

Emissionsstrategien für Großmotoren in der Schifffahrt - Herausforderung und Lösungsansätze

Horst Harndorf
Universität Rostock, LKV Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren

Martin Reißig
FVTR Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik
Rostock GmbH

Abstract

The marine and large diesel engine industry faces huge challenges regarding the significant reduction of harmful emissions. Over the past years, the relative as well as the absolute contribution of emissions from shipping to the overall emissions has increased considerably. In the future this tendency has to be reversed, to demonstrate the ecologic advantages of shipping as an efficient means of international transport

In the immediate future, SCR catalysts or dual-fuel engine concepts will be applied to comply with the upcoming IMO emission limits. In addition to the IMO requirements, rapid solutions for a significant reduction of particulate emissions will be necessary.

Generally, a vast number of promising emission reduction technologies for large diesel engines are already known. Some of them have been tested successfully at test beds and pilot plants. Significant efforts in research and development will be necessary to transfer these concepts to industrial applications and reliable products. In this context, the quality of the fuel available for large marine diesel engines of the future is of central importance.

Kurzfassung

Die internationale Schifffahrt spielt bei der Bewältigung von Güter- und Personentransportleistungen eine zentrale Rolle. So werden näherungsweise 90% des weltweiten Transportvolumens von Schiffen erbracht. Das Schiff als Transportsystem ist hoch effizient und bietet geringe spezifische Transportkosten. Darüber hinaus sind moderne Schiffsdieselmotoren hoch-effiziente Verbrennungskraftmaschinen, die niedrigste spezifische Kraftstoffverbräuche garantieren. Mit einem Anteil von insgesamt mehr als 95 % ist der Dieselmotor mit Abstand die führende Antriebsquelle in der Handelsschifffahrt.

Demgegenüber stehen kritisch hohe Abgasemissionen, die sich sowohl bei absoluter als auch spezifischer Bewertung gegenüber anderen Antriebsarten (z.B. Pkw, Nkw) signifikant unterscheiden. So beträgt zum Beispiel der durch den Schiffsverkehr verursachte Stickoxidausstoß (NO_x) ca. 18 % der gesamten weltweiten jährlichen NO_x-Emissionen. Alleine in Deutschland hat sich der NO_x-Anteil aus der internationalen Schifffahrt von 5,9 % im Jahre 1990 auf 12,8 % in 2008 erhöht [1]. Des Weiteren stehen die Schwefeloxid(SO_x)-Emissionen in der Kritik, die sich während des Verbrennungsprozesses aus den hohen Schwefelkonzentrationen im Kraftstoff bilden und so zu den bekannten Umweltbelastungen (z.B. sauren Regen) führen.

Auf Grund der in ihrer Gesamtheit großen Mengen ausgestoßener Schadstoffe wurde durch die International Maritime Organisation (IMO) eine Begrenzung der Luftverschmutzung beschlossen. Diese enthält u.a. ab den Jahren 2015/2016 verschärfte Grenzwerte zunächst für die SO_x- sowie NO_x- Emissionen. Dabei gelten für spezielle Zonen in Küstennähe - sogenannte „Emission Control Areas“ (ECAs) – besonders consequente Regelungen.

So ist der Schwefelgehalt im Kraftstoff außerhalb der Emissionskontrollgebiete ab 2012 auf 3,5 % und ab 2020 auf 0,5 % begrenzt, während innerhalb der ECA's entsprechend deutlich strengere Limitierungen von 0,1% ab dem Jahr 2015 bestehen. Für die europäischen Hoheitsgewässer wurden die Bereiche der Nord- und Ostsee als sogenannte ECAs ausgewiesen. Darüber hinaus gibt es vergleichbare Vorgaben für die Ost- und Westküste der USA sowie das Küstengebiet Kanadas.

Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte wurde somit zu einem zentralen Entwicklungsziel für alle neuen maritim eingesetzten Motoren und erfordert daher verstärkte und nachhaltige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf den Feldern der inner- und nachmotorischen Emissionskontrolle. Dabei wird der Einsatz von bereits bei Pkw und Nkw etablierten Abgasnachbehandlungsverfahren (z.B. Oxidationskatalysator (DOC), Partikelfilter (DPF), Selektive katalytische NOx-Reduktion (SCR)) vor allem durch den hohen Schwefelgehalt bei maritimen Kraftstoffen erschwert oder gar verhindert.

Durch den Einsatz von SCR-Katalysatoren, die eine erhöhte Schwefeltoleranz besitzen, werden die von der IMO ab dem Jahr 2016 ff vorgesehenen NOx-Emissionsgrenzwerte Tier II erfüllt werden können. Über die aktuellen Vorgaben der IMO hinaus werden zudem kurzfristig Lösungen zur Reduzierung der kritisch hohen Partikelemissionen angestrebt.

Eine weitere Möglichkeit, um auf die lokal unterschiedlichen Emissionsanforderungen bei weltweit operierenden Schiffen reagieren zu können, wird bei den Motorenherstellern u.a. in einer bivalenten Kraftstoffstrategie gesehen. Dabei werden innerhalb der ECA's mit strengerer Emissionsgesetzgebung (IMO Tier III) höherwertige Destillatkraftstoffe oder mit steigender Tendenz auch Erdgas (LNG) zum Einsatz kommen, während außerhalb dieser Kontrollgebiete (IMO Tier II) die Motoren noch mit minderwertigen, jedoch aus betriebswirtschaftlicher Sicht sehr preiswerten Rückstandsölen betrieben werden dürfen. Kompromisse bei der Auslegung des Brennverfahrens (z.B. Brennraum- und Kolbengestaltung, Einspritzsystem, Aufladegruppe, Abgasrückführung), die auf unterschiedliche Kraftstoffqualitäten appliziert werden müssen, sind die Folge derartiger Entwicklungen.

Aus den beschriebenen Zusammenhängen leitet sich für die Weiterentwicklung von Großmotoren für Schiffsantriebe im Spannungsfeld von Effizienz, Umweltverträglichkeit und betriebswirtschaftlichen Zwängen umfängliche Forschungsaktivitäten ab.

1. Einleitung

Die Großmotorenbranche steht hinsichtlich einer wirkungsvollen Emissionskontrolle insbesondere auf den Feldern Stickoxiden (NOx), Schwefeloxiden (SOx) - und Partikeln (PM) vor großen Herausforderungen. Strikte Emissionsgrenzwerte für landbasierten Verkehr und die Energiewirtschaft führten dazu, dass der Beitrag dieser Emittenten an der Gesamtemission deutlich gesunken ist. Gleichzeitig stieg der Anteil dieser Schadstoffe aus dem Schiffsverkehr stark an. Zur Umkehr dieser Tendenz werden zukünftig der maritimen Wirtschaft größere Anstrengungen abverlangt werden. Die Umsetzung der durch die IMO vorgegebenen Emissionsziele werden dafür allein nicht ausreichen.

Grundsätzlich stehen zur Umsetzung emissionsenkender Maßnahmen eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung. Deren erfolgreiche Übertragung auf den Großmotor ist jedoch mit erheblichen Herausforderungen für die Forschung und Entwicklung verbunden. Für eine erfolgreiche Kombination möglicher Einzelmaßnahmen zu einem effektiven und effizienten Gesamtpaket ist eine systemische Betrachtung und Optimierung von Motor und Abgasnachbehandlung notwendig. Das Fehlen einer zukünftigen Fortschreibung anspruchsvoller und einheitlicher Emissionsgrenzwerte über das Jahr 2020 hinaus bewirkt entsprechende Unsicherheiten und bedeutet daher für alle Beteiligten, ob Forscher, Motorenentwickler, Zulieferer oder Betreiber, erhebliche Entwicklungs- und Investitionsrisiken.

2. Emissionen aus Schiffsdieselmotoren – Historie, Stand und Vergleich mit dem Straßentransportsektor

Die IMO Tier III Grenzwerte für NO_x-Emissionen und die Vorgaben für eine schrittweise Absenkung der erlaubten Schwefelanteile im Kraftstoff standen in den vergangenen Jahren im Fokus umfangreicher Diskussionen innerhalb der Schifffahrtsbranche. Im Ergebnis ist der Einführungstermin für die NO_x-Grenzwerte auf Basis IMO Tier III in Nord- und Ostsee in Frage gestellt. Ebenso offen ist die für 2018 vorgesehene Überprüfung der ab 2020 geplanten Absenkung des Grenzwerts für Kraftstoffschwefel auf 0,5%_m außerhalb der SECAs.

Durch die entstandenen Verzögerungen und Unsicherheiten besteht die Gefahr, dass die internationale Schifffahrt bei Umweltstandards und Zukunftsfähigkeit noch weiter hinter landbasierte Transport- und Industriesektoren zurückfällt. Aus **Abbildung 1** geht die Entwicklung der NO_x-Grenzwerte für den europäischen Straßentransportsektor am Beispiel schwerer Nutzfahrzeuge (Nkw) hervor, die im Vergleich zu Großdieselmotoren für den internationalen Seeverkehr gegenübergestellt und diskutiert werden. Folgende Sachverhalte werden dabei deutlich:

- Die Emissionsgrenzwerte für den straßengebundenen Transport in Europa wurden über die zurückliegenden zwei Dekaden kontinuierlich und im Ergebnis drastisch reduziert (Euro I bis Euro VI).
- Eine wirksame Emissionskontrolle für die internationale Schifffahrt wurde zeitlich verzögert aufgenommen und ist vergleichsweise wenig ambitioniert.
- Die aktuell gültigen Grenzwerte für den Schiffsverkehr übersteigen die des straßengebundenen Transports um Faktoren (Beispiel Nkw: NO_{x,max} bei Euro VI Motoren ca. 0,3 – 0,4 g/kWh auf Basis EN 590 Diesel mit S<10 ppm).
- Selbst bei Umsetzung der in 2015 bzw. 2020 geplanten Emissionsgrenzwerte besteht eine erhebliche Diskrepanz für den Schiffsverkehr, die sich wie folgt darstellt:
 - innerhalb ECA's: NO_x ca. Faktor 5, Kraftstoffschwefel Faktor 100
 - außerhalb ECA's: NO_x ca. Faktor 20, Kraftstoffschwefel Faktor 500

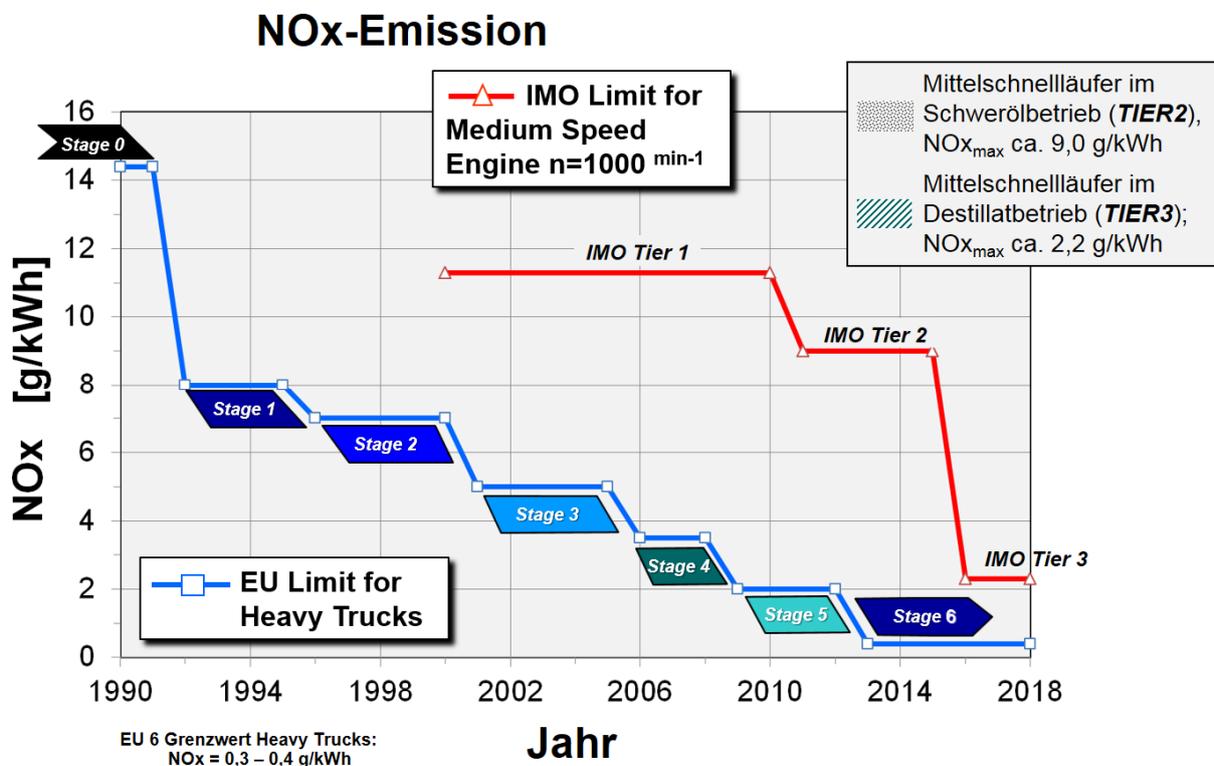


Abbildung 1: Vergleich der NO_x-Grenzwerte für den Straßenverkehr in Europa auf Basis schwerer Nkw im Vergleich zu den IMO Grenzwerten für den internationalen Seeverkehr

So hat sich der Anteil des internationalen Schiffsverkehrs an den Gesamtemissionen in den letzten 20 Jahren kontinuierlich erhöht und im dargestellten Zeitraum mehr als verdoppelt [1]. Eine Umkehr dieses Trends für den Schiffsverkehr ist selbst bei kurzfristiger Umsetzung der geplanten IMO Grenzwerte nicht zu erwarten.

Auf Grundlage des beschriebenen Sachverhalts hat sich die öffentliche Wahrnehmung gegenüber der Umweltbilanz des Schiffsverkehrs in jüngerer Vergangenheit erkennbar verschlechtert. Selbst innerhalb der Kreuzfahrtbranche, generell mit modernen und gut gemanagten Schiffen ausgestattet, sieht man sich infolge kritisch hoher Schadstoffemissionen (NO_x, SO_x- und Partikeln) einer zunehmenden negativen Meinungsbildung ausgesetzt. Die daraus resultierenden Vorwürfe können nicht immer und in allen Details einer wissenschaftlichen Überprüfung standhalten. Jedoch hat es die internationale Gesetzgebung und damit die Schifffahrtsbranche insgesamt versäumt, durch ambitionierte Emissionsziele und einen nachvollziehbaren Zeitplan der öffentlichen Wahrnehmung mit Blick auf überzeugende Umweltstandards entgegenzutreten.

Die Umsetzung einer ambitionierten und wirkungsvollen Emissionskontrolle in der Schifffahrt wird den Einsatz neuer bzw. weiterentwickelter Technologien an Bord erzwingen. Entsprechend wird hier der betriebswirtschaftliche Druck zunehmen. Dies galt und gilt aber ebenso für den straßengebundenen Transport, wo umfangreiche innovative Motorentechnologien, z.B. Common-Rail Einspritzsysteme, 2-stufige Turboaufladung, variable Ventiltriebe usw., einschließlich Abgasnachbehandlungssysteme (DOC, DPF, SCR) gestiegene Investitionskosten für die Fahrzeuge bedingen. Darüber hinaus mussten steigende Kosten für schwefelfreien Kraftstoff, AdBlue-Verbrauch sowie Straßengebühren durch die Flottenbetreiber bewältigt werden.

Mit Blick auf die durch die IMO vorgegebenen Emissionsgrenzwerte haben Motorenentwickler und Zulieferer in den vergangenen Jahren eine Vielzahl innovativer Technologien entwickelt (**Abbildung 2**). Deren Systemintegration und damit Effizienz und Zuverlässigkeit zur Senkung von Kraftstoffverbrauch (CO₂) und Abgaschadstoffen müssen überprüft und je nach Einsatzbedingungen eines Schiffes bei Bedarf weiterentwickelt werden.

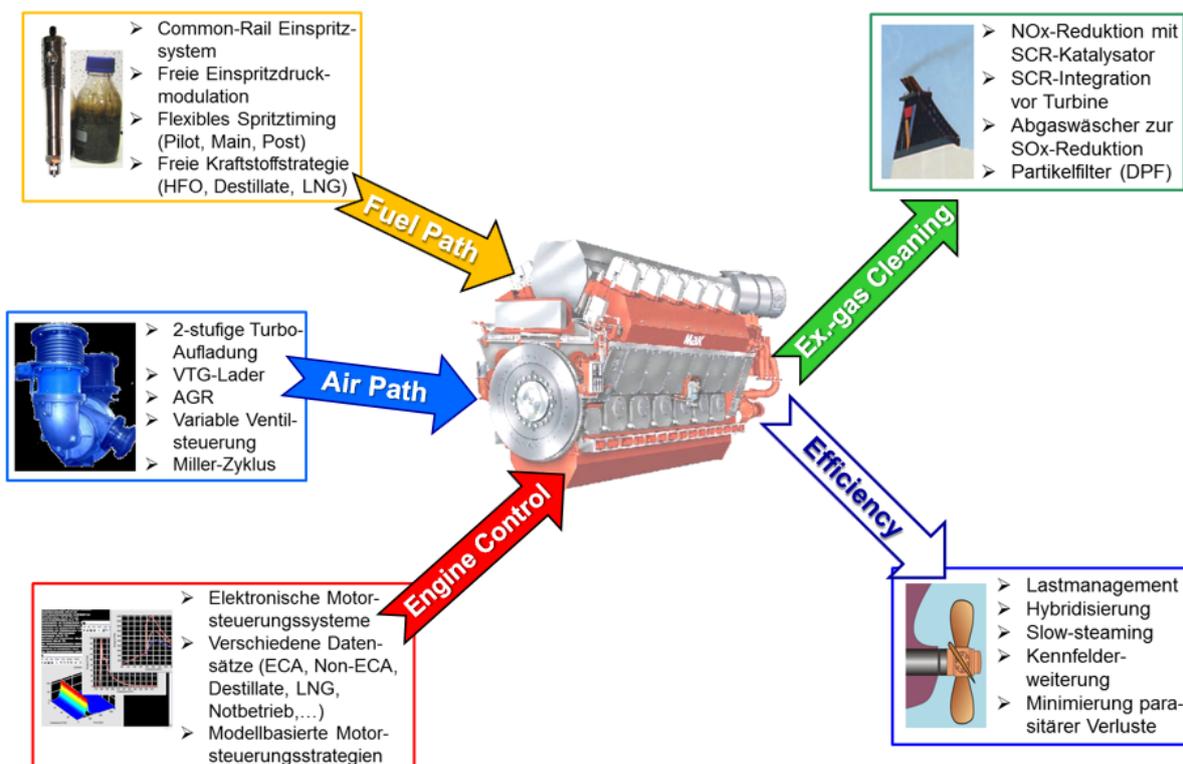


Abbildung 2: Verfügbare Motortechnologien zur Systemoptimierung von Brennverfahren und Abgasnachbehandlung

Voraussetzung für die Umsetzung innovativer Technologiepakete bei Großmotoren ist es, dass anspruchsvolle und verlässliche gesetzgeberische Vorgaben zur Emissionskontrolle bestehen, um so eine erfolgreiche Übertragung dieser Technologien in die industrielle Anwendung zu beschleunigen. Aus diesen Feststellungen wird aber auch deutlich, dass der Großmotor als Gesamtsystem deutlich an Komplexität gewinnen wird.

Im Gesamtergebnis ist zu erwarten, dass sich durch gesetzgeberische Anreize nicht nur Wettbewerbsvorteile bei Flottenbetreibern einstellen werden, sondern insbesondere auch bei Motorenherstellern und Zulieferern zusätzliche Wertschöpfung entsteht.

3. Entwicklungstrends vor dem Hintergrund IMO Tier III Gesetzgebung

3.1 Einhaltung der NO_x -Emissionen mittels SCR

Für die Einhaltung der IMO Tier III NO_x -Grenzwerte zeichnet sich z.Z. die SCR-Technologie als generell bevorzugter Lösungsansatz ab. Das gilt insbesondere für den Bereich der schnell- und mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotoren. Während NO_x -Grenzwerte im Bereich von 3,5 bis 4,0 g/kWh (z.B. EU Schienenfahrzeuge Stage IIIB, USA EPA Tier 4 interim) bei Verwendung hochwertiger Destillatkraftstoffe durch den Einsatz von AGR-Konzepten erreicht werden können, ermöglicht die SCR-Technologie auch die Einhaltung der von der IMO vorgegebenen NO_x -Grenze von ca. 2 g/kWh (abhängig von Motornendrehzahl) selbst beim im Schiffsbetrieb üblichen Einsatz von Rückstandsbrennstoffen mittlerer Qualität. Die eingesetzten Vanadium-Wolfram-Titanoxid (VWT) SCR-Materialien können dabei in Abhängigkeit der Abgas- bzw. Betriebstemperaturen Schwefelanteile im Kraftstoff bis ca. 2% tolerieren. Jedoch scheidet für derartige Anwendungen der Einsatz eines vorgelagerten Diesel-Oxidationskatalysators aus, womit eine Verschiebung des NO/NO_2 Gleichgewichts und damit eine Begünstigung der sogenannten Fast-SCR Reaktion im anschließenden SCR-Katalysator nicht möglich ist.

In **Abbildung 3** ist die heute übliche Integration eines SCR-Katalysators in den Abgasstrang eines schnell- bzw. mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotors schematisch dargestellt. Die zur Bereitstellung des Reduktionsmittels Ammoniak an Bord mitgeführte wässrige Harnstofflösung ist üblicherweise höher konzentriert gegenüber Straßenanwendungen (32,5% Harnstofflösung für Pkw und Nkw), da ihr Einfrieren unter Schiffsbedingungen nicht befürchtet werden muss und somit die Reichweite des Reduktionsmittels erhöht werden kann.

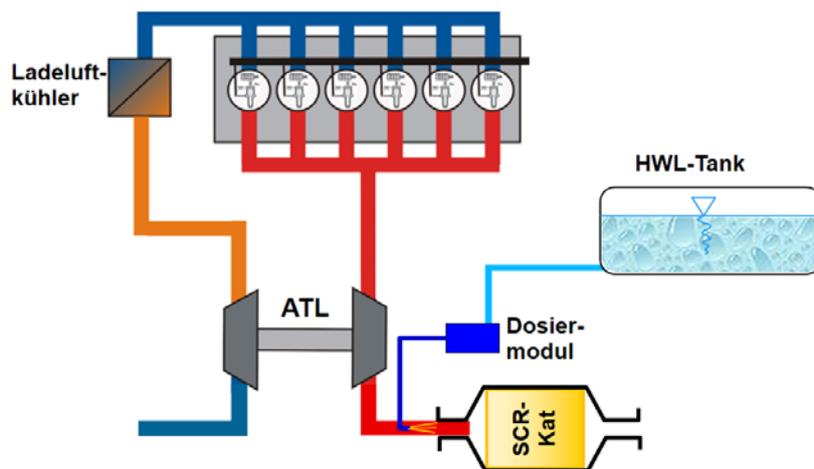


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Integration eines SCR-Katalysator an einem 4-Takt Schiffsdieselmotor

Soll die SCR-Technologie an hocheffizienten Schiffsdieselmotoren mit sehr niedrigen Abgas-temperaturen eingesetzt werden, kann das für die SCR-Reaktionen notwendige Temperaturfenster bei einer Einbauposition am ATL nach Turbine im gesamten Betriebskennfeld nicht mehr sicher erreicht werden. Das gilt für moderne 2-Takt Schiffsdieselmotoren, aber auch für zukünftige 2-stufig aufgeladenen Mittelschnellläufer. Für diese Anwendungen muss der SCR-Katalysator vor bzw. zwischen die Turbinenstufen des ATL platziert werden (**Abbildung 4**). Neben erheblichen Anforderungen an die Regelung und Absicherung der Aufladegruppe ergibt sich auch ein verändertes Betriebsdruckniveau für den SCR. Diese Druckänderung hat Auswirkungen auf die Ammoniak (NH_3) Ein- und Ausspeicherung sowie das Konvertierungsverhalten des SCR-Katalysators.

Untersuchungen zum Verhalten von Standard VWT-basierten SCR Katalysatormaterialien an einem druckfesten Modellgasprüfstand zeigten unter anderem einen starken Einfluss des Betriebsdrucks auf die Ammoniak-Speicherfähigkeit des Katalysators. Dieser Effekt ist vor allem bei Lastwechseln am Motor zu berücksichtigen. Da ein Lastsprung auch mit einer Druckänderung an der Einbauposition des SCR vor Turbine verbunden ist, muss für eine korrekte Dosierung des Reduktionsmittels die druckbedingte Änderung der NH_3 -Adsorption am SCR berücksichtigt werden, um NO_x oder NH_3 Durchbrüche bei Lastanhebung bzw. Lastabsenkung zu verhindern [2].

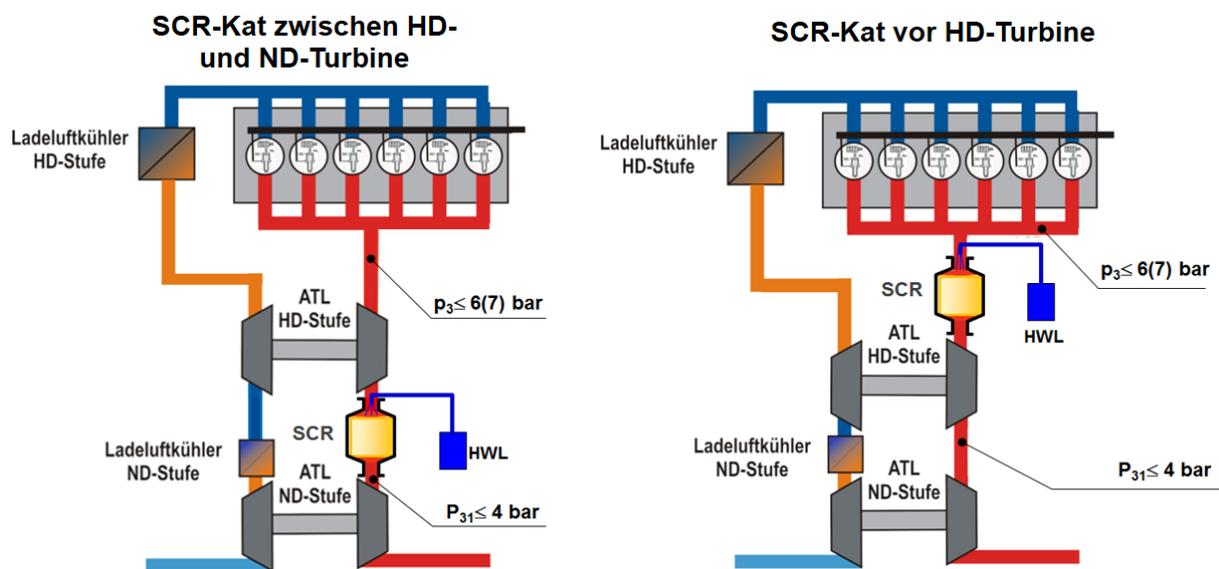


Abbildung 4: Abgastemperatur abhängige Integrationsmöglichkeiten eines SCR-Katalysator an einem 2-stufig aufgeladenen 4-Takt Schiffsdieselmotor

Eine Anhebung des Betriebsdrucks hat weiterhin Auswirkungen auf die Energie- und Stofftransportprozesse im Katalysator und auf die chemischen Reaktionen an seiner Oberfläche. Messungen an einem 1-Zylinder Forschungsmotor im Schwerölbetrieb [2] zeigten, dass bei einer Anhebung des Betriebsdrucks eine Zunahme der stationären NO_x -Konvertierungsrate bei hohen Raumgeschwindigkeiten am SCR erreicht werden kann (**Abbildung 5**).

Um einen zuverlässigen und effizienten Einsatz der SCR-Technik für die beschriebenen Einbaupositionen zu gewährleisten, besteht mit Blick auf das Prozessverhalten des Katalysators selbst noch weiterer Forschungsbedarf. Aber auch auf den Feldern der Einbringung und Aufbereitung des Reduktionsmittels, sowie den vorhandenen Wechselwirkungen zwischen SCR, ATL und Motorbetrieb, insbesondere bei transienten Betriebszuständen, sind weitere Entwicklungsanstrengungen notwendig.

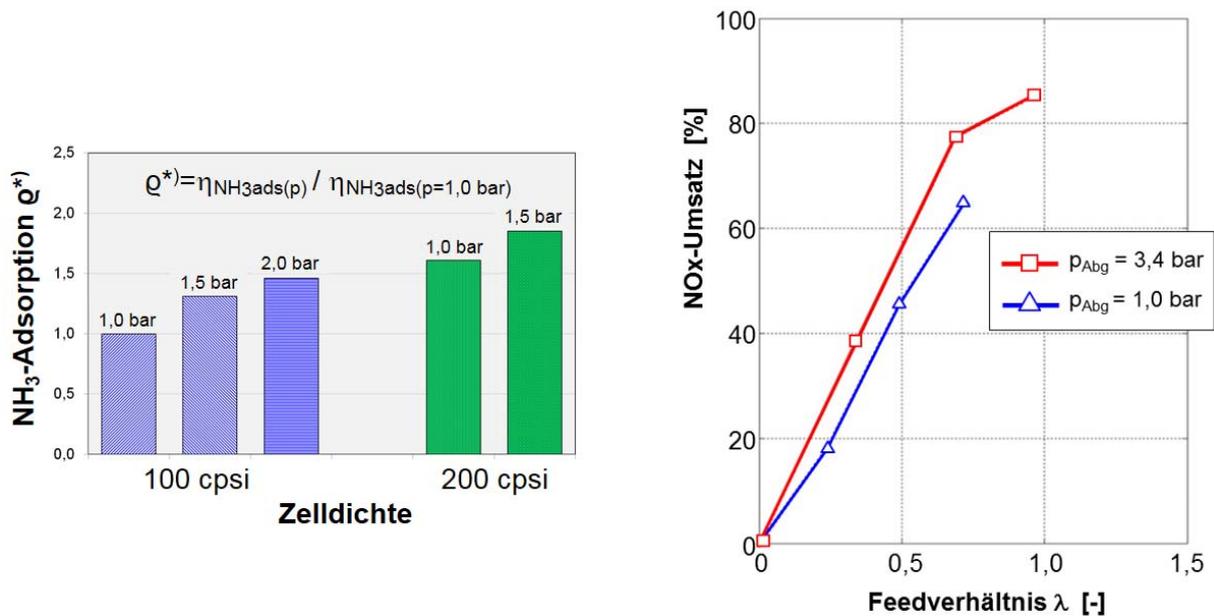


Abbildung 5: Links: Druckabhängige Zunahme der Ammoniakadsorption an zwei VWT-SCR Keramiken (100 und 200 cpsi)
 Rechts: Druckabhängige Änderung der stationären NO_x-Konvertierungsraten an einem VWT-SCR Katalysator, Motorbetrieb mit Schweröl [2]

3.2 NO_x-Reduktion durch Abgasrückführung (AGR)

Ein bei Schiffsdieselmotoren bisher nicht umgesetzter Ansatz zur Reduzierung der NO_x-Emissionen stellt die Einführung eines Abgasrückführ(AGR)-Konzeptes dar. Aus dem Nutzfahrzeug(Nfz)-Motorenbereich ist bekannt, dass durch Einsatz der AGR die NO_x-Rohemissionen unter die Grenze von 2 g/kWh gedrückt werden können [2]. Abgasrückführ-Konzepte waren bisher im Bereich der Schiffsdieselmotoren wegen des hohen Schwefelanteils im Kraftstoff, welcher insbesondere bei den AGR-Kühlern zu nicht beherrschbaren Versottungsproblemen führte, nicht anwendbar.

Eine Vielzahl von Untersuchungen an Pkw- und Nkw-Dieselmotoren zeigt, dass NO_x-Niveaus im Bereich kleiner 2 g/kWh mittels gekühlter Abgasrückführung sicher erreicht werden können. Im Rahmen eigener Untersuchungen an einem mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotor konnten diese Aussagen auch für den Großmotor grundsätzlich bestätigt werden [3]. Bei AGR-Raten im Bereich von 30% ist eine Unterschreitung der IMO Tier III NO_x-Grenzwerte möglich (**Abbildung 6**), bei gleichzeitig nur geringfügigen Mehrverbräuchen.

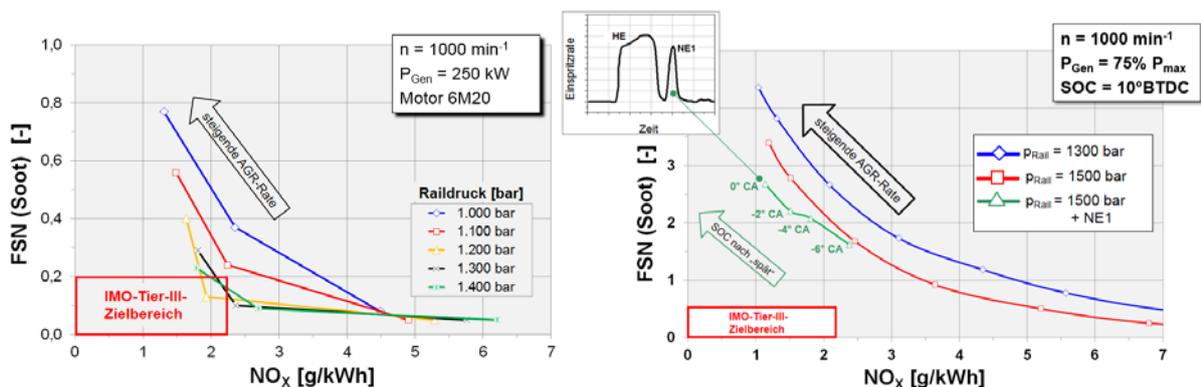
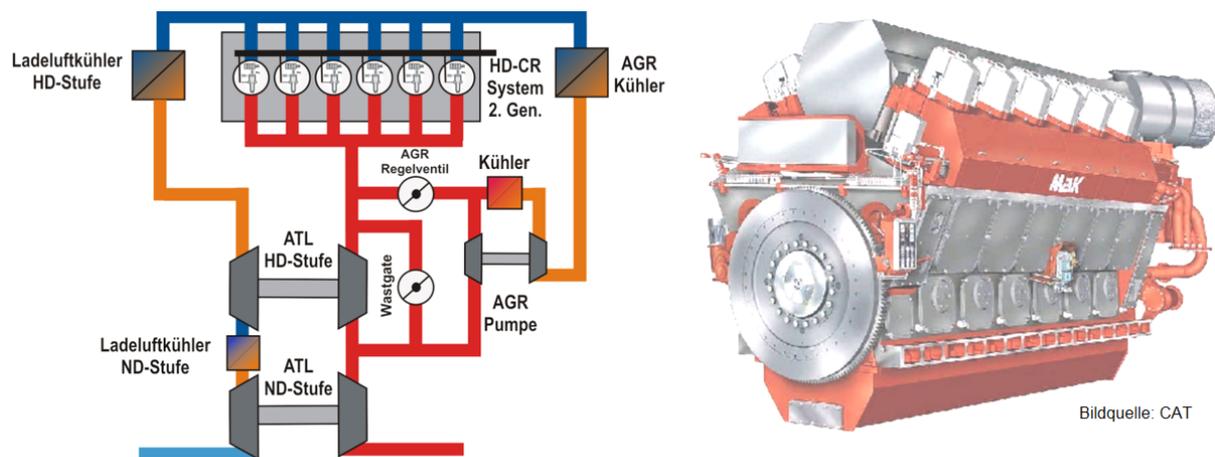


Abbildung 6: Einfluss von Abgasrückföhrate, Einspritzdruck und angelagerte Nacheinspritzung auf den Soot (Partikel) - Stickoxid (NO_x) trade-off [3]

Für einen breiten Einsatz der AGR am Schiffsdieselmotor sind jedoch noch eine Reihe von Fragen zu klären. Insbesondere die im AGR-Betrieb stark ansteigenden Partikelemissionen müssen deutlich abgesenkt werden (mindestens unter die Sichtbarkeitsgrenze). Neben einer weiteren signifikanten Anhebung des Einspritzdrucks zur Verbesserung der Rußoxidation in der Ausbrandphase zeichnet sich die Einführung einer an die Haupteinspritzung angelagerten Nacheinspritzung zur Kontrolle der Partikelemissionen ab. Zwei Forderungen, die sich nur mit modernen Hochdruck Common-Rail Einspritzsystemen umsetzen lassen. Weiterhin muss das mit steigender AGR-Rate absinkende globale Luftverhältnis wieder angehoben werden, was erhöhte Ladeluftdrücke erfordert, die wiederum nur über eine 2-stufige Aufladung realisiert werden können. Damit ergibt sich für die Umsetzung der Abgasrückführung am mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotor das in **Abbildung 7** dargestellte Anlagenschema mit den damit einhergehenden Vor- und Nachteilen.



AGR-basiertes Konzept	Innerhalb ECA	Außerhalb ECA	Vor- und Nachteile
Motorintern, ohne Abgasnachbehandlung	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoff: Destillat, schwefelarm • Einspritzsystem: Common-Rail mit Nacheinspritzung • Ladeluftsystem: 2-stufig • NOx-Reduzierung: IMO III durch AGR • SOx-Reduktion: über Kraftstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoff: Schweröl • Einspritzsystem: Common-Rail; nur Haupteinspritzung • Ladeluftsystem: 2-stufig • NOx-Reduzierung: IMO II-Betrieb; AGR geschlossen • SOx-Reduzierung: keine 	<ul style="list-style-type: none"> + Niedrige Investkosten + Vollintegriertes System - Hohe Kraftstoffkosten innerhalb der ECA's - Komplexes Motorsystem mit aufwändiger Steuerung

Abbildung 7: AGR Konzept mit 2-stufiger Aufladung und Hochdruck Common-Rail Einspritzsystem für IMO Tier III; Vor- und Nachteile AGR

Für die Anwendung der AGR im maritimen Umfeld ist die Kraftstofffrage zu klären. Selbst unter der Voraussetzung, dass die AGR nur innerhalb der ECAs bei gleichzeitigem Einsatz von schwefelreduziertem Kraftstoff ($S < 0,1\%_m$) genutzt wird, stehen nur unzureichende Erfahrungen über die Dauerhaltbarkeit der Einspritzsysteme (höchste Raildrücke im Destillatbetrieb bei gleichzeitiger Schwerölfähigkeit), der Brennraumkomponenten (Kaltkorrosion) und der Bauteile im AGR-Pfad zur Verfügung. Beispielhaft seien hier die Untersuchungen zu Verschmutzungsprozessen an AGR-Kühlern bei Einsatz von Kraftstoffen mit $0,1\%_m$ Schwefel genannt [4]. Mögliche Rückwirkungen auf das Schmieröl und Regelkonzepte für die Aufladegruppe im AGR und Nicht-AGR Betrieb bedürfen ebenfalls weiterer Anstrengungen im Forschungs- und Entwicklungsbereich.

3.3 Dual-Fuel Motoren zur Einhaltung von NO_x und SO_x

Es zeichnet sich ab, dass die Nutzung von Erdgas in Dual-Fuel Motoren für eine zunehmende Anzahl von Schiffskonzepten eine effektive und effiziente Methode zur Einhaltung der zukünftigen NO_x und SO_x Vorgaben sein wird. Im Erdgasbetrieb ermöglichen die Dual-Fuel Motoren eine sichere Einhaltung der zukünftig innerhalb der ECAs vorgeschriebenen Grenzwerte für NO_x und SO_x ohne weitere Abgasnachbehandlung. Extrem geringe Partikelemissionen, vorteilhafte CO₂-Emissionen, günstige Weltmarktpreise sowie die langfristige Verfügbarkeit sprechen für eine langfristige Nutzung dieses Kraftstoffs auch im Schiffsverkehr [5]. Die aktuell verfügbaren Dual-Fuel Motoren sind Derivate etablierter schweröltauglicher Dieselmotoren. Sie arbeiten im Gasbetrieb üblicherweise als gemischverdichtende Motoren mit Pilotstrahlzündung (**Abbildung 8**).

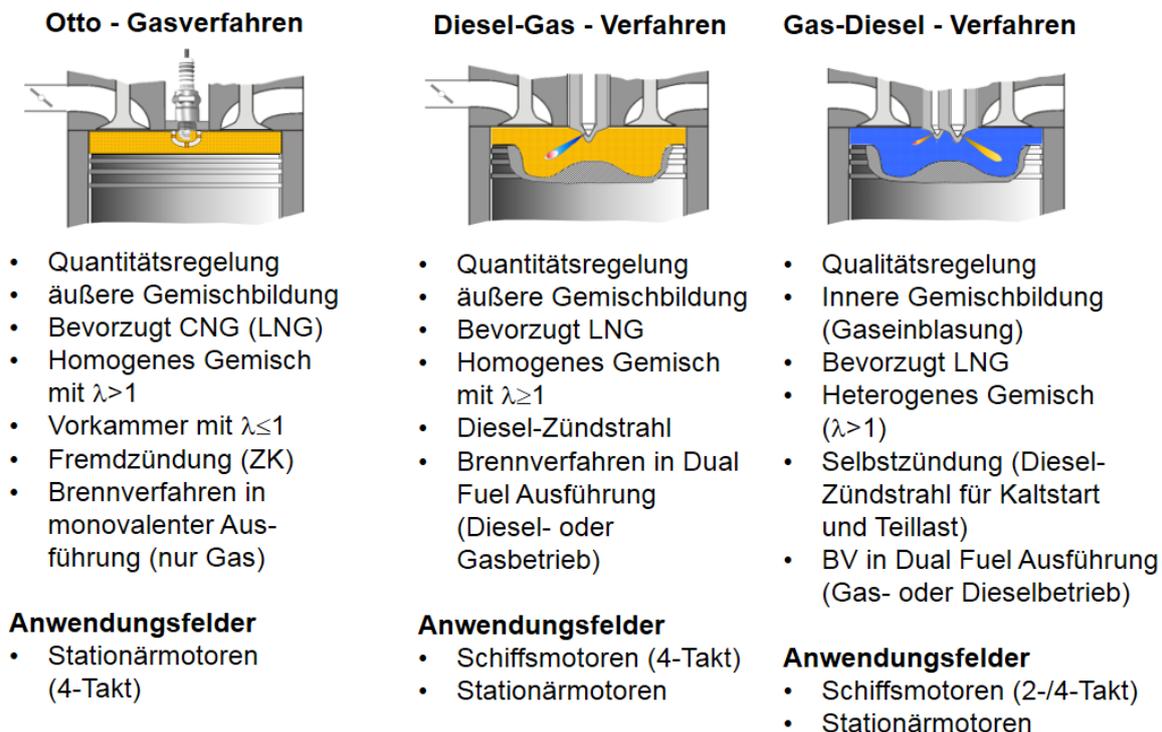
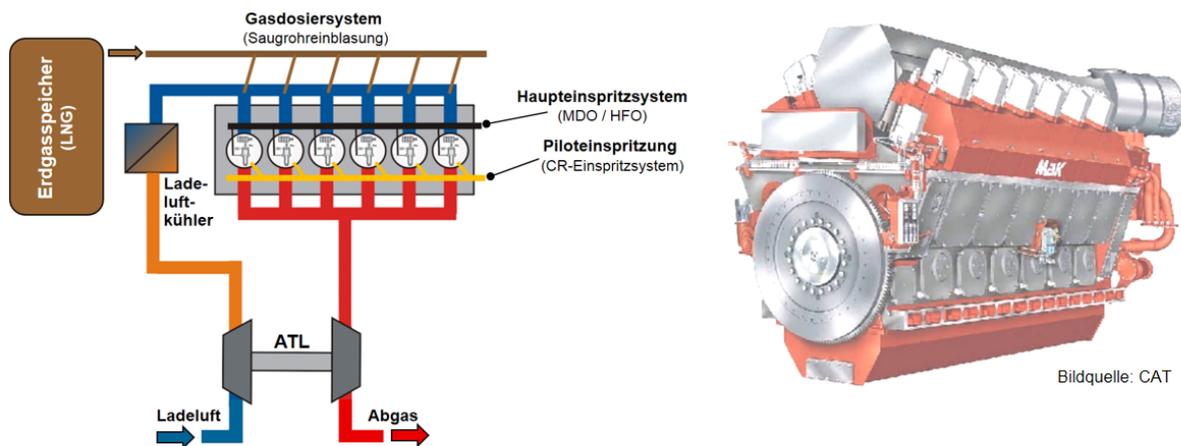


Abbildung 8: Gasbrennverfahren für Großmotoren: Mögliche Anwendungsfelder in mono- und bivalenter Ausführung

Eine Einbringung des Brenngases über saugrohrseitig installierte, magnetventilgesteuerte Gasdosierventile sowie ein zusätzliches Einspritzsystem inklusive zusätzlicher kleinstmengenfähiger Injektoren für die Pilotzündmengen stellen den aktuellen Stand der Technik dar. Das volllastfähige Einspritzsystem für den flüssigen Kraftstoff ist in der Regel ein schwerölfähiges PLD Einspritzsystem und wird weitgehend unverändert vom Dieselmotor übernommen (**Abbildung 9**). Zur Regelung der Gasdosierventile, des CR-Piloteinspritzsystems, zur Klopfregelung und zur Umschaltung zwischen den verschiedenen Betriebszuständen (Gas – Flüssigkraftstoff) werden gegenüber dem Standard-Dieselmotor deutlich komplexere Steuergeräte und Steueralgorithmen benötigt.

Die Hauptherausforderung bei der Einführung der Dual-Fuel Technologie ist zurzeit noch die eingeschränkte Verfügbarkeit von LNG an den Schiffs Liegeplätzen. Gelingt es, die notwendigen logistischen, rechtlichen und sicherheitstechnischen Voraussetzungen für das Be bunkern von Handels- und Passagierschiffen mit LNG umzusetzen, dann könnte ein stärkerer Wachstumsimpuls von Großmotoren in Dual-Fuel Ausführung ausgehen.



Bildquelle: CAT

LNG-basiertes Konzept	Innerhalb ECA	Außerhalb ECA	Vor- und Nachteile
Motorintern, ohne Abgasnachbehandlung	<ul style="list-style-type: none"> Kraftstoff: Erdgas + Destillat Einspritzsystem: PLD (CR) + Gas-Dosiersystem + CR-System für Piloteneinspritzung (Zündstrahl) Ladeluftsystem: 1-stufig NOx-Reduzierung: IMO III über Gas-Mager-Betrieb SOx-Reduktion: über Kraftstoff 	<ul style="list-style-type: none"> Kraftstoff: Schweröl Einspritzsystem: PLD (Common-Rail); nur Haupteinspritzung Ladeluftsystem: 1-stufig NOx-Reduzierung: IMO II-Betrieb SOx-Reduzierung: keine wegen HFO 	<ul style="list-style-type: none"> + Sehr geringe Emissionen + Keine Abgasnachbehandlung + CO₂-Vorteil ggü. Diesel - Komplexe Funktionalitäten - Zusätzliches Piloteneinspritzsystem + Gasdosiersystem - Geringere Leistungsdichte - Platzbedarf für LNG-Speicher - Sicherheit und Versorgungsstruktur

Abbildung 9: LNG basiertes IMO Tier 3 Konzept für Dual-Fuel Großmotoren im Diesel- und Gasbetrieb

Gleichwohl müssen bei der Umsetzung der Dual-Fuel Technologie noch umfangreiche technische Optimierungsmaßnahmen geleistet werden. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht vor allem auf folgenden Feldern:

- Reduzierung des Methan-Schlupf: Teilweise kann das vergleichsweise günstige H/C-Verhältnis von Methan aufgrund eines unerwünscht hohen Methanschlupfs aus dem Brennraum und den damit einhergehenden Treibhausgasfaktor von Methan in der Praxis kaum überzeugend vermittelt werden.
- Einsatz eines kleinstmengenfähigen Haupteinspritzsystems: Durch ein CR-Einspritzsystem, das sowohl die Vollastmenge für den Dieselbetrieb als auch die Kleinstmenge als Zündstrahlmenge für den Gasbetrieb zuverlässig absetzen kann, könnte das aktuell benötigte separate Piloteneinspritzsystem entfallen.
- Erweiterung des im Gasbetrieb nutzbaren Motorkennfelds: Aufgrund des engen Betriebsfensters zwischen Klopf- und Aussetzergrenze ist heute noch kein Gasbetrieb im gesamten Kennfeldbereich des Dieselmotors möglich. Durch innovative Brennverfahrensstrategien und Regelungskonzepte besteht die Möglichkeit, bestehende Grenzen zukünftig weiter auszudehnen.
- Wirkungsgradsteigerung: Hohe Wirkungsgrade, vor allem im Gasbetrieb, werden zukünftig an Bedeutung gewinnen.

3.4 Schwefelarmer Kraftstoff versus Schwefelwäscher

Die von der IMO ab 2015 innerhalb der SECAs geforderte Nutzung von Kraftstoff mit einem Schwefelanteil von maximal 0,1%_m Schwefel bedingt de facto einen Wechsel von Schweröl auf Destillatkraftstoffe. Dieser Wechsel ist mit einem Anstieg der Kraftstoffkosten verbunden.

Alternative Technologien zur Senkung der SO_x Emissionen treffen also auf erhebliches kommerzielles Interesse, sofern die Effizienz der Abreinigung so hoch ist, dass ein weiterer Schiffsbetrieb mit Schweröl zulässig ist. Das hat zur Entwicklung verschiedener Systeme von Schwefelwäschern geführt. Neben trockenen Verfahren der Abgasentschwefelung gibt es nasse Verfahren, die nach geschlossenen und offenen Systemen unterschieden werden. Nasse Schwefelwaschverfahren im offenen Kreislauf führen jedoch nur zu einer Verlagerung der SO_x Emissionen von der Abluft in das Wasser. Ein Einsatz dieser offenen Verfahren erscheint ökologisch daher nicht zielführend. Sowohl die geschlossenen nassen als auch die trockenen Entschwefelungsverfahren ermöglichen eine dauerhafte Entfernung der SO_x Emissionen aus der Umwelt, weshalb sie in ihrer positiven Auswirkung auf die Umwelt mit dem Einsatz von schwefelarmen Kraftstoff gleichgesetzt werden können.

Bei einer bestätigten SO_x-Abscheiderate von etwas über 90% ermöglichen Schwefelwäscher auch nach 2015 einen fortgesetzten Schiffsbetrieb mit Schweröl mit 1%_m Schwefelanteil innerhalb der SECAs. Perspektivisch würde eine 50%ige Abscheiderate genügen, um nach 2020 die außerhalb der SECAs geltenden IMO Anforderungen bei Einsatz eines Schweröls mit 1% Schwefel zu erfüllen.

Vor allem trockene Schwefelwäscher können vorteilhaft stromauf eines SCR-Katalysators angeordnet werden, da sie im stationären Betrieb zu keiner signifikanten Abkühlung des Abgasstroms führen. Die Betriebsbedingungen für einen nachgeschalteten SCR-Katalysator verbessern sich dann deutlich.

Folgende Herausforderungen verhindern trotz der positiven ökonomischen Bilanz zurzeit eine breitere Anwendung von Schwefelwäschern:

- Bauraumanforderungen: Insbesondere trockene Schwefelwäscher benötigen erheblichen Bauraum. Nachträgliche Integration in bestehende Schiffsbetriebsanlagen, insbesondere bei Fähren, ist daher kaum möglich. Entsprechend sind F&E-Aktivitäten zur Ausschöpfung aller Potenziale zur Verringerung von Bauraum, Gewicht und Granulatverbrauch, aber auch eine erforderliche Infrastruktur an den Schiffsliegeplätzen, dringend erforderlich.
- Installationsaufwand: Nasswäscher sind mit erheblichen Aufwendungen für Rohrbau, Pumpen, Speicher und Wasseraufbereitung verbunden. Wie bei Trockenwäschern wird dadurch die Installation in bestehende Schiffe äußerst schwierig.
- Reichweite/Speicherkapazität: Wenn Schwefelwäscher über den Status einer Brückentechnologie hinauskommen sollen, muss die SO_x-Speicherkapazität soweit erhöht werden, dass nicht nur Kurzstreckenbetrieb innerhalb der SECAs dargestellt werden kann.
- Die Integration der Schwefelwäscher in Gesamtkonzepte zur Emissionsreduzierung ist weiter zu untersuchen. Die Kombination von Schwefelwäschern mit SCR-Katalysatoren oder Schwefelwäschern mit AGR-Konzepten ist bisher noch nicht hinreichend betrachtet worden.

4. Partikelemissionen von Schiffsdieselmotoren

4.1 Kontrolle der Partikelemissionen - eine große Herausforderung

Partikelemissionen aus Schiffsdieselmotoren sind ein typisches Beispiel für die Folgen einer verzögerten Einführung anspruchsvoller Emissionsgrenzwerte. Noch in den neunziger Jahren war das Niveau der Partikelemissionen aus Schiffsdieselmotoren gegenüber dem straßengebundenen Transportsektor vergleichsweise niedrig und Großmotoren konnten auf einen spezifischen Emissionsvorteil gegenüber kleineren Light- und Medium-Duty Dieselmotoren verweisen. Vor allem aufgrund der durch die hohen Aufladegrade bedingten hohen Verbrennungsluftverhältnisse, die auch bis zur Vollast gewährleistet werden konnten, zeigten Großmotoren zumindest im Destillatbetrieb nur sehr geringe Abgasschwärzungen. Mit flächendeckender Einführung der Diesel-Partikelfilter im Straßenverkehr und zunehmend auch bei mo-

bilen Maschinen hat sich die Situation objektiv und in der öffentlichen Wahrnehmung signifikant geändert (**Abbildung 10**). Schwarze Abgasfahnen hinter Taxis, Bussen und LKW sind bis auf wenige Ausnahmen komplett aus der Alltagswelt verschwunden.

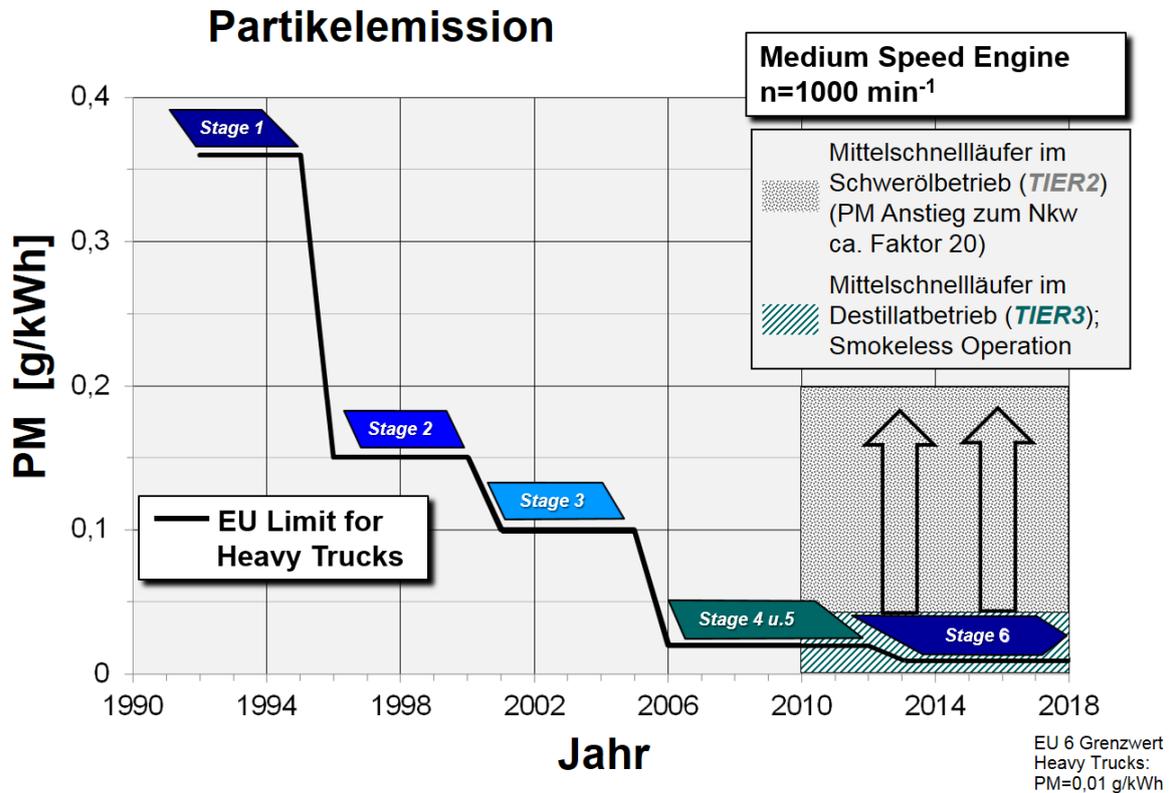


Abbildung 10: Entwicklung der PM Emissionsgrenzwerte für schwere Straßenfahrzeug (Nkw) in Europa im Vergleich zu Schiffsdieselmotoren

Damit sind die Partikelemissionen aus dem Schiffsverkehr sehr schnell und mit hoher Brisanz in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung getreten. Insbesondere Fähr- und Kreuzfahrtschiffbetreiber werden sich in europäischen Häfen sehr schnell Forderungen ausgesetzt sehen, die Maßnahmen zur nachhaltigen Absenkung der Partikelemissionen erforderlich machen. Die Tatsache, dass seitens der IMO aktuell keine Einführung von PM-Grenzwerten zu erkennen ist, wird den entstehenden Handlungsdruck nicht dämpfen.

4.2 Ansätze zur motorinternen Reduzierung der Partikelemissionen

Der effizienteste Ansatz zur motorinternen Reduzierung der Partikelemissionen ist die Umstellung auf Betrieb mit Erdgas (LNG). Das Abgas der Dual-Fuel Motoren im Gasbetrieb ist praktisch partikelfrei. Geringfügige Fortschritte ließen sich noch durch Senkung der aus dem Schmieröl resultierenden Partikel erzielen. Da Dual-Fuel Motoren aber auch einen Schwerölbetrieb (ohne vorherigen Schmierölwechsel) darstellen müssen, ist hier kurzfristig keine Verbesserung möglich.

Ein Wechsel von Schweröl auf Destillatkraftstoff führt ebenfalls zu einer deutlichen Senkung der Partikelemissionen. Vergleichende Messungen [6] zeigten eine Verringerung der Partikelemissionen um 80% bei einem Wechsel von Schweröl (2,6 %_m Schwefel) auf Destillatkraftstoff (0,16 %_m Schwefel). Jedoch ist zu erwarten, dass allein durch einen Wechsel auf Destillatkraftstoff die momentan aufflammenden Diskussionen zu den Partikelemissionen aus Schiffsmotoren nicht beendet werden können. Im Fokus der aktuellen Diskussion stehen Fähr-

ren und im Hafen liegende Kreuzfahrtschiffe. Diese werden aufgrund der aktuellen Gesetzgebung bereits heute mit relativ sauberen Kraftstoffen (< 1% Schwefel) bzw. Destillaten (<0,1% Schwefel) betrieben.

Da nicht alle Schiffskonzepte bzw. Motoren auf Dual-Fuel Betrieb umgestellt werden können, gilt es auch Lösungen für mit Flüssigkraftstoffen betriebene Motoren zu entwickeln. Wie bereits erwähnt, kann motorintern eine Reduzierung der Partikelemissionen vor allem durch Anhebung des Einspritzdrucks und durch Umsetzung von Mehrfach-Einspritzkonzepten erreicht werden. Insbesondere die an die Haupteinspritzung angelagerte Nacheinspritzung ermöglicht eine nahezu verbrauchsneutrale Reduzierung der Partikelemissionen durch Intensivierung der Rußoxidationsphase am Ende der Verbrennung. Solche Konzepte können nur mittels höchstdruckfähiger Common-Rail Systeme umgesetzt werden, die zusätzlich in der Lage sein müssen, Kleinstmengen reproduzierbar abzusetzen. Bezüglich der Dauerhaltbarkeit derartiger Einspritzgeräte gibt es vor allem bei gleichzeitig geforderter Schweröltauglichkeit weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Das gleiche gilt für geeignete Motorsteuerungskonzepte, die die komplexen Mehrfacheinspritzstrategien auch bei schwankenden Kraftstoffeigenschaften korrekt umsetzen können.

4.2 Abgasnachbehandlungskonzepte zur Reduzierung der Partikelemissionen

Die Einführung des Dieselpartikelfilters hat innerhalb der Europäischen Union die erfolgreiche Umsetzung extrem anspruchsvoller PM-Emissionsgrenzwerte für den Straßenverkehr ermöglicht. Es liegt daher nahe, eine Übertragung dieser erfolgreichen Technologie auf Großmotoren und maritime Anwendungen ebenfalls anzustreben. Um dieses Ziel zu erreichen, sind grundsätzlich neue Lösungen zu finden. Die zu bearbeitenden Fragestellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Auswahl eines geeigneten DPF-Konzepts: Aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Filterkonzepte ist das für den Großmotor bestgeeignetste zu identifizieren. Während offene Partikelfilter unbefriedigende Abscheideraten zeigen, bergen geschlossene Filterkonzepte die Gefahr des Verblockens. Metallische und keramische Filter unterscheiden sich in ihrem Asche-Einspeichervermögen aber auch hinsichtlich Preis und Robustheit. In der Vergangenheit getestete Elektrofilter scheinen für motorische Anwendungen ungeeignet zu sein.
- Festlegung einer zuverlässigen Regenerationsstrategie: Solange aufgrund des Schwefelgehalts im Kraftstoff keine Diesel-Oxidationskatalysatoren (DOC) dem DPF vorgeschaltet werden dürfen, kann der NO₂-getragene CRT-Effekt (Continuous Regenerating Trap) nicht für eine Filterregeneration genutzt werden.
- Eine aktive thermische Regeneration des DPF ist am Großmotor aufgrund der niedrigen Abgastemperaturen noch schwieriger umzusetzen als bei Medium- und Heavy-Duty Dieselmotoren in mobilen Anwendungen. Wiederum fehlt der DOC, an dem eine HC-Nachdosierung in Wärme umgesetzt werden könnte. Separate Brenner zur temporären Anhebung der Abgastemperatur sind mit erheblichen Herausforderungen hinsichtlich Bauraum, Zuverlässigkeit, Steuerung und Betriebskosten verbunden.
- Eingrenzung der mit einem DPF-Einsatz kompatiblen Kraft- und Schmierstoffqualitäten: Der Einsatz eines DPF im klassischen Schwerölbetrieb ist nicht zeitnah umsetzbar. Die Frage, für welche Kraft- und Schmierstoffqualitäten ein DPF-Einsatz mit kommerziell praktikablen Wartungsintervallen in den nächsten Jahren erreicht werden kann, ist völlig offen.
- Limitierung des Abgasgedrucks: Großmotoren sind besonders empfindlich gegen erhöhte Abgasgedrücke mit den damit einhergehenden Verbrauchsnachteilen. Welche Maßnahmen in der Motorauslegung die Toleranz gegenüber moderat erhöhten Abgasgedrücken erlauben bzw. wie die Zunahme des Differenzdruckes am DPF über ein ausreichend langes Betriebsintervall minimiert werden kann, müssen beantwortet werden.

- Systemintegration: Wie ein DPF an einem Großmotor mit anderen Abgasnachbehandlungskomponenten optimal zu kombinieren ist, hängt stark von den zugelassenen Kraftstoffqualitäten und den Regenerationskonzepten ab. Hier wäre eine klare gesetzgeberische Entscheidung über die Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte nach IMO Tier III notwendig.

5. Dual-Fuel und Gasmotoren – Notwendige Verbesserungen eines sauberen Konzepts

Bei Dual-Fuel und Gasmotoren besteht mittelfristig Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf folgenden Gebieten: Minimierung des Methanschlupfs, effektive Klopfregelung, Erweiterung des Motorkennfelds, Steigerung des Wirkungsgrads und Verbesserung der Lastaufnahme.

Ein Brennverfahren, welches bezüglich der oben genannten Entwicklungsziele erhebliches Potenzial verspricht ist das Gas-Diesel(DI-Hochdruck)-Verfahren (**Abbildung 8**). Hierbei wird das Brenngas nicht während des Gaswechsels über das Saugrohr zugeführt, sondern erst am Ende des Verdichtungstaktes über einen Gasinjektor direkt in den geschlossenen Brennraum eingeblasen. Dort vermischt sich der Kraftstoff aufgrund des Einblaseimpulses und der Ladungsbewegung mit der komprimierten Frischladung (heterogene Gemischbildung). Die Zündung wird über eine geeignete Zündhilfe, typischerweise einer Pilotmenge flüssigen Kraftstoffs, vor der eigentlichen Brenngaszufuhr, eingeleitet. Die Verbrennung erfolgt weitgehend als Diffusionsverbrennung.

Die Vorteile dieser Strategie liegen darin, dass sich während der Verdichtung kein Brenngas/Luft-Gemisch im Zylinder befindet und daher Klopfreaktionen bzw. Vorentflammungen wirkungsvoll vermieden werden können. Dies ermöglicht die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses und damit die Steigerung des Gesamtwirkungsgrads. Methanschluß aufgrund von Ventilüberschneidungen im Ladungswechsel sowie durch unvollständige Verbrennung in Spalten scheidet ebenfalls aus.

Da keine Klopfgefahr bei Direkteinblasung des Gases am Kompressionsende besteht, kann während einer Lastaufschaltung die zuzuführende Brenngasmenge kurzfristig erhöht und damit die Lastreaktion verbessert werden. Weiterhin kann das untere Motorkennfeld ausgeweitet werden, da aufgrund der heterogenen Gemischbildung auch hier keine Zündaussetzer zu erwarten sind.

Zu beachten ist jedoch, dass das Gas-DI-Hochdruckverfahren einen erhöhten Systemaufwand erfordert, da das Brenngas mit Drücken weit oberhalb des Kompressionsenddrucks am Motor bereitgestellt und über magnetventilgesteuerte Gasinjektoren in den Brennraum überführt werden muss. Die benötigten Systemdrücke zur Bereitstellung des Brenngases müssen somit bei Betrachtungen des Systemwirkungsgrads als Verlustleistung berücksichtigt werden. Setzt man LNG an Bord eines Schiffes voraus, so könnte aus thermodynamischer Sicht die sinnvollste Lösung sein, das flüssige LNG mittels kryogener Pumpe auf den erforderlichen Systemdruck bereitzustellen und dann erst mittels Wärmetausch über den Motorkühlkreislauf die Gasphase einzustellen. Unter dieser Voraussetzung könnten sich deutliche Wirkungsgradvorteile einstellen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass bei heterogenen, im Luftüberschuss betriebener Brennverfahren in den verbrannten Zonen unter der Voraussetzung hoher Arbeitstemperaturen erhöhte NO_x-Emissionen entstehen können. Bei strengen NO_x-Grenzwerten erfordert dies ggf. eine Abgasrückführung oder eine Abgasnachbehandlung mittels SCR-Katalysator.

6. Zusammenfassung

Nachhaltige Maßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffemissionen von Großmotoren sind möglich und dringend erforderlich. Kurzfristig werden die SCR-Technologie und der verstärkte Einsatz von Erdgas als Kraftstoff zu merklichen Reduzierungen insbesondere von Stickoxid- und Schwefeloxidemissionen aus dem Schiffsverkehr führen.

Mit der in der Öffentlichkeit zunehmend angemahnten Reduzierung der Partikelemissionen ist ein Zukunftsthema unwiderruflich gesetzt. Hiermit ist die Frage nach den zukünftig im Schiffsverkehr einzusetzenden Kraftstoffqualitäten eng verbunden. Dieselpartikelfilter sind für einen zuverlässigen Betrieb auf saubere und schwefelfreie Kraftstoffe angewiesen. Die Frage der Kraftstoffqualität hat weiterhin direkte Auswirkung darauf, wie verschiedene Emissionsminderungsstrategien zu einem geeigneten Gesamtsystem kombiniert werden können. Zur Lösung dieser Fragen sind zukünftig erhebliche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung erforderlich. Die dabei entwickelten Lösungsansätze und Technologien können zu neuen Produkten und Wettbewerbsvorteilen der europäischen Motoren- und Zulieferindustrie führen, wodurch zusätzlich Wertschöpfung und Beschäftigung generiert werden können. Aber auch die Flottenbetreiber können durch den Einsatz innovativer Technologien bei den Antriebsanlagen Wettbewerbsvorteile für sich verbuchen.

Im Bereich der Dual-Fuel Motoren können neue Gas-Hochdruck-Brennverfahren nicht nur ungewollte Methan-Emissionen reduzieren helfen, sondern zusätzlich weitere Vorteile im Gesamtwirkungsgrad eröffnen.

Allen hier diskutierten Lösungsoptionen ist gemein, dass innerhalb und außerhalb der Emissionskontrollgebiete jeweils sehr unterschiedliche Betriebszustände der Motoren und Anlagen eingestellt werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass die meisten Konzepte mit einem häufigen Wechsel der Kraftstoffart verbunden sind. Vor diesem Hintergrund wird die Anzahl der zu erfassenden Messgrößen sowie die anzusteuern den Stellglieder deutlich zunehmen. Damit wird nicht nur die Einführung moderner Motorsteuerungshardware unabdingbar, sondern auch die Entwicklung geeigneter Funktionalitäten, die durch entsprechende Steuerungs- und Regelalgorithmen umgesetzt werden müssen.

Durch ganzheitliche Betrachtung und abgestimmte Optimierung der Antriebsanlage als Gesamtsystem können offensichtliche Konflikte zwischen emissionskonformen Motorbetrieb und weiterer Effizienzsteigerung gelöst werden. Damit kann der Großmotor auch zukünftig seine Position als hocheffizientes und umweltfreundliches Antriebsaggregat in der internationalen Schifffahrt verteidigen.

Literatur

- [1] Patrick Gniffke, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2008, Fassung zur EU-Submission 15.01.2010, Umweltbundesamt, Dessau 2010
- [2] Bank, R.; Buchholz, B.; Harndorf, H.; Rabe, R.; Etzien, U.: "High-Pressure SCR at Large Diesel Engines for Reliable NOx-Reduction and Compliance with IMO Tier III Standards", CIMAC Congress, Shanghai, China, May 13-16, 2013
- [3] Püschel, M.; Buchholz, B.; Fink, C.; Rickert, C.; Ruschmeyer, K.: "Combination of post-injection and cooled EGR at a medium-speed diesel engine to comply with IMO Tier III emission limits", CIMAC Congress, Shanghai, China, May 13-16, 2013
- [4] M. Sturm, C. Rickert, D. Krauß, M. Reißig, M. Drescher: AGR-Kühlung - Eine Herausforderung zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften an Großdieselmotoren; 2. Rostocker Großmotorentagung, 2012, Rostock
- [5] Harndorf, H., Fink, C., Rabe, R., Buchholz, B. Brennverfahren für emissionsarme Großmotoren – Trends und Potenziale 13. FAD-Konferenz, „Herausforderungen – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren“ 4. und 5. November 2015, Dresden
- [6] Measuring the Emission Benefits of Cleaner Burning Fuels, US EPA & Mexico Workshop, Vera Cruz, Mexico, 16. April 2010