

Fortschrittliche PKW Dieselaugsnachbehandlung; Potential für niedrigste Emissionsgrenzwerte?

Advanced Diesel Passenger Car Exhaust Gas Aftertreatment; Potential for Lowest Emission Limits?

Dipl. Ing. Wolfgang Maus
Dipl. Ing. Rolf Brück
Dipl. Ing. Friedrich W. Kaiser

Abstrakt

Europaweit haben die Zulassungsanteile von Dieselfahrzeugen in den vergangenen Jahren zugenommen. Gute Drehmoment- und Leistungsentfaltung bei gleichzeitigem niedrigem spezifischen Verbrauch konnte durch die Einführung moderner Direkteinspritzerkonzepte mit geringerer Geräuschentwicklung und „weicherem Lauf“ gepaart werden. Dieser Erfolg blieb bisher auf Europa beschränkt. Der für die europäischen Hersteller wichtige US-Markt blieb bis heute noch wegen der dortigen, strengen Abgasgesetze verschlossen. In der EU gelten jedoch im Vergleich zu den Ottomotoren – bis einschließlich der EU IV Grenzwerte – geringere Emissionsanforderungen für PKW Dieselfahrzeuge. Auch im Interesse des Exports der in der EU weit entwickelten Dieselsechnologie, wird zur Zeit im Rahmen der „Enhanced Environmentally Friendly Vehicle“ (EEV) in Europa die Gleichbehandlung aller Motorenkonzepte diskutiert. Dabei ist es bedeutsam dem Diesel ausreichende Zeit zur Anpassung zu geben. Die Erhaltung der Diesel typischen Verbrauchs- und CO₂-Emissionsvorteile wird für den Flottenverbrauch zunehmend wichtig. Es gilt demnach das Entwicklungspotential und den erforderlichen Zeitbedarf realistisch einzuschätzen.

Im folgenden werden für den Diesel erprobte sowie in Entwicklung befindliche Abgasnachbehandlungskonzepte zusammenfassend dargestellt. Darüber hinaus wird das Entwicklungspotential und die Möglichkeit zur Einhaltung der EEV bzw. der kalifornischen SULEV Grenzwerte abgeschätzt und das Innovationspotential diskutiert.

Abstract

During the last years the registration figures of Diesel passenger cars increased. Excellent torque and power output along with low specific fuel consumption could be combined with low noise emissions by introducing the modern direct injected diesel engine concept.

This success remains limited to Europe. The for the European OEM's important US-market remains inaccessible because of the more stringent emission legislation in the United States of America.

In Europe compared to spark ignition engines, including Europe stage IV legislation, Diesel engines have to fulfill lower requirements. Specially in the interest of exporting the Diesel technology which was developed in Europe, there are ongoing discussions to introduce a new legislation "Enhanced Environmentally Friendly Vehicles EEV" which supports the equalization of all drive concepts with regard to emissions. For this it is important for Diesel engines to get enough time for adaptation.

The preservation of the for Diesel engines typical advantages like fuel-consumption and CO₂-emissions get increasingly important for the fleet average. Therefore the potential of the developments and the necessary time spend on has to be judged realistically.

The following text describes exhaust gas aftertreatment technologies for Diesel engines that have been tested and are under development. In addition the potential of measures to achieve the EEV and the Californian SULEV limit values and innovative approaches will be discussed.

1. Einleitung:

Bekanntlich leisten Automobile durch Mobilität einen wichtigen Beitrag zum Wohlstand. Aber gleichzeitig sind hiermit Emissionen verbunden. Öffentliche und politische Diskussionen über schädliche Abgase von Kraftfahrzeugen decken durch Meinungen, Bewertungsstandpunkte und wissenschaftliche Erkenntnisse ein weites Spektrum ab. In der Folge divergieren auch bis heute noch politische und wissenschaftlich/technische Lösungsansätze.

Die Luftverschmutzung im Los Angeles Becken führte in den 80er Jahren zu strengeren PKW Abgasemissionsgesetzen und zur Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung. Entsprechende Entwicklungen konzentrierten sich auf Benzinmotoren, da der Diesel eine untergeordnete Bedeutung in den USA hatte. Mit der neu eingeführten Katalysator- und Gemischregeltechnik gelang eine deutliche Reduzierung der Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x). In Kalifornien werden heute bereits Fahrzeuge angeboten, die im betriebswarmen Zustand partiell die Umwelt reinigen (HC, CO) können. In Europa erzeugten Debatten über das Waldsterben und sommerliche Ozonkonzentrationen in den vergangenen Jahren zusätzlichen, politischen Handlungsdruck den kalifornischen Abgasgesetzen bei den o. g. Abgas-schadstoffen – außer bei den Ruß-Partikelgrenzwerten – zu folgen.

Hohe europäische Kraftstoffpreise haben dem verbrauchsgünstigen Diesel-PKW traditionell eine größere Marktnische in Europa offen gehalten. Aufgrund des historisch bedingten Entwicklungsrückstands des Diesels in Bezug auf die Abgasnachbehandlung und der wirtschaftlichen Bedeutung, wurde dieses Motorenkonzept in Europa sinnvoller Weise von Beginn an weniger strengen Grenzwerten unterworfen.

Der Treibstoffverbrauch – und damit verbunden – die Emission des Klima-Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂), hat inzwischen in Europa und Japan einen hohen politischen Stellenwert. Auch diese Situation hat bei der Festlegung der Grenzwerte Berücksichtigung gefunden.

Aufgrund dieser Situation muss heute noch abgewogen werden, ob primär toxische oder klimarelevante Emissionen begrenzt werden sollen. Die EU hat sich zunächst für die zügige Absenkung der CO₂ Emission, also für einen möglichen Klimaschutzbeitrag entschieden. Die US-Amerikaner fokussieren ihre politischen und technologischen Anstrengungen weiterhin auf die direkt gesundheitsgefährdenden Emissionen.

Der Diesel-PKW Käufer in der EU stellt sich vermutlich weniger die Frage, ob Partikel (PM) oder ein möglicher Treibhauseffekt insgesamt schädlicher ist. Die wachsende Diesel-Kundschaft lässt sich von Verbrauchs- und Kostenvorteilen sowie guter Motorcharakteristik leiten. Heutige, moderne Diesel Turbo-Direkteinspritzmotoren stehen in Bezug auf Drehmoment und Leistung einem Ottomotor kaum nach. Sie zeigen im für den alltäglichen Gebrauch relevanten Drehzahl- und Lastbereich eher Vorteile. Dies erklärt den in den letzten Jahren stark angestiegenen Dieselanteil in allen europäischen Ländern. Der durchschnittliche Flottenverbrauch und damit die CO₂ Emissionen wurden signifikant positiv beeinflusst.

Für den Fall, dass dieses erfolgreiche Motorenkonzept auch in den USA vermarktet werden soll, gilt es, die bisher vorhandene Abgasnachbehandlungs-Technologielücke zu schließen.

Die Emissionscharakteristik der verschiedenen Motorkonzepte unterscheidet sich deutlich. Emittiert ein stöchiometrisch betriebener (Lambda=1) Ottomotor HC und CO sowie Stickoxide bei nur geringen Mengen von Partikeln, so emittiert der Dieselmotor hauptsächlich Partikel und Stickoxide.

Die katalytische Konvertierung der Emissionen dieser Motorkonzepte in natürliche Bestandteile der Luft, unterscheidet sich ebenfalls. Ein Dieselmotor wird grundsätzlich mager, d. h. mit Luftüberschuss betrieben. Eine Ausnahme zu dem üblicherweise stöchiometrisch betriebenen Ottomotor bildet der Benzindirekteinspritzmotor. Dieser kann teilweise mager betrieben werden und ist bezüglich der Problemstellung einer Abgasnachbehandlung dem Dieselmotor ähnlich.

Um Hinweise zu erhalten, ob sich der Dieselmotor längerfristig global durchsetzen kann, muss er sich u.a. wie oben erwähnt den emissionsseitig bestehenden Benchmark-Grenzwerten des stöchiometrisch betriebenen

Ottomotors stellen. Dabei hätte es sicherlich große wirtschaftliche Bedeutung, würde man die Erfolgsgeschichte des turboaufgeladenen direkt einspritzenden Dieselmotors außerhalb Europas fortsetzen können. Untersucht werden sollte daher, ob bereits das technologische Potential für eine entsprechende Diesel-Abgasnachbehandlung erkennbar ist. Im folgenden wird dieses Motorkonzept unter Maßgabe der Einhaltung amerikanischer bzw. kalifornischer „Super Ultra Low Emission Vehicle“ Grenzwerte (SULEV) betrachtet. Dabei sind alle je Meile ausgestoßenen und limitierten Emissionen, einschließlich der Partikel, von Interesse.

Eine entsprechende Diskussion wird zur Zeit auch zur Festlegung der neuen europäischen „Enhanced Environmentally Friendly Vehicles“ EEV Grenzwerte [1] geführt, bei denen es ebenfalls keine unterschiedlichen Grenzwerte für verschiedene Motorkonzepte geben soll. Abbildung 1 zeigt die europäischen und die kalifornischen Grenzwerte für Otto- und Dieselfahrzeuge. Alle Werte sind in g/km dargestellt. Die im amerikanischen Testzyklus übliche Wichtung zwischen den einzelnen Betriebsphasen wurde pauschal entsprechend einem „Ultra Low Emission Vehicle“ ULEV-Fahrzeug mit einem Faktor 2 für HC und einem Faktor 1,5 für NO_x und PM angesetzt.

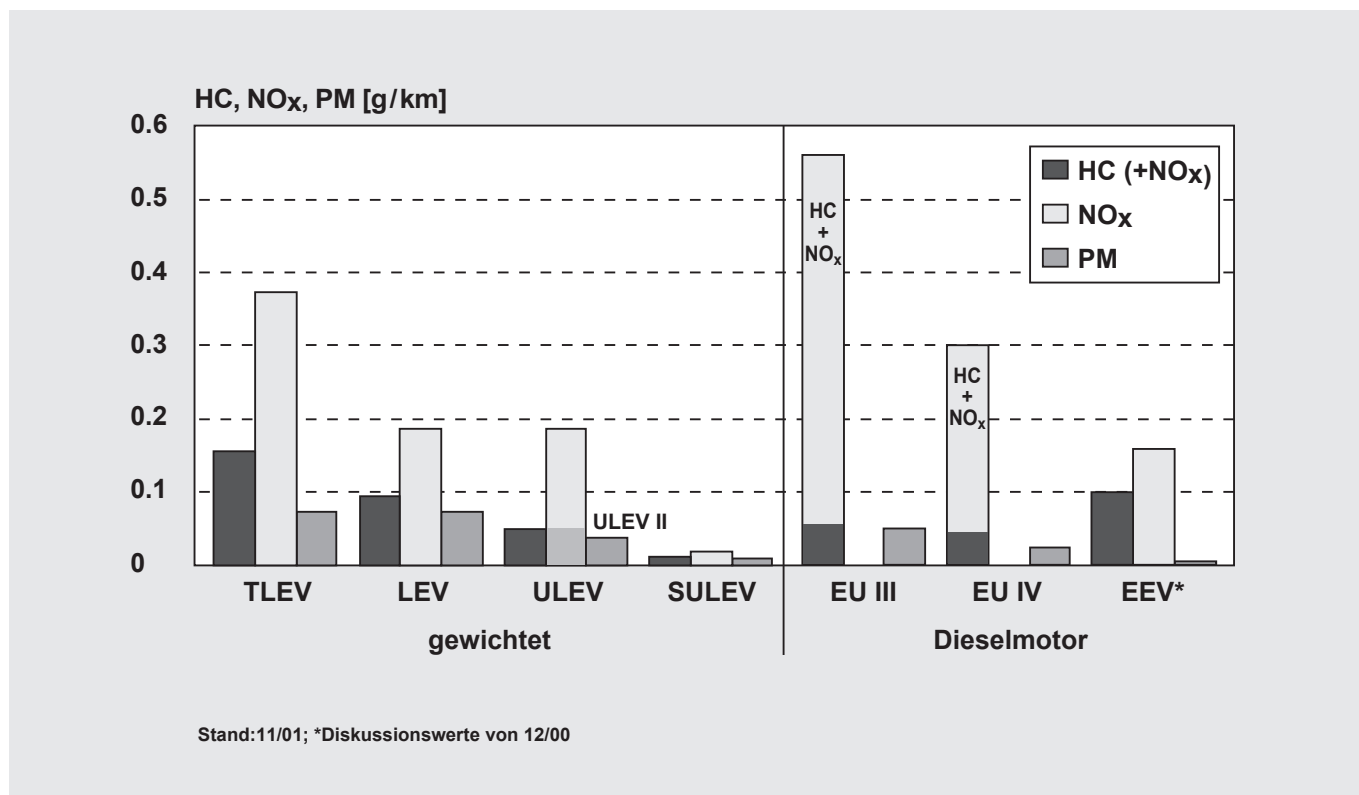


Abbildung 1: Vergleich der heutigen und zukünftigen Abgasgesetzgebung in Europa und Kalifornien für Dieselmotoren; Wichtung entsprechend ULEV-Fahrzeug: HC=2; NO_x, PM=1,5

Der Unterschied in den HC und NO_x Grenzwerten in Kalifornien und in Europa beträgt im Vergleich zwischen SULEV und EEV ca. 850%. Dies deutet an, welche Anstrengungen gemacht werden müssen, um moderne Dieselmotoren auch in Kalifornien/USA einsetzen zu können.

2. Moderne Dieselmotoren

Moderne Dieseldirekteinspritzmotoren mit Abgasturboaufladung haben nicht nur hinsichtlich ihrer Leistungs-Drehmomentcharakteristik und spezifischen Verbrauch einen deutlichen Fortschritt im Vergleich zu älteren Vorkammermotoren erreicht. Gleichzeitig wurde das Rohemissionsniveau, insbesondere bei der ausgestoßenen Partikelmasse, deutlich gesenkt. Die meisten Dieselfahrzeuge sind heute mit einem Oxidationskatalysator zur Reduktion der HC und CO Emissionen ausgestattet. Diese Oxidationskatalysatoren setzen teilweise auch die an Partikeln angelagerten Kohlenwasserstoffe um und reduzieren damit die Partikelgesamtmasse. Abbildung 2 und 3 zeigen die Zulassungsdaten des Kraftfahrbundesamts KBA von 2001 unterteilt in die Schwungmassenklassen kleiner und größer 1590 kg und damit in Klein-/Mittelklassefahrzeuge und Oberklassefahrzeuge.

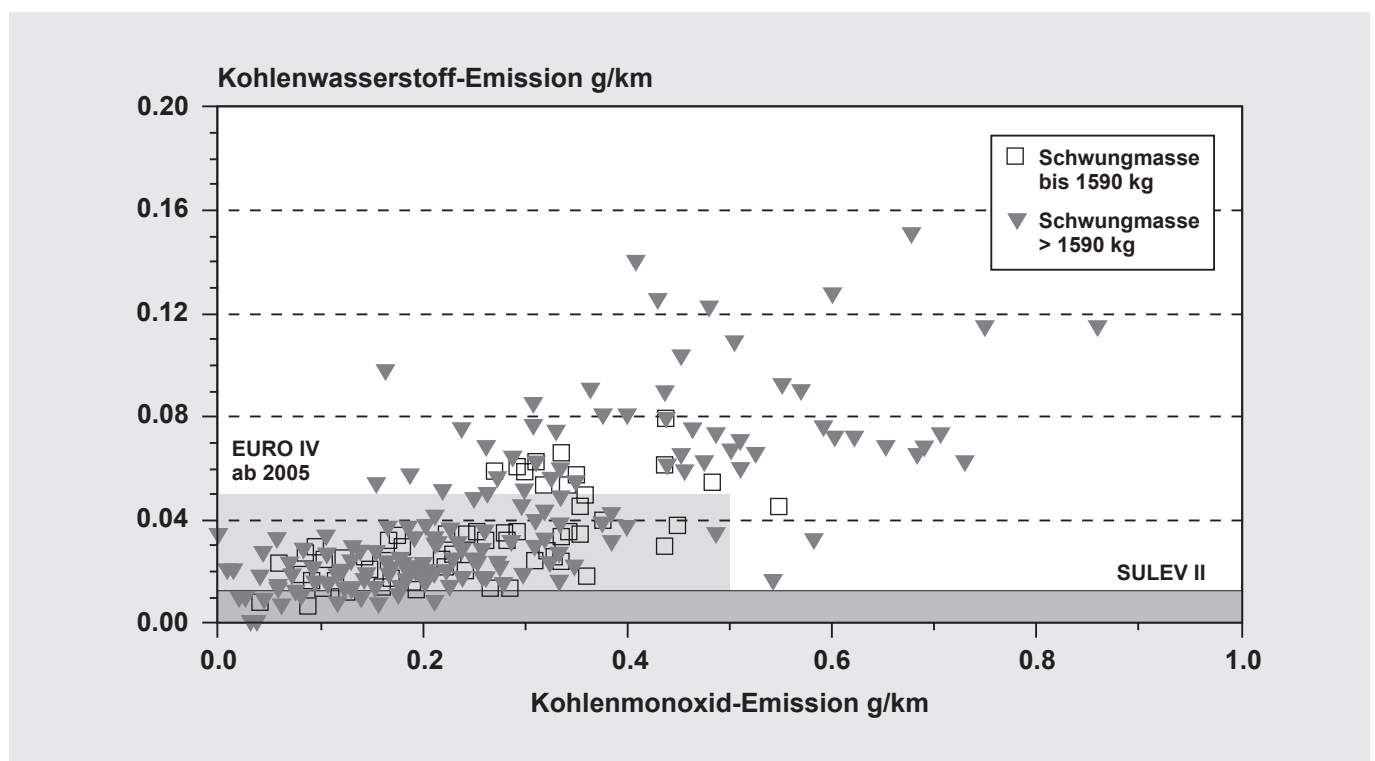


Abbildung 2: HC und CO Zertifizierungsdaten verschiedener Fahrzeuge der Schwungmassenklassen kleiner und größer 1590 kg

Es wird deutlich, dass vor allem die Fahrzeuge der Klein- und Mittelklasse die europäischen Stufe IV Grenzwerte (2005) teilweise schon heute einhalten. Die Fahrzeuge der Oberklasse zeigen aufgrund ihrer größeren Fahrzeugmasse und damit, bezogen auf den Testzyklus einer größeren spezifischen Leistung, insbesondere bei den Partikeln und Stickoxiden höhere Emissionen. Geht man von den kalifornischen SULEV Grenzwerten (umgerechnet in g/km mit einem konstanten Wichtungsfaktor von 2,0 für HC, CO und 1,5 für NO_x, PM) aus, wird jedoch die Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung für alle Schadstoffe deutlich.

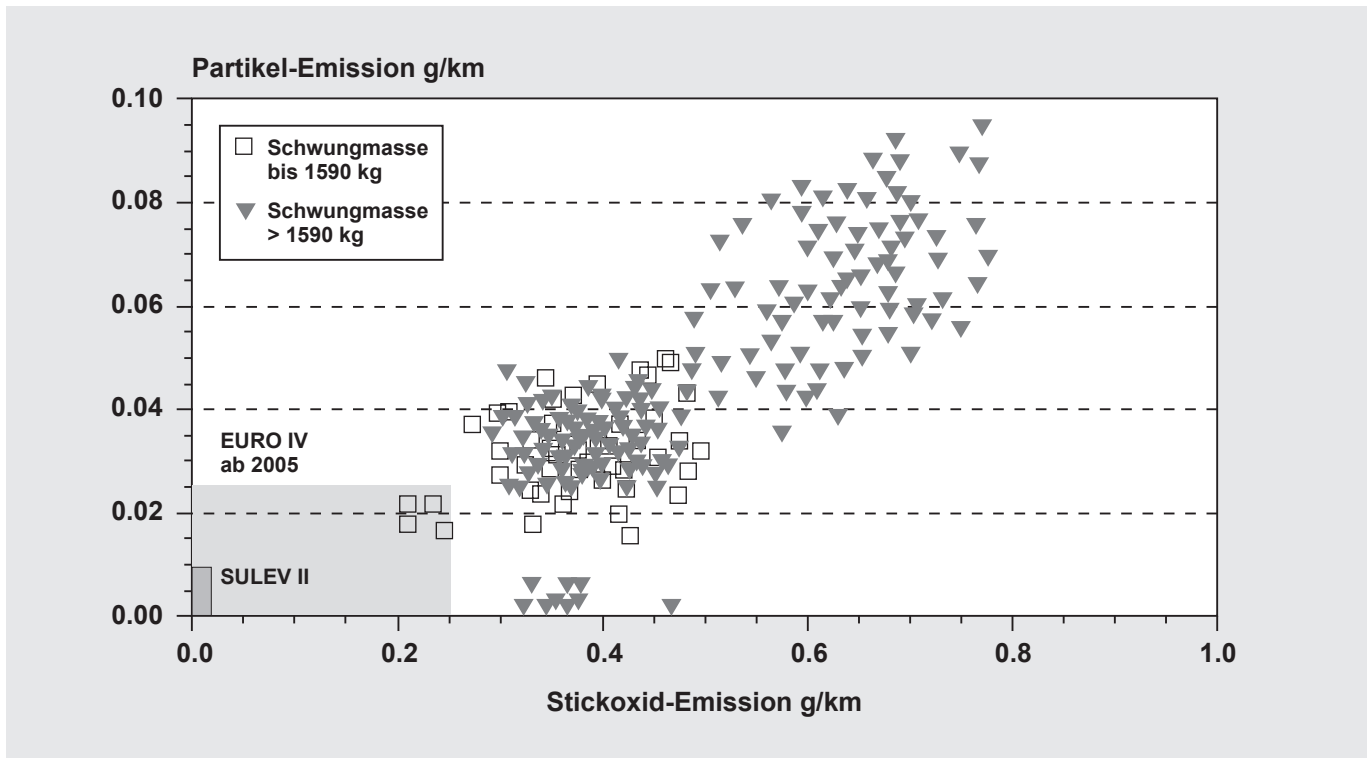


Abbildung 3: NO_x und Partikel Zertifizierungsdaten verschiedener Fahrzeuge der Schwungmassenklassen kleiner und größer 1590 kg

3. Katalysatortechnologien

3.1 Erforderliche Umsatzraten

Basierend auf den in Tabelle 1 dargestellten beispielhaften Rohemissionen für moderne Dieselfahrzeuge der Klein- und Oberklasse wurden die erforderlichen Umsatzraten für die einzelnen Abgaskomponenten in Abhängigkeit der Grenzwerte berechnet (Abbildung 4).

	HC [g/km]	CO [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]
Kleinfahrzeuge	0,15	0,93	0,39	0,034
Oberklasse	0,54	1,8	0,51	0,05

Tabelle 1: Typische aktuelle Rohemissionen für Klein- und Oberklassefahrzeuge im EU III Testzyklus

Die für den amerikanischen Testzyklus typische Wichtung der einzelnen Betriebsphasen wurde (wie vorher erwähnt) mit einem in der Praxis ermittelten konstanten Faktor von 2 für HC und CO und einem Faktor 1,5 für NO_x und PM angesetzt. Die berechneten Umsatz- und Partikel-Abscheideraten sind direkt von den heute noch hohen Motorrohmissionen abhängig. Neue Entwicklungen in der Motor und Motorsteuertechnik und die damit verbundene Rohemissions-Absenkung, werden zu einer Reduktion der berechneten Umsatzraten führen.

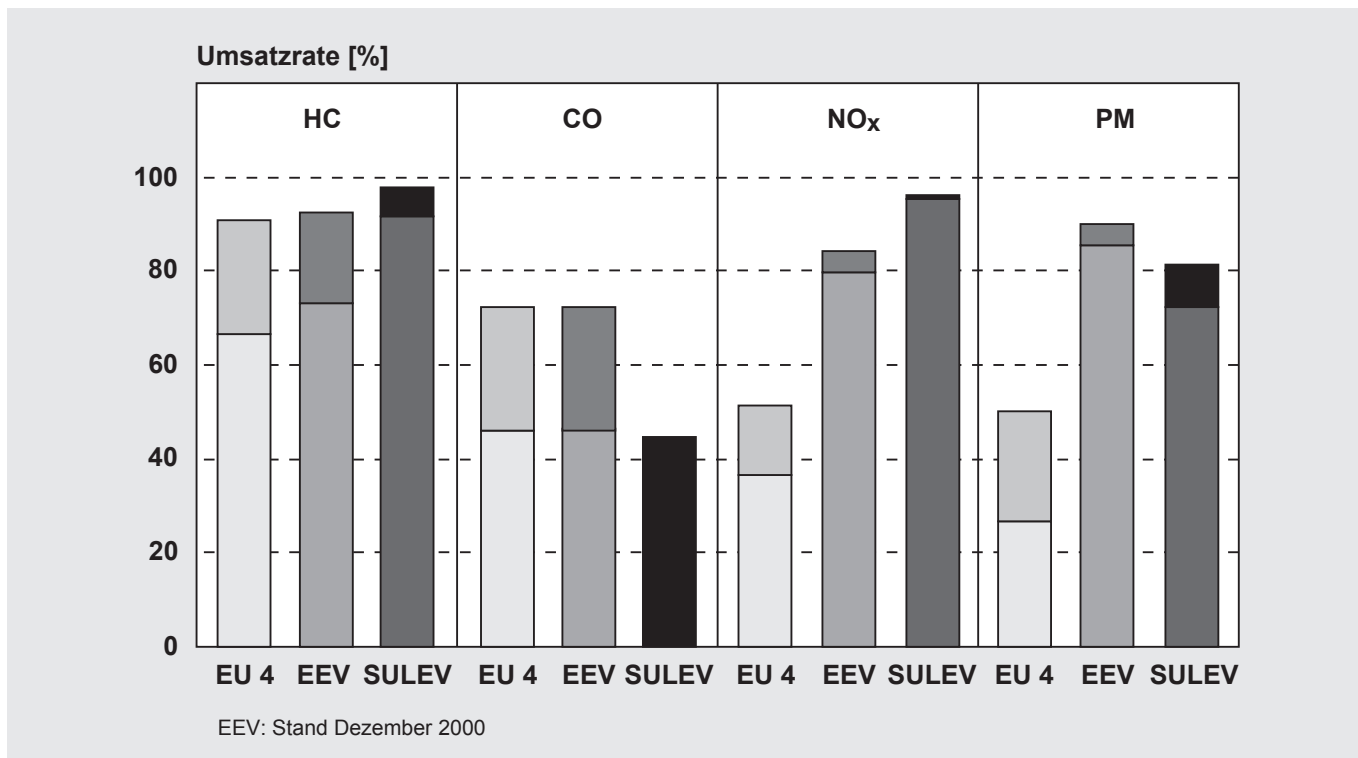


Abbildung 4: Berechnete erforderliche Umsatzraten um die diskutierten und in Planung befindlichen zukünftigen Grenzwerte einzuhalten

Die hier dargestellten Umsatzraten sind abhängig von der Fahrzeugschwingmassenklasse und den Rohemissionen in Tabelle 1 notwendig, wenn bei Neufahrzeugen die jeweiligen Grenzwerte zu 100 % eingehalten werden sollen. Evtl. notwendige Reserven wegen Alterung und Serientoleranzen sind noch nicht berücksichtigt. Aus Abb. 3 wird deutlich, dass vor allem bei Fahrzeugen der Oberklasse, neben den schon verwendeten Oxidationskatalysatoren auch Technologien zur Partikel- und Stickoxidreduktion eingesetzt werden müssen. Zur Einhaltung der diskutierten EEV und SULEV Grenzwerte (Abb. 4) erfordert CO die geringsten Umsatzraten. Der SULEV Wert fällt mit ca. 30 % geringer als die EEV Rate aus. HC und NO_x erfordern Umwandlungsraten von etwa 90 %. PM Abscheideraten liegen im Bereich von 80 bis 90 %.

Um die verfahrenstechnischen Nachbehandlungsmöglichkeiten abzuschätzen, ist sowohl der US- Und EU-Tests zu analysieren. Wie vorher erwähnt ist die spezielle Wichtung der Kalt- und Warmphasen im US-amerikanischen Zyklus im Vergleich zum EU-Test zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass die Abgastemperaturen schneller ansteigen und wegen größerer Fahrgeschwindigkeiten insbesondere in den ersten Minuten nach Motorstart deutlich höher sind (Abbildung 5).

3.2 Oxidationskatalysatoren

Um Beeinträchtigungen des Verbrauchs und Motorverhaltens zu vermeiden, sind passive und kontinuierlich nutzbare Nachbehandlungssysteme zu bevorzugen. Der Oxidationskatalysator erfüllt diese Anforderung. Er wird mit gutem Entwicklungsstand seit einigen Jahren zur Reduktion der HC und CO Emissionen in Dieselfahrzeugen eingesetzt. Der Wirkungsgrad dieser Systeme wird vor allem durch die sehr niedrigen Abgastemperaturen bestimmt [2]. Im europäischen Testzyklus liegen bei einem modernen Dieselmotor die Katalysatortemperaturen selbst in motornaher Lage hinter dem Abgasturbolader nur im Bereich der Light-Off Temperatur (Abbildung 6).

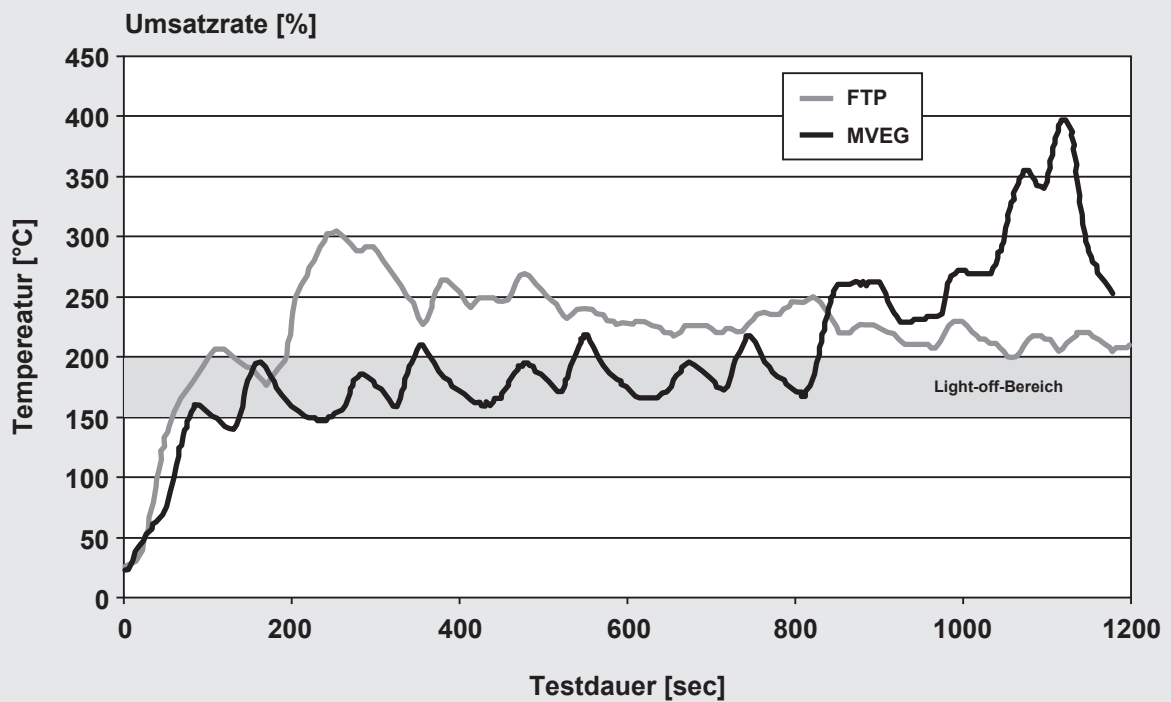


Abbildung 5: Vergleich der Abgastemperaturen vor Unterbodenkatalysator im europäischen und im amerikanischen Testzyklus (Abstand vom Zylinderkopf ca. 1200 mm)

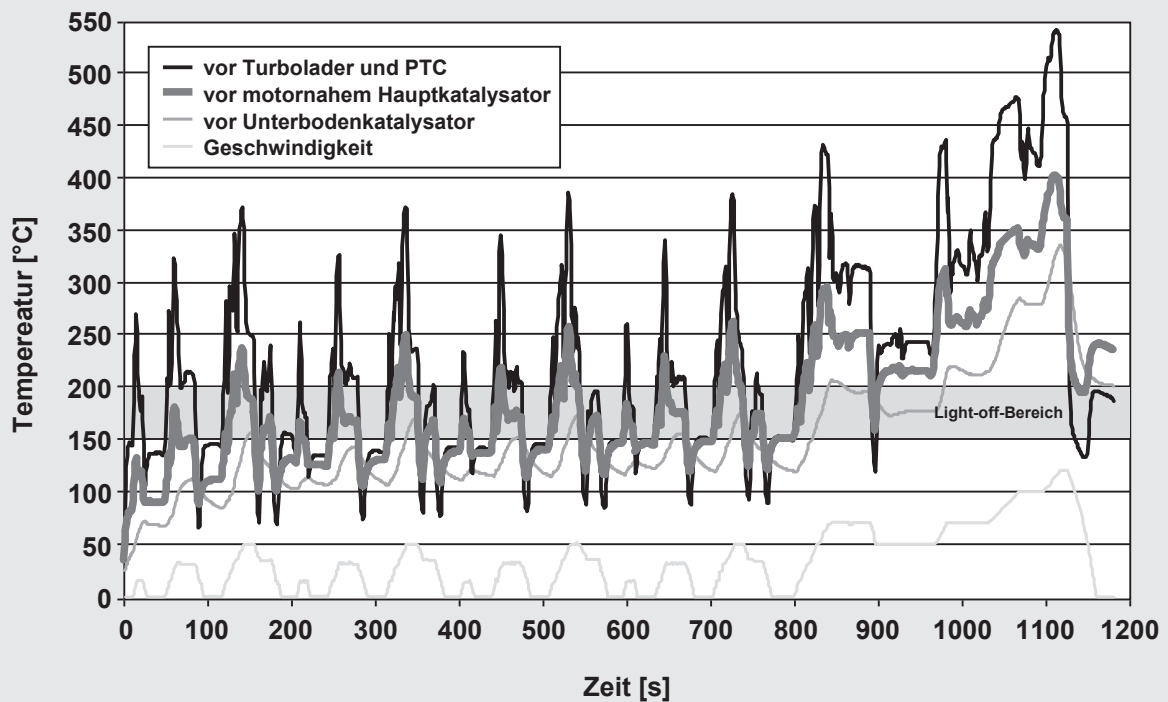


Abbildung 6: Abgastemperaturen in Abhängigkeit der Katalysatorlage eines 6 Zylinder Dieselmotors und Oxidationskatalysator Light-Off Temperaturbereich im europäischen Testzyklus

Eine Steigerung der Katalysatoreffektivität ist zum einen durch eine Vergrößerung der Verweilzeit und damit des Katalysatorvolumens und zum andern durch ein optimales Wärmemanagement im Katalysator möglich. Größere Katalysatoren erreichen zwar Wirkungsgrade bis zu 90 % [3], verursachen jedoch insbesondere aufgrund der Edelmetallbeladung hohe Kosten. Eine motortechnische Abgastemperaturerhöhungen kann zur Verbesserung der Katalysatoreffektivität bei gleichbleibendem Katalysatorvolumen genutzt werden. Aufgrund der Verschlechterung des Motorwirkungsgrads und damit des Kraftstoffverbrauchs, wäre dies nur für die Kaltstartphase hinnehmbar.

Eine neuartige Lösung zur Erhöhung des Katalysatortemperaturniveaus, ist der Einbau von Vorturboladerkatalysatoren (PTC) [4]. Die sehr kleinen Vorturboladerkatalysatoren zeigen aufgrund des turbulenten Stofftransports Umsatzraten von 30 - 40 % im Abgastest [6]. Der Einfluß der Zelldichte und der Katalysatorlänge auf das relative CO Emissionsniveau und auf das Drehmomentniveau eines 4 Zylinder Dieselmotors sind in Abbildung 7a und b dargestellt. Es wird deutlich, dass die Vorturboladerkatalysatoren das Drehmoment im niedrigen Drehzahlbereich positiv beeinflussen (+ 12 %), im maximalen Drehzahlbereich jedoch zu einem Verlust von 2-6 % führen.

Der ebenfalls neuartige Hybridkatalysator [5] dient dem verbesserten Katalysator Wärmemanagement, hierdurch wird eine volumenspezifische Verbesserung der Katalysatoreffektivität erzielt. Durch diese speziellen Metall-Katalysatorträger (Abbildung 8) werden die betriebspunktabhängigen Schwankungen der Abgastemperaturen über den gezielten Einsatz von thermischen Massen im Katalysatorträger vorteilhaft ausgenutzt, indem zugeführte Wärmeenergie in einem ersten Metall-Katalysator durch sehr niedrige Wärmekapazität zu einem schnellen Anspringen führt, während der dahinter angeordnete zweite Metall-Katalysator durch eine besonders hohe Wärmekapazität bei abnehmender Temperatur das „Ausgehen“ der Konvertierung verzögert. Hierdurch läßt sich die Gesamtumsatzrate auf einfache Weise steigern.

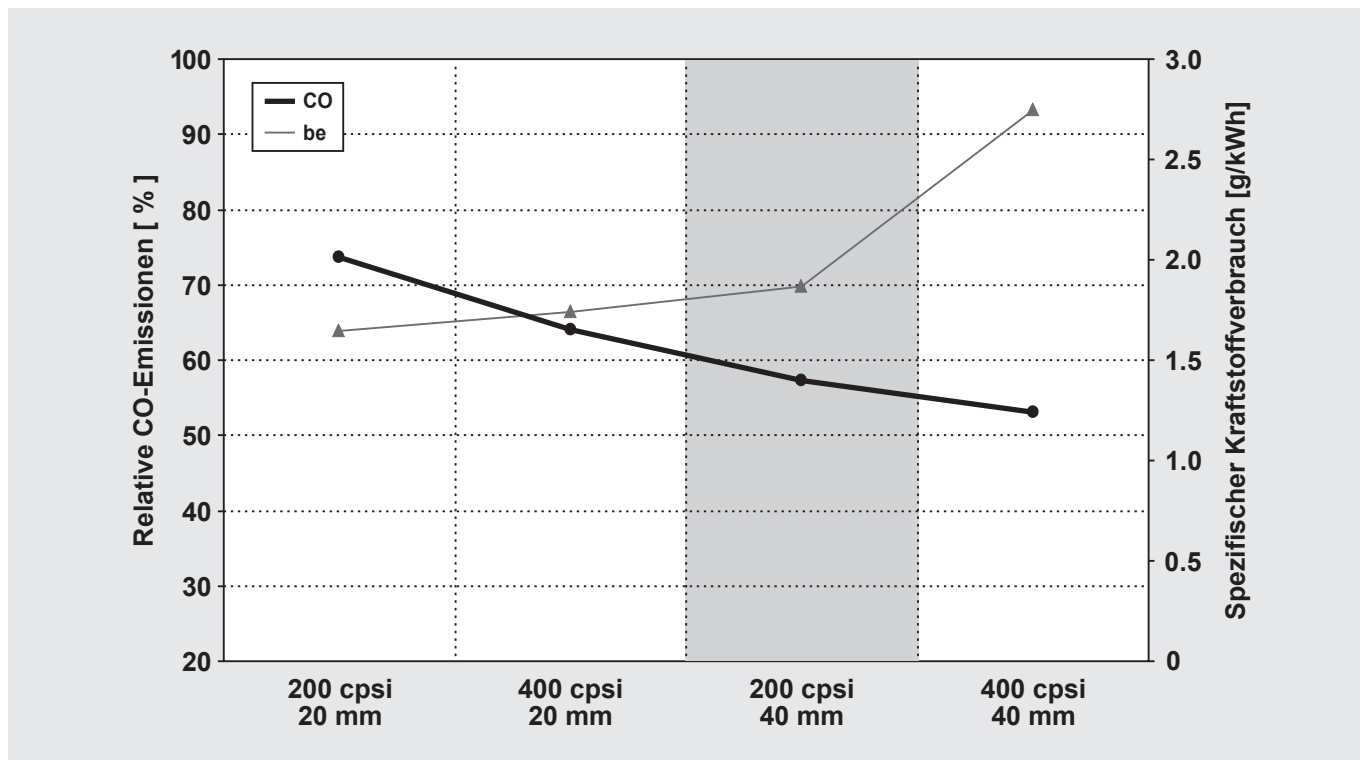


Abbildung 7a: Relatives Emissionsniveau von Vorturboladerkatalysatoren unterschiedlicher Größe und Zelldichte

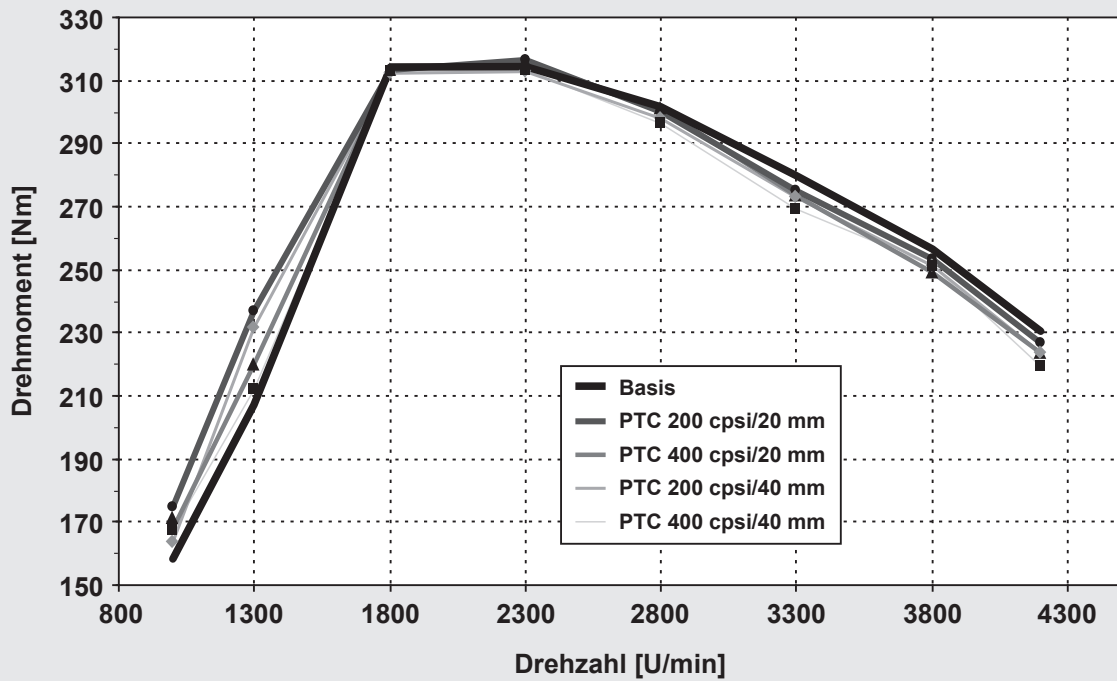


Abbildung 7b: Drehmomentverlauf als Funktion von Vorturboladerkatalysatoren unterschiedlicher Größe und Zelldichte

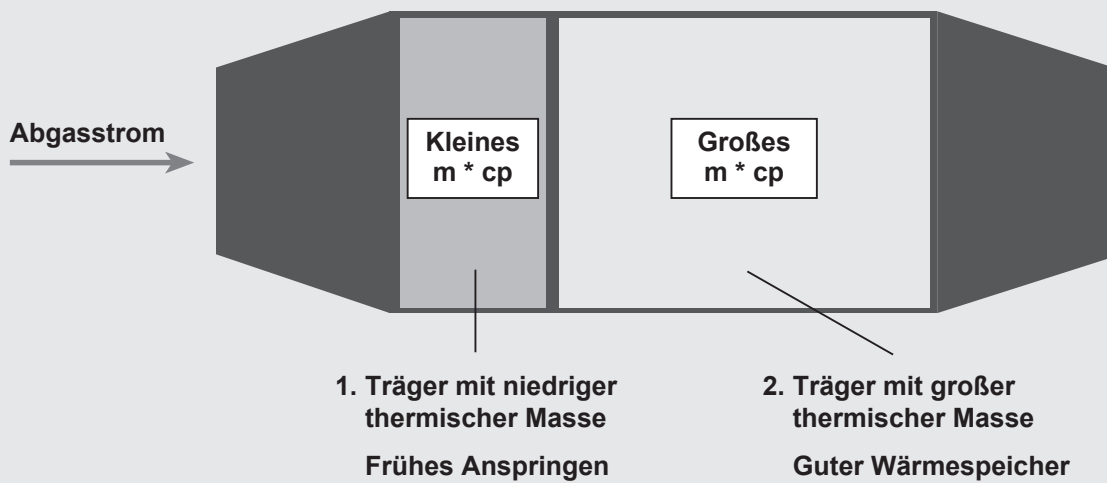


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Hybridkatalysators mit niedriger thermischer Masse im Gaseintritt und hoher thermischen Masse zur Speicherung der Abgasenergie im Gasaustritt

Neben HC und CO werden auch die an den Partikeln angelagerten Kohlenwasserstoffe oxidiert. Dies führt je nach Motor zu einer Reduktion der Partikelmasse zwischen 10 und 30 % [7]. Nach erfolgtem Umsatz von HC und CO wird nachlaufend NO zu NO₂ aufoxidiert.

NO₂ ist in der Lage bereits bei Temperaturen ab etwa 200 °C mit Ruß zu reagieren und somit in motornaher Lage eine weitgehend kontinuierliche Verbrennung der in einem Filter abgeschiedenen Partikel zu gewährleisten.

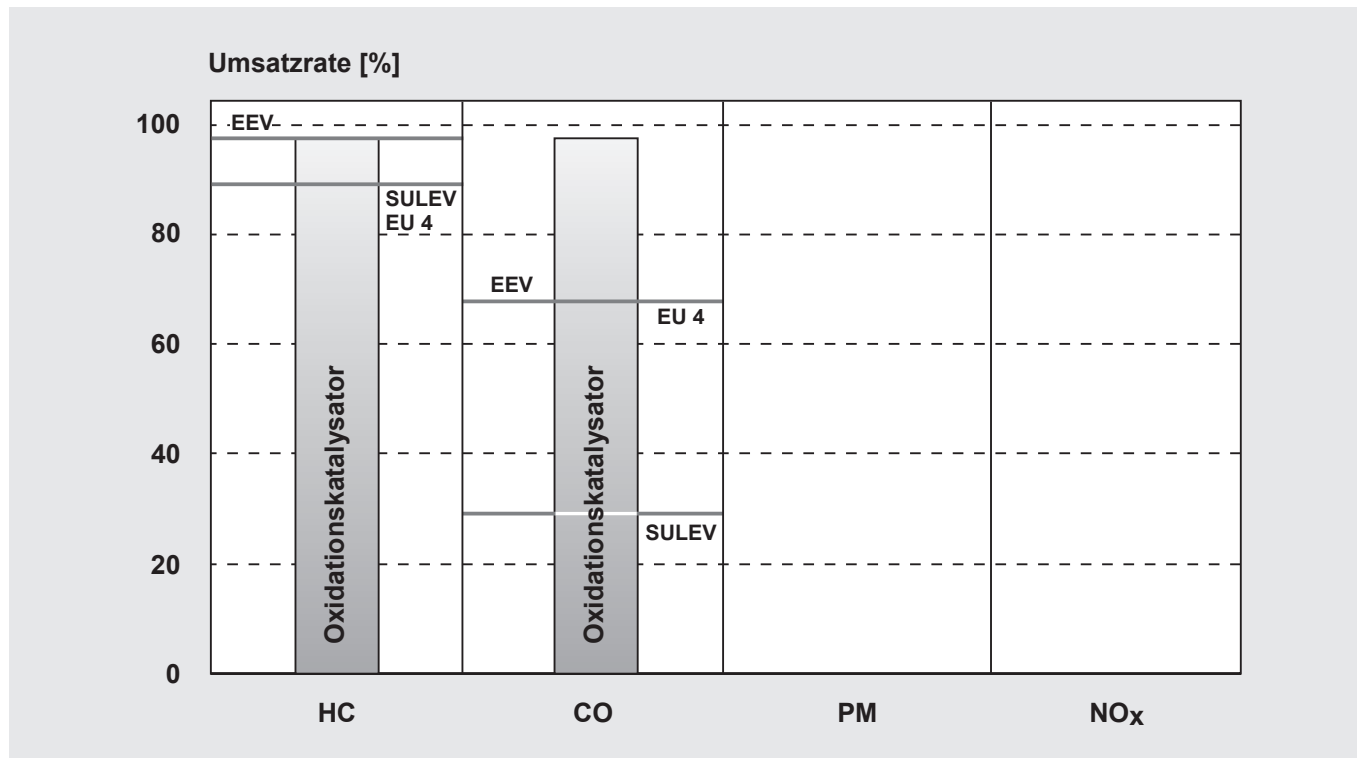


Abbildung 9: Vergleich der mit bekannter Technologie theoretisch darstellbaren Grenzwerte

Abbildung 9 zeigt das bzgl. HC und CO die EEV und SULEV Grenzwerte mit bekannten Oxidationskatalysatoren eingehalten werden können. Die optimierende Entwicklung besteht hier zukünftig in der Verkleinerung des Katalysatorvolumens und damit in einer Verringerung der Kosten.

In Abbildung 10 ist der Vergleich der spezifischen Katalysatoreffektivität eines heutigen Standard Oxidationskatalysatorsystems bestehend aus einem motornahem Startkat der Größe Ø 90 x 90 mm; 0,57 l und einem Unterbodenkatalysator der Größe 101,6 x 152,4 x 127 mm; 1,5 l zu einem thermisch optimierten System bestehend aus Vorturboladerkatalysator (28 x 39 x 30 mm; 0,03 l) und einem Hybridkatalysator mit einem Gesamtkatalysatorvolumen von 0,6 l dargestellt.

Katalysatorsysteme, die Diesel spezifisch für das niedrige Temperaturniveau und geringe Wärmemengenangebot ausgelegt werden, bieten entsprechend Abbildung 10 das Potential im Hinblick auf eine Steigerung der Umsatzraten und damit auch zur Kosteneinsparung bestehender Systeme.

3.3 Partikelreduktion

Die Gesundheitsgefährdung der Rußpartikel wird seit Jahren kontrovers diskutiert. Ob nun die angelagerten polyzyklischen Kohlenwasserstoffe oder die Feinstpartikel und wenn, in welcher Konzentration, für Menschen gefährlich sind, ist jedoch nach wie vor nicht eindeutig nachgewiesen. Es geht in der Diskussion auch darum, das Risiko durch geringere Konzentrationen zu verringern.

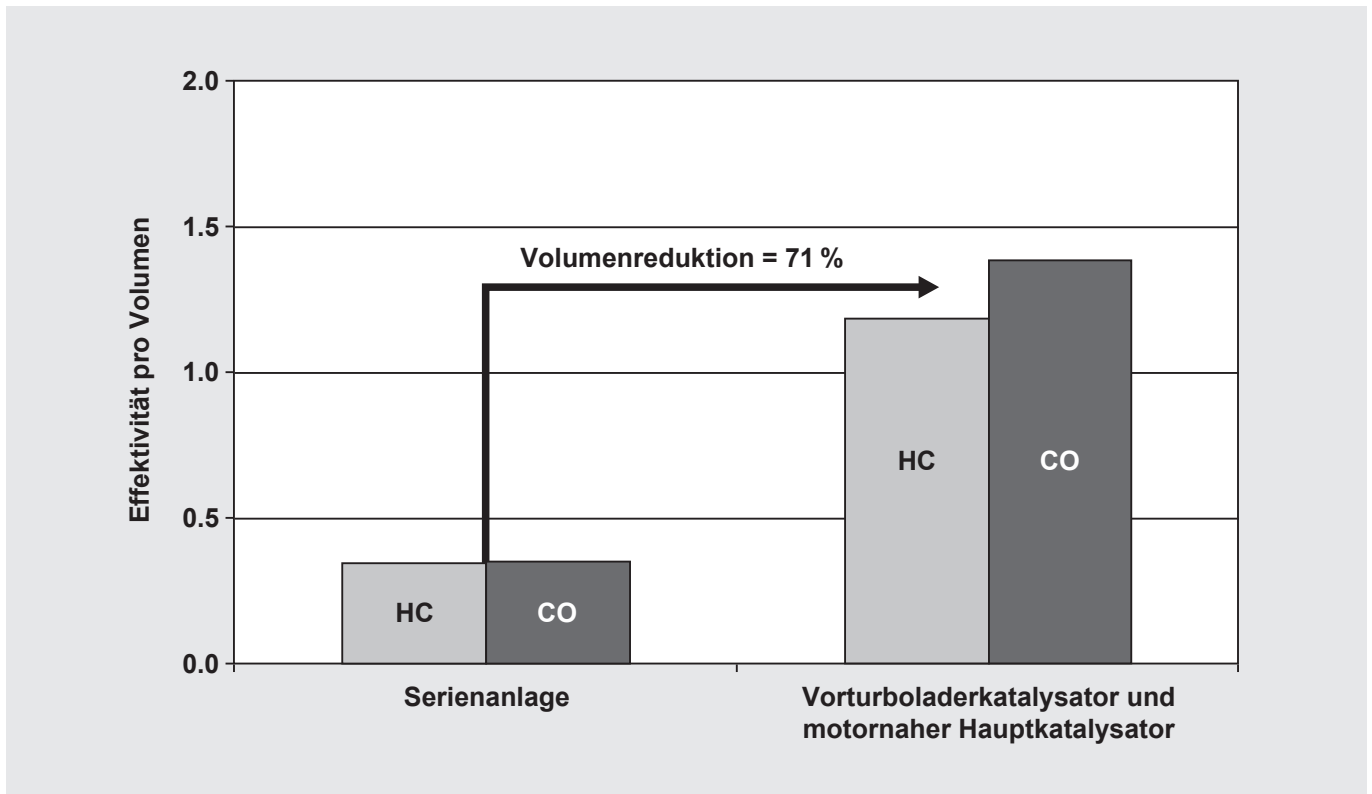


Abbildung 10: HC und CO Effektivität als Funktion des Katalysatorvolumens eines Serienkatalysators im Vergleich zu einem wärmetechnisch optimierten Metallkatalysatorsystem

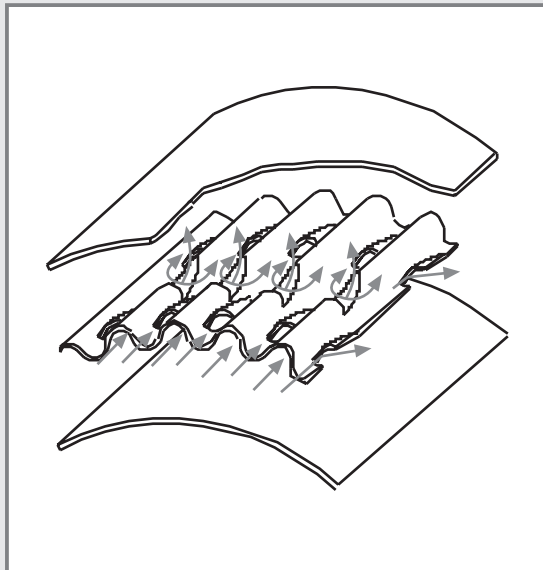
Zur Abscheidung von Rußpartikeln wurden verschiedene Filtertechnologien (Wandstromfilter, Filterkerzen, Drahtgestrickfilter, usw. [8, 9,10,11]) entwickelt und teilweise in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Der Wirkungsgrad dieser geschlossenen Filter beträgt meist mehr als 90 % [12] . Der Nachteil aller dieser Filter ist jedoch die diskontinuierliche Arbeitsweise. Zur sicheren Regeneration der Filter sind selbst beim Einsatz von Additiven Temperaturen erforderlich, die z. B. im Stadtbetrieb eines Kraftfahrzeugs mit Dieselmotor nicht oder kaum erreicht werden. Motortechnische Maßnahmen zur Temperaturerhöhung gehen zu Lasten des Kraftstoffverbrauchs und erhöhen die Motorrohmissionen. Damit der Druckverlust der Filter und der Druckverlustanstieg im diskontinuierlichen Betrieb nicht zu stark ansteigt, sind Filtergrößen von 2 - 4 l notwendig.

Alternative kontinuierliche Regenerationsverfahren mit Hilfe von NO_2 werden teilweise eingesetzt [13]. Sie können in der für Partikelfilter aus Bauraumgründen typischen Unterbodenlage aufgrund der niedrigen Temperaturen jedoch ohne Motorsteuerungsmaßnahmen auch keine kontinuierliche Regeneration sicherstellen.

Der neuentwickelte strömungstechnisch offene Abscheider stellen hierzu eine Alternative dar (Abbildung 11) [14]. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Systeme beträgt jedoch z. Z. nur 30 - 70 %.

Dieser Partikelabscheider arbeitet nach dem System der kontinuierlichen Reaktion von Partikeln mit NO_2 . Vorteilhafterweise tritt ein Verblocken der Kanäle selbst bei nicht ausreichender NO_2 -Konzentration nicht auf, sodass der Druckverlust unabhängig vom Beladungsgrad weitgehend konstant bleibt. Ein weiterer Vorteil ist das geringe spezifische Druckverlustniveau, sodass ein solcher Abscheider relativ klein baut und damit motornah eingesetzt werden kann. Der Abscheider funktioniert jedoch nur in einem abgestimmten Gesamtkonzept optimal. Es ist notwendig, zunächst die HC und CO Emissionen zu reduzieren, bevor die kinetisch nachlaufende Oxydation von NO zu NO_2 abläuft.

**Struktur mit
porösen Glattlagen**



**Partikelrückhaltung beim
Durchgang durch die poröse Folie**

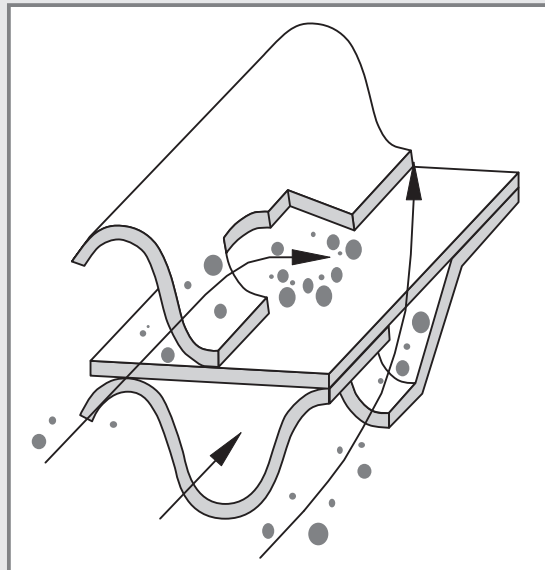


Abbildung 11: Offener Partikelabscheider

Abbildung 12 zeigt ein Katalysatorsystem bestehend aus einem Vorturboladerkat zur Oxidation von CO und HC, einem Hybridkat zu Oxidation von NO und einem unmittelbar nachgeschalteten Partikelabscheider.

In Fahrzeugversuchen wurde ein Abgassystem mit Vorturboladerkat und nachgeschaltetem Hybridkatalysator zusätzlich mit einem offenen Abscheider der Größe $\varnothing 90 \times 74,5$ mm ausgerüstet. Im direkten Vergleich mit und ohne Abscheider wurde hier eine Partikelreduktion um 49 % im EU III Testzyklus erreicht (Abbildung 13).

Die in Kapitel 3.1 gezeigten erforderlichen Umsatzraten machen jedoch deutlich, dass ein solches System alleine zur Zeit nur eine Lösung für EU IV darstellt. Eine Verbesserung der Effektivität ist durch eine Vergrößerung des Abscheiders möglich. Eine Kombination mit elektrostatischen Kräften ist zwar denkbar, aber zur Zeit nicht verfügbar.

Mit Hilfe der bereits in Serie befindlichen geschlossenen „Wall Flow“ Filter ist eine Einhaltung der EEV und SULEV Grenzwerte möglich (Abbildung 14). Durch Verbesserung der Motorentechnologie (z. B. HCCI [21]) erscheint der Einsatz von weniger aufwändigen Abscheidern langfristig möglich.

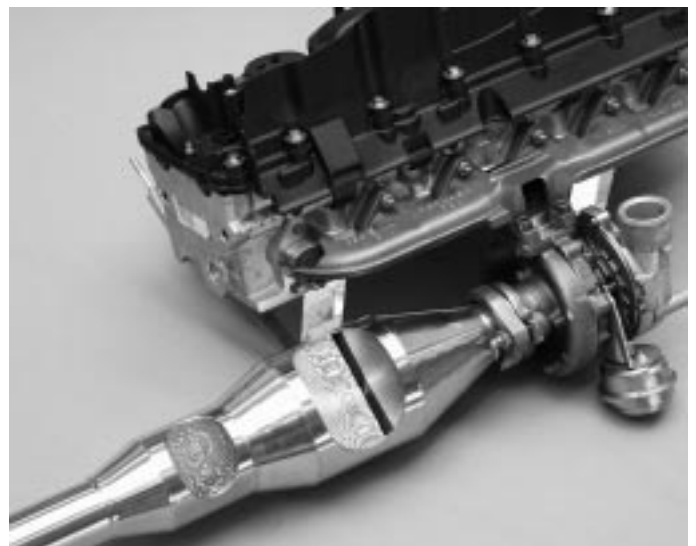


Abbildung 12: Dieselkatalysatorsystem in Kombination mit einem Partikelabscheider

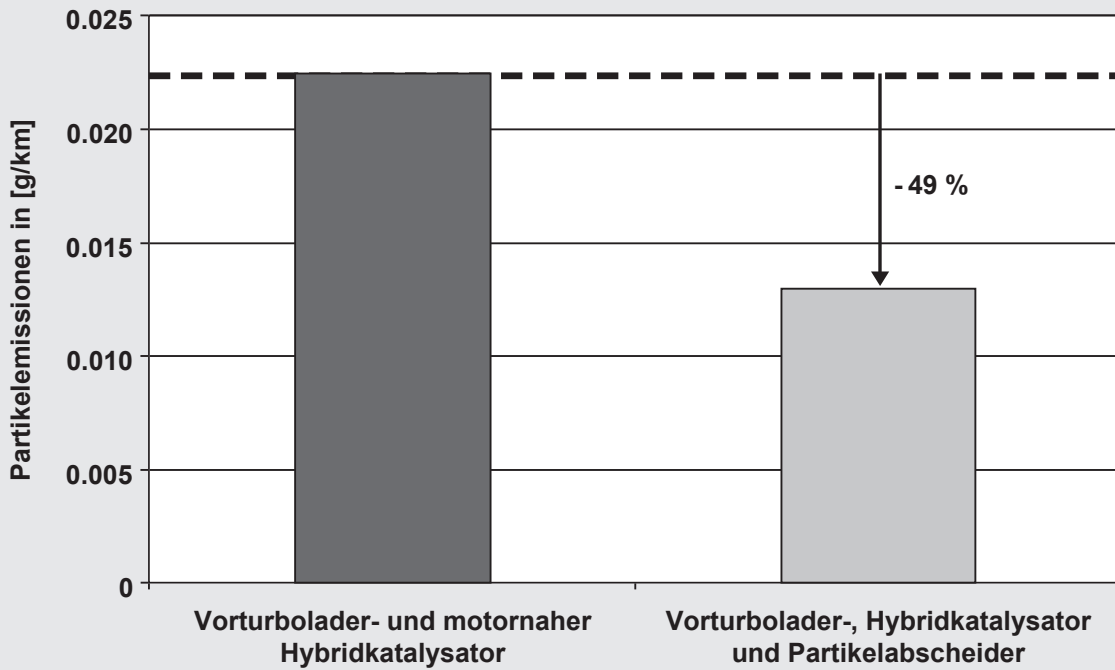


Abbildung 13: Vergleich der Partikelemissionen eines Mittelklasse PKW's mit Vorturbolader- und Hybridkatalysator mit und ohne Partikelabscheider

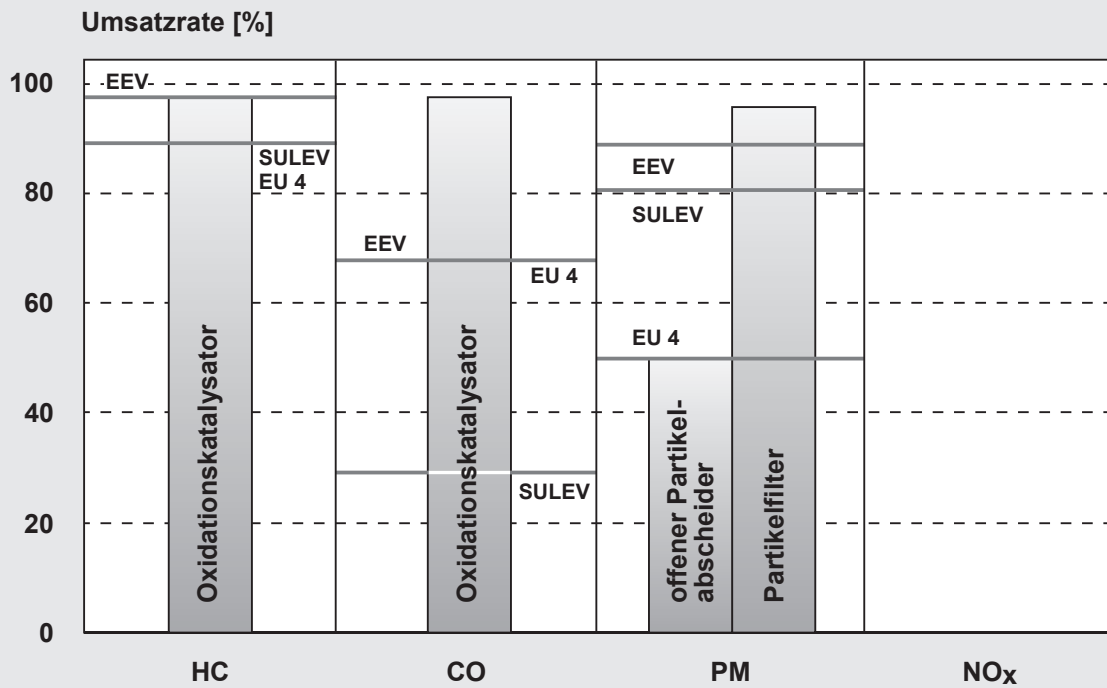


Abbildung 14: Vergleich der mit bekannter Technologie theoretisch darstellbaren Grenzwerte

3.4 Stickoxidreduktion

Die Reduktion der Stickoxide stellt unter den beim Dieselmotor herrschenden mageren Betriebsbedingungen die größte Herausforderung dar. Die seriennah entwickelten Technologien sind die Harnstoff SCR und die NO_x Adsorber Technik. Harnstoff SCR wird seit Jahren für LKW's entwickelt und ausgiebig getestet. NO_x Adsorber stellen zur Zeit für die mager laufenden Ottodirekteinspritzmotoren die bevorzugte Technologie dar.

Harnstoff SCR:

Das Harnstoff SCR System umfaßt neben dem eigentlichen SCR- und Hydrolysekatalysator noch ein Harnstoffbevoratungs- und Dosiersystem. Der SCR Katalysator kann sowohl in Vollextrudattechnik als auch als Beschichtung auf keramischen oder metallischen Trägern dargestellt werden. Als Reduktionsmittel wird heute üblicherweise eine 32,5-prozentige Harnstoff/Wasserlösung eingesetzt. Je nach Rohemission und Größe des Tanks reicht eine Füllung 1000 - 3000 km. Um den zusätzlichen Tankaufwand zu verringern sind Dualzapfsäulen im Gespräch. Als Alternative bietet sich die in Entwicklung befindliche Festharnstoffeinspeisung an, die aufgrund der 100 % Konzentration eine Verdreifachung der Reichweite bedeuten würde.

Die in verschiedenen Veröffentlichungen dargestellten Umsatzraten im EG Test betragen 60 - 70 % [15,16]. Nachteile des Systems bestehen in Wirksamkeit im Kaltstart, d. h. im unteren Betriebstemperaturbereich. Aufgrund der für eine ausreichende Umsatzrate erforderlichen Raumgeschwindigkeiten von ca. 50.000 h⁻¹ ist die Möglichkeit einer motornahen Positionierung aus Bauraumgründen begrenzt.

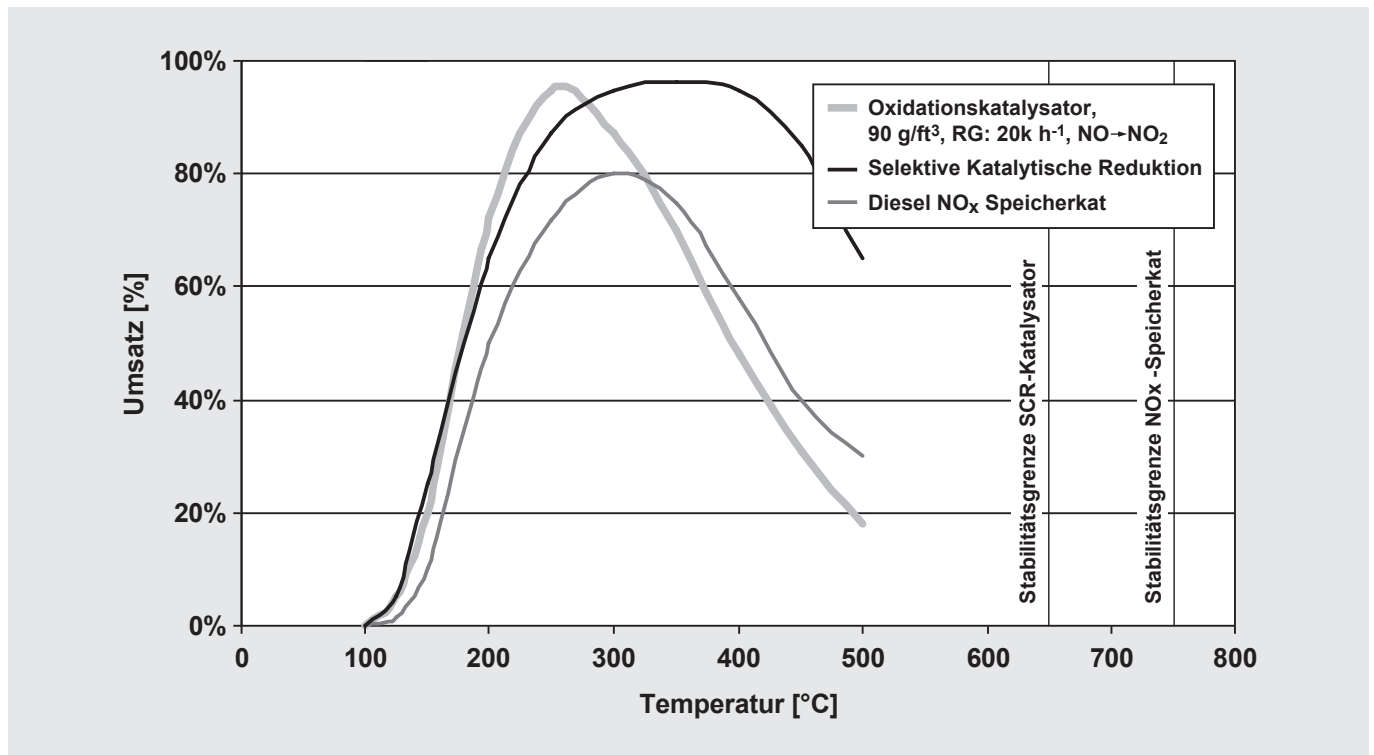


Abbildung 15: Betriebstemperaturbereiche und Maximaltemperaturen von Harnstoff SCR und NO_x-Adsorbertechnologie

NO_x-Adsorber:

Die Funktion des NO_x Adsorbers beruht auf der Chemisorption der Stickoxide mit Barium oder Kalium [17,18]. Zur Regeneration ist es in Abhängigkeit der Rohemissionen und des Adsorbervolumens notwendig, in Abständen von 30 - 90 Sekunden kurzfristig einen „fetten“ Betriebszustand einzustellen. Umsatzraten von bis zu 80 % im Abgastest sind beschrieben [19]. Da neben den Stickoxiden auch Schwefel adsorbiert wird, muss regelmäßig eine Desulfatisierung bei Temperaturen größer 600 °C durchgeführt werden.

Die erreichbaren Umsatzraten beider Technologien sind auch durch den eingeschränkten Betriebstemperaturbereich begründet. Abbildung 15 zeigt die Betriebstemperaturbereiche und die für die Dauerhaltbarkeit relevanten Maximaltemperaturen der beiden Technologien. Im optimalen Temperaturbereich sind Umsatzraten bis zu 90 % darstellbar.

Da beide Technologien einen ähnlichen unteren Betriebspunkt von 150 - 180 °C (50 % Umsatz) zeigen, ist auch bei der NO_x Reduktion wie beim Oxidationskatalysator die Lage im Abgassystem für die Niedrigtemperatur-Effektivität von Bedeutung. Da die NO_x Reduktion jedoch im gesamten Betriebskennfeld, also auch bei höheren Lastbedingungen und Temperaturen funktionieren sollen, ist die Unterbodenlage sinnvoll, um den oberen, zulässigen Temperaturbereich nicht zu überschreiten. Vergleicht man die für die Dauerhaltbarkeit möglichen Maximaltemperaturen (Abbildung 15), zeigt der NO_x-Adsorber einen deutlichen Vorteil.

Um die für EEV erforderlichen Umsatzraten von 85 % zu erreichen, ist ein Beginn der katalytischen Reaktion nach 57 Sekunden erforderlich. Dies basiert auf den gemessenen Rohemissionen eines Oberklasse Fahrzeugs im EU Test und einer Katalysatoreffektivität von 90 % nach Light-Off (Abbildung 16).

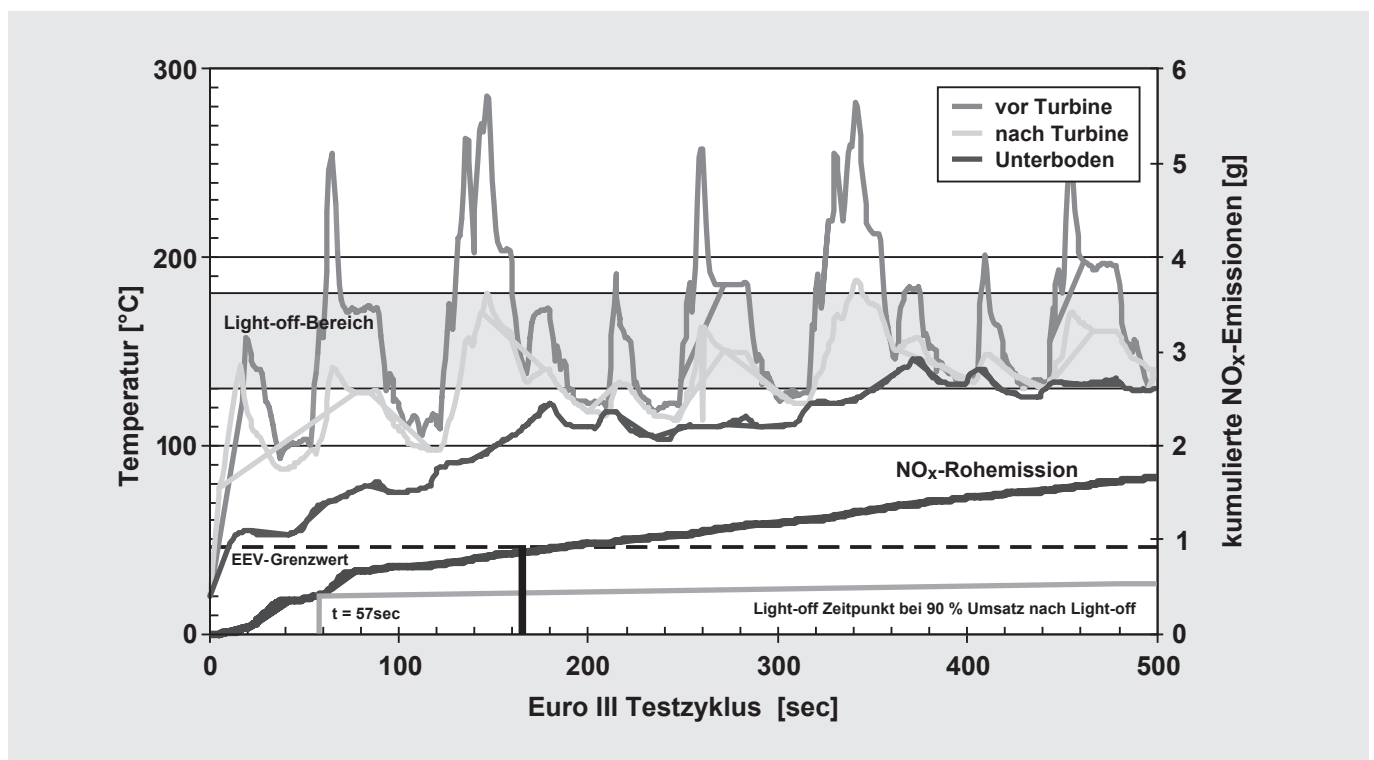


Abbildung 16: NO_x Rohemissionen eines Oberklassefahrzeugs und erforderliche Light-Off Zeitpunkte zur Einhaltung der EEV Grenzwerte und Abgastemperatur in Unterbodenlage, motornaher Lage und vor Turbolader im EU Test

Die gezeigten Abgastemperaturen machen deutlich, dass bei dem dargestellten für heutige Motoren typischen Rohemissionsniveau ein „rechtzeitiges“ Light-Off nur in der Position vor Turbolader erreicht werden kann. In Abbildung 17 sind die Temperaturen in der Katalysatorposition Unterboden motornah hinter Turbolader und motornah Vorturbolader im FTP Test dargestellt. Um die für SULEV erforderlichen Umsatzraten von 96 % zu erreichen, ist ein Beginn der katalytischen Reaktion nach wenigen Sekunden erforderlich. Die aufgrund der im FTP-Test höheren Fahrgeschwindigkeiten nach Motorstart und der damit höheren Abgastemperaturen ermöglichen eine Positionierung des NO_x Reduktionskatalysators hinter dem Turbolader.

Gleichzeitig wird bei Fahrzeugbetrieb in höheren Lastpunkten die obere Grenztemperatur beider Technologien schnell überschritten. Um beiden Anforderungen gerecht zu werden bietet sich eine Kombination der Technologien an:

- Motornah ein sehr kleiner NO_x Adsorber der im Zehntelsekundenbereich durch Nacheinspritzen regeneriert wird
- Im Unterboden ein Harnstoff SCR System (Abbildung 18)

Die Effektivität eines NO_x Adsorbers ist nicht nur vom Adsorbervolumen sondern auch von der Häufigkeit der Regeneration abhängig [20]. Mit Hilfe eines Berechnungsprogramms wurde die theoretische Umsatzrate von NO_x Adsorbervolumen unterschiedlicher Größe und Regenerierungszeiten berechnet. Die Berechnungen wurden für eine Temperatur von 300 °C und einen Massenstrom von 100 kg/h durchgeführt. Selbst bei extrem kleinen NO_x Adsorbervolumen und gleichzeitig sehr kurzen Regenerationszeiten sind Umsatzraten von 60 % zu erreichen.

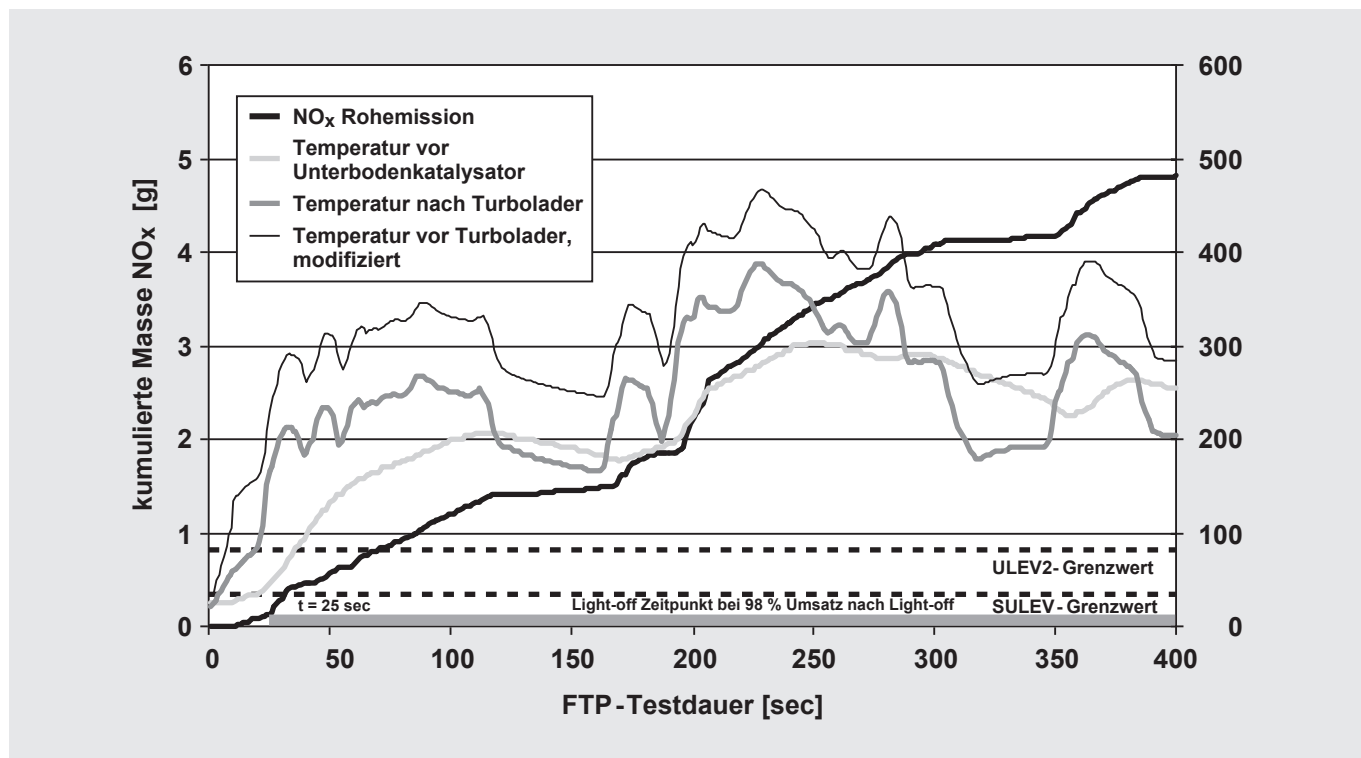


Abbildung 17: NO_x Rohemissionen eines Oberklassefahrzeugs und erforderliche Light-Off Zeitpunkte zur Einhaltung der SULEV Grenzwerte und Abgastemperatur in motornaher Lage im FTP Test

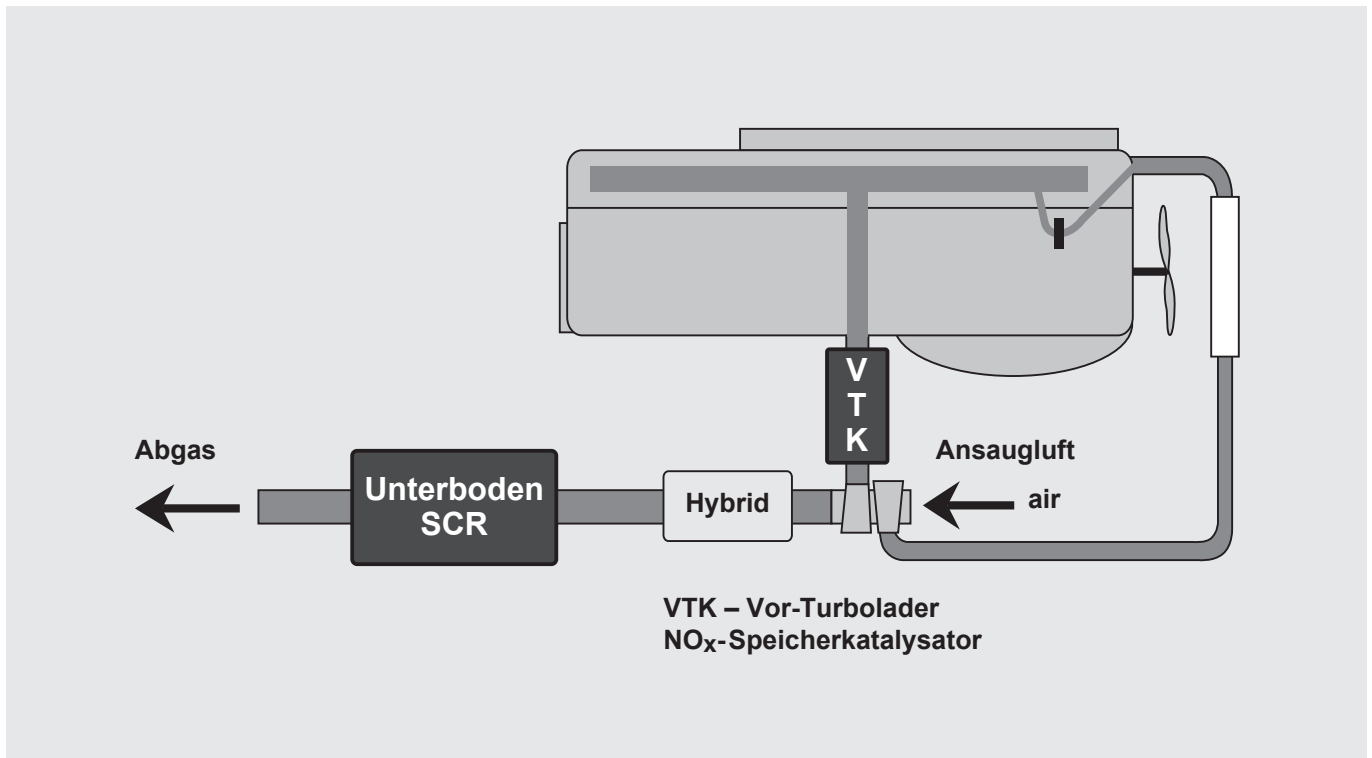


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Abgassystems mit Vorturbolader NO_x Adsorber und Unterboden SCR System

Durch den lastpunktabhängig alternierenden Einsatz des NO_x Adsorbers und des SCR Systems werden deutlich geringere Mengen an Harnstoff benötigt, sodass hierdurch das Ziel – Harnstoff nur entsprechend den Fahrzeug-Wartungsintervallen nachfüllen zu müssen – erreicht werden könnte.

Eine Alternative für das SCR System stellt ein Unterboden NO_x Adsorber mit vorgeschalteter Kühlstrecke dar, um im Bereich der Betriebstemperatur zu bleiben.

Berechnet man die NO_x Umsatzrate der in Abbildung 18 dargestellten Kombination der beiden Technologien, wird der spezifische Vorteil jeder Einzeltechnologie in der kumulierten Darstellung deutlich (Abbildung 19).

Die Berechnungen im EG Test wurden sowohl mit einem normal großen Vorturbolader NO_x-Adsorber (halbe mögliche Effektivität) als auch mit einem vergrößertem NO_x Speicherkat mit voller Effektivität (entsprechend dem Wirkungsgrad in Abbildung 15) durchgeführt. Es wird ersichtlich dass die erforderliche Light-Off Zeit von 57 Sekunden zwar eingehalten werden kann, die Effektivität im weiteren Verlauf des Tests, aufgrund der niedrigen Temperaturen, jedoch nicht ausreicht eine Umsatzrate von 90 % zu erreichen (Abbildung 19). Aus diesem Grund wird der EEV Grenzwert nach ~350 Sekunden überschritten.

Eine mögliche Abhilfe würde ein isoliertes Abgassystem in Verbindung mit einem auf höhere Temperaturen getrimmten Motor schaffen. Inwieweit sich motortechnische bzw. steuerungstechnische Maßnahmen auf den Kraftstoffverbrauch auswirken muß geklärt werden.

Die Berechnungen im FTP Test machen deutlich das der hinter Turbolader eingebaute NO_x Adsorbers nicht in der Lage ist die Light-Off Zeit von 25 Sekunden einzuhalten (Abbildung 20). Die Umsatzrate im betriebswarmen Zustand ist im Vergleich zum Europa Test zwar deutlich günstiger reicht jedoch ebenfalls nicht aus die hochgesteckten Ziele des SULEV Grenzwertes zu erreichen. Der ULEV II Grenzwert kann mit einem solchen System theoretisch eingehalten werden.

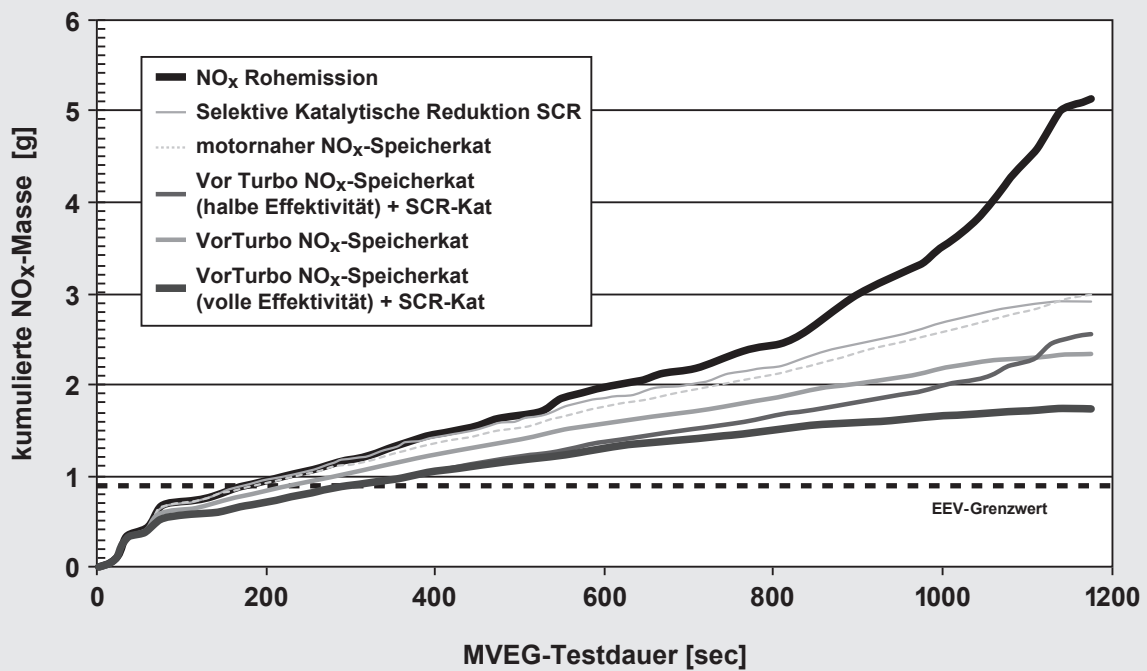


Abbildung 19: Berechnete kumulierte NO_x Emissionen und Reduktionsraten als Funktion der Nachbehandlungstechnologie im MVEG-Test

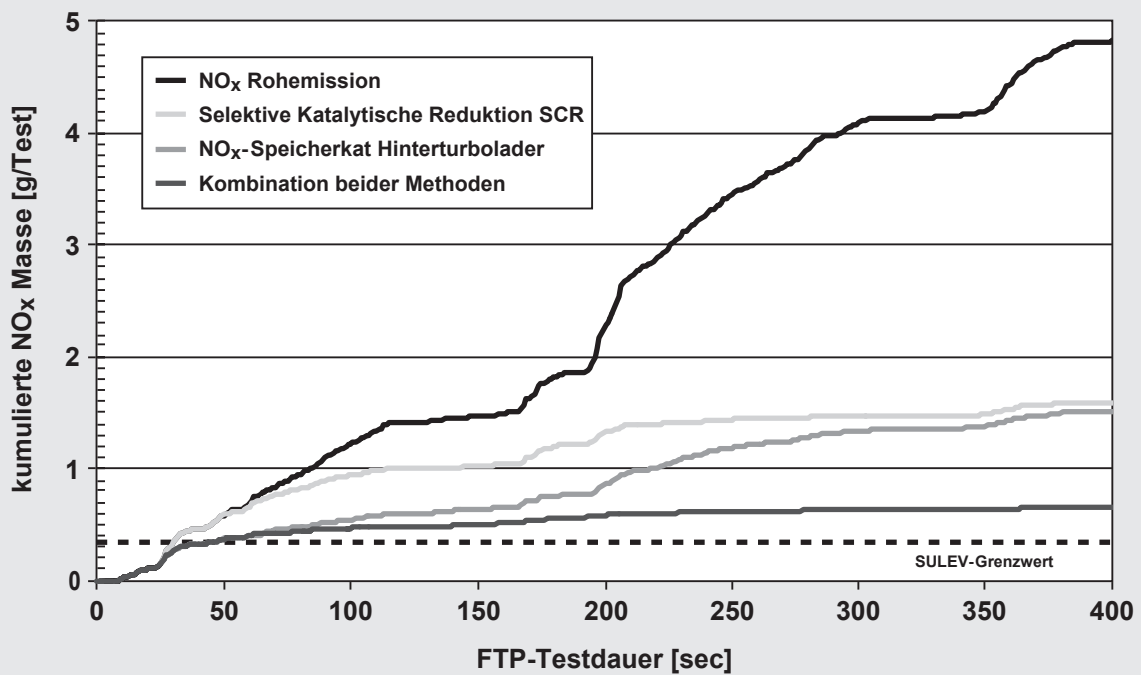


Abbildung 20: Berechnete kumulierte NO_x Emissionen und Reduktionsraten als Funktion der Nachbehandlungstechnologie im US-FTP-Test; NO_x Adsorber Hinter Turbolader

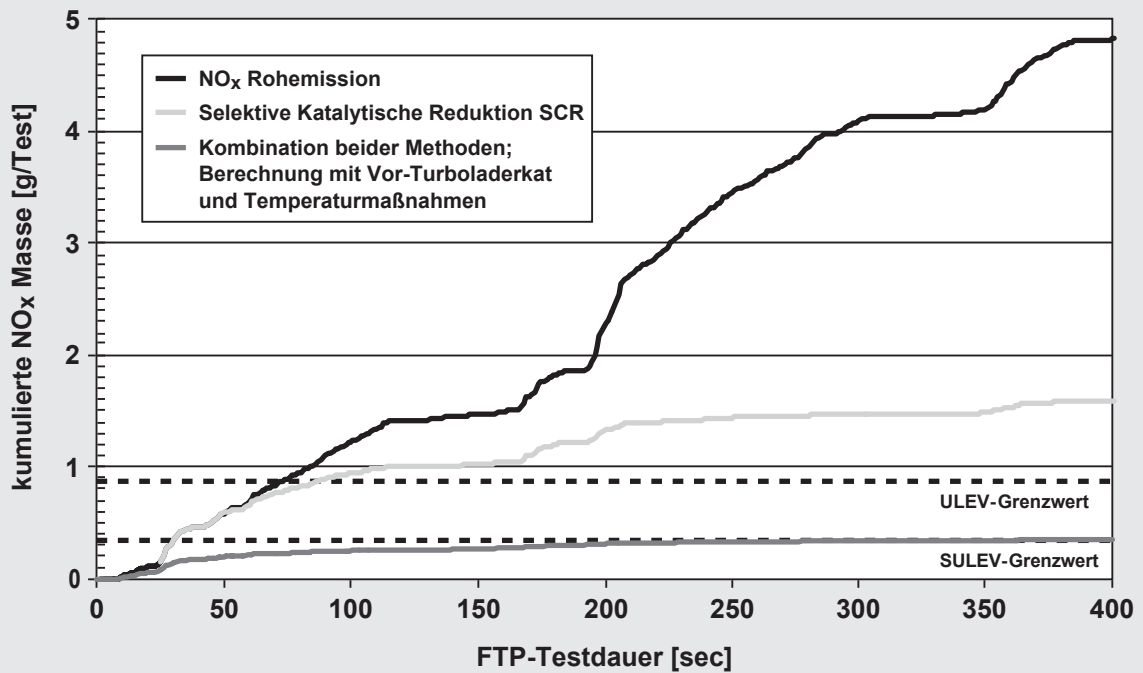


Abbildung 21: Berechnete kumulierte NO_x Emissionen und Reduktionsraten als Funktion der Nachbehandlungstechnologie im US-FTP-Test; NO_x Adsorber Vor Turbolader

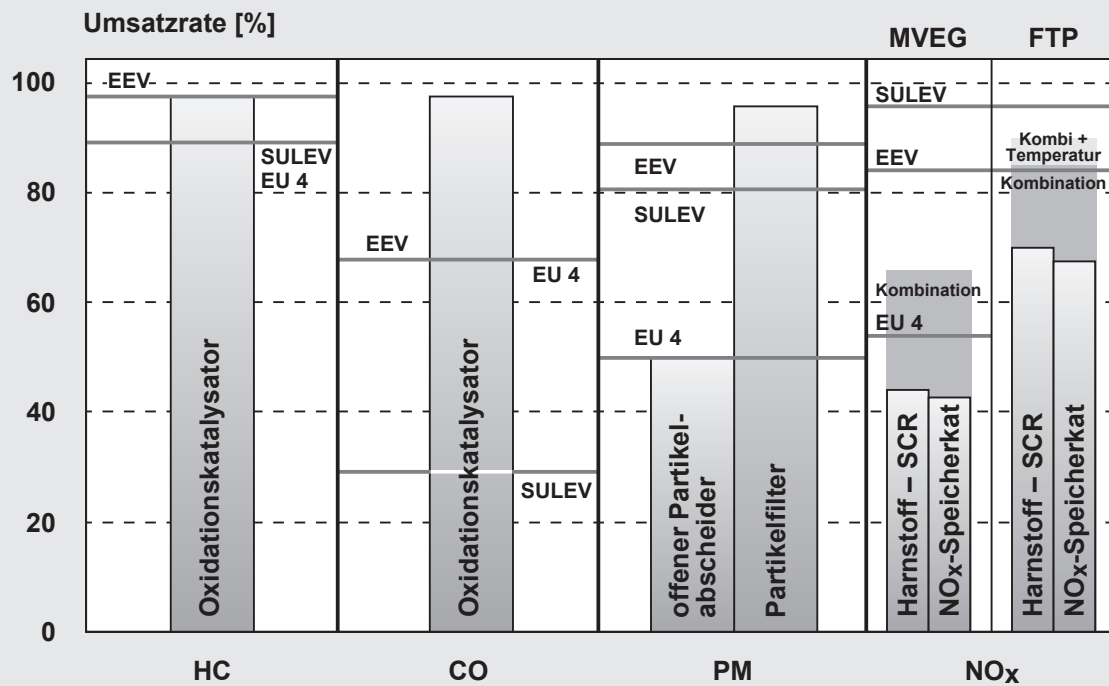


Abbildung 22: Vergleich der mit den betrachteten Technologien theoretisch darstellbaren Grenzwerte

Baut man einen NO_x Adsorber mit voller Effektivität in der Lage vor Turbolader ein und erhöht, insbesondere zwischen Sekunde 10 bis Sekunde 20 nach Motorstart, die Temperatur über Motorsteuerungsmaßnahmen kann die Light-Off Zeit auf 20 Sekunden gesenkt werden (Abbildung 21). Hierdurch werden die Kaltstartanforderungen an ein SULEV System erreicht. Eine notwendige Erhöhung der katalytischen Effektivität im betriebswarmen Zustand ist nur durch eine weitere Vergrößerung der Katalysatoren und eine optimale Gemischsteuerung sowohl des Motors als auch des SCR Systems zu erreichen.

Es wird jedoch deutlich, dass unter der Voraussetzung heutiger Rohemissionen selbst bei erhöhter Abgastemperatur und darstellbarer Katalysatoreffektivitäten auch mit der Kombination der beiden Technologien die EEV Grenzwerte erreicht werden können, für die SULEV Werte jedoch noch eine deutliche Steigerung der Katalysatoreffektivität und eine Absenkung der Motorrohmissionen erforderlich ist (Abbildung 22).

4. Zusammenfassung

Abgasnachbehandlungskonzepte für Dieselmotoren, welche die niedrigsten z. Z. vorstellbaren europäischen und existierenden kalifornischen Grenzwertstufen (EEV, SULEV) erfüllen könnten, sind in ersten Ansätzen verfügbar. Die abschätzende Darstellung zeigt aber, dass dies heute noch ein sehr komplexes System mit grundlegenden Entwicklungsrisiken ist. Daher werden sowohl die Weiter- und Neuentwicklung der Nachbehandlungstechnologien wie auch die Verringerung der Rohemissionen eine entscheidende Rolle für die Eignung des Diesel-Motorkonzepts für den amerikanischen Einsatz spielen. Verbesserte Verbrennungsverfahren haben damit eine besondere Bedeutung, da hierdurch die erforderlichen Umsatzraten und damit der technische Nachbehandlungsaufwand entscheidend beeinflusst werden kann. Entsprechend könnte man die mögliche Erfüllung o. g. Grenzwerte auch unter der Voraussetzung heute verfügbarer Nachbehandlungstechnologien und erforderlicher maximaler Rohemissionen betrachten.

Diese Überlegung ist alleine deshalb anzustellen, weil der heute für den Diesel notwendige Aufwand in die kostenseitige Wettbewerbsfähigkeit zum Otto Lambda=1 Motoren und zum direkteinspritzenden Benzin Magermotor eingeht. Bereits zertifizierte SULEV Otto Lambda=1 Fahrzeuge zeigen relativ überschaubare komponentenseitigen Zusatzmaßnahmen gegenüber den EU4 Fahrzeugen. Der Vorteil liegt bekanntlich darin, dass alle Emissionen mit dem Drei-Wege Katalysator gleichzeitig behandelt werden können und die Partikelrohmissionen bereits unterhalb der EEV-/SULEV-Grenzwerte liegen.

Direkteinspritzende Otto Benzinmotoren sind zumindest bezüglich der Oxidations- und Stickoxidnachbehandlung zum Diesel vergleichbar. Der Vorteil dieser Motorentechnologie liegt jedoch darin, dass ein DI Magermotor auch stöchiometrisch betrieben werden kann, sodass die Kaltstart- und die Regenerationsproblematik einer NO_x Adsorber-Technologie vermieden werden kann.

Um den Dieselmotor erfolgreich in den USA vertreiben zu können, ist die Einhaltung der SULEV Grenzwerte das Benchmark. Bezüglich der HC, CO und PM Emissionen können mit heute bekannter und in Serie befindlicher Technologien die EEV und SULEV Grenzwerte eingehalten werden. Bezüglich der NO_x Effektivität ist jedoch noch ein deutlicher Entwicklungsfortschritt notwendig, um die SULEV NO_x Grenzwerte einzuhalten, sodass sich zukünftige Entwicklungen neben der kontinuierlichen Reduktion der Partikel auf die NO_x Reduktion konzentrieren werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] „EEV concept for light vehicles“; European Commission 2000-12-13
- [2] Schaper; K.; Konieczny, R.; Brück, R. ; „Diesel-Katalysator mit Hybrid-Trägerstruktur“; Haus der Technik Essen, Abgasnachbehandlung von Fahrzeugdieselmotoren 15. & 16. Juni 1999
- [3] Diesel Emission Control – Sulfur Effects (DECSE) Program; Final Report: Diesel Oxidation Catalysts and Lean-Nox Catalysts; June 2001
- [4] Dr. E. Jacob, Dipl.-Ing. A. Döring, MAN Nutzfahrzeuge AG, Nürnberg: „GD-KAT: Abgasnachbehandlungssystem zur simultanen Kohlenstoffpartikel-Oxidation und NO_x-Reduktion für Euro 4/5-Nfz-Dieselmotoren“; 21. Internationales Wiener Motorensymposium, VDI-Fortschritt Berichte, Reihe 12 (2000)
- [5] Meike Reizig, Rolf Brück, Roman Konieczny, Peter Treiber, Emitec GmbH: „New Approches to Catalyst Substrate Application for Diesel Engines“; SAE 2001-01-0189
- [6] Saroglia, Basso, Presti, Reizig, Stock; „Application of New Diesel Aftertreatment Strategies on a Production 1.9 L Common-Rail Turbocharged Engine“; SAE 2002-01-1313
- [7] Stein, H.J.; „Diesel Oxidation Catalysts for Commercial Vehicle Engines: Strategies on their Application for Controlling Particulate Emissions“; Appl. Catal. B Vol. 10 (1997), 69
- [8] Bloom R.L., Brunner N.R., Schroer S.C.: „Fiber-Wound Diesel Particulate Filter Durability. Experience with Metal-Based Additives“; SAE 970180, 1997
- [9] Cuttler W.A., Merkel G.A.: „A New High Temperature Ceramic Material for Diesel Particulate Filter Applications“, SAE 2000-01-2844, 2000
- [10] Pattas, K; Samaras, Z; Kyriakis, N; Manikas, T; Pistikopoulos, P; Seguelong, T; Rouveirrolles, P; Ccomparative Assessment of DPF's of Different Materials: A Case Study on a Euro I Light Duty Truck; SAE 2001-01-1287
- [11] Miwa, S., Abe, F.; Yamada, T.; Miyairi, Y.; „Diesel Particulate Filters Made of Newly Developed SiC“ SAE 2001- 01-0192
- [12] Hickman, DL; Ebener, S; Zink, U; „Reduktion der Partikelemissionen bei Diesel PKW und Nutzfahrzeugen“ Wien 2001, S. 267
- [13] R. Allansson, P. Blakeman, G. Chandler, C., Maloney, A. Walker, J. Thoss: „Einsatz von selbstregenerierenden Partikelfiltersystemen (CRT – Continuously Regenerating Trap) sowie SCRT (CRT + SCR – Selective Catalytic Reduction) zur Einhaltung künftiger Emissionsgrenzen“, 21. Internationales Wiener Motorensymposium, 04./05.05.2000, Fortschrittsberichte VDI Reihe 12, Nr. 420, 343-355
- [14] Reizig, M.; Brück,R.; Treiber, P.; Hodgson, J.; Breuer, J.; „Metal Supported Flow-Through Particulate Trap; A Non-Blocking Solution“; SAE 2001-01-1950
- [15] M. Aust, H.-P. Rabl, G. Wißler; Siemens AG: „SINOX – Ein Abgasnachbehandlungssystem auf SCR-Basis für Diesel-Pkw“; Haus der Technik, Essen, Tagung vom 15.6.1999
- [16] Gieshoff, J; Pfeifer, M.; Schäfer-Sindlinger, A; Spurrk, P C; Garr, G; Leprince, T; Crocker, M; „Advanced Urea SCR Catalysts for Automotive Applications“ SAE 2001-01-0514
- [17] Göbel, U., Kreuzer, Th., Lox, E.: „Moderne NO_x-Adsorber-Technologien: Grundlagen, Voraussetzungen, Erfahrungen“, Technischer Kongress VDA, 20.-21. September 1999, Frankfurt
- [18] Dahle, U., Beutel, T., a. Punke, A.: „Euro 4-Abgasnachbehandlungstechnologien für Magermotoren (Otto/Diesel)“, Technischer Kongress VDA, 20.-21. September 1999, Frankfurt
- [19] West, B. H.; Sluder, C. S; „NO_x Adsorber Performance in A Light-Duty Diesel Vehicle“; SAE 2000- 01-2912
- [20] Andrée Bergmann, Rolf Brück, Emitec GmbH: „Design Criteria of Catalyst Substrates for NO_x Adsorber Function“; SAE 2000-01-0504
- [21] HCCI Technologies; SAE special publications SP-1642 (2001)