



# Konzepte für Non-Road Stage IV / Tier 4 Emissions-Gesetzgebung

Bis zum Dezember 2007 soll die Europäische Kommission einen Bericht vorstellen, der für NRMM (Non-Road Mobile Machinery) sowohl die bestehende Emissions-Grenzwerte auf ihre technische Machbarkeit überprüft als auch Bereiche identifiziert, für die neue oder veränderte Gesetzgebung entwickelt werden sollte. Die in Europa tätigen NRMM-Motorenhersteller, vertreten durch Euromot, haben sich dazu verpflichtet, einen Beitrag zu diesem Prozess zu leisten, und haben bei der AVL List GmbH, als neutrale Engineering Gesellschaft, eine Studie zur Darstellung technischer Möglichkeiten und Rahmenbedingungen von Kombinationen von Motoren- und Abgas-Technologien durchführen lassen. Die Hauptthemen dieser Studie werden in diesem Beitrag beschrieben

## 1 Einleitung

Mit der Einführung der EU-Stufe IV- und US EPA Tier 4-Emissions-Gesetzgebung werden die Emissions-Grenzwerte für NRMM deutlich verringert. Neben neuer Motortechnologie werden auch Abgasnachbehandlungssysteme eingeführt werden, um diese strengen Zielwerte zu erreichen. Im Folgenden werden Konzepte und Technologien und ihre spezifischen Randbedingungen für NRMM beschrieben.

## 2 Gesetzgebung

### 2.1 NRMM-Regelwerk

In **Bild 1** und **Bild 2** sind die EU- und US-Emissions-Vorschriften für 19 bis 560 kW-Dieselmotoren in NRMM, die zum Beispiel in landwirtschaftlichen und Bau-Maschinen eingesetzt werden, dargestellt. Die beiden Grafiken stellen lediglich einen Teil eines weitaus komplexeren globalen Regelwerks für NRMM dar. Es wurden nicht nur Regelungen für landgestützte Maschinen entwickelt, sondern auch für Schienenverkehr, Sportboote, Binnenschiffahrt, Hochseeschiffe und zahlreiche Hilfsmotoren, die mit konstanter Drehzahl betrieben werden. Darüber hinaus gibt es auch noch verschiedene regionale und auch internationale spezifische Regelungen.

Beide Abbildungen zeigen eindeutig,

- wie sehr die Leistungskategorien, Emissions-Grenzwerte und Einführungsdaten zwischen der EU und den USA aufeinander abgestimmt sind
- das Konzept einer schrittweisen Einführung neuer Emissions-Grenzwerte als Funktion der Motorleistung.

Diese Ansätze spiegeln die auch die wesentlichen Voraussetzungen wieder, welche die NRMM-Industrie an jede neue beziehungsweise überarbeitete Vorschrift stellt. Die größte Herausforderung, vor der die NRMM Industrie steht, ist die Verteilung der Ressourcen für Forschung und Produktentwicklung auf die zahlreichen weltweiten Nischenmärkte mit ihren außerordentlich stark diversifizierten Anwendungen und üblicherweise geringen Marktvolumina. Demzufolge streben neben der EU und den USA auch andere wirtschaftliche Schlüsselregionen wie Japan, Indien und China bei der Einführung von NRMM-Vorschriften nach möglichst enger Harmonisierung der Grenzwerte und Leistungskategorien, um einheimischen Unternehmen den Zugang zu globalen Märkten zu ermöglichen.

### 2.2 Zukünftige NRMM-Vorschriften

Derzeit laufen umfangreiche Revisionsprozesse im Hinblick auf die Emissions-Vorschriften für NRMM in der EU (Direktive 97/68/EG und Änderungsrichtlinien), in den USA (Marine- und Lokomotivmotoren <30 L/Cyl), der UNECE (Gothenburg Protocol) und auf globaler Basis, bei der UNO (IMO MARPOL Annex VI und des NO<sub>x</sub> Technical Code für Emissionen der Seeschiffahrt). In der EU und bei der IMO werden auch Maßnahmen zur Verbesserung der Kraftstoffqualität bezüglich des Schwefelgehalts diskutiert.

Die technische Überprüfung der EU-Richtlinie 97/68/EG (ergänzt durch 2004/26/EG) beabsichtigt sowohl eine Neubewertung der technischen Machbarkeit der bestehenden Stufe IIIB- und IV-Vorschriften und eine Beurteilung des Bedarfs an weiteren beziehungsweise neuen Vorschriften bei einigen der Anwendungen, die gegenwärtig noch nicht über eine Stufe IIIA hinausgehen (zum Beispiel bei Binnenschiffen). Mögliche weitere Anforderungen wie u.a. In-Use-Konformität oder Off-Cycle-Emissions-Maßnahmen sind ebenso inbegriffen. Derzeit identifiziert die Europäische Kommission Bereiche für mögliche neue beziehungsweise überarbeitete NRMM-Regelungen und soll dem Europäischen Parlament und Rat bis Ende 2007 einen Bericht über ihre Erkenntnisse vorlegen. Euromot hat sich verpflichtet, einen Beitrag zu diesem Revisionsprozess zu leisten, indem es Branchenerfahrung und spezifisches Expertenwissen einbringt, um sicherzustellen,

## Die Autoren



Dipl.-Ing. Thomas Cartus ist Leiter Abgasnachbehandlungssysteme bei der AVL List GmbH in Graz.



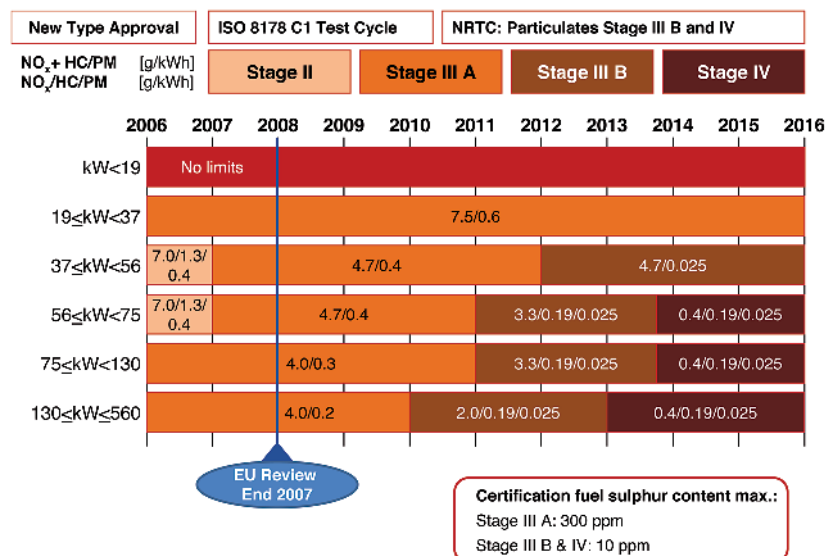
Dipl.-Ing. Holger Herrmuth war Projektleiter der Studie und ist Leiter Versuch DeNO<sub>x</sub>-Systeme bei der AVL List GmbH in Graz.



Dr. Peter Scherm ist General Manager bei Euromot (European Association of Internal Combustion Engine Manufacturers) in XXXX.



Dipl.-Ing. Gunnar Stein ist Leiter der Produktlinie Non-Road bei der AVL List GmbH in Graz.



**Bild 1:** EU-Emissions-Vorschriften und ihre Einführungsdaten für NRMM-Dieselmotoren im Leistungsbereich von 19 bis 560 kW

**Figure 1:** EU regulations on emission limits and introductory dates of NRMM diesel engines with a power between 19 and 560 kW

ISO 8178 C1 Test Cycle		NRTC cycle: Tier 4 & Interim Tier 4 < 560 kW											
NO <sub>x</sub> + NMHC/PM [g/kWh]	NO <sub>x</sub> /NMHC/PM [g/kWh]	Tier 2		Tier 3		Tier 4 Interim		Tier 4					
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
kW<8*		7.5/0.8		7.5/0.4									
8<kW<19*		7.5/0.8		7.5/0.4									
19<kW<37*		7.5/0.6		7.5/0.3				4.7/0.03					
37<kW<56		7.5/0.4		4.7/0.3				4.7/0.03					
56<kW<75		7.5/0.4		4.7/0.4				3.4/0.19/0.02		0.4/0.19/0.02			
75<kW<130		6.6/0.3		4.0/0.3				3.4/0.19/0.02		0.4/0.19/0.02			
130<kW<560		4.0/0.2				2.0/0.19/0.02				0.4/0.19/0.02			
560>kW		6.4/0.2				3.5/0.40/0.10				3.5/0.19/0.04			

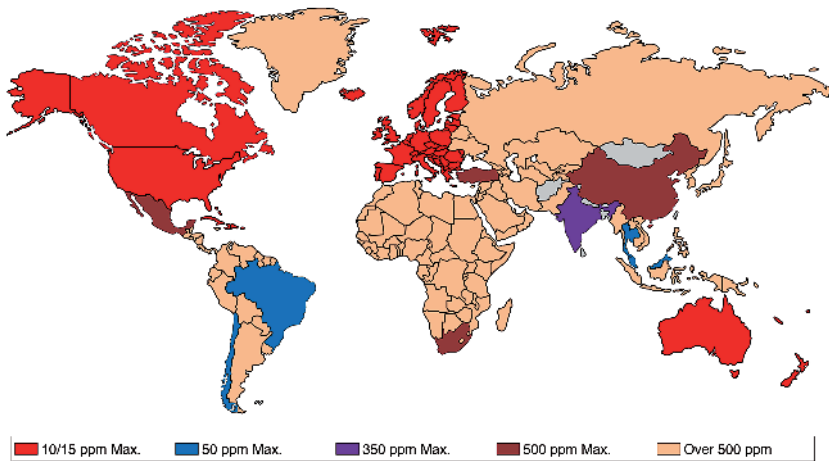
**Certification fuel sulphur content:**  
 06/2007: 500 ppm  
 06/2010: 15 ppm

\* NRTC MY 2013 and later

**Bild 2:** US- Emissions-Vorschriften und ihre Einführungsdaten für NRMM-Dieselmotoren im Leistungsbereich von 19 bis 560 kW

**Figure 2:** US regulations on emission limits and introductory dates of NRMM diesel engines with a power between 19 and 560 kW

**Diesel Fuel Sulfur Levels –2010**



Source: Status Report: Low Sulfur Diesel Fuel Trends Worldwide, Michael P. Walsh, June 12, 2005

**Bild 3:** Kraftstoff-Schwefelgehalt in Dieseldieselkraftstoff für NRMM im Jahre 2010

**Figure 3:** Global NRMM sulphur levels in diesel fuel in 2010

len, dass die nächsten Schritte sowohl umweltfreundlich als auch technisch und wirtschaftlich machbar sind.

### 2.3 NRMM-Kraftstoffqualität

Zurzeit werden in der EU bei NRMM-Stufe II- und IIIA-Anwendungen Kraftstoffe mit einem Schwefelgehalt von bis zu 2000 ppm eingesetzt. Die Einführung von Motortechnologien, die die Grenzwerte der Stufe IIIB vom 31. Dezember 2010 an einhalten werden, erfordert nicht nur wesentlich geringere Schwefelmengen, sondern auch die Übereinstimmung mit On-Road-Kraftstoffparametern, insbesondere der Schmierfä-

higkeit, Cetanzahl, Viskosität und Gehalt an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen gemäß der europäischen Norm EN 590.

Im Januar 2007 veröffentlichte die Europäische Kommission einen Vorschlag zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Otto- und Diesel-Kraftstoffqualität im Straßenverkehr. Unter anderem empfiehlt dieser Vorschlag die Einführung von Kraftstoff mit einem Schwefelgehalt von 10 ppm für alle landgestützten NRMM-Anwendungen bis zum 31. Dezember 2009. Unter der Annahme der Umsetzung dieses Vorschlags in Europa kann das globale Szenario für die Schwefelmenge in NRMM-Kraftstoffen im

Jahre 2010 vorhergesehen werden, wie in **Bild 3** dargestellt: Mengen bis zu 15 ppm in der EU, den USA, Australien und Japan, bis zu 500 ppm in Indien und China und über 500 ppm in der restlichen Welt.

## 3 Technologie-Optionen zur Erfüllung der Stage IV-Emissionsstandards

### 3.1 Motor- und Abgasnachbehandlungstechnologie

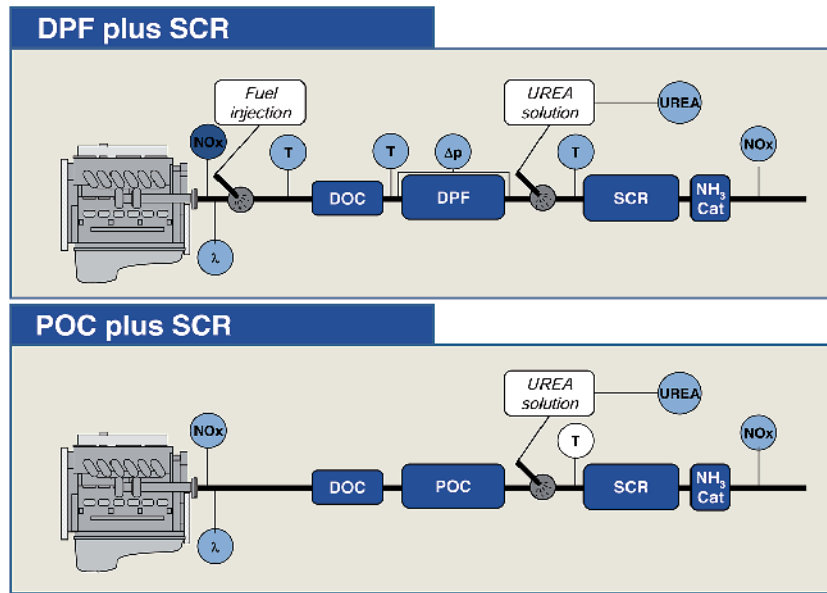
Die Verringerung der Emissionen, welche erforderlich ist, um die EU Stage IV / US Tier 4-Standards zu erreichen, erfordert eine Kombination aus wesentlich reduzierten Rohemissionen des Motors und einer Abgasnachbehandlung mit hohen Wirkungsgraden. Diese Anforderungen sind mehr oder weniger dieselben wie jene für zukünftige On-Road-CI (Compression Ignition)-Motoren, abgesehen von einigen Einschränkungen, die für NRMM charakteristisch sind und später skizziert werden.

Auf der Grundlage der verschiedenen Stufen der Non-Road-Emissions-Gesetzgebung in Europa und in den USA wurde versucht, wesentliche Technologiepakete zu definieren, mit welchen die jeweiligen Emissionsstandards erfüllt werden können, **Bild 4** und **Bild 5**.

In diesen Abbildungen wurden sieben Bereiche identifiziert, die generell aus identischen Technologiepaketen für die Anwendungen in Europa und den USA bestehen. Jedoch unterscheiden sich die Bereiche zwischen Europa und den USA im Hinblick auf die Motorleistungsklasse und das Datum des Inkrafttretens. Im Folgenden ist eine Übersicht der wichtigsten Technologien eines jeden Bereiches dargestellt:

- Bereich 1: Mechanisches FIE (Fuel Injection System), keine AGR (Abgasrückführung)
- Bereich 2: Mechanisches FIE, interne AGR
- Bereich 3: Elektronisches FIE, interne AGR und verzögerter Einspritzzeitpunkt oder extern gekühlte AGR
- Bereich 4: Elektronisches FIE, interne AGR plus DPF (Dieselpartikelfilter) oder IDI-Motor (Indirect Injection) plus DPF plus externe Regeneration oder Benzinmotor mit einem Drei-Weg-Katalysator
- Bereich 5: Elektronisches FIE, intern beziehungsweise extern gekühlte AGR plus DPF oder elektronisches FIE (>1800 bar), extern gekühlte AGR plus Passivfiltersystem, (zum Beispiel POC: PM-Oxidationskatalysator)
- Bereich 6: Elektronisches FIE, extern gekühlte AGR plus DPF oder elektronisches FIE (>1600 bar) plus SCR (Selective Catalytic Reduction), keine AGR, kein PM-Filter





**Bild 6:** Kombiniertes DPF (POC) – SCR-System  
**Figure 6:** Combined DPF (POC) – SCR System

**4 Spezifische Einschränkungen für Non-Road-Anwendungen**

Viele Aspekte in der Non-Road-Industrie sind anders als jene der On-Highway-Industrie. Dies kann zu verschiedenen technologischen Möglichkeiten führen, die je nach den Maschinen, in denen sie installiert werden, variieren können. Es ist naheliegend, dass On-Highway-Technologien in Non-Road-Anwendungen ohne wesentliche Anpassungen zufriedenstellend funktionieren. Die Ergebnisse der On-Highway-Feld-erfahrungen liefern wertvolle Inputs für die Entwicklung der für die Non-Road-Anwendungen spezifischen Lösungen und zur Sicherstellung verlässlicher Produkte bei der Markteinführung.

Einige der Marktanforderungen für Non-Road-Motoren variieren je nach der Anwendung wie in **Bild 7** und **Bild 8** dargestellt. Diese Anforderungen sind auch abhängig von der Maschinengröße. Während bei kleinen Maschinen der Verkaufspreis im Vordergrund steht, sind die Betriebskosten bei größeren Maschinen wichtiger. Somit ist die Bilanz zwischen der Optimierung des Kraftstoffverbrauchs und den Maschinenkosten verschieden und damit ein wichtiger Einflussfaktor für die gewählte Technologie. Vor allem bei Einrichtungen in der Leistungsklasse 37-75 kW werden die Hersteller von Motoren und Maschinen vor der Herausforderung stehen, kostenoptimierte Lösungen zu wählen und Anwendervorteile zu bieten, um Marktakzeptanz zu erzielen.

Als eine Folge der Einführung der Abgasnachbehandlung kann das Geschäfts-

feld der Motorenentwickler bis zu einem gewissen Grad geändert werden. Traditionell waren die Wahl des Abgassystems und dessen Einbau dem Fahrzeughersteller überlassen. Angesichts der kommenden Vorschriften werden jegliche Nachbehandlungssysteme Teil des zertifizierten Motors sein. Damit erfordert der Einbau des Abgassystems eine intensive Zusammenarbeit zwischen dem Motor- und Fahrzeuglieferanten. In vielen Fällen wird der Freiheitsgrad für den Einbau weitgehend verringert. Darüber hinaus wird mit der Applizierung und Kalibrierung der Nachbehandlungs-

systeme ein neues Tätigkeitsfeld in die Industrie einziehen.

Ein weiterer Aspekt sollte bei der Entwicklung der künftigen Motor- und Nachbehandlungssystem-Technologien genau berücksichtigt werden, nämlich das dynamische Reaktionsverhalten des Motors. Die Lastzyklen von Non-Road-Motoren können sehr dynamisch sein und von einem sehr abrupten Anstieg des Drehmomentbedarfs gekennzeichnet sein. Die Erfahrungen mit Tier 3-Motoren haben gezeigt, dass dies ein sehr wichtiges Kriterium für die Endbenutzer ist, während Entwickler dazu neigen, den Entwicklungsschwerpunkt auf das Erreichen der Emissionsziele zu legen.

**5 Bewertung von kritischen Punkten und Herausforderungen beim täglichen Einsatz**

**5.1 Bauraum von Nachbehandlungssystemen**

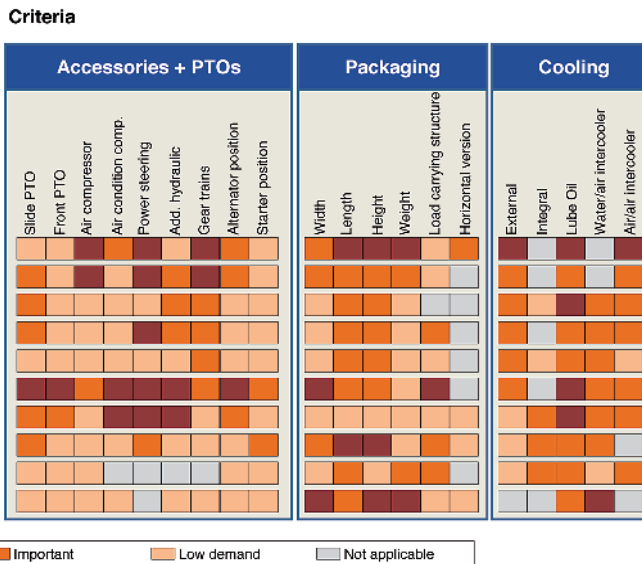
Die meisten NRMM sind durch sehr eingeschränkte Raumverhältnisse, d.h. ein sehr kompaktes Design, gekennzeichnet. Das heißt, dass sehr wenig Platz für den Einbau von Abgasnachbehandlungssystemen vorhanden ist. Dennoch ist jeder DPF- und SCR-Katalysator je nach dem jeweiligen Massenstrom der Emissionen ungefähr 1,5 bis 2 Mal so groß wie der Hubraum des Motors. Des Weiteren erfordert ein SCR-System Platz für das Pumpenmodul, die Dosiereinheit und den AdBlue-Tank. Die AdBlue-Tankgröße ist abhängig von der Höhe der Rohemissionen im Lastkollektiv, der jeweiligen NO<sub>x</sub>-

**Criteria**

Application	Performance	Operating requirements	Governor requirements
Commercial vehicle	Specific power Specific torque Torque back-up Low end torque Speed range Load response Engine brake	Noise Vibration Fuel economy Lube oil consumption Biolog. degr. fluids Inclined operation High altitude operation Comf./ mass balancer	2 speed governor All speed Governor quality Electronic governor Limp-Home
Dump truck			
Hydraulic excavator			
Wheel loader			
Roller			
Agr. tractor			
Harvester			
Material handling			
Compressor & aggr.			
Marine (pleasure craft)			

Legend: Must (dark red), Important (orange), Low demand (light orange), Not applicable (grey)

**Bild 7:** Spezielle Anforderungen für Non-Road-Motoren  
**Figure 7:** Specific demands on Non-Road Engines



**Bild 8:** Spezielle Anforderungen für Non-Road-Motoren  
**Figure 8:** Specific demands on Non-Road Engines

Konvertierungsrate des SCR-Katalysators und der Betankungsstrategie. Unter der Annahme einer  $\text{NO}_x$ -Emission Rohemission von 2 g/kWh, entsprechend Stage IV / Tier 4, und einem Nachfüll-Intervall des AdBlue-Tanks mit jeder zweiten Diesel-Betankung muss der AdBlue-Tank ein Volumen von 3 bis 5 % des Kraftstofftanks haben. Letztendlich werden die Einschränkungen des Bau-raums als das stärkste Motiv angesehen, die Rohemissionen zu reduzieren, um das erforderliche Volumen des Abgas-Nachbe-handlungsystems zu minimieren.

## 5.2 Abgastemperatur in Arbeitszyklen

NRMM-Motoren werden mit vielen spezi-fischen Leistungen angeboten und für ver-schiedene Arbeitszyklen verwendet. Dem-zufolge können Abgastemperaturen wie auch Abgasmassenströme bei einer gege-benen Motorgröße deutlich variieren. Um

die große Vielfalt der verschiedenen realen Arbeitszyklen zu illustrieren, ist in **Bild 9** die Verteilung der Abgastemperaturen nach DPF für verschiedene Arbeitszyklen dargestellt, wie sie auf stationären Mes-sungen abgeschätzt wurden. Die große Vielfalt von Abgastemperaturen bei realen Arbeitszyklen ist klar erkenntlich. Demzu-folge können die Worst-Case-Betriebsbedin-gungen nicht nur durch den Zertifizie-rungs-Zyklus sondern auch durch den re-alen Arbeitszyklus definiert werden.

## 5.3 Herausforderungen für den Motorbetrieb

Bild 1-4 zeigt eindeutig, dass es einige An-wendungen gibt, die zumeist mit sehr niedrigen Lasten arbeiten. Bei diesen An-wendungen kann keine kontinuierliche DPF-Regeneration durch  $\text{NO}_2$  realisiert werden, so dass der DPF nach Erreichen

seiner Rußbelastungsgrenze aktiv regene-riert werden muss.

Die Effizienz des SCR-Systems hängt vor allem von der Abgastemperatur und der Raumgeschwindigkeit ab. Die große Viel-falt der Abgastemperatur in realen Arbeits-zyklen führt zu einer großen Spreizung des AdBlue-Verbrauchs und hat damit ei-nen großen Einfluss auf das Nachfüllinter-vall des AdBlue-Tanks.

## 5.4 AdBlue-Infrastruktur

AdBlue ist derzeit an Tankstellen in Euro-pa weit reichend aber auch auf den meis-ten Betriebshöfen von Speditionen verfü-gbar. Allerdings werden Non-Road-Maschi-nen üblicherweise nicht in diesen Tank-stellen betankt, so dass andere Nachfüll-strategien zu wählen sind. Je nach dem AdBlue-Verbrauch der spezifischen An-wendung ist es möglich, AdBlue in Fla-schen beziehungsweise Kanistern nachzu-füllen (zum Beispiel kleine Radlader auf Baustellen). Bei größeren Maschinen, die für längere Zeit am selben Ort betrieben werden, müssen AdBlue-Tanks am Betriebs-ort positioniert werden. Traktoren und Erntemaschinen können auf den Bauern-höfen betankt werden.

Die Nachfüllstrategie für Erntemaschi-nen ist besonders kritisch, weil sie häufig nur für eine kurze Zeit im Jahr betrieben werden und dann bis zur nächsten Ernte-saison stehen. Da die AdBlue-Lagerzeit laut Händlerangeben weniger als sechs Monate beträgt, sollte der AdBlue-Tank bei solchen Anwendungen am Ende der Erntesaison geleert werden.

## 5.5 Fehlbetankung mit Kraftstoff mit hohem Schwefelgehalt und Wasser

Treibstoff mit einem hohen Schwefelge-halt führt zur Vergiftung des Oxidations-katalysators und somit zum Verlust des

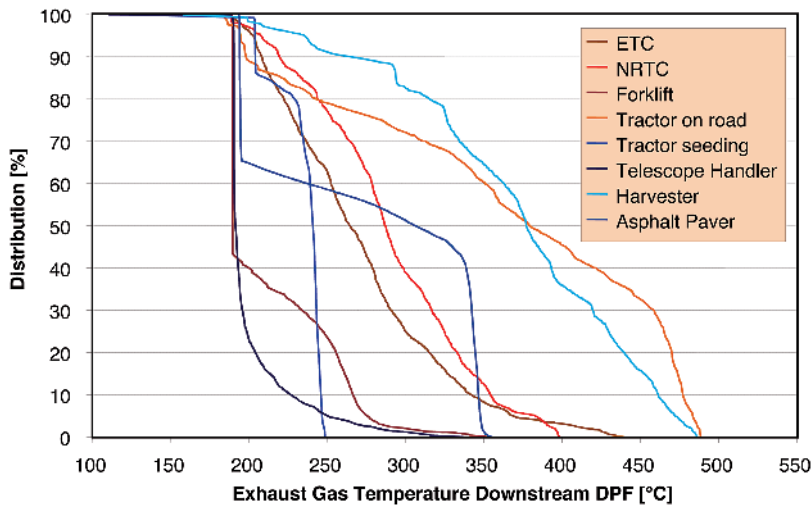


Bild 9: Verteilung der Abgastemperatur nach DPF

Figure 9: Exhaust Gas Temperature Distribution downstream of the DPF

CRT-Effekte und SCR-Katalysatoren können durch Ammoniumsulfate vergiftet werden. Fehlbetanken mit Kraftstoff mit hohem Schwefelgehalt kann damit zum Ausfall des Abgasnachbehandlungssystems führen und ist zu vermeiden.

Das SCR-System wird durch reines Wasser nicht beschädigt, lediglich die  $\text{NO}_x$ -Reduktion wird wesentlich verringert, wenn Wasser nachgefüllt beziehungsweise AdBlue verdünnt wird. SCR-Systeme werden allerdings beschädigt, wenn der AdBlue-Tank mit Treibstoff befüllt wird.

### 5.6 Staubige und schmutzige Umgebung und mechanische Schwingungen

Mobile Non-Road-Maschinen sind oft einer staubigen und schmutzigen Umgebung ausgesetzt. Zusätzliche Filter, die dazu dienen, AdBlue und den Kraftstoff von Schmutz zu befreien, sind einzubauen und regelmäßig auszutauschen. Einige Maschinen (zum Beispiel Erntemaschinen) werden in einer Umgebung mit leicht brennbarem

Staub betrieben. Die Zündung dieses Staubs an heißen Motorkomponenten oder im Abgas (zum Beispiel während der DPF-Regeneration) muss vermieden werden.

Mobile Non-Road-Maschinen werden häufig mit Hochdruckreinigern gereinigt, sodass alle Stecker und Tanks sehr gut abgedichtet sein müssen. Im Vergleich zu On-Road-Anwendungen sind mobile Non-Road-Maschinen stärkeren Stößen und mechanischen Schwingungen ausgesetzt. Die Module für die Abgasnachbehandlung (zum Beispiel Katalysatoren, Dosiersysteme) müssen dieser starken mechanischen Belastung standhalten.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Technologien, mit welchen die EU Stage IV- und EPA Tier 4-Emissions-Gesetzgebung eingehalten werden können, sind generell verfügbar. All diese Technologien

wurden bereits in On-Road-Anwendungen eingeführt, und ihre Kombinationen werden demnächst in Serie gehen. Eine einfache Übertragung von On-Road-Anwendungen auf Non-Road-Anwendungen ist jedoch nicht möglich.

Die Technologien müssen angepasst werden, um den Anforderungen im Off-Road-Bereich zu entsprechen. Die Komponenten müssen nicht nur äußerst hohen mechanischen Belastungen standhalten, sondern auch einer schmutzigen und staubigen Umgebung. Außerdem ist es erforderlich, neue Bauraumkonzepte für Motor, Motorkühlung und Abgasnachbehandlung zu entwickeln.

Spezielle Lösungen sind nicht nur aus finanziellen Gründen erforderlich, sondern auch wegen der Non-Road-spezifisch Anforderungen. Hauptfaktoren sind die große Anzahl verschiedener Maschinen in verschiedenen Märkten und vergleichsweise niedrige Produktionszahlen. Standardisierung ist erforderlich, um die wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Industrie sowie den Endkunden zu minimieren.

Ein schrittweise Einführung der neuen Gesetzgebung und neuer Technologien werden es ermöglichen, Motoren zu entwickeln, die niedrige Emissionen bei hoher Wirtschaftlichkeit bezogen auf Kraftstoffverbrauch, Haltbarkeit und Kosten aufweisen.

Nicht zuletzt müssen der Endkunde und Benutzer die Komplexität der Motoren akzeptieren und die Maschine entsprechend warten, so dass die Investition in neue Maschinen rentabel ist. ■

Download des Beitrags online unter | Download this article online at  
[www.all4engineers.de](http://www.all4engineers.de)

all4engineers

MTZ  
WORLDWIDE

For an English version of this article,  
see MTZ Worldwide.