

# Partikelmassen-/Partikelanzahlreduktion contra NOx-Grenzwert – ein Zielkonflikt?

Autoren:

Rolf Brück  
Jan Hodgson  
Peter Treiber

Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH

## 1. Einleitung

Mit der Gesetzgebung EU 6 für PKW und EU VI für Nutzfahrzeuge wird neben den gasförmigen Emissionen und der Partikelmasse erstmalig auch die Partikelanzahl vom Gesetzgeber limitiert. Hierbei steht insbesondere die Reduktion der als gesundheitsgefährdend angesehenen Nanopartikel im Fokus. In Tabelle 1.1 sind die betreffenden Grenzwerte für PKW EU 6 und Heavy Duty EU VI aufgelistet.

Grenzwert	PKW			Heavy Duty (ETC)		
	PM [g/km]	PN [# /km]	NOx [g/km]	PM [g/kWh]	PN [# /kWh] (in Diskussion)	NOx [g/kWh]
EU 5 / V	5.0	-	0.18	0.03	-	2.0
EU 6 / VI	4.5	6 x 10 <sup>11</sup>	0.08	0.01	6 x 10 <sup>11</sup>	0.4

Tabelle 1.1: Heavy Duty EU V/VI und PKW EU 5/6 Grenzwerte

Die Anzahlgrenzwerte für Partikelemissionen aus Nutzfahrzeugen werden derzeit noch diskutiert. Der ursprüngliche Ansatz zur Limitierung der Partikelanzahl beinhaltete folgende Merkmale:

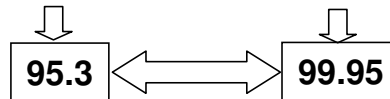
Der Anzahlgrenzwert sollte mit dem Massengrenzwert korrelieren und sollte zusätzlich durch die sogenannte Best Available Technology bestimmt werden.

Mit den EU PMP-Vorhaben (Particulate Measurement Program) wurde eine Datenbasis sowohl für PKW- als auch für Nutzfahrzeug-Motoren geschaffen. Allerdings wurden bei den Messungen und den Vergleichen zwischen Partikelmasse und -Anzahl nicht zwischen Roh- und Tailpipe-Emission unterschieden. Insbesondere aber wurde bei der Korrelation der Tailpipe-Emissionen nicht die unterschiedlichen Filterraten bei den Anzahl- und Massenmessungen berücksichtigt.

Tabelle 1.2 zeigt Filtereffektivitäten aus dem PMP-Programm [1]. Deutlich ist der Unterschied zwischen den Massen- und Anzahlumsatzraten zu erkennen. Auf den ersten Blick erscheinen die Unterschiede klein, jedoch im Hinblick auf die Restemissionen (Tailpipe) sind die Unterschiede signifikant.

Cycle	NOx	PM (CVS)	PN (CVS)
WHTC (kalt)	4.9	87	99.2
WHTC (warm)	3.4	94.7	100
WHSC	- 0.2	93.6	99.9
ETC	- 0.5	96.3	100
ESC	- 0.9	96.6	99.9

Testmotor: EU III; NOx / PM ~ 30 / 1



delta entspr. ~ Faktor 100  
bezogen auf die Restemissionen

Tabelle 1.2: PMP Ergebnisse der Massen- und Anzahl-Filtereffektivitäten [1]

Bild 1.1 zeigt eine Korrelation der Messergebnisse von Partikelanzahl und Masse bezogen auf die Motorrohmissionen und auf die Tailpipe-Emissionen nach Partikelfilter. Deutlich ist die Verschiebung der Korrelation aufgrund der unterschiedlichen Filterwirkungsgrade bezogen auf Masse und Anzahl zu erkennen.

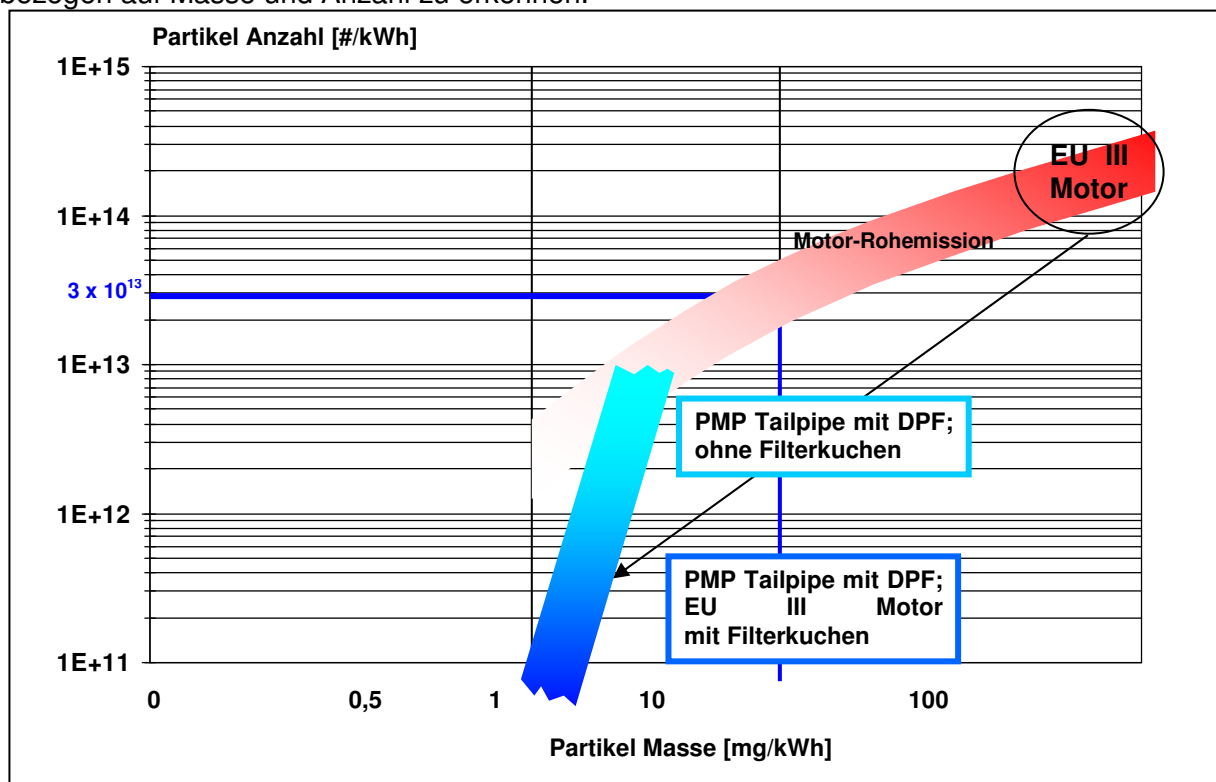


Bild 1.1: Korrelation zwischen Partikelanzahl- und Massenergebnissen bezogen auf die Motorrohmissionen und die Tailpipe-Emissionen mit Partikelfilter

Einem Massengrenzwert von 10 mg/kWh entspricht bezogen auf die Motorrohmissionen ein Anzahlgrenzwert von etwa  $1 \times 10^{13}$  Partikeln pro kWh. Dem gegenüber entspricht der momentan diskutierte Heavy-Duty-Grenzwert von  $6 \times 10^{11}$  Partikel / kWh einem Rohmissions-Massengrenzwert von 0,5 mg/kWh. Damit schreibt die Gesetzgebung einen um ca. einen Faktor 10 verschärften Massengrenzwert vor und damit indirekt eine Technologie, nämlich den DPF-Partikelfilter. Motorische Entwicklungen, die zu einem Wettbewerbsvorteil der europäischen Motorenindustrie in der Welt führen könnten, werden damit unterdrückt, da man mit solchen innovativen Technologien zwar die Massengrenzwerte erreichen könnte, aber durch den Anzahlgrenzwert gezwungen ist, trotzdem einen DPF-Partikelfilter, auch zu Lasten des Kraftstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub> Werte, einzusetzen.

Neben den Partikelemissionen werden auch die Grenzwerte für die NO<sub>x</sub>-Emissionen weiter verschärft. In diesem Zusammenhang wird das Dilemma der nicht mit den Massengrenzwerten korrelierenden Anzahlgrenzwerte und deren Folgen noch deutlicher.

Zusätzlich zu den beschriebenen Auswirkungen auf die Motorenentwicklung zeigt sich, dass auch die Entwicklung von hocheffektiven NO<sub>x</sub>-Minderungsrichtungen mit Wirkungsgraden über 90 % überflüssig wird, da aufgrund der extremen Partikelanzahlgrenzwerte auf jeden Fall ein Partikelfilter eingesetzt werden muss, wodurch weiter erhöhte Kosten entstehen. Hocheffektive SCR-Katalysatorsysteme (SCR=Selektive Katalytische Reduktion [2]) würden jedoch den Kraftstoffverbrauch weiter verbessern und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen absenken. Eine weitere Herausforderung für die Hersteller von Nutzfahrzeugen sind neue Testzyklen wie z.B. der WHTC (Worldwide Heavy Duty Transient Cycle [3]), der nun, ähnlich dem PKW-Zyklus, auch einen Kaltstartanteil enthält. Da während des Kaltstarts und auch der Minuten danach die Abgastemperaturen der modernen Motoren sehr niedrig sind, werden zusätzliche Maßnahmen zum Katalysatorheizen erforderlich.

Der Vollständigkeit halber muss darüber hinaus bezüglich der NO<sub>x</sub>-Nachbehandlung zwischen leichtem PKW und NFZ unterschieden werden. So kommt bei leichten PKW überwiegend die NO<sub>x</sub>-Adsorbertechnologie [4] zum Einsatz, während bei schweren PKW und Nutzfahrzeugen aus Kostengründen und auch wegen des Kraftstoffverbrauchs zumeist Harnstoff-SCR-Technologie verbaut wird. In den nachfolgenden Ausführungen wird nur auf die Harnstoff-SCR-Technologie eingegangen, da die entsprechenden Versuche an Nutzfahrzeugmotoren durchgeführt wurden.

## **2. SCR- / Motor- Entwicklungsziele**

Moderne Dieselmotoren von Nutzfahrzeugen können, auch mittels AGR-Verstellung, hinsichtlich ihrer NO<sub>x</sub>- und PM-Emissionen im Kennfeld verschoben werden. Wie bereits erwähnt, bedeutet eine Verschiebung hin zu hohen NO<sub>x</sub>-Rohmissionen üblicherweise auch eine Verringerung des Verbrauchs (Bild 2.1).

Aufgrund der weltweit relativ breiten Streuung des Niveaus der Abgasgrenzwerte für NO<sub>x</sub> und Partikel unterscheiden sich die Betriebspunkte bezüglich des NO<sub>x</sub>-Partikel-Trade-Offs für einzelne Applikationen signifikant. In den USA werden Nutzfahrzeugmotoren zur Erfüllung der US07-Grenzwerte überwiegend mit Partikelfilter und ohne NO<sub>x</sub>-Abgasnachbehandlung ausgerüstet [5]. Der Nachteil im Verbrauch wird dabei vom Markt akzeptiert. In Europa dagegen gibt es zur Erfüllung der EU V-Grenzwerte unterschiedliche Lösungen. Zum einen werden Motoren ohne Abgasrückführung mit SCR-Systemen ausgerüstet [6], zum anderen kommen hochmoderne Motoren zum Einsatz, die außer ggf. einem Oxidationskatalysator keine Abgasnachbehandlung benötigen [7]. Beide Konzepte weisen trotz der unterschiedlichen Motorenausstattung (Einspritzdruck, Aufladung) ähnlich hohe Kraftstoffverbräuche auf [8]. Zur Erfüllung der EU VI-Grenzwerte werden aus Emissions- und Kraftstoffverbrauchsgründen praktisch alle schweren Nutzfahrzeuge mit SCR-Technologie

ausgerüstet sein. Dabei wird aus Verbrauchsgründen, wie oben erwähnt, die NO<sub>x</sub>-Rohemission so hoch wie möglich gewählt werden.

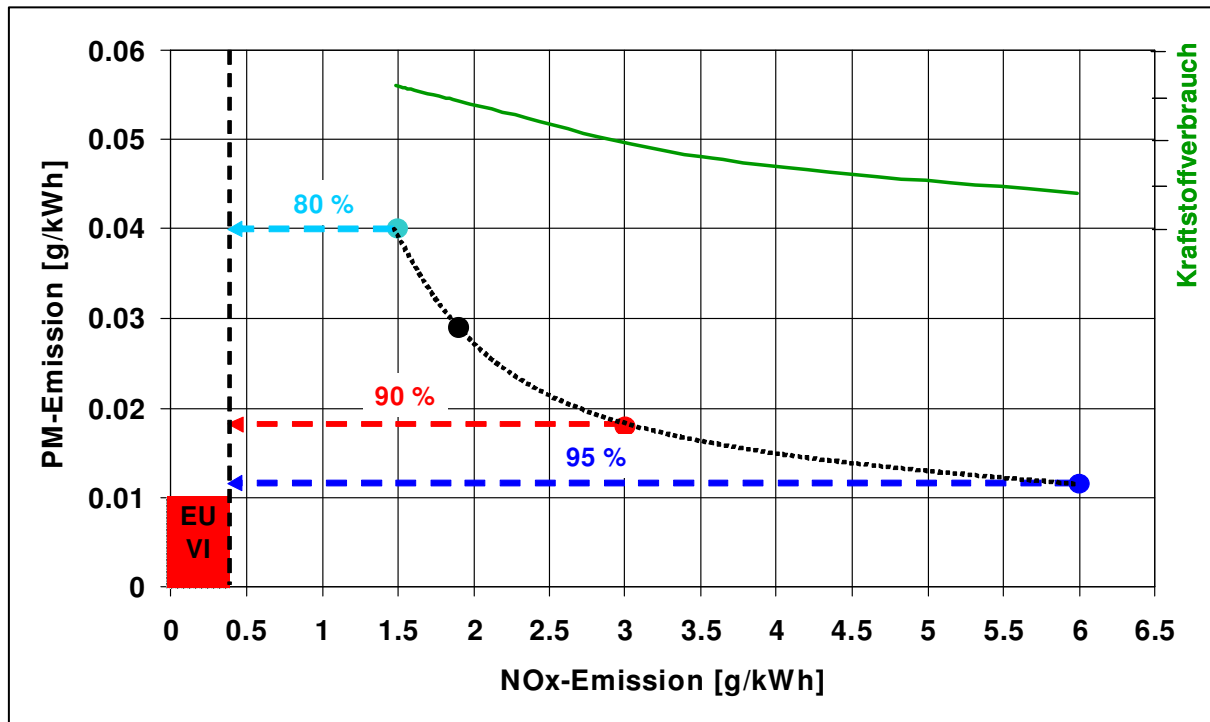


Bild 2.1: NO<sub>x</sub> / PM Trade-Off und Kraftstoffverbrauch eines Nutzfahrzeugmotors

Bild 2.2 zeigt die dabei notwendigen SCR-Umsatzraten und die entsprechenden NO<sub>x</sub>-Rohemissionen zur Einhaltung des EU VI-Grenzwertes.

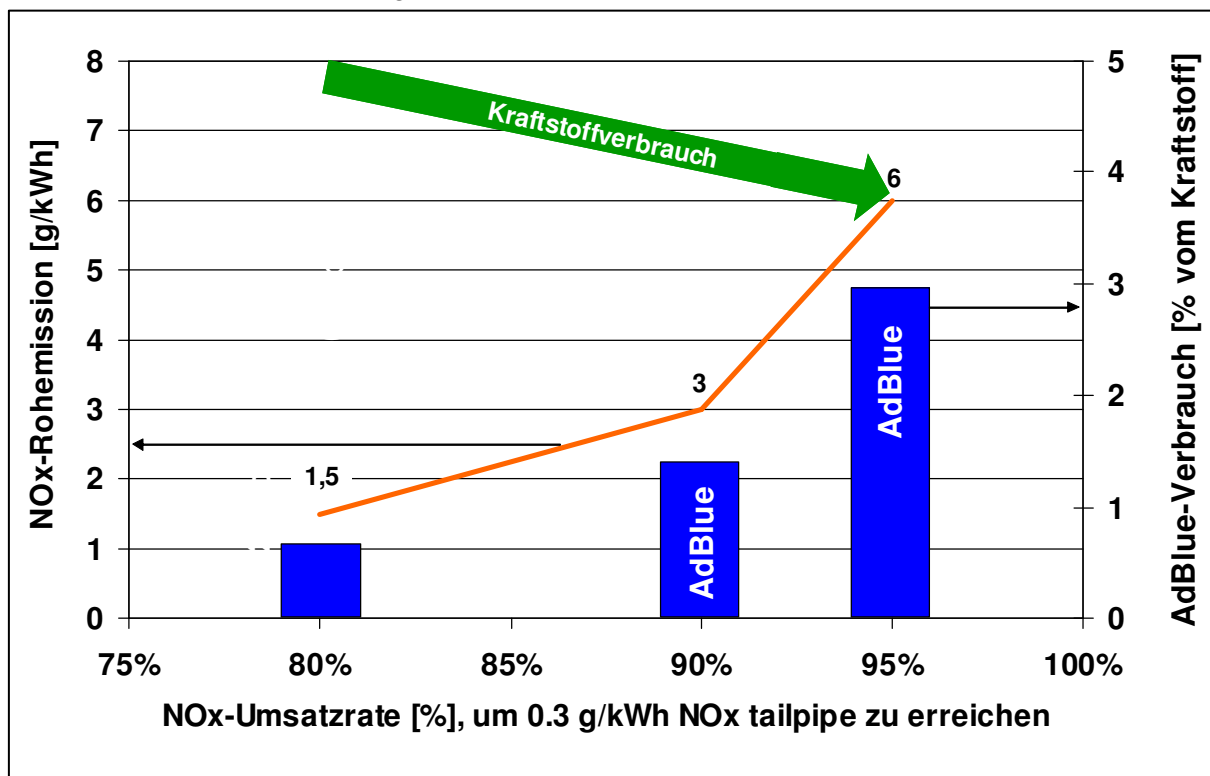


Bild 2.2: Notwendige NO<sub>x</sub>-Umsatzraten zur Einhaltung des EU VI-NO<sub>x</sub>-Grenzwertes und korrespondierender AdBlue-Verbrauch

Dem Diagramm in Bild 2.2 kann entnommen werden, dass eine Steigerung der  $\text{NO}_x$ -Umsatzrate von 80% auf 90% oder sogar auf 95% den Verbrauch deutlich reduziert. Das kann im konkreten Fall einen Kraftstoffverbrauchsvorteil von bis zu 5 % bedeuten.

Zur Darstellung solch hoher SCR-Umsatzraten im dynamischen Fahrbetrieb ist eine „perfekte“ Verteilung des Reduktionsmittels AdBlue und des daraus generierten Ammoniaks im Abgassystem notwendig. AdBlue wird mittels einer Einspritzdüse in das Abgassystem eingedüst, wo es verdampft und durch Thermolyse und Hydrolyse in  $\text{NH}_3$  und  $\text{CO}_2$  zersetzt wird. Die Eindüsstelle kann in Abhängigkeit von der Applikation im Abgasrohr oder in der Katalysatoranlage selbst liegen. Aufgrund der dynamischen Betriebsbedingungen ist es vorteilhaft, den Einspritzdruck und damit die Tropfengröße entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit an der Eindüsstelle zu regeln. Nur mit Hilfe dieser Technologie ist es möglich, die Tropfenverteilung im gesamten Kennfeldbereich gleichmäßig zu gestalten. Zur Verdampfung von AdBlue ist das Erreichen einer Mindesttemperatur im Abgas erforderlich, um die benötigte Verdampfungsenthalpie zur Verfügung zu stellen. Bei sehr kalten Applikationen und nach Motorstart müssen außerdem Katalysatorheizmaßnahmen angewandt werden. Dieses Aufheizen des Katalysators kann entweder motorisch oder mit Hilfe von elektrisch heizbaren Katalysatoren bewerkstelligt werden.

Eine wichtige Randbedingung für hohe SCR-Umsatzraten bei niedrigen Temperaturen und deshalb auch für eine Minimierung solcher Heizmaßnahmen ist die Zusammensetzung des Abgases vor dem SCR-Katalysator, insbesondere das Verhältnis  $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ . Ideal für das zügige Ablaufen der katalytischen Reduktion ist ein Verhältnis zwischen  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  von 1:1 (gilt für die sog. „fast SCR reaction“). Niedrigere oder höhere  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen haben eine Verringerung der Effektivität zur Folge. Erst oberhalb etwa 300....350°C spielt der  $\text{NO}_2$ -Anteil keine Rolle mehr. Das Verhältnis von  $\text{NO}_2$  zu  $\text{NO}_x$  bleibt über den SCR-Kat näherungsweise konstant, wodurch bei den beschriebenen Betriebsbedingungen hohe  $\text{NO}_2$ -Tailpipe-Anteile am  $\text{NO}_x$  beobachtet werden können, die jedoch nur sehr geringen absoluten Schadstoffmassen entsprechen. Bild 2.3 zeigt diese Verhältnisse an einem für EU VI ausgelegten SCRi-System. Da in der Atmosphäre  $\text{NO}$  schnell zu  $\text{NO}_2$  umgewandelt wird, liegt die Priorisierung der Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen näher als eine Limitierung des  $\text{NO}_2$ -Anteils am Gesamt- $\text{NO}_x$ , denn zu dessen Darstellung aus  $\text{NO}$  ist ein vergleichsweise erhöhter Energiebedarf zum Heizen des Katalysators erforderlich, der wiederum zu erhöhten  $\text{CO}_2$ -Emissionen führt.

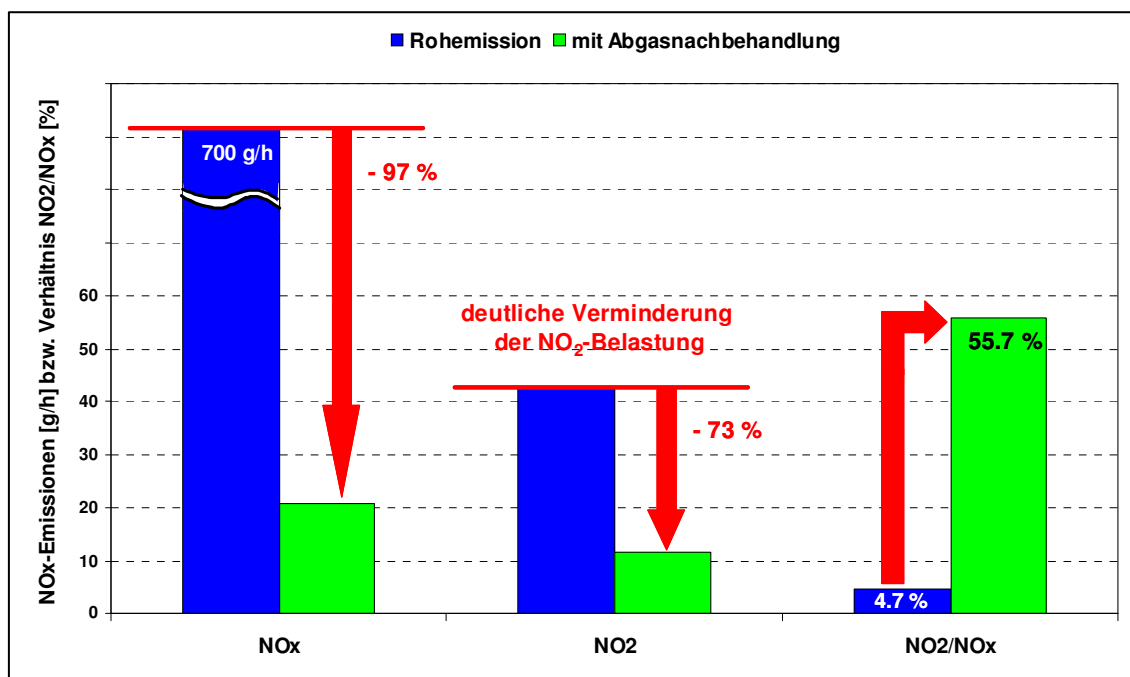


Bild 2.3:  $\text{NO}_x$ -Emissionen bzw. Verhältnis  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  im ETC beim Nfz-Motor mit EU VI-Abgassystem

Die Entwicklungsziele für Motoren und für SCR-Abgasnachbehandlungssysteme sind damit vergleichbar. Da bei einer Motorauslegung zugunsten höherer  $\text{NO}_x$ -Emissionen der Ausstoß von Partikeln deutlich abgesenkt werden kann, ist die Voraussetzung für eine rein passive Regeneration der Restpartikel in den für die Partikelanzahlreduktion notwendigen Partikelfiltern mittels CRT [9] gegeben. Heutige Partikelfilter erreichen ihre hohen Umsatzraten von größer 98% primär durch Nutzung des Filterkuchens des bereits abgelagerten Rußes. Da die neuen Motoren vor allem im Realbetrieb praktisch ausschließlich unter Bedingungen laufen, die eine durchgängige CRT-Regeneration des Filters erlauben, ist die Existenz eines Filterkuchens nicht zu erwarten womit die heutige „best available technology“ nur eingeschränkt funktioniert. Aus diesem Grund wird es bei der Applikation zukünftiger Motoren zur Einhaltung der Partikel-Anzahlgrenzwerte notwendig sein, neu konstruierte Partikelfilter einzusetzen.

### 3. Versuchsträger und Messanordnung

Als Versuchsträger stand ein Nfz-Motor der 400 kW-Klasse in einer EU V-Auslegung mit auf keramischen Trägern basierender SCR-Technik zur Verfügung, wie er zur Zeit von einem OEM serienmäßig angeboten wird.

Dieser Motor wurde auf einem Prüfstand betrieben, der mit einer Hochleistungsbremse ausgerüstet ist, die es erlaubt, alle derzeit bekannten Testzyklen zu realisieren. Bild 3.1 zeigt die schematische Anordnung für den Motor mit dem Serien-Abgasnachbehandlungssystem, Bild 3.2 die entsprechende Anordnung bei der Untersuchung des auf EU VI ausgelegten SCRi-Systems [10].

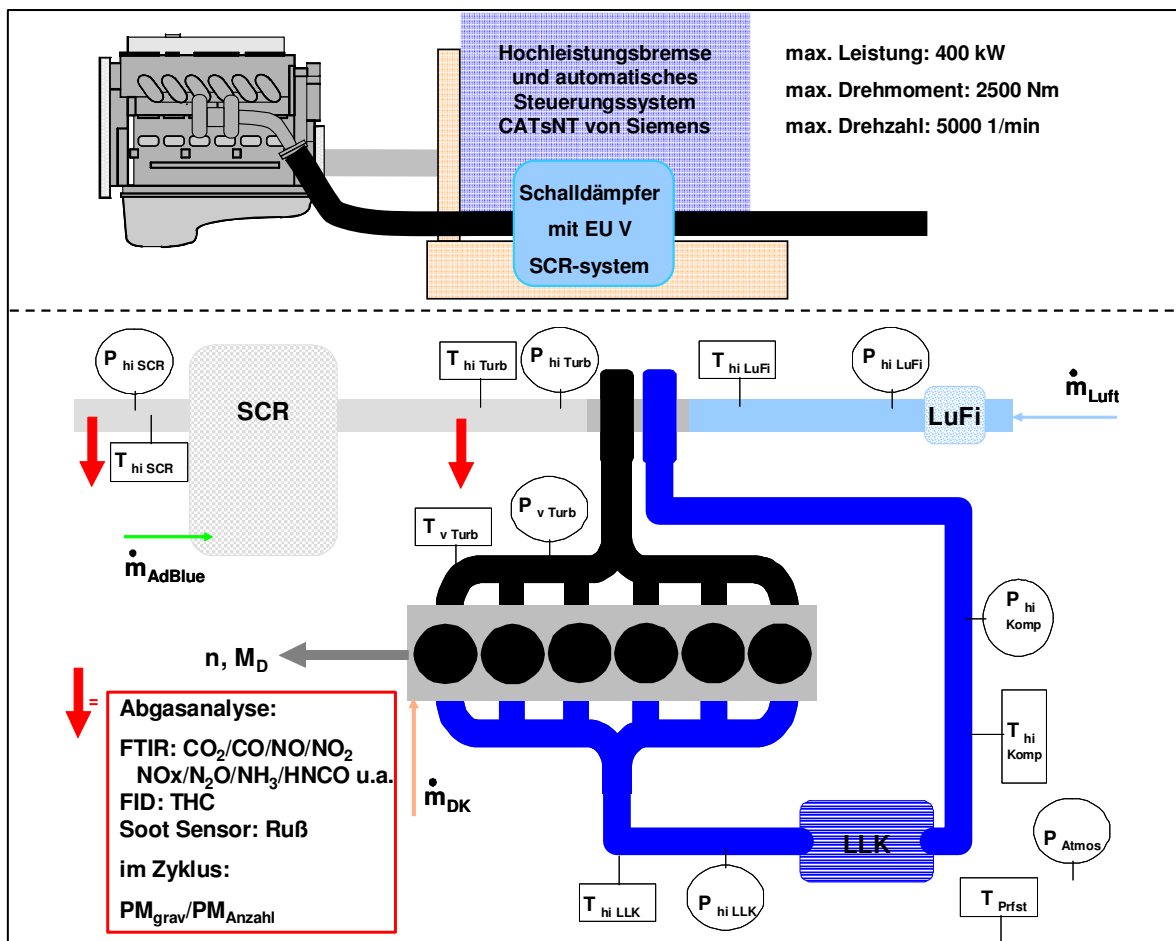


Bild 3.1: Schematische Darstellung der Messanordnung für das Original-EU V-SCR-System

Die Abgasanalyse der gasförmigen Komponenten wurde mit einer 2-Linien FTIR-Meßtechnik bewerkstelligt. Ebenfalls in 2-Linien Messtechnik wurde eine photo-akustische Meßmethode zur Bestimmung der Rußkonzentrationen angewandt. Die Abspeicherung der Meßsignale erfolgte beim Durchfahren der Testzyklen mit einer Frequenz von zwei Hz. Die Messungen erfolgten in den Testzyklen ESC, ETC, WHTC, WHSC und NRTC.

Die verwendete Abgasanalytik ist in Bild 3.3 näher dargestellt.

Die Partikelmassenemission wird, den Bestimmungen entsprechend, als Testmittelwert bestimmt, was auch im Fall der Partikelanzahlemission der Fall ist. Die hierfür eingesetzte Messtechnik entspricht dem PMP-Protokoll.

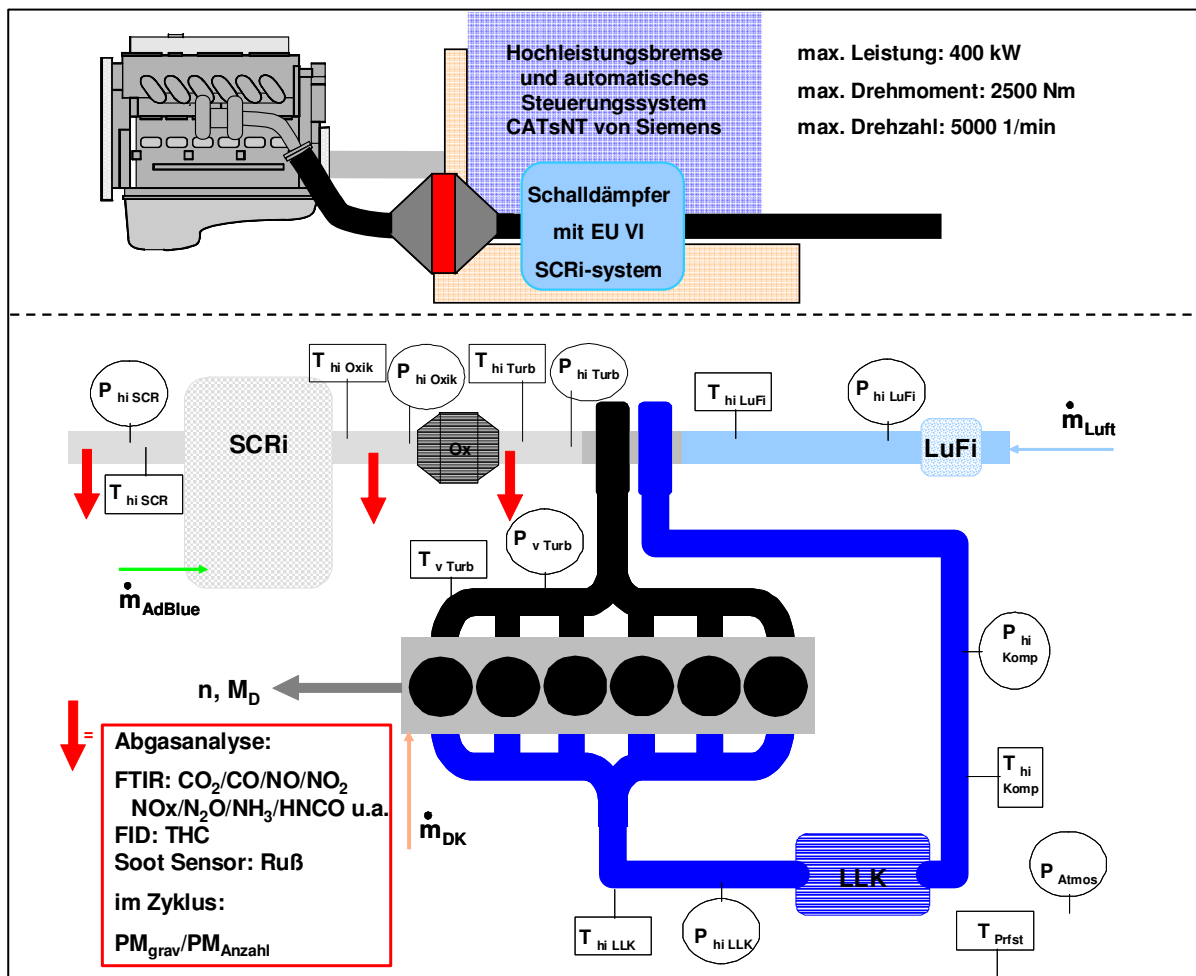


Bild 3.2: Schematische Darstellung der Meßanordnung für das Metalit-basierte EU VI-SCRi-System



Bild 3.3: Auflistung der verwendeten Abgasanalytik

#### 4. Auslegung und Ergebnisse eines für EU VI geeigneten SCRi-Systems

Ausgehend von dem im vorangehenden Kapitel beschriebenen Nfz-Motor wurde ein Konzept vorgelegt, welches ohne Veränderungen der motorischen Parameter demonstriert, dass mit entsprechender Abgasnachbehandlung die in der Diskussion befindlichen EU VI-Grenzwerte eingehalten werden können. Tabelle 4.1 zeigt die relativ zum Katalysatorvolumen des Keramik-Referenzsystems gewählten Volumina der verschiedenen Träger für das SCRi-System, das heißt für die auf Metallträgern basierende Kombination von Partikel- und NO<sub>x</sub>-Reduktion, bei dem die Eindüsung des AdBlue stromaufwärts vor Nebenstromfilter angeordnet ist. Vor dem Hintergrund zukünftiger Testverfahren mit Kaltstart und niedriger Auslastung wurde grundsätzlich ein Oxidationskatalysator dem eigentlichen SCRi-System vorgeschaltet (Größe etwa 0.8 x Hubvolumen).

Variante	Originalsystem	Metalit basiertes SCR	Größeres SCR-Volumen
	Relatives Volumen / Beschichter	Relatives Volumen / Beschichter	Relatives Volumen / Beschichter
Hydrolyse & PM Reduktion	--	V = 50% Beschichter „B“ + V = 50% Beschichter „B“	V = 50% Beschichter „B“
NO <sub>x</sub> Reduktion	V = 100% Beschichter „A“	V = 50% Beschichter „B“ + V = 25% Beschichter „B“	V = 50% Beschichter „A“ + V = 50% Beschichter „B“ + V = 25% Beschichter „B“

Tabelle 4.1: Relative, auf das Serienkeramiksysteem bezogene Kat-Volumina der verglichenen Varianten

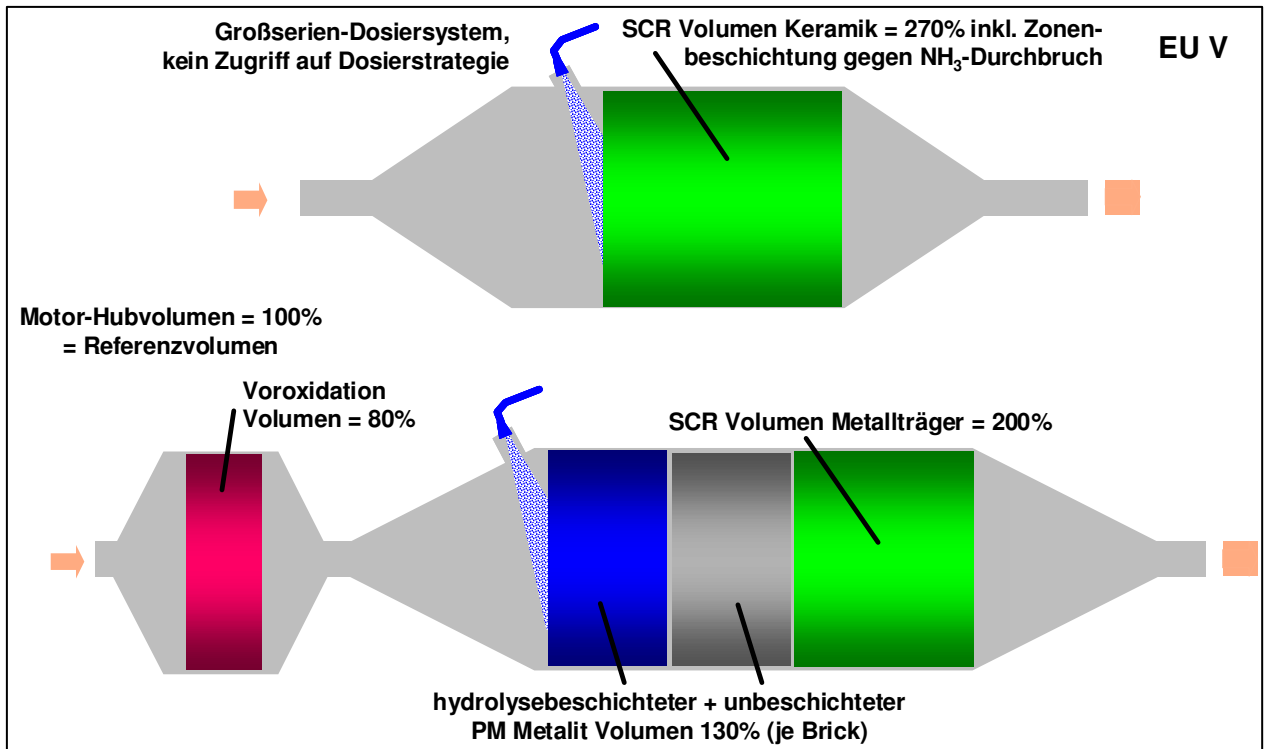


Bild 4.1: Schematische Darstellung der Trägeranordnungen im Originalsystem und im metallbasierten SCRi-System

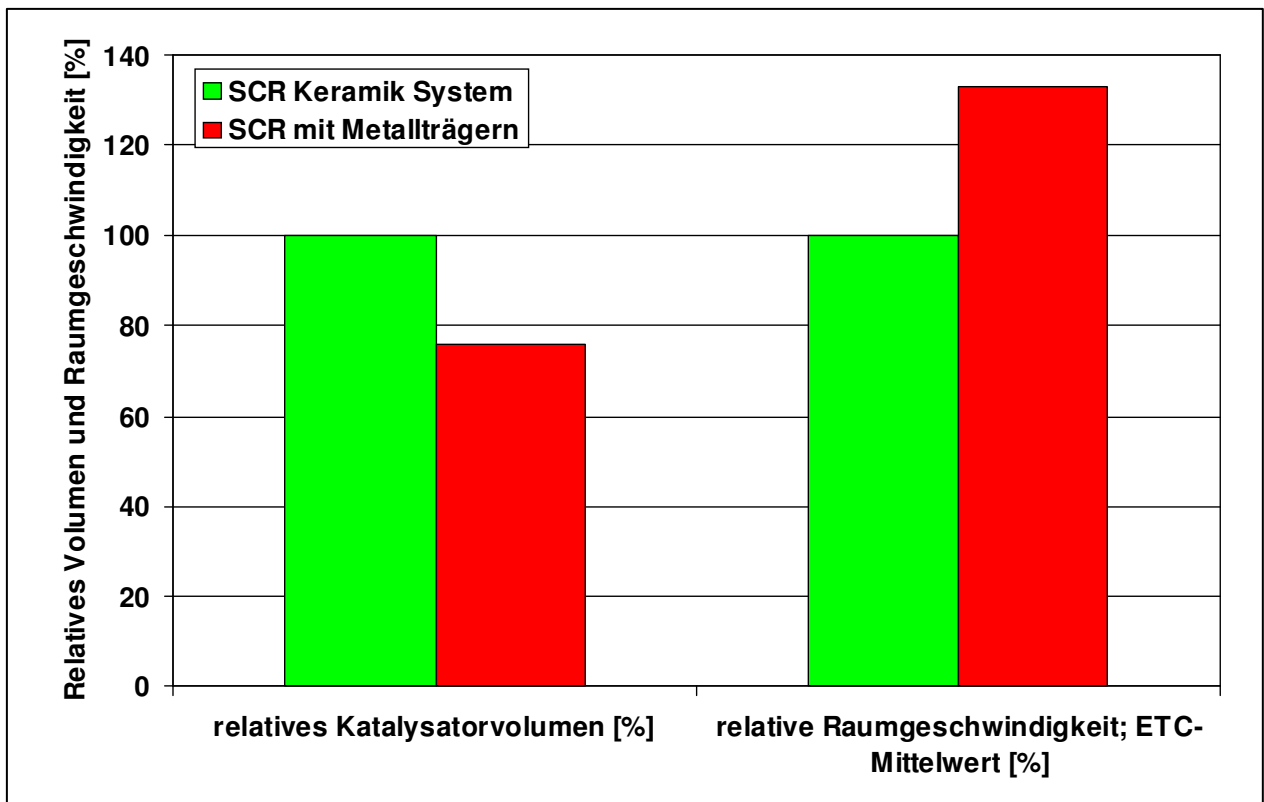


Bild 4.2: Relative, auf das Serienkeramiksystem bezogene Volumen des SCRi-Systems, sowie die entsprechenden relativen Raumgeschwindigkeiten

Den Volumenverhältnissen entsprechend wird das im Vergleich zur Keramik volumenreduzierte Metallträgersystem bei höheren Raumgeschwindigkeiten betrieben. Bild 4.2 zeigt die Verhältnisse für die Mittelwerte im ETC-Test.

Da kein Zugriff auf die Regelung des Serien-Dosiersystems bestand, werden in den folgenden Ausführungen zunächst nur die Ergebnisse des SCRi-Systems im ETC dargestellt. Die applizierte Dosierstrategie war im vorliegenden System auf einen entsprechenden Motorbetrieb ausgelegt. Die mit dieser Auslegung erzielten  $\text{NO}_x$ -Tailpipe-Emissionen waren niedriger als die entsprechenden Werte des Originalsystems, lagen aber über dem für ein EU VI-Konzept angestrebten Zielwert. Es wurde eine  $\text{NO}_x$ -Umsatzrate von ca. 88% erreicht. Zu Erhöhung der  $\text{NO}_x$ -Umsatzrate ergab sich zunächst nur die Möglichkeit, die dosierte AdBlue-Menge generell um 20 % zu erhöhen. Mit diesem Ansatz konnten dann die angestrebten  $\text{NO}_x$ -Zielwerte unterschritten werden, wie Bild 4.3 im Vergleich der Varianten zeigt.

Die gleichfalls gemessenen  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen steigen durch diese unregelmäßige Mehreindüsung von AdBlue allerdings auf Größenordnungen an, die deutlich über dem geplanten Grenzwert liegen, wie aus Bild 4.4 zu erkennen ist. Bild 4.5 zeigt die Maximal- und Mittelwerte, die bei den ETC-Messungen ermittelt wurden.

Der ermittelte  $\text{NH}_3$ -Durchbruch legt es nahe, diese Ammoniakreserve zur weiteren  $\text{NO}_x$ -Reduktion zu nutzen, in dem das Reduktionsvolumen vergrößert wird.

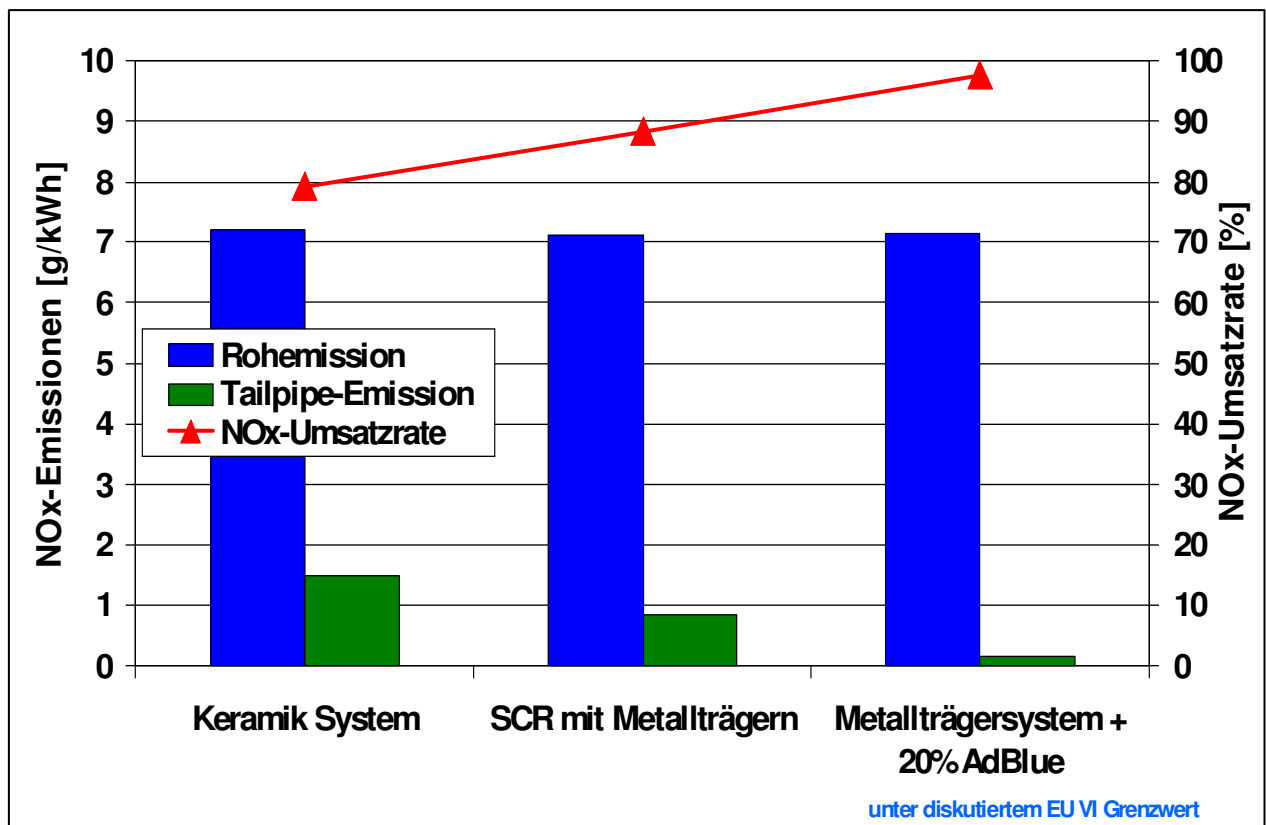


Bild 4.3: Vergleich der  $\text{NO}_x$ -Emissionen (Roh und Tailpipe) für die untersuchten Varianten, sowie die entsprechenden  $\text{NO}_x$ -Umsatzraten

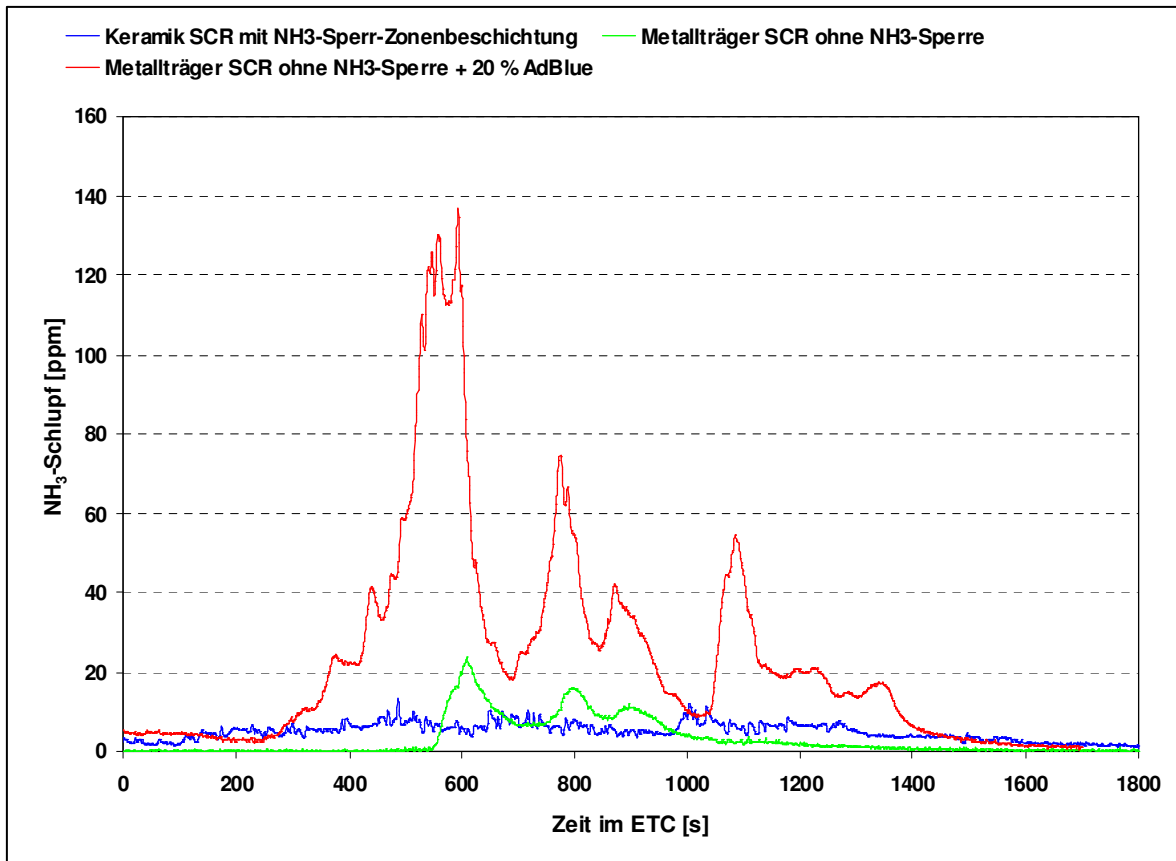


Bild 4.4: Zeitlicher Verlauf der Tailpipe-NH<sub>3</sub>-Konzentrationen im ETC für die untersuchten Varianten

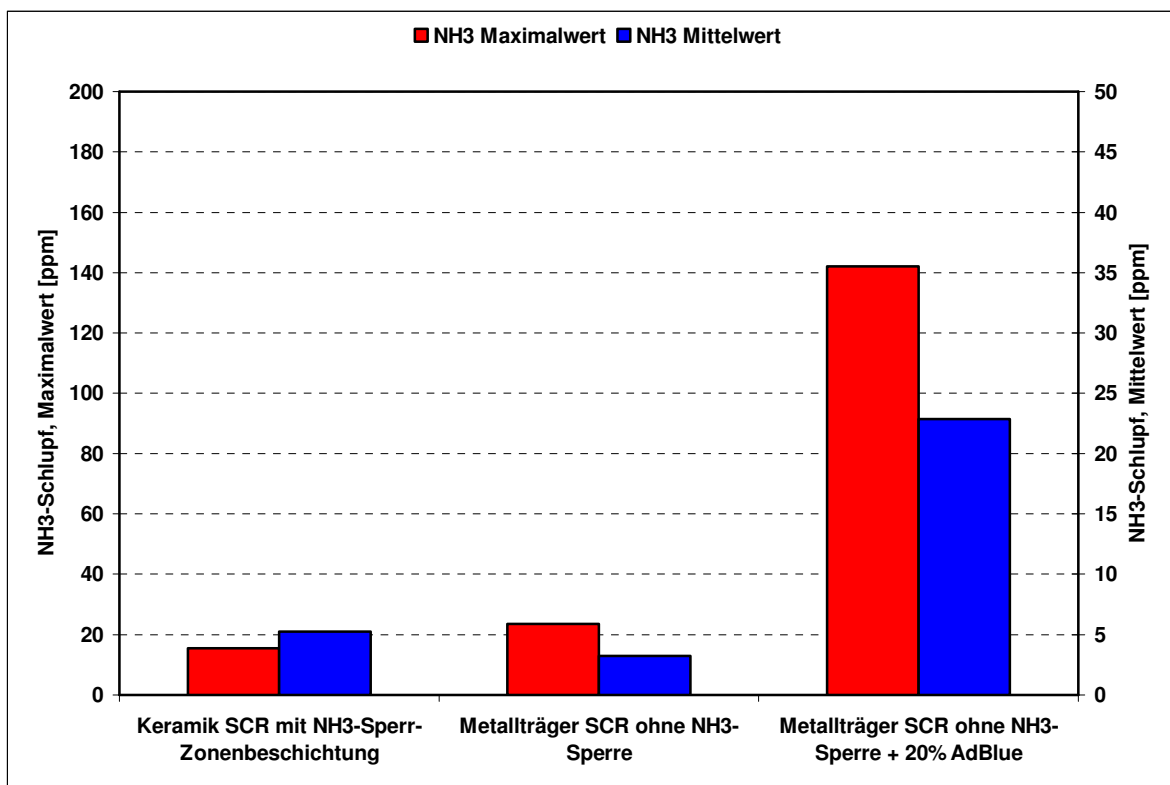


Bild 4.5: Gemessene Maximal- und Mittelwerte der Tailpipe-NH<sub>3</sub>-Konzentrationen im ETC für die untersuchten Varianten

Allerdings lassen sich die bei der hohen AdBlue-Dosierung gemessenen  $\text{NH}_3$ -Durchbrüche durch zusätzlich installierte  $\text{NH}_3$ -Sperrkatalysatoren zuverlässig verhindern. Bild 4.6 zeigt die Ergebnisse einer Messung mit erhöhter Dosierung bei Einsatz eines Sperrkats. Die im ETC ermittelten Werte liegen in diesem Fall sogar noch unter denen des Originalsystems, welches bereits über eine Zonenbeschichtung zur Verhinderung von  $\text{NH}_3$ -Durchbrüchen verfügte.

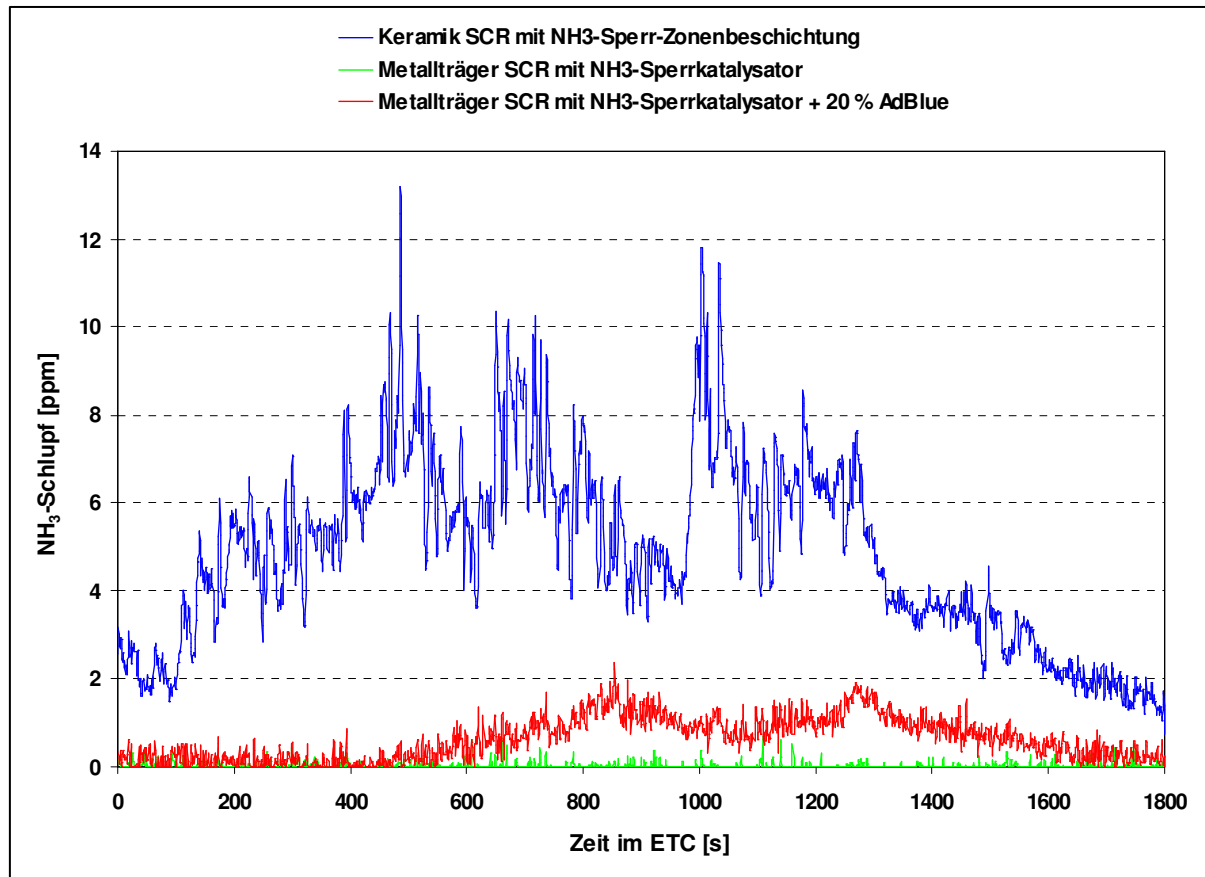


Bild 4.6:  $\text{NH}_3$ -Tailpipe-Konzentrationen im ETC beim Seriensystem im Vergleich zu zwei metallbasierten Systemen, einmal mit Standard-AdBlue-Dosierung, sowie mit um 20 % erhöhter Dosierrate; alle Systeme mit  $\text{NH}_3$ -Sperrkat

Die im ETC gemessenen zugehörigen  $\text{NH}_3$ -Maximal- und -Mittelwerte sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

Die Einhaltung der Grenzwerte für CO und HC ist in der Regel für Nfz-Motoren, die auf dem aktuellen Stand der Technik basieren, unproblematisch. Da das SCRi-System für die Darstellung der  $\text{NO}_x$ -Ziele einen Oxidationskatalysator enthält, werden HC- und CO-Emissionen im ETC um Werte zwischen 97 und 99 % oxidiert. Aus diesem Grund wird bei den hier vorliegenden Ausführungen auf die Komponenten CO und HC nicht weiter eingegangen.

Die in den vorausgegangenen Ausführungen beschriebene Kombination zweier PM-Metaliten, von denen der in Durchströmungsrichtung vordere mit einer Hydrolysebeschichtung versehen ist, während der nachfolgende Träger unbeschichtet blieb, sorgt für eine Verminderung der Partikelemissionen, mit der das angestrebte Ziel, die Erfüllung des EU VI-Grenzwertes, sicher erreicht wird.

Die Ergebnisse der gravimetrischen Partikelemissionsmessungen im ETC zeigt Bild 4.8. Unter Beibehaltung der Standard-Dosiermenge konnte eine Partikelmassenreduktion von

etwa 76% erreicht werden, die sich nach Erhöhung der Dosierate um 20% sogar noch steigern ließ. Eine höhere AdBlue-Menge ist also nicht kontraproduktiv für die Partikelreduktion.

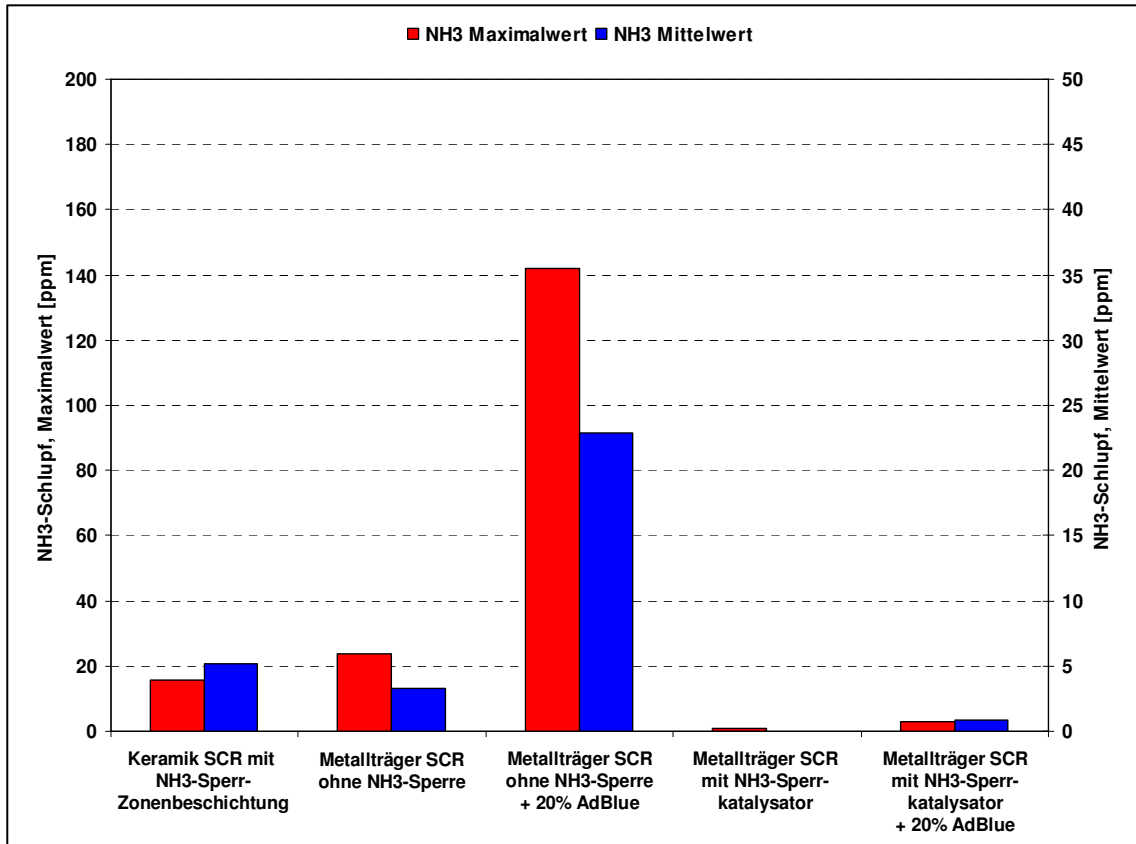


Bild 4.7: NH<sub>3</sub>-Tailpipe-Konzentrationen im ETC bei verschiedenen Systemen und Konfigurationen; Maximal- und Mittelwerte

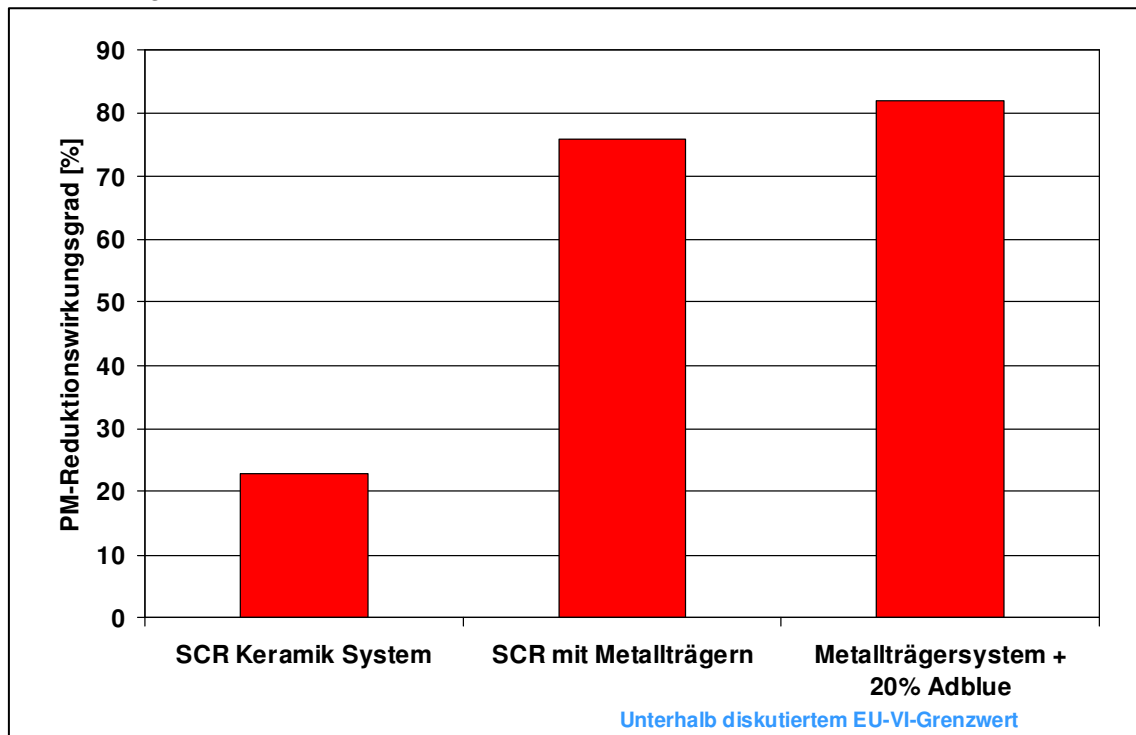


Bild 4.8: PM-Reduktionsraten auf gravimetrischer Basis im ETC beim Seriensystem im Vergleich zu zwei metallbasierten System

Wie in der Einleitung bereits angesprochen wurde, ist neben der gravimetrisch ermittelten PM-Massenemission für EU VI aber auch die Partikelanzahlreduktion von weitreichender Bedeutung. Mit der im Abschnitt 3 vorgestellten Messtechnik wurden daher die spezifischen Partikelanzahl-Emissionen der oben vorgestellten PM- und NO<sub>x</sub>-Nachbehandlungssysteme ermittelt. Bild 4.9 zeigt die Ergebnisse der Messungen im ETC.

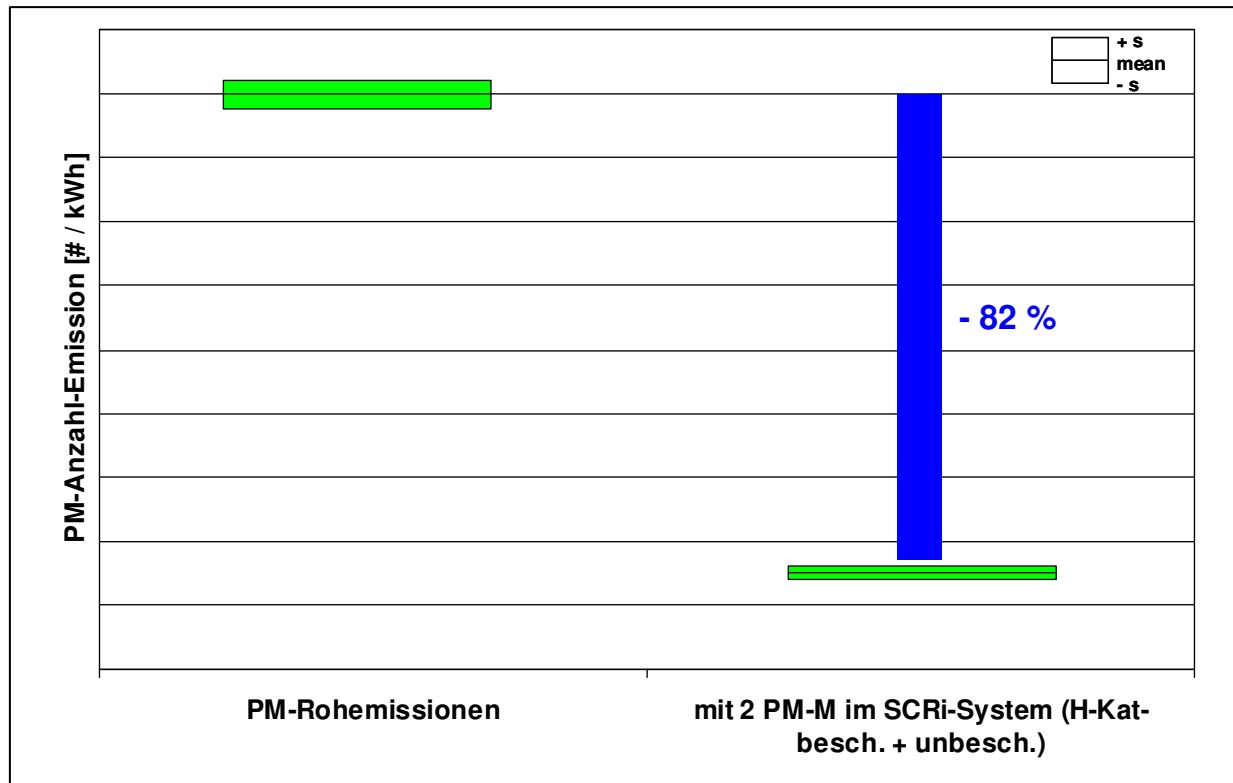


Bild 4.9: Verminderung der Partikelanzahl-Emissionen durch Einsatz von PM-Metaliten im SCRi-System

Der Blick auf die gemessenen Partikelemissionen zeigt, dass die Verminderungen bezüglich Masse und Anzahl sehr ähnlich sind (Bilder 4.8 und 4.9).

## 5. Weitere Entwicklungen

Bei den bisher beschriebenen Untersuchungen war es ein signifikanter Nachteil bei der Abstimmung der Systemvarianten, dass weder Zugriff auf die Motorsteuerung noch auf die Regelung der AdBlue-Dosierung bestand. Eine Anpassung der Motorsteuerung würde es erlauben, die Abgastemperatur in Betriebszuständen mit sehr niedrigen Werten so anzuheben, dass auch in solchen Betriebsabschnitten die Arbeitsfähigkeit der katalytisch unterstützen Abgasnachbehandlungsprozesse ermöglicht wird. Diese Aspekte sind besonders dann von weitergehendem Interesse, wenn realer Niedriglastbetrieb oder auch Testverfahren mit entsprechenden Niedriglastabschnitten und Kaltstartbedingungen beherrscht werden sollen. Eine bewährte Möglichkeit, die Abgastemperatur ohne Zugriff auf die Motorsteuerung anzuheben, besteht in der Verwendung eines elektrisch beheizbaren Katalysators. Bei diesem Träger wird der elektrische Widerstand des Folienmaterials für eine Direktbeheizung benutzt. Solche Lösungen bieten sich insbesondere dann an, wenn Fahrzeuge über Bremsenergie rückgewinnungssysteme verfügen, wie sie heute in Fahrzeugen mit (Teil-) Hybridanlagen verwendet werden. Bild 5.1 zeigt den Effekt einer Ausrüstung mit einem elektrisch beheizbaren Katalysator auf die Abgastemperatur vor einem Reduktionskatalysator in einem Abschnitt eines Testzyklus mit niedrigen

Motorabgastemperaturen. Dargestellt ist der Einfluss zweier unterschiedlicher Heizstrategien, die in Bild 5.2 näher erläutert sind. Der positive Einfluss auf das Temperaturniveau spiegelt sich in der Verbesserung der NO<sub>x</sub>-Reduktion deutlich wieder (Bild 5.2).

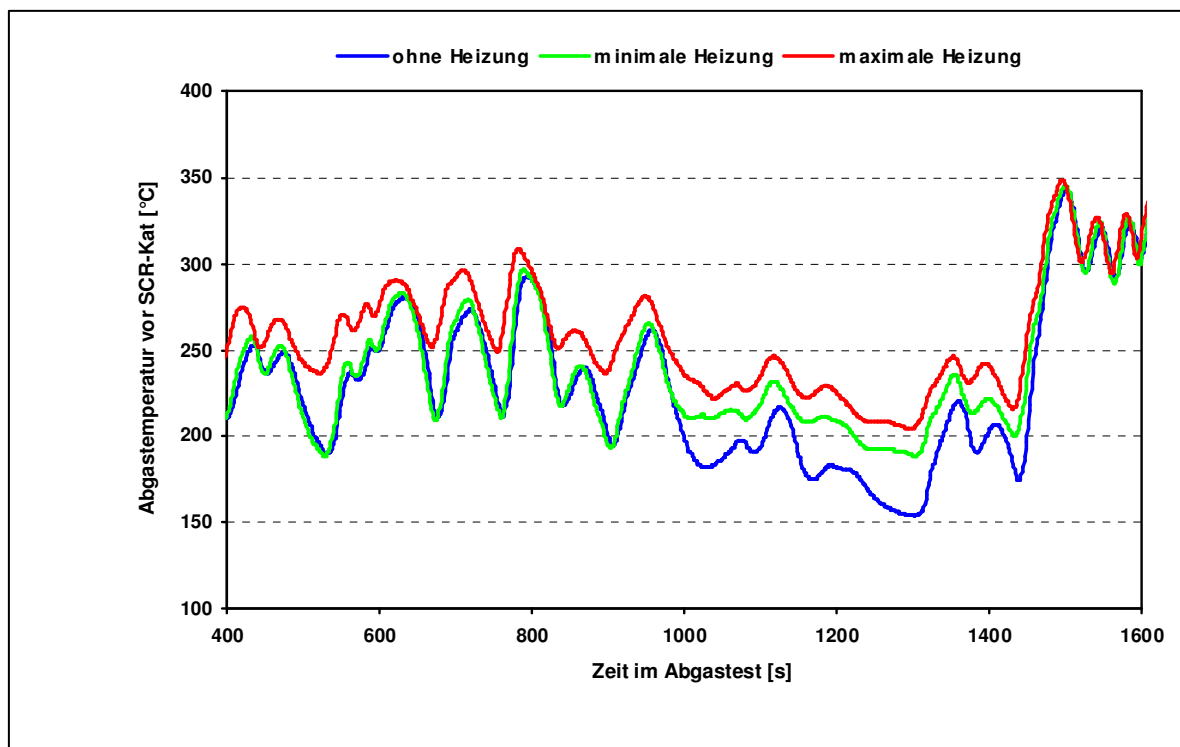


Bild 5.1: Einsatz eines elektrisch beheizbaren Katalysators und dessen Einfluss auf die Abgastemperatur vor Eintritt in den SCR-Reduktionskatalysator

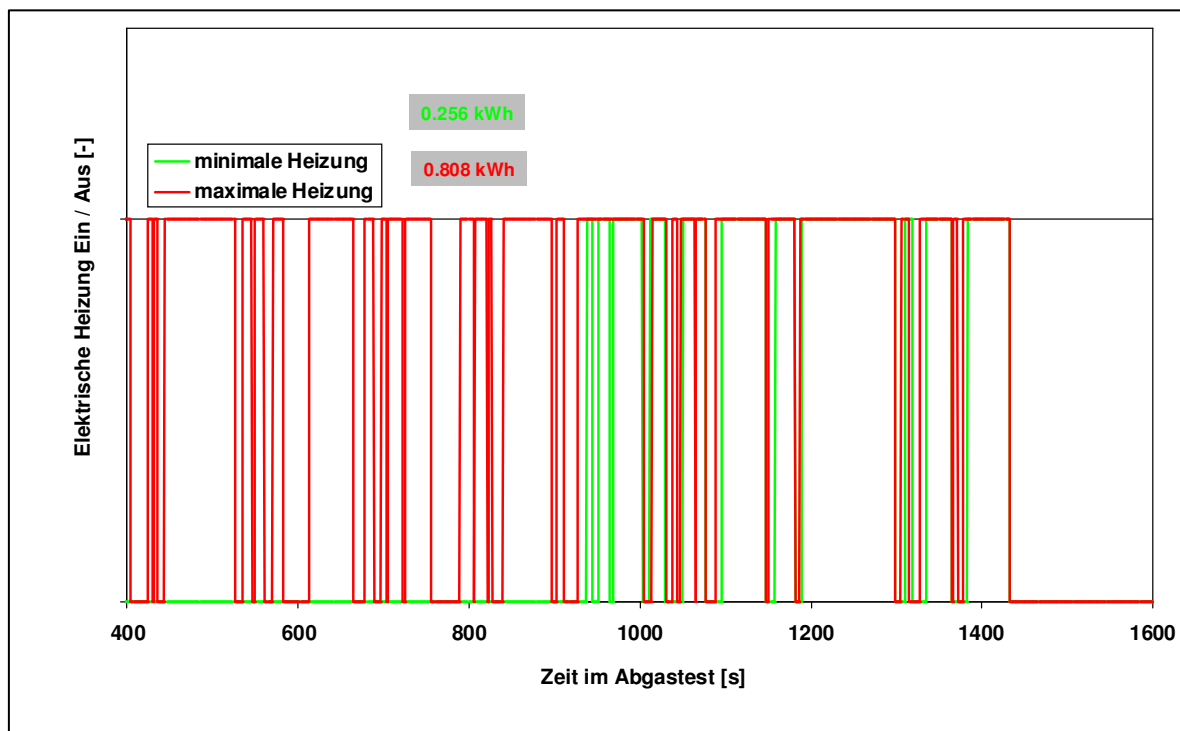


Bild 5.2: Heizstrategie mit minimaler und maximaler Leistung

Die Entscheidung, welche Strategie erforderlich ist, hängt natürlich von der erforderlichen NO<sub>x</sub>-Reduktion und den jeweiligen charakteristischen Motorbetriebsbedingungen ab, welche die Abgastemperaturen bestimmen.

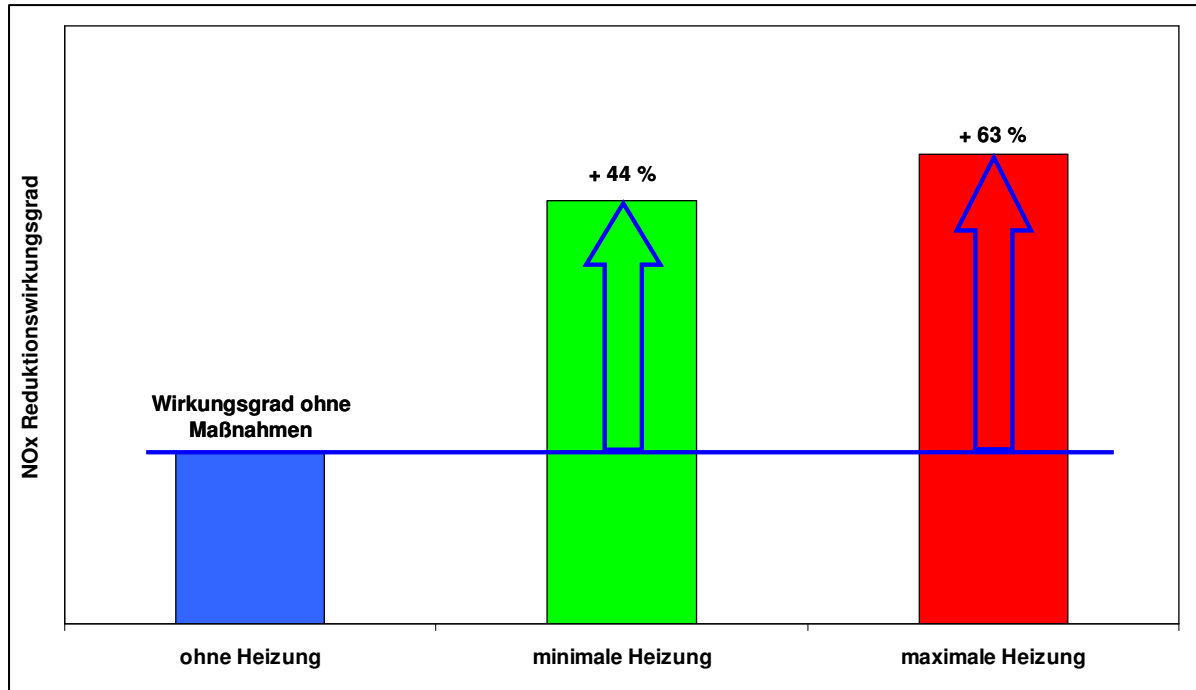


Bild 5.3: Relative Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Umsatzrate durch den Einsatz eines elektrisch beheizbaren Katalysators

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die EU VI-Gesetzgebung für PKW und Nutzfahrzeuge sieht eine Reduktion von Partikelanzahl und -masse vor, die zusammen mit einer signifikanten NO<sub>x</sub>-Reduzierung umgesetzt werden muss. Bei modernen Motoren kann, auch mittels AGR, das Verhältnis zwischen NO<sub>x</sub>- und PM-Emissionen verändert werden, so dass bei Einsatz eines SCRi-Katalysatorsystems die Verwendung eines passiven regenerierten Nebenstromfiltersystems möglich ist, wobei gleichzeitig eine Verbrauchsreduzierung realisiert werden kann. Mit einem solchen, im Vergleich zu einem Serienkeramiksistem volumenreduzierten SCRi-System, welches passive regenerierte PM-Metalite von etwa 260% des Motorhubvolumens zur Russnachbehandlung und SCR-Katalysatoren mit 200% desselben zur NO<sub>x</sub>-Nachbehandlung umfasst, konnte gezeigt werden, dass die EU-IV-Grenzwerte sicher eingehalten werden können. Dabei wurde ohne jegliche Anpassung des Dosiersystems gearbeitet.

Eine weitere, deutliche Steigerung des Wirkungsgrads der NO<sub>x</sub>-Reduktion wäre sicherlich möglich, wenn eine Anpassung der Dosierstrategie an gegebene Aufgabenstellungen durchgeführt würde. Eine Anlage, die vorwiegend an einem Motor mit niedriger Auslastung betrieben wird, sollte eine entsprechend angepasste Dosierstrategie aufweisen. Bei zukünftigen Untersuchungen wird daher anstelle des bisher verwendeten Dosiersystems ein weiterentwickeltes Dosiersystem der dritten Generation von Emitec zum Einsatz kommen.

In diesem System bietet die Zusammenfassung aller wesentlichen Komponenten in einer Einheit, die ohne größere konstruktive Änderungen in üblicherweise verwendeten AdBlue-Tankkonzepte integriert werden kann, erhebliche Vorteile hinsichtlich des Installationsaufwandes und der Kosten für eine Fahrzeugapplikation.

Mit den gezeigten Ergebnissen lässt sich die im Titel gestellte Frage eindeutig beantworten. Ja, es ergibt sich ein Zielkonflikt aus der zukünftigen Limitierung der Partikelmassen- und Partikelanzahlemissionen gegenüber der Stickoxidemission, aber er ist lösbar.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] B. Giechaskiel, P. Martinez-Lozano, S. Alessandrini, F. Forni, F. Montigny, I. Fumagalli, M. Carriero, G. Martini; Transport and Air Quality Unit, Institute for Environment and Sustainability; EC Joint Research Centre, Ispra: „Particle Measurement Programme (PMP) Heavy-Duty Inter-laboratory Exercise“; Validation exercise tests at JRC, 2008
- [2] E. Jacob; MAN Nutzfahrzeuge AG; „Verfahren und Vorrichtung zur selektiven katalytischen NOx-Reduktion in sauerstoffhaltigen Abgasen“; EP 0487 886; 1994
- [3] United Nations: “Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure”; 58th GRPE; Geneva; 11 June 2009
- [4] O. H. Bailey; Dieselnet; NOx-Adsorbers for Diesel Applications: “General Considerations and Operational Issues”; www.DieselNet.com, Technical Report, 1997
- [5] Dr. H.-O. Herrmann; Daimler AG; Stuttgart: „Der MBE900-Nutzfahrzeugmotor für die Abgasgesetzgebung EPA '07“; 5. internationales AVL-Forum Abgas- und Partikelemissionen; Ludwigsburg; 2008
- [6] W. Müller; Daimler AG; Stuttgart: „Emission Strategy for Commercial Vehicle Diesel Engines“; 5th International CTI Forum; Nürtingen; 2007
- [7] Scania-Press-Info: „Technologischer Durchbruch für Scania: Euro V und EEV für hohen Komfort beim Handling“; P07X02DE / Per-Erik Nordström; 18. Oktober 2007
- [8] Fachzeitschrift Commercial Motor: 1000 Miles Test; Reed Business Information Ltd.; Dezember 2006
- [9] B.J. Cooper, S.A. Roth; Johnson Matthey; Platinum Metals Rev. 35 (1991)
- [10] M. Rice, J. Kramer, Dr. R. Mueller, K. Mueller-Haas; Emitec: “Development of an Integrated NOx and PM Reduction Aftertreatment System: SCRi for Advanced Diesel Engines”; SAE 2008-01-1321