simulation der Verbrennung und der Schadstoffbildung beim Dieselmotor ist der zeitliche Verlauf der Einspritzrate.

Für die Vorgabe der Einspritzrate werden unterschiedlich genaue Methoden eingesetzt. Die Bandbreite reicht dabei von der Annahme eines einfachen rechteckigen Einspritzratenverlaufs zwischen Spritzbeginn und Spritzende bis zur Vorgabe der für den jeweiligen Betriebspunkt an speziellen Messeinrichtungen exakt gemessenen Einspritzraten. Im vorliegenden Beitrag wird die Frage diskutiert, mit welcher Präzision der Einspritzratenverlauf bekannt sein muss, um mit den Simulationsmodellen eine vorgegebene Ergebnisgenauigkeit erreichen zu können. Dazu werden Vergleiche von Messpunkten an einem Einzylinder-Großdieselmotor bei Variation einer Reihe von Parametern wie Raildruck, Einspritzzeitpunkt, Mehrfacheinspritzung, etc. mit Ergebnissen der 0D- und 3D-Simulation auf Basis unterschiedlicher Modellansätze dargestellt. Um die bestenfalls erreichbare Prognosegenauigkeit zeigen zu können, werden zunächst die Simulationsergebnisse hinsichtlich Brennrate, NO<sub>x</sub> und Russ unter Vorgabe der exakt gemessenen Einspritzverläufe gezeigt. Abschließend erfolgen eine Sensitivitätsbetrachtung der Ergebnisse hinsichtlich Form und Lage der Einspritzrate und die Bewertung unterschiedlicher Methoden der Einspritzratenbestimmung.

#### **Abstract:**

In the development of large Diesel engines, the increasing demands of emission legislation and competition are forcing greater efforts to be made when simulation is used to predict emissions and efficiency. The injection rate history provides the foundation for the accurate simulation of combustion and emission formation in Diesel engines.

Methods of varying degrees of accuracy are employed to set the injection rate. These range from assuming a simple rectangular injection rate history between the start and end of injection to the setting of injection rates that have been measured precisely for each operating point with special measuring devices. The following paper discusses how precisely the injection rate history must be known so that a certain accuracy can be achieved with the simulation models. Therefore it presents comparisons of measurements taken on a single-cylinder large Diesel engine with variations in a range of parameters such as rail pressure, injection timing, and multiple injections with results from 0D and 3D simulation using various models. In order to show the best possible predictive accuracy, the results from simulation of the rate of heat release, NO<sub>x</sub> and soot are presented by setting the injection rate histories



that have been measured precisely. Finally, the sensitivity of these results to changes in the form and location of the injection rate is examined and various methods for determining the injection rate are assessed.

*Dr. Christian Fink, Rom Rabe, Martin Drescher, Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf,  
Universität Rostock*

## **Potenzial der druckwellenbasierten Einspritzverlaufsformung zur Emissionsenkung mittelschnelllaufender Schiffsdieselmotoren**

### **Potential of pressure wave induced injection rate shaping on emission reduction for medium speed ship diesel engines**

#### **Abstract:**

The introduction of IMO-TIER III in 2016 demands a reduction of NO<sub>x</sub>-emissions by 75% compared to IMO-TIER II. This cut in emissions is only to be achieved by applying new technologies to ship diesel engines. One promising option to reduce emissions by engine internal measures is the introduction of exhaust gas recirculation (EGR). In order to control particulate emissions as well as fuel consumption, this technology can only be applied when significantly improving the fuel injection system at the same time.

The presented work focuses on the impact of basic hydraulic parameters of a common-rail injection system on the emissions of a medium speed diesel engine. The approach is based on the idea to generate very specific injection rates which are referred to have a positive effect on engine emissions. This is done by passive measures, like high pressure line length and diameter, and active measures allowing a control of pressure waves in the high pressure line to a large extend. The combination of both measures results in a very flexible common-rail injection system capable to provide a wide range of injection rate shaping options, i.e. SQUARE, RAMP and BOOT.

Based on fundamental 1D hydraulic calculations an injection system layout has been developed considering existing injection components of the medium speed research engine 1VDS 18/15. Afterwards a demonstration system was set up and tested extensively at an injection rate analyzer. The measurements absolutely confirmed the simulations and showed a high flexibility to generate very different injection rates. At the same time, reproducibility and shot-to-shot variations are found to be at the same high level as for conventional common-rail systems. Moreover, the systems capability of allowing multiple injections is still given.

After describing the injection system layout and functional testing the paper focuses on discussing engine test results from the single cylinder research engine 1VDS 18/15. It is shown that injection rate shaping can influence engine emissions significantly. In certain points, reductions of particulate emissions of more than 60% were achieved at constant NO<sub>x</sub> by applying injection rate shaping to a single injection. It is shown that especially at part load conditions a BOOT-like injection rate does offer the highest potential for the given setup. These results are confirmed by cylinder pressure traces showing how rate shaping influences the premixed and diffusive combustion phase.

Based on the engine results it has to be stated that passive and active hydraulic measures to control injection rates can have a considerable potential to reduce engine emissions. Particularly for large diesel engines with stationary high loads it is therefore recommended to carefully design the hydraulic system layout.

The possibility to influence the combustion process by applying injection rate shaping allows a fundamental analysis of combustion parameters with respect to emission generation. The presented work so provides an important basis to improve the understanding of emission generation processes in large diesel engines.

*Dr. Fabian Kock, Germanischer Lloyd SE, Hamburg*

## **Zertifizierung von Abgasnachbehandlungssystemen für maritime Anwendungen**

### **Certification of Exhaust Gas Cleaning Systems for maritime applications**

Die Entwicklung von extrem hohen Wirkungsgraden von Verbrennungsmotoren hat im Zusammenspiel mit der Verwendung von preiswerten, qualitativ minderwertigen Kraftstoffen zu deutlich erhöhten Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Schwefeloxiden (SO<sub>x</sub>) und Partikeln (PM) geführt. Daher haben die Internationale Maritime Organisation (IMO) und verschiedene nationale und lokale Verwaltungen Konzepte zur Verhütung und Bekämpfung der Luftverschmutzung durch Schiffe erarbeitet.

In der Revision von 2008 des MARPOL Anhangs 6 der Internationalen Maritimen Organisation sind die Grenzwerte für die Emissionen von Stickoxiden weiter verschärft worden. In der zweiten Stufe (Tier II) ist eine Verringerung der Stickoxidemissionen um ca. 20% gegenüber den bisherigen Werten gefordert. Die dritte Stufe (Tier III) der Emissionsgrenzwerte für Stickoxide gilt für Neubauten mit Kiellegungsdatum ab dem 1. Januar 2016, die in ausgewiesenen Emissionsschutzgebieten (ECAs) navigieren.

Insbesondere diese dritte Stufe stellt aus technischer und operativer Sicht eine Herausforderung für die Motorenhersteller, Schiffsbetreiber und Zertifizierer (Recognised Organisations/Klassifikationsgesellschaften) dar. Denn die Einhaltung der Grenzwerte der dritten Stufe ist ohne eine gezielte Nachbehandlung der Abgase voraussichtlich nicht zu erreichen. Aus diesem Grund wurden von der Internationalen Maritimen Organisation Regelwerke und Ausführungsvorschriften für die Verwendung von Abgasnachbehandlungsanlagen erstellt. Aus der Sicht einer Klassifikationsgesellschaft muss bei der Installation und des Betriebes solcher Anlagen sowohl die Einhaltung dieser Regeln überprüft werden als auch der sichere Schiffsbetrieb gewährleistet sein. Zu diesem Zweck hat der Germanische Lloyd sein Regelwerk um ein Kapitel über Abgasnachbehandlungssysteme ergänzt.

In diesem Vortrag werden die aktuell gültigen und zukünftigen Emissionsgrenzwerte in der Seeschifffahrt vorgestellt. Die sich hierfür in der Entwicklung befindlichen technischen Lösungen werden aus der Sicht einer Klassifikationsgesellschaft auf ihre technischen, operativen sowie organisatorischen und verwaltungstechnischen Herausforderungen untersucht.

#### **Abstract:**

Recent developments of extremely high levels of engine efficiency combined with the use of cheap, low-quality fuels has resulted in significantly increased emissions of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulphur oxides (SO<sub>x</sub>) and particulate matter. Consequently the International Maritime Organisation (IMO) and various national and local administrations have reacted by establishing policies to prevent and control air pollution from ships leading to a challenging task in understanding all legal and administrative requests.

In the Revision of MARPOL Annex VI dated 2008 the International Maritime Organisation agreed to further tighten the limits on the emissions of nitrogen oxides. In the second stage

(Tier II) a reduction in nitrogen oxide emissions by about 20% compared to the previous values is required. The third stage of emission limits for nitrogen oxides (Tier III) shall apply to new buildings with keel laying from 1 January 2016 when navigating Emission Control Areas (ECAs).

In particular, this third stage imposes a strong challenge for engine manufacturers, ship operators and certifiers (Recognised Organisations / classification societies) from a technical and operational point of view. As without specific treatment of the exhaust gases the third level of emission limits for nitrogen oxides is unlikely to be met. For this reason the International Maritime Organization recently published guidelines for the use of after-treatment systems. The correct executions of the guidelines have to be proven and guaranteed from the perspective of a classification society. Moreover the installation and operation of such systems must be both: in compliance with these guidelines and in conformity with a safe ship operation. To this end, Germanischer Lloyd has extended its rules to a section on exhaust gas aftertreatment systems.

In this presentation latest updates and future emission standards for marine applications are introduced. The purpose of this presentation is to show technical solutions for exhaust gas aftertreatment systems from the perspective of a classification society with a strong focus on its technical, operational, organizational and administrative challenges.

*Jürgen Messner, Dr. Harald Andruleit, Hansgeorg Babies, Michael Schauer, Dr. Sandro Schmidt, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover*

### **Geologische Verfügbarkeit von fossilen Energierohstoffen**

#### **Geological availability of fossil energy resources**

Zunehmend setzt sich die Erkenntnis durch, dass Erdöl der erste Rohstoff der Erde werden kann, bei dem die Produktion auf Grund von Beschränkungen in der geologischen Verfügbarkeit nicht mehr steigerbar ist. Zudem ist das schnelle Wirtschaftswachstum insbesondere in Schwellenländern wie China und Indien auf eine intensive Nutzung von nicht-erneuerbaren Energieträgern angewiesen. In dieser Situation ergibt sich eine Reihe von Fragen, die ein Wissen um die globalen Vorräte der Energierohstoffe Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran und deren Verfügbarkeit erfordern.

Bei der Bewertung der Vorratssituation in der Welt werden sowohl Reserven als auch Ressourcen der einzelnen Energierohstoffe berücksichtigt. Unter Reserven versteht man dabei die nachgewiesenen, zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbaren Energierohstoffmengen. Ressourcen sind sowohl nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare als auch nicht nachgewiesene, aber aus geologischen Überlegungen heraus mögliche Mengen an Energierohstoffen, deren Existenz vermutet wird.

Im Jahr 2009 wurden nicht-erneuerbare Energierohstoffe mit einem Energiegehalt von etwa 457 EJ gefördert. Vergleicht man zusammengenommen für alle Energierohstoffe weltweit diese Jahresförderung mit den Reserven in Höhe von 39.794 EJ und den Ressourcen mit 613.180 EJ, so ergibt sich eine Relation von etwa 1 zu 87 zu 1342. Damit lassen die globalen Vorräte an Energierohstoffen aus geologischer Sicht grundsätzlich eine ausreichende Deckung des künftigen Energiebedarfes erwarten. Fraglich ist allerdings, ob diese Rohstoffe in Zukunft immer dann in ausreichender Menge verfügbar gemacht werden können, wenn sie benötigt werden.

*Dr. Klaus Heinrich, Simone Bernasconi, ABB Turbo Systems Ltd., Baden/Schweiz*

## **Auslegung eines 2-stufigen ABB Aufladesystems für einen mittelschnell laufenden Dieselmotor und Vergleich mit Messergebnissen**

### **Performance improvement of a medium speed diesel engine based on two stage turbocharging**

Zur Erfüllung der ab 2016 gültig werdenden Abgasemissionsvorschriften für Schiffsmotoren ist der Übergang zur 2-stufigen Aufladung zusammen mit anderen Massnahmen eine der möglichen Technologien. Ein 2-stufiges Aufladesystem mit Zwischenkühlung zwischen den Verdichterstufen, eventuell in Kombination mit einer Abgasrezirkulation, stellt eine erhebliche Erhöhung der Komplexizität des Aufladesystems dar. Das insbesondere auch dadurch, das gefordert wird, das Aufladessystem an die unterschiedlichen Anforderungen innerhalb und ausserhalb der ECA Zonen anzupassen.

Für den Turboladerhersteller ist es wichtig, neben den geeigneten Turboladern Simulationsmöglichkeiten zu besitzen, um das Aufladesystem für den geforderten Einsatzzweck zu optimieren, und dem Motorenbauer zuverlässige Angaben für die Motoroptimierung liefern zu können. Am Beispiel der Auslegung einer 2-stufigen Aufladegruppe mit einem Hochdruck EGR-Lader wird gezeigt, wie mit dem ABB internen Simulationsprogramm das Aufladesystem modelliert und ausgelegt wird. Im Vergleich mit Messergebnissen kann gezeigt werden, dass mit der Simulation in einem weiten Betriebsbereich des Motors eine zuverlässige Prognose möglich ist. Voraussetzung dafür sind möglichst genaue Kenntnisse über die Eigenschaften des Motors und der Turboladerkomponenten. Im vorliegenden Fall wurde deshalb vor Beginn der Auslegung des 2-stufigen Aufladesystems das Rechenmodell mit vorhandenen Messwerten des existierenden Motors mit konventioneller 1-stufiger Aufladung kalibriert. Anschliessend wurde das Simulationsmodell auf die neue Topologie angepasst.

Besonderes Augenmerk muss bei der Auslegung auf die Fähigkeit des Systems, die Anforderungen in den ECA Zonen und ausserhalb derer zu erfüllen, gelegt werden. Die Simulationen zeigen, dass ohne Regeleingriff innerhalb der vorhandenen Verdichterkennfelder kein sinnvoller Betrieb möglich ist. Im vorliegenden Fall wird deshalb ein By-Pass über die Hochdruckturbine verwendet. Mit diesem einfachen Regelorgan wird der Betrieb in den Kennfeldbereichen mit gutem Wirkungsgrad und unter Einhaltung der durch die Bauteilfestigkeit gesetzten Drehzahlgrenzen erreicht.

Variable Ventiltriebe, wie zum Beispiel mit dem bei ABB in Entwicklung befindlichen voll variablen VCM System, sind eine Voraussetzung für Motoren mit extremen Miller Steuerzeiten. Die Veränderung der Motorsteuerzeiten stellt eine alternative Regelmethode zum By-Pass dar. Rechnerisch wird diese Möglichkeit untersucht und das Potenzial für die Optimierung des Motorbetriebs ausserhalb der ECA Zonen gezeigt.

*Julia Herth, Peter Holand, Dr. Alexander Knafel, Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch, MAN Diesel & Turbo SE, Augsburg*

**Verbesserung der Performance eines mittelschnell laufenden Großdieselmotors durch zweistufige Turboaufladung**

**Performance improvement of a medium speed diesel engine based on two stage turbocharging**

Um den stetig steigenden Anforderungen hinsichtlich Emissionen, Kraftstoffverbrauch und spezifischer Leistung gerecht zu werden, setzen immer mehr Großmotorenhersteller auf zweistufige Turboaufladung. In einer NO<sub>x</sub>-neutralen Betrachtung bietet die zweistufige Turboaufladung mit Zwischenkühlung deutliche Verbrauchsvorteile gegenüber der einstufigen Aufladung.

In diesem Beitrag wird die Motorperformance eines zweistufig aufgeladenen mittelschnelllaufenden Dieselmotors einem einstufig aufgeladenen Dieselmotor gegenübergestellt.

Darüber hinaus wird das dynamische Motorverhalten betrachtet, welches speziell im Marine-Offshorebereich aber auch bei Stationäranlagen wie zum Beispiel Stahlwerken von großer Bedeutung ist. In diesem Zusammenhang werden sowohl innermotorische als auch externe Maßnahmen zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens aufgezeigt und bewertet.

**Abstract:**

In order to meet ever more demanding emissions, fuel oil consumption, and power requirements, more and more large engine manufacturers rely on two stage turbocharging. Engines equipped with two stage turbocharging with charge air cooling have significant emissions and fuel consumption benefits compared to engines with single stage turbocharging.

This paper compares the performance characteristics of a two stage turbocharged medium speed diesel engine to a single stage variant of the same engine.

Special emphasis is placed on transient engine behavior which is particularly important in marine offshore applications as well certain stationary applications like steel mills to give an example. Additionally, transient combustion-control and auxiliary measures to improve transient performance are discussed and evaluated.



*Prof. Dr.-Ing. Koji Takasaki, Kyushu University, Fukuoka/Japan*

## **Verwendung eines optischen Zweitakt-Versuchsmotors zur Großmotoren Entwicklung**

### **Utilization of an optical two-stroke test engine for large engine development**

Das Labor des Autors ist führend im Bereich der Visualisierung der innermotorischen Verbrennung von Schweröl, Diesel und Gas betriebenen Großmotoren und leistet einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung kommender Emissionsvorschriften im maritimen Bereich. Neben einer Brennkammer mit konstantem Volumen und einer schnellen Kompressionsmaschine, steht ein optischer Zweitakt-Versuchsmotor zum Generieren der visuellen Daten, hilfreich für die Entwicklungsphase neuer Motoren, zur Verfügung. Diese Abhandlung beschreibt, wie der optische Zweitakt-Versuchsmotor zur Entwicklung neuer Verbrennungssysteme für Dieselmotoren verwendet wird, während aktuelle Forschungsergebnisse basierend auf Ergebnissen der schnellen Kompressionsmaschine, inklusive der Gasverbrennung, ebenfalls an dieser Tagung publiziert werden.

Der aufgeladene optische Zweitakt-Versuchsmotor (Bohrung/Hub 190/350 mm) entspricht mit seiner Bauweise Zweitakt-Dieselmotoren für maritime Anwendungen und wird mit 400 U/min betrieben. Ein präzises, elektronisch kontrolliertes Einspritzsystem erlaubt es, die Einstellungen für die Brennstoffeinspritzung frei zu wählen; beispielsweise einen Einspritzdruck von 160 MPa.

*Nasse Verfahren* – Mögliche Lösungsansätze zur Stickoxidreduktion beinhalten eine Herabsetzung der Flammtemperatur durch die Beigabe von Wasser; in Form der geschichteten Brennstoff-Wasser Einspritzung, der direkten Wassereinspritzung oder der Wasser-in-Brennstoff Emulsionen. Diese Ansätze wurden im optischen Zweitakt-Versuchsmotor umgesetzt und verglichen, wobei die Zwei-Farben-Pyrometrie zur Bestimmung der Flammtemperatur und der Russpartikelkonzentration Anwendung findet.

*Minderwertige Brennstoffe* – LCO (Light Cycle Oil), ein Nebenprodukt katalytischer Crack Anlagen, mit tiefem Schwefelgehalt, tiefer Viskosität, aber hohem Anteil an Aromaten wurde vom Autor bereits an der 1. Rostocker Großmotorentagung als möglicher Kraftstoff für die maritime Industrie vorgestellt. Um den schlechten Verbrennungseigenschaften entgegenzuwirken, wurde im optischen Zweitakt-Versuchsmotor eine Piloteinspritzung realisiert, welche den Verbrennungsvorgang kontrollieren lässt und die Stickoxidemissionen reduziert.

*CFD-Validierung* – Ein Forschungsschwerpunkt des Autors ist die Validierung von Verbrennungssimulationen mittels der Datensätze des optischen Zweitakt-Versuchsmotors. Ein CFD Code FIRE zur Simulation der spraygeführten Verbrennung in Großmotoren wurde entwickelt und anhand der experimentell ermittelten Daten des optischen Zweitakt-Versuchsmotors mit 100 und 150 MPa Einspritzdruck validiert. Im Anschluss wurde der validierte CFD Code FIRE bis zu einem Einspritzdruck von 300

MPa, welcher in reellen Motoren nicht erreicht wird, erweitert um die Grenzwerte der Vorteile durch Einspritzdruckerhöhung zu evaluieren.

*Dino Imhof, Kyushu University, Fukuoka/Japan*

## **Schnelle Kompressionsmaschine mit relevanten Dimensionen für die Großmotorenforschung**

### **Rapid Compression Expansion Machine with relevant dimensions for large engine research**

Die kommenden Abgasemissionsvorschriften zur Senkung der Emissionen von Hochseeschiffen dominieren die Motorenentwicklung im maritimen Bereich. Am Institut für Motoren und Verbrennung der Kyushu Universität in Japan wurde eine schnelle Kompressionsmaschine entwickelt, welche den Dimensionen eines Mittelschnellläufers entspricht und erfolgreich in der Großmotorenforschung eingesetzt wird. Diese Publikation vermittelt einen Einblick in aktuelle Erkenntnisse der schnellen Kompressionsmaschine und zeigt ihre Einsatzmöglichkeiten auf.

*Dieselmotorische Verbrennung* – Im Bereich der dieselmotorischen Verbrennung wird stellvertretend für eine Abgasrückführung der Sauerstoffgehalt der Ladeluft auf 17.5 % und 15.5 % verringert und damit eine Minderung der Stickoxidemissionen von 80 % und 90 % erreicht. Wasser-in-Brennstoff Emulsionen auf der Basis von Diesel und LCO (Light Cycle Oil), ein schwefelarmes, hocharomatisches Nebenprodukt katalytischer Crack Anlagen, werden bei 21 %, 17.5 % und 15.5 % Sauerstoffgehalt der Ladeluft untersucht. Flammtemperatur und Russpartikelkonzentration werden mittels Zwei-Farben-Pyrometrie ermittelt. Zusätzlich wird die Russpartikelkonzentration durch die „Back Diffused Laser“ Technik visualisiert und abgeglichen. Dabei zeigen sich eine deutliche Verringerung der Russpartikelkonzentration und eine verkürzte Phase des Nachbrennens bei den Emulsionen.

*Dual Fuel Verbrennung* – Für die Forschung im Bereich der „Dual Fuel“ Verbrennung von Erdgas mit Diesel-Piloteinspritzung kommt eine Gas-Saugrohreinspritzung zum Einsatz. Mittels Schattenbild Technik können Verbrennungsanomalien, verursacht durch das Zylinderschmieröl, nachgewiesen werden. Die Temperatur der Ladeluft spielt dabei eine entscheidende Rolle und deren Absenkung ermöglicht es, den negativen Effekt des Zylinderschmieröls zu verzögern. Der Zündverzug kann visualisiert und exakt bestimmt werden. Dabei zeigt sich ein deutlich längerer Zündverzug in der „Dual Fuel“ Verbrennung, verglichen mit dem Diesel-Pilotspray in Luft.

Ein eigens entwickeltes System zur Visualisierung der Gasdirekteinspritzung mit Diesel-Piloteinspritzung erlaubt deren experimentelle Analyse, die Generierung von Datensätzen zur Validierung des entwickelten CFD Code FIRE und lässt einen direkten Vergleich der Brennraten der diffusen Gasverbrennung mit der strahlgeführten Dieselverbrennung zu. Durch Absenken des Sauerstoffgehalts der Ladeluft wird eine Stickoxidreduktion von 80 % bei der Dual Fuel Verbrennung mit Gasdirekteinspritzung erreicht und aufgezeigt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine schnelle Kompressionsmaschine mit relevanten Dimensionen entwickelt wurde, welche ein

erfolgreiches Instrument der Großmotorenforschung darstellt, und die Modellierung der dieselmotorischen und der „Dual Fuel“ Verbrennung ermöglicht.

*Robert Bank, Dr. Bert Buchholz, FVTR GmbH, Rostock; Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf, Rom Rabe, Uwe Etzien, Universität Rostock*

### **Analyse des Konversionsverhaltens von SCR-Katalysatoren unter den Betriebsbedingungen IMO Tier III konformer Großdieselmotoren**

#### **Analysis of the conversion characteristics of SCR catalysts under operating conditions of IMO Tier III compliant large diesel engines**

Mit der Verabschiedung der Regularien IMO Tier II und III sowie der Erweiterung von Emission Control Areas (ECA) ändern sich die Rand- und Betriebsbedingungen für maritime Anwendungen von Verbrennungsmotoren in großem Umfang. Hierbei ergeben sich für Hersteller und Anwender grundsätzlich verschiedene Lösungsmöglichkeiten zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte.

Die Einhaltung der Grenzwerte für schwefelhaltige Emissionen (SO<sub>x</sub>) kann durch den Einsatz schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraftstoffe oder durch eine effektive Entschwefelung der Motorabgase erfolgen. Der Einsatz schwefelarmer Destillatkraftstoffe ist dabei mit hohen laufenden Kosten, der Einsatz von Entschwefelungsanlagen mit einem erheblichen Investitionsaufwand verbunden.

Zur Einhaltung der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte kommen grundsätzlich innermotorische Maßnahmen (Hochdruck-CR, AGR, 2-stufige Aufladung) oder der Einsatz von katalytisch aktiven Nachbehandlungskomponenten in Frage. Im Bereich von Kraftwerks- und Onroad-Anwendungen hat sich hierbei die SCR-Technologie bewährt.

Für den effizienten und zuverlässigen Einsatz eines SCR-Systems muss eine Reihe von Randbedingungen eingehalten werden, dabei ist die Temperatur die wichtigste Leitkomponente für den Stoffumsatz. Weiterhin spielen zusätzliche Spezies im Abgas eine entscheidende Rolle. Beim Einsatz von Rückstandsölen mit Schwefelgehalten bis zu 3,5 % kann es zu reversiblen und irreversiblen Vergiftungsprozessen des verwendeten SCR-Substrates kommen. In Verbindung mit Ammoniak kommt es insbesondere bei Abgastemperaturen unter 340°C zu einer unzulässigen Ablagerung von Ammoniumsulfaten. Abgastemperaturen über 340°C können jedoch sowohl bei großen 2-Takt-Motoren als auch bei 2-stufig aufgeladenen 4-Takt-Motoren nach ATL-Turbine bzw. nach ND-Turbine nicht über den relevanten Betriebsbereich der Motoren garantiert werden. Eine bereits in einzelnen Prototypen ausgeführte Lösung ist die Verlagerung des gesamten SCR-Systems in den Bereich vor Turbine (2-Takt-Motoren) bzw. zwischen HD- und ND-Turbine (2-stufig aufgeladenen 4-Takt-Motoren). Durch die Verschiebung des SCR-Systems vor bzw. zwischen die ATL-Turbinenergeben sich neben erhöhten Betriebstemperaturen aber auch veränderte Druckbedingungen. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde der Einfluss dieser geänderten Randbedingungen auf die thermodynamischen und chemischen Prozesse auf einen SCR-Katalysator untersucht. Anhand eines 1-Zylinder-Forschungsmotors sowie mit Modellgasmessungen wurde das Verhalten eines typischen VWT-Substrates bezüglich der Veränderungen im Einspeicherverhalten von Ammoniak sowie der ablaufenden SCR-Reaktionen experimentell analysiert. Innerhalb der Motorversuche wurden hierzu sowohl Messungen mit einem schwefelfreien Standard-

Dieselmotoren nach DIN EN 590 sowie mit einem Schweröl HFO380 mit 5% Schwefelgehalt durchgeführt.

Innerhalb des Beitrags werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt sowie das Potential dieses Ansatzes kritisch diskutiert.

*Karl-Heinz Fölzer, Thomas Cartus, Rene Kögl, Dr. Robert Pöschl, AVL List GmbH, Graz/Österreich*

### **Interdisziplinäre Zusammenarbeit als Herausforderung bei der Entwicklung neuer Großmotorengenerationen**

### **Interdisciplinary cooperation as challenge for the development of new large engine generations**

Mit Inkrafttreten der nächsten Generation von Emissionsregularien für Großmotoren werden Maßnahmen, die über die innermotorische Reduktion der limitierten Abgasbestandteile hinausgehen, erforderlich. Das führt nicht nur zur Notwendigkeit, die Systemgrenzen der Optimierung zu erweitern, sondern auch dazu, dass eine zunehmend größere Anzahl an Aspekten im Motorentwicklungsprozess beleuchtet werden muss. So werden beispielsweise neben der Verbesserung des Hochdruckund Ladungswechselprozesses, welche von der klassischen Thermodynamik Analyse bedient wird, auch zunehmend Herausforderungen an die Gesamtsystemkonstruktion, die Regelungstechnik, die Abgasnachbehandlung und eine Vielzahl von Anwendungsgebieten der 3D Berechnung gestellt. Hierzu zählen exemplarisch die Vibrationsanalyse am Motorgesamtmodell, Festigkeitssimulation und die Strömungssimulation. In diesem Beitrag soll gezielt das Ineinandergreifen dieser Teilaspekte der Gesamtauslegung diskutiert werden.

#### **Abstract:**

With the introduction of the next generations of emissions regulation for large engines, methods which go beyond the reduction of the limited combustion related exhaust gas components become mandatory. This leads not only to a necessity of expanding the system boundaries for the optimization, it also requires an increased number of aspects of the engine development process to be considered. So for example next to high cycle and gas exchange improvements which are covered by the classical thermodynamic analysis, increasing challenges exist for total system packaging, engine controls, exhaust gas after treatment and various investigation fields for 3D simulation. As examples vibration analysis of global engine modeling, strength analysis and fluid dynamics can be mentioned. This paper aims to discuss the interactions between these various aspects for a total engine system layout.

*Thomas Hamm, Erwin Reichert, Thomas Koch, Vinod Karthik Rajamani, FEV GmbH, Aachen*

### **Der FEV Einzylindermotor als Werkzeug für die Großmotorenentwicklung**

### **The FEV single cylinder engine - a tool for the development of large bore engines**

Einzylindermotoren stellen ein wertvolles Werkzeug bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren allgemein und von Großmotoren im Besonderen dar. Für die Verfahrensentwicklung können die entscheidenden Parameter viel schneller und preiswerter in der Realität dargestellt werden als mit einem Mehrzylindervollmotor. Darüber hinaus werden auch Untersuchungen zur Motormechnik und unterschiedlichste Komponententests effektiv mit Einzylindermotoren durchgeführt.

Der vorliegende Beitrag stellt die FEV Einzylindermotorenfamilie vor, die mit ihren Varianten die Motorgrößen für Nutzfahrzeuge bis zu Schiffsgroßmotoren abdeckt. Dabei ist ein gleicher konstruktiver Aufbau realisiert worden, der hier beschrieben wird. Der Beitrag wird durch Ergebnisse zu Verbrennungsoptimierungen, die mit einem FEV Einzylindermotor ermittelt wurden, abgerundet.



*Michael Sturm, Carsten Rickert, Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, Kiel; Dietmar Krauss, GEA Luftkühler GmbH, Bochum; Dr. Martin Reißig, Martin Drescher, FVTR GmbH, Rostock*

**AGR – Kühler Eine Herausforderung zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften an Großdieselmotoren**

**EGR-cooling - A challenge to fulfill future emission regulations for medium speed engines**

Durch die ab 2016 geltenden Emissionsgrenzwerte werden im Bereich der Großmotoren umfangreiche Maßnahmen für das Erreichen der geforderten Ziele notwendig. Zur Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen wird von der CATERPILLAR Motoren GmbH & Co. KG externe Abgasrückführung als innermotorische Maßnahme erprobt. Aufgrund der benötigten Abgasrückführrate und um das Einlasssystem weitestgehend von Abgas freizuhalten erfolgt die Umsetzung als Hochdruck-AGR. Dieser separate Gaspfad muss zur Überbrückung des Spülgefälles durch einen Abgaskompressor ergänzt werden. Um das Potential zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung zu maximieren bzw. die thermodynamischen Nachteile zu minimieren muss das rückgeführte Abgas auf das Ladelufttemperaturniveau abgekühlt werden.

Durch den hohen Schwefelgehalt des Kraftstoffes sowie den festen Bestandteilen des Abgases besteht eine potentiell hohe Versottungsneigung (Fouling) der Kühler. Diese stellt neben der Entwicklung eines schadstoffarmen Brennverfahrens die größte Herausforderung bei der Umsetzung der Abgasrückführung an Großmotoren dar. Zum besseren Verständnis der Ablagerungsvorgänge wurden verschiedene Maßnahmen hinsichtlich des Kühlerverhaltens an einem Komponentenprüfstand untersucht. Dazu wurden skalierte Versuchskühler im Abgasstrang eines PKW-Dieselmotors appliziert. Durch Variation sowohl der gas- als auch der kühlmitteleitigen Randbedingungen konnten verschiedene Szenarien in Hinblick auf ihre Verschmutzungsneigung untersucht werden. Im Rahmen des Beitrags werden theoretische Betrachtungen sowie Ergebnisse der skalierten Kühlerversuche detailliert vorgestellt. Das skizzierte Vorgehen ermöglicht im Rahmen des Gesamtentwicklungsprozesses eine effektive Umsetzung eines AGR-Systems am Vollmotor.

*Marko Püschel, FVTR GmbH, Rostock; Claude-Pascal Stöber-Schmidt, Technische Universität Braunschweig*

### **Mehrfacheinspritzstrategien zur Reduzierung der Partikelemissionen an Großmotoren im AGR-Betrieb**

#### **Multiple injection strategies for reducing soot emissions of large engines at EGR operation**

Die Einführung der IMO Tier III im Jahr 2016 mit ihrer drastischen Absenkung der Stickoxide von 75 % gegenüber dem aktuellen Stand (IMO Tier II) macht es erforderlich, dass die Schiffmotorenhersteller neuartige Verfahren und Techniken im Bereich der Schadstoffreduzierung entwickeln und umsetzen werden.

Sowohl die Beschränkung der IMO Tier III auf die küstennahen Emissionsschutzgebiete (ECAs) als auch die Senkung des Schwefelanteils im Kraftstoff im Jahr 2015 auf 0,1 % Schwefel begünstigen den Einsatz einer Hochlast-Abgasrückführung im Schiffsdieselmotorenbereich. Aus dem Heavy-Duty-Truck-Motorenbereich ist bekannt, dass durch Einsatz der AGR die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen unter die Grenze von 2 g/kWh gedrückt werden können.

Vor diesem Hintergrund untersuchen die Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, das Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Universität Braunschweig (ivb) und die FVTR GmbH im Rahmen eines gemeinsamen Projekts das Potential von AGR-basierten Brennverfahren zur Erfüllung der IMO-Tier-III-NO<sub>x</sub>-Grenzwerte an mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotoren.

Die für die Erreichung der IMO-Tier-III-Grenzwerte notwendigen hohen AGR-Raten führen physikalisch bedingt zu einem markanten Anstieg der Partikelemissionen, was neben einer komplexen Aufladegruppe auch zu gesteigerten Anforderungen an das Einspritzsystem führt. Verglichen mit dem heutigen Stand der Technik bei Großmotoren-Common-Rail-Systemen sind die Einspritzdrücke anzuheben und die Einführung von Mehrfacheinspritzkonzepten (vor allem eine Kombination aus Haupt- und angehängter Nacheinspritzung) zu erwägen.

Es werden aktuelle Messergebnisse präsentiert, die zeigen, dass die IMO-Tier-III-NO<sub>x</sub>-Limits bei mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotoren mit AGR sicher einzuhalten sind. Ergänzend werden Simulationsergebnisse, basierend auf diesen Messung gezeigt, die das Potenzial für einen möglichen Serieneinsatz der Abgasrückführung darstellen sollen. Aufbauend darauf werden die Möglichkeiten moderner Common-Rail-Einspritzsysteme im Hinblick auf Mehrfacheinspritzstrategien zur Reduzierung der Partikelemissionen mit Messergebnissen aufgezeigt.

Die sich in diesem Zusammenhang ergebenden erheblichen Herausforderungen und Forschungsbedarfe werden dargestellt und die weitere Vorgehensweise für das gemeinsame Forschungsprojekt umrissen.