

Kurzstudie

Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x-Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Baar

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

Univ.-Prof. Dr. techn. Christian Beidl

Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

15. Februar 2018

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Entwicklungsprozess
3. Grundlagen der Abgasnachbehandlung
4. Entwicklungsumfänge
5. Eingriff in das Motormanagement
6. Katalysatorheizung durch motorischen Betrieb / Wechselwirkungen
7. On-Board Diagnose
8. Sicherheit / Betriebssicherheit
9. NVH
10. NH₃-Durchbruch / Sperrkatalysator
11. Abgasgegendruckverhalten / Regelung
12. Elektrische Bordleistung für Heizung
13. Kabelsatz E/E
14. Reifegradabsicherung und Absicherungsbedarf
15. Kostenerstbewertung
16. Verbrauchs(-einflüsse)
17. Zusammenstellung verschiedener Nachrüstlösungen
18. Vorstellung der Fahrzeugbefundungen / Anhang
19. Zusammenfassung

Anhang

Fahrzeugbewertung

Befundungsergebnisse Volkswagen

Befundungsergebnisse BMW

Befundungsergebnisse Mercedes-Benz

Befundungsergebnisse Renault

Befundungsergebnisse Mercedes-Benz Transporter

1. Einleitung

Die vorliegende Studie erläutert zunächst die wesentlichen Randbedingungen und physikalisch-chemischen Zusammenhänge in vereinfachter Weise, die bekannt sein müssen, um die Umfänge einer Applikationsänderung eines dieselmotorischen Antriebstranges mitsamt Abgasnachbehandlung bewerten zu können.

Am Ende der Ausführungen findet sich eine Zusammenfassung und Gesamtbewertung der Thematik. Zudem wird kurz auf weiterführende Aspekte einer hardwareseitigen Nachrüstlösung eingegangen.

Im Anhang der Kurzstudie sind die detaillierten Analysen der befundeten 10 Fahrzeuge aufgeteilt auf 5 Fahrzeughersteller zusammengefasst. Diese Fahrzeugvarianten wurden seitens des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) vorgegeben und auch die Zurverfügungstellung wurde vom BMVI organisiert, wofür sich die Autoren dieser Studie bedanken.

Bei dieser Bewertung steht die prinzipielle Machbarkeit einer hardwareseitigen Umrüstung, insbesondere der Abgasnachbehandlung im Vordergrund. Schwerpunkt bildet hier insbesondere die Betrachtung einer EURO5 Ausführung, da diese in den betrachteten Fällen noch nicht mit einer NO_x-Abgasnachbehandlung ausgerüstet waren. Ebenfalls ist eine sehr kompakte Erstbewertung einer EURO4 Technologie, wiederum mit dem Fokus auf einer NO_x-Abgasnachbehandlungsnachrüstung aufgeführt.

Im Vordergrund steht bei dieser Studie also die Bewertung der Machbarkeit eines Nachrüstlösung mit einer Fokussierung auf die Emissionsstufe EURO5, wobei insbesondere für EURO5 einleitend folgende Sachverhalte diskutiert werden:

Generell wird es bei so gut wie jedem Fahrzeugtyp ohne NO_x-Abgasnachbehandlung möglich sein, durch irgendwie geartete Maßnahmen eine Absenkung der Stickoxidemissionen unterhalb eines Niveaus zu erzielen, das mit Hilfe eines Softwareupdates erzielt werden kann. Dies kann insbesondere durch die Nachrüstung eines SCR-Katalysators erreicht werden, der "in irgendeiner Art und Weise in irgendeiner Bauteilgröße" mitsamt der benötigten fahrzeugseitigen Infrastruktur verbaut werden kann. Die entscheidende Frage ist jedoch nicht diejenige nach der prinzipiellen Möglichkeit, sondern die nach dem Aufwand. Dieser Aufwand ist eine Folge nicht zu diskutierender Entwicklungsprozesse. Auf diese wird in einem eigenen Absatz eingegangen. Dieser Aufwand kann fahrzeugabhängig unter Umständen in der Größenordnung eines Entwicklungsjahres liegen, er kann jedoch auch in der Größenordnung einer kompletten Neuentwicklung liegen oder den Entwicklungsaufwand einer Neuentwicklung deutlich übertreffen.

2. Entwicklungsprozess

Die Einhaltung von dokumentierten und in ihren Aufgaben klar beschriebenen Entwicklungsprozessen ist die unabdingbare Voraussetzung für die Validierung und Freigabe von Fahrzeugen und ihren Teilsystemen. Ohne diese Freigabe ist keine Zulassung und Markteinführung möglich, innerhalb der Unternehmen ist sie Voraussetzung für Produktionsanlauf und der gesamten Logistik.

Für ein Abgassystem gelten dabei neben der Erfüllung von Emissionszielen sowohl sicherheitskritische, funktionale, als auch Dauerhaltbarkeitsanforderungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit PKW ein Volumenmarkt bedient werden muss, in dem der Endnutzer i.A. neben der Fahrberechtigung keine technische Qualifikation aufweist, sowie völlig unbekannte Fahrprofile unter unterschiedlichsten Randbedingungen auftreten können.

Die folgende Aufstellung gibt einen Überblick über die notwendigen Entwicklungsschritte. Nicht berücksichtigt sind in dieser Auflistung Entwicklungen für die Komponenten eines SCR-Systems inklusiv Dosing System, Tank, Heizung, etc. Hier wird davon ausgegangen, dass dieses bereits als vergleichbares Derivat entwickelt ist. Ebenfalls nicht in der Zeitleiste berücksichtigt wurden Aufwände für die Software-Funktions-Entwicklung in Steuergeräten. Entsprechende Softwarefunktionen für SCR-Heizbetrieb, Dosingstrategie, etc. werden ebenfalls vorausgesetzt!

Der Entwicklungsprozess für eine SCR-Entwicklung und deren Kalibrierung ist ein Prozess, der aus unterschiedlichen Phasen besteht:

Konzeptphase:

- a. Konzeptionierung
- b. konstruktive Integration
- c. Prototypenbeschaffung

Für die Dauer der Konzeptphase sind 9 – 12 Monate zu berücksichtigen.

Applikationsphase:

- d. Gleichverteilungsoptimierung
- e. Basisapplikation und Beschichtung
- f. Adaption der Motor-ECU zur Berücksichtigung der Rückwirkungen
- g. stationäre Abstimmung der Temperatur- und Speichermodelle
- h. Kabelbaum und Sensorintegration
- i. Abstimmung der Regler und Effizienzmodelle für den dynamischen Motorbetrieb
- j. Optimierung Alterungsmodelle
- k. Kalibrierung SCR unter anormalen Betriebsbedingungen z.B. DPF-Regeneration

Für die Dauer der überwiegend experimentellen Applikationsphase sind 6 – 9 Monate zu berücksichtigen.

Fahrzeugversuch:

- l. Adaption Fahrzeug (Katalysator, Dosing Unit, Heizung, Tank, etc.)
- m. Validierung der Modelle

- n. RDE-Optimierung
- o. OBD-Kalibrierung und Validierung
- p. Grenzwertversuche (Dosing Frequenz, Temperatur, Lastprofile, etc.)
- q. Applikationsdauerlauf
- r. Flottendauerlauf
- s. Festlegung der Wartungsintervalle

Für die Dauer des Fahrversuchs sind 8 – 12 Monate zu berücksichtigen.

Die Entwicklung einer SCR-Abgasreinigung für ein bestimmtes Fahrzeugmodell nimmt daher eine Zeitspanne von 2-3 Jahren in Anspruch.

Hierbei wird vorausgesetzt, dass eine Vielzahl von Einzelaufgaben parallel bearbeitet werden, um den straffen Entwicklungsplan, wie in Abbildung 1 dargestellt, einhalten zu können.

Parallel zu den oben aufgeführten Entwicklungsschritten laufen Untersuchungen zur konstruktiven Optimierung der Bauteile wie z.B. Schwingungstest / NVH, Betriebsfestigkeitsuntersuchungen und Hot Shaker Tests. Diese sind im Rahmen der Entwicklungslinie nicht explizit aufgeführt.

Die beschriebene Vorgehensweise basiert auf der Sicherheits- und Qualitätsansprüchen der Fahrzeugindustrie. Nur unter diesen Randbedingungen ist es möglich, für die Abgasreinigung bzw. für die hinsichtlich einer eventuellen Rückwirkung betroffenen Komponenten die entsprechende Verantwortung hinsichtlich Gesetzeskonformität, Langzeitverhalten, Sicherheitsansprüchen und Gewährleistung zu übernehmen.

Folgende über die SCR Komponenten hinausgehende Eigenschaften sind in diesem Zusammenhang vor der Freigabe durch den Hersteller abzusichern:

Temperaturverhalten	Einfluß auf die Massenströme
Dosierfreigaben	Rückwirkung auf die Motorfunktionen
Verhalten in besonderen Situationen	Rückwirkung auf die Kalibrierung
Wartungsintervalle	Alterungsverhalten

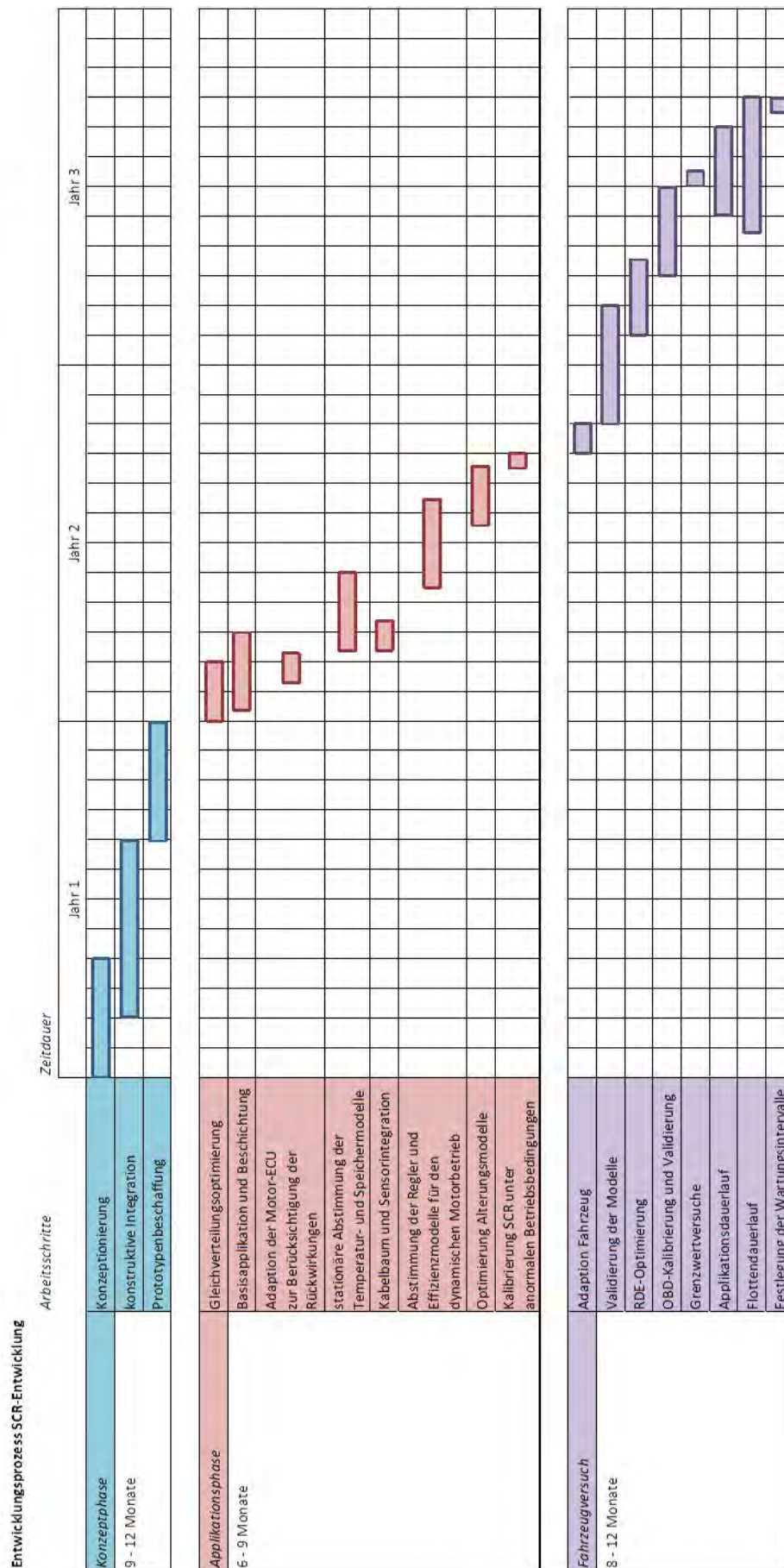


Abbildung 1: Entwicklungsprozess SCR-Entwicklung

Insbesondere der Absicherungsprozess für Fahrzeug und Fertigung ist langwierig. In der Serienentwicklung eines OEMs besteht dieser exemplarisch aus den folgenden Einzelaktivitäten:

- a. 2x Sommererprobung (1x mit Konzeptbauteil / 1x mit finaler Auslegung)
- b. 2x Wintererprobung
- c. Absicherung / Dauerlauf am Motorprüfstand und im Fahrzeug
- d. Applikation für den geforderten Kennfeld-/Temperaturbereich
- e. Industrialisierung / Optimierung der Serienfertigung
- f. Zulassungsprozess

3. Grundlagen der Abgasnachbehandlung

Die beiden entscheidenden Elemente der Abgasnachbehandlung dieselmotorischer Anwendungen sind der Partikelfilter (DPF) als auch die NO_x -Abgasnachbehandlung. Die wesentlichen Herausforderungen beider Systeme werden in diesem Absatz erläutert.

Dieselpartikelfilter DPF

Der Dieselpartikelfilter wird in Europa seit Einführung der Emissionsstufe EURO4 bei einer Vielzahl von PKW-Dieselmotoren verbaut. Bei EURO3 waren nur wenige Fahrzeuge mit einem DPF ausgerüstet, da die Technologie sicher noch nicht die benötigte Reife aufgewiesen hat. Der mit EURO4 vorgeschriebene NEFZ Partikelgrenzwert (25 mg/km) erlaubte bei einer sehr guten Brennverfahrensabstimmung eine Zielerfüllung ohne DPF, weshalb der Gesetzgeber eine weitere Verschärfung des Partikelgrenzwertes mit EURO5 realisierte (EURO5a: 5 mg/km, EURO5b: Partikelanzahlgrenzwert $6 \cdot 10^{11}$ #/km). Mit EURO5 mussten somit alle PKW-Dieselmotoren mit einem DPF ausgerüstet werden.

Die wesentliche Herausforderung bei der DPF Entwicklung ist nicht die Filtration der Partikel! Dies wird durch die Substratgeometrie des DPF realisiert. Hierbei strömen die Partikel, mit dem Abgasstrom kommend, in die einzelnen Kanäle des DPF ein (Abbildung 2). Durch den Verschluss des Kanalaustritts, der in Strömungsrichtung am Ende des DPF-Kanals liegt, muss der gesamte Abgasmassenstrom durch die poröse Filterwand strömen. Hierbei werden die Partikel, jedoch auch die Aschebestandteile des Abgases in den DPF-Kanälen abgesondert. Die wesentlichen Herausforderungen bei der dieselmotorischen DPF Entwicklung sind daher:

- Vermeidung einer zu hohen Partikelbeladung (Gefahr der Partikelfilterzerstörung, Gefahr des DPF-Durchbrands, Gefahr durch Abgasgegendruckanstieg mit Auswirkungen hinsichtlich Verbrauch, Leistungsverlust, Fahrzeugfahrbarkeit)
- Vermeidung einer zu hohen Aschebeladung des DPF (Gefahr durch Abgasgegendruckanstieg -> Verbrauch, Leistungsverlust, Fahrbarkeit).

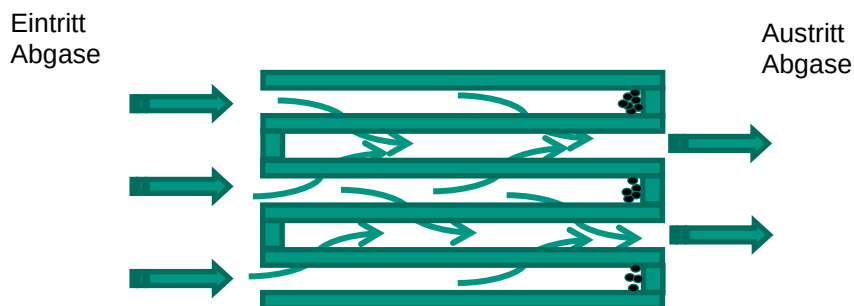
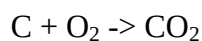


Abbildung 2: Prinzipskizze eines Dieselpartikelfilters

Aus Betriebssicherheitsgründen ist die Vermeidung einer zu hohen Partikelbelastung des DPF die noch wichtigere Herausforderung, da ein unkontrollierter Abbrand der Partikel im DPF im Extremfall bis zu einem Fahrzeugbrand mit nicht mehr kontrollierbaren Konsequenzen führen kann. Dies muss vermieden werden! Es sind drei technische Lösungsansätze zielführend, um die Partikelbelastung unterhalb eines kritischen Niveaus zu halten. Dieses Beladungsniveau hängt wiederum vom DPF-Substratmaterial ab. Ein charakteristischer Beladungsgrenzwert liegt in der Größenordnung von 5 Gramm Ruß pro Liter Filtervolumen für Cordierit, für Siliciumkarbit SIC liegt dieser Wert etwas höher.

Der erste technische Ansatz ist die aktive DPF-Regeneration. Über eine Zeitdauer von etwa 20 bis 30 Minuten wird am Partikelfilter ein Temperaturniveau von etwa 600°C eingestellt. Bei diesem Temperaturniveau reagieren die Partikel, die wesentlich aus Kohlenstoff bestehen, mit dem Restsauerstoff im Abgas gemäß der vereinfachten Reaktion



Diese aktive Partikelfilterregeneration ist bei allen bekannten Dieselfahrzeugen mit DPF hinterlegt. In den Kanälen des DPF können, abhängig von der Raumgeschwindigkeit und der Sauerstoffkonzentration Temperaturen bis oberhalb von 800°C durch die Kohlenstoffoxidation vorliegen. Eine Bauteilschädigung durch thermischen Einfluss ist unbedingt zu vermeiden.

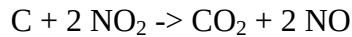
Der Vollständigkeit halber wird darauf hingewiesen, dass sich der angelagerte Ruß hinsichtlich seiner Reaktivität unterscheiden kann. Dies stellt eine weitere Herausforderung dar (Abhängigkeit der Partikelreaktivität vom Hardwarestand oder vom Softwarestand). Die große technische Herausforderung ist jedoch die Sicherstellung einer Abgastemperatur von 600°C. Da die typische Abgastemperatur bei einem innerstädtischen Fahrzeugbetrieb unterhalb von 200°C liegt, muss der gesamte Motorbetrieb mit weitreichenden Konsequenzen neu abgestimmt werden durch mehrere Maßnahmen, die wiederum weitreichende Folgen bewirken.

- Neue Strategie der Einspritzung mit einer deutlichen Spätverstellung der Verbrennungslage in Richtung der Expansionsphase mit Einfluss hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, NO_x-Emission, PM-Emission etc.
- Reduzierung des Luftmassenstroms durch den Motor, beispielsweise durch eine Androsselung mit einem Eingriff in das gesamte Air-Management des Motors (Strategie Wastegate, Drallklappe, variable Turbinengeometrie VTG) mit Einfluss hinsichtlich Kraftstoffverbrauch
- Innermotorische Dosierung von zusätzlichem Kraftstoff, der am - dem DPF vorgeschalteten - Oxidationskatalysator, ausgehend von mindestens etwa 300°C exotherm reagiert, also verbrennt, und so eine Temperatur von 600°C im DPF sicherstellt. Diese sogenannte innermotorische HC-Dosierung bedingt typischerweise das Schließen des Hochdruck-AGR-Ventils, da in Kombination mit einer Kohlenwasserstoffbelastung unbedingt zu vermeidende Versottungs- und Verlackungsphänomene so verhindert werden.

Auf die zweite technische Maßnahme zur Vermeidung einer zu hohen DPF-Rußbelastung wird nur sehr bündig eingegangen. Mit Hilfe eines Additivs kann die Reaktivität des Rußes verbessert werden, so dass dieser bereits bei Temperaturen um 300°C oxidiert werden

kann. Peugeot hat das Additiv EolysTM bereits bei der Emissionsstufe EURO3 erfolgreich zum Einsatz gebracht. Dieses Additiv enthält Cerin. Da Cerin jedoch toxisch ist, scheidet dieser Lösungsweg, trotz seiner technischen Attraktivität, aus.

Der dritte und entscheidende Ansatz ist die passive DPF-Regeneration mit Hilfe von NO₂. Da vom Motor her kommend der NO₂-Anteil im Dieselaabgas nur zwischen 5 bis 20 Prozent liegt, muss hierfür zunächst am Oxidationskatalysator der NO₂-Anteil im Abgas deutlich erhöht werden. Werte bis 50 Prozent NO₂-Anteil im Abgas werden, abhängig vom Oxidationskatalysator erreicht. Die wesentliche Reaktion im nachgelagerten DPF lautet nun



Die entscheidende Herausforderung ist bei der robusten Etablierung der Kohlenstoffoxi-dation mit Hilfe von NO₂ die Darstellung eines geeigneten NO_x/Kohlenstoff-Verhältnisses im Abgasmassenstrom vor dem DPF. Gemäß der Stöchiometrie wird theo-retisch ein Faktor 7,67 des Massenverhältnisses NO₂/Kohlenstoff benötigt, um keine zu-sätzliche Rußablagerung im DPF zu erzielen. Ein etwa 8-fach erhöhter NO₂-Massenstrom im Verhältnis zu dem Partikelmassenstrom würde die ankommende Partikel im Partikelfilter also mit Hilfe des NO₂-Anteils im Abgas sofort zu Kohlendioxid oxidie-ren. In der Realität zeigt sich, dass abhängig von der Arbeitsweise des Oxidationskataly-sators (Edelmetallgehalt, Alterungseffekte, Raumgeschwindigkeit, NO₂ Anteil im Abgas) mindestens der Faktor 20 NO_x/Ruß benötigt wird, eher der Faktor 40 bis 100, um einen unerwünschten Rußaufbau im DPF zu vermeiden. Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, dass die Etablierung der Partikeloxidation von der Reaktivität des ankommenden Rußes abhängig ist. Dies stellt eine weitere Herausforde-rung bei der Applikation dar.

Hilfreich ist also die Existenz von NO₂ im DPF zur Oxidation des angelagerten Rußes im Filter! Zwei Kernaussagen sind deshalb die Konsequenz aus obenstehenden Ausführun-gen zum DPF:

1. Das Motorsteuergerät muss zu jedem Zeitpunkt die genaue Rußbeladung des DPF kennen, um unkontrollierte Effekte, die im Extremfall bis zu einem Fahr-zeugbrand führen können, zu vermeiden! Auf jeden Fall muss eine thermisch be-dingte Substratschädigung vermieden werden. Diese Partikelfilterbeladungs-mo-delle sind das Ergebnis von langwierigen Entwicklungs- und Applikationsarbeiten und Grundlage einer DPF-Entwicklung.
2. Jede Änderung an den motorischen NO_x oder Partikelemissionen führt zu einer entwicklungsseitigen Notwendigkeit, die Partikelfilterbeladungsmodelle zu über-prüfen und eventuell neu zu überarbeiten! Dies kann einen großen Entwicklungs-aufwand zur Folge haben.

NO_x-Abgasnachbehandlung

Hauptfragestellung dieser Studie ist die Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen. Daher werden in diesem Absatz kurz die wesentlichen Herausforderungen von Abgasnachbehandlungssystemen (AGN) erläutert. Die AGN zur Stickoxidreduzierung wird benötigt, wenn die innermotorisch gebildeten NO_x-Emissionen nicht weiter reduziert werden können. Im zu vorigen Kapitel ist bereits ausgeführt worden, dass es bei dem Einsatz eines DPF einen Zwang gibt, eine genügend hohe NO₂-Konzentration im Abgas zu realisieren. Daher können erst mit einer nachgeschalteten NO_x-AGN die NO_x-Emissionen weiter reduziert werden, ohne den Partikelfilter entscheidend nachteilig zu beeinflussen. Wichtige innermotorische Maßnahmen zur NO_x-Reduzierung sind im Wesentlichen eine Reduzierung der Sauerstoffkonzentration im Brennraum oder eine Reduzierung der Verbrennungstemperatur. Dies kann durch eine Vielzahl von Maßnahmen erreicht werden, beispielsweise:

- Spätere Verbrennungslage durch eine entsprechende Einspritzstrategie (Verbrauch/CO₂-Anstieg)
- Reduzierung des Einspritzdruckes (Anstieg der Rußemissionen)
- Erhöhung des Anteils von CO₂, H₂O im Brennraum durch gekühlte Abgasrückführung (Kühlsystem, Auslegung des Air-Managements)
- Reduzierung des Sauerstoffanteils im Brennraum durch Abgasrückführung oder Drosselung (Verbrauch/CO₂-Anstieg)
- Anpassung des Restgasgehaltes im Brennraum, beispielsweise durch Anpassung des Abgasgegendruckes (VTG-Position, Wastegate-Position)
- Beeinflussung des Strömungsniveaus im Zylinder durch Reduzierung der turbulenten kinetischen Energie (Öffnen der Drallklappe)
- Reduzierung der Ansauglufttemperatur durch verbesserte Ladeluftkühlung

Mit all diesen Stellhebeln ist man jedoch limitiert, so dass für ein niedriges NO_x-Emissionsniveau eine NO_x-AGN vonnöten ist. Hier gibt es zwei Systeme, den NO_x-Speicherkatalysator oder das selektive katalytische System (SCR).

Der NO_x-Speicherkatalysator (NSK) ist als Nachrüstlösung nicht geeignet!

Beim NSK muss zyklisch, abhängig vom Fahrzustand etwa alle 30s bis 500s, ein "Fettsprung" appliziert werden. Für einen Zeitraum von wenigen Sekunden muss der Motor unter Luftmangelbetrieb arbeiten, um mit der resultierenden Abgaszusammensetzung die in Form von Bariumnitrat im NSK eingelagerten Stickstoffverbindungen wieder aus dem NSK auszutreiben. Der Fettsprung ist derart in die Betriebsstrategie integriert, dass eine Nachrüstung eine rein theoretische Maßnahme darstellt. Ein stabiler Motorbetrieb bei einem nachgerüsteten Motor ist nicht gewährleistet, zahlreiche erdenkliche Komplikationen sind gegeben.

Es verbleibt als Alternative das selektive katalytische System SCR, das typischerweise mit einer Betankung durch die wässrige Harnstofflösung Adblue® realisiert wird. Die Alternative Amminex, die NH₃ gasförmig einbläst, wird ebenfalls kurz diskutiert. Prinzipiell ist die SCR-Technologie anspruchsvoll, nach etwa dreizehn Jahren Felderfahrung im LKW-Bereich liegen jedoch zahlreiche Erfahrungswerte vor.

Abbildung 3 zeigt die prinzipielle Funktionsweise des SCR-Systems. Hierbei wird eine Harnstoff-Lösung AdBlue in den Abgasstrang eingespritzt. Nach Verdampfung der Lösung finden zwei chemische Reaktionen (Thermolyse und Hydrolyse) statt, welche aus Harnstoff Ammoniak bilden. Mit dem generierten Ammoniak NH_3 können die Stickoxide im Katalysator ab ca. 180–200°C signifikant reduziert werden. Auf die hier existierenden Reduktionspfade der Stickoxide NO_x (Standardreaktion, schnelle Reaktion) wird im Absatz "NH₃ Durchbruch" eingegangen.

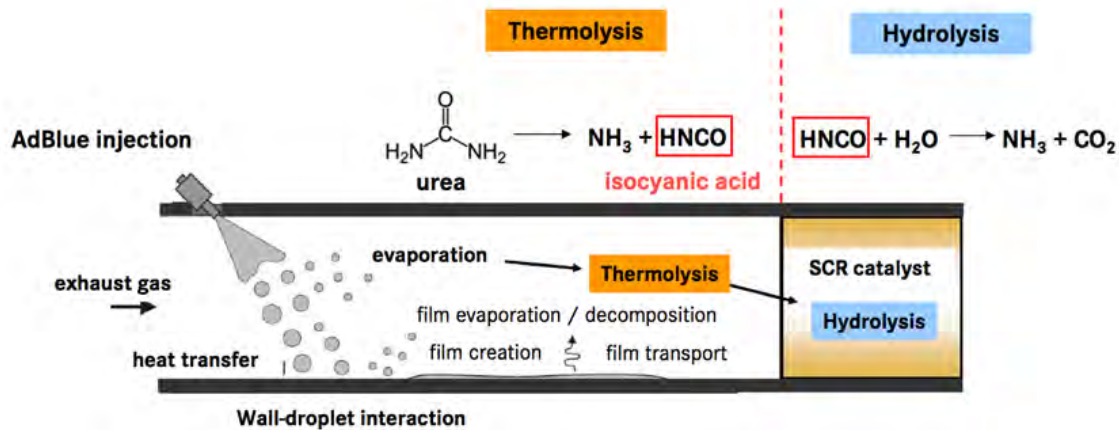


Abbildung 3: SCR-System, chemische Reaktionen zur Ammoniakaufbereitung

Thermolyse und Hydrolyse des Abgases sind also sehr temperaturabhängig. Vor allem unterhalb von circa 180°C Abgastemperatur bilden sich unerwünschte korrosive Ablagerungen (Abbildung 3). Diese Ablagerungsbildung ist per Applikation unbedingt zu vermeiden, jedoch tritt sie in vielen Anwendungen über der Laufzeit auf. Abbildung 3 zeigt nun deutliche Ablagerungen. Diese resultieren aus einem Laborversuch bei Temperaturen unterhalb von 180°C. In der Realität können diese Ablagerungen aus Stickstoffverbindungen wie Biuret, Cyanursäure, Mellamin, Ammelin oder Ammelid die Funktion des SCR-Systems sehr beeinträchtigen und sogar einen Motorstillstand bedingen.



Abbildung 4: Ablagerungen durch AdBlue-Einspritzung bei Temperaturen unterhalb von 180°C (Quelle: Börnhorst, Deutschmann, ITCP, KIT)

Wichtig ist zudem die Tatsache, dass sich am SCR-Katalysator Ammoniak NH_3 einlagern kann. Es gibt also eine NH_3 -Einspeicherfähigkeit. Daher muss das Steuergerät auch die aktuelle Einspeicherung von Ammoniak NH_3 im SCR-Katalysator kennen, ähnlich wie beim Partikelfilter DPF die Partikelbeladung. Auch ohne aktive Einspritzung von Adblue ist eine Reduktion am SCR-Katalysator möglich, wenn dort NH_3 eingelagert ist. Dies ist beispielsweise auch bei der Vermeidung des unerwünschten NH_3 Durchbruchs bei einer Überdosierung von Adblue wichtig.

Entscheidend für das Verständnis eines SCR-Systems ist also die Tatsache, dass eine Abgastemperatur/Systemtemperatur oberhalb von 180°C-200°C vorliegen muss, um Adblue einspritzen zu dürfen.

Typische Abgastemperaturen bei einem dieselmotorischen Betrieb können jedoch deutlich unterhalb von 180°C liegen, weshalb eine zusätzliche Erwärmung des Abgassystems notwendig ist. Die unbefriedigende Auslegung der PKW-Hersteller bei der Ersteinführung des SCR-Systems war im Wesentlichen, dass man den moderaten Mehrverbrauch durch eine Heizung (Realisierung durch eine Einspritzstrategie mit einer späteren Verbrennungslage in Kombination mit einer Luftmassenreduktion, beispielsweise durch Androsselung) gescheut hat. Dies wird aktuell bei den EURO6 Fahrzeugen mit einem Softwareupdate korrigiert und führt mit geringen Verbrauchsnachteilen zu einer deutlichen NO_x -Reduzierung von etwa 50 bis 90 Prozent. Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass zumindest bei EURO6 Fahrzeugen mit einem "kalten" Unterboden SCR Katalysator eine Abhängigkeit der SCR-Funktionalität von der Außentemperatur gegeben ist.

Eine SCR-Nachrüstlösung, z.B. eines EURO5 Fahrzeuges, macht prinzipiell erst dann Sinn, wenn auch für diese Lösung "Heizmaßnahmen des SCR-Systems" existieren. Ohne diese Heizmaßnahmen können die NO_x -Emissionen bei über 700 bis 1000 mg/km liegen. Mit diesen Heizmaßnahmen ist ein NO_x -Zielniveau im Bereich von 100 bis 300 mg/km mit einem Unterboden SCR-System realistisch.

Heizmaßnahmen, typischerweise durch Maßnahmen der Einspritzung oder des Air-Managements realisiert, beeinflussen wiederum sowohl die Stickoxid- als auch die Partikelemissionen. Sowohl Partikelfilterbeladungsmodelle als auch das NH_3 -Einspeicherverhalten müssen überprüft werden.

RDE-fähige EURO6_{dtemp} Fahrzeuge werden mit wenigen Ausnahmen einen motornahen SCR-Katalysator haben, da dort die Abgastemperatur deutlich erhöht ist. Dies stellt einen komplett neuen Technologiestand dar, da diese Technologie typischerweise aus Bau- raumgründen erst durch eine Kombination eines Partikelfilters mit einer SCR-Beschichtung (SDPF-System) realisiert wird. Neue Technologieherausforderungen sind für diese Abgasnachbehandlung gegeben (deutlich schnellerer Rußaufbau im DPF durch die reduzierten NO_x -Emissionen im DPF).

4. Entwicklungsumfänge

Hinsichtlich anzuwendender Entwicklungsumfänge müssen klare Rahmenbedingungen von Beginn an gegeben sein. Folgende drei Fälle sind dabei grundsätzlich zu unterscheiden:

1. Einbau eines autarken Nachrüstsystems durch ein Nachrüstunternehmen

Beschreibung: das System muss vollständig autark sein und darf keine Wechselwirkung/Rückwirkung auf Funktionalität und Betriebssicherheit des Fahrzeugs und seine (zertifizierten) Eigenschaften haben.

Die Entwicklung, die Einführung in den Markt und die anschließende Gewährleistung liegen in der Verantwortung des Nachrüstunternehmens. Die Spezifikationen des OEMs an der Einbauschchnittstelle sind einzuhalten.

Eine behördliche Freigabe ist erforderlich.

Im gegenständlichen Fall kommt entsprechend dem Stand der Technik nur ein Unterboden SCR System in Frage. Neben dem SCR Katalysator müssen der Adblue Tank, die Aufbereitung, die NH_3 - und die Temperatursensorik sowie ein eigenes Steuergerät vorhanden sein. Ebenfalls unverzichtbar ist ein NH_3 Sperrkatalysator. Das Auslesen von Fahrzeugdaten ist nur eingeschränkt über die OBD Schnittstelle möglich. Damit kommt nur ein gesteuertes System in Frage (*Erläuterung s.u.). Anzeigen, Warnungen, Überwachung und Absicherung gegen Missbrauch müssen separat entwickelt und für den Fahrzeugeinbau zur Verfügung gestellt werden.

Weiterhin ist nur eine minimale Erhöhung des Abgasgedrucks zulässig, da sonst ein umfassender Eingriff in die Motorsteuerung erforderlich wäre. (=> Widerspruch zu Forderung 1). Das bedeutet, dass eine Gegendruckerhöhung durch den SCR Katalysator durch Eingriff in andere Komponenten – z.B. Schalldämpfer – kompensiert werden müsste. Im Entwicklungsverlauf müssen damit die Geräuschemission und das Betriebsschwingungsverhalten entwickelt und nachgewiesen werden.

Ebenfalls nicht zulässig sind Eingriffe in das elektrische Bordnetz mit höheren elektrischen Strömen, da dies wiederum fahrzeugseitige Entwicklung und Neuapplikation erfordern würde.

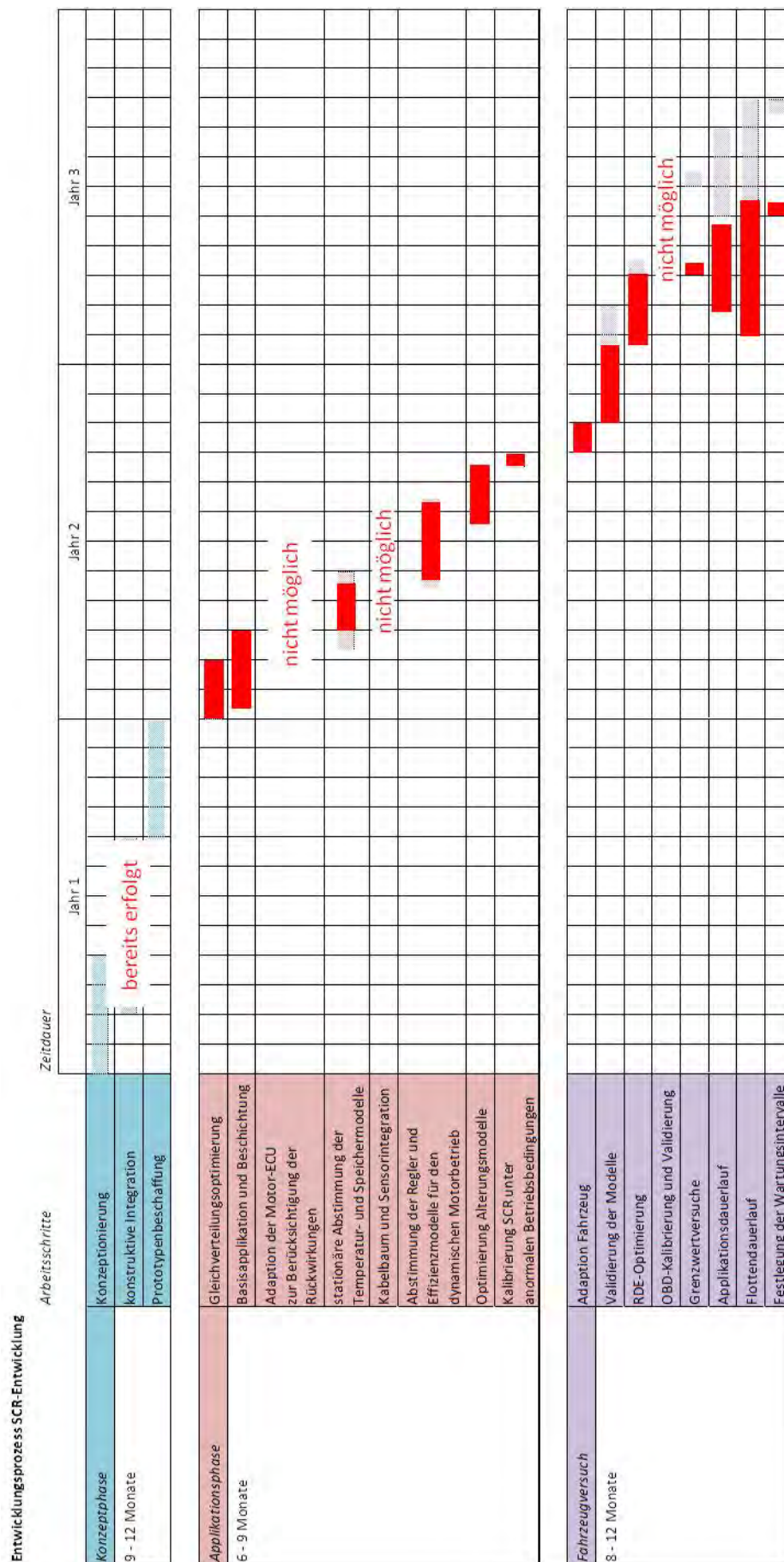
Hinsichtlich der NO_x Minderung ist ein derartiges System Prinzip bedingt eingeschränkt wirksam, da eine sehr konservative Auslegung der Eindosierung notwendig ist, um Funktionsstörungen und NH_3 -Durchbrüche sicher zu vermeiden. Es muss davon ausgegangen werden, dass gerade im Niedriglastbetrieb (Stadtfahrt) nur eine geringe Wirksamkeit gegeben ist. Motorseitige Heizmassnahmen für den SCR Katalysator sind nicht möglich. Zudem sind die erreichbaren Minderungsraten stark fahrzeugabhängig. (Gewicht, Eigenschaften der anderen AGN Komponenten – z.B. NO_2 Bildung im DOC, Systeme mit LNT besonders kritisch - etc.)

Derzeit ist kein System bekannt, dass die oben genannten Anforderungen erfüllt. Betrachtet man beispielweise die von Fa. Twintec vorgestellte NH_3 -Generator Technologie, so ist folgendes zu berücksichtigen: Es sind zwei Ausführungen des Systems bekannt. Bei einer Variante wird ein Teils des Abgasmassenstrom vor Turbolader entnommen. Dies erfordert eine Applikationsänderung des Motors und hat zudem Einfluss auf die Partikelemission. In Erkenntnis dieser Notwendigkeit wurde eine zweite Variante entwickelt, bei der ein Abgasteilstrom nach der Turbine entnommen wird. Allerdings ist hier die Darstellung einer notwendigen Druckdifferenz – welche auch die Regelung der Durchflussmenge beeinflusst - zwischen dem Ein- und Ausgang des Bypasses deutlich empfindlicher, als bei der ersten Lösung.

In beiden Fällen ist eine Heizung des Abgases notwendig. Für die Adblue Aufheizung und den Betrieb des Generators sind wegen des 12Volt Bordnetzes relativ hohe elektrische Ströme erforderlich mit Auswirkungen auf das elektrische Bordnetz. I.d.R. erforderliche motorseitige Katalysatorheizmaßnahmen erfordern wiederum eine Neuapplikation des Fahrzeugs und sind damit ausschließlich Sache des Herstellers.

Ein Vergleich mit Nachrüstlösungen mit Stadtbussen ist nicht zielführend, da dort andere thermodynamische Randbedingungen vorliegen, insbesondere bedingt durch eine andere Motorbetriebsstrategie dieser Fahrzeuge.

Damit ist die Anforderung eines autarken Systems nicht gegeben, eine entsprechende Entwicklung wäre erforderlich. Unter der Vorgabe der Erfüllung gleicher Sicherheits- und Qualitätsanforderungen wie beim OEM würde der Entwicklungsprozess ca. 1,5 Jahre für ein einzelnes Modell dauern, wie aus der Abbildung 5 ersichtlich.



Es ist ebenso denkbar, dass ein Nachrüster gemeinsam mit einem OEM ein derartiges Nachrüstsystem entwickelt. In diesem Falle kommen die OEM-Prozesse zur Anwendung.

2. Systemlösung durch den OEM, wenn Fahrzeugvarianten mit SCR System als Sonderausstattung verfügbar waren

Beschreibung: In diesem Fall entwickelt der OEM eine vollständige Systemlösung und übernimmt damit die Freigabe- und Markteinführungsverantwortung sowie die anschließende Gewährleistung. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass sich bereits zertifizierte Eigenschaften (z.B. CO₂) nicht ändern und für den Kunden keine Änderung der Nutzungseigenschaften gegeben sind, bzw. er solche klar kommuniziert bekommt und diese akzeptiert. (z.B. Nachfüllen von Adblue, Änderungen des Kraftstoffverbrauchs in bestimmten Betriebssituationen durch Katheizmassnahmen)

Ein beschleunigter Entwicklungsprozess ist dann möglich, wenn die technische Lösung mit einem entsprechenden Vorentwicklungsstand verfügbar ist. Dies trifft beispielsweise für Fahrzeuge zu, die als vorgezogene EU6 Variante mit SCR verfügbar waren. (Kompletter Kabelbaum, alle AGN Komponenten, Tank mit Füll- und Heizeinrichtung, Dosiersystem, Sensoren, sowie die vollständige Applikation)

Für die Umsetzung ist entscheidend, dass alle notwendigen Komponenten verfügbar sind, und der vorgesehene Bauraum nicht anderweitig verwendet wurde.

In diesem Fall kann der Entwicklungsprozess mit einem bekannten Technologiestand gestartet werden und erfordert im Wesentlichen die Applikation und das Durchlaufen der Absicherungs- und Freigabeprozesse. (s. Abbildung 1)

Dafür ist ein Zeitraum von 1 – 1,5 Jahren anzusetzen, mit anschließender Vorbereitung der Markteinführung.

Damit besteht technisch die Möglichkeit für die geeigneten EU5 Fahrzeuge (Anm.: eingeschränkte Teilmenge) eine Nachrüstlösung innerhalb von 2 Jahren im Markt verfügbar zu machen.

3. Systemlösung durch den OEM, allgemeiner Fall

Beschreibung: wie in Fall 2., jedoch ist kein Vorentwicklungsstand verfügbar.

In diesem Fall ist eine Einzelfallprüfung der technischen Machbarkeit erforderlich. Ist das Fahrzeug grundsätzlich für die Nachrüstung mit einem SCR System geeignet, muss ein nahezu vollständiger Entwicklungsprozess durchlaufen werden. Unter der Annahme, dass geeignete Systemkomponenten aus aktuellen Entwicklungen kurzfristig verfügbar gemacht werden können, ist dafür eine Durchlaufzeit von 3 Jahren anzusetzen.

Komponenten eines Nachrüsters können ggf. funktionale Vorteile bieten, führen aber nicht zu einer Reduktion der Entwicklungszeit.

An dieser Stelle sind zwei Anmerkungen erforderlich, die in eine kritische Betrachtung einfließen sollten

- Eine derartige Nachrüstung kann neben dem hohen Entwicklungsaufwand mit sehr hohen Produktkosten verbunden sein, wenn beispielsweise die Leistungsfähigkeit des Motorsteuergerätes nicht ausreicht und getauscht werden muss.
- eine große Zahl von in dieser Aufgabenstellung qualifizierten Entwicklungsingenieuren wäre mit dieser Tätigkeit gebunden und steht dann nicht für zukunftsorientierte Neuentwicklungen zur Verfügung

Zusätzlich zu berücksichtigen ist der Zeitbedarf für die Beschaffung von Teilen; dieser kann mehrere Monate betragen.

Im Vergleich der unterschiedlichen Rahmenbedingungen ergeben sich abweichende Entwicklungsumfänge, die durch den Nachrüster bzw. den OEM geleistet werden müssen. Basierend auf dem in Abbildung 1 dargestellten Entwicklungsprozess resultieren hieraus im Vergleich die in der folgenden Abbildung 6 gezeigten und bewerteten Einzelumfänge.

	autarke Nachrüstsysteme	OEM-System bereits vorhanden-	OEM-System muß entwickelt werde -
Systemkonzept	vorhanden	vorhanden	nicht vorhanden
Performance DOC	nicht ausreichend	Austausch DOC	Entwicklungsbedarf
Amomoniak-aufbereitung	vorhanden / zu adaptieren	vorhanden	Entwicklungsbedarf
SCR-Katalysator	muß beim OEM vorhanden sein	vorhanden	Entwicklungsbedarf
NH3-Sperrkat	nicht vorhanden	nicht notwendig	nicht notwendig
konstruktive Integration	aufwändig	vorhanden	nicht vorhanden
Sensorsignale Kabelbaum	begrenzt	Austausch	nicht vorhanden
Anbindung an ECU	nicht möglich	Austausch ECU	nicht vorhanden
Basisapplikation	vorhanden	vorhanden	teilw. vorhanden
Fahrzeugspezifische Optimierung	nicht vorgesehen	vorhanden	nicht vorhanden
ECU-Optmierung	nicht möglich	vorhanden	nicht vorhanden
OBD-Adaption	nicht möglich	vorhanden	nicht vorhanden
Systemeffizienz	gering	sehr hoch	sehr hoch
Kosten	gering	hoch	sehr hoch
Entwicklungsdauer	1-2 Jahre	1-1,5 Jahre	3 Jahre

Abbildung 6: Entwicklungsumfänge bei verschiedenen Rahmenbedingungen

Anmerkung: Entwicklungszeiten beinhalten keine Teilebeschaffungszeiten für die Markteinführung.

5. Eingriff in das Motormanagement

Das Motormanagement („Motorsteuerung“) ist zentrales Element eines optimalen und sicheren Betriebs moderner Dieselmotoren. Im betrachteten Technologiezeitraum kommen flächendeckend sogenannte momentengeführte Systeme zum Einsatz, in denen das gewünschte Antriebsdrehmoment die Führungsgröße darstellt. Für dieses gewünschte Drehmoment werden zu jedem Zeitpunkt die Aktoren mit optimalen Parametern angesteuert, beispielsweise Einspritzzeitpunkt, Einspritzdruck, Einspritzdauer bzw. bei Mehrfacheinspritzung das Einspritzmuster, die Abgasrückführrate und viele weitere Größen. Das Ermitteln der optimalen Parameter wird als Applikation und Kalibration des Motors bezeichnet und in Form von Kennfeldern und Funktionen im Steuergerät hinterlegt. Dazu gehört beispielsweise die Applikation der Abgasrückführrate, die Prinzip bedingt und abhängig vom Aufladesystem bei zunehmender Motorlast- und Drehzahl reduziert werden muss. Eine Vielzahl von Korrekturkennfeldern berücksichtigt dabei die Einflüsse unterschiedlicher Randbedingungen, beispielsweise der Temperaturen, bis zu denen die einzelnen Komponenten sicher betrieben werden können. Aufgrund der komplexen Abläufe in einem Verbrennungsmotor besteht eine hohe Abhängigkeit der Größen voneinander.

Diese Applikation der Motorsteuerung stellt einen zentralen Aspekt der Motorenentwicklung dar und erfordert eine umfassende Absicherung der Funktionen sowie deren Parametrierung und muss auch eine 100% Absicherung gegen äußere Störeinflüsse aufweisen. Daher muss Zugriff von außen auf eine eingeschränkte Lesefunktion begrenzt werden, der Funktionsumfang innerhalb der „Engine Control Unit“ (ECU) ist streng hierarchisch strukturiert, abhängig von der eingesetzten Hardware und nach Freigabe in klar dokumentierten Softwareständen eingefroren. Damit wird das nachträgliche Einbinden eines im ursprünglichen Funktionsumfang nicht berücksichtigten Zusatzsystems zu einer komplexen Entwicklungsaufgabe, in der außerdem unterschiedliche Softwarestände und alle verschiedenen Fahrzeugvarianten berücksichtigt werden müssen. Zudem gilt für emissionsrelevante Parameter, dass sie in der On Board Diagnose (OBD) erfasst werden müssen (s. Kap. OBD)

Die Optimierung des Emissionsverhaltens hat zentrale Bedeutung für die Weiterentwicklung der Leistungsfähigkeit von Motorsteuerungssystemen. Bis zur Emissionsstufe 4 lag der Fokus auf wirkungsgradoptimaler Parametrierung der Betriebspunkte unter Einhaltung von vorgegebenen Emissionswerten. Zusätzlich sind Korrekturfunktionen für den dynamischen Betrieb (z.B. Beschleunigungsvorgänge), für Kaltstartphasen, etc. und - wie eingangs angeführt - eine Vielzahl von Korrekturfunktionen hinterlegt.

Mit EURO5 und Einführung des Partikelfilters ist das Abgasnachbehandlungssystem zum integralen Bestandteil der Motorsteuerung geworden. Die für diesen Technologiestand charakteristisch niedrigen Partikelemissionen beruhen darauf, dass über die Ansteuerung des Motors ein optimales Systemverhalten sichergestellt wird, bei dem die Partikelbildung im Motor, die Filterung mit kontinuierlichem Rußabbrand im Partikelfilter (DPF) sowie die aktive Regeneration des Filters entsprechend aufeinander abgestimmt sind. Dazu wird in der Regel der Gegendruck über den Filter erfasst, und mit einem aufwändigen, in der Motorsteuerung hinterlegten Filterbeladungsmodell abgeglichen und plausibi-

lisiert. Zusätzlich muss das Einspritzsystem in der Lage sein, eine aktive Regeneration des Filters, d.h. einen kontrollierten Abbrand der Rußpartikel zu initiieren und kontrolliert abzuschließen. Dazu ist eine gezielte Temperaturerhöhung im DPF erforderlich, die durch zusätzlich eingespritzten Kraftstoff unter Nutzung der Exothermie im Dieseloxydationskatalysator erreicht wird. Zu hohe Temperaturen würden dabei zur Zerstörung von Komponenten bis hin zur massiven Gefährdung der Fahrzeugumgebung führen, ist hingegen die Grundtemperatur im System zu gering, kann der Vorgang nicht gestartet werden, bzw. muss gegebenenfalls abgebrochen werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass es nicht zu einem Durchbruch anderer Schadstoffkomponenten (z.B. HC) kommt.

Aus dieser Systembeschreibung kann abgeleitet werden, dass Änderungen in der Abgasanlage, die einen Einfluss auf Gegendruck- und Temperaturverhalten haben, eine Neuapplikation und Validierung erforderlich machen. Dabei ist besonders zu beachten, dass Fehler nicht zwangsläufig sofort sichtbar sind, sondern auch erst nach längerer Laufzeit auftreten können, z.B. wenn ein nicht plausibler Filterbeladungszustand zu einem Notlaufzustand, oder im schlimmsten Fall zu einem Abbrennen des DPF führt.

Motorsteuerungen für diesen Technologiestand haben zwar den für die DPF Regeneration erforderlichen Funktionsumfang, sind jedoch in der Regel noch nicht für die mit EURO6 eingeführten aktiven DENOX Systeme appliziert.

Dafür steigt die Komplexität nochmals deutlich an. Für die als LNT bzw. NSK bezeichneten NO_x -Speicherkat ist ein regelmäßiger Regenerationsvorgang erforderlich, für den ein sogenannter "Fettsprung" erforderlich ist. Dabei wird der Motor kurzzeitig mit einem unterstöchiometrischen Kraftstoff-Luftverhältnis betrieben, um das gebundene NO_x als unschädliches N_2 abzugeben und damit den Speicherkat wieder zu leeren. Das ist ein spezieller Betriebszustand, der im normalen dieselmotorischen Betrieb nicht vorgesehen ist und unter Berücksichtigung der anderen Abgassystemkomponenten appliziert werden muss. Zusätzlich muss die Auslegung des Einspritzsystems diese Funktionalität ermöglichen.

Kommt ein SCR System zum Einsatz, ist wiederum ein anderer Funktionsumfang erforderlich. Hier sind insbesondere zwei Aspekte zu nennen: Zum einen muss für einen sicheren, effektiven und langfristig robusten Betrieb das NO_x Bildungsverhalten des Motors, das über den Diesel-Oxydationskatalysator (DOC) gebildete NO/NO_2 Verhältnis, sowie die Wechselwirkung mit dem DPF bekannt und in geeigneter Weise in der Motorsteuerung hinterlegt sein. Zum anderen ist die Temperatur im Abgassystem von entscheidender Bedeutung. Dies ist im folgenden Kapitel 7 erläutert.

Eine Kombination von LNT und SCR System hat aus funktionaler Sicht hohes Potenzial und ist bereits für aktuelle EURO 6_{d temp} (RDE) Fahrzeuge in Serie. Aus Sicht der Motorsteuerung erhöht sich dabei die Komplexität nochmals sprunghaft, da zwei grundsätzlich unterschiedlich funktionierende Systeme betriebszustandsabhängig aufeinander abgestimmt werden müssen. Das Nachschalten eines SCR Systems an einen LNT kommt demnach einer Neuapplikation gleich und ist nicht unabhängig möglich.

6. Katalysatorheizung durch motorischen Betrieb / Wechselwirkungen

Die Abgaskatalyse benötigt ein Mindesttemperaturniveau, welches durch die Anspringtemperatur beschrieben wird. Unterhalb von diesem Schwellwert ist kaum eine Konvertierung der Abgaskomponenten festzustellen. Der Grenzwert liegt in der Regel bei ca. 180 °C. Dabei ist es nahezu unabhängig, ob es sich um einen Dieseloxydationskatalysator (DOC) oder einen SCR-Katalysator handelt. Auch NO_x-Speichersysteme (LNT) benötigen eine entsprechende Mindesttemperatur, die unter 180°C liegen kann. Eine Ausnahme bilden Partikelfiltersysteme, die erst bei deutlich höheren Temperaturen die angesammelten Partikel abbrennen und sich damit regenerieren können. Diese Regeneration kann jedoch zyklisch stattfinden, anders als bei den kontinuierlich arbeitenden Katalysesystemen.

Grundsätzlich erscheint der angegebene Schwellwert im Bezug auf Motorabgas nicht ungewöhnlich hoch. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass moderne Dieselmotoren eine hohe Effizienz aufweisen, d.h. die motorischen Verluste gezielt minimiert sind. Damit sind die thermischen Abgasverluste entsprechend niedrig und insofern die im Abgas messbaren Temperaturen entsprechend gering. Mit zukünftig weiter steigender Effizienz wird demzufolge die Abgastemperatur nochmals abgesenkt, was das Erreichen der notwendigen Schwellwerte zunehmend schwierig macht. Hinzu kommt der Betrieb mit Luftüberschuss im Teillastbereich, der das thermische Niveau des Abgases ebenfalls reduziert, wodurch das Fahrzeug insbesondere bei langsamer Fahrt (Stadtverkehr) mit niedrigen Abgastemperaturen arbeiten muss.

Um diesem Problem zu begegnen, werden üblicherweise unterschiedliche Maßnahmen miteinander kombiniert. Zum ersten wird die Abgasreinigung bei modernen, besonders effizienten Fahrzeugen sehr nahe am Motor positioniert. DOC und Partikelfilter, sowie meist auch der SCR werden in unmittelbarer Nähe hinter dem Turbolader positioniert, weil der Wärmeverluste bei einer alternativen Anordnung im Unterbodenbereich des Fahrzeugs zu gravierend ist. Hinzu kommen Heizmaßnahmen, die durch die Motorelektronik mithilfe der Einspritzung initiiert werden. Die Motorelektronik nutzt entsprechende Berechnungsmodelle, die bei einer Annäherung an die kritischen Temperaturgrenzen die angesprochenen Heizmaßnahmen aktivieren. Derartige Maßnahmen sind z.B. die Verzögerung der Einspritzung in Richtung spät oder die Aktivierung einer gesonderten Nach einspritzung zu einem in Bezug auf die Kolbenposition sehr späten Zeitpunkt. Durch diese weit in die Expansion verlagerte Verbrennung erhöht sich das Abgastemperaturniveau bei Auslass öffnet, d.h. die Abgastemperatur steigt. Allerdings ist eine solche Maßnahme mit einer gewissen Verbrauchserhöhung verbunden, weswegen sie vom Hersteller sehr sorgfältig appliziert sein muss.

Eine weitere temperaturbildende Maßnahme ist die vermehrte Einspritzung von Kraftstoff zu einem sehr späten Zeitpunkt, wodurch teilweise unverbrannter Kraftstoff in den Abgasstrang gelangt. Die dabei freiwerdenden Kohlenwasserstoffe werden im DOC exotherm in ungefährliche Gaskomponenten konvertiert und dabei ein deutlicher Temperaturanstieg im Abgas messbar. Auch diese Funktion wird durch die Motorsteuerung angesteuert und muss ebenso sorgsam kontrolliert werden, denn es darf keinesfalls zum

Durchbruch von Kohlenwasserstoffen kommen oder der DOC gar thermisch überlastet werden.

Mit Hilfe der beschriebenen Verfahren ist es einem optimal abgestimmten Fahrzeug auch im Teillastbereich möglich, die notwendigen Temperaturen für die SCR-Katalyse bereit zu stellen. Hier wird die Wärme einerseits benötigt, um die Hydrolyse zu betreiben, d.h. die Umwandlung der wässrigen Harnstofflösung Adblue in Ammoniak, bei der das Wasser verdampfen muss. Andererseits benötigt der SCR-Katalysator die Wärme um seine Anspringtemperatur auch im Stadtverkehr sicher zu überschreiten. Nur so sind Konvertierungsraten von über 90% unter allen Bedingungen einzuhalten, ohne gleichzeitig den angebotenen Ammoniak ungenutzt als Ammoniakschlupf in die Umgebung zu emittieren.

Unterstützt wird das thermische Verhalten durch das NO₂-Angebot aufgrund der Konvertierung im DOC, wodurch die Reaktionstemperaturen abgesenkt werden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die DOCs für SCR-Systeme eine andere Beschichtung haben, als diejenigen Exemplare mit einem älteren Technologiestand.

Als weitere Maßnahme werden elektrische Systeme vorgeschlagen. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden. Ein Heizkatalysator zur Unterstützung der Hydrolyse von Ammoniak kann eine Dosierfreigabe bei niedrigen Temperaturen ermöglichen und kommt dazu mit einer moderaten Heizleistung aus. Er trägt allerdings kaum dazu bei, den SCR-Katalysator selbst und den Abgasmassenstrom aufzuheizen, lediglich die Tieftemperaturaktivität des SCR-Katalysators kann etwas besser genutzt werden.

Diese Begrenzung liegt daran, dass auch in der Teillast ein hoher Abgasmassenstrom gegeben ist. Um diesen hohen Gasstrom wirksam aufzuheizen, sind bis zu mehreren Kilowatt elektrischer Heizleistung notwendig (s. Kap „Elektrische Abgastemperaturerhöhung“). Da gleichzeitig ein Fahrzeug nur ein Bordnetz mit einer Nominalspannung von 12 Volt besitzt, ergeben sich Stromstärken bis zu einigen hundert Ampere. Ein derartiger Betrieb würde eine komplette Neuapplikation des elektrischen Systems inklusive Bordnetzmanagement erfordern.

Unter Berücksichtigung der geschilderten Randbedingungen erklärt sich die Problematik, die die Integration eines SCR-Systems im Unterbodenbereich eines Fahrzeugs ohne Anbindung an die Motorelektronik mit sich bringt. Bei dieser Montageposition sind die Abgastemperaturen bei den relativ verbrauchsgünstigen Euro 5-Fahrzeugen (und später) insbesondere im Teillastbereich (Stadtverkehr) sehr gering. Mangels softwaretechnischer Einbindung können Heizmaßnahmen durch die Motorelektronik nicht initiiert werden; thermische Funktionsmodelle existieren für das Bauteil innerhalb der Elektronik nicht. Die Funktionalität wird damit im Wesentlichen auf den höheren Lastbereich (z.B. Autobahn) des Fahrzeugs beschränkt.

7. On-Board-Diagnose

Mit Einzug des elektronischen Motormanagements in die Fahrzeugantriebstechnik wurden neben den eigentlichen Regelungs- und Steuerungsfunktionen auch zusätzliche Funktionen zur Eigendiagnose integriert. Dieses in das Motormanagement integrierte Diagnosesystem vergleicht die gemessenen Sensordaten mit den in Kennfeldern hinterlegten betriebspunktabhängigen Sollwerten der Sensordaten für den optimalen Motorbetrieb ab. Weichen die Werte durch Störeinflüsse oder Alterungseffekte voneinander ab, gleicht die Motorregelung diese Abweichungen über Korrekturen verschiedener Stellglieder aus. Dabei werden die Rückwirkungen der Aktorfunktionen auf die Messwerte der Sensoren kontinuierlich überwacht. Gelingt der Abgleich der Soll- und Istwerte nicht, oder übersteigen die hierfür benötigten Korrekturwerte die zulässigen Schwellwerte, werden entsprechende Fehler im Steuergerät abgelegt und können über eine genormte Schnittstelle abgefragt werden. Zusätzlich wird dem Fahrer in der Regel ein Hinweis auf das Vorliegen eines Fehlers gegeben. Je nach Schwere des Fehlers wird unter Umständen auch der Motornotlauf aktiviert. Abhängig von dessen Gefährdungspotential für den Antrieb, bzw. des daraus resultierenden Grades der Emissionsüberschreitungen, existieren verschiedene Stufen des Notlaufes. So muss beispielsweise bei Ausfall des Ladedrucksensors ein dauerhafter Fehlbetrieb des Motors mit für den DPF unzulässig hohen Partikelemissionen sicher verhindert werden.

Neben den herstellerspezifischen Diagnosesystemen zur Unterstützung bei Fahrzeugwartung und Reparaturen, hat auch der Gesetzgeber die Potentiale der kontinuierlichen Eigendiagnose zur Überwachung der Abgasemissionen erkannt. So trat bereits im Jahr 1988 die erste Stufe der OBD-Gesetzgebung (OBD-I) in Kalifornien in Kraft. Dabei wurden erstmals die kontinuierliche Überwachung der abgasrelevanten Komponenten, sowie die Abspeicherung entsprechender Fehlermeldungen auf dem Steuergerät vorgeschrieben. Gleichzeitig wurde eine Kontrollleuchte - die sogenannte Motorkontrollleuchte MIL (Malfunction Indicator Lamp | Abbildung 7) - verpflichtend eingeführt, welche den Fahrer auf das Vorliegen ebensolcher Fehler hinweisen sollte. Seit der Einführung der nächsten OBD-Stufe im Jahr 1994 (OBD-II) muss zusätzlich die Funktionalität des Gesamtsystems überwacht werden. Diesbezüglich müssen beispielsweise auch die Messdaten aller notwendigen Sensoren auf Plausibilität untersucht und miteinander abgeglichen werden. Damit müssen zusätzlich zu allen abgasrelevanten Komponenten und Systemen, auch alle Komponenten, welche zur Überwachung und Diagnose von abgasrelevanten Systemen eingesetzt werden, überwacht werden. Seit der Einführung wurde die OBD-Gesetzgebung regelmäßig überarbeitet und an den aktuellen Stand der Technik angepasst.



Abbildung 7: Piktogramm Motorkontrollleuchte (MIL) (Quelle: Wikipedia)

Für Europa wurde die kontinuierliche Europäische-On-Board-Diagnose (EOBD) der emissionsrelevanten Bauteile und Systeme für Personenkraftwagen mit Ottomotoren durch die Richtlinie 98/69/EG, zusammen mit der Abgasnorm Euro 3 zum 1. Januar 2000 eingeführt. Die EOBD-Vorschriften sind an die kalifornischen OBD-II Vorgaben angelehnt und gelten seit dem 1. Januar 2003 auch für PKW mit Dieselmotoren.

Die Vielzahl der zu überwachenden Komponenten macht die OBD-Funktionsumfänge in der Motorsteuerung sehr komplex, auch weil teilweise zur Plausibilitätsprüfung auf virtuelle Sensoren (sogenannte „modellierte“ Sensoren) zurückgegriffen werden muss, deren Modellgüte sich beispielsweise mit Komponentenänderungen verändert. Jede verbaute Komponente benötigt darin eine eigene Funktion zur Überprüfung der Funktionalität sowie zur Plausibilisierung der Sensordaten. Für Dieselfahrzeuge sind zur Erfüllung der EOBD-Gesetzgebung insbesondere folgende Teilsysteme und Komponenten zu untersuchen:

- Sauerstoff-(Lambda-)Sensoren
- NO_x-Sensoren
- Verbrennungsaussetzererkennung (im Leerlauf)
- Abgasrückführung
- Kraftstoffsystem
- Katalysatoren; NO_x-Speicherkatalysator und/oder SCR-System
- Partikelfilter
- „Comprehensive Components“
- „sonstige emissionsrelevanten Komponenten“

Unter den Punkten „Comprehensive Components“ oder den „sonstigen emissionsrelevanten Komponenten“ sind die nicht genauer bezeichneten Bauteile und Teilsysteme des Emissionsminderungssystems zusammengefasst, aber auch Teilsysteme des Antriebsstrangs deren Ausfall oder Fehlfunktion entweder direkt zu einer Erhöhung der Abgasemissionen führen können, oder jedoch die Diagnosefunktionen der OBD blockierten. Die Festlegung der für jede Komponente durchzuführenden Diagnosen wird auf Basis der zu erwartenden Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen bei Ausfall des Systems bestimmt. Während einfache Funktionsprüfungen lediglich die Funktionsfähigkeit einer Komponente sicherstellen, erlauben qualitative Funktionsprüfungen spezifischere Aussagen über die Funktionsfähigkeit des Systems. So wird beispielsweise bei der Überprüfung der Katalysatorsysteme der Grad der Alterung auf Basis von Sensordaten bestimmt. Insbesondere die Funktionen zur Überwachung der Funktionsfähigkeit der Abgasnachbehandlungssysteme sind allerdings sehr komplex. Bei NO_x-Speicherkatalysatoren wird die Konvertierungsleistung beispielsweise durch irreversible Alterungsvorgänge, oder aber auch durch die reversible Schwefelvergiftung reduziert. In beiden Fällen würde dem Fahrer die reduzierte Konvertierungsfähigkeit durch Aufleuchten der MIL angezeigt. Sollte dabei jedoch eine zu hohe Schwefelbeladung die Ursache des Konvertierungseinbruchs sein, wäre es zielführender einen entsprechenden Regenerationszyklus einzuleiten. Die Unterscheidung von reversibler und irreversibler Schädigung des Katalysators ist damit für die Bewertung des Alterungszustands (des Gütegrads) des Abgasnachbehandlungssystems von höchster Bedeutung. Dies erfordert im Gegenzug allerdings auch hochkom-

plexe Funktionen und Steuergerätemodelle. Der ermittelte Alterungszustand kann dann über die Diagnoseschnittstelle ausgelesen werden. Darüber hinaus kann die Kenntnis über den Alterungszustand der Katalysatoren auch zur Erzielung eines möglichst schadstoffarmen Motorbetriebs in der Motorsteuerung Berücksichtigung finden.

Bei der Verwendung von SCR-Systemen zur Reduktion der Stickoxidemissionen wird ebenso der Alterungszustand des Katalysators, sowie dessen Umsatzwirkungsgrade überwacht. Zusätzlich muss allerdings auch das komplette System der Regenerationsmittel-Versorgung überprüft werden. Einerseits bedeutet das konkret, dass sowohl der Adblue-Tank und die Pumpe, als auch der Adblue-Injektor in die OBD-Diagnosestrategie eingebunden sein müssen. Andererseits muss allerdings auch der Wirkungsgrad der Reduktionsmittelversorgung am Katalysator, genauer gesagt die Umwandlung des Harnstoffs in Ammoniak (NH_3) und dessen Einspeicherung und Umsatz im Katalysator, überwacht werden. Insbesondere die Modellierung der NH_3 -Speicherfähigkeit, sowie die Bestimmung des aktuellen Speicherzustands, sind vor dem Hintergrund der Abhängigkeiten zu Druck und Temperatur, nicht trivial. Allein für die Überwachung der Funktionsfähigkeit des SCR-Systems sind in der Regel zusätzliche NO_x -Sensoren stromauf- und -abwärts des eigentlichen Katalysators notwendig, welche wiederum eine eigene OBD-Überwachung nach sich ziehen. Diese Sensoren werden auf folgende Fehler überwacht:

- Elektrische Fehler: Kurzschlüsse und Kabelbrüche
- Bereichsfehler / „Range Check“: Über- oder Unterschreiten des physikalischen Messbereichs
- Plausibilitätsfehler: Fehler, welche in der Komponente selbst (z.B. Alterung, Drift), oder in der Einbindung in das Gesamtsystem liegen. Diese werden anhand von Modellen und/oder Messergebnissen anderer Sensoren plausibilisiert

Eine besondere Bedeutung hat die OBD für die „Untersuchung des Motormanagement- und Abgasreinigungssystems“ (UMA) im Rahmen der Hauptuntersuchung. Mit Einführung des (AU) Leitfadens 3 im Jahr 2006 wurde für Dieselfahrzeuge die Überprüfung des OBD-Systems in die Abgasuntersuchung integriert (gilt für Ottofahrzeuge nach Leitfaden 2 bereits seit 2002). Dabei wird der OBD-Fehlerspeicher auf Fehlereinträge geprüft und es wird zusätzlich ein Prüfbereitschaftstest durchgeführt, bei welchem die sogenannten Readiness-Codes (Abbildung 8) der verbauten abgasrelevanten Bauteile des Fahrzeugs abgerufen werden, um so zu überprüfen, ob alle notwendigen Systemtests im Rahmen der Abgasuntersuchung durchgeführt werden konnten.

Bei erfolgreicher OBD-Prüfung, d.h. wenn alle Readiness-Codes auf Null gesetzt waren und zeitgleich im Fehlerspeicher keine abgasrelevanten Fehler vorlagen, konnte für Fahrzeuge mit einer Erstzulassung ab dem 1. Januar 2006, bis zur letzten Änderung der AU-Richtlinie zum 1. Januar 2018, die eigentliche Endrohrmessung sogar gänzlich entfallen. Bei fehlender Freigabe eines oder mehrerer Readiness-Codes war die Endrohrmessung verpflichtend. Mit der Voraussetzung einer nicht leuchtenden Motorkontrollleuchte wurde bei Bestehen der Endrohrmessung dann die gesamte Abgasuntersuchung als bestanden gewertet. Im Rahmen der Endrohrmessung wird für Dieselfahrzeuge allerdings lediglich eine Trübungsmessung zur Überprüfung des Partikelemissionsverhaltens durchgeführt.

Eine Aussage über die restlichen limitierten Schadstoffemissionen ist mit dieser Messung nicht möglich.

Baugruppe / Readiness-Code	unbenutzt	übrige Systeme	Kraftstoffsysteme	Aussetzerkennung	Abgasrückführung	Lambdasondenheizung	Lambdasonde	Klimanlage	Sekundärluftsystem	Tankentlüftungssystem	Kat-Heizung	Katalysator
verbaut 1 nicht verbaut 0 nicht unterstützt 0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
geprüft 0 nicht möglich 0 nicht geprüft 1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
kontinuierlich überwacht	x	x	x	x								
sporadisch überwacht					x	x	x	x	x	x	x	x

Abbildung 8: Kontrollschema Readiness-Codes (Quelle: <http://www.kfztech.de>)

Das Fehlen von Testumfängen zur Bestimmung der Stickoxidemissionen im Rahmen der Abgasuntersuchung ist darauf zurückzuführen, dass diese Emissionen während der Verbrennung nur bei sehr hohen Brennraumtemperaturen entstehen, welche nur bei höherlastigen Betriebspunkten in ausreichenden Mengen für die bei einer AU realisierbaren Messgenauigkeiten auftreten. Gleichzeitig ist das NO_x-Emissionsverhalten sehr stark von den Umgebungsbedingungen sowie den Motor- und Abgasnachbehandlungstemperaturen abhängig, wodurch repräsentative Messungen mit einer hohen Wiederholgenauigkeit im Rahmen der üblichen Endrohrmessung (d.h. im Rahmen der Hauptuntersuchung, auf entsprechend teuren Abgasrollenprüfständen aber natürlich sehr wohl) nicht möglich sind, auch wenn der Verbrennungsmotor bei der freien Beschleunigungsmessung für die Beschleunigungszeit nahezu an der Volllast betrieben wird. Diese Messprozedur eignet sich auch deshalb nicht für die Untersuchung der NO_x-relevanten Systeme und Bauteile, da die dabei auftretenden Betriebspunkte hinsichtlich der Stickoxidentstehung nicht repräsentativ sind und bei realen Fahrten unter Motorlast mit daraus resultierend deutlich geringeren Drehzahlgradienten niemals auftreten würden.

Vor diesem Hintergrund kommt dem Auslesen des OBD-Fehlerspeichers im Rahmen der Abgasuntersuchung von Dieselfahrzeugen eine besondere Bedeutung zu, da nur so Informationen über die Stickoxidemissionen und den Zustand der DeNO_x-Systeme gewonnen werden können. Sollten die fahrzeugeigenen NO_x-Sensoren beispielsweise eine Schwellwertüberschreitung der gemessenen Stickoxidemissionen feststellen, würde eine entsprechende Fehlermeldung in den Fehlerspeicher eingetragen (z.B. DTC-Code P2BA7 – NO_x Überschreitung – Leerer Adblue Tank). Aufgrund der Schwere des Fehlers und der damit verbundenen Umweltauswirkungen würde damit in der Regel die Motorkontrollleuchte (MIL) aktiviert werden und die Abgasuntersuchung müsste als „Nicht Bestanden“ gewertet werden. Darüber hinaus ist der Fahrer aber auch ohne anstehende Hauptuntersuchung dazu angehalten, angezeigte emissionsrelevante Fehler schnellstmöglich in einer Fachwerkstatt beheben zu lassen.

Bezüglich des aufgeführten Beispiels ist allerdings die Besonderheit zu beachten, dass ausgewählte NO_x-relevante Fehler, selbst nach durchgeführter Reparatur in der Fachwerkstatt, aus gesetzlichen Gründen für einen definierten Zeitraum nicht gelöscht werden dürfen. Da diese Fehler dann nach erfolgreicher Reparatur allerdings nicht mehr als aktiv gewertet werden, würde in diesem Fall auch die MIL nicht leuchten. Da allerdings im Rahmen der Abgasuntersuchung für Dieselfahrzeuge mit Erstzulassung nach dem 01.01.2006 der gesamte OBD-Fehlerspeicher inklusive der nicht aktiven Fehler ausgelesen wird, würden die schon behobenen und nicht mehr aktiven emissionsrelevanten Fehler trotzdem zu einem Nicht-Bestehen der Untersuchung führen. Sollten diese Fahrzeuge aus technischer Sicht jedoch in Ordnung sein und im Fehlerspeicher ausschließlich NO_x-relevante Fehler abgelegt sein, gilt deshalb auch diese Prüfung unter der Voraussetzung einer nicht leuchtenden MIL und mit Bestehen einer zusätzlichen Endrohrmessung, trotz der gespeicherten Fehler als Bestanden. Mit der Forderung der nicht leuchtenden MIL ist in diesem Fall sichergestellt, dass zumindest zum Zeitpunkt der Abgasuntersuchung keine aktiven emissionsrelevanten Fehler vorliegen. Damit ist im Rahmen der Abgasuntersuchung, unter Verwendung des OBD-Systems und der hierfür eingesetzten fahrzeugeigenen Sensorik zusätzlich zur Bewertung des Partikelemissionsverhaltens auch die Kontrolle der Stickoxidemissionen möglich.

Das herangezogene Beispiel der NO_x-Emissionsüberschreitung aufgrund eines leeren Adblue-Tanks gibt einen Hinweis auf die Problematik, dass der eigentliche Motorbetrieb durch das fehlende Reduktionsmittel nicht direkt beeinflusst wird. Während sich das Emissionsverhalten des Fahrzeugs aufgrund der fehlenden Stickoxidreduktion im SCR-System zwar nicht hinnehmbar verschlechtert, ist der Fahrer in der Nutzung des Fahrzeugs nicht eingeschränkt. Zur Sicherstellung, dass die SCR-Systeme trotzdem immer ausreichend mit Adblue versorgt werden, dürfen die Fahrzeughersteller einen Weiterbetrieb des Fahrzeugs bei leerem Adblue-Tank allenfalls im eingeschränkten Notlauf-Modus ermöglichen. Damit ist der Fahrer gezwungen, seinen Adblue-Tank rechtzeitig nachzufüllen, bevor der Motorstart andernfalls gänzlich unterbunden wird.

Mit Blick auf eine eventuelle SCR-Hardware-Nachrüstung ist diese Funktion einer „Umwelt-Wegfahrsperre“ von besonderer Bedeutung, da nur so eine Wiederauffüllung der Reduktionsmitteltanks in der Fahrzeugflotte gewährleistet werden kann. Für die Nachrüstung dieser Funktion ist allerdings eine Einbindung der nachgerüsteten Abgasnachbehandlungssysteme in die OBD-Funktionsstruktur notwendig. Aufgrund des damit verbundenen immensen Entwicklungsaufwands und der benötigten Zugriffe und Kenntnisse der gesamten Software-Struktur des Motormanagements, welche größtenteils Kern-Know-How (insbesondere die OBD-Strategie) der Fahrzeughersteller darstellen und damit weitestgehend der Geheimhaltung unterliegen, können diese Funktions- und Softwareentwicklungen auch nur seitens der Fahrzeughersteller erbracht und mittels entsprechender Software-Updates auf die nachzurüstenden Fahrzeuge aufgespielt werden.

Eine weitere Frage, welcher im Rahmen der Erstellung dieser Kurzstudie nachgegangen wurde, ist, ob sich die verpflichtende Einbindung der Nachrüst-Abgasnachbehandlung in die OBD-Überwachung bereits aus der Gesetzgebung zur Fahrzeugtypzulassung ergibt.

Diese Frage kann hier jedoch nicht abschließend beantwortet werden und erfordert eine fundierte juristische Prüfung. Für Austauschkatalysatoren, welche als Ersatzteil bestimmt sind, ist der Sachverhalt durch die Richtlinie 70/220/EWG, Anhang XIII, 6.5ff (vgl. Abbildung 9) zwar geregelt, da es sich im Fall einer Nachrüstung jedoch nicht um ein Ersatzteil handelt, ist dieser Passus vermutlich nicht anwendbar. Wenn dann noch eine komplett neue Homologation zur Umschlüsselung und Neueinstufung in eine bessere Schadstoffklasse durchgeführt werden soll, ist die Situation eventuell nochmal anders zu bewerten.

6.5. Anforderungen in Bezug auf OBD-Kompatibilität (gilt nur für Austauschkatalysatoren, die in Fahrzeuge mit OBD-System einzubauen sind)

Die Demonstration der OBD-Kompatibilität ist nur erforderlich, wenn der Katalysator für die Erstausrüstung in der ursprünglichen Konfiguration überwacht wurde.

6.5.1. Die Kompatibilität des Austauschkatalysators mit dem OBD-System ist anhand der in der Richtlinie 98/69/EG Anhang XI Anlage 1 beschriebenen Verfahren zu demonstrieren.

Abbildung 9: Auszug aus Richtlinie 70/220/EWG, Anhang XIII, Satz 6.5ff

Während die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Nachrüstung von Abgasnachbehandlungssystemen bei Personenkraftwagen an dieser Stelle nicht abschließend bewertet werden können, sei an dieser Stelle trotzdem auf die UN/ECE Richtlinie 132 zur Vereinheitlichung der Anforderungen an die „Nachrüstung von Partikel- und NO_x-reduzierenden Abgasnachbehandlungssystemen“ für Nutzfahrzeuge verwiesen. Diese sogenannte REC-Richtlinie (Retrofit Emission Control Device) schreibt für NO_x-mindernde Nachrüstsysteme explizit auch eine Funktionsüberwachung (NCD = NO_x Control Diagnostics) vor, welche jedoch nicht zwingend in die bestehende OBD-Funktionsstruktur integriert werden muss. Allerdings muss der Nachweis erbracht werden, dass das Nachrüstsystem mit dem ursprünglichen OBD-System kompatibel ist. Insbesondere darf die Funktion der OBD-Überwachung nicht eingeschränkt werden, oder dort zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Zusätzlich wird für die betreffende Abgaskomponente mindestens das Erreichen der nächst höheren EU-Emissionsstufe gefordert. Der Kraftstoffverbrauch darf sich dabei um maximal 4 % erhöhen. Insbesondere für NO_x-reduzierende Nachrüstsysteme ist ein minimaler Umsatzwirkungsgrad von 60 % im jeweiligen Zertifizierungszyklus zu erreichen.

Die Anforderungen an das NO_x Control Diagnostics-System (NCD) sind an die entsprechenden Anforderungen des OBD-Systems angelehnt (UN/ECE R132, Anhang 10). Zunächst muss das NCD die Funktion der Nachrüstkomponenten überwachen und Fehlfunktionen selbstständig abspeichern. Darüber hinaus muss der Fahrer über das Vorliegen einer Fehlfunktion (z.B. fehlendes oder fehlerhaftes Reduktionsmittel, fehlerhafte Dosiermenge, unzureichende Umsatzraten, ...) sowohl visuell als auch akustisch hingewiesen werden. Gleichzeitig wird der Fahrer in verschiedenen Warnstufen dazu aufgefordert, den Fehler unverzüglich zu beheben. Sollte der Fehler 19 Betriebsstunden nach der ursprünglichen Erkennung immer noch vorliegen, ist der Fahrer darauf hinzuweisen, dass

der Motor-Neustart nach einer weiteren Betriebsstunde ohne Behebung des Fehlers nicht mehr möglich sein wird. Nach 20 Betriebsstunden ohne Fehlerbehebung ist der Motor-Neustart dann durch Unterbrechung der elektrischen Verbindung zwischen Anlasser und Batterie für mindestens 5 Stunden zu unterbrechen. Sollte der Fehler nach dem nächsten Motorstart dann trotzdem weiter vorliegen, wird die 20-stündige Eskalationskaskade erneut durchlaufen - der Wiederstart ist dann für 48 Stunden zu unterbrechen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Überwachung der Funktion der Nachrüstsysteme, entweder in Form der Einbindung in die vorhandene OBD-Funktionsstruktur, oder durch ein separates System (z.B. NCD), unausweichlich erscheint. Allein auf Basis von Appellen an die Eigenverantwortung der Fahrzeugführer wird man diese - wie auch die Meldungen über manipulierte SCR-Systeme in Nutzfahrzeugen zeigen - nicht flächendeckend an die Adblue-Tankstelle bewegen. Ohnehin müssen die Fahrzeugführer optisch und/oder akustisch auf einen leeren Adblue-Tank hingewiesen werden, da nicht zu erwarten ist, dass diese den Füllstand der Adblue-Tanks, welche beispielsweise in der Ersatzradmulde unter dem Kofferraum verbaut werden könnten, regelmäßig kontrollieren und rechtzeitig auffüllen. Auch für die Überwachung der Funktion der verbauten Nachrüstsysteme im Rahmen der gesetzlich vorgeschriebenen Abgasuntersuchung, ist ein solches Überwachungssystem derzeit unverzichtbar.

Zur gesamten EOBD Thematik gehört auch, dass nicht nur der Ausfall eines Sensors detektiert werden muss (was z.B. durch ein sich nicht änderndes oder unmotiviert schwankendes Signal oder einen Kabelbruch relativ leicht zu detektieren ist), sondern auch eine Plausibilitätsprüfung des Sensorsignals erfolgen muss.

Um dies durchzuführen muss das Sensorsignal plausibel aus anderen den Motorbetriebszustand charakterisierenden Größen synthetisch abgeschätzt werden.

Dies setzt eine Einbindung der Sensorik in das Motorsteuergerät zwingend voraus. Z.B. müssen die bei einer Nachrüstlösung verbauten NO_x- und Temperatursensoren auf genau diese Weise eingebunden werden, um beim Nichtbestehen der Plausibilitätsprüfung einen mehrstufigen Notlaufbetrieb des Motors zu aktivieren, der den Fahrer letztlich in die Werkstatt zwingt.

8. Sicherheit / Betriebssicherheit

Durch die Nachrüstung von Abgasreinigungskomponenten wird eine Überprüfung der Betriebssicherheit des betreffenden Fahrzeugs notwendig. Zum einen muss überprüft werden, ob von den zusätzlich hinzugefügten Bauteilen keine Betriebsgefahr in Wechselwirkung mit der serienmäßigen Konfiguration des Fahrzeugs ausgeht. Zum anderen werden durch hinzugefügte Bauteile einer Hardware-Nachrüstung auch zusätzliche Massen besonders im Abgasstrang hinzugefügt.

Diese Zusatzmassen verändern das Schwingungsverhalten der Abgasanlage im Betrieb, so dass mittels Simulation und in Dauerversuchen zumindest exemplarisch nachgewiesen werden muss, ob es bei im Fahrbetrieb auftretenden Anregungen und Temperaturen nicht zum mechanischen Versagen kommt. Es besteht dabei die realistische Gefahr eines Bruchs oder Abrisses der Abgasanlage oder der Aufhängungspunkte an der Karosserie.

Eine Überprüfung der Tragfähigkeit der Abgasanlage samt Aufhängung muss bei jeder Nachrüstungsvariante obligatorisch sein, da beispielsweise der zusätzliche Einbau eines SCR Katalysators die Masse der Abgasanlage um ca. 2 kg bis 4 kg erhöht.

Zusätzlich muss im Zuge der Entwicklung von Hardware-Nachrüstlösungen die Betriebsfestigkeit in Fahrzeugversuchen und gerafften Dauerläufen nachgewiesen werden. Dies ist deshalb von zwingender Notwendigkeit, da beispielsweise ein Abriss der Abgasanlage besonders bei hohen Geschwindigkeiten eine erhebliche Gefahr für den nachfolgenden Verkehr und auch für das nachgerüstete Fahrzeug selbst darstellt. Derartige Dauerlaufüberprüfungen sind vom Aufwand her einer Neuentwicklung der Abgasanlage vergleichbar.

Besonders gefährdet im Hinblick auf ein Bauteilversagen erscheint in diesem Fall der bei vielen Fahrzeugen verbaute Schwingungskompensator (siehe Abbildung 10). Dieser ist - wie hier am Beispiel des BMW 320d EU5 (Baureihe F30) abgebildet - meist am Übergang des Abgasrohres vom Motorraum in den Fahrzeugunterboden angeordnet.



Abbildung 10: Schwingungskompensator - Faltenbalg in der Abgasanlage eines BMW 320d EU5, Baureihe F30

Weitere kritische Punkte stellen die karosseriefesten Aufhängungspunkte dar. Bei der Überlastung durch zusätzliche Massen in der Abgasanlage oder durch verändertes Eigenschwingungsverhalten kann es dort zu Ermüdungsbrüchen kommen. Dabei kann die ge-

samte Abgasanlage Rißbildungen aufweisen, die zum Bruch und damit Unfall verursachendem Abfallen führen können, oder es können Einzelteile und Aufhängungsteile Schaden nehmen und ebenfalls zum Abfallen führen und damit das Fahrzeug selbst, aber auch den nachfolgenden Verkehr stark gefährden.

Sollten neben einer Modifikation des Haupt-Abgasstranges zusätzliche Eingriffe, wie die Verlegung eines Bypasses z.B. am Abgaskrümmern oder im Abgasbereich erfolgen, muss eine Bauteilneuentwicklung und Absicherung der so modifizierten Bauteile und Zusatzbauteile durchgeführt werden. Auch die mechanische und thermische Interaktion der Bauteile und Systemkomponenten im Fahrzeug ist im Versuch zu überprüfen.

Da im Versuch während der zeitlich gerafften Dauerläuferproben auf so genannten „Rüttelstrecken“ fahrzeugspezifisch nicht vorhersehbare Belastungsfälle stochastisch auftreten, kann für diesen Fall eine Absicherung auf Simulationsbasis nicht die erforderliche Betriebssicherheit gewährleisten. Umfangreiche und zeitaufwändige Fahrzeugversuche sind hierfür unverzichtbar und auch branchenüblich.

Eingriffe an der Karosserie wie beispielsweise Verstärkungen der Abgasanlagenaufhängung, Durchbrüche für Bypass-Systeme, Kabel und Adblue-Leitungen führen zu erhöhter Korrosionsneigung an den betroffenen Stellen, da die bei den meisten aktuellen Fahrzeugen übliche anodische Korrosionsschutzbeschichtung - meist eine Zink-Beschichtung - lokal irreversibel zerstört wird.

Neben einer Absicherung gegen mechanisch bedingten Ausfall der nachgerüsteten oder modifizierten Bauteile ist auch die Absicherung der Crash-Sicherheit zu gewährleisten. Abgasanlagen und deren Zusatzsysteme stellen durch ihre hohe Bauteiltemperatur eine potenzielle Zündquelle dar. Wenn nun durch Nachrüstung von SCR-Katalysatoren das Einknicken oder Verformungsverhalten bzw. die Funktionalität der Aufhängung verändert wird, muss auch dies im Hinblick auf Crash-Sicherheit überprüft werden.

Eine weitere Herausforderung stellt der im Fahrzeug erzeugte Ammoniak NH_3 dar. Da NH_3 ein gesundheitsschädliches Gas ist, muss auf alle Fälle ein Eindringen in die Fahrgastzelle ausgeschlossen werden. Dies gilt für den Normalbetrieb und ganz besonders im Falle eines Crashes.

Systeme, welche mit Adblue als NH_3 -Träger arbeiten, haben dabei ein relativ kleines Gefährdungspotenzial, da der reaktive Ammoniak in verhältnismäßig kleinen Mengen erst in der Abgasanlage erzeugt wird. Systeme die NH_3 separat erzeugen oder in Feststoffe einlagern, müssen aus naheliegenden Gründen komplett außerhalb der Fahrgastzelle und des Kofferraumes installiert werden.

Bei Systemen mit einer Feststoff-Ammoniak Speicherung kommt es bereits ab Temperaturen von 55°C zu einer Auslagerungsreaktion von NH_3 [„*Amminex - Questions & Answers*“: <http://www.amminex.com/retrofit/retrofit-qa.aspx>, letzter Zugriff: 20.01.2018]. Eine Innenraumtemperatur von 55°C kann in einem im Sommer abgestellten Fahrzeug - auch in Mitteleuropa - mühelos erreicht werden. Aus diesem naheliegenden Grund können derartige NH_3 -Trägersysteme nicht in einer im Kofferraum angeordneten Reserveradmulde verbaut werden, da eine Undichtigkeit des Systems über die gesamte Nutzungsdauer auch in einem normalen Einsatzszenario nicht auszuschließen ist.

9. NVH

Der Einbau von zusätzlichen Komponenten - wie einem SCR-Katalysator - auf das akustische Verhalten (NVH = Noise/Vibration/Harshness) wird die Dämpfungswirkung der Abgasanlage eher erhöhen. Es ist zu erwarten, dass das vom Antrieb verursachte Fahrzeuggeräusch tendenziell abnimmt.

Es muss auf jeden Fall überprüft werden, ob durch nachgerüstete Komponenten keine Verstimmung des Frequenzganges des Auspuffgeräuschs hervorgerufen wird. Sollte dies für eine Fahrzeugkonfiguration der Fall sein, besteht die Gefahr, dass die gesamten Fahrzeuggeräuschemissionen verstimmt werden. Das bedeutet dann, dass Frequenzbänder, welche besonders gedämpft oder verstärkt werden sollen, neu abgestimmt werden müssen. Dies geschieht in der Regel durch Austausch oder Modifikation des Abgasschalldämpfers.

Durch Eingriff in die Fahrzeuggeräusch-Abstimmung ist nach den geltenden Zulassungsbestimmungen eine Neuzertifizierung des Fahrzeugs erforderlich.

Es wird deshalb dringend empfohlen, die gängigen psychoakustischen Kennwerte wie Lautheit, Schärfe, Tonalität, Rauigkeit, Impulshaltigkeit etc. nach einer Hardware-Nachrüstung neu zu bewerten und ggf. neu abzustimmen. Die psychoakustische Bewertung ist ein weitgehend auf empirische Methoden gestütztes Verfahren. Der hierfür erforderliche Versuchs- und Zeitaufwand ist nicht unerheblich. Erfahrungsgemäß werden in einem solchen empirischen Entwicklungsprozess während der Entwicklungsphase mehrmalige Veränderungen der Hardware erforderlich sein.

Das Dämpfungsverhalten wird durch zusätzliche Einbauten - wie erwähnt - wahrscheinlich verbessert werden. Dies ist zu einem nicht unerheblichen Maß auf den Anstieg des Abgasgegendrucks zurückzuführen. Ein erhöhter Gegendruck bedeutet aber auch für den Fahrer deutlich merkliche Einschränkungen in der Leistungsentfaltung des Motors und einen nicht vernachlässigbaren Mehrverbrauch, da die vom Motor aufzubringende Abgas-Ausschiebearbeit naturgemäß ansteigt.

Der Einbau jeglicher Art von Bypass-Systemen in die Abgasanlage wird erfahrungsgemäß das NVH-Verhalten spürbar verschlechtern und die Geräuschemissionen erhöhen.

Weiterhin sind Eingriffe in die Karosserie-Struktur für Kabelbaum-Durchbrüche, die Verlegung von Ad-Blue Leitungen, etc. soweit wie möglich zu vermeiden. Grund hierfür ist zum einen, dass Öffnungen die Luftschallausbreitung stark begünstigen und zum anderen die Körperschallausbreitung (z.B. Vibrationen) zumindest beeinflussen.

10. NH₃-Durchbruch / Sperrkatalysator

Abbildung 11 zeigt schematisch eine vollständige Dieseldabgasnachbehandlungsanlage [1] bestehend aus:

- Oxidationskatalysator (DOC: Diesel Oxidation Catalyst)
- Partikelfilter (CSF: Coated Soot Filter)
- Harnstoff-Einspritzung (UREA Injection)
- SCR-Katalysator (SCR: Selective Catalytic Reduction)
- NH₃-Sperrkatalysator (ASC: Ammonia Slip Catalyst)

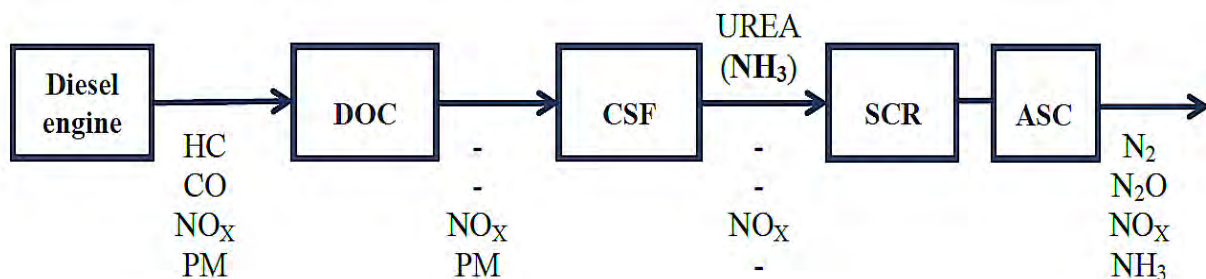
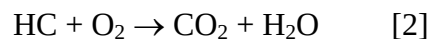
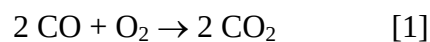


Abbildung 11: schematische Darstellung einer Diesel Abgasnachbehandlungsanlage [1]

Im DOC laufen im Wesentlichen folgende Reaktionen ab:



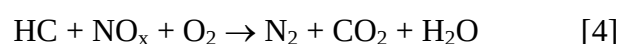
90% der innermotorisch entstandenen NO_x bestehen aus NO. Sowohl im DOC, als auch im CSF reagieren diese zu NO₂



Idealerweise enthält das Abgas nach dem CSF zu 50% NO und zu 50% NO₂. In der Realität ist das Verhältnis sehr stark von verschiedenen Faktoren (Abgastemperatur, O₂-Gehalt, CRT-Effekt im CSF, aktiver thermischer Regenerationsmodus) abhängig.

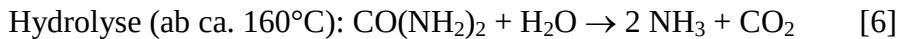
Die Verteilung von NO und NO₂ – neben der absoluten, bzw. relativen Menge im Abgas – ist, wie gleich gezeigt wird, von wesentlicher Bedeutung für die Menge des im SCR-Kat verbrauchten, bzw. verbrauchbaren NH₃.

Grundsätzlich kann (sofern nach DOC und CSF noch HC vorhanden sind) im SCR auch folgende Reaktion ablaufen:

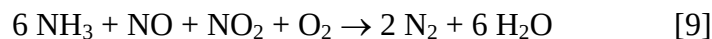
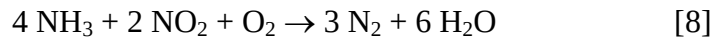
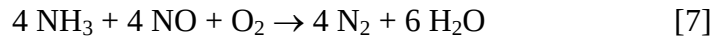


Reaktion 4 ist aber viel reaktionsträger im Vergleich zu Reaktion 2, so dass diese bei der Berechnung der zu erzeugenden NH₃-Menge keine Rolle spielt.

Die eingespritzte wässrige Harnstofflösung (gravimetrisch 32,5% UREA in deionisiertem Wasser) wird mittels zweier Reaktionen in NH_3 gewandelt:



Die erste Reaktion läuft im Wesentlichen im Abgas ab, die zweite im SCR-Kat. Im SCR-Kat laufen nun parallel im Wesentlichen folgende drei Reaktionen ab:

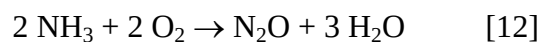
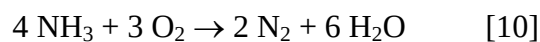


Reaktion 7 gilt als die "Standard SCR Reaktion". Reaktion 9 ist viel schneller, als Reaktion 7 und Reaktion 8 ist viel langsamer als Reaktion 7.

Allein aus dieser vereinfachten Darstellung ist zu erkennen, dass

- Das Verhältnis NO zu NO_2 , neben der gesamten NO_x -Menge eine Rolle spielt bei der Berechnung der erforderlichen NH_3 Menge.
- Je nachdem welche Reaktionen bevorzugt ablaufen, sind selbst bei gleicher NO_x -Menge unterschiedliche NH_3 -Mengen erforderlich.
- Auf diese Berechnungen im Steuergerät kann auch beim Vorhandensein von NO_x -Sensoren nicht verzichtet werden, da einerseits eine hohe Konversionsrate auch im Niedertemperaturbereich anzustreben ist und andererseits ein NH_3 -Durchbruch vermieden werden muss.

Neben diesen NO_x -Reduktionsreaktionen laufen natürlich auch noch folgende Oxidationsreaktionen ab:



Reaktion 10 erzeugt keine unerwünschten Ergebnisse, verbraucht aber NH_3 ungenutzt. Die Reaktionen 11 und 12 wiederum erzeugen weiteres NO und sogar N_2O . Der Vollständigkeit halber muss auch noch Reaktion 13 erwähnt werden, die ebenfalls N_2O erzeugt:



Reaktion 12 dominiert bei niedrigeren Temperaturen, wohingegen Reaktion 13 bei höheren Temperaturen dominiert.

Die Berechnung der für einen gegebenen, transienten(!) Betriebszustand im SCR-Kat erforderliche NH_3 -Menge ist also nahezu beliebig kompliziert. Bei einer Mindermenge reduziert sich in unerwünschter Weise der Konversionsgrad des NO_x , bei einer Übermenge kommt es zum NH_3 -Durchbruch.

Letzterer ist sehr unangenehm, da NH_3 giftig ist und in höheren Konzentrationen zu Verätzungen der Augen, Atemwege und der Haut. Die Geruchsschwelle liegt bei ca. 15ppm

und sollte unter keinen Umständen überschritten werden. Bei den Herstellern wird üblicherweise mit einem Engineering Target von 10 ppm appliziert.

Die maximal verarbeitbare NH₃-Menge wird üblicherweise in Relation zur NO_x-Menge als sogenanntes Feedverhältnis angegeben.

Abbildung 12 zeigt den grundsätzlichen Zusammenhang Feedverhältnis, NH₃-Durchbruch (Slip) und der NO_x-Konversionsrate.

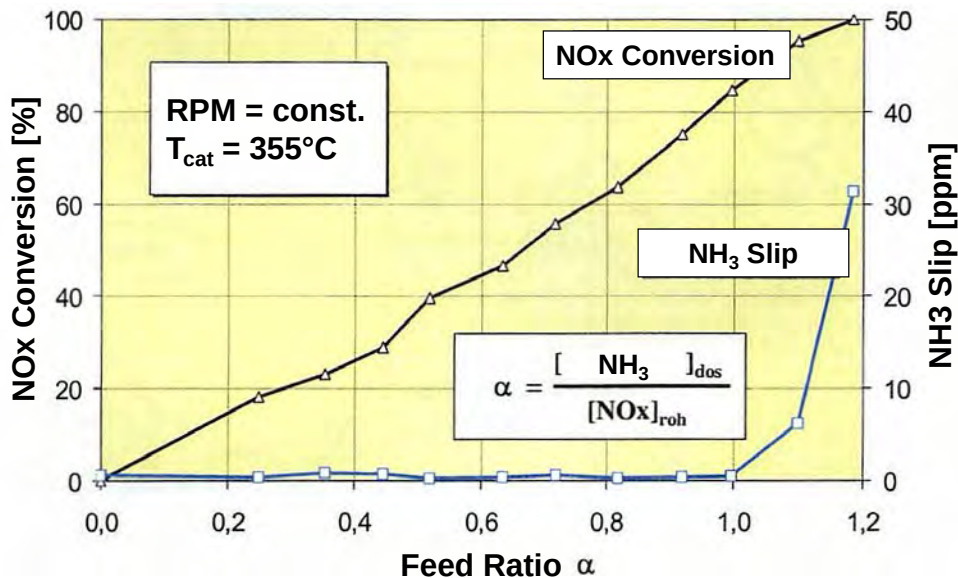


Abbildung 12: NO_x-Konvertierungsrate und NH₃-Durchbruch als Funktion des Feedverhältnisses [Quelle Bosch]

Man erkennt, dass bei den hier dargestellten (konstanten!) Randbedingungen eine NO_x-Konversionsraten größer 85% nur bei Inkaufnahme eines NH₃-Durchbruches erzielt werden kann. Bei einer Konversionsrate größer 90% wird bereits die Geruchsschwelle überschritten.

Wenn von einem Sicherheits-Engineering-Target von kleiner 5ppm NH₃-Slip ausgegangen wird, dann ergeben sich – beispielhaft – die in **Abbildung 13** dargestellten erreichbaren Konversionsraten, als Funktion der Abgastemperatur.

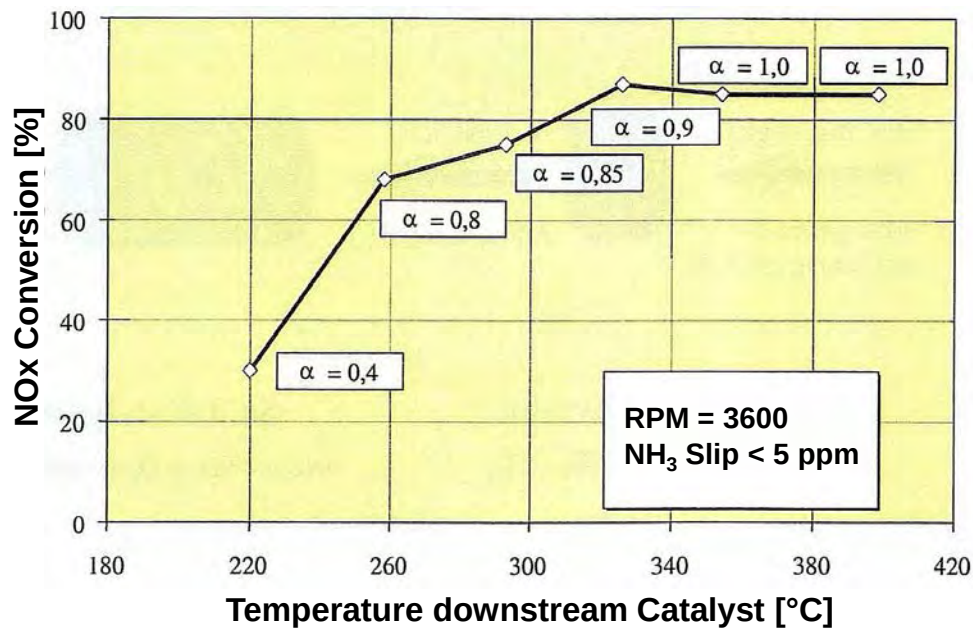


Abbildung 13: NO_x-Konversionsrate als Funktion der Abgastemperatur [Quelle Bosch].

Insbesondere bei niedrigen Abgastemperaturen (d.h. im besonders interessanten Teillastbetrieb) ist die Versuchung sehr groß, zur Steigerung der Konvertierungsrate unzulässig hohe Feedverhältnisse zu verwenden, das heißt: zu viel Harnstoff einzuspritzen.

Die **Abbildung 14** – aus einer öffentlich zugänglichen Masterarbeit an der Chalmers University [1] – zeigt rein beispielhaft, dass insbesondere im transienten Motorbetrieb ohne weiteres NH₃-Durchbrüche von 100 ppm entstehen können.

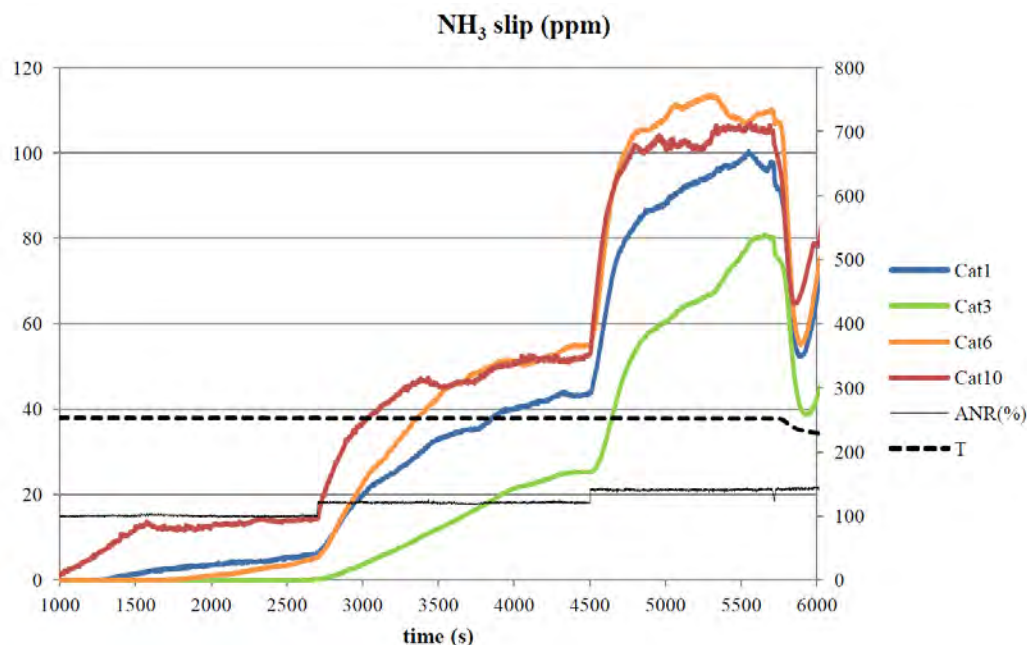


Abbildung 14: NH₃-Durchbruch bei T_{Abg} = 250°C [1]

Selbst bei sorgfältigster Applikation ist also ein dem SCR-Kat nachgeschalteter NH₃-Sperrkat (Abbildung 14) eigentlich unvermeidlich, außer es gelingt die gesetzlichen NO_x-Grenzwerte durchgängig mit Feedverhältnissen zu erreichen, die genügend Sicherheitsab-

stand zum NH_3 -Durchbruch aufweisen. Aber selbst bei Verwendung eines NH_3 -Sperrkats enthebt dies den Applikateur nicht von der zeitraubenden sorgfältigen Applikationsarbeit, das für jeden Betriebszustand korrekte Feedverhältnis zu ermitteln.

Ein NH_3 -Sperrkat muss hochreaktiv beschichtet sein, damit die gewünschte Oxidationsreaktion 10 nahezu ausschließlich abläuft. **Abbildung 15** zeigt, dass nämlich sehr wohl das Potential besteht, dass im Sperrkat statt Reaktion 10 die Reaktionen 11 und 12 ablaufen, die wiederum unerwünschtes NO , bzw. N_2O bilden und damit den Reduktionserfolg des SCR-Kats zunichtemachen können.

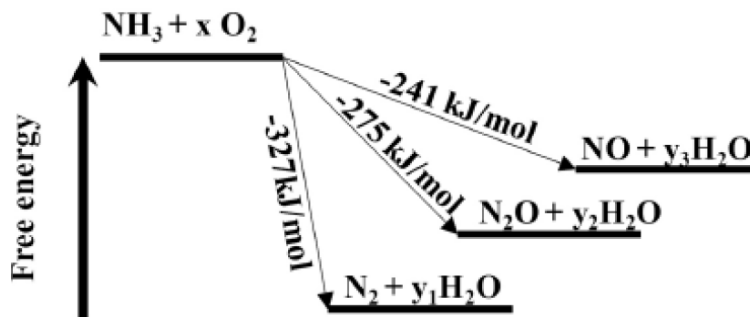


Abbildung 15: Mögliche NH_3 -Reaktionen im Sperrkat [1]

Die Sensitivität des Sperrkats auf die Reaktion 10 kann z.B. durch eine sogenannte Dual Layer Struktur erreicht werden (**Abbildung 16**). Trotzdem ist immer mit der Entstehung von NO und N_2O zu rechnen, so dass – wie oben beschrieben – eine sehr exakte Feedverhältnisapplikation trotz Sperrkat zwingend ist.

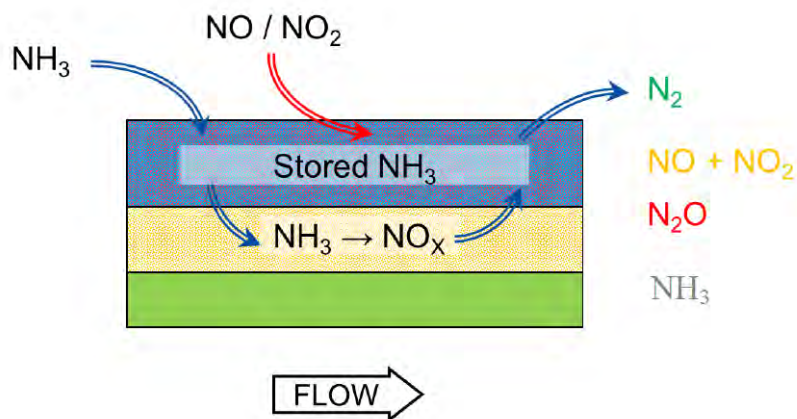


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau eines Dual Layer Sperrkats [Johnson Matthey]

[1] Elena Sala Gil: Evaluation of Ammonia Slip Catalysts,
Master Thesis Chalmers University Göteborg Sweden 2013

11. Abgasgegendruckverhalten / Regelung

Die Nachrüstung des Fahrzeuges mit einem SCR-System erfordert die Positionierung eines zusätzlichen Katalysatorsystems und eines Reduktionsmitteldosiersystems inklusive Reduktionsmittelmischsystem im Hot-End des Abgassystems. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung des Abgasgegendruckniveaus für den Dieselmotor. Hierbei wirkt die Erhöhung des Abgasgegendruckes etwa quadratisch mit der Zunahme des Abgasmassenstroms. Somit hat der Motor eine erhöhte Ladungswechselarbeit zu leisten. Ein erhöhter Abgasgegendruck führt auch zu einer Verschlechterung des Spülverhaltens während der Ladungswechselphase. Der Restgasgehalt steigt mit zunehmendem Abgasgegendruck. Der Abgasgegendruck hat eine direkte Auswirkung auf die Motorleistungscharakteristik und die Nennleistung des Motors. Steigt der Abgasgegendruck im Nennleistungspunkt an, kann dies auch mit einer Reduzierung der Nennleistung verbunden sein.

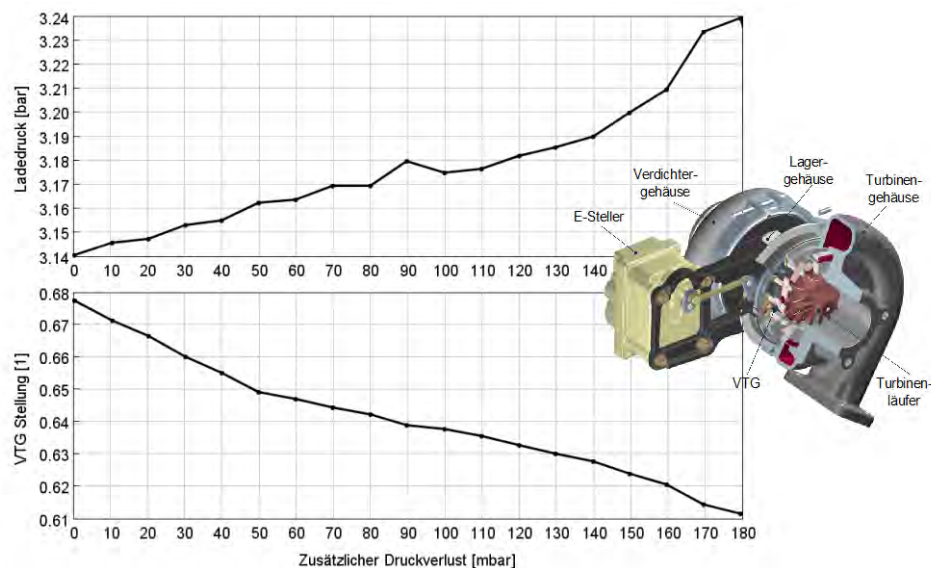


Abbildung 17: Einfluss des Abgasgegendrucks durch Katalysator auf die VTG-Regelung des Turboladers (Beispiel eines 100kW-Dieselmotors bei Nennleistung)

Katalysatoren erzeugen, bedingt durch Strömungseffekte, einen Druckverlust von 100 bis 200 mbar bei maximalem Durchsatz. Dieser Druckverlust beinhaltet auch Störungen durch Sensoren oder Misch-Elemente. Bei der Applikation des Steuergeräts des Motors werden insbesondere Einspritzung, Aufladung und Abgasrückführung für jeden Betriebspunkt eingestellt. Das Gesamtsystem versucht, zusätzliche Verluste auszugleichen. Entscheidend ist das insbesondere für zwei Themenbereiche: a) Inwieweit ist die Regelung des Motors in der Lage, den zusätzlichen Druckverlust zu kompensieren. Wenn Sie das nicht möglich ist, kann es wie oben beschrieben zu einem Leistungsverlust kommen. b) Inwieweit ist der Turbolader in der Lage, den Strömungsverlust auszugleichen. **Abbildung 17** zeigt an einer Beispielrechnung den Zusammenhang zwischen dem „zusätzlichen Druckverlust“ und dem dadurch zusätzlich notwendigem Ladedruck bzw. der daraus resultierenden Veränderung der VTG-Position. Mit der VTG (Variable Turbinen-

Geometrie) wird eingestellt, wie hoch die Leistung der Turbine ist, die den Verdichter antreibt, der wiederum den zusätzlichen Druckverlust kompensiert. Bei der Auslegung von Verbrennungsmotoren werden Turbolader exakt an den Motor angepasst. Turbolader gehören zu den Bauteilen, die am individuellsten auf den jeweiligen Motor angepasst werden müssen. Dabei erfolgt die Anpassung an verschiedenen Grenzen. Zu berücksichtigen sind z.B. das Durchsatzverhalten, die maximale Temperatur, das Ansprechverhalten, die Verdichterpumpgrenze, die maximal zulässige Turbolader-Drehzahl und nicht zuletzt den Regelbereich der VTG. Es kann nicht einfach davon ausgegangen werden, dass der zusätzliche Druckverlust durch den SCR-Katalysator automatisch durch die Turbolader-Regelung kompensiert werden kann.

Neben der Auswirkung auf die Motorleistung und den Regelbereich ist mit Auswirkungen auf die thermodynamischen Motorbetriebsgrenzen zu rechnen. Hierbei sind z.B. die Abgastemperaturen oder Betriebsmitteltemperaturen zu nennen.

12. Elektrische Bordleistung für Katalysatorheizung

Abgasnachbehandlungsmaßnahmen erfordern, wie bereits obenstehend ausgeführt wurde, eine ausreichende Abgas- bzw. Katalysatortemperatur, um zuverlässig und mit ausreichender Umsatzrate zu funktionieren. Zusätzlich gibt es hier noch weitere Aspekte zur Funktionssicherheit zu beachten. So erfordert insbesondere die Eindüsung von Adblue bei SCR-Systemen eine Mindesttemperatur, um nicht in die Gefahr der geschilderten, unerwünschten Umwandlungs- und Ablagerungseffekte zu kommen. Im Kalt- und Niedriglastbetrieb eines Motors treten durchaus Abgastemperaturen im Bereich 120 - 150°C häufig auf, während eine Mindestabgastemperatur im Bereich >180°C benötigt wird.

Die folgende Abbildung 18 zeigt exemplarisch die benötigten Wärmeleistungen, um einen Abgasmassenstrom von 100 kg/h um einen definierten Temperaturbetrag zu erhöhen. Es wurde eine typische dieselmotorische Abgaszusammensetzung mit $\lambda=4$ angenommen.

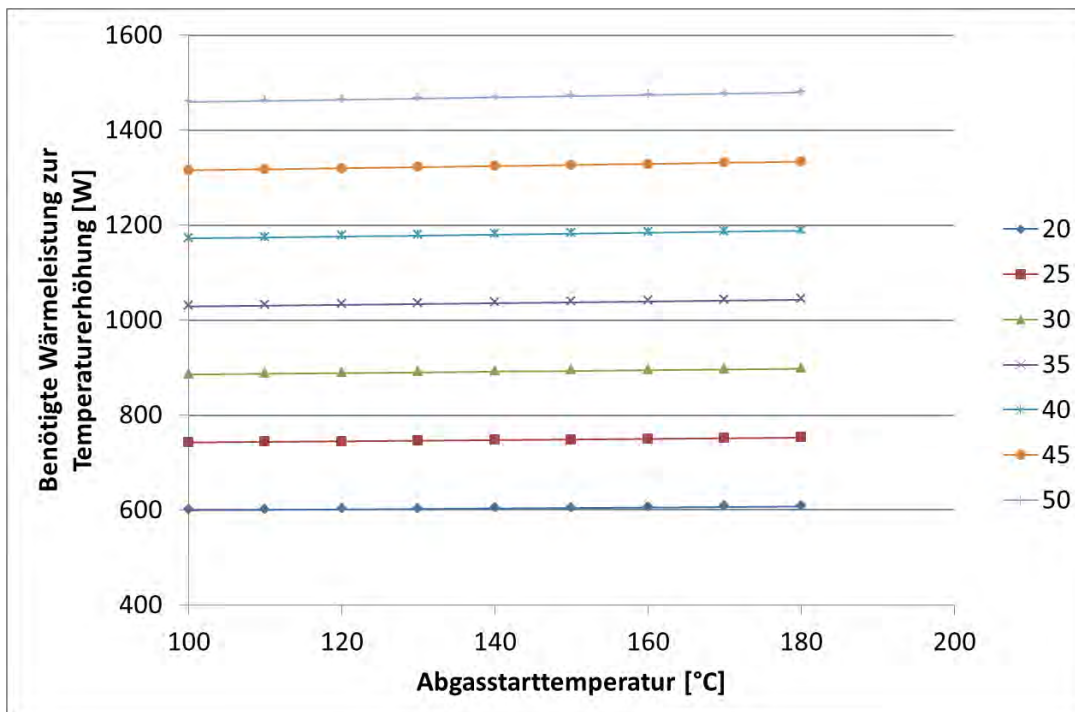


Abbildung 18: Benötigte Wärmeleistungen in Abhängigkeit der Abgastemperatur und der Temperaturerhöhung bei einem Massenstrom von 100 kg/h

Schon ab einer benötigten Temperaturerhöhung von 35°C wird für diesen Fall eine Wärmeleistung von mehr als 1kW benötigt. Für den Fall einer elektrischen Heizeinrichtung, um diesen Temperaturhub zu erreichen, muss diese Leistung über das elektrische Bordnetz zur Verfügung gestellt werden. Da solche Heizmaßnahmen im Wesentlichen während Kaltstart- und Warmlaufphasen eingesetzt werden müssen, konkurriert dieser elektrische Bedarf teilweise mit weiteren anderen Komponenten im Fahrzeug, die ebenfalls einen erhöhten elektrischen Leistungsbedarf aufweisen.

Typische elektrische Leistungsumfänge liegen bei

- PTC-Heizelementen für die Innenraumheizung (notwendig, um in der gesetzlich geforderten Zeit die Frontscheiben von Kondensat zu befreien): 1,5kW
- Glühleinrichtungen (seit 2001 bei mehreren Herstellern verbaute Diesel-Schnellstart-Glühsysteme) verbrauchen in den ersten ca. 3 Sekunden des Startes um 1,2kW anschließend ca. 0,5kW bei einem Vierzylinder-Motor in der Warmlaufphase. Bei Systemen mit Keramik-Glühkerzen ist die benötigte Leistung in den ersten Sekunden höher (2kW) und anschließend niedriger als bei Stahl-Glühkerzen.
- Scheibenheizungen (liegen zw. 150W Heckscheibe und 1400W Frontscheibe)

Nun sind durchschnittliche Diesel-Fahrzeuggordnetze auf eine Gesamtbelastung <3,5kW ausgelegt. Die größte Herausforderung im Alltagsbetrieb ist die Kombination aus typischem Kurzstreckenverkehr, in dem mehrmals höhere elektrische Leistungen benötigt werden (Starter mit 1,5-2kW, Glühsystem) und zudem Komfortanwendungen bedient werden (Sitzheizung, zusätzliche Lüfter, ...). Im Kurzstreckenverkehr ist der Fahrzeug-generator nicht mehr in der Lage, die benötigte Arbeit auszugleichen. Die Batteriespannung sinkt in Folge dessen und eine Überlastung des elektrischen Bordnetzes eines Fahrzeuges droht insbesondere bei kälteren Außentemperaturen (**Abbildung 19**).

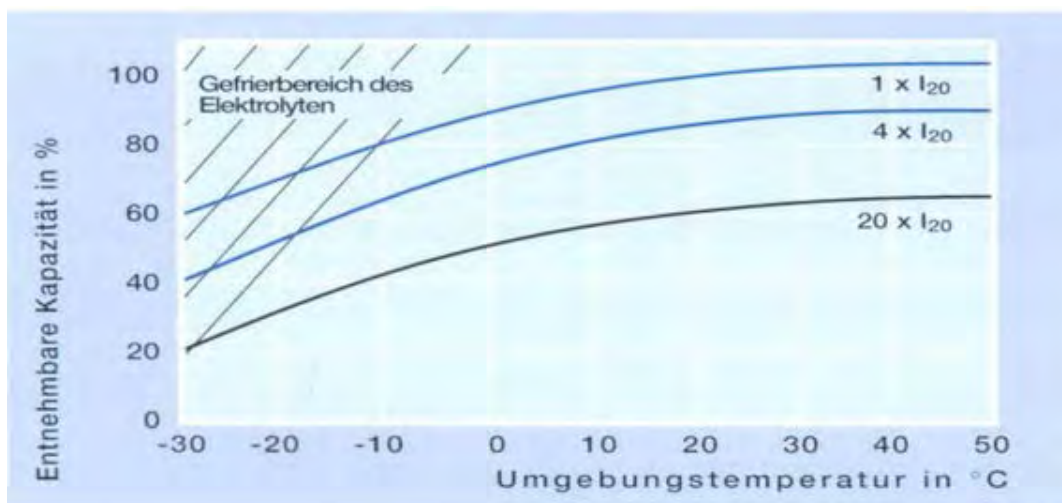


Abbildung 19: Entnehmbare Kapazität einer Bleisulfatbatterie als Funktion der Umgebungstemperatur (Quelle: <http://www.akkutron.at/blog/view/temperatureinfluss-kolumne-teil-6>)

Da moderne Fahrzeuge (teilweise auch bereits bei EU5-Kalibrierungen) über eine Stopp-Start-Automatik verfügen, sind diese mit einem Bordnetzmanagement-Steuergerät ausgestattet, häufig auch (elektrischer) Energiemanager genannt, das das Zu- und Wegschalten angeforderter Komponenten priorisiert und ggf. bei schwacher Batterieleistung sicherheitsrelevante Verbraucher bedient und komfortrelevante Verbraucher (Sitzheizung etc.) deaktiviert. Wie sensibel diese Thematik ist, kann daran erkannt werden, dass teilweise zusätzliche Stützbatterien verbaut wurden, um ein Flackern der Lampen beim Motorwiederstart zu vermeiden.

Die Integration von Leistungsverbrauchern >500W ohne Integration in das Bordnetzmanagement birgt die Gefahr, das restliche Bordnetz überzubelasten und die gesetzlich geforderten Komponenten (s.o. Beschlagfreiheit Scheiben, OBD-relevante Komponenten wie Glühsystem, Flackern der Fahrzeugbeleuchtung) außer Funktion zu setzen. Eine zusätzliche elektrische Belastung durch eine Abgasheizung würde zu einer deutlich erhöhten Ausfallrate von Fahrzeugen im Feld aufgrund zu niedrigerer Batteriespannung führen!

Die Bordnetzmanagement-Steuergeräte haben zudem die Funktion, den Gesamt-Energiebedarf zu minimieren, da in erster Näherung 100W Bedarf eines elektrischer Verbrauchers zu 0,1l Mehrverbrauch führen (Quelle: https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/Elektrische_Verbraucher.aspx).

13. Kabelsatz, E/E

Um das SCR-System zu betreiben, ist die Einbindung des Nachrüstsystems in die Fahrzeugelektrik notwendig. Sowohl das Tanksystem, das Dosierventil, die Sensoren und die elektronische Steuereinheit müssen aus dem elektrischen Bordnetz versorgt werden. Hierbei sind elektrische Leitungen durch das gesamte Fahrzeug zu verlegen, weil der Katalysator aus thermischen Gründen motornah im vorderen Bereich des Fahrzeugs eingebaut werden sollte, ein Adblue-Tank jedoch in typischen Anwendungsfällen nur Platz im Kofferraum findet. Die Leistungsaufnahmen der einzelnen Komponenten und die maximale Leistungsaufnahme des Gesamtsystems sind zu beachten. Insbesondere in bestimmten kritischen Fahrzuständen maximaler elektrischer Leistungsaufnahme des Gesamtfahrzeuges ist die Funktion des SCR-Systems gegebenenfalls auch gegenüber sicherheitsrelevanten Stromverbrauchern zu priorisieren. Für den Fall einer temporär nicht ausreichenden elektrischen Leistung des Generators ist die Anpassung der Leistungsbereitstellung durch den Batteriespeicher des Fahrzeuges zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Ggf. kann es notwendig sein, ein zusätzliches Bordnetz (12Volt Stützbatterie, 48Volt Sekundärkreis) einzuführen.

Beim Verbau von komplexen SCR-Nachrüstsystemen stellt sich auch die Frage nach möglichen Auswirkungen auf das Crashverhalten der Serienfahrzeuge. Je nach verbauter Technologie und Positionierung innerhalb des Fahrzeuges können sich Auswirkungen auf das Crashverhalten und damit die Sicherheit der Fahrzeuginsassen ergeben. Dies gilt auch für das elektrische Bordnetz. Hierbei ist zu prüfen, ob bestimmte Komponenten von Crashzonen fernzuhalten sind.

Zusätzlich zum mechanischen Crashverhalten ist bei Nachrüstsystemen die Sicherheit gegen Ruptur des Tanks, von Versorgungsleitungen und stromführenden Kabeln zu bewerten. Insbesondere Fahrzeugelektrik und Wasser bedürfen einer Absicherung gegen ungewollten Kontakt.

14. Reifegradabsicherung und Absicherungsbedarf

Die bekannten und im Rahmen dieser Studie diskutierten Hardware-Nachrüstlösungen befinden sich nach realistischer Einschätzung durchweg noch nicht in einem Stadium der Serienreife.

Zur objektiven Bewertung des Reifegrades von technischen Produkten und Systemlösungen wird in der Automobilindustrie auf standardisierte Verfahren zur Einschätzung der Produktreife zurückgegriffen. Ein sehr weit verbreitetes Werkzeug hierfür ist die Bewertung des TRL (Technical Readiness Level), zu Deutsch etwa „Technologie-Reifegrad“, einem standardisiertem Verfahren, welches ursprünglich für die Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Es ist sehr gut geeignet, die technische Robustheit und den jeweiligen Entwicklungsstand in seinen neun Stufen zu beschreiben [siehe: https://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf, letzter Zugriff: 18.01.2018].

Die Abstufung der TRL-Stufen, übertragen auf die Produktentwicklungszyklen und Absicherungsprozesse in der Automobilindustrie, ist folgende:

- **TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips**
Die wissenschaftliche Grundlagenforschung ist abgeschlossen. Grundlegende Prinzipien sowie die Umrisse des Prozesses sind festgelegt.
- **TRL 2: Beschreibung des Technologiekonzepts und/oder der Anwendung einer Technologie**
Theorie und wissenschaftliche Grundlagen fokussieren auf spezifische Anwendungsbereiche, um das technologische Konzept zu definieren. Anwendung und Durchführungskriterien wurden formuliert. Entwicklung von analytischen Methoden zur Simulation oder Untersuchung der Anwendung ist abgeschlossen.
- **TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie, „Proof of Concept“**
Eine Prüfung (experimenteller Beleg) des Konzeptes hat stattgefunden. Forschung / Entwicklung wurde mit den ersten Laboruntersuchungen gestartet. Nachweis der generellen Machbarkeit durch Laborversuche ist erfolgt.
- **TRL 4: Versuchsaufbau im Labor**
Eigenständiger Prototypenbau, Implementierung und Test, Integration der technischen Elemente. Versuche mit komplexen Aufgabenstellungen oder Datensätzen.

- **TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung**

Versuchsaufbau wird intensiv in relevanter Umgebung erprobt. Wesentliche Technikelemente wurden mit den unterstützenden Elementen verbunden. Prototypenimplementierung entspricht der Zielumgebung und Schnittstellen.

- **TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung**

Prototypenimplementierung mit realistischen komplexen Problemen ist erfolgt und teilweise in existierende Systeme integriert. Begrenzte Dokumentation ist verfügbar. Die technische Machbarkeit ist im aktuellen Anwendungsbereich komplett nachgewiesen.

- **TRL 7: Prototyp im Einsatz**

Demonstration des Versuchsaufbaus im betrieblichen Umfeld ist erfolgt. System ist beinahe maßstabsgetreu zum betrieblichen Umfeld. Die meisten Funktionen für Demonstration und Test sind vorhanden. Eine Integration in die Sicherheits- und Hilfssysteme ist erfolgt.

- **TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich**

Die Systementwicklung ist beendet. Vollständige Integration in die betriebliche Hardware und Softwaresysteme ist erledigt. Großteil der Benutzerdokumentation, Ausbildungsdokumentation und Wartungsdokumentation sind verfügbar. Das System wurde funktionsgeprüft in simulierten und Betriebsszenarien. Verifizierung und Validierung sind abgeschlossen.

- **TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes**

Das gegenwärtige System wurde intensiv demonstriert und getestet in seiner Betriebsumgebung. Dokumentation vollständig abgeschlossen. Es liegen erfolgreiche Betriebserfahrungen vor.

Wendet man das Klassifizierungssystem nach TRL auf die den Verfassern der Studie bekannten und die im Rahmen der Abfassung dieser Untersuchung mit den betroffenen Fahrzeugherstellern besprochenen Nachrüst-Lösungsansätze an, ergibt sich ein eindeutiges Bild.

Durchweg alle Lösungen befinden sich in Reifegraden, welche einem TRL von 6 bis 7 entsprechen.

Übertragen auf die Absicherungsanforderungen für automobiler Systeme entspricht dies einem Reifegrad einer laufenden oder gerade abgeschlossenen Vor-Entwicklungsphase.

Nach erfolgreichem Abschluss der Vorentwicklungsphase wird in der Automobilindustrie, gemäß dem sogenannten generischen Synchro-Plan, welcher einen allgemeingültigen Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie beschreibt, eine mindestens dreijährige

Serienentwicklungsphase nachgeschaltet [*Qualitätsmanagement in der gesamten Wertschöpfungskette, ATZproduktion 01/2008, S. 6f*].

In diesem Zeitraum muss neben der Sicherstellung einer qualitativ und quantitativ abgesicherten Teileversorgung auch ein Mindestmaß an funktionalen und mechanischen Absicherungsversuchsreihen durchgeführt werden. Nur eine derartige Vorgehensweise stellt sicher, dass singuläre Prototyplösungen auf die jeweilig betroffenen Fahrzeugtypen und deren Derivate angepasst werden können, um einen merklichen und nachhaltigen Nutzen der Hardware Nachrüstlösungen zu erreichen.

Dabei kann das Versuchsprogramm zur Absicherung möglicherweise um einige Bausteine reduziert werden. Die Erfahrungen aus der Praxis der Fahrzeugabsicherung zeigen, dass mindestens ein 18- bis 24-monatiger Fahrzeugabsicherungsprozess – inklusive je einer Fahrzeugerprobung unter sogenannten „Heiß-Land“-Bedingungen und einer „Kalt-Land“- / Winter-Erprobung - durchgeführt werden muss. Nur dadurch können die Einflüsse extremer Außenbedingungen ermittelt und im Nachrüst-Paket abgesichert und umgesetzt werden. Derartige Gesamtfahrzeugerprobungen sind nicht gleichwertig an Prüfständen durchführbar, da hier die Interaktion aller Komponenten und Systeme im Fahrzeug, wie beispielsweise der Einfluss der Karosserieanregung auf Antrieb und Abgasanlage, betrachtet wird.

Die Absicherung des Fahrzeuggesamtsystems wird dabei mit Hilfe kundenorientierter Prüfläufe im öffentlichen Straßenverkehr und ausfallorientierten Raffungs-Prüfläufen auf speziellen Handling-Prüfstrecken und Rüttelstrecken durchgeführt. Diese sich „zufällig“ ergebenden Rand- und Betriebsbedingungen sind für die Absicherung sehr wichtig. Es treten dabei Schadensbilder zu Tage, welche unter Umständen bislang unbekannt waren und aufgrund der vordefinierten äußeren Randbedingungen am Prüfstand nicht in Erscheinung getreten sind.

Dieser Zeitraum lässt sich für abgesicherte Nachrüstlösungen aufgrund der großen Anzahl betroffener Dieselfahrzeuge nicht wesentlich verkürzen. Eine Teileversorgung muss aufgebaut und der Qualitätsabsicherungsprozess dafür zwingend durchlaufen werden.

Aus den oben aufgeführten Gründen erscheint eine branchenübliche Absicherung von Nachrüstlösungen jeglicher Art unabdingbar. Ein Verzicht auf die Absicherung wird das Risiko von Ausfällen der nachgerüsteten Systeme und auf die Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs drastisch erhöhen.

Sollten nachgerüstete Fahrzeuge durch Ausfälle, Schäden oder Pannenhäufigkeit negativ auffallen, wird die Attraktivität einer Fahrzeugnachrüstung massiv abnehmen. Die wirtschaftlichen Folgekosten für die Hersteller der Nachrüstlösung und die betroffenen Fahrzeugeigentümer bedeuten neben nicht auszuschließenden Personenschäden ein unkalkulierbares Risiko.

Ein weiterer zu klärender haftungsrechtlicher Aspekt ist die Frage der Zuständigkeit für die auftretenden Garantie- und Qualitätssicherungskosten, welche durch unzureichende Produktabsicherung hervorgerufen werden.

15. Kostenerstbewertung

Durch die Tagespresse und andere Medien werden stark unterschiedliche Kostenabschätzungen für eine wirksame und realisierbare SCR-Nachrüstlösungen verbreitet. Diese Meldungen führen zu meist unrealistischen Preisvorstellungen in der Öffentlichkeit.

Basis der in dieser Studie getätigten Kostenerstbewertung, ist der Umfang einer Hardwareumrüstung, welche eine Nachrüstung eines SCR-Katalysatorsystems beinhaltet. Die angegebenen Preise sind als Endverbraucherpreise inklusive Umsatzsteuer zu verstehen.

Als Ausgangsbasis wurden hier exemplarisch die Fahrzeuge aus dem **Vergabelos 2 (BMW 320d EU5 und BMW X3 2.0d EU6b)** ausgewählt, da diese beiden Fahrzeuge von der grundlegenden Konzeption zum Einbau eines SCR-Katalysatorsystems für den Markt in USA und als Sonderausstattung in Europa bereits ausgelegt sind. Für diese länderspezifischen Fahrzeugvarianten existieren demnach bereits Ersatzteilangebote. Diese Ersatzteile für die USA-Varianten der betreffenden Fahrzeuge können allerdings in den meisten Fällen nicht direkt für die Umrüstung genutzt werden, da auf die spezifischen Fahrzeugrandbedingungen sehr genau Rücksicht genommen werden muss. Der Rückschluss, der oft in der Presse gezogen wird, dass die notwendigen Teile für eine SCR-Nachrüstung bereits fertig entwickelt und verfügbar sind, ist falsch und unseriös.

Für Fahrzeuge anderer Hersteller ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch hier müssen die notwendige Hardware und die Motorsteuerungsfunktionen zumeist noch entwickelt werden. Insbesondere bei Steuergerätekomponten und den großen Bauteilen der Abgasanlage - wie der Verrohrung und den Katalysatoren - sind teils erhebliche Entwicklungsaufwände erforderlich, um sie für eine Nachrüstlösung einsetzen zu können.

Die Bewertung der Kosten für die Entwicklungsaufwände von Fahrzeugherstellern und Anbietern von Stand-Alone-Nachrüstlösungen ist nicht Inhalt dieser Studie.

Der Werkstatt-Stundensatz wird in dieser Betrachtung mit 110€ beziffert (Mittelwert aus eigenen Recherchen und publizierten Werkstatttests). Der zeitliche Umbauaufwand im Zuge einer Hardware-Nachrüstung auf ein SCR-Katalysatorsystem ist erheblich. Insbesondere der Umfang der Arbeiten für den Austausch bzw. die Überarbeitung der betroffenen Kabelbäume – beim EU5-Fahrzeug sind Motor und Unterboden-Kabelstrang betroffen – muss mit einem mindestens zweistelligen Arbeitsstundenaufwand angesetzt werden. Die fahrzeugspezifischen Kabelsätze sind durchweg sehr kompliziert und unzugänglich im Fahrzeug verlegt und nicht für eine Erweiterung oder einen einfachen Austausch ausgelegt. Das bedeutet, um Kabelbäume neu zu verlegen oder fachmännisch zu erweitern, dass in der Regel auch sehr viele nicht betroffene Komponenten aus- und wieder eingebaut werden müssen. Bei Eingriffen in die Verkabelung ist besonders darauf zu achten, dass die Leitungen vor Überhitzung an der Abgasanlage geschützt sind und keine Probleme beim Crash oder bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) auftreten.

Die Kostenerstbewertung wurde für drei Fälle durchgeführt.

Fall 1: Aufrüstung eines EU5-Fahrzeugs (ohne NO_x-Abgasnachbehandlung) mit einem NO_x-Speicherkatalysator plus SCR-Katalysatorsystem im Fahrzeugunterboden und flüssiger Adblue-Dosierung (vgl. Fahrzeug aus Vergabe-Los 2: BMW 320d EU5)

Basis EU5 (ohne NO_x-Abgasnachbehandlung) inkl. NSK-Nachrüstung	Einzelpreis / Stundensatz	benötigte Stückzahl	Kosten pro Fahrzeug
Dieselpartikelfilter (DPF) / NO _x -Speicherkatalysator (NSK) - Einheit inkl. Abgasrohr (NO/NO ₂ angepasst)	1.369,06 €	1	1.369,06 €
Primäres Abgasrohr - ab Faltenbalg inkl. SCR-Katalysator, Mischer & Isolierung	1.131,44 €	1	1.131,44 €
Lambda Sonde (Breitband)	202,70 €	1	202,70 €
Abgas-Temperatursensor	54,47 €	1	54,47 €
NO _x -Sensor (Führungs- und Kontrollsonde)	300,00 €	2	600,00 €
AdBlue-Tank (aktiv, beheizt) inkl. Füllstandssensorik	490,00 €	1	490,00 €
AdBlue-Leitungen (beheizt)	145,00 €	1	145,00 €
AdBlue-Dosiermodul (gekühlt)	156,00 €	1	156,00 €
Heizung/Kühlung SCR-Dosiermodul (Systemkosten)	150,00 €	1	150,00 €
Motorsteuergerät erforderlich für NSK-Nachrüstung	750,00 €	1	750,00 €
SCR Steuergerät für AdBlue Dosierung	100,00 €	1	100,00 €
Tankstutzen-Modul	55,00 €	1	55,00 €
Kabelbaum im Fzg.-Unterboden	175,00 €	1	175,00 €
Kabelbaum im Fzg.-Motoraum	340,00 €	1	340,00 €
Kleinteile (Abschirmungen, Abdeckungen, Halter, etc.)	250,00 €	1	250,00 €
Generator (leistungsverstärkt für zus. AdBlue-Heiz-Anforderungen)	175,00 €	1	175,00 €
Kontroll- und Überwachungsanzeigen (einfachste Ausführung)	50,00 €	1	50,00 €
Arbeitszeiten			- €
Karosserie-Arbeiten	110,00 €	3	330,00 €
Umbau / Einbau AGA & SCR-System	110,00 €	10	1.100,00 €
Kabelbaum ändern	110,00 €	12	1.320,00 €
E/E - Bedienkonzept	110,00 €	3	330,00 €
			- €
Netto			9.273,67 €
19% MwSt.			1.762,00 €
Brutto			11.035,67 €

Tabelle 1: Fall 1

Einen nicht unerheblichen Kostenpunkt stellt der für die SCR-Systemnachrüstung erforderliche Tausch des DPF/Oxidations-Katalysators dar. Für die Erreichung einer wirksamen SCR-Katalyse - insbesondere bei im Stadtverkehr auftretenden niedrigen Abgastemperaturen - ist ein angepasstes NO/NO₂-Verhältnis im Abgas erforderlich. Dieses wird von den Oxidationskomponenten im DPF/Oxidations-Katalysator erzeugt, welche hierauf abgestimmt sein müssen.

Fall 2: Aufrüstung eines EU5-Fahrzeugs (ohne serienmäßige NO_x-Abgasnachbehandlung) mit einem SCR-Katalysatorsystem im Fahrzeugunterboden und flüssiger Adblue-Dosierung (vgl. Fahrzeug aus Vergabe-Los 2: BMW 320d EU5)

Basis EU5 (ohne NO _x -Abgasnachbehandlung) ohne NSK-Nachrüstung	Einzelpreis / Stundensatz	benötigte Stückzahl	Kosten pro Fahrzeug
NO/NO ₂ angepasste Oxidations-Katalysator / Dieselpartikelfilter - Einheit inkl. Abgasrohr	1.369,00 €	1	1.369,00 €
Primäres Abgasrohr - ab Faltenbalg inkl. SCR-Katalysator, Mischer & Isolierung	1.131,44 €	1	1.131,44 €
Abgas-Temperatursensor	54,47 €	1	54,47 €
NO _x -Sensor (Führungs- und Kontrollsonde)	300,00 €	2	600,00 €
AdBlue-Tank (aktiv, beheizt) inkl. Füllstandssensorik	490,00 €	1	490,00 €
AdBlue-Leitungen (beheizt)	145,00 €	1	145,00 €
AdBlue-Dosiermodul (gekühlt)	156,00 €	1	156,00 €
Heizung/Kühlung SCR-Dosiermodul (Systemkosten)	150,00 €	1	150,00 €
SCR Steuergerät für AdBlue Dosierung	100,00 €	1	100,00 €
Tankstutzen-Modul	55,00 €	1	55,00 €
Kabelbaum im Fzg.-Unterboden	175,00 €	1	175,00 €
Kleinteile (Abschirmungen, Abdeckungen, Halter, etc.)	250,00 €	1	250,00 €
Generator (leistungsverstärkt für zus. AdBlue-Heiz-Anforderungen)	175,00 €	1	175,00 €
Kontroll- und Überwachungsanzeigen (einfachste Ausführung)	50,00 €	1	50,00 €
Arbeitszeiten			- €
Karosserie-Arbeiten	110,00 €	3	330,00 €
Umbau / Einbau AGA & SCR-System	110,00 €	8	880,00 €
Kabelbaum ändern	110,00 €	10	1.100,00 €
E/E - Bedienkonzept	110,00 €	3	330,00 €
			- €
Netto			7.540,91 €
19% MwSt.			1.432,77 €
Brutto			8.973,68 €

Tabelle 2: Fall 2

Fall 3: Aufrüstung eines EU6b-Fahrzeugs (mit serienmäßiger NO_x-Abgasnachbehandlung durch einen NO_x-Speicherkatalysator) mit einem SCR- Katalysatorsystem im Fahrzeugunterboden und flüssiger Adblue-Dosierung (vgl. Fahrzeug aus Vergabe-Los 2: BMW X3)

EU6b mit NSK auf NSK + SCR	Einzelpreis / Stundensatz	benötigte Stückzahl	Kosten pro Fahrzeug
Primäres Abgasrohr - ab Faltenbalg inkl. SCR-Katalysator, Mischer & Isolierung	1.131,44 €	1	1.131,44 €
Abgas-Temperatursensor	54,47 €	1	54,47 €
NO _x -Sensor (Führungs- und Kontrollsonde)	300,00 €	2	600,00 €
AdBlue-Tank (aktiv, beheizt) inkl. Füllstandssensorik	490,00 €	1	490,00 €
AdBlue-Leitungen (beheizt)	145,00 €	1	145,00 €
AdBlue-Dosiermodul (gekühlt)	156,00 €	1	156,00 €
Heizung/Kühlung SCR-Dosiermodul (Systemkosten)	150,00 €	1	150,00 €
SCR Steuergerät für AdBlue Dosierung	100,00 €	1	100,00 €
Tankstutzen-Modul	55,00 €	1	55,00 €
Kabelbaum im Fzg.-Unterboden	175,00 €	1	175,00 €
Kleinteile (Abschirmungen, Abdeckungen, Halter, etc.)	250,00 €	1	250,00 €
Arbeitszeiten			- €
Karosserie-Arbeiten	110,00 €	1	110,00 €
Umbau / Einbau AGA & SCR-System	110,00 €	8	880,00 €
Kabelbaum ändern	110,00 €	9	990,00 €
E/E - Bedienkonzept	110,00 €	2	220,00 €
			- €
Netto			5.506,91 €
19% MwSt.			1.046,31 €
Brutto			6.553,22 €

Tabelle 3: Fall 3

Für den **Fall 3** – einer Aufrüstung eines EU6b-Fahrzeugs mit Speicherkatalysator ohne aktives SCR-System - wird gegenüber **Fall 2** angenommen, dass ein Anzeige und Bedienkonzept bereits vorgehalten ist und dass die Generatorleistung für die zusätzlichen SCR-Komponenten ausreicht. Zusätzlich wurde für obigen Fall angenommen, dass der hier serienmäßig verbaute NO_x-Speicherkatalysator auf ein NO/NO₂-Verhältnis wie es vom SCR-Katalysator benötigt wird, abgestimmt ist.

Diese Annahmen können auf diejenigen Fahrzeuge zutreffen, bei denen eine SCR-Abgasnachbehandlung serienmäßig ab Werk für Fahrzeuge zukünftiger Modelljahre vorgehalten wurde.

Für den Fall 2 ist mit einer stark verringerten NO_x-Konvertierung - während innerstädtischem Verkehr - im Vergleich mit dem Fall 1 und **Fall 3** zu rechnen. Dies liegt daran, dass die notwendigen Abgastemperaturen im Stadtverkehr für den Betrieb des SCR-Katalysators im Unterboden nur eingeschränkt erreicht werden. Je nach Fahrzeug-Konfiguration sind bei Geschwindigkeiten bis 60km/h mit einer Konfiguration, wie im Fall 2, nur maximale NO_x-Umsatzraten im Bereich von 40-60% zu erwarten. Für höhere Geschwindigkeiten können aber auch mit einem Fahrzeug, welches die in Fall 2 beschriebene Konfiguration aufweist, prinzipiell auch NO_x-Umsatzraten bis zu 90% werden. Die hier genannten Kosten sind eine erste Abschätzung auf der Basis von

- frei verfügbaren Ersatzteilkosten der angefragten Fahrzeughersteller
- eigenen Recherchen und Erfahrungswerten
- sinnvollen Annahmen zur Betriebs- und Regelungsstrategie

Exakte fahrzeugspezifische Kosten müssen auf Basis der konstruktiven und funktionalen Randbedingungen in deutlich tiefergehenden und aufwändigeren Untersuchungen ermittelt werden.

Alle hier vorgestellten Kostenerstbewertungen berücksichtigen keine Einsparungspotenziale, welche sich durch eine Erhöhung der Stückzahlen (sog. Stückzahleneffekte) bei der Umrüstung ganzer Fahrzeugflotten ergeben können. Hier könnte unter Umständen durch einen erweiterten Gleichteileansatz der Preis für einzelne Komponenten etwas gesenkt werden. Weiteres Einsparungspotenzial besteht bei den Logistikkosten und den Aufwendungen für die Lagerhaltung der erforderlichen Bauteile. Die Entwicklung und Bereitstellung fahrzeugspezifischer Erweiterungskabelsätze könnte zudem auch eine Reduktion der Werkstattkosten bewirken. Der Entwicklungsaufwand um diese Kostenpotenziale erschließen zu können, ist allerdings aufgrund der zu erwartenden Variantenvielfalt als sehr hoch einzustufen.

Zieht man sämtliche aufgeführten Einspareffekte in Betracht, kann ein maximales Einsparpotenzial - realistisch geschätzt - auf maximal bis zu 30% erreicht werden.

16. Verbrauchseinflüsse

16.1 Abgasgegendruck

Mehr oder minder jedwede zusätzliche Einbauten in den Abgasstrang führen durch einen zusätzlichen Strömungswiderstand zu einer Erhöhung des Abgasgegendrucks.

Bei der Nachrüstung einer SCR-Anlage handelt es sich bei den Abgasanlageneinbauten im Wesentlichen um das Harnstoffdosiermodul mit Harnstoffeinblasung, einem Mischer im Abgas und eventuell einem Hydrolysekatalysator, sowie dem eigentlichen SCR-Katalysator, dem sich gegebenenfalls noch ein sogenannter NH_3 -Sperrkatalysator anschließt.

Da es sich bei den meisten zu betrachtenden Dieselmotoren um turboaufgeladene Motoren handelt, muss hinsichtlich der Wirkung einer Abgasgegendruckerhöhung auch beachtet werden, dass eine Abgasgegendruckerhöhung nach Turbine prinzipiell zu einer Ladedruckabsenkung führen würde, da sich das für die Wellenleistung des Abgasturboladers relevante Druckverhältnis vor/nach Turbine verändert, sofern von einem konstanten Druck vor Turbine ausgegangen wird.

Wird der Druck vor Turbine aber erhöht, um den Ladedruckverlust und damit den Drehmoment- und Leistungsverlust zu kompensieren, so ist dies immer mit einer Verbrauchserhöhung verbunden, da dies über einen schlechteren thermodynamischen Wirkungsgrad des Prozesses erkauft werden muss.

Zudem verschlechtert sich im Normalfall noch additiv die Ladungswechselarbeit, da die Erhöhung des Druckes vor Turbine nicht in eine identische Erhöhung des Ladedruckes umgesetzt werden kann. Dies führt zu einer weiteren Verbrauchserhöhung.

In der Teillast werden bei einem Dieselmotor keine ladedruckerhöhenden Maßnahmen zur Drehmomentsteigerung notwendig. Allerdings werden durch die geänderten Abgasgegendruckverhältnisse die Abgasrückführrate und das globale Kraftstoff-Luftverhältnis verändert. Beides bedarf einer regelungsseitigen Kompensation. Dies kann sowohl verbrauchserhöhend wirken, als auch zu einer Zunahme der Partikelemissionen führen. Letzteres wiederum führt zu einer häufigeren thermischen Regeneration des DPF, wobei die Einleitung der thermischen Regeneration – je nach Lastzustand und damit Abgastemperatur - zu einem weiteren Kraftstoffmehrverbrauch führt.

Im ungünstigsten Fall liefert das Beladungsmodell des DPF im Steuergerät falsche Werte und führt zu einer zu späten Regeneration, wodurch der DPF überhitzt werden kann mit einem teuren Schaden an der Abgasanlage.

16.2 Kat-Heizverfahren

Da als Hardware-Nachrüstlösung nahezu ausschließlich eine Unterboden-SCR-Anlage in Frage kommt, sind auch sogenannte Kat-Heizmaßnahmen notwendig, um bereits bei für den Stadtbetrieb typischen niedrigen Lastzuständen eine ausreichend hohe Abgastemperatur (ca. mindestens 200°C) am Unterboden-SCR-Kat darzustellen. Diese Kat-Heizmaßnahmen sind sowohl durch den Kaltstart und anschließenden Warmlauf, als auch aus dem thermischen Regenerationsbetrieb des DPF wohlbekannt.

Grundsätzlich stehen bei einem modernen Common-Rail-System zwei Varianten zur Verfügung, die auch gerne kombiniert eingesetzt werden:

- Zum einen gibt es die Möglichkeit einer relativ frühen Nacheinspritzung in den Brennraum. Diese führt nur zu einer relativ geringen Drehmomenterzeugung wegen des schlechten Wirkungsgrades der späten Wärmefreisetzung in der Expansion. Genau dieser schlechte Wirkungsgrad ist aber das Ziel, weil damit die Abgasenthalpie steigt und damit die Abgastemperatur. Bei optimaler Positionierung dieser Nacheinspritzung kann sogar erreicht werden, dass die Partikelnachoxidation im Brennraum verbessert wird und damit der Mehrverbrauch durch die Einleitung der thermischen DPF-Regeneration geringer wird, weil die Regeneration seltener erfolgen muss. Eine derartige Applikation einer sogenannten „angelagerten Nacheinspritzung“ setzt aber auch eine Neubedatung der NO_x -Modelle im Motorsteuergerät voraus, die auch beim Vorhandensein eines NO_x -Sensors notwendig sind, um die EOBD-Anforderungen zu erfüllen (siehe hierzu das OBD-Kapitel).
- Zum anderen kann eine relativ späte Nacheinspritzung realisiert werden. Bei dieser wird angestrebt, dass nahezu keine Drehmomentänderung mehr eintritt, sondern kurzketzige HC- und CO-Emissionen entstehen, die im Oxidationskatalysator (DOC) exotherm oxidiert werden und damit die Abgastemperatur erhöhen. Der DOC muss dazu eine Mindestausgangstemperatur aufweisen. Die maximale Konzentration an CO ist hierbei begrenzt. Es kann zur CO-Vergiftung des DOC kommen. Vorteil dieser Variante ist die höhere Heizwirkung für die SCR-Anlage, da die Abgastemperaturerhöhung erst nach dem DOC entsteht. Zudem ist eine weitgehende Drehmomentneutralität gegeben, die – im Unterschied zur frühen, bzw. angelagerten Nacheinspritzung – keine Anpassung der Haupteinspritzung erfordert, um eine ungewollte Änderung des Drehmomentes zu vermeiden. Wegen der DOC-Restriktionen muss aber, häufig abhängig vom Betriebszustand, entweder zu einer kombinierten Methode mit zwei Nacheinspritzungen oder ausschließlich zur frühen Nacheinspritzung gegriffen werden. Letzteres ist vor allem erforderlich zur Einleitung des Heizbrennverfahrens bei zu niedrigen DOC-Temperaturen.

16.3 Elektrische Verbraucher

Bei Nachrüstung einer SCR-Anlage steigt der elektrische Verbrauch im Wesentlichen durch:

- Heizung des Adblue-Tanks um ein Einfrieren der wässrigen Harnstofflösung im Winter sicher zu verhindern (Gefrierpunkt Adblue: $-11,5\text{ °C}$)
- Heizung der Adblue-führenden Leitungen vom Tank zur Einblasestelle (eventuell durch einen Selbstentleerungsmechanismus der Leitungen zurück in den Tank beim Abstellen des Fahrzeugs vermeidbar)
- Eventuell Heizung des Adblue-Einblaseventils (abhängig vom Selbstentleerungsmechanismus, der Wiederbefülldauer der Leitungen nach Motorstart und der Effektivität des Heizbrennverfahrens)

- Bei Nachrüsterlösungen eventuell elektrische Heizung eines Abgasbypasses zur NH_3 -Erzeugung.

Aufgrund der erheblichen Heizströme ist auf jeden Fall eine Einbindung in den elektrischen Energiemanager des Fahrzeugs erforderlich, damit der Strombedarf nicht in Konkurrenz zu anderen Verbrauchern steht. Z.B. sind die Adblue-Heizungen während des Anlassvorganges abzuschalten um ein Flackern der Lichter bei Dunkelheit sicher zu verhindern (Wie beim W212 mit EU6b gezeigt, hat Daimler wegen der SCR-Anlage sogar aus diesem Grund eine Stützbatterie im Kofferraum neben dem Adblue-Steuergerät verbaut).

Eventuell – und im Einzelfall zu prüfen – ist auch der Austausch des vorhandenen Generators gegen ein stärkeres Exemplar erforderlich. Auch ein Austausch der Fahrzeugbatterie gegen ein Exemplar mit höherer Kapazität kann u.U. notwendig werden.

Auf jeden Fall führen die elektrischen Zusatzverbraucher für sich zu einem nicht zu vernachlässigenden Mehrverbrauch, da die elektrische Leistung über den Generator – mit entsprechenden Wirkungsgradverlusten - vom Verbrennungsmotor erzeugt werden muss.

16.4 Zusammenfassung Kraftstoffverbrauch

Grundsätzlich führen alle hier aufgeführten Mechanismen zu einem Kraftstoffmehrverbrauch. Allerdings – wie exemplarisch an der angelagerten Nacheinspritzung erwähnt – können auch kompensierende Minderverbräuche erschlossen werden, sofern der OEM diese Möglichkeiten bei der komplexen Überarbeitung der Steuergerätebedatung nutzen kann.

Zu diesem Komplex gehört auch die generelle Optimierung der damaligen Steuergerätebedatung, da zwischenzeitlich Optimierungspotentiale sichtbar wurden. Man muss sich dabei vor Augen führen, dass es sich um Datenstände handelt, die zu einem großen Teil bereits vor 10 Jahren entwickelt wurden. Seitdem hat der Erfahrungslevel erheblich zugenommen, und dies betrifft vor allem die verbrauchs- und emissionsoptimale Bedatung von Instationärvorgängen im Motorsteuergerät. Hier stehen mittlerweile Forschungsergebnisse der Gemeinschaftsforschung (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV) zur Verfügung, die schlicht damals nicht verfügbar waren.

Allerdings können diese Potentiale bereits sehr weitgehend mit einem Software-Update durch den OEM erschlossen werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Quantifizierung eines Kraftstoffmehrverbrauchs auf Grund der Vielzahl an Einflussfaktoren und im Feld befindlichen Varianten nicht möglich ist. Die Bandbreite wird hier von minimal, gar nicht (siehe Optimierungspotential) bis hin zu mehreren Prozentpunkten Mehrverbrauch gehen, wobei sich hieraus keine Qualitätsaussage bezüglich des Ausgangszustandes, noch bezüglich des getriebenen Aufwandes ableiten lässt, da die Anzahl der im Feld befindlichen Varianten zu groß ist.

Der Mehrverbrauch von autarken Nachrüstlösungen kann ebenfalls nicht pauschal bewertet, bzw. quantifiziert werden. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass durch zusätzliche elektrische Verbraucher (NH_3 -Erzeugung oder gar Abgasvollstromheizung) und die nicht gegebene Möglichkeit einer verbrauchsoptimalen Einbindung in das Motorsteu-

ergerät, sowie die nicht gegebene Möglichkeit der Optimierung der Einspritz- und Verbrennungsregelung ein erheblicher Mehrverbrauch im Vergleich zu einer Herstellerlösung kaum vermieden werden kann.

17. Zusammenstellung verschiedener Nachrüstlösungen

Seitens Zulieferunternehmen werden für Personenkraftwagen verschiedene Stickoxid-Minderungskonzepte zur Nachrüstlösung angeboten.

17.1 Baumot/Twintec-Lösung BNO_x -System

17.1.1 Aufbau und Funktion

Der Ansatz der Firma Baumot/Twintec basiert auf einem Umbau der Abgasanlage bei Einsatz einfacher, seriennaher Bauteile mit autonomer Regelung. Abbildung 20 zeigt die Systemansicht des BNO_x -Systems.

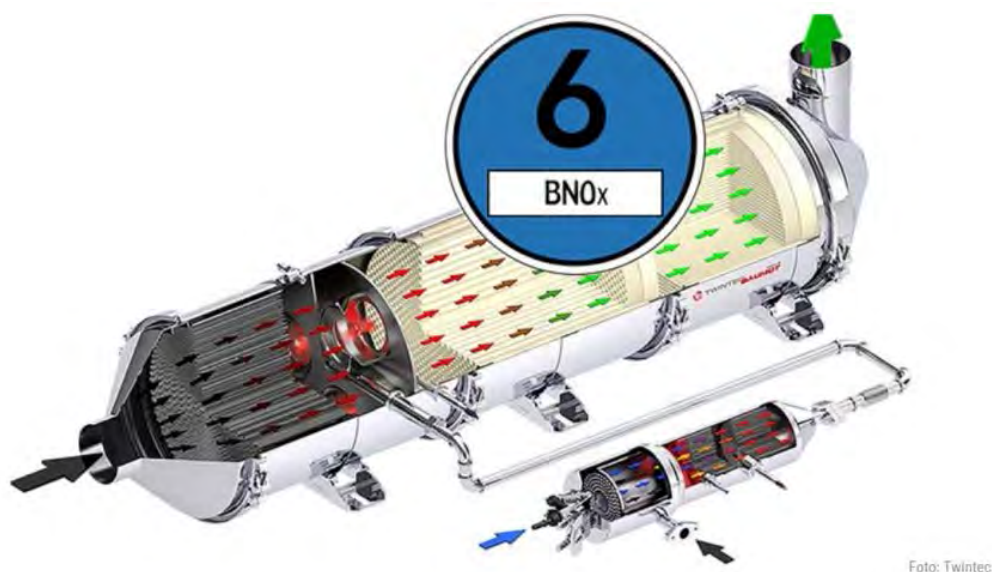


Foto: Twintec

Abbildung 20: NH_3 -Generator des BNO_x -Systems

Ein Kernstück des Konzepts der Firma Baumot/Twintec ist der sogenannte Ammoniak-Generator, bei dem die zur Erzeugung von Ammoniak aus Adblue notwendige Temperatur über thermische und elektrische Energie zur Verfügung gestellt wird. Zum einen wird ein Teil-Abgasmassenstrom verwendet, darüber hinaus wird eine elektrische Heizung eingesetzt. Abbildung 21 zeigt die Systemansicht des NH_3 -Generators.

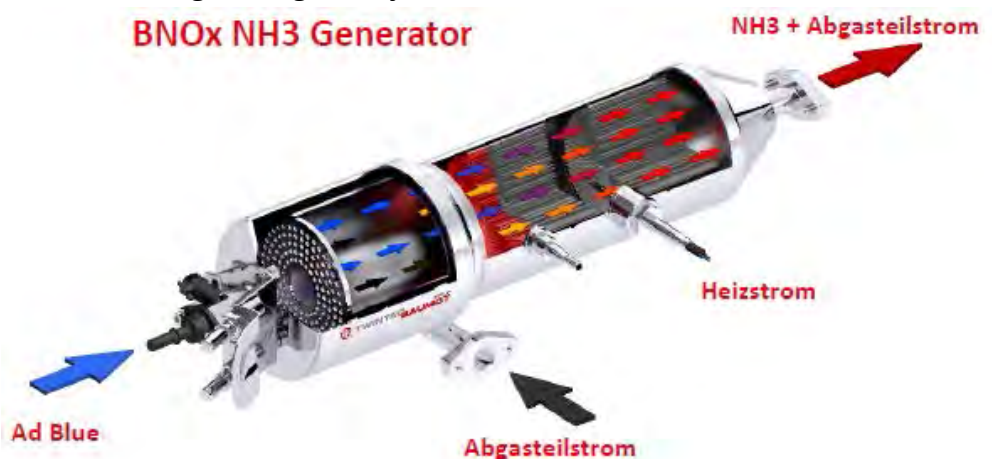


Abbildung 21: NH_3 -Generator des BNO_x -Systems

Das BNO_x-System besteht aus 4 grundlegenden Elementen:

1. Tanksystem
2. BNO_x-Ammoniakgenerator mit elektrischer Heizung und Adblue-Dosiersystem
3. SCR-Katalysator incl. NO_x-Sensoren
4. Steuergerät

Als SCR-Reduktionsmittel wird eine wässrige Harnstofflösung – HWL – verwendet. Die HWL ist kommerziell im Tankstellennetz erhältlich und unter dem Markennamen Adblue® vertrieben.

Laut Unternehmensangaben können Euro5-Fahrzeuge nachgerüstet werden, sofern der notwendige Bauraum vorhanden ist. In Veröffentlichungen aus dem Jahr 2017 (Abbildung 22) wird der zur NH₃-Erzeugung notwendige Abgasmassenstrom vor Turbolader entnommen. Im persönlichen Gespräch wurde jetzt eine Lösung genannt, bei der erst nach Oxidationskatalysator und Partikelfilter ein Abgasmassenstrom entnommen und durch einen NH₃-Generator geführt werden soll.

Die Kontrolle des Systems soll über ein zusätzliches Steuergerät dargestellt werden, das auch über eine zusätzliche OBD-Schnittstelle verfügen soll. Die Tankanzeige soll über zusätzliche Lampen oder ein Display realisiert werden.

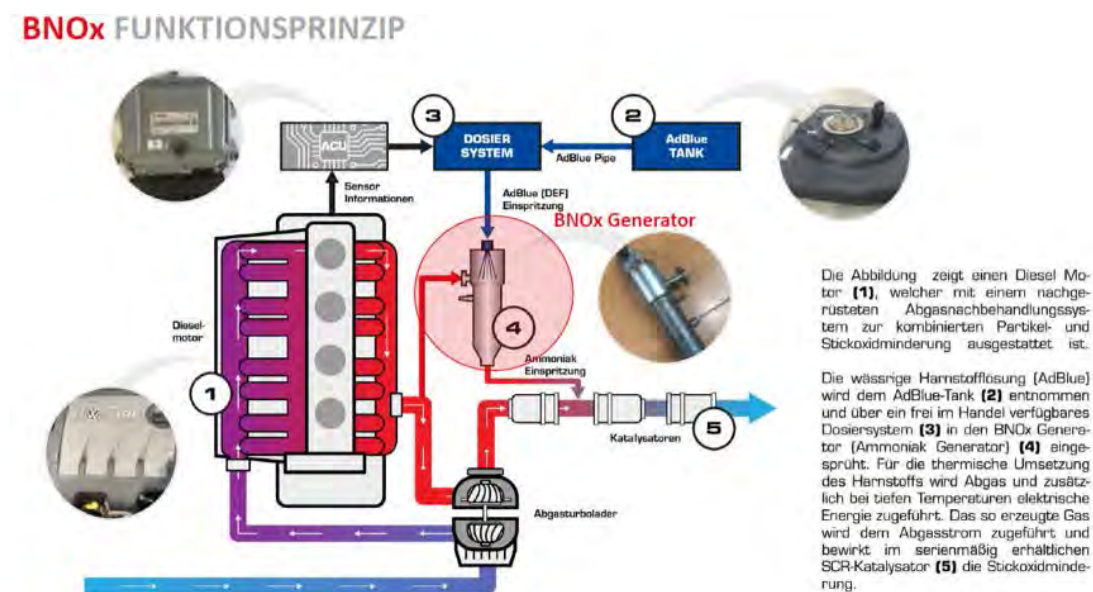


Abbildung 23: Funktionsprinzip des BNO_x-Systems

17.1.2 Entwicklungsstand

Sofern ein Teil-Abgasmassenstrom vor Turbolader umgeleitet wird, ist aufgrund der Reformation von gasförmigem Ammoniak aus Adblue mittels Ammoniakgasgenerator von einer guten Tieftemperaturperformance im Vergleich zur Dosierung von flüssigem Reduktionsmittel (Adblue) auszugehen. Die Begrenzung des NO_x-Umsatzes wird primär von der Wirkungsgradcharakteristik des SCR-Katalysators bestimmt. Allerdings wird ein Abgasteilmassenstrom um das Partikelfiltersystem kontinuierlich herumgeleitet. Unklar ist, inwieweit die Partikelemissionen (Partikelmasse und Partikelanzahl) durch den Teilabgasmassenstrom vor Abgasturbine nachteilig beeinflusst werden. Es ist davon auszugehen, dass dies ohne Veränderung der Motorsteuerung nicht möglich ist, da ansonsten

mit nachteiligen Auswirkungen in Bezug auf Emissionen, Motorleistung und Fahrbarkeit von Fahrzeugen auszugehen ist.

Eine Lösung, dass nach Turbolader ein Teilstrom des Abgases entnommen werden soll, um den NH_3 -Generator zu heizen, führt zu der Herausforderung, dass sowohl die notwendige Temperatur, als auch die notwendige Druckdifferenz anspruchsvoller zu realisieren, bzw. sicher zu stellen ist.

Sowohl die Abgasentnahme vor als auch nach Turbolader bedeuten Modifikationen der bestehenden Abgasanlage dieses Konzeptes. Zu den Auswirkungen auf die mechanischen Haltbarkeiten sind keine Informationen bekannt. Aufgrund der Verwendung von gasförmigem Ammoniak ist nicht mit einer Ablagerungsproblematik vergleichbar mit Adblue-Systemen unterhalb von 180 °C auszugehen.

Das System muss ferner mit einem SCR-beschichteten DPF kombiniert werden, da dies die einzige Möglichkeit der Bypasseinleitung ohne Erhöhung der Partikelemissionen bietet. Als Konsequenz muss ein alter EURO5 Entwicklungsstand mit einem Partikelfilter ohne passiven Partikelabbau kombiniert werden. Diese Lösung kann zu einem schnellen Aufrußen des Partikelfilters bis zur Beladungsgrenze führen und damit im Feld zu großen Schwierigkeiten hinsichtlich Überhitzung des SDPF bei der thermischen Regeneration.

Ganz grundsätzlich ist die Veränderung der DPF-Situation ein gravierendes Problemfeld dieser Konzeption und erfordert umfangreiche Absicherungsarbeiten mit Einbeziehung der den Herstellern bekannten Worst Case Szenarien.

Der Hydrolysekatalysator auf Basis von Titanoxid stellt einen Funktionsträger dar. Es gibt – soweit bekannt – noch keine Felderkenntnisse zu diesem Bauteil. Erst eine umfangreiche Serienentwicklung mit Erprobung in Höhe, Hitze und Kälte kann zeigen, ob ein Serieneinsatz möglich ist.

Damit kann allein durch die gravierende Veränderung der DPF-Situation und den prototypisch verbauten Hydrolysekatalysator von mehreren Jahren Entwicklungszeit bis zur Serienreife ausgegangen werden. Ohne herstellerseitige Eingriffe in das Motorsteuergerät (z.B. Anpassung der Strategie der thermischen Regeneration des DPF) erscheint ein Serieneinsatz nicht machbar.

Zusätzlich bedingt dieser Ansatz weiteren Bauraum im Unterboden des Fahrzeuges durch den Bypass mitsamt BNO_x -Generator, so dass sich typabhängige Herausforderungen durch das Fahrzeugpackaging ergeben können, die nicht verallgemeinerbar sind.

Nicht vernachlässigt werden dürfen auch die zu erfüllenden EOBD-Anforderungen und die Crash-Absicherung für jeden Fahrzeugtyp der gesamten Anlage, einschließlich, Leitungen und Adblue-Tank.

Schlussendlich ist insbesondere für diese Lösung zu betonen, dass neben den Kosten für den BNO_x -Generator (1300 bis 1600€) die Kosten für eine EURO6 Abgasnachbehandlung (>2000€), für eine Adblue-Infrastruktur (>500€), für Fahrzeugkabelsätze und Elektrik/Elektronikumfänge (>500€) und Umbaukosten (>1000€ bei Fahrzeugkabelsatztausch) anfallen.

Die häufig zitierten 1300 bis 1600€ sind für eine tatsächliche Serienlösung unseres Erachtens nicht realistisch.

17.2 Amminex/Faurecia ASDS-System (BlueFit)

17.2.1 Aufbau und Funktion

Die BlueFit-Lösung (ASDS-System) besteht aus zwei Hauptelementen. Einem Ammoniak-speicher und einem SCR-Katalysator. Gasförmiges Ammoniak wird mittels einem Trägersalz (Strontiumchlorid) in fester Form gespeichert. Das ASDS umfasst eine Start-Up-Kartusche und zwei größere Hauptkartuschen. Die Kartuschen enthalten ein Salz in fester Form, welches in der Lage ist Ammoniak chemisch bei Temperaturen unter 50 °C zu binden.

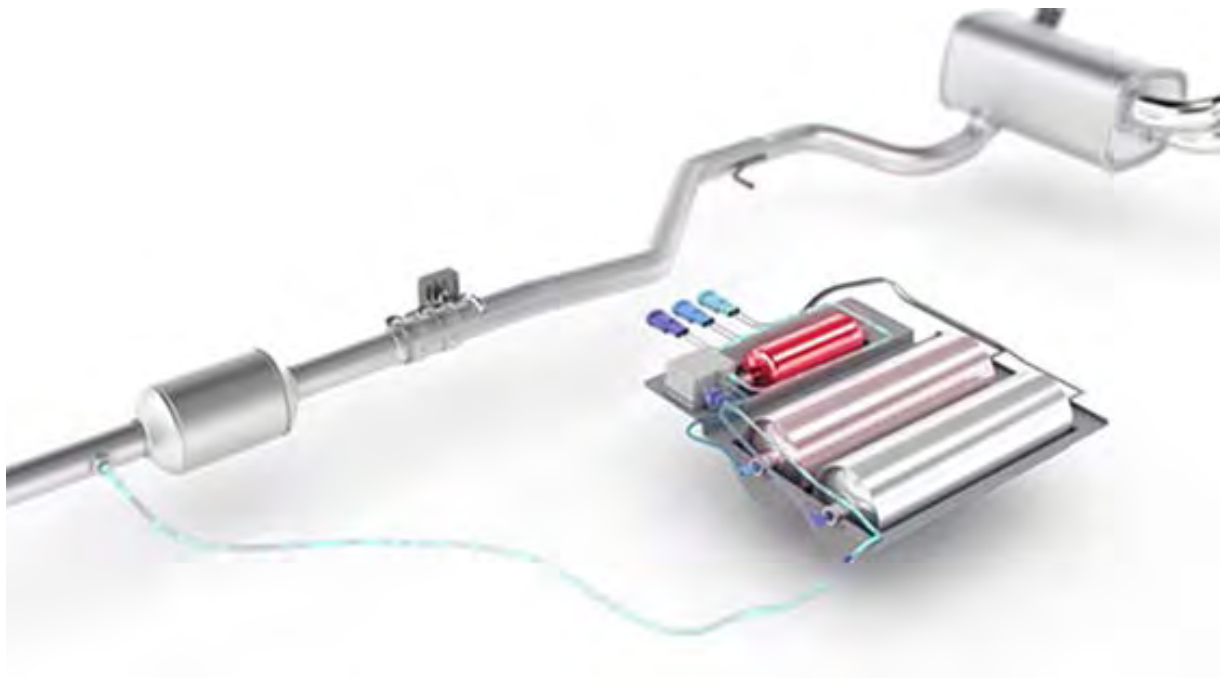


Abbildung 24: ASDS-System (schematisch) (Quelle: Amminex)

Der Ammoniak-Speicher des ASDS kann in der Reserveradmulde installiert werden.



Abbildung 25: ASDS-System Prototyp verbaut in der Reserveradmulde

(Quelle: Amminex)



Abbildung 26: ASDS-Kartuschensystem und Wechselkonzept (Quelle: Amminex)

- NOxTracker™ provides transparent emissions performance
 - On-board measuring and logging of 24/7 vehicle emissions
 - On-line emissions data transmitted via GSM & GPS
 - OBD monitor & error warning: SMS/email
 - Continuous monitoring over web interface and public app



Abbildung 27: ASDS-NO_xTracker Monitor- und Diagnosekonzept (Quelle: Amminex)

Nach dem Motorstart wird die Start-up-Kartusche elektrisch aufgeheizt. Innerhalb von wenigen Minuten beginnt das Ammoniak in der Kartusche zu verdampfen und lässt sich somit, anders als Adblue, unter niedrigem Druck in den Abgasstrang befördern. Wenn eine der Hauptkartuschen ihre Betriebstemperatur erreicht hat, übernimmt sie von der Start-up-Kartusche. Gleichzeitig lässt sie gasförmiges Ammoniak auch zur Start-up-Einheit strömen, um diese aufzuladen. Beim Abstellen des Motors wird das reine Ammoniak vom Salz der Hauptkartusche wieder absorbiert und ist im Trägersalz gebunden.

Der SCR-Katalysator ist im Abgassystem des Fahrzeuges positioniert. Das Nachrüstsystem soll keine Änderungen im Motorraum, der Kalibrierung des Motors, dem Diesel-Partikelfilter oder dem Bordnetz erfordern. Die Standard-Konfiguration hat zwei kom-

pakte Kartuschen was etwa einem 16 Liter Adblue-Äquivalent entspricht. Die Reichweite soll etwa 15.000 km betragen. Der Zeitaufwand für einen Kartuschentausch wird nach Angaben erster Testpersonen als kurz eingeschätzt (etwa zwei Minuten laut Fachzeitschrift). Ggf. kann dies auch in einer Werkstatt erfolgen. Einige Pkw-Modelle haben Platz für eine dritte Patrone, die die Reichweite potenziell auf mehr als 20.000 Kilometer verlängern kann.

Als Besonderheit ist hervorzuheben, dass diese Technologie aus einem eigenen neuartigen Speichersystem. Dieses ist als modulares Kartuschensystem ausgeführt. Die NH₃-Speicherkartuschen sind mehrfach verwendbar und werden durch den Hersteller im Recyclingverfahren betrieben.

Product value for pas-car owners: Customer friendliness

- Easy for customer: 30 second "swap". Clean and fast.
- Cartridge distribution via traditional retail channels (e.g. tank stations, e-commerce, dealers/workshops)



Abbildung 28: ASDS-NO_xTracker Monitor- und Diagnosekonzept (Quelle: Amminex)

Es stehen nach Angaben des Herstellers unterschiedliche Kartuschengrößen zur Verfügung. ASDS-Systeme werden aktuell bereits für die Nachrüstung von Stadtbussen in mehreren europäischen Ländern und Städten eingesetzt. Es sind jedoch bisher keine kommerziellen Serienanwendungen dieser Technologie bei Pkw's oder leichten Nutzfahrzeugen bekannt.

17.2.2 Entwicklungsstand

Aufgrund der Verwendung von gasförmigem Ammoniak ist von einer guten Tieftemperaturperformance im Vergleich zur Dosierung von flüssigem Reduktionsmittel (Adblue). Die Begrenzung des NO_x -Umsatzes wird primär von der Wirkungsgradcharakteristik des SCR-Katalysators bestimmt.

Es ist nicht bekannt inwieweit nachteilige Auswirkungen in Bezug auf Motorleistung und Fahrbarkeit von Fahrzeugen besteht. Zumindest auf Grund des zusätzlichen Druckverlustes des Katalysators sowie zusätzlicher elektrischer Verbraucher ist allerdings eine eindeutige Rückwirkung (u.a. Verbrauchsnahteil) auf dem Motor zu erwarten.

In den Publikationen sind keine Informationen zur Notwendigkeit von NH_3 -Mischelementen beschrieben. Es wird bei kurzen Mischerstreckenlängen erwartet, dass ein gewisses Maß an Mischelementen notwendig sein kann.

Es ist nicht bekannt inwieweit nachteilige Auswirkungen in Bezug auf die Haltbarkeit von Fahrzeugen besteht. Es sind keine Informationen über die Auswirkungen auf die Herstellergarantie des Fahrzeuges oder Garantieleistungen für das Nachrüstsystem.

Aufgrund der Verwendung von gasförmigem Ammoniak ist nicht mit einer Ablagerungsproblematik vergleichbar mit Adblue-Systemen unterhalb von 180 °C auszugehen.

In den Informationen des Herstellers ist die Verfügbarkeit einer elektronischen Monitoring- und Diagnose-App (NO_x -Tracker) beschrieben. Über Möglichkeiten der OBD ist nichts bekannt.

In ersten Testberichten werden Wechselintervalle für das Kartuschensystem von 15.000 bis 20.000 km prognostiziert. Die mitgeführte Menge an NH_3 ist über die modularen Kartuschengrößen in gewissen Schritten skalierbar.

Eine Infrastruktur für den notwendigen Austausch der Kartuschen ist nicht durchgängig vorhanden.

Eine Herausforderung ist die Gleichverteilung des gasförmig eingebrachten NH_3 , was zu fahrzeugabhängigen Optimierungsprozessen führt. Auch wenn die NH_3 Aufbereitung Vorteile aufweist, so ist trotzdem die Katalyse im SCR-Katalysator bei niedrigen Temperaturen, abhängig von der Katalysatorzusammensetzung, limitiert.

17.3 Emitec E-SCR-System

17.3.1 Aufbau und Funktion

Umweltfreundlich im Stadtverkehr mit E-SCR®
Lowest emissions in urban driving with E-SCR®



Euro-IV Aufrüstung mit E-SCR®
Euro IV upgrade with E-SCR®

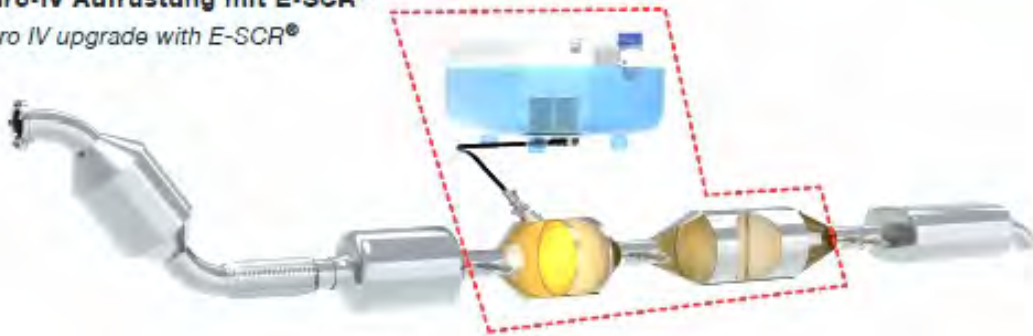


Abbildung 29: E-SCR-System (Quelle Emitec)

Das E-SCR-System besteht aus 4 grundlegenden Elementen:

1. Tanksystem
2. Dosiersystem
3. E-Kat
4. SCR-Katalysator

Als SCR-Reduktionsmittel wird eine wässrige Harnstofflösung – HWL – verwendet. Die HWL ist kommerziell im Tankstellennetz erhältlich und unter dem Markennamen Ad-blue® vertrieben.

Wesentliches Merkmal des E-SCR-Systemes ist die Anhebung der Abgastemperatur durch EHC vor SCR bei niedriger Last. Durch das aktive Temperaturmanagement der elektrischen Zuheizung wird die Betriebstemperatur des Abgasnachbehandlungssystems sehr schnell nach Motorstart erreicht (Abbildung 30). Dadurch erfolgt auch die Dosierfreigabe des Reduktionsmittels zügig nach Motorstart, auch bei Niedriglast im Stadtbetrieb. Verbunden mit der Anhebung der Abgastemperatur ist eine deutliche Steigerung des NO_x-Umsatzes in den relevanten Fahrzyklen (z.B. NEDC).

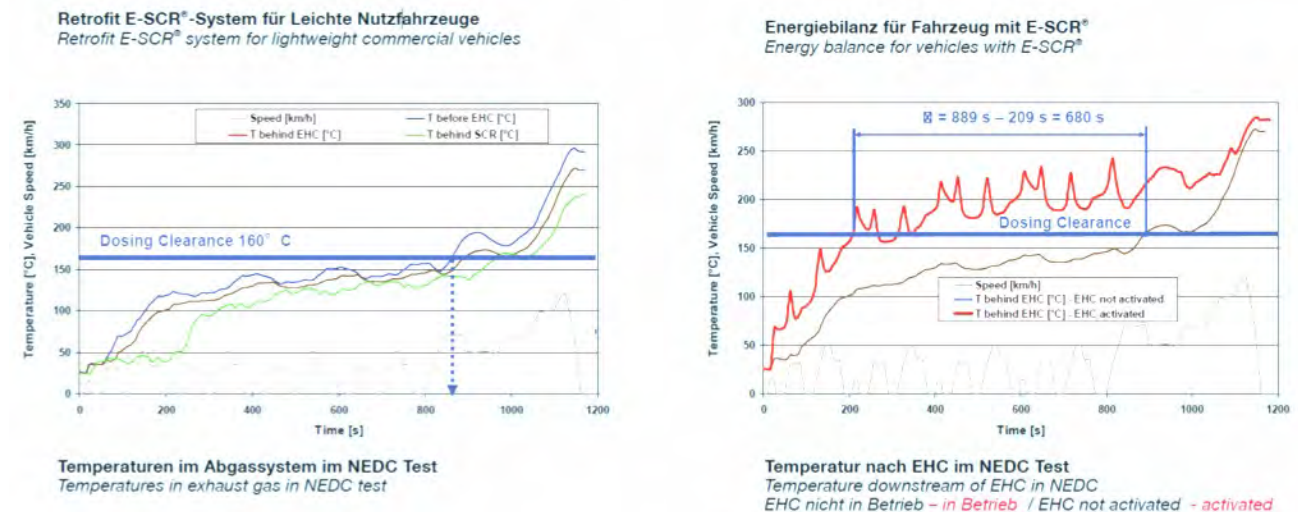


Abbildung 30: Einfluss des E-SCR-Systems auf das Abgastemperaturverhalten im NEDC

Als technologische Besonderheit ist zu erwähnen, dass das E-SCR-System die Möglichkeit verfügt, aktiv das Abgastemperaturniveau an das Arbeitsfenster des SCR-Katalysators anzupassen. Eine (dauerhafte) Regelung des Temperaturniveaus des Katalysatorsystems ist prinzipiell möglich. Zu beachten ist jedoch der direkte Einfluss auf die Belastung des elektrischen Bordnetzes und den Kraftstoffverbrauch durch die gesamthafte Wirkungsgradkette.

17.3.2 Entwicklungsstand

Das Funktionsprinzip besteht aus der Kombination eines SCR-Katalysators mit einer elektrischen Zuheizung mittels E-Kat auf 12 Volt-Basis. Sowohl die SCR-Technologie als auch elektrisch beheizte Katalysatoren sind bereits im Serieneinsatz bei Dieselmotoren.

Nachteilige Auswirkungen in Bezug auf Motorleistung und Fahrbarkeit von Fahrzeugen werden ggf. durch den zusätzlichen Energiebedarf zum Betrieb des Retrofitsystems erwartet.

Aufgrund der Möglichkeit des aktiven Thermomanagements mittels E-Kat wird eine sehr gute Tieftemperaturperformance erwartet. Begrenzt wird diese nur durch die zur Verfügung stehende Heizleistung.

Der elektrisch beheizte Katalysator kann zur Unterstützung der Aufbereitung des flüssigen Reduktionsmittels eingesetzt werden.

Es ist nicht bekannt, inwieweit nachteilige Auswirkungen in Bezug auf die Fahrbarkeit von Fahrzeugen bestehen. Zumindest auf Grund des zusätzlichen Druckverlustes des Katalysators sowie zusätzlicher elektrischer Verbraucher ist allerdings eine eindeutige Rückwirkung (u.a. Verbrauchsnachteil) auf den Motor zu erwarten.

Es ist ferner nicht bekannt, inwieweit nachteilige Auswirkungen in Bezug auf die Haltbarkeit von Fahrzeugen bestehen. Es sind keine Informationen über die Auswirkungen auf die Herstellergarantie des Fahrzeuges oder Garantieleistungen für das Nachrüstsystem.

Aufgrund der Verwendung von wässriger Harnstofflösung kann es zu einer Ablagerungsproblematik von Adblue-Systemen unterhalb von 180 °C kommen.

Es sind keine Informationen zum Diagnosekonzept und zur Fahrerinformation verfügbar. Ebenfalls ist nicht näher erläutern wie genau die Verbindung zum Motorsteuergerät spezifiziert ist und ob dies für alle am Markt verfügbaren Fahrzeuge adaptierbar ist.

Es sind keine Informationen über Reduktionsmitteverbrauch, Tankvolumen und des sich daraus ergebenden Nachfüllintervalls publiziert.

17.4 HJS SCRT-Systeme



Abbildung 31: SCRT®-System (Quelle HJS)

17.4.1 Aufbau und Funktion

Das SCRT-System besteht aus 4 grundlegenden Elementen:

1. Tanksystem
2. Dosiersystem
3. DOC+DPF-System (SMF® - Sintermetallfilter)
4. SCR-Katalysator

Als SCR-Reduktionsmittel wird eine wässrige Harnstofflösung – HWL – verwendet. Die HWL ist kommerziell im Tankstellennetz erhältlich und unter dem Markennamen Adblue® vertrieben.

Das SCRT-System ist als klassisches konventionelles DOC-DPF-SCR-System konzipiert zur Abgasreinigung von CO, HC, PM und NO_x (Abbildung 32).

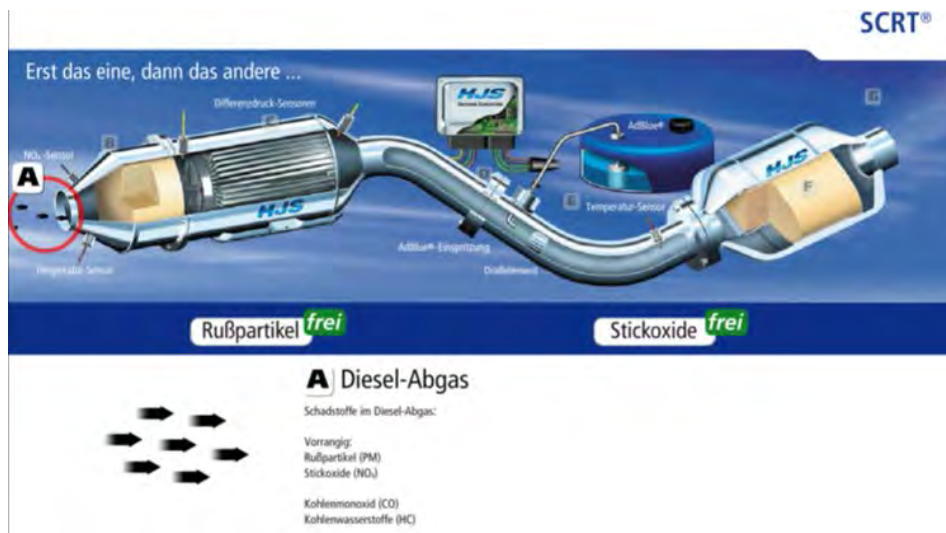


Abbildung 32: Aufgabe Abgasreinigung SCRT-System

Der Oxidationskatalysator übernimmt die Funktion der CO-, HC- und NO-Oxidation (Abbildung 33).



Abbildung 33: Funktion DOC

Der Dieselpartikelfilter ist als Sintermetallfilter (Abbildung 34) ausgeführt und arbeitet primär mit nach dem CRT-Prinzip der Rußverbrennung über NO₂ (passive Rußverbrennung). Es werden sehr hohe Abscheidegrade von bis zu 100% von HJS beschrieben. Ein aktives Thermomanagement kann systembedingt nur über den Dieselmotor erfolgen. Dies erfordert jedoch die entsprechende Motorfunktion und Einbindung des SCRT-Systems in die Motorsteuerung.

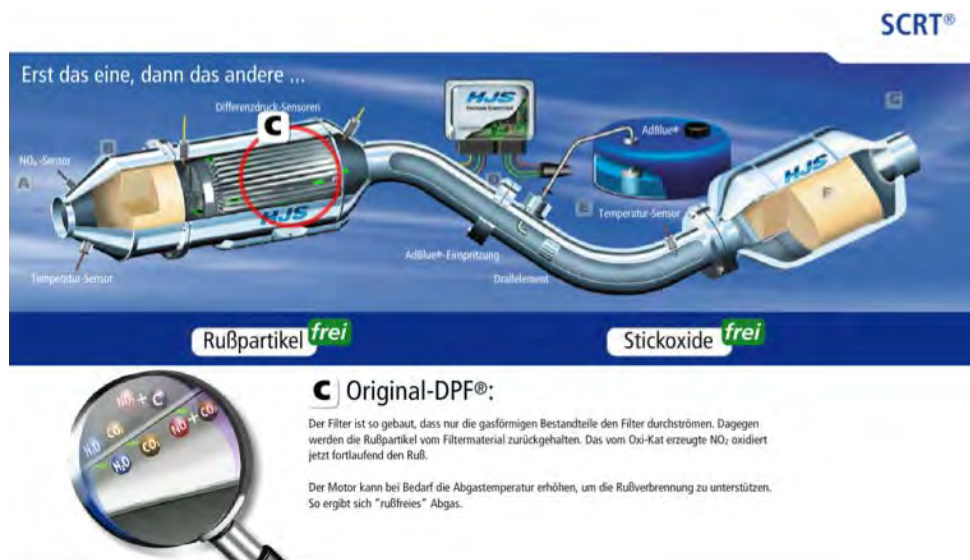


Abbildung 34: Funktion Dieselpartikelfilter

Das SCRT-System ist mit einem SCR-Katalysator ausgerüstet (Abbildung 35). Dieser befindet sich sequenziell nach dem DPF angeordnet in Unterbodenposition. Als Reduktionsmittel wird die wässrige Harnstofflösung (HWL) Adblue® verwendet. Die Zuführung des flüssigen Reduktionsmittels in den Abgastrakt wird nicht näher beschrieben. Für die Gemischaufbereitung wird eine definierte Mischstrecke und ein zusätzliches Mischelement verwendet. Das flüssige Reduktionsmittel wird in einem eigenen Tanksystem mitgeführt (Abbildung 35).



Abbildung 35: Funktion SCR-Reduktionsmittelzuführung und Aufbereitung

Die Konvertierung der Stickoxide erfolgt im SCR-Katalysator (Abbildung 36). Nähere Informationen zur verwendeten SCR-Katalysatortechnologie sind nicht verfügbar. Es ist wahrscheinlich, dass HJS das SCR-Systemmodul auch unabhängig vom DOC+DPF-Systemmodul für Nachrüstlösungen anbietet. Es werden NO_x -Umsatzraten von bis zu 90 % von HJS angegeben.



Abbildung 36: Funktion SCR-Katalysator

Als technologische Besonderheit ist zu erwähnen, dass das SCRT-System als Komplettsystem, bestehend aus DOC-DPF-SCR angeboten wird. Anhand des skizzierten Systemlayouts erscheint ein modulares System, mit der Trennung nach SMF-Systemmodul, für möglich. Als mögliche Systemerweiterung wird der Sintermetall-Partikelfilter mit einer zusätzlichen Heizoption angeboten (Abbildung 37). Ob dies auch im Zusammenhang mit einem SCR-System verfügbar ist, kann nicht erkannt werden.



Abbildung 37: Modulares SMF-AR-System mit autarker thermoelektrischer Regeneration

Zusätzlich wird als Technologiebausteinoption für ein aktives Thermomanagement auf das HJS TMT-Modul verwiesen (Abbildung 38). Es ermöglicht nach Angaben von HJS eine Temperaturerhöhung des Abgases von bis zu 50K.

HJS TMT Thermo Management Technology

Die HJS Lösung zur bestmöglichen Reduzierung der NO_x-Emissionen in den Städten ist die aktive und passive TMT Thermo Management Technology. Durch diese Technologie können die Abgastemperaturen um bis zu 50 °C erhöht werden. Hierdurch erzielt man im SCR-System einen höheren Wirkungsgrad und damit eine deutliche NO_x-Umsatzsteigerung ohne Beeinflussung der OE-AdBlue®-Dosierstrategie.

Systemumfang – Kernkomponenten

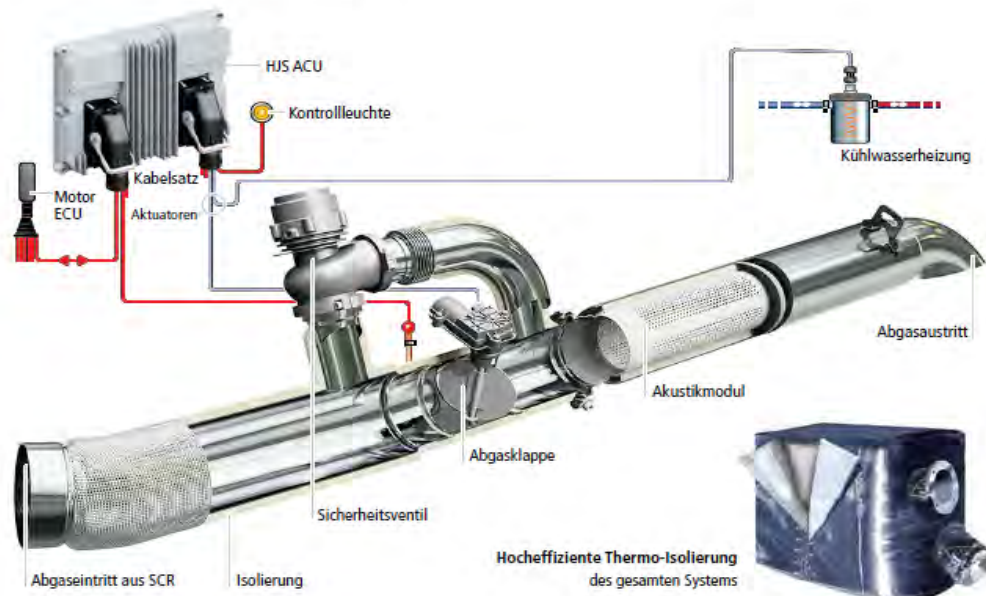


Abbildung 38: Anwendungen für das SCRT-System

Das SCRT-System wird als Nachrüstlösung von HJS primär für Nutzfahrzeuganwendungen (z.B. Stadtbusse, siehe: „Das SCRT-System wird als Nachrüstlösung von HJS“) primär für Nutzfahrzeuganwendungen beworben (Abbildung 39).



Abbildung 39: Anwendungen für das SCRT-System

17.4.2 Entwicklungsstand

Das Funktionsprinzip beruht auf einem klassischen Systemansatz mit Unterboden-SCR in Verbindung mit einem flüssigen SCR-Reduktionsmittel.

Aufgrund der Verwendung einer HWL Adblue ist natürlich von einer limitierten Tieftemperaturperformance im Vergleich zur Dosierung von gasförmigem Reduktionsmittel (NH_3) auszugehen. Sobald eine hinreichende Abgastemperatur gegeben ist, wird von einem hohen NO_x -Minderungspotenzial ausgegangen.

Es ist nicht bekannt, inwieweit nachteilige Auswirkungen in Bezug auf Motorleistung und Fahrbarkeit von Fahrzeugen besteht. Zumindest auf Grund des zusätzlichen Druckverlustes des Katalysators sowie zusätzlicher elektrischer Verbraucher ist allerdings eine eindeutige Rückwirkung (u.a. Verbrauchsachteil) auf den Motor zu erwarten.

Es ist wiederum nicht bekannt, inwieweit nachteilige Auswirkungen in Bezug auf die Haltbarkeit von Fahrzeugen bestehen. Es sind keine Informationen über die Auswirkungen auf die Herstellergarantie des Fahrzeuges oder Garantieleistungen für das Nachrüstsystem.

Aufgrund der Verwendung von wässriger Harnstofflösung kann es zu einer Ablagerungsproblematik von Adblue-Systemen unterhalb von 180 °C kommen.

Als Systembestandteil ist ein elektronisches Steuergerät zu erkennen. Es sind keine näheren Informationen zum Diagnosekonzept und zur Fahrerinformation verfügbar. Ebenfalls ist nicht näher erläutert, wie genau die Verbindung zum Motorsteuergerät spezifiziert ist und ob dies für alle am Markt verfügbaren Fahrzeuge adaptierbar ist.

Es sind keine Informationen über Reduktionsmittelverbrauch, Tankvolumen und des sich daraus ergebenden Nachfüllintervalls publiziert.

HJS selbst bestätigt, dass insbesondere im Segment PKW „vor allem aufgrund der Industrialisierung in dem erwarteten Zeitrahmen eine immense Herausforderung“ liegt. Daher betont HJS, dass man die technische Kompetenz prinzipiell besitzt, sich jedoch durch die Komplexität und Vielfalt „nur gemeinsam mit dem jeweiligen OEM in der Lage sieht, diese Aufgabe zu meistern“. Fahrzeugdemonstratoren wurden realisiert. Diese haben keinen Großseriencharakter.

17.5 Schlussfolgerungen

Auf Basis der Analyse der verfügbaren Informationen zu potenziellen NO_x -Nachrüstlösungen für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge (Transporter), wurden verschiedene technologische Lösungen auf theoretischer Basis (Publikationen etc.) analysiert. Für Retrofitlösungen erscheint aus Aufwands- und Nutzen-Aspekten die NH_3 -SCR-Technologie als Einzige überhaupt prinzipiell geeignet, da Speicherkatalysatoren (NSK) eine viel zu komplexe Einbindung in die Motorsteuerung und -regelung erfordern.

Verschiedene Nachrüstlösungen weisen im Detail interessante Aspekte auf. Generell sind verschiedene Lösungen mit teilweise guten technischen Ideen in Prototypen überführt worden, welche eine prinzipielle Machbarkeit demonstrieren.

Prinzipiell ist bei Nachrüstlösungen für Pkw kein Vergleich mit Lösungen für NfZ- oder Busanwendungen zielführend. In diesem Lastsegment sind die Motoren durch das hohe Fahrzeuggewicht deutlich höher ausgelastet. Die Herausforderung der Abgastemperatur ist zwar ebenfalls gegeben, jedoch nicht so prägnant, wie bei einer PKW-Anwendung, die fast ausschließlich temperaturlimitiert operiert.

Generell sind nun bei Nachrüstlösungen die Risiken gegenüber dem Nutzen zu bewerten und dazu gehört die Abschätzung, welchen Reifegrad die vorgestellten Systeme realistisch haben.

Aufgrund der Komplexität des Zusammenwirkens von Motor und Abgasnachbehandlungssystem, sind beim Eingriff in das elektronische Management oder die Thermodynamik des Motors die Auswirkungen in Bezug auf Leistung, Kraftstoffverbrauch, Akustik, Fahrbarkeit und Quereinflüsse zu anderen Komponenten der Abgasnachbehandlung (AGR, DPF, DOC, etc.) zu beachten.

Neben diesen technischen Anforderungen sind auch gesetzliche Anforderungen (EOBD, Crash, Missbrauch, Zertifizierung, etc.) zu beachten, aber auch Fragen nach der Sicherheit, der Lebensdauer, der Komponentenverfügbarkeit, etc. und letztlich spielt auch der zeitliche Aufwand bis zur Ausrollung eine wesentliche Rolle bei einer Nutzneabschätzung.

Das BNO_x- und BlueFit-System führt dem Abgas das SCR-Reduktionmittel als gasförmiges Ammoniak zu. Dies ist aus Robustheitsaspekten durch Ablagerungen als positiv zu bewerten. Beim BNO_x-System wird das gasförmige Reduktionsmittel durch einen Gasgenerator an Bord mit Hilfe elektrischer Energie produziert. Das E-SCR-System beruht auf der gezielten Erhöhung der Abgastemperatur durch elektrische Zuheizung mittels E-Kat. Die elektrische Zuheizung kann die chemische Aufbereitung der wässrigen Harnstofflösung (Adblue®) unterstützen. Jedoch erscheint die Notwendigkeit der äußerst anspruchsvollen Kombination eines EURO5 Motors mit einem SCR-beschichteten DPF der neuesten Generation als kritischer Aspekt des BNO_x-Ansatzes.

Unter Aufwands-Nutzen-Aspekten könnte die BlueFit-Technologie für eine Nachrüstung beim Pkw potentiell als am besten geeignet erscheinen. Aktuell befindet sich diese Technologie schon im Einsatz für Nachrüstlösungen bei Stadtbussen in europäischen und asiatischen Großstädten. Es sind jedoch weitere Herausforderungen, Gleichverteilung, Ersatzteilloistik, Alterungsverhalten des Systems etc. zu klären. Als kritische Pfade sind hier Packaging-Anforderungen und die Belastung des elektrischen Bordnetzes zu sehen. Der Reifegrad des Systems ist sicherlich noch nicht serienfähig.

Das E-SCR-System erscheint als autark arbeitendes System ebenfalls geeignet, um gerade bei Fahrzeuganwendungen mit sehr niedrigen Abgastemperaturen an der SCR-Katalysatorposition hohe Umsatzraten zu erzielen. Aufgrund der Energieversorgung über das elektrische 12Volt-Bordnetz ist dies ein kritischer Pfad und nicht verallgemeinerbar (auch nicht hinsichtlich des Kraftstoffmeherverbrauchs). Zu betonen ist, dass entwicklungsseitig bereits vor 10 bis 15 Jahren die elektrische Kat-Heizung bei 12Volt-Bordnetz verworfen wurde, um die Bordnetzstabilität nicht zu gefährden, obwohl natürlich deutliche Vorteile im Kaltstart und Warmlauf erzielbar waren. Eine Nachrüstlösung an Altfahrzeugen würde dieses Problem verschärfen.

18. Vorstellung der Fahrzeugbefundungen

Insgesamt wurden 10 Fahrzeuge analysiert. Insbesondere stand die Bewertung im Vordergrund, ob die EURO5 Fahrzeuge mit einer SCR-Abgasnachbehandlung nachgerüstet werden können.

Zudem wurden Potentiale der EURO6 Fahrzeuge beleuchtet. Teilweise sind auch Aussagen zu älteren EURO4 Fahrzeugen im Rahmen der Analysemöglichkeiten aufgeführt.

Diese analysierten Fahrzeuge im Einzelnen sind

- Volkswagen Tiguan I, EURO5
- Volkswagen Passat B8, EURO6b
- BMW 3er (F30), EURO5
- BMW X3 (F25), EURO6
- Mercedes-Benz C-Klasse (W204) EURO5
- Mercedes-Benz E-Klasse (W212) EURO6
- Renault Megane EURO5
- Renault Megane EURO6b
- Mercedes-Benz Sprinter (NCV3) EURO5b+, Gr.III, N1
- Mercedes-Benz Sprinter (NCV3) EURO6b, N1 Gr. III

Die Einzelberichte zu diesen Fahrzeugen sind im Anhang separat angehängt. Es findet sich am Ende jedes Fahrzeuganalyseberichts eine individuelle Fahrzeuganalyse mitsamt Zusammenfassung und technischer Empfehlung.

19. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie besteht aus einer allgemeingültigen Analyse der Wirkzusammenhänge von NO_x-mindernden Abgasnachbehandlungssystemen, den Wechselwirkungen mit Motor und Fahrzeug, sowie den Anforderungen an die Entwicklung derartiger Systeme. Im zweiten Teil erfolgt eine Befundung der seitens des Ministeriums ausgewählten Fahrzeuge mit Analyse der fahrzeugspezifischen Optionen und Potenziale.

Das Ergebnis dieser Analysen ergibt ein differenziertes Bild.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass als sinnvolle Nachrüstlösungen nur SCR Systeme in Frage kommen. Werden diese korrekt, d.h. im richtigen Temperaturfenster und mit geeigneter Adblue Dosierung betrieben, sind deutliche NO_x Minderungsraten technisch darstellbar. Dies erfordert keinen besonderen Nachweis und kann als bekannt vorausgesetzt werden.

Die Analyse der ausgewählten Fahrzeuge zeigt, dass bei diesen genügend Bauraum für den zusätzlichen Einbau eines SCR Katalysators (sofern nicht schon verbaut) vorhanden ist, allerdings ausschließlich im Unterbodenbereich, wo ohne entsprechende Thermomanagementmaßnahmen ungünstig niedrige Temperaturverhältnisse gegeben sind, die aufwändige Zusatzmaßnahmen erforderlich machen, da ansonsten die Funktion im besonders wichtigen Stadtbetrieb eingeschränkt ist.

Die Herausforderungen für eine Hardware Nachrüstung in einem PKW Volumenmarkt gehen jedoch weit darüber hinaus. Im Gegensatz zur seinerzeitigen Nachrüstung rein passiver Partikelfilter handelt es sich bei einem SCR System um ein aktives System, das aus mehreren Komponenten inkl. Reglern besteht. Ein derartiges System steht grundsätzlich in Wechselwirkung mit dem Motor und anderen Komponenten im Abgassystem. Es muss vollständig funktional entwickelt, validiert und gegen Fehlbetrieb/Missbrauch und Folgeschäden abgesichert sein.

Die Analyse des Stands der Technik zeigt folgende Ansätze.

Nachrüstanbieter schlagen, unabhängig vom OEM entwickelte, Nachrüstsätze vor, deren NO_x-Minderungswirkung in Versuchsfahrzeugen demonstriert wird. Hier kommen zum Teil neu entwickelte Komponenten (z.B. „NH₃ Generator“, „E-Kat“) zum Einsatz, die mit heute verfügbaren Katalysatorkomponenten kombiniert und mit einer spezifischen Reglereinheit angesteuert werden. Allerdings stehen in allen betrachteten Varianten den Vorteilen der „neuen“ Lösungen spezifische Nachteile gegenüber (z.B.: „NH₃ Generator“ benötigt SDPF um die Partikelemissionen nicht zu erhöhen), die bei zwangsläufig relativ kurzen Versuchsfahrten mit Prototypen u.U. gar nicht zum Tragen kommen (z.B. NH₃-Schlupf oder unzulässig hohe Temperaturen bei der DPF-Regeneration. Beides insbesondere in Worst Case-Szenarien). Darüber hinaus sind mehrere weitere unverzichtbare Komponenten wie Adblue Tank, Leitungen, Kabelbaum, Stützbatterie erforderlich und hinsichtlich Crash abzusichern und gemeinsam mit dem Einbau in der Kostenbetrachtung zu berücksichtigen.

Der technische Stand ist als Funktionsmuster einzustufen, also als Vorstufe zu einer möglichen Serienentwicklung. Allerdings liegen offensichtlich mehrere Funktionen noch nicht vor, beispielsweise Fahrerinformation, Missbrauchsabsicherung, Inducement, Sicherstellung einer unveränderten DPF-Regeneration auch in Worst Case Szenarien, Einbindung in das elektrische Bordnetzmanagement, etc.

Zu ganz ähnlichen Formulierungen kommt hier auch der ADAC, die er im Internet (https://www.adac.de/infotestrat/tests/eco-test/diesel_nachruestung/default.aspx) veröffentlicht hat, nachdem er einen von der Firma Baumot nachgerüsteten Prototypen untersucht hat.

Weiterhin ist völlig unklar, wie die Abstimmung mit dem OEM und die fahrzeugspezifische Entwicklung erfolgen sollen.

Vereinfachend wird in diesem ADAC-Bericht vorgeschlagen, dass der Einsatz autarker, nachgeschalteter Systeme möglich ist. Aus technischer Sicht ist demgegenüber klar festzuhalten, dass im Sinne einer einwandfreien und dauerhaft abgesicherten Funktion eine fahrzeug- und motorseitige Anpassung unverzichtbar ist, d.h. eine Entwicklung, Validierung und Freigabe durch den OEM. Damit müssen aber die erforderlichen Entwicklungsprozesse durchlaufen werden, die nicht unter 2 Jahren darstellbar sind, ggf. mit dem Anbieter der Nachrüstlösung als Zulieferer. Weiterhin ist festzuhalten, dass sich die Randbedingungen von Fahrzeug zu Fahrzeug signifikant unterscheiden. Dies betrifft Geometrie, Temperaturverhältnisse, Funktionen der Motorsteuerung u.v.m. Das bedeutet auch, dass unterschiedliche Emissionsergebnisse zu erwarten sind.

Ein anderer Ansatz besteht in der Nachrüstung von EURO5 Fahrzeugen, für die bereits Sondervarianten in einer SCR/EURO6 Variante verfügbar waren. Dafür besteht die Möglichkeit, seitens OEM einen verkürzten Entwicklungsprozess zu durchlaufen, sodass im Idealfall eine Marktverfügbarkeit eines Nachrüstsystems innerhalb von 1,5 Jahren darstellbar wäre, mit anschließender sukzessiver Ausrollung. Hier wären entsprechende Pilotprojekte denkbar.

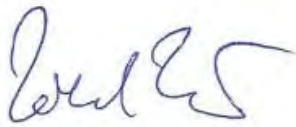
Die Neuentwicklung eines kompletten neuen SCR Systems durch den OEM für EURO5 Fahrzeuge, für die keine SCR Varianten verfügbar waren, ist als komplette Neuentwicklung einzustufen und kritisch zu hinterfragen, da eine Wirksamkeit im Markt frühesten in 3-4 Jahren möglich ist.

In jedem Fall sind die Kosten für eine HW Nachrüstung > 5000€ anzusetzen, der Fahrzeugnutzer muss auch bei sorgfältiger Umsetzung mit Qualitätseinbußen und einem Kraftstoffmehrverbrauch rechnen.

Die Analyse der EURO6 Fahrzeug zeigt deutlich, dass in keinem untersuchten Fahrzeug eine HW-Änderung des Abgassystems sinnvoll erscheint, da ein noch deutlich höherer Aufwand einem eingeschränkten Nutzen gegenüber steht.

Demgegenüber ist in diesem Technologiestand die Entwicklung der letzten Jahre deutlich vorangeschritten, sodass Softwareupdates eine signifikante Verbesserung bringen und deutlich schneller und überdies flächendeckend im Realverkehr wirksam werden.

Berlin, Stuttgart, Darmstadt, Karlsruhe, Magdeburg den 15. Februar 2018



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Baar



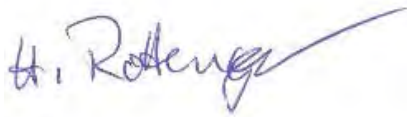
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Beidl



Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Kurzstudie

Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x- Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge

Analyse der Fahrzeuge:

VW Tiguan EU5 (Baureihe EA189)

VW Passat B8 EU 6b (Baureihe EA189)

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

01. Februar 2018

Einleitung

Untersucht wurden zwei PKW des Herstellers Volkswagen. Beide Fahrzeuge waren gebraucht und befanden sich in einem dem Fahrzeugalter und der Laufleistung angemessenen guten, fehlerfreien Zustand.

Fahrzeug A: Passat B8

In dem Passat ist ein Vierzylinder-Motor (Frontantrieb) der Baureihe EA189 mit einer Leistung von 110kW und der Emissionsstufe EU6b verbaut. Das Abgasnachbehandlungssystem besteht aus einem Diesel-Oxidationskatalysator (DOC), einem Diesel-Partikelfilter (DPF) und einem Unterboden SCR-System (Dosisereinrichtung, NO_x-Sensor, Katalysator).

Der Motor ist quer eingebaut. Abbildung 40 zeigt die Komponenten von oben (Abdeckung wurde demontiert). Zu erkennen sind Oxidationskatalysator, Partikelfilter und Turbolader. Im Gegensatz zu dem Euro5-Fahrzeug ist die Einbausituation geändert, hier ist kein freier Bauraum vorhanden.



Abbildung 40: Motorraum, Passat Euro6b

Im Unterboden ist ein SCR-System untergebracht (Abbildung 41, Abbildung 42).

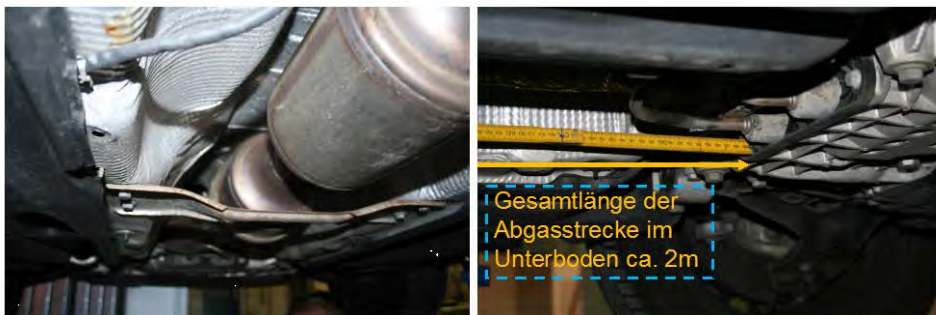


Abbildung 41: Unterboden hinten, Passat Euro6b



Abbildung 42: Unterboden vorn, Passat Euro6b

Beim Euro6b-Passat ist Bauraum für größere Katalysatoren vorhanden, allerdings kann davon ausgegangen werden, dass hier bereits das maximal mögliche Potential zur NO_x-Reduzierung auf dem im Unterboden vorhandenen Abgastemperaturniveau erreicht wurde, sodass dieses System mit Euro6b an seine Grenze kommt. Weitere Emissionsreduzierungen wären durch Integration eines Speicher-Katalysators oder eines motornahen SCR-Systems möglich, was eine vollständige Neuentwicklung von Hard- und Software bedeuten würde. Da im Motorraum kein Platz vorhanden ist, ist ggf. von der Notwendigkeit eines vollständigen Umbaus des Vorderwagens auszugehen.

Schließlich ist in Abbildung 43 der Adblue-Tank im Kofferraum dargestellt.



Abbildung 43: Adblue-Tank im Kofferraum, Passat Euro6b

Die Nachfüllung von Adblue erfolgt über den Kofferraum, also nicht über einen zweiten Zugang neben dem Diesel-Befüllungsstutzen. Es wäre Raum für einen größeren Tank vorhanden.

Zusammenfassung EU6b:

Für eine Verbesserung der Emissionen des Euro6b-Fahrzeugs müsste zusätzlich ein NO_x-Speicher-Katalysator oder ein motornahes SCR-System integriert werden. Dazu wären folgende Veränderungen nötig:

- Umbau des Vorderwagens zur Schaffung von Raum für einen motornahen eine NO_x-Speicher-Katalysator
- Neubau der Abgasanlage und Integration des Katalysators einschließlich Neuauslegung von DOC und DPF
- Umsetzung einer komplett neuen Motorsteuerung (Neuentwicklung, da eine entsprechende Hardware-Lösung für den EA189 nicht existiert)

Ein Kraftstoffverbrauchsnachteil ist wahrscheinlich.

Fahrzeug B: Tiguan I

Dieses Fahrzeug wird mit einem Vierzylinder-Motor der Baureihe EA189 angetrieben. Die Motorleistung beträgt 103 kW, die Emissionsstufe ist Euro5. Das Fahrzeug ist mit einem Diesel-Oxidationskatalysator (DOC) und einem Diesel-Partikelfilter (DPF) ausgestattet. Es hat einen Allrad-Antrieb.

Die Ansicht des Motorraums (Abbildung 44) zeigt den quer eingebauten Motor (Abdeckung wurde demontiert). Zu erkennen sind die motornah platzierten Abgasnachbehandlungskomponenten DOC und DPF. Die Abgasseite ist entgegen der Fahrrichtung orientiert. In Richtung der Spritzwand ist ein freier Bauraum vorhanden, der vermutlich für das Aufladesystem mit einem zweistufigen Turbolader vorgehalten wurde. Durch diesen Raum führt auch die Herunterführung des Abgases in die Abgasanlage des Unterbodens.

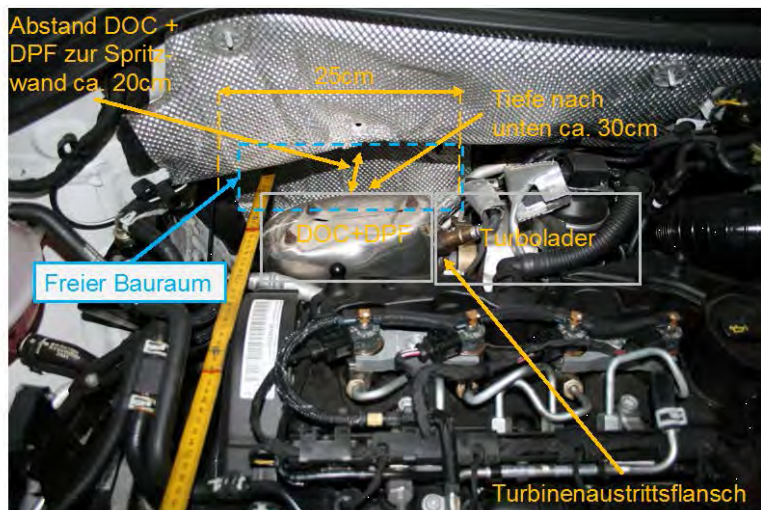


Abbildung 44: Motorraum, Tiguan Euro5

Im Unterboden (Abbildung 45) sind keine weiteren Abgasnachbehandlungskomponenten vorhanden.

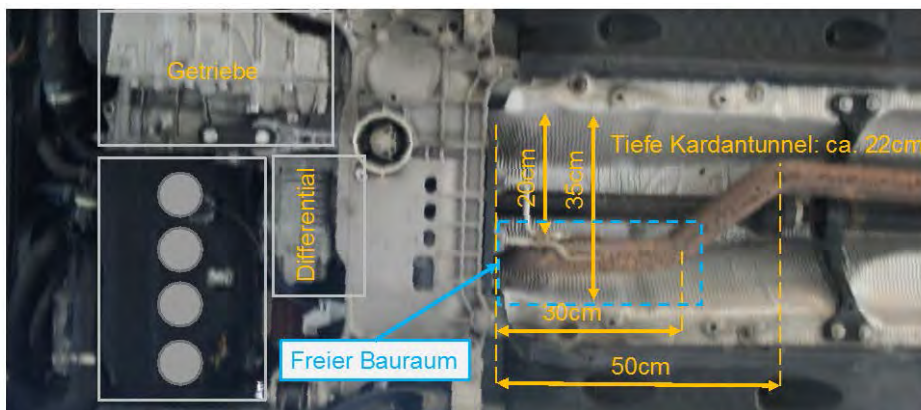


Abbildung 45: Unterboden (vordere Hälfte der Abgasanlage), Tiguan Euro5

Es ist erkennbar, dass es freien Bauraum für zusätzliche Abgaskomponenten gibt, dieser Platz jedoch durch die Kardanwelle (Allrad) stark eingeschränkt ist. Eine Platzierung des SCR-Systems weiter in Richtung Hinterachse ist aus thermischen Gründen wenig sinnvoll. Trotzdem scheint es möglich, wirksam einen SCR-Katalysator mit entsprechendem NOx-Sensor und einen integrierten Ammoniak-Sperrkatalysator zu platzieren. Für den Fahrzeughersteller Volkswagen ist es eventuell möglich, die motorferne Abgasanlage der Euro6b-Fahrzeuge durch verhältnismäßig geringe Änderungen einzupassen. (Hinweis: Das System des Euro6b-Fahrzeugs würde vermutlich wegen des Allrad-Antriebs nicht direkt verwendbar). Zudem sollten Unternehmen, die Komponenten zur Nachrüstung anbieten wollen, im Unterboden Platz finden können. Ein Problem dabei könnte die Einbauposition für die Dosiereinheit von Harnstoff sein, die von der Kardanwelle blockiert werden könnte (Abbildung 46). Selbst bei ausreichendem Platz wären nur kurze Mischungsstrecken realisierbar.

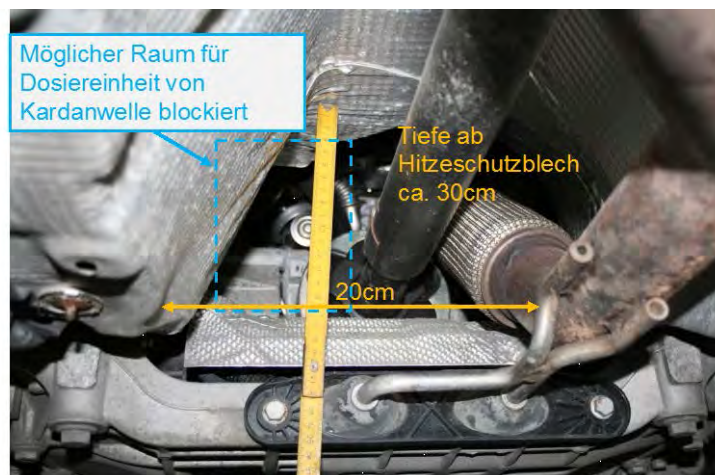


Abbildung 46: Übergang von Motorraum zu Unterboden, Tiguan Euro5

Die Unterbringung eines Adblue-Tanks incl. Heizung und Pumpe wäre im Kofferraum möglich. Hier existiert ein ungenutzter Raum, wo in früheren Fahrzeugtypen das Reserverad untergebracht war (Abbildung 47, linke Seite). Unklar ist, inwieweit dafür Veränderungen an der Karosserie vorgenommen werden müssen. Alternativ wäre ein Tank im Unterboden denkbar (Abbildung 47, rechte Seite).



Abbildung 47: Platzierungsmöglichkeiten für Adblue im hinteren Fahrzeugbereich, Tiguan Euro5

Diese Analyse zeigt, dass es grundsätzlich möglich erscheint, ein SCR-System in dem Euro5-Fahrzeug zu platzieren. Zu den genannten Komponenten (Katalysator incl. NOx-Sensor, Ammoniak-Sperrkatalysator, Dosiereinrichtung und Tank) wären weitere Bauteile notwendig. Zunächst ist davon auszugehen, dass ebenfalls die Einheit aus Oxidationskatalysator und Partikelfilter auszutauschen sind, da für eine angemessene Emissionsreduzierung durch ein SCR-System im typischen PKW-Fahrbetrieb darüber das Verhältnis von NO zu NO₂ eingestellt wird, was für eine schnelle SCR-Reaktion notwendig ist. Darüber hinaus ist einerseits die beheizte Adblue-Leitung vom Tank zur Dosiereinrichtung zu nennen, die ggf. analog des Euro6b-Systems aufgebaut ist. Außerdem müsste es einen zusätzlichen Kabelbaum geben, der zumindest beschränkten Zugang auf den CAN-Bus haben müsste und der die Dosiereinrichtung, die Heizung, die Pumpe und den NOx-Sensor koordiniert. Damit wäre ein autonomes NOx-Reduzierungssystem realisierbar, das allerdings keine Rückwirkung auf den Motor erlaubt. Dieses System ist dementsprechend nicht OBD-fähig. Es erscheint unrealistisch, damit das volle Euro6b-Potential zu erzielen. Außerdem ist festzuhalten, dass es eine spezielle Tankfüllstandskontrolle geben müsste (z.B. direkt am Tank; keine direkte Information im Hauptdisplay). Schließlich ist es zu prüfen, inwieweit das Gesamtsystem durch Druckverlust am Katalysator sowie durch elektrische Energieaufwendungen insbesondere für die Heizung zu Verbrauchsnachteilen führt, die dann ggf. zulassungsrelevant wären. Außerdem könnte der Druckverlust in den Katalysatoren entweder zu einer veränderten Motorbelastung führen, so dass die Haltbarkeit zu prüfen wäre, oder eine Leistungsreduzierung bewirken.

Es erscheint denkbar, dass Volkswagen für Anbieter von Nachrüstlösungen den CAN durch eine Schnittstelle öffnet. Welche Aufwände hinter „öffnet“ stehen ist nicht abschätzbar.

Zusammenfassung EU5:

Eine Verbesserung der Emission des Euro5-Fahrzeugs wäre durch Integration eines SCR-Systems möglich. Hierzu wären folgende Komponenten möglich:

- Abgasanlage mit SCR-System (zB aus Euro6b-Fahrzeugen) incl. DOC und DPF
- Einbau eines autonomen Tanksystems (zB im Kofferraum)
- Einbau eines autonomen, zusätzlichen Steuergeräts zur Adblue-Dosierung
- Verlegen eines separaten Kabelbaums zwischen Tank, Adblue-Injektor, CAN und NOx-Sensor

Hinweise:

- Nicht OBD-fähig
- Tankfüllstandskontrolle unklar
- Verbrauchsnachteil wahrscheinlich (Druckverlust des Katalysators und Heizung und Pumpe für Injektor)
- Haltbarkeit und Leistungsverlust unklar

Es ist unwahrscheinlich, dass mit diesem System das volle Potential von Euro6b erreicht werden kann. Weitere Verbesserungen sind nur durch Integration von NOx- Speicher-Katalysatoren möglich (analog zum Euro6b-Fahrzeug).

Ergänzende Anmerkungen zu Speicher-Katalysatoren

Das Unternehmen Volkswagen hat Fahrzeuge mit NO_x-Speicher-Katalysatoren entwickelt. Es soll darauf hingewiesen werden, dass deren Funktion und Wirksamkeit vermutlich optimiert werden kann, auf Grund der völlig unterschiedlichen Wirkweise aber ein Tausch mit SCR-Systemen nicht möglich erscheint. Eine Ergänzung mit einem SCR-System erscheint auf Grund des starken Eingriffs in das Gesamtsystem als unverhältnismäßig hoher und kaum zu rechtfertigender Aufwand.

Kurzstudie

Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x- Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge

Analyse der Fahrzeuge:

BMW 320d EU5 (Baureihe F30), EZ 2012

BMW X3 2.0d xDrive EU6b (Baureihe F25), EZ 2016

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

06. Februar 2018

Einleitung

Untersucht wurden zwei PKW des Herstellers BMW. Beide Fahrzeuge waren gebraucht und befanden sich in einem dem Fahrzeugalter und der Laufleistung angemessenen guten, fehlerfreien Zustand.

BMW 320d EU5 (Baureihe F30), EZ 2012



BMW X3 2.0d xDrive EU6b (Baureihe F25), EZ 2016



Abbildung 48: Frontansicht der untersuchten Fahrzeuge aus dem Vergabe-Los 2 (BMW)

	320d	X3 2.0d xDrive
Emissionsklasse	EU5	EU6b
Baureihe	F30	F25
Baujahr	2012	2016
Km-Stand	94832 km	10038 km
Motor	N47D20 TÜ	B47D20
Motorleistung	135 kW	140 kW
Hubraum	1995 ccm	1995 ccm
Einspritzung	Common Rail mit Piezo-Injektoren (1800 bar)	Common Rail mit Magnetventil-Injektoren (2000 bar)
Abgasrückführung	gekühlte HD-AGR	gekühlte HD-AGR
Getriebe/Antrieb	Handschaltung/Hinterachse	Automatik/Allrad
Abgasnachbehandlung	Oxidationskatalysator + DPF	DPF + NSK + Sperrkatalysator

Tabelle 4: Technische Daten der untersuchten Fahrzeuge

Eine Analyse der möglichen Einbauverhältnisse ist im Rahmen dieser Studie nur für die vom Hersteller, hier die BMW AG, zur Verfügung gestellten Fahrzeugkonfigurationen möglich. Da unter Umständen in abweichenden Ausstattungsvarianten der Fahrzeuge 320d

und X3 Bauräume durch Sonderausstattungsvarianten belegt sein können, ist die hier getroffene Bewertung nicht auf sämtliche Fahrzeugvarianten der Baureihen F30 und F25 übertragbar. Dies kann insbesondere potentielle Bauräume für das Adblue-Tanksystem betreffen.

Analyse des BMW 320d EU5 (Baureihe F30), EZ 2012

Trotz des für die BMW 3er Reihe charakteristischen Standard-Heckantriebs ist in der Fahrzeugmitte des Unterbodens Bauraum für die Integration eines SCR-Katalysators gegeben. Dies ist insofern plausibel, da in der US-Variante der Baureihe F30 eine Fahrzeugkonfiguration mit SCR-Katalysatorsystem angeboten wird.

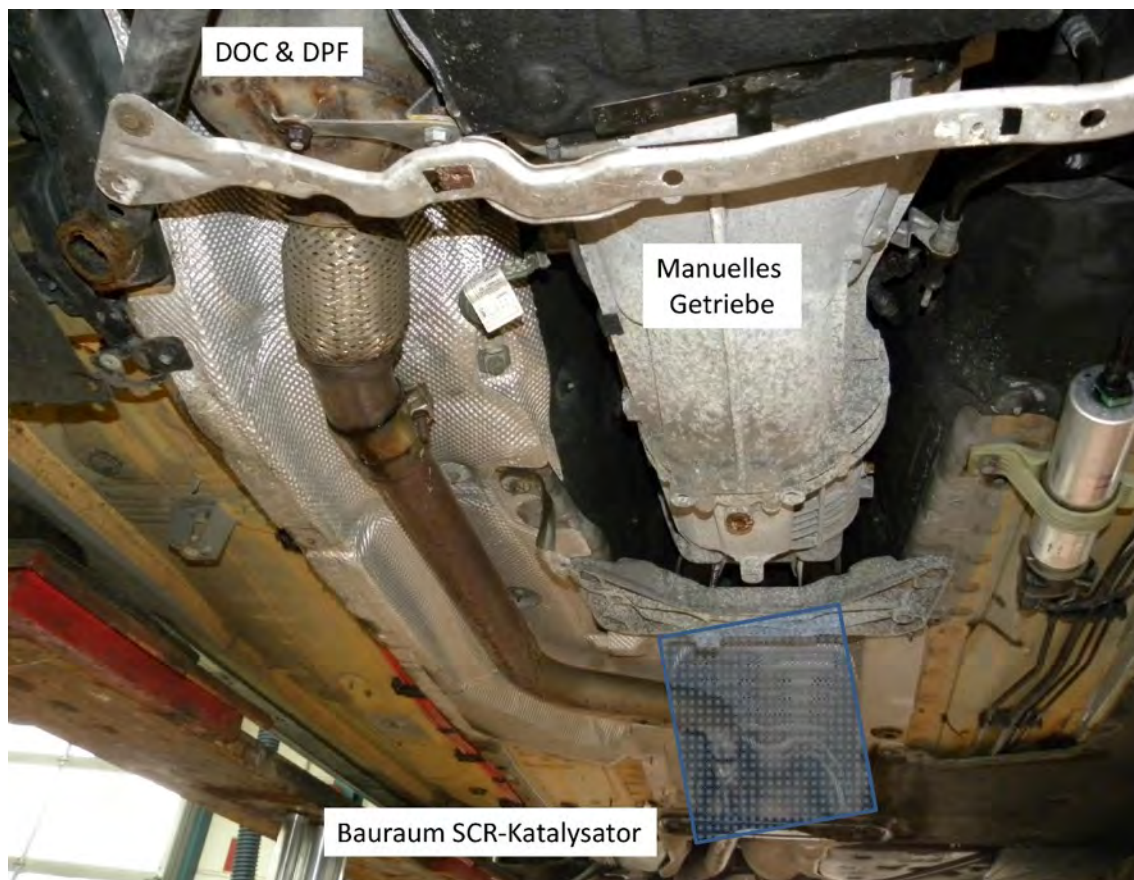


Abbildung 49: Fahrzeugunterboden BMW 320d EU5 (F30) – Bauraum des SCR-Katalysators analog der US Variante der Baureihe F30 ist farblich hervorgehoben

Eine Positionierung der SCR-Katalysatoreinheit abgasstromabwärts hinter dem Getriebe wird aufgrund abnehmender Abgastemperaturen in diesem Bereich der Abgasanlage nur im Systemverbund mit einem NSK (NOx-Specier-Katalysator) zu nennenswerten Reduzierungen der Stickoxid Emissionen im Stadtverkehr führen. Die für die Funktion des SCR-Katalysators – mit NO_x-Umsetzungsraten von 90% und mehr - erforderlichen Abgastemperaturen werden an dieser Position erst bei Geschwindigkeiten - ab ca. 60 km/h - sicher erreicht. Eine elektrische Aufheizung des Abgases zur Anhebung der Temperatur vor dem SCR-Katalysator scheidet aus energetischen und aus Gründen der Leistungsfähigkeit des elektrischen Bordnetzes definitiv aus. Desweiteren fehlt der Kabelbaum zur

Ansteuerung der Adblue-Eindüsung und für den Anschluss erforderlicher Sensorik ans Bordnetz. Ebenfalls nachzurüsten ist die für die Betriebssicherheit der Adblue-Dosierungseinheit erforderliche Kühlung.

Eine motornähere Anbringung des SCR-Katalysators mit einer der zwingwend erforderlichen Adblue-Dosierung sind aufgrund von Bauraumrestriktionen im BMW 320d F30 mit dem in Fahrzeuginnenrichtung eingebauten 4-Zylindermotor nicht möglich.



Abbildung 50: Unterboden-SCR-Katalysator (Beispiel Foto)



Abbildung 51: Motorraum abgasseitig – Einbausituation von AGR, Turbolader und motornaher DOC/DPF-Einheit

Die Nachrüstung eines NSK im Systemverbund mit einem SCR-Katalysatorsystem erfordert weitgehende konstruktive Änderungen am Abgassystem, dem AGR-System, der Sensorik, an der Aufladung und ggf. am Einspritzsystem. Damit eine Hardware-Nachrüstung einen Beitrag zur Stickoxidreduktion leisten kann, sind weitreichende Software-Funktionsentwicklungen der Motorsteuerung und eine nahezu komplette Neu-Applikation erforderlich. Die aktuell in diesen EU5-Varianten der 3er Reihe verbauten Motoren vom Typ N47D20 Tü sind von den Rohemissionswerten und auch funktional nicht befähigt im unterstöchiometrischen Betrieb, also mit Kraftstoffüberschuss, im NSK eingespeicherte Stickoxide zu konvertieren. Dieser Lösungsansatz muss deshalb aus Kostengründen und aus Gründen der zu erwartenden Entwicklungszeiten verworfen werden.



Abbildung 52: Tankdeckel mit geometrischem Vorhalt für den AdBlue-Einfüllstutzen

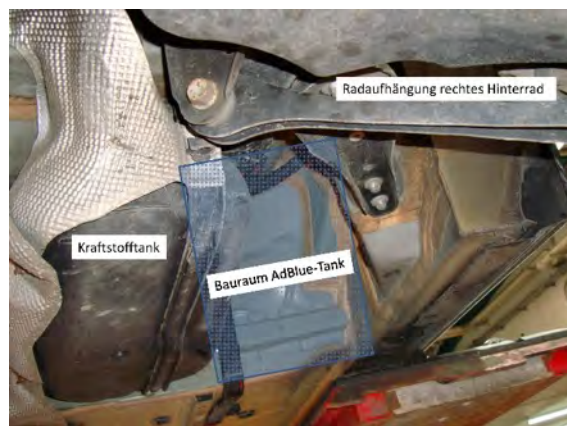


Abbildung 53: Fahrzeugunterboden BMW 320d EU5 (F30) – Bauraum des AdBlue-Tanksystems analog der US-Variante des F30 ist farblich hervorgehoben

Das zur Verfügung gestellte Fahrzeug BMW 320d EU5 (Baureihe F30) scheint die erforderlichen Bauräume für eine Adblue-Tanksystem-Nachrüstung aufzuweisen. Der Packageraum für einen Adblue-Tank im Unterboden rechts unter der Rücksitzbank wäre gegeben. Offensichtlich nicht vorhanden sind die Adblue-Leitungen vom Adblue-Tank zum Adblue-Injektor sowie der Kabelbaum für die Ansteuerung und Beheizung der Adblue-Einspritzung. Hierzu wären eine Karosseriemodifikation und die Neuverlegung eines elektrisch abgesicherten Kabelbaums zur Füllstandsermittlung, Temperaturmessung sowie eine Stromversorgung für die Förderpumpe und Beheizung erforderlich. Eine Befüllung analog der US-Variante über einen Einfüllstutzen ist über die vorhandene große Tankklappe und die Verlegung der Leitungen mit geringen Eingriffen an der Karosserie des Fahrzeugs möglich.

Bauraum für einen weiteren Adblue-Tank (Passiv-Tank) analog der US-Variante erscheint ebenfalls möglich, sofern der Bauraum in Fahrzeugheck neben dem Endschalldämpfer nicht durch eventuelle Sonderausstattungen belegt ist.

Die zusätzliche Masse des SCR-Katalysators führt zu veränderten Schwingungsverhalten der Abgasanlage. Hier sind eine neue Auslegung und Erprobung der Betriebsfestigkeit und eine neue Auslegung der Abgasanlagenaufhängung sowie des Metallfaltenbalgs zur

Längen- und Schwingungskompensation zwingend notwendig. Das macht ggf. ebenfalls Änderungen an der Fahrzeugkarosserie erforderlich. Eingriffe in die Karosserie wie das Schaffen von Durchbrüchen und zusätzlich angebrachte Schweißstellen führen in jedem Falls zu erhöhter Korrosionsneigung an den betroffenen Stellen, da die bei Fahrzeugen von BMW übliche Zinkbeschichtung zum Korrosionsschutz lokal zerstört wird.

Analyse des BMW X3 2.0d xDrive EU6b (Baureihe F25), EZ 2016

Das Fahrzeug BMW X3 2.0d EU6b verfügt über einen motornahen NSK (NOx-Speicher-Katalysator) mit üblicher Sensorik inklusive Lambda-Sonde vor und hinter dem NSK sowie Temperaturmessung vor NSK zur Überwachung und Steuerung der Katalysator-Funktionalität.



Abbildung 54: Fahrzeugunterboden BMW X3 EU6b (F25) mit Sperr-Katalysator (CU-Zeolith) – Bauraum für den SCR-Katalysator ist farblich hervorgehoben

Diese Position für einen SCR-Katalysator ist relativ weit abgasstromabwärts - also deutlich hinter dem Automatik-Getriebe - angeordnet. Dieser Katalysator ist mit einer SCR-Beschichtung (CU-Zeolith) versehen. Dieses Bauteil kann bei einer SCR-Nachrüstung funktional entfallen und gibt damit einen möglichen Bauraum für ein SCR-Katalysatorsystem frei. Ein Vorhalt für einen sog. Sperr-Katalysator für Ammoniak NH_3 muss ohnehin bei jeglicher SCR-Katalysator Nachrüstung gemacht werden. Üblicherweise können derartige Sperrkatalysatoren in dem SCR-Katalysatorgehäuse integriert werden. Im Falle einer Nachrüstung mit der üblichen flüssigen Adblue-Eindüsung fehlen

die Kühlungsanschlüsse für das Dosiermodul und die elektrischen Anschlüsse für Dosierventil und Sensorik.

Die Aufhängung der Abgasanlage muss bei Nachrüstung eines SCR-Katalysators aufgrund des verstimzten Schwingungsverhaltens durch zusätzliche Steifigkeiten und Massen modifiziert, angepasst und auf Betriebssicherheit abgesichert werden.

Das Fahrzeug ist in der EU6b-Variante mit einem Motor Typ B47D20 ausgerüstet. In dieser Konfiguration steht abgasseitig im Motorraum des BMW X3 der Baureihe F25 etwas Bauraum (max. Breite etwa 10 cm) für eine NH_3 -Aufbereitung zur Verfügung. Die hohen Betriebstemperaturen einer solchen NH_3 -Aufbereitungseinheit stellen eine stark erhöhte Schwierigkeit in diesem kleinen Bauraum dar und müssten zwingend abgesichert werden.

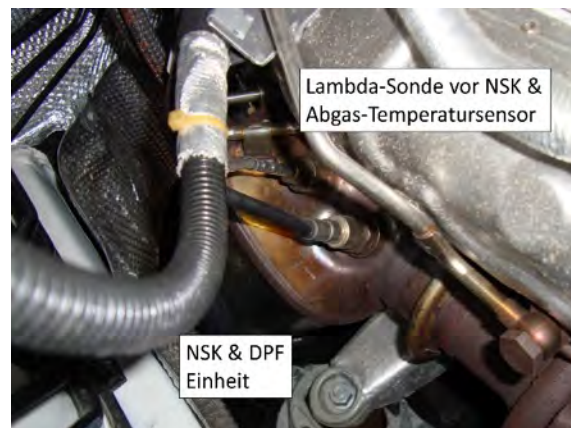


Abbildung 55: NO_x -Speicher-Katalysator mit Sensorik



Abbildung 56: Motorraum des BMW X3 EU6b (F25) - Ansicht abgasseitig – Einstallung von AGR, Turbolader und motornaher DPF/NSK-Einheit

Möglicher Bauraum für einen Adblue-Tank ist innerhalb des rechten Radhauses unterhalb des Tankeinfüllstutzens vorhanden. Hier sind bereits angeschweißte Halterungen vorhanden, welche auf einen Vorhalt für einen Adblue-Tank hindeuten. Allerdings fehlen beim untersuchten Fahrzeug der dazugehörige Kabelbaum für die Beheizmöglichkeit, den Anschluss der Förderpumpe und die notwendige Temperatur- und Füllstands-Überwachung.



Abbildung 57: Radhaus rechts hinten des BMW X3 EU6b (F25) – ein möglicher Bauraum für das Adblue-Tanksystem ist farblich hervorgehoben



Abbildung 58: Tankdeckel mit geometrischem Vorhalt für den Adblue-Einfüllstutzen

Das analysierte Fahrzeug BMW X3 2.0d verfügt über eine große Tankklappe. Die Integration einer Adblue-Betankungsmöglichkeit ist durch einen Austausch des Tankklappenmoduls mit zusätzlichem Einfüllstutzen gegeben.

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass ein zumindest geometrischer Vorhalt für den Einbau eines Adblue-Systems und eines SCR-Katalysatorsystems in der Karosserie des BMW X3 aus der Baureihe F25 gegeben ist. Für den US-amerikanischen Markt und für eine kleine Stückzahl (nach Auskunft von BMW ca. 400 Einheiten) in der EU wurden BMW X3-Fahrzeuge der Baureihe F25 mit SCR-Systemen ausgerüstet. Diese Fahrzeuge verfügten aber noch über einen Motor älterer Bauart vom Typ N47D20TÜ, was eine direkte Übernahme der Systemkomponenten und der Motorsteuerungsfunktionalitäten ausschließt. Die in der vorliegenden EU6b-Variante der Baureihe F25 verbauten Dieselmotoren vom Typ B47D20 sind von den Rohemissionen und der funktional nicht vorgesehene Möglichkeit des Betriebs mit einem SCR-Katalysatorsystem nicht ohne weitgehende Modifikationen kompatibel mit einer Nachrüstlösung.

Die Nachrüstung eines X3 2.0d EU6b Fahrzeugs auf eine Abgasnachbehandlung mit NSK im Systemverbund mit einem SCR-Katalysatorsystem erfordert tiefgreifende konstruktive Änderungen am Abgassystem, am Motor selbst (Brennverfahren und Aufla-

dung), dem AGR-System und der Sensorik sowie eine umfassende Neuapplikation und Funktionsentwicklung der Motorsteuerung. Funktional und im Hinblick auf die Integration von Sensorik, Aktuatorik und Integration in das Anzeige- und Bedienkonzept entsteht bei der Umsetzung ein erheblicher Entwicklungs- und Kostenaufwand.

Zusammenfassung

Die zu erwartenden Aufwände für eine Nachrüstung mit einem SCR-Katalysatorsystem der beiden untersuchten BMW-Fahrzeuge sind als sehr hoch einzustufen.

Prinzipiell ist eine Umrüstung der untersuchten Fahrzeuge technisch möglich. Beide Fahrzeuge, sowohl der 320d EU5 als auch der X3 2.0d xDrive EU6b, verfügen über geeignete und freie Packageräume zum Einbau eines SCR-Systems, da beide Fahrzeuge bereits in bestimmten Derivaten ab Werk mit SCR-Systemen ausgerüstet wurden.

Bei den untersuchten Fahrzeugen 320d (EU5) und X3 2.0d xDrive (EU6b) ist kein SCR-System verbaut. Die oben aufgeführte Analyse zeigt auf, dass eine nachträgliche Aufrüstung auf ein SCR-System unter Serienqualitäts Gesichtspunkten umfangreiche Eingriffe in die Abgasanlage, Sensorik, Motorsteuerung und den Einbau einer Adblue-Eindüsung erforderlich macht.

Bei einer Nachrüstung sind folgende Umfänge zwingend anzupassen:

- Anpassung der Abgasanlage (Katalysatoren und Verrohrung)
- Adblue-Infrastruktur im Fahrzeug (Tank, Leitungen, Eindüsung, Heizung/Kühlung)
- Neu-Applikation/Neu-Entwicklung der Motorsteuerung & SCR-Steuergerät
- neuer Motor-Kabelsatz und Getriebe-/Unterboden-Kabelsatz
- Bordspannungsabsicherung (leistungsstärkerer Generator und ggf. Batterie)
- Fahrerinformationssystem
- Sensorik und Diagnose / Missbrauchseinschränkungen
- Beachtung der Variantenvielfalt (Allradantrieb, Getriebe, Länder-Varianten, Sonderausstattung...)

Die Nachrüstkosten wurden für die beiden Fahrzeuge auf Basis der aktuellen frei verfügbaren Ersatzteilpreise und Werkstattstundensätze ermittelt. Dabei ergaben sich für den BMW 320d EU5 für eine Nachrüstung Kosten von ca. 8970€ und für den BMW X3 2.0d xDrive EU6b Kosten von ca. 6550€ (Details hierzu siehe Kapitel „Kostenerstbewertung“ im Hauptteil der Studie).

Eine technisch sinnvolle und wirtschaftlich tragfähige Nachrüstung von noch älteren mit **EU4 zertifizierten BMW Diesel-Fahrzeugen** ist als unrealistisch anzusehen. Die Gründe dafür sind der nicht ausreichende Umfang der Packageräume der Fahrzeuge und das Fehlen der funktionalen Basis in der Antriebs- und E/E-Architektur. Die im Kapitel „Kostenerstbewertung“ getätigten Annahmen für die zu erwartende Kosten würden für den

Fall von EU4-Fahrzeugen sogar noch überschritten werden. Bei einem vergleichsweise niedrigen Restwert dieser Fahrzeuge ist dann eine Umrüstung unwirtschaftlich.

Um für die Fahrzeuge eine tragfähige und wirkungsvolle Nachrüstlösung anbieten zu können, muss ein erheblicher Entwicklungs- und Absicherungsaufwand getrieben werden. Dazu kommt der damit verbundene Zeitaufwand zur Umsetzung der Nachrüstlösungen. Da diese Entwicklungs- und Absicherungsarbeit für verschiedenste Varianten erfolgen muss, ist von einem Mindestzeitbedarf von 18 bis 24 Monaten auszugehen. Diese zeitliche Abschätzung trifft auf Nachrüstlösungen zu, die vom Hersteller – hier die BMW AG – in allein umgesetzt werden können. Für den Fall, dass eine von einem Drittanbieter bis zum Prototypenstadium entwickelte SCR-Nachrüstlösung integriert werden sollte, verringert sich der Zeitbedarf bis zur abgesicherten Serienreife der Nachrüstlösung nur unwesentlich. Ein SCR-System muss von seiner Komplexität und Rückwirkung auf den Fahrzeugbetrieb eng an die Gesamtfahrzeugfunktionalität gekoppelt werden. Eine wirk-same Stand-Alone-Nachrüstlösung, ohne Einbindung des Fahrzeugherstellers scheidet für die untersuchten Fahrzeuge aus.

Aus den oben genannten Punkten ist für die beiden untersuchten BMW-Fahrzeuge eine Hardware-Nachrüstung aus wirtschaftlichen Gründen und wegen des hohen Zeitbedarfs für die Umsetzung der Nachrüstungen in der Fahrzeugflotte nicht zu empfehlen. Hinzu kommt wie oben beschrieben, dass selbst unter Best-Case-Annahmen abhängig von der Fahrzeugbasis nur eine reduzierte Konversionsrate im innerstädtischen Betrieb erreicht werden kann.

Kurzstudie

Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x- Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge

Analyse der Fahrzeuge:

Mercedes Benz E-Klasse E-220 CDI Bluetec (W212) EU6b
mit OM651 DE 22 LA (125 kW)

Mercedes Benz C-Klasse C-250 CDI (W204) EU5
mit OM651 DE 22 LA (150 kW)

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

15. Januar 2018

Befundung Daimler E-Klasse (W212) EU6b

Fahrzeug: BB-FP 8159 (WDD2122011B102439)

Modell: E 220 Bluetec (125 kW)

Motor: OM 651 DE 22 LA

Baujahr: 2014

Abgasnorm: Euro 6b

Verbaute Abgasanlage:

- Dieseloxidationskatalysator (DOC)
- Dieselpartikelfilter (DPF)
- SCR-Katalysator (nicht isoliert)
- Adblue-Tankvolumen ca. 24,5 l

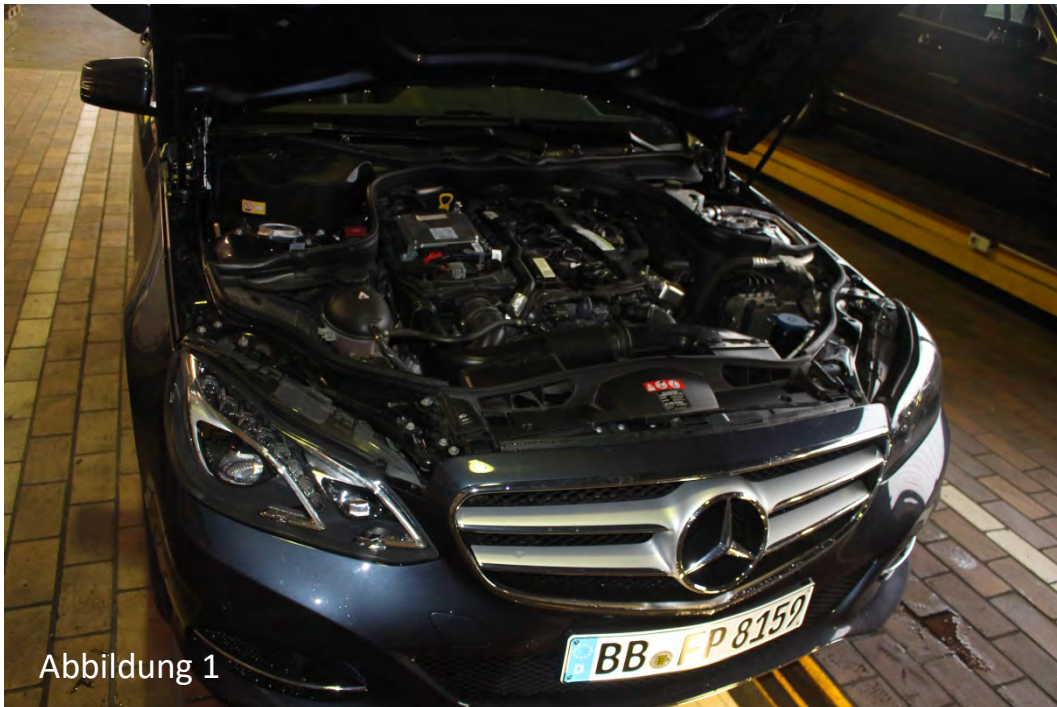
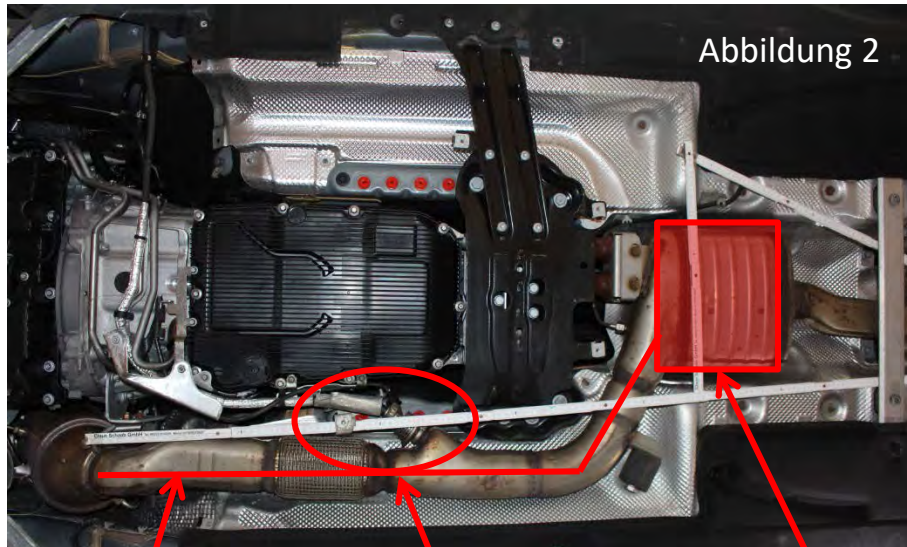


Abbildung 1

Der von Daimler zur Verfügung gestellte W212 Baujahr 2014 verfügt bereits serienmäßig über einen SCR-Katalysator mit Harnstoff-Einspritzung.

Allerdings ist der SCR-Kat (siehe Abbildung 2 und 3) motorfern im Wagenunterboden montiert. Um die Wirksamkeit des SCR-Kat schnell nach dem Kaltstart zu erreichen und auch bei betriebswarmem Motor im unteren Teillastbereich nicht aus dem Konvertierungsfenster zu fallen, sind offensichtlich umfangreiche Applikationsmaßnahmen umgesetzt worden, um die Abgastemperatur unter den genannten Umständen auf einem ausreichend hohen Niveau (ca. $> 150^{\circ}\text{C}$) zu halten, bzw. diese Kat-Temperatur nach Kaltstart schnell zu erreichen.

Ansicht Unterboden:



Freie Rohrlänge zwischen
DPF & SCR ca. 100 cm

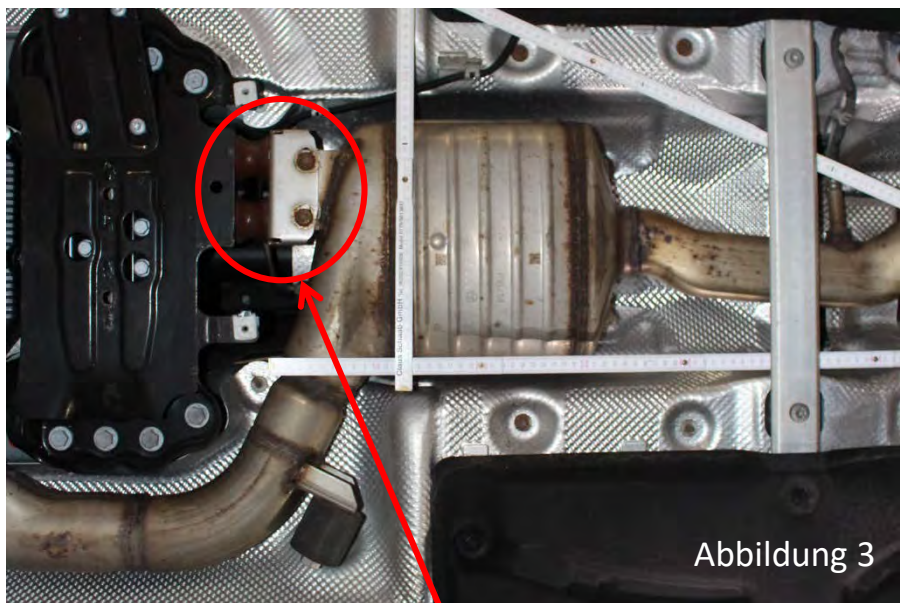
Einbauposition
AdBlue-Injektor

Einbauposition
SCR-Katalysator

SCR-Katalysator:

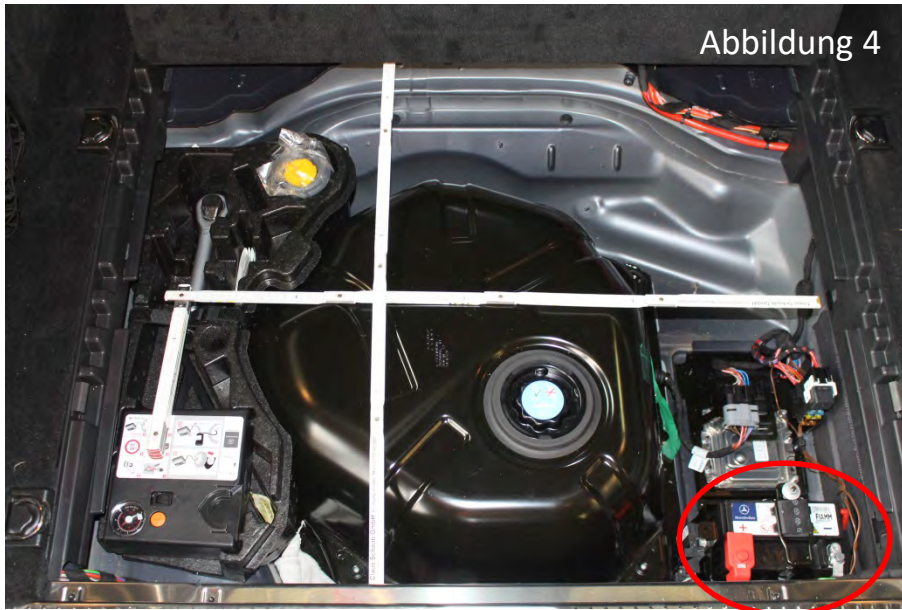
SCR im Unterboden / motorfern

benötigter Bauraum für SCR-Katalysator (l/b/h in cm): 30 x 25 x 10



Lagerung der Abgasanlage an Getriebeträger

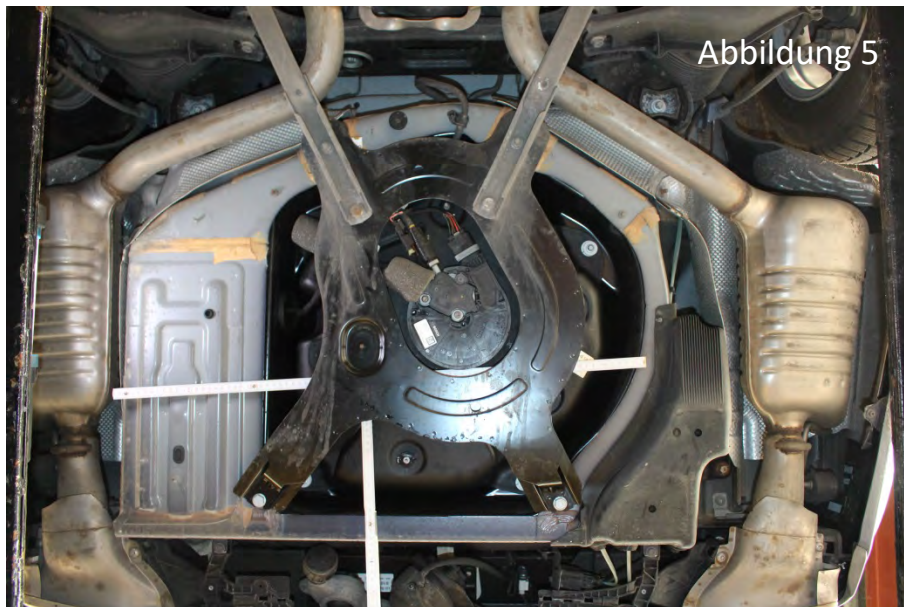
Innenansicht Kofferraum | Ersatzradmulde:



Stützbatterie
für Start-Stopp

Über der Stützbatterie ist das Adblue Steuergerät zu erkennen, das in Zusammenarbeit mit dem Motorsteuergerät alle Adblue-Funktionalitäten steuert und regelt.

Außenansicht Kofferraum | Ersatzradmulde:



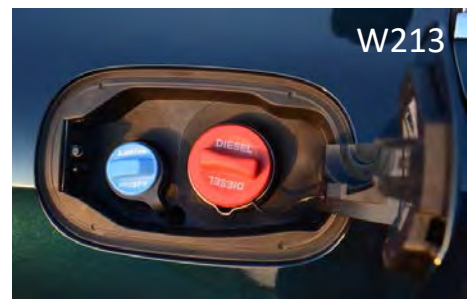
Gut zu erkennen, ist die zweiflutige Führung der Abgasanlage im hinteren Bereich, obwohl der OM651 ein Reihenvierzylinder ist.

Der Adblue-Tank benötigt auf Grund seiner Größe von ca. 24,5 Liter und dem damit einhergehenden Gewicht bei voller Befüllung eine Vierpunktaufhängung. Anzunehmenderweise hat dies auch Crash-Gründe um die Sicherheit zu gewährleisten.

Detail: Tankstutzen EU6



Da es den W212 auch als bivalentes Erdgasfahrzeug gibt, sind alle Fahrzeuge mit einem Vorhalt für den CNG-Tankstutzen versehen. Dies ist kein Vorhalt für eine Adblue-Feldbetankung, wie angenommen werden könnte, wenn man den Tankstutzen des Folgemodells (W213) betrachtet. Der W212 war nie für eine Adblue-Feldbetankung mit Einfüllstutzen vorgesehen.



Detail: Adblue-Injektor



Die Harnstoffleitung vom Adblue-Tank (Abbildung 4 und 5) bis zur Eindüsestelle (Abbildung 7 und 8) ist offensichtlich beheizt um ein Einfrieren der wässrigen Harnstofflösung zu verhindern.

Ebenfalls elektrisch beheizt ist der (mit 24,5 Liter relativ große) Adblue Tank in der Reserveradmulde im Kofferraum (Abbildung 4 und 5). In Abbildung 4 ist eine Stützbatterie zu erkennen, die aber nicht der Adblue-Heizung dient, sondern Bordnetzeinbrüche bei Start-Stopp verhindern soll. Darüber befindet sich das Steuergerät für das Adblue-Management. Diese arbeitet eng mit dem Motorsteuergerät zusammen. Vermutlich ist hier eine CAN-Busverbindung realisiert.

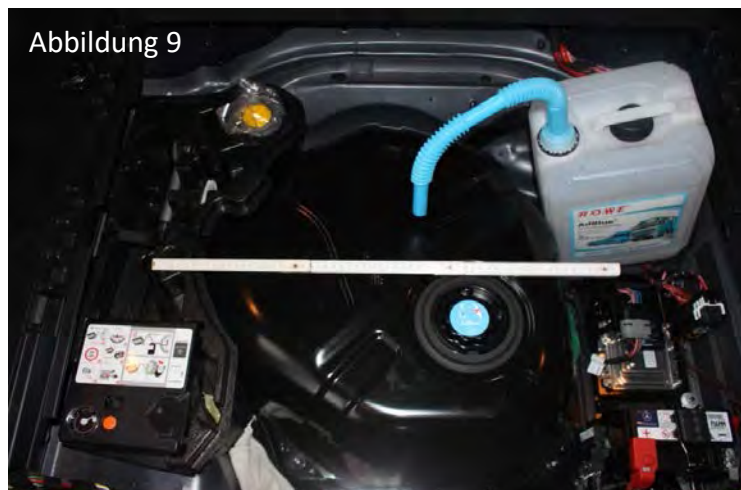
Das Fahrzeug ist nicht mit einem Adblue-Nachfüllstutzen versehen. Der scheinbar hierfür vorgesehene Platzvorhalt neben dem Tankstutzen, dient vielmehr bei den bivalenten CNG-Fahrzeugen des W212 für den CNG-Betankungsstutzen (Abbildung 6). Der W212 war nie für eine Adblue-Feldbetankung mit Einfüllstutzen vorgesehen.

D.h., dass das Adblue-Management so ausgelegt ist, dass innerhalb der Inspektionsintervalle kein Nachfüllen von Adblue erforderlich wird (sogenannter Werkstatt-Refill).

Durch den großen Tank mit 24,5 Liter Volumen stellt dies keine allzu große Einschränkung dar, da Taxifahrer beim Nachfolgemodell mit Nachfüllstutzen (W213 mit OM654) von 15.000 bis 20.000 km Laufleistung bis zum Nachfüllen berichten. Allerdings muss beim OM651 von einem höheren Roh-Emissionsniveau ausgegangen werden, so dass diese Laufleistungen beim W212 mit OM651 kaum erreicht werden dürften.

Fazit:

Der W212 mit Euro 6b und SCR-System bietet sehr gute Voraussetzungen für ein Software-Update, da nahezu keine Hardware-Nachrüstung erforderlich ist. Lediglich die Nachrüstung eines Adblue-Tanks mit Nachfüllstutzen wäre – lediglich aus Komfortgründen - sinnvoll, wobei – wie Abbildung 9 zeigt – auch eine Nachfüllung direkt am Tank – insbesondere auf Grund der Seltenheit infolge Tankgröße – gut zumutbar erscheint. Die Bedienungsanleitung des W212 beschreibt diese Nachfüllmöglichkeit, wenn der Fall eintreten sollte, dass zwischen den Inspektionsintervallen nachzufüllen wäre. Siehe hierzu auch die folgenden Ausführungen über die Füllstandsanzeige und die Erfüllung der gesetzlichen Vorschriften.



Beim W212 bereits vorhanden ist auch eine Füllstandsüberwachung des Adblue mit Anzeige (Abbildung 10). Eingehalten werden auch alle gesetzlichen Vorgaben. D.h. der Fahrer(in) wird unterhalb eines bestimmten Füllstandes zum Nachtanken aufgefordert. Unterlässt er/sie das, dann ist der Motor mit leergefahrenem Adblue-Tank nicht mehr startbar. Davor liegen diverse Warnstufen. Die Adblue-Nachfüllung mittels Kanister (Abbildung 9) ist in der Bedienungsanleitung beschrieben und auch auf dem Nachfülldeckel findet sich ein entsprechender Hinweis.



Der Aufwand hinsichtlich der Überarbeitung der Serienapplikation des Steuergerätes ist jedoch als relativ hoch einzuschätzen, da nicht nur die gesamte SCR-Strategie überarbeitet werden muss.

Mit der im W212 vorhandenen EU6-Hardware kann davon ausgegangen werden, dass durch eine Überarbeitung der Motorsteuerung eine signifikante und nennenswerte Verbesserung des Abgasverhaltens im Straßenbetrieb zu erzielen ist. Mögliche Maßnahmen zur innermotorischen Stickoxid-Minderung (Optimierung der Verbrennung durch eine optimierte Einspritz- und Aufladestrategie, sowie eine Erschließung weiterer Potenziale der Abgasrückführung) können einen wichtigen Beitrag im innerstädtischen Betrieb leisten. Die Potentiale hin zu deutlichen Verbesserungen ergeben sich auch daraus, dass seit der Entwicklung des hier befundeten W212 mit OM651 in EU6b-Zertifizierung eine Vielzahl von damals nicht bekannten Erkenntnissen und auch eine große Datenbasis im Feld befindlicher Fahrzeuge gewonnen werden konnte.



Allerdings müssen diese Optimierungsmaßnahmen vor dem Hintergrund eines weitgehend unveränderten Kraftstoffverbrauchs und einer unbedingt erforderlichen Dauerhaltbarkeit gesehen werden. Eine Absicherung durch aufwendige Dauerläufe ist deshalb unabdingbar.

Da all diese Maßnahmen in unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen verschiedene Auswirkungen haben können, sind diese auch bei Kälte, Hitze und Höhenbetrieb bezüglich Dauerhaltbarkeit und Fahrbarkeit aufwendigen Testfahrten zu unterziehen. Eine Absicherung via Simulation ist hierfür erfahrungsgemäß gänzlich unzureichend.

Da mit EU6-Fahrzeugen bereits gegenüber EU5-Fahrzeugen tendenziell deutlich geringere Stickoxid Emissionen realisiert sind, ist durch eine derartige komplette Überarbeitung der Motorsteuerung bei EU6 Fahrzeugen auch im realen Kundenbetrieb eine geringere absolute Verbesserung der Stickoxid-Emissionen (ca. -20%) im Vergleich zu den EU5 Fahrzeugen (ca. -30%) zu erwarten. Trotzdem sollten die vorhandenen Potentiale unbedingt realisiert werden, weil dadurch die Stickoxid-Immissionen an neuralgischen Punkten in Innenstädten unter die Grenzwerte gedrückt werden können.

Vorteilhaft ist allerdings, dass die EOBD-Applikation relativ wenig betroffen ist, da praktisch keine neue Sensorik oder grundsätzliche Funktionsänderungen der emissionsrelevanten Prozesse erforderlich sind.

Letztlich ist zur Einschätzung des tatsächlichen Aufwandes noch sehr wesentlich, wie viele unterschiedliche Datenstandvarianten sich bei welcher Anzahl an Derivaten im Feld befinden. Dies können leicht mehrere Dutzend Varianten sein.

Abschließend erscheint beim W212 EU6 mit SCR eine herstellerseitige Software Überarbeitung sehr viel sinnvoller und der Sache dienlicher, als jedwede Hardware-Nachrüsterlösung.

Befundung Daimler C-Klasse (W204) EU5

Fahrzeug: BB-FP 7172 (WDD2040031A744830)

Modell: C 250 CDI (150 kW)

Motor: OM 651 DE 22 LA

Baujahr: 2012

Abgasnorm: Euro 5

Verbaute Abgasanlage:

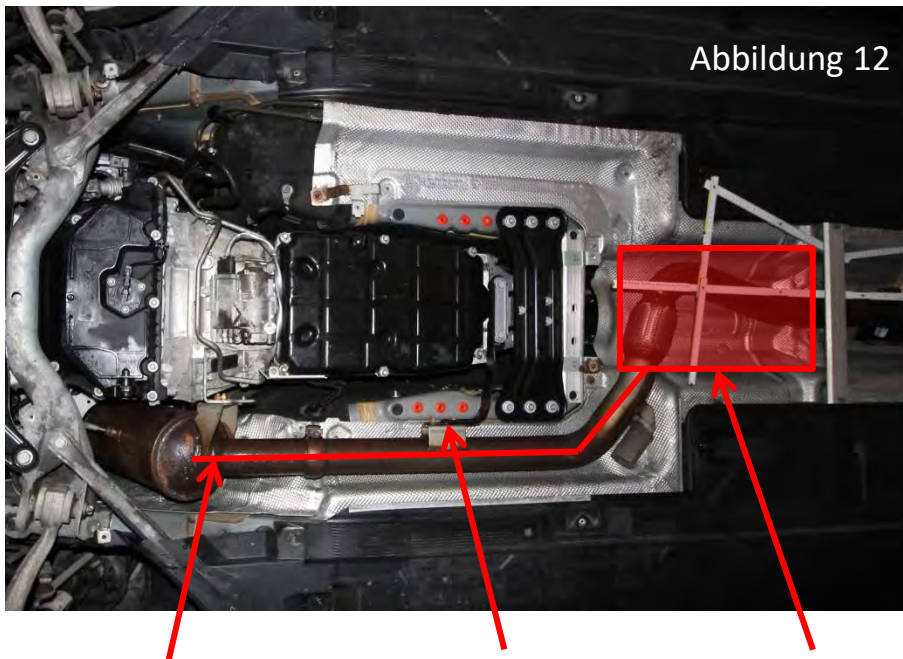
- Dieselloxidationskatalysator (DOC)
- Dieselpartikelfilter (DPF)



Der von Daimler zur Verfügung gestellte W204 Baujahr 2012 (Abbildung 11) verfügt über keine aktive Denoxierung in der serienmäßig verbaute Abgasanlage.

Recherchen ob der W204 in anderen Märkten als Europa (z.B. USA) mit einer aktiven Denoxierung (z.B. SCR-System mit oder ohne Adblue) angeboten wurde, verliefen negativ.

Ansicht Unterboden:



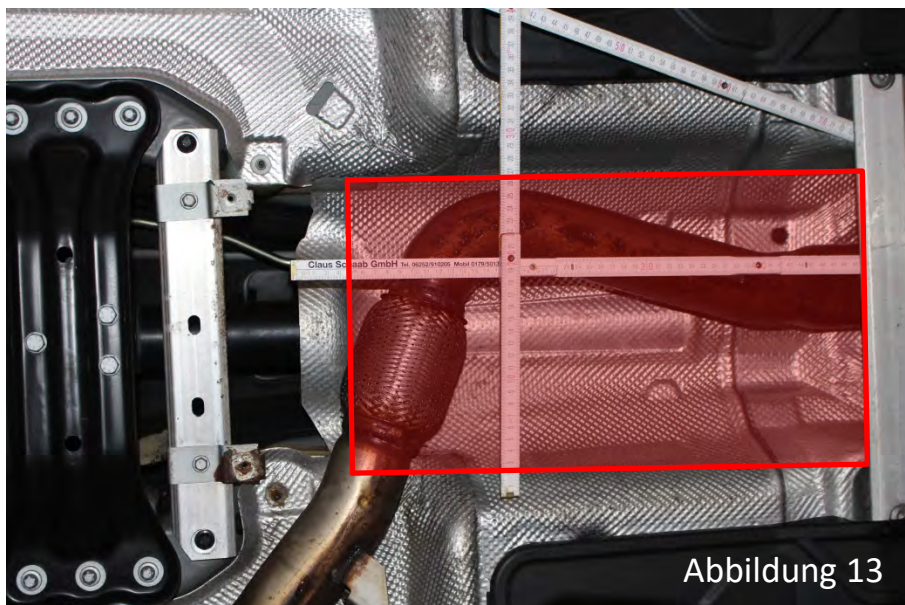
Freie Rohrlänge zwischen
DPF & SCR ca. 100 cm

mögl. Einbauposition
AdBlue-Injektor

mögl. Einbauposition
SCR-Katalysator

Beim Vergleich von Abbildung 12 zu Abbildung 2 des W212 fällt sofort auf, dass der SCR-Katalysator des W212 im Unterboden des W204 verbaubar erscheint, wie die Abbildungen 12 und 13 zeigen. Auch die Harnstoff-Dosierung scheint an gleicher Stelle realisierbar, wie im W212, siehe hierzu Abbildung 12 im Vergleich zu Abbildung 2.

Einbauort SCR-Katalysator:

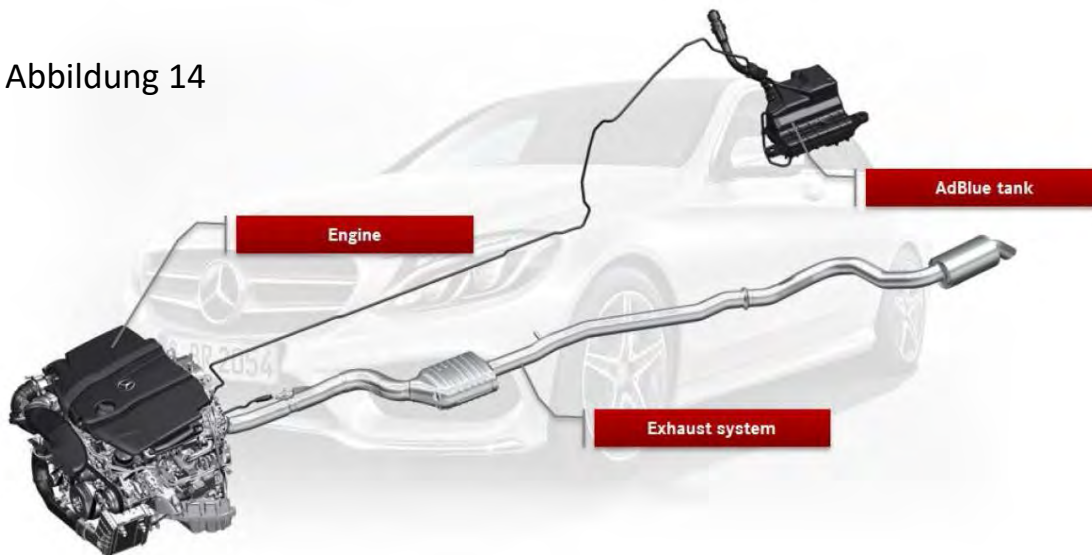


Allerdings muss für eine entsprechende Lagerung am Getriebeträger (Abbildung 13 im Vergleich zu Abbildung 3) gesorgt werden.

Selbstverständlich nicht vorhanden sind die Adblue-Leitungen vom Adblue-Tank zur Adblue-Eindüsestelle. Ebenfalls nicht vorhanden ist der Kabelbaum für die Ansteuerung und Beheizung der Adblue-Einspritzung und -leitungen.

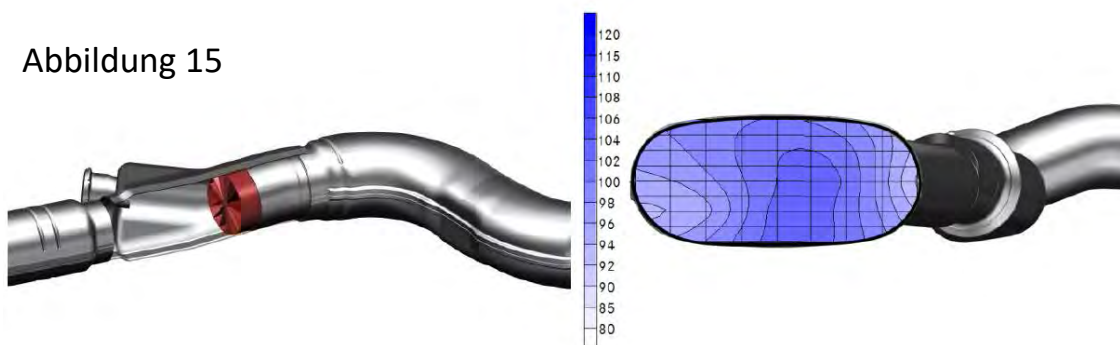
Abbildung 14 zeigt die Abgasanlage des Nachfolgemodells (W205) des hier betrachteten W204, wobei der dargestellte W205 ebenfalls mit dem hier betrachteten OM651 DE 22 LA ausgerüstet ist. Die Abgaszertifizierungsstufe ist hier – wie beim W212 – EU 6b.

Abbildung 14



Auch hier ist der SCR-Kat im Unterboden verbaut wie im W212. Die Lage der Adblue-Einspritzung ist ebenfalls identisch. Zur Adblue-Einspritzung gehört auch ein Drallmischer, der für die notwendige Gleichverteilung des NH_3 -Stromes im Kat sorgt (Abbildung 15).

Abbildung 15



Trotz der relativ ungünstigen motorfernen Anordnung des SCR-Kat im Unterboden können nach Aussage Daimler durch entsprechende innermotorische Heizmaßnahmen (Einspritz-, Ladedruck- und AGR-Strategie) ein schneller LightOff und eine bemerkenswerte Konversionsrate auch im Niedriglastbereich erzielt werden (Abbildung 16).

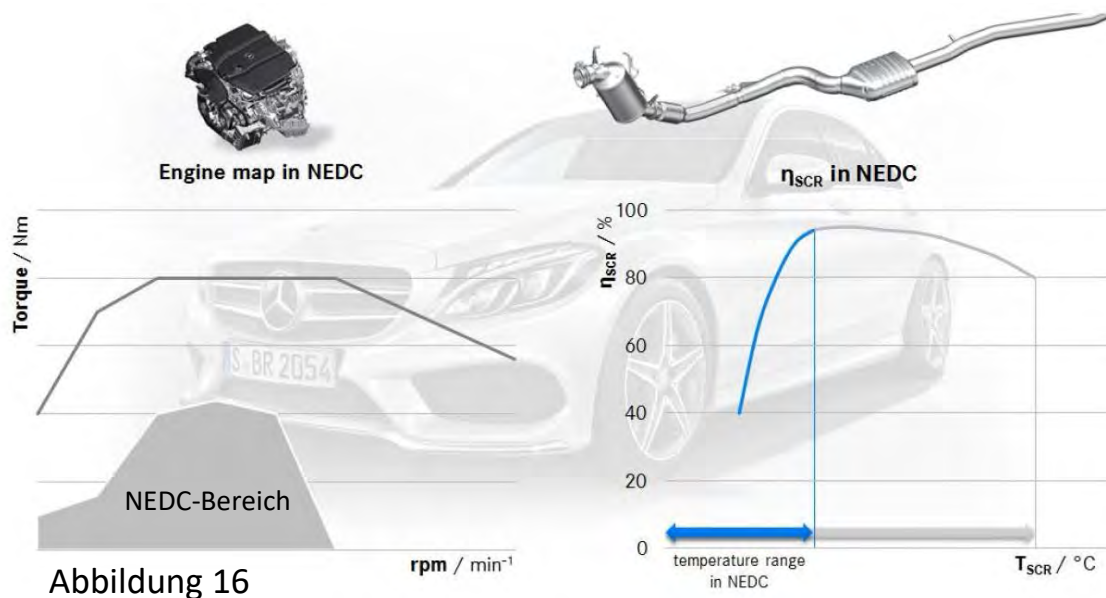


Abbildung 16

Abbildungen 14, 15 und 16 aus „Mercedes-Benz BlueTEC SCR-Technologie für die neue C-Klasse“
<http://docplayer.org/24914506-Mercedes-benz-bluetec-scr-technologie-diesel-abgasnachbehandlung-fuer-die-neue-c-klasse.html>

Hinsichtlich Adblue-Tank zeigen sich beim W204 im Bereich der Reserveradmulde sehr ähnliche Platzverhältnisse wie beim W212 (Abbildung 17 im Vergleich zu Abbildung 4). Auch im Unterboden im Bereich der Reserveradmulde liegen recht ähnliche Verhältnisse vor (Abbildung 18 im Vergleich zu Abbildung 5). Allerdings ist die Abgasanlage nur einflutig ausgeführt, so dass die Vierpunktabstützung des W212 ohne Neukonstruktion nicht verwendbar ist.

Innenansicht Kofferraum | Ersatzradmulde:



Abbildung 17

Im Rahmen der hier durchgeführten Sichtprüfung kann also davon ausgegangen werden, dass idealerweise der 24,5 Liter große Adblue-Tank des W212 in der Reserveradmulde des W204 verbaubar ist. Dies betrifft auch das Adblue-Steuergerät neben dem Adblue-Tank in der Reserveradmulde (Abbildung 4).



Abbildung 18

Ein Adblue Nachfüllstutzen ist jedoch kaum verbaubar, da der entsprechende CNG-Betankungsstutzen-Platzvorhalt nicht vorhanden ist. Da es sich hier aber – wie beim W212 besprochen – um eine reine Komfortmaßnahme handelt, kann darauf auch verzichtet werden.

Fazit:

Um beim W204 mit OM651 in EU5-Kalibrierung eine SCR-Anlage nachzurüsten sind die Hardware-Voraussetzungen auf Grund der Ähnlichkeit der Wagenunterbodengestaltung mit dem W212 relativ gut.

Jedoch muss auf die Variantenvielfalt geachtet werden. Gemäß der durchgeführten Sichtprüfung ist bereits bei der Rechtslenkervariante des W204 mit erheblichen Packagingproblemen zu rechnen, so dass diese Variante z.B. nicht abdeckbar ist.

Zudem ist beim W204 neben **allen** für den W212 geltenden Applikationsnotwendigkeiten (wobei beim OM651 im W204 von einer anderen Software-Struktur in den Steuergeräten, als im W212 auszugehen ist) auch noch zu berücksichtigen, dass

- a) keinerlei SCR-Strategie im Motorsteuergerät existiert und
- b) durch die zusätzliche Sensorik auch eine komplette EOBD-Überarbeitung notwendig und zwingend ist.

Die EOBD-Überwachung des nachgerüsteten SCR-Systems ist insbesondere auch deshalb unverzichtbar, da nur so eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit des DeNOx-Systems im Rahmen der Abgasuntersuchung möglich ist.

Hardwareseitig ist eine komplett neue Abgasanlage mit Adblue-Eindüsung, Mischer und SCR-Kat zu entwickeln und hinsichtlich Einsatz bei Höhe, Kälte und Hitze, sowie Schwingungsdauerhaltbarkeit zu erproben.

Der Adblue-Tank einschließlich Steuergerät und die gesamte Verkabelung, sowie die Adblue-Verrohrung für die Anlage ist Crash sicher, dauerhaftbar und schwingungssicher zu verbauen, zu erproben und abzunehmen.

Die Adblue-Tank- und –Leitungsheizung muss in das elektrische Energiemanagement eingebunden werden. Wie an der im W212 verbauten Stützbatterie, die einen Spannungseinbruch bei Start-Stopp-Vorgängen mit eventuellem Flackern der Lampen und Scheinwerfer verhindert, zu erkennen ist, handelt es sich hier um eine zwingende Maßnahme um einen betriebssicheren Betrieb des Fahrzeugs sicherzustellen.

Wie im W212 muss für eine Adblue-Füllstandsanzeige im Display gesorgt werden. Hierzu gehört auch die Erfüllung sämtlicher gesetzlicher Vorgaben für das Systemverhalten bei Nichtbefüllung des Adblue-Tanks.

Ein Nachfüllen kann nur über Kanister direkt in den Tank erfolgen.

Letztlich müssen sämtliche Fertigungskapazitäten für alle Teile wieder aufgebaut werden, die nicht mehr heutiger Serienstand sind. Hierzu gehört auch eine komplette Ersatzteillogistik.

Eine Nachrüstung des W204 mit OM651 DE22 LA auf mindestens EU6b-Niveau ist also sehr, sehr viel aufwendiger, wobei auch hier eine große im Feld befindliche Variantenvielfalt zu berücksichtigen ist.

Trotzdem ist eine derartige herstellerseitige Hardware-Nachrüstung jeder Hardware-Nachrüstung eines Nachrüsters weit überlegen, weil z.B. nur so

- a) eine EU-zulassungsfähige EOBd-Einbindung dargestellt werden kann
- b) sichergestellt werden kann, dass nicht mit leerem Adblue-Tank gefahren werden kann (und das mit mehreren Warnstufen!)
- c) alle notwendigen Sicherheitsstandards (Crash, Schwingung (NVH), Höhe, Hitze, Kälte und Dauerhaltbarkeit) eingehalten werden
- d) dass die zusätzlichen elektrischen Verbraucher (insbesondere die notwendigen Heizungen) in das elektrische Energiemanagement des Fahrzeugs eingebunden sind
- e) nicht ganz unerwähnt bleiben soll hier auch die Gewährleistungsproblematik und Ersatzteilversorgung und -logistik
- f) etc.

Realistisch gesehen ist – selbst bei den hier vorgefundenen eigentlich relativ guten Ausgangsverhältnissen – auf jeden Fall zunächst eine Software-Nachrüstung (AGR-, Einspritz- und Ladedruck-Optimierung) vorzuziehen, da diese mit erheblich geringerem (aber definitiv nicht kleinem(!)) Aufwand eine sehr nennenswerte und signifikante Stickoxidreduzierung (ca. im Mittel 30% je nach Variante, Umweltbedingungen und Fahrzeugbetrieb) ermöglicht.

Bei einer derartigen Hardware-Nachrüstung - wie hier für den W204 diskutiert - ist davon auszugehen, dass – einschließlich Entwicklung, Zulassung und Aufbau der Fertigungskapazitäten - mindestens zwei Jahre vergehen, so dass bei einer realistischen Ausrolldauer von einem weiteren Jahr mit mindestens drei Jahren zu rechnen ist, bis die Wirkung der Maßnahme greift. Bis dahin dürfte sich das Stickoxidproblem in unseren Städten weitgehendst durch die flächendeckende Software-Nachrüstung, sowie einer Erneuerung der Fahrzeugflotte (Euro 6d Fahrzeuge – d.h. RDE konform) erledigt haben.

Kurzstudie

Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x- Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge

Analyse der Fahrzeuge:

Renault Megane III 1.5 dCi, Euro 5

Renault Megane IV Energy dCi 110 ECO², Euro 6b

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

06. Februar 2018

Einleitung

Untersucht wurden zwei PKW des Herstellers Renault. Beide Fahrzeuge waren gebraucht und befanden sich in einem dem Fahrzeugalter und der Laufleistung angemessenen guten, fehlerfreien Zustand.

Renault Megane Euro 5



Abbildung 59: Renault Megane III 1.5 dCi Euro 5

Der Renault Megane III war die dritte Ausführung des Renault Megane auf dem Markt. Die offizielle Präsentation des Fahrzeugs fand im Oktober 2008 statt. Der Verkauf startete Ende November 2008. Er wurde als Kombilimousine in der Kompaktklasse angeboten. Gleichzeitig wurden eine Kombiversion, ein Kombicoupe und eine Cabrioletversion offeriert. Die Motorenpalette umfasste Ottomotoren mit einer Hubraumspanne von 1,2 bis 2 Liter Hubraum und einem Leistungsbereich von 74 bis 195 kW. Die angebotenen Dieselmotoren waren allesamt aufgeladen und hatten einen Hubraum zwischen 1,5 und 2 Liter. Der Leistungsbereich lag zwischen 66 und 120 kW. Alle Dieselmotoren waren mit einem Partikelfilter ausgerüstet. Die Schadstoffklasse der Motoren entsprach Euro 5.

Im Rahmen des vorliegenden Kurzstudie wurden die Nachrüstmöglichkeiten am Beispiel des Modells 1,5 dCi (FAP) untersucht. Der Motor ist seit Mai 2014 im Programm. Er hat eine Leistung von 81 kW (110 PS) und ein maximales Drehmoment von 260 Nm bei einem Hubraum von 1461 ccm verteilt auf 4 Zylinder.

Renault Megane Euro 6



Abbildung 60: Renault Megane IV Energy dCi 110 ECO² Euro 6

Der Renault Megane IV ist die aktuelle Ausführung des Renault Megane. Das Fahrzeug löste den Vorgänger im März 2016 ab, nachdem das Modell erstmalig im September 2015 präsentiert wurde. Wie der Vorgänger wurde das Fahrzeug als Kombilimousine in der Kompaktklasse angeboten. Gleichzeitig wurden eine Kombiversion und ein Kombicoupe offeriert. Eine Cabrioletversion wurde bis dato noch nicht vorgestellt. Die Motorenpalette umfasst Ottomotoren mit einer Hubraumspanne von 1,2 bis 1,8 Liter Hubraum und einem Leistungsbereich von 74 bis 206 kW. Die angebotenen Dieselmotoren sind ausnahmslos aufgeladen und der Hubraum schwankt zwischen 1,5 und 1,6 Liter. Dabei liegt der Leistungsbereich zwischen 66 und 120 kW. Partikelfilter sind bei allen Dieselmotoren obligatorisch. Die Schadstoffklasse der Motoren entspricht Euro 6.

Im Rahmen des vorliegenden Kurzstudie wurden die Nachrüstmöglichkeiten am Beispiel des Modells dCi 110 ECO² untersucht. Der Motor ist seit Markteinführung im März 2016 im Programm. Er hat wie sein Vorgänger eine Leistung von 81 kW (110 PS) und ein maximales Drehmoment von 260 Nm bei einem Hubraum von 1461 ccm verteilt auf 4 Zylinder. Insbesondere die Abgasreinigung (AGN) und die Anordnung des Turboladers sind jedoch deutlich unterschiedlich gegenüber der Vorgängerversion.

Ein besonderes Augenmerk wurde bei der aktuellen Generation der Megane Dieselmotoren auf die Verbrauchsreduktion gelegt. So sind diese Motoren mit

- a) einer stufenlos variablen Ölpumpe
- b) einem Generatormanagement zur Nutzung der Bewegungsenergie beim Bremsen bzw. Schubetrieb zum Zwecke der Batterieladung
- c) einer Start-/Stopp-Automatik ausgerüstet.

Hinzu kommt ein Thermomanagement zur Optimierung des Warmlaufverhaltens.

Renault Megane Euro 5

Anordnung der bestehenden Abgasreinigungskomponenten

Der Antrieb des Megane III 1,5 dCi ist nach Euro 5b zertifiziert. Die Grenzwerte liegen in diesem Falle bei

CO	0,50 g/km
HC + NO _x	0,23 g/km
NO _x	0,18 g/km
PM	0,0045 g/km
PN	6*10 ¹¹ 1/km

Grundlage für diese Grenzwerte ist der NEFZ-Prüfzyklus.

Da insbesondere die Anforderungen hinsichtlich der Partikelmasse (PM) und der Partikelanzahl sehr anspruchsvoll sind, ist der Einsatz eines Partikelfilters unumgänglich. Demzufolge setzt Renault ein derartiges Filter im Abgasstrang ein. Dem Filter vorgeschaltet ist ein Dieseloxydationskatalysator (DOC), welcher die Konvertierung der CO- und HC-Anteile im Abgas unter magerer Atmosphäre übernimmt. Gleichzeitig oxidiert dieser in bestimmten Grenzen NO zu NO₂. Der DOC ist so ausgelegt, daß das gebildete NO₂ zur Regeneration der Partikel im Filter verwendet wird.

Die Anforderungen bezüglich der Stickoxidlimits wird im Wesentlichen mit einer gekühlten Abgasrückführung entsprochen. Sie ist hochdruckseitig angeordnet. Die Entnahme der Abgasteilmenge erfolgt aus dem Krümmer in Flußrichtung vor dem Turbolader. Nach Abkühlung der Gase im AGR-Kühler erfolgt die Rückführung in Flußrichtung hinter dem Verdichter, also zwischen Turbolader und Zylinderkopf. Das notwendige Druckgefälle wird durch den Einsatz einer Luftklappe unterstützt.

Im Abbildung 61 ist der Motor im ausgebauten Zustand auspuffseitig gezeigt. Deutlich zu erkennen ist die Anordnung des Turboladers unterhalb vom Zylinderkopf. Oberhalb vom Turbolader ist das Wellrohr der Abgasrückführung sichtbar und darüber der aus Edelstahl gefertigte AGR-Kühler mit dem (offenen) Anschluß für die Luftseite und dem kleineren Anschluß für die Kühlwasserleitung.

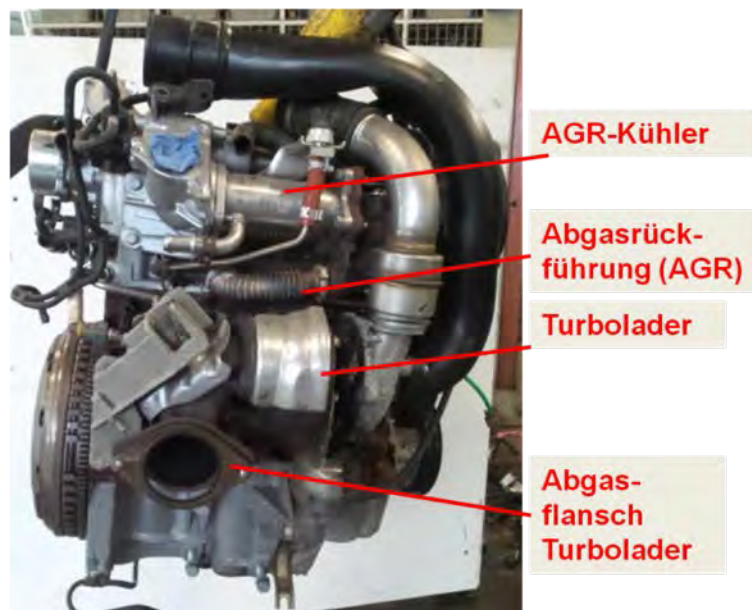


Abbildung 61: Motor mit Turbolader

Auf dem Bild nicht sichtbar sind der Oxidationskatalysator und das Partikelfilter. Sie befinden sich in Strömungsrichtung weiter hinten. Hinter dem Turbolader ist ein 90°-Bogen angeordnet, welcher in einem deutlich erkennbaren Abgasflansch endet. An diesem Flansch wird im eingebauten Zustand ein Wellrohr verbunden, welches dem Bewegungsausgleich zwischen Motor und Abgasanlage dient. Es ist bei abgenommener unterer Motorabdeckung auf dem Abbildung 62 deutlich sichtbar.

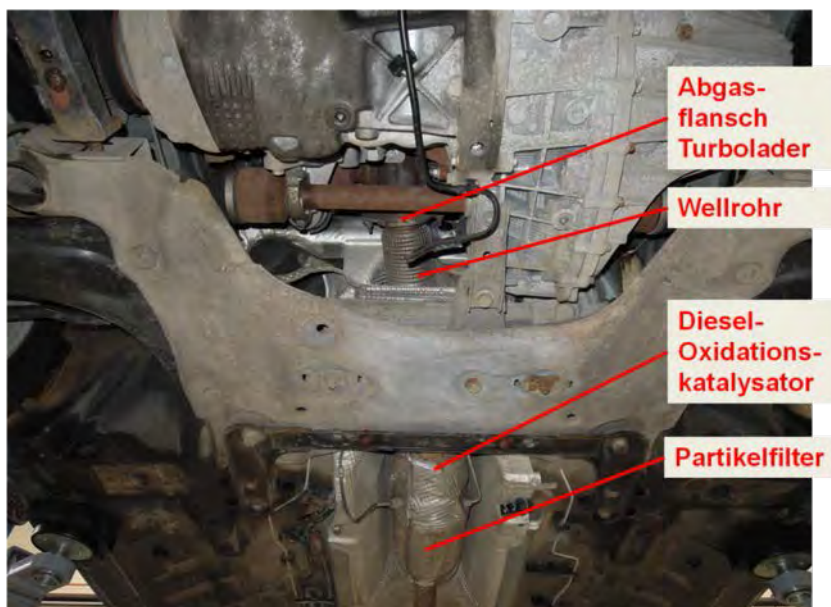


Abbildung 62: Anordnung der Abgasreinigungskomponenten

Das Wellrohr ist im weiteren Verlauf mit der Katalysator-/Partikelfiltereinheit verschraubt. Da diese Komponenten relativ weit vom Motor entfernt angeordnet sind, liegen sie bereits teilweise im Unterflurbereich und damit im kühlenden Luftstrom des Fahrtwindes. Aus diesem Grund sind sie teilweise mit einer Wärmeisolation versehen, wie in Abbildung 63 zu erkennen. Zur Regeneration des Partikelfilters ist eine hohe Abgastem-

peratur notwendig. Die Unterfluranordnung ist in diesem Punkt nicht optimal. Ein entsprechender Temperatursensor misst die aktuelle Gastemperatur am Eintritt in das Filter, sichtbar in Abbildung 63 und Abbildung 64.

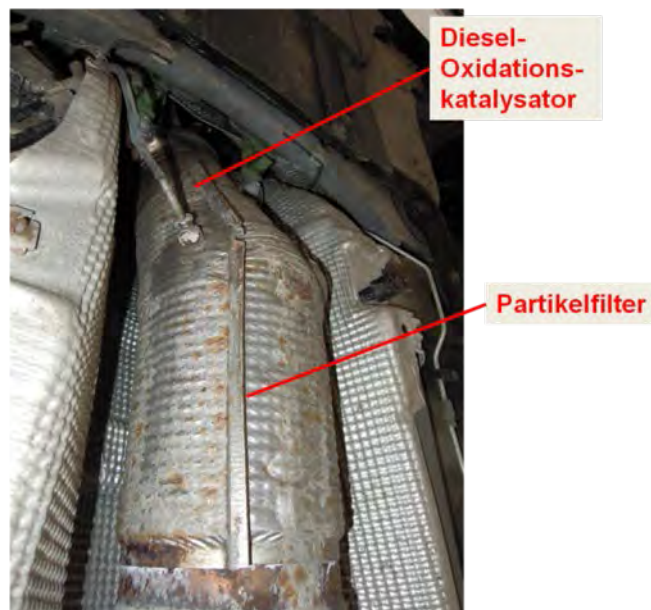


Abbildung 63: Abgasreinigungskomponenten

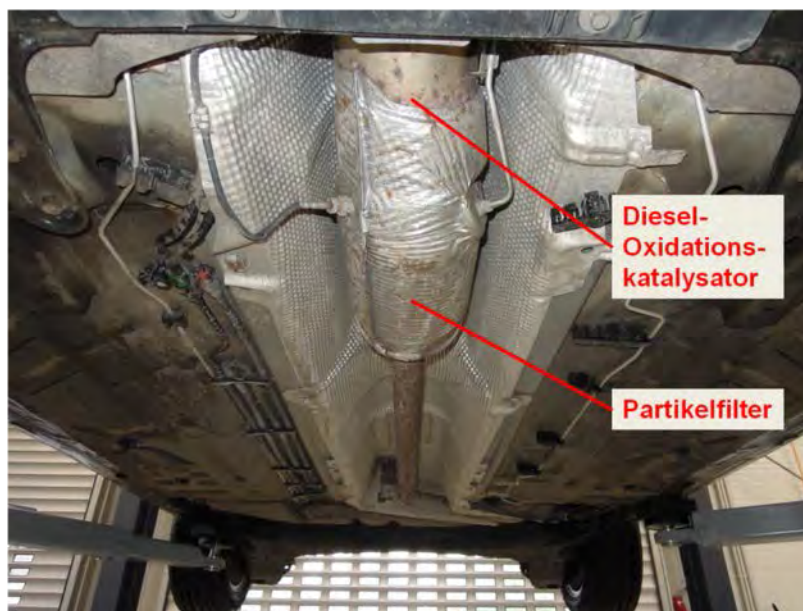


Abbildung 64: Abgasreinigungskomponenten

Neben dem Temperatursensor ist gleichzeitig in Abbildung 64 auf der rechten Seite eine Druckleitung angeordnet. Sie gibt eine Information über den aktuellen Abgasgegendruck an die Motorelektronik weiter. Diese erkennt an dem Druckwert den Beladungszustand des Filters, sodaß beim Erreichen definierter Grenzwerte gezielt Maßnahmen zur Regeneration eingeleitet werden können.

Gaswege und Leitungslängen ab Zylinderkopf

Die Gaswege sind eine maßgebliche Größe für das thermische Verhalten der abgasreinigenden Komponenten. Einerseits sollte die thermische Masse der den Nachbehandlungssystemen vorgeschalteten Komponenten so gering wie möglich sein, was unter anderem durch kurze Gaswege gewährleistet wird. Andererseits sollte der wärmeabstrahlende Bereich minimiert werden, was ebenfalls für möglichst kurze Gaswege zur Abgasreinigung spricht. Demgegenüber stehen die konstruktiven Randbedingungen, die eine unmittelbare Positionierung der Katalysatoren oder des Partikelfilters in unmittelbarer Nähe des Krümmers oder Turboladers verhindern. Aufgrund des Wärmeentzugs durch die vorgeschaltete thermische Masse bzw. der Wärmeverluste durch die Wärmeabgabe an die Umgebung bei langen Leitungslängen gestaltet sich das Erreichen der notwendigen Betriebstemperatur bei Teillast sehr schwierig und gleichzeitig ist die Aufwärmphase nach einem Kaltstart verzögert.

Wie bereits in einem vorhergehenden Kapitel angesprochen liegen die notwendigen Mindesttemperaturen für den die Konvertierung im Rahmen der SCR-Katalyse bei ca. 180 °C.

Bei dem untersuchten Euro 5-Fahrzeug der Fa. Renault konnten die folgenden charakteristischen Weglängen der Gasführungen ermittelt werden:

Zylinderkopf – Eingang Turbolader:	100 mm
Durchmesser Turbolader:	120 mm
Ausgang Turbolader – Eingang Dieseloxydationskatalysator:	430 mm
Länge AGN (DOC+DPF):	470 mm

In der Summe ergibt sich somit der Gasweg bis zum Ende des Dieselpartikelfilters mit einer Gesamtlänge von ca. 1315 mm. Erst dahinter könnte eine Nachrüstlösung integriert werden. Der freie Bereich hinter der Serien-AGN hat eine ungefähre Länge von 1040 mm.

Die geometrischen Daten geben zwei wesentliche Informationen:

- a) hinter dem Partikelfilter ist vergleichsweise viel Platz, um eine weitere AGN-Komponente bzw. ein weiteres System zu integrieren. Grundsätzlich würde das Platzangebot für die Integration einer Adblue-Injektion nebst Verdampfungsstrecke, Mischer und den notwendigen Katalysatorstufen ausreichen.
- b) der Bereich für eine mögliche Integration eines SCR-Systems ist hinsichtlich der Gaswege sehr weit von der Wärmequelle, dem Motor, entfernt.

Damit kann in weiten Bereichen des Kennfelds, vor allem im meist genutzten Teillastbereich, nicht die für eine ordnungsgemäße Funktion notwendige Betriebstemperatur erreicht werden (keine/niedrige Konvertierungsraten und/oder Ammoniakdurchbruch). Das Problem könnte gemildert werden durch motorseitige Heizmaßnahmen, die allerdings einen tiefgreifenden Eingriff in die Motorapplikation erfordern.

Platzverhältnisse im Motorraum und im Unterbodenbereich

Das Fahrzeug Renault Megane III mit dem 1,5 dCi-Motor nach Euro 5-Spezifikation nutzt einen aufgeladenen Dieselmotor, welcher quer zur Fahrtrichtung montiert ist. Da es sich bei der Grundkonstruktion des Motors um ein bewährtes und lange am Markt befindliches Aggregat handelt, basiert dieser noch auf dem Gleichstromprinzip, bei dem Ansaug- und Abgasführung auf der gleichen Seite des Motors positioniert sind. Beide befinden sich auf der Motorrückseite zwischen Motor und Spritzwand. Dort ist demzufolge auch der Turbolader angeordnet, wie im Abbildung 65 erkennbar.

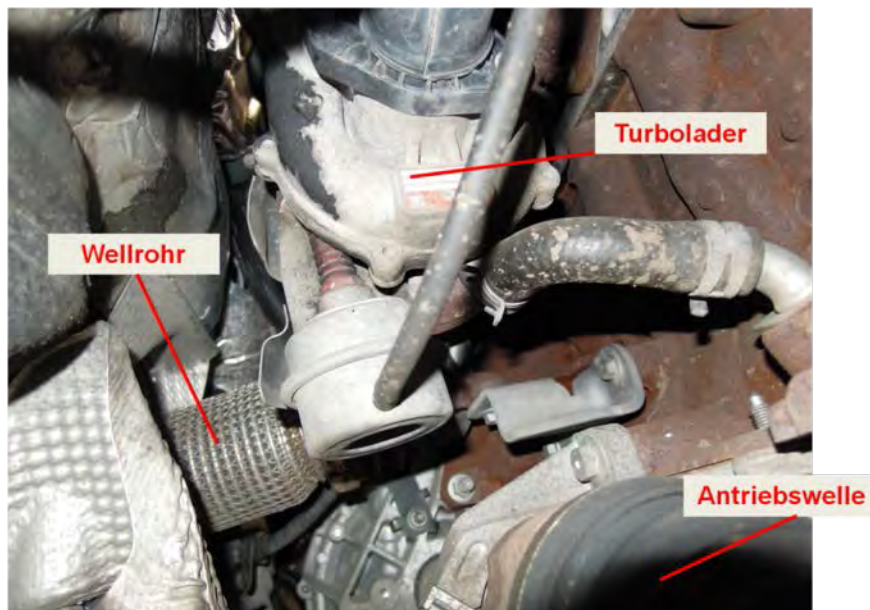


Abbildung 65: Platzverhältnisse im Motorraum (Nähe Turbolader)

Ausgehend vom Zylinderkopf werden die Abgase durch den Krümmer abwärts geleitet, wo sich der Turbolader auf Höhe des Motorblocks befindet. Direkt unterhalb des Laders verlaufen die Antriebswellen, wie ebenfalls im Abbildung 65 erkennbar ist. Der Gasaustritt des Turboladers mündet über einen 90°-Bogen direkt in das Wellrohr, welches sich bereits im Unterboden, im sog. Fahrzeugtunnel, befindet.

Der Bereich in der Umgebung des Krümmers bzw. Turboladers innerhalb des Motorraums ist sehr eng gepackt. Die Zugänglichkeit ist deutlich eingegrenzt. Es ist kaum vorstellbar, wie in diesem Bereich ein zusätzliches Bauteil, wie z.B. der NH₃-Generator der Fa. BAUMOT integriert werden könnte. Ein Ausweichen auf den Tunnelbereich, d.h. eine Positionierung des NH₃-Generators neben dem Wellrohr, ist ebenfalls unwahrscheinlich, weil auch dort der Durchtrittsdurchmesser sehr begrenzt ist. Gleichzeitig sind in diesem Falle die Probleme der Schwingungsentkoppelung von NH₃-Generator zum Motor bzw. zum Restauspuff im Rahmen einer gesonderten Konstruktion zu lösen.

Die Integration eines SCR-Systems im hinteren Bereich der Abgasführung ist konstruktiv grundsätzlich gut möglich. Die Platzverhältnisse sind im Bereich hinter dem Partikelfilter ausreichend, wie anhand der Abbildung 66 nachvollziehbar.



Abbildung 66: Platzverhältnisse im Unterbodenbereich

Die gerade verlaufende Rohrführung wirkt sich positiv auf die Gasführung und die Möglichkeiten zur Integration von Katalysatoren aus. Allerdings ergeben sich besondere Probleme für den Fall der Integration einer Adblue-Einspritzdüse. Die optimale Einbauposition ergäbe sich im Bereich einer gekrümmten Rohrführung, da dort die Düse in Richtung der Gasströmung spritzen könnte. Im vorliegenden Falle müsste die Düse jedoch schräg seitlich am Rohr angebracht werden. Damit ist eine Benetzung der Rohrwandungen im Betrieb nahezu unausweichlich. Das führt zu einer Kondensation von Adblue in Verbindung mit einer unvollständigen Hydrolyse und einer inhomogenen Katalysatorbeaufschlagung.

Dieses Problem betrifft insbesondere die Konfigurierung eines Standard-SCR-Systems. Die Systeme der Firmen FAURECIA und BAUMOT führen dem SCR-Katalysator Ammoniak gasförmig zu, was den Mischungsvorgang verbessert, allerdings mit anderen Problemen (siehe Kapitel 2) verbunden ist.

Grundsätzlich muß berücksichtigt werden, daß Nachrüstsysteme in der Regel dergestalt konzipiert sind, daß auf einen vom Fahrzeughersteller angebotenen SCR-Katalysator zurückgegriffen wird. Dies ist im vorliegenden Fall nicht möglich, weil das Abgasreinigungskonzept des Typs Megane Diesel auch bei der Euro 6-Version nicht auf einem SCR-System basiert, sondern die Kombination von AGR und LNT nutzt. Ein SCR-Katalysator müsste daher für dieses Fahrzeug speziell entwickelt werden.

Möglicher Einbauort eines SCR-Systems

Der Bereich, in dem ein SCR-System bei dem untersuchten Fahrzeug integriert werden könnte, wurde in den vorhergehenden Kapiteln bereits identifiziert und die Entscheidung begründet.

Anhand der Abbildung 67 werden die konstruktiven Freiräume zur Integration eines SCR-Systems deutlich.



Abbildung 67: freies Einsatzfeld im Unterbodenbereich

Ein mehr als 90 cm langes Abgasrohr verläuft innerhalb des Fahrzeugtunnels. Dieser ist zur Fahrgastzelle komplett wärmeisoliert. Der Freiraum zwischen Abgasführung und der Fahrgastzelle ist örtlich unterschiedlich groß, da einige Absätze in diesem Bereich bestehen.

Direkt hinter dem Partikelfilter ist ein halbkreisförmiger Bereich mit einem Radius von ca. 10 cm vorhanden, wie im Abbildung 68 ersichtlich.



Abbildung 68: Platzangebot im Unterbodenbereich

Der Bereich verjüngt sich im weiteren Verlauf auf ca. 6 cm im Radius (Abbildung 69) und weitet sich später wieder auf ca. 8 cm im Radius auf (Abbildung 70).

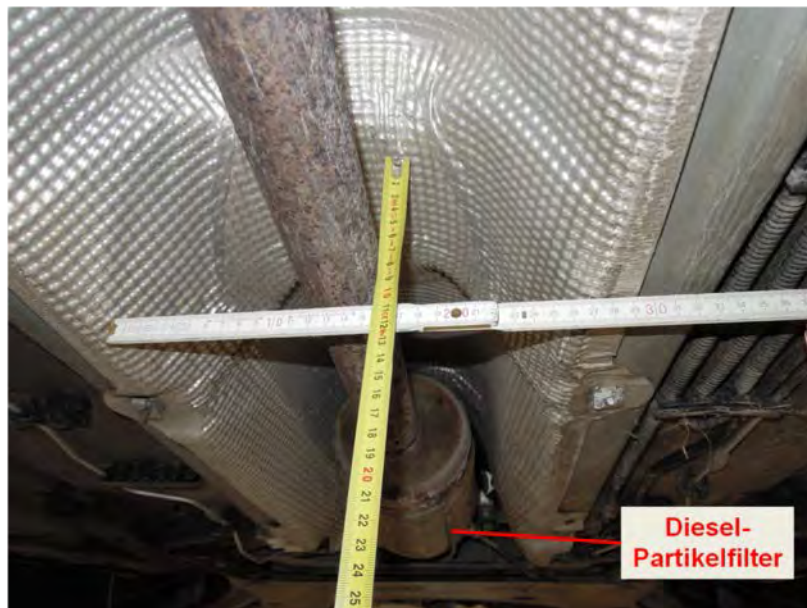


Abbildung 69: Platzangebot im Unterbodenbereich

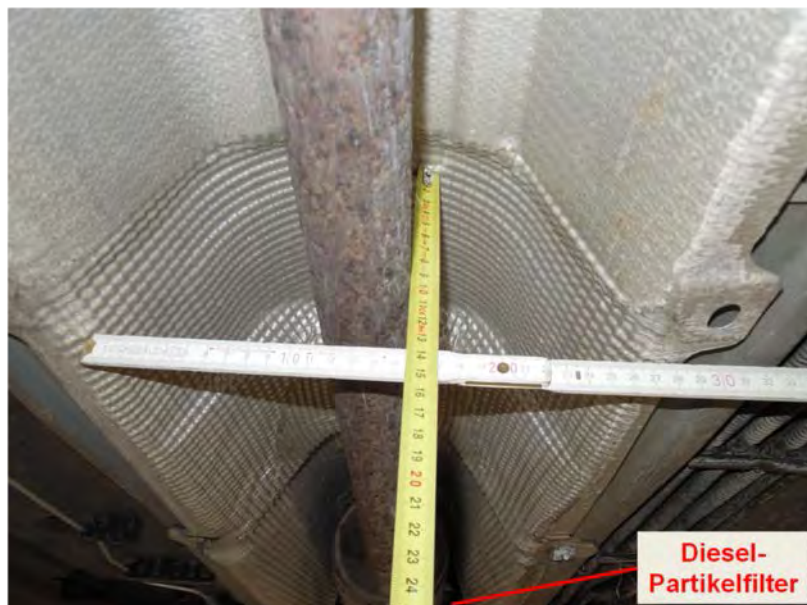


Abbildung 70: Platzangebot im Unterbodenbereich

Ein SCR-System ist ein komplexes Abgasreinigungssystem, welches aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten besteht. Hierbei stellt der Adblue-Tank eine Baugruppe dar und ist in der Regel mit der Fördervorrichtung/Pumpe kombiniert. Zum größtmöglichen Schutz vor Vereisung ist der Tank zumeist im Fahrzeuginnenraum positioniert, wobei der Kofferraumbereich bevorzugt genutzt wird. Auch ein Nachrüstsystem benötigt eine wie auch immer geartete Ammoniakbevorratung, die in das Fahrzeug integriert werden muß. Folglich wurden im Rahmen der Studie auch die Möglichkeiten der Integration eines Ammoniak/Adblue-Tanks im Fahrzeug untersucht.

In dem nach Euro 5 zertifizierten Fahrzeug Renault Megane III ist kaum Platz für die Integration eines Ammoniak/Adblue-Tanks unter den Aspekten Sichtschutz und Sicherheit. Hinzu kommen die Probleme der Platzbeeinträchtigung im Bereich der Ladefläche

vorhanden. Das Abbildung 71 zeigt den Kofferraum des betreffenden Fahrzeugs mit entferntem Kofferraumbodenbelag.



Abbildung 71: Platzangebot im Innenraum (Adblue-Speicher / Ammoniakspeicher)

Das Fahrzeug verfügt über ein vollwertiges Ersatzrad, welches die Ersatzradmulde in Verbindung mit dem Wagenheber und dem Bordwerkzeug vollständig ausfüllt. Desweiteren finden sich im Kofferraum keinerlei Nischen der ausreichenden Größe, wo ein 5-10 Liter großer Zusatztank nebst Pumpeneinheit Platz finden könnte. Auch die Integration der Ammoniakkartuschen der Fa. FAURECIA ist durch Nutzung von Hohlräumen nicht möglich. So bleibt die Option, die Bevorratung anstelle des Ersatzrades zu montieren. Dies wäre konstruktiv möglich, bedeutet jedoch eine erhebliche reparaturtechnische Einschränkung für den Fahrzeugnutzer, da er in diesem Falle weder auf Ersatzrad noch Notrad im Pannenfall zurückgreifen kann, sondern einen Pannendienst beauftragen müßte. Die Befüllung des Tanks mit Adblue wäre beim Renault Megane III nicht von außerhalb des Fahrzeugs möglich. Neben dem Einfüllstutzen für Dieselkraftstoff ist kein ausreichendes Platzangebot, um eine Befüllöffnung für Adblue zu integrieren (Abbildung 72).



Abbildung 72: Einfüllöffnung für Dieselkraftstoff

Fazit EU5 + Option für Nachrüstung

Die folgende Beurteilung der Möglichkeiten zur Nachrüstung von SCR-Systemen bei dem untersuchten Fahrzeug Renault Megane III 1.5 dCi bezieht sich lediglich auf den Aspekt der konstruktiven Integration der Bauteile am Fahrzeug. Softwaretechnische und regelungstechnische Aspekte werden in diesem Kapitel ausdrücklich nicht diskutiert. Hier wird auf die entsprechenden Absätze im Vorfeld hingewiesen.

- Das Fahrzeug weist im Unterbodenbereich ausreichend Platz auf, um einen SCR-Katalysator in Verbindung mit einer Adblue-Injektion und einer Mischvorrichtung bzw. Mischstrecke zu installieren. Gegebenenfalls wäre auch noch die Integration eines weiteren Dieseloxydationskatalysators zur Verbesserung des NO/NO₂-Verhältnisses aufgrund der räumlichen Gegebenheiten möglich. Allerdings ist der mögliche Montagebereich sehr weit von der Wärmequelle, dem Motor, entfernt, so daß die thermischen Bedingungen für den Betrieb der Abgasreinigung sehr ungünstig sind und daher die Funktion eher auf den Autobahnrelevanten Hochlastbetrieb beschränkt sein dürfte. In weiten Bereichen des Teillastbetriebs, wie er im Stadtverkehr vornehmlich vorliegt, wird die Ansprechtemperatur voraussichtlich nicht erreicht. Der mögliche Betriebsbereich kann nur durch einen erheblichen Eingriff in die Motorsteuerung erweitert werden („Aufheizstrategie“), was jedoch aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der verbauten Motorsteuerung nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist. Auch dabei sind deutliche Grenzen gesetzt. Zudem gehen derartige Maßnahmen auf Kosten des Verbrauchs.
- Der Platz für einen externen Ammoniakgenerator nach dem System der Fa. BAUMOT ist in der vorgegebenen unmittelbaren Nähe des Turboladers nicht gegeben.
- Die Nachrüstung erfordert eine komplette Euro 6 – Abgasanlage mit entsprechendem SCR-Katalysator. Eine derartige Anlage ist herstellerseitig nicht verfügbar
- Der Platz für einen Adblue-Tank ist ebenfalls sehr begrenzt, zumindest, wenn dieser nicht dominant innerhalb des Kofferraums positioniert werden sollte. Sowohl ein Flüssigtank mit Pumpeneinheit, wie er üblicherweise verwendet wird, als auch ein Feststofftank in Kartuschenform, ähnlich dem System der Fa. FAURECIA, finden allenfalls in Reserveradmulde Platz. Dies würde für den Fahrzeughalter jedoch den Verzicht auf das Reserverad bedeuten.
- Eine Betankung des Tanks ist nur mit Hilfe eines Kanisters direkt in den zu installierenden Tank möglich, da hinter der Tankklappe keine ausreichende Möglichkeit für die Integration einer Befüllung besteht.
- Die Beheizung des Tanks und der flüssigkeitsführenden Leitungen müssen nicht nur installiert werden, sondern das elektrische System, insbesondere die installierte Batteriegröße, müssen unter dem Aspekt der zusätzlichen elektrischen Last überprüft und eventuell angepaßt werden.

- Eine Einbindung in das On-Board-Diagnose- und –Überwachungssystem ist nur mit großem Aufwand und nur für den Fahrzeughersteller möglich. Nichtsdestotrotz müssen Überwachungsfunktionen integriert werden und die Funktionsinformationen dem Fahrer übermittelt werden. Eventuell müssen sogar die Aktionen des Fahrers überschrieben werden, wie z.B. zur Verhinderung der Fahrt mit leerem Adblue-Tank oder der Sicherung gegen Auffüllen mit reinem Wasser.
- Die Rückwirkung des erhöhten Abgasgegendrucks auf das Betriebsverhalten des Motors, insbesondere hinsichtlich der Abstimmung der Abgasrückführung, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Im schlimmsten Falle wird die ECU aufgrund der veränderten Randbedingungen den Notlauf aktivieren.
- Für eine Nachrüstung wäre ein nahezu vollständiger, fahrzeugunabhängiger Funktionsumfang erforderlich. Damit ist die Wirkung der Nachrüstung prinzipbedingt eingeschränkt, da nur ein gesteuerter Betrieb mit konservativen Dosiermengen zur Vermeidung von NH_3 -Durchbrüchen und Ablagerungen möglich ist.
- Herstellerseitig sind dennoch umfangreiche Arbeiten noch erforderlich:
 - Beladungsmodelle Partikelfilter
 - Überarbeitung der OBD
 - Überprüfung und Freifahren der neuen Applikation
 Eine Erweiterung der Software-Funktionsumfänge für ein erweitertes Thermomanagement auf diesem Modell ist praktisch nicht umsetzbar.

Der erwartete Entwicklungsaufwand bis zum Erreichen der Marktfähigkeit beträgt ca. 2 Jahre.

Die NO_x -Minderungsfunktion ist beim Einsatz an diesem Fahrzeug gerade in Teillast, z. B. im Stadtverkehr, aufgrund der oben beschriebenen Zusammenhänge signifikant eingeschränkt.

Renault Megane Euro 6

Anordnung der bestehenden Abgasreinigungskomponenten

Der Antrieb des Megane IV Energy dCi 110 ECO² ist nach Euro 6b zertifiziert. Die Grenzwerte liegen in diesem Falle bei

CO	0,50 g/km
HC + NO _x	0,17 g/km
NO _x	0,08 g/km
PM	0,0045 g/km
PN	6*10 ¹¹ 1/km

Grundlage für diese Grenzwerte ist der NEFZ-Prüfzyklus.

Im Vergleich zur vorhergehenden Abgasnorm Euro 5b wurden die NO_x-Grenzwerte um ca. 56% reduziert. Dies bedeutete eine erhebliche Verringerung, die nicht mehr mit einer verbesserten motorischen Abstimmung zu erreichen war. Daher wurde die Abgasreinigung gegenüber dem Vorgänger deutlich überarbeitet. Die wesentlichen Punkte sind hierbei:

- Einsatz eines NO_x-Speicherkatalysators (LNT) in Verbindung mit der entsprechenden Regenerationsstrategie, aktiviert und kontrolliert durch die Motor-ECU
- Integration einer ECU-gesteuerten Niederdruck-Abgasrückführung
- Überarbeitung der Positionierung der AGN-Komponenten zur Verbesserung des thermischen Verhaltens nach Kaltstart bzw. im Warmlauf und bei Niedriglast

Ergänzt werden diese Maßnahmen durch den Einsatz eines Common-Rail-Systems mit Piezo-Injektoren, welche durch die verbesserten dynamischen Eigenschaften in der Lage sind, Mehrfacheinspritzungen mit größeren Freiheitsgraden zu gewähren. Dieses Potential kann genutzt werden, um durch eine entsprechend segmentierte Einspritzung mit einer oder mehreren Voreinspritzungen, geteilten Haupteinspritzungen und Nacheinspritzungen die motorische NO_x- und die Partikelemission positiv zu beeinflussen.

Hinzu kommen erweiterte Maßnahmen im Vergleich zum Vorgängermotor, die insbesondere die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs zum Ziel haben, wie z.B. die geregelte Ölpumpe, Start-Stopp-Vorrichtung oder eine spezielles Thermomanagement zur Verbesserung des Warmlaufs. Diese Maßnahmen haben in begrenztem Maße auch einen Einfluß auf die motorischen Schadstoffemissionen.

In Abbildung 73 ist der Motor im ausgebauten Zustand auspuffseitig gezeigt. Deutlich zu erkennen ist die im Vergleich zum Vorgänger veränderte Anordnung des Turboladers auf Höhe des Zylinderkopfs. Der Abgaskrümmter fördert die Abgase nach oben zu der dort angeordneten Aufladeeinrichtung. Der Ausgang der Abgasturbine führt die Abgase in Form eines 180°-Bogens zur unterhalb vom Turbolader angeordneten Abgasnachbehandlung, bestehend aus Dieseloxydationskatalysator (DOC), NO_x-Speicherkat (LNT) und katalytisch beschichtetem Dieselpartikelfilter (DPF).

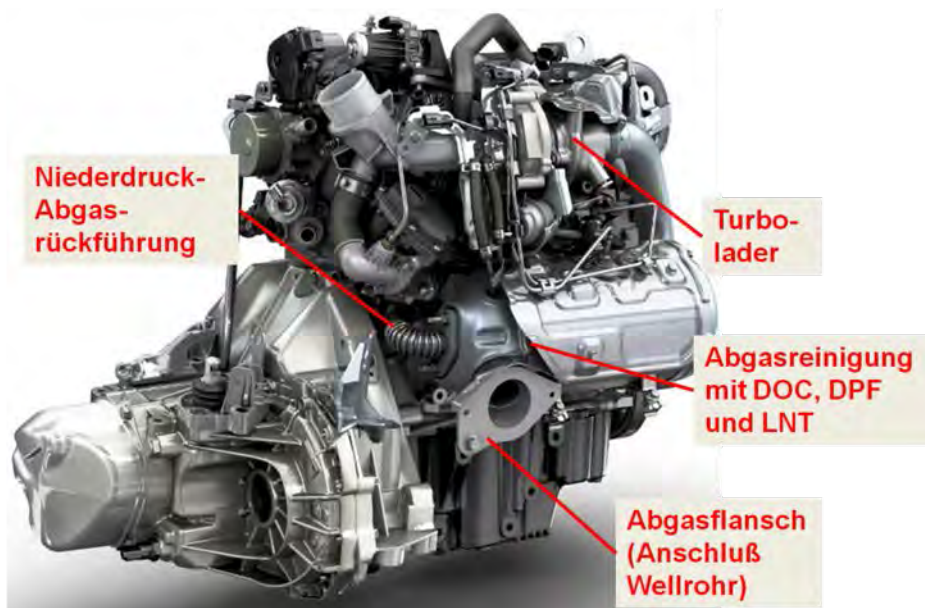


Abbildung 73: Motor mit Turbolader (baugleich)

Optisch sind die einzelnen Komponenten als singuläre Bauteile nicht auszumachen, da sie gemeinsam in einem Gehäuse integriert sind. Dieses ist zylinderförmig ausgebildet und befindet sich unterhalb von dem Abgasturbolader. Der Ausgang zum Anschluß der weiteren Abgasführung erfolgt über einen im Bild deutlich zu erkennende Abgasflansch. Im Austrittsbereich der Abgasreinigung ist ein kleines Wellrohr zu erkennen. Über diese Verbindung wird aus dem Niederdruckbereich, d.h. dem druckentspannten Bereich hinter der Abgasturbine, ein Abgasteilstrom für die Abgasrückführung abgezweigt und über ein ECU-angesteuertes Ventil in den Saugbereich des Verdichters geleitet. Da die Entnahme im Austrittsbereich der Abgasreinigung erfolgt, wird auf gesonderte zusätzliche Maßnahmen zur Reinigung des AGR-Stroms verzichtet. Allerdings ist ein entsprechender Gaskühler zwischengeschaltet. Die hier verwirklichte Maßnahme ist eine effiziente Maßnahme zur Reduktion der NO_x -Emissionen insbesondere im Teillastbereich. Die Maßnahme ist darauf angewiesen, daß ein ausreichendes Druckgefälle zwischen der Abgasentnahmestelle und dem Ansaugbereich herrscht, was ohne begleitende Maßnahmen meist nicht in ausreichendem Maße der Fall ist. Daher ist als unterstützende Maßnahme im Abgasstrang eine Drosselklappe eingebaut, wie in Abbildung 74 zu erkennen.

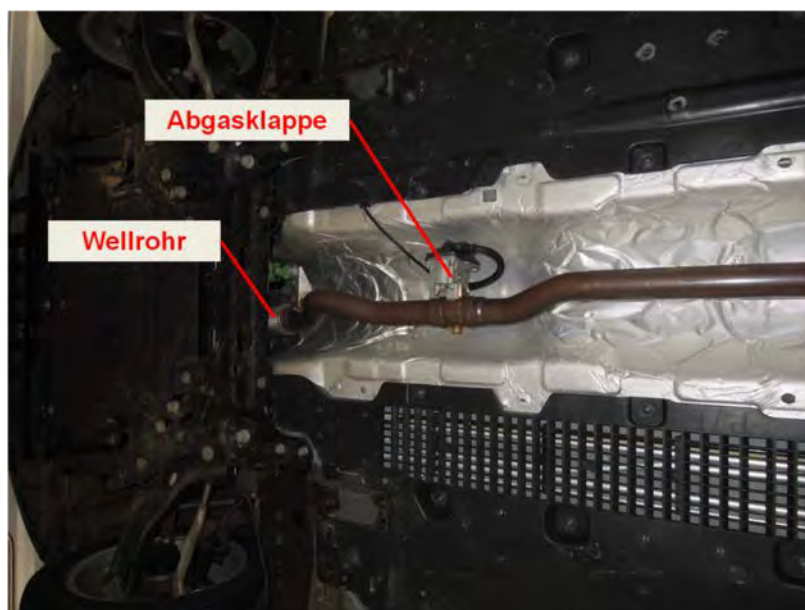


Abbildung 74: weiterer Abgasverlauf

Die Klappe wird im Teillastbereich angesteuert und erhöht so den Abgasgegendruck, was die Rückströmung der Abgase aus dem AGR-Bereich unterstützt.

Der Austritt der Abgasreinigung ist über den oben angesprochenen Flansch mit einem Wellrohr mit dem restlichen Abgasrohrverlauf, in dem die bereits diskutierte Abgasklappe integriert ist, verbunden. Das Wellrohr dient dem Bewegungsausgleich zwischen Motor und Abgasanlage und verhindert Verspannungen zwischen den beiden Bereichen.

Zwischen dem Wellrohr und dem Schalldämpfer, welcher auf den obigen Bildern nicht zu erkennen ist, verläuft das Abgasrohr, bei dem mit Ausnahme der Abgasklappe keine weiteren wesentlichen Bauteile mehr angeordnet sind.

Gaswege und Leitungslängen ab Zylinderkopf

Auf die Notwendigkeit möglichst kurzer Gaswege bei einer gleichzeitig geringen thermischen Masse wurde bereits im Kapitel 2.1.2 hingewiesen. Daher soll an dieser Stelle auf eine neuerliche Erörterung der physikalischen Zusammenhänge unter Verweis auf die entsprechende Textstelle verzichtet werden.

Bei dem untersuchten Euro 6-Fahrzeug der Fa. Renault konnten die folgenden charakteristischen Weglängen der Gasführungen ermittelt werden:

Zylinderkopf – Eingang Turbolader:	100 mm
Durchmesser Turbolader:	110 mm
Ausgang Turbolader – Eingang Abgasreinigung:	360 mm
Länge AGN (DOC+DPF):	250 mm

In der Summe ergibt sich somit der Gasweg bis zum Ende des Dieselpartikelfilters mit einer Gesamtlänge von ca. 1010 mm. An dieser Stelle ist jedoch noch keine Integration einer Nachrüstlösung möglich, weil sich dort der Anschluß für das Wellrohr und die Rohrführung in den Unterflurbereich des Fahrzeugs befindet. Tatsächlich ergibt sich ein real nutzbarer Bereich für nachträglich integrierte Systeme bei einem Gasweg von ca. 1300 mm hinter Zylinderkopfaustritt. Damit liegen die Werte ganz ähnlich, wie bei der vorher diskutierten Euro 5 – Variante. Dies ist insofern nicht ungewöhnlich, da die vierte

Generation des Megane mit großer Wahrscheinlichkeit auf der selben Bodengruppe aufbaut, wie die dritte Variante.

Erst hinter dem Wellrohr, also nach einer Flußlänge von den angesprochenen ca. 1300 mm, könnte eine Nachrüstlösung integriert werden. Der freie Bereich hinter der Serien-AGN hat eine ungefähre Länge von ca. 1100 mm. Allerdings befindet sich in diesem Bereich die Abgasklappe, welche den Gegendruck für die Abgasrückführung regelt. Sie könnte jedoch auch an eine andere Stelle versetzt werden, sodaß diese keine unüberbrückbare Hürde beim Einbau eines SCR-Systems im angesprochenen Bereich sein sollte.

Die geometrischen Daten geben zwei wesentliche Informationen:

- a) Die Gaswege zur serienmäßigen Abgasreinigung sind bei dem untersuchten Fahrzeug sehr kurz, offensichtlich mit dem Fokus auf gutes Aufwärmverhalten nach dem Kaltstart und größtmöglichem Nutzungsbereich bei Teillastbetrieb mit niedrigen Abgas-temperaturen.
- b) Der Austritt der serienmäßigen Abgasreinigung liegt relativ nahe am Motor. Trotzdem kann dort eine Systemerweiterung nicht installiert werden, da der Platz nicht ausreichend ist bzw. dort die Schwingungsentkoppelung mittels Wellrohr zwischen Motor und Abgasanlage integriert ist.
- c) Hinter dem Wellrohr ist vergleichsweise viel Platz, um eine weitere AGN-Komponente bzw. ein weiteres System zu integrieren. Grundsätzlich würde das Platzangebot für die Integration einer Adblue-Injektion nebst Verdampfungsstrecke, Mischer und den notwendigen Katalysatorstufen ausreichen.
- d) Der Bereich für eine mögliche Integration eines SCR-Systems ist hinsichtlich der Gaswege sehr weit von der Wärmequelle, dem Motor, entfernt. Damit ist das Erreichen einer ausreichenden Betriebstemperatur in weiten Bereichen des Kennfelds, vor allem im meist genutzten Teillastbereich, in Frage zu stellen.

Platzverhältnisse im Motorraum und im Unterbodenbereich

Das Fahrzeug Renault Megane IV mit dem 1,5 dCi-Motor nach Euro 6-Spezifikation nutzt einen aufgeladenen Dieselmotor, welcher wie beim Vorgänger quer zur Fahrtrichtung montiert ist. Aufgrund der vorgängerbasierten Grundkonstruktion befinden sich auch bei der aktuellen Variante Ansaug- und Abgasführung auf der Motorrückseite zwischen Motor und Spritzwand. Dort ist demzufolge auch der Turbolader angeordnet, wie in Abbildung 75 erkennbar.

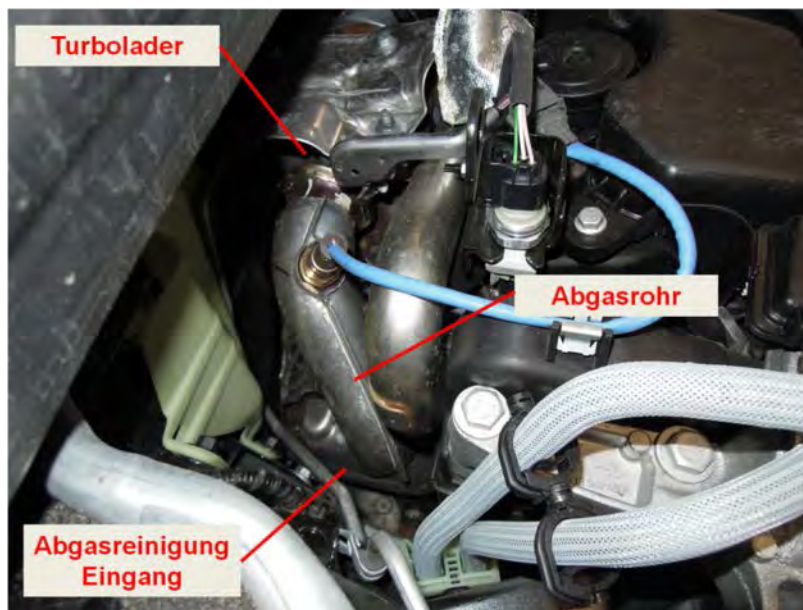


Abbildung 75: Platzverhältnisse im Motorraum

Der Austritt des Abgasturboladers ist über eine wärmeisolierte Rohrführung direkt mit dem unterhalb vom Turbolader positionierten Abgasreinigungssystem verbunden. Die blaue Leitung, welche auf dem Foto sehr deutlich zu erkennen ist, gehört zu einer Lambdasonde, welche das aktuelle Kraftstoff-Luft-Gemisch anhand der Sauerstoffkonzentration im Abgas misst und diese Information an das Motorsteuergerät weitergibt.

Neben der Abgasführung ist eine weitere Rohrführung sichtbar. Hierbei handelt es sich um die Luftzufuhr zum Motor.

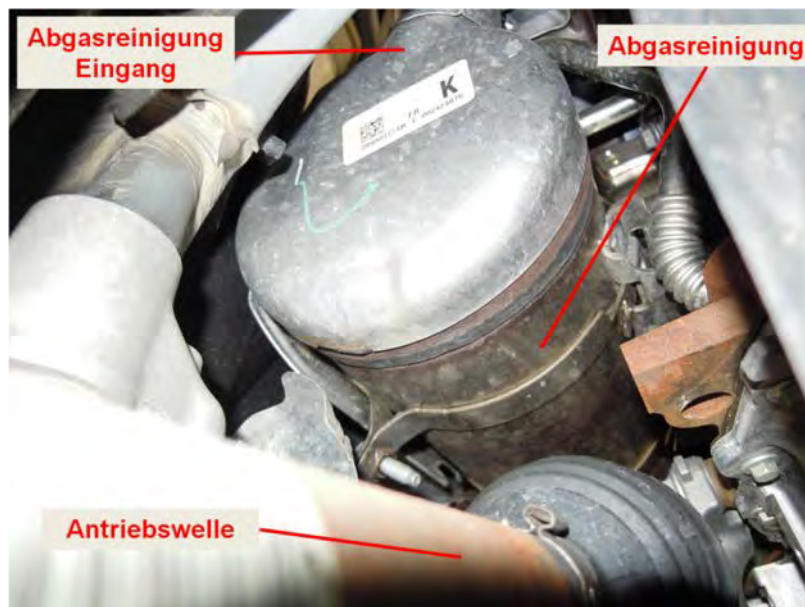


Abbildung 76: Platzverhältnisse im Motorraum

Das Abgasreinigungssystem ist ein kompaktes Bauteil bestehend aus Dieseloxydationskatalysator (DOC), NO_x-Speicherkatalysator (LNT) und Dieselpartikelfilter (DPF). Der Gaseintritt des Systems ist in Abbildung 76 mit Blick aus dem Radhaus dargestellt.

Direkt unterhalb der Abgasreinigung verlaufen die Antriebswellen. Gleichzeitig ist die AGN sehr eng zwischen der Motorspritzwand auf der linken Seite und dem Motorblock zur Rechten eingefasst. Bei einer derartig begrenzten Zugänglichkeit ist es nur schwerlich

vorstellbar, hier ein zusätzliches Bauteil, wie z.B. den NH₃-Generator der Fa. BAUMOT, zu integrieren.

Ein Ausweichen auf den Tunnelbereich mit einer Positionierung des Generators neben dem Wellrohr in der Durchführung zwischen Motorraum und Unterflurbereich wäre eventuell gerade noch möglich. Die Abbildung 77 zeigt diesen Bereich. Dabei wird deutlich, daß das Wellrohr aus der Mitte der Durchführung versetzt ist und sich damit ein Freiraum ergibt, der möglicherweise für die Integration des NH₃-Generators ausreichend sein könnte. Allerdings dürfte die Rohrstütze der Abgasführung in diesem Falle stören und müßte wahrscheinlich versetzt werden.

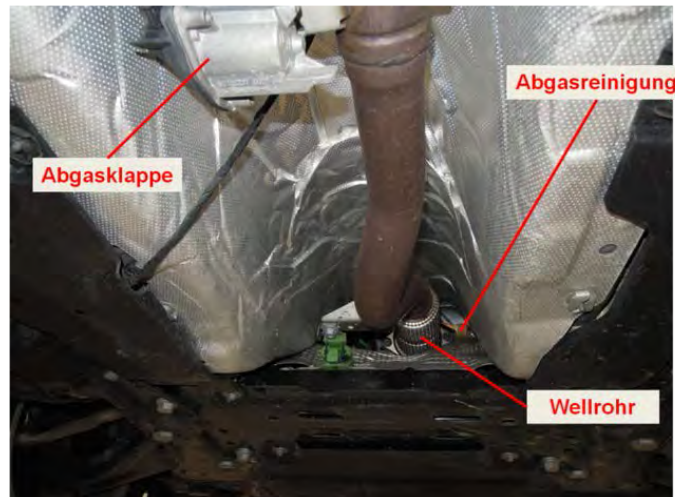


Abbildung 77: Platzverhältnisse im Unterbodenbereich

Zweifelhaft ist jedoch in diesem Falle, inwieweit die Zuleitung der Abgase vom weit entfernten Abgasturbolader noch auf einem ausreichend hohen Temperaturniveau stattfinden kann. Durch die ortsferne Positionierung vom NH₃-Generator und der Wärmequelle sind Funktionseinbußen insbesondere im Kaltstartbereich und Teillast zu befürchten.

Die Integration eines SCR-Systems im hinteren Bereich der Abgasführung ist konstruktiv grundsätzlich gut möglich. Die Bodengruppe ist dem Vorgängermodell sehr ähnlich. Daher sind wie bei diesem Fahrzeug die Platzverhältnisse im Bereich hinter dem Partikelfilter ausreichend, wie anhand der Abbildung 78 nachvollziehbar.



Abbildung 78: Platzverhältnisse im Unterbodenbereich

Die geradlinige Rohrführung wirkt sich positiv auf die Gasableitung und die Möglichkeiten zur Integration von Katalysatoren aus. Allerdings ergeben sich besondere Probleme für den Fall der Integration einer Adblue-Einspritzdüse. Die optimale Einbauposition ergäbe sich im Bereich einer gekrümmten Rohrführung, da dort die Düse in Richtung der Gasableitung spritzen könnte. Im vorliegenden Falle müsste die Düse jedoch schräg seitlich am Rohr angebracht werden. Damit ist eine Benetzung Rohrwandungen im Betrieb nahezu unausweichlich. Das führt zu einer Kondensation von Adblue in Verbindung mit einer unvollständigen Hydrolyse und einer inhomogenen Katalysatorbeaufschlagung.

Dieses Problem betrifft insbesondere die Konfigurierung eines Standard-SCR-Systems. Die Systeme der Firmen FAURECIA und BAUMOT führen dem SCR-Katalysator Ammoniak gasförmig zu, was den Mischungsvorgang verbessert, allerdings mit anderen Problemen (siehe Kapitel 2) verbunden ist.

Grundsätzlich muß berücksichtigt werden, daß Nachrüstsysteme in der Regel dergestalt konzipiert sind, daß auf einen vom Fahrzeughersteller angebotenen SCR-Katalysator zurückgegriffen wird. Dies ist im vorliegenden Fall nicht möglich, da für diese Fahrzeug / Motorkombination kein SCR-System entwickelt wurde und auch keine vorentwickelten Komponenten verfügbar sind.

Möglicher Einbauort eines SCR-Systems

Wie bereits anhand der vorhergehenden Kapitel ausführlich diskutiert, ist im direkten Umfeld des Motors beim untersuchten Fahrzeug kein Raum für die Installation eines zusätzlichen Abgasreinigungssystems. Es muß auf den Unterflurbereich ausgewichen werden. Die Platzverhältnisse dort sind relativ großzügig, allerdings ist die Entfernung zur Wärmequelle Motor sehr groß.

Die Abbildung 79 zeigt den freien Bereich, der sich für die Integration eines SCR-Systems anbieten würde. Die serienmäßig vorhandene Abgasklappe müßte jedoch ersetzt werden.

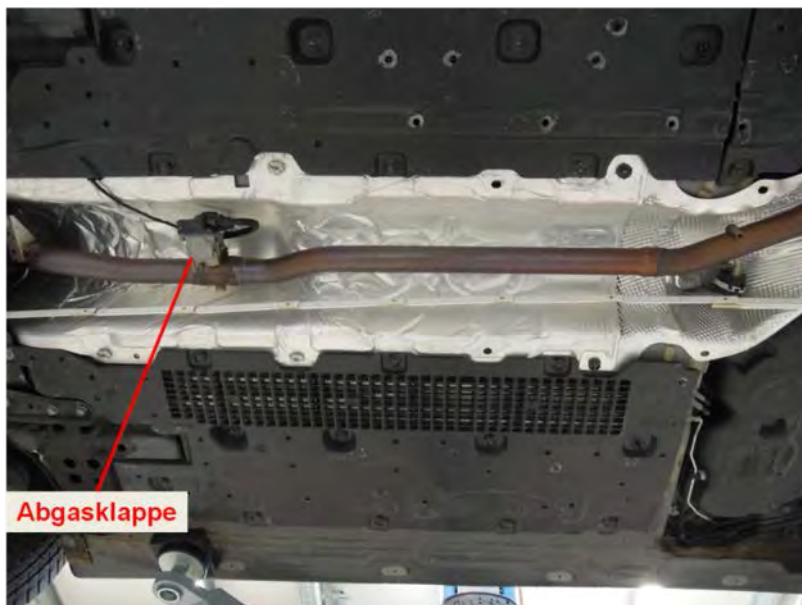


Abbildung 79: freies Einsatzfeld im Unterbodenbereich

Ein mehr als 90 cm langes Abgasrohr verläuft innerhalb des Fahrzeugtunnels. Dieser ist zur Fahrgastzelle komplett wärmeisoliert. Der Freiraum zwischen Abgasführung und der Fahrgastzelle ist unterschiedlich groß, da einige Absätze in diesem Bereich vorhanden sind. Der größte Freiraum besteht zwischen der Abgasrohrstütze, welche in Abbildung 79 am ganz linken Bildrand zu erkennen ist und dem leichten S-Knick kurz hinter der Abgasklappe. Weiter stromabwärts ist der Unterbodenbereich etwas mehr eingeschränkt, wie im Abbildung 80 zu erkennen. Ein halbkreisförmiger Bereich mit einem Radius von ca. 6 cm Radius entspricht dem Platzangebot, welches durch ein SCR-System genutzt werden könnte.



Abbildung 80: Platzangebot im Unterbodenbereich

Im hinteren Verlauf weitet sich dieser Bereich wieder leicht auf einen Radius von ca. 7 cm auf (siehe Abbildung 81).



Abbildung 81: Platzangebot im Unterbodenbereich

Die Ammoniakbevorratung bei einem SCR-System erfolgt in der Regel im Kofferraum des Fahrzeugs, unabhängig von der Art des Speichers. Der Platz bietet sich an, weil die

Tankeinheit dort einerseits einen besseren Schutz gegen Vereisung besitzt, andererseits die Wahrscheinlichkeit der Beschädigung von außen, z.B. durch Unfall oder Steinschlag gering ist. Gleichzeitig ergeben sich bei dieser Positionierung Vorteile hinsichtlich der Nachbetankungsmöglichkeiten gegenüber der Montage andernorts, z.B. unter dem Fahrzeug oder im Motorraum. Daher wurde auch im Rahmen der vorliegenden Studie der Kofferraum als möglicher Platz für die entsprechende Installation begutachtet. Die Abbildung 82 zeigt das Platzangebot im Kofferraum des Megane IV bei entferntem Kofferraumbodenbelag.



Abbildung 82: Platzangebot im Innenraum (Adblue-Speicher / Ammoniakspeicher)

Der Kofferraum des Megane IV zeigt sich nahezu identisch zu dem des Vorgängermodells (siehe Abbildung 71). Auch dies deutet darauf hin, dass die Fahrzeuge trotz der unterschiedlichen Modellgenerationen im Grundaufbau offensichtlich nahezu identisch sind. Allerdings ist bei dem untersuchten Fahrzeug kein Ersatzrad vorhanden, weswegen sich aufgrund der trotz allem vorhandenem Ersatzradmulde großzügige Platzbedingungen für die Integration eines zusätzlichen Tanks und für die entsprechende Druckversorgung mit Hilfe einer Förderpumpe ergeben. Die Recherche bezüglich der Ausstattungsvarianten bei diesem Fahrzeug ergab jedoch, daß der Käufer an dieser Stelle die Wahl zwischen drei Optionen hat:

- a) mit vollwertigem Ersatzrad
- b) mit platzsparendem Notrad
- c) ohne Ersatzrad mit Notfallset.

Im vorliegenden Falle wurde offensichtlich die Option c) geordert. Bei Käufern, welche die Optionen a) oder b) bestellt haben, ist die Reserveradmulde nicht frei. Damit ergibt sich bei diesen Varianten ähnlich wie beim Megane III die Problematik der Bauteilintegration. Sollte sich der Besitzer für den Verzicht des Ersatzrads zugunsten des Nachrüstsystems entscheiden, so wäre zumindest der zusätzliche Erwerb eines Pannensets angeraten.

Die Befüllung des Tanks mit Adblue wäre grundsätzlich von außerhalb des Fahrzeugs möglich. Neben dem Einfüllstutzen für Dieselmotorkraftstoff ist ein ausreichender Freiraum,

um eine Befüllöffnung für Adblue zu integrieren (Abbildung 83). Hier unterscheidet sich die neue Fahrzeuggeneration vom Vorgänger. Eventuell wurde an dieser Stelle durch die Fa. Renault bereits Platz für zukünftige Entwicklungen vorgehalten.



Abbildung 83: Einfüllöffnung für Dieselkraftstoff

Fazit EU6 + Option für Nachrüstung

Die konstruktiven Randbedingungen für die Integration eines nachgerüsteten SCR-Systems wurden am Beispiel eines Renault Megane IV Energy dCi 110 ECO² untersucht. Die nachfolgende Beurteilung konzentriert sich daher lediglich auf diesen Aspekt der konstruktiven Integration. Die softwaretechnischen und regelungstechnischen Aspekte bei der Integration eines derartigen Systems finden im Rahmen des aktuellen Kapitels unter Verweis auf die entsprechenden Textabschnitte im Vorfeld keine Berücksichtigung.

- Hinsichtlich des Aspekts des Platzangebots im Unterbodenbereich ergibt sich ein vergleichbares Bild wie beim Vorgängermodell Renault Megane III. Es ist ausreichenden Platz vorhanden, um einen SCR-Katalysator in Verbindung mit einer Adblue-Injektion und einer Mischvorrichtung bzw. Mischstrecke zu installieren. Gegebenenfalls wäre auch noch die Integration eines weiteren Dieseloxydationskatalysators zur Verbesserung des NO/NO₂-Verhältnisses aufgrund der räumlichen Gegebenheiten möglich. Allerdings ist der Freiraum sehr weit von der Wärmequelle, dem Motor, entfernt, sodaß die thermischen Bedingungen für den Betrieb der Abgasreinigung sehr ungünstig sind und daher die Funktion eher auf den Autobahn-relevanten Hochlastbetrieb beschränkt sein dürfte. In weiten Bereichen des Teillastbetriebs, wie er im Stadtverkehr vornehmlich vorliegt, wird die Ansprechtemperatur voraussichtlich nicht erreicht. Der mögliche Betriebsbereich kann nur durch einen erheblichen Eingriff in die Motorsteuerung erweitert werden („Aufheizstrategie“). Auch dabei sind deutliche Grenzen gesetzt. Zudem gehen derartige Maßnahmen auf Kosten des Verbrauchs.
- Die in der Serie verbaute Abgasklappe müsste neu positioniert werden. Hierzu muß eventuell der Kabelstrang verlängert werden.
- Der Platz für einen externen Ammoniakgenerator nach dem System der Fa. BAUMOT ist in der vorgegebenen unmittelbaren Nähe des Turboladers nicht gegeben.
- Sofern das Fahrzeug mit einem sog. Pannenset geordert wurde, ist in der Reserveradmulde ausreichend Platz für den Adblue-Tank und die Fördervorrichtung oder einen Feststofftank in Kartuschenform vorhanden. Sofern jedoch das Fahrzeug mit Notrad oder vollwertigem Ersatzrad ausgeliefert wurde, entfällt diese Option, es sei denn, der Fahrzeughalter verzichtet auf das Reserverad. Möchte er dies nicht, so ist die Integration der Ammoniakbevorratung schwierig.
- Eine Betankung von außen ist prinzipiell möglich, da hinter der Tankklappe ausreichend Platz für die Integration einer Befüllöffnung besteht. Hinsichtlich der Leitungsführung zum Adblue-Behälter wären erhebliche Karosseriearbeiten notwendig.
- Die Beheizung des Tanks und der flüssigkeitsführenden Leitungen müssen nicht nur installiert werden, sondern das elektrische System, insbesondere die installierte Batteriegröße, müssen unter dem Aspekt der zusätzlichen elektrischen Last überprüft und eventuell angepaßt werden.

- Eine Einbindung in das On-Board-Diagnose- und –Überwachungssystem ist nur mit großem Aufwand und nur für den Fahrzeughersteller möglich. Nichtsdestotrotz müssen Überwachungsfunktionen integriert werden und die Funktionsinformationen dem Fahrer übermittelt werden. Eventuell müssen sogar die Aktionen des Fahrers überschrieben werden, wie z.B. zur Verhinderung der Fahrt mit leerem Adblue-Tank oder der Sicherung gegen Auffüllen mit reinem Wasser.
- Die Rückwirkung des erhöhten Abgasgegendrucks auf das Betriebsverhalten des Motors, insbesondere hinsichtlich der Abstimmung der Abgasrückführung mit Hilfe der serienmäßigen Abgasklappe, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Im schlimmsten Falle wird die ECU aufgrund der veränderten Randbedingungen den Notlauf aktivieren.
- Die Kombination eines nachgerüsteten SCR-Systems mit der serienmäßigen motornahen AGN (mit NO_x-Speicherkat LNT) ist nur als Neuentwicklung mit einer kompletten Neuapplikation möglich.
- Weder ein diesbezüglicher Vorentwicklungsstand noch die entsprechenden Software-Funktionalitäten bzw. Komponenten sind bei Renault vorhanden.
- Bei der vorgegebenen Anwendung ist im Niedriglastbereich, z.B. im Stadtverkehr, nur eine geringe Verbesserung der NO_x-Emission durch ein zusätzliches SCR-System darstellbar.

Bei der untersuchten Euro6-Variante ist mit einer schnellen Umsetzung eines Software-Updates (Erweiterung des ND-AGR-Arbeitsbereiches, optimierte Ansteuerung des LNT) die höchste Wirksamkeit im Feld zu erwarten.

Der erwartete Entwicklungsaufwand bis zum Erreichen der Marktfähigkeit beträgt ca. 3 Jahre.

Die NO_x-Minderungsfunktion ist beim Einsatz an diesem Fahrzeug gerade in Teillast, z. B. im Stadtverkehr, aufgrund der oben beschriebenen Zusammenhänge ist gering.

Kurzstudie

**Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x-
Reduzierungsnachrüstmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten
Nutzfahrzeuge**

Analyse der Fahrzeuge:

Mercedes-Benz Sprinter NCV3, EURO5b+, Gr.III, N1

Mercedes-Benz Sprinter NCV3, EURO6b, Gr.III, N1

Im Auftrag des



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

04. Februar 2018

Einleitung

Untersucht wurden zwei Transporterfahrzeuge des Typs Mercedes Benz Sprinter (NCV3).

In der Ausführung EURO5b+ N1 war ein Fahrzeug

- als zertifizierte Variante zur Güterbeförderung N1 mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 3,5t
- mit einer Leistung von 120kW
- mit einem maximalen Drehmoment von 360Nm
- mit Hinterradantrieb

als geschlossener Kastenwagen verfügbar. Die Abgasnachbehandlung dieses Fahrzeuges besteht aus einem Oxidationskatalysator und einem Dieselpartikelfilter DPF. Es ist eine Hochdruck-Abgasrückführung HD-AGR appliziert.

Ebenfalls wurde im Vergleich eine EURO6 Variante als N1 Zertifizierung mit vergleichbarer Konfiguration (120kW), ebenfalls mit einem Vierzylinder Dieselmotor Antriebsaggregat OM651, untersucht. Das EURO6 Fahrzeug ist neben einem Oxidationskatalysator und dem obligatorischen DPF mit einem SCR System ausgestattet. Ebenfalls ist eine Hochdruck-Abgasrückführung HD-AGR verbaut.

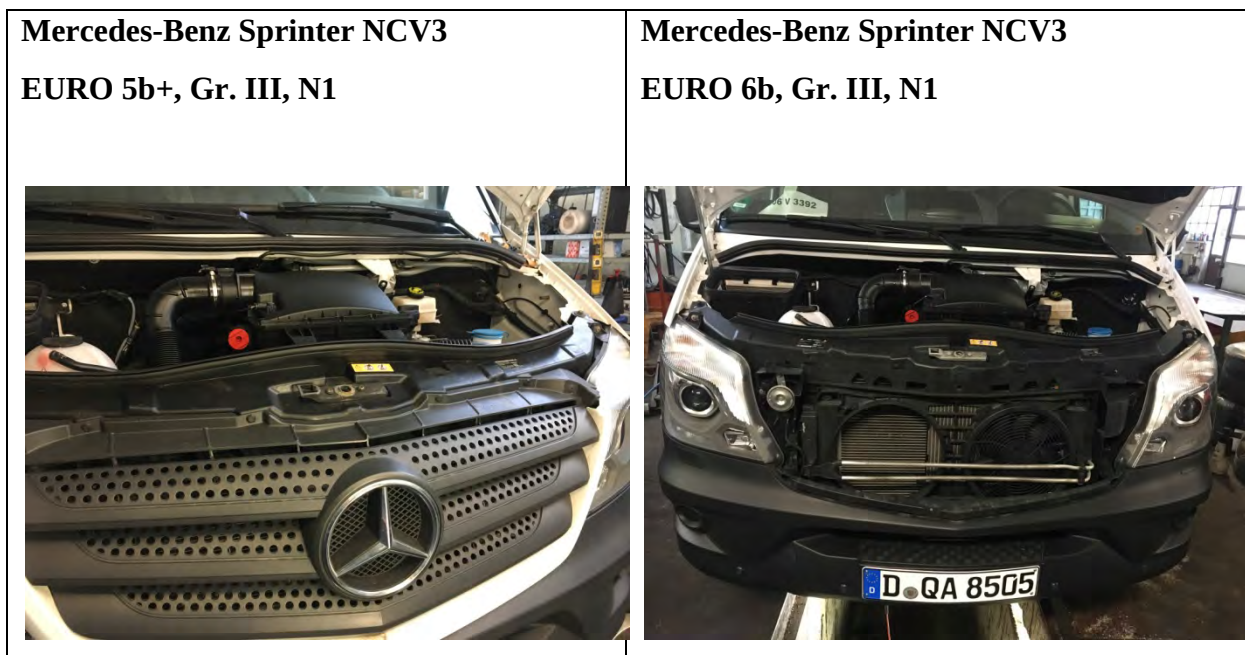


Abbildung 1: Frontansicht der Fahrzeuge mit Motorraum mit demontierter Kühlerverkleidung bei der EURO6 Variante

Bei allen nachfolgenden Abbildungen ist das EURO5 Fahrzeug links und das SCR Fahrzeug rechts abgebildet!

Abbildung 1 zeigt eine Frontansicht der beiden Fahrzeuge. Als Getriebe ist bei beiden Fahrzeugen ein TSG 6-Gang Schaltgetriebe verbaut.

1. Packaginganalyse

Der Adbluetank ist bei der EURO6 Ausführung im Crash-relevanten Bereich in Fahrtrichtung vorne rechts platziert. Der Adblue-Einfüllstutzen ist gut erreichbar in Fahrtrichtung und ebenfalls vorne rechts verbaut (Abbildung 2).

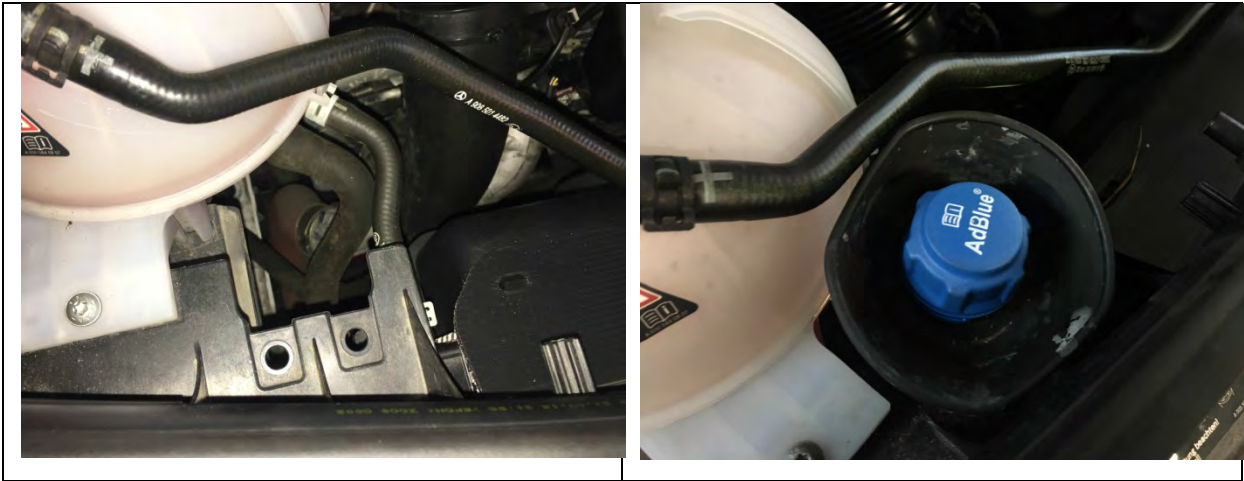


Abbildung 2: Bereich des Adblueeinfüllstutzens

Der Adbluetank liegt in Fahrtrichtung vorne rechts neben dem vorderen Längsträger (Abbildung 3).

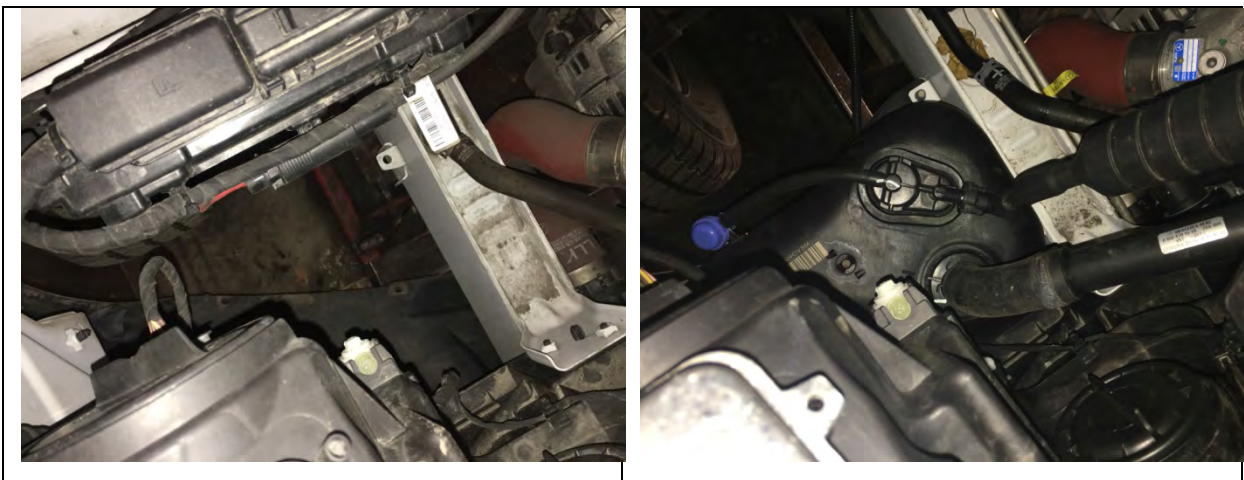


Abbildung 3: Bereich des Adblue-Tanks mit dem Motorsteuergerät bei der EURO5 Variante in Fahrtrichtung rechts

Auch die Analyse des Bauraums nach Entnahme der Radlaufverkleidung zeigt keine Komplikationen beim Verbau eines Adblue-Tanks (Abbildung 4).



Abbildung 4: Position des Adblue-Tanks nach Abbau der Radlaufverkleidung

Zu beachten ist die Tatsache, dass beim EURO5 Fahrzeug das Motorsteuergerät in Fahrtrichtung rechts verbaut gewesen ist und deshalb in der Nähe des Adblue-Tanks liegt. Es sind jedoch keine Packaging-seitigen Komplikationen für einen Einbau eines Adblue-Tanks in das EURO5 Fahrzeug ersichtlich (Abbildung 5).



Abbildung 5: Bereich des Motorsteuergeräts beim EURO5 Fahrzeug in Fahrtrichtung rechts unterhalb des Luftansaugkastens für die Innenraumbelüftung

Abgasseitig gestaltet sich das hot-end bei beiden Fahrzeugen geometrisch identisch. Auch der Abgasturbolader sieht zumindest geometrisch identisch aus. Unterschiedliche Radgeometrien des Verdichter- oder Turbinenlaufrades konnten nicht evaluiert werden. Auf die Sensorik (Abbildung 6) wird untenstehend noch eingegangen werden.



Abbildung 6: Abgasturbolader mitsamt p_4 , T_4 Sensorik von oben betrachtet mit Wastegatesteller über Druckdose.

Im weiteren Verlauf der Abgasanlage findet sich bei der EURO6 Variante ein NO_x -Sensor. Es werden keine bauraumlimitierenden Einschränkungen für den Verbau eines NO_x -Sensors bei der EURO5 Variante identifiziert. Ebenfalls ist der Dieselpartikelfilter bei beiden Ausführungen bezüglich der Außenabmessungen identisch ausgeführt und mit dem vorgeschalteten Oxidationskatalysator in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich insbesondere die Oxidationskatalysatoren aber auch die Beschichtung des DPF unterscheiden. Somit ist für einen Verbau der SCR-Anlage auf jeden Fall die komplette Abgasnachbehandlung zu tauschen, da sonst keine zuverlässigen NH_3 -Modelle für die Einspeicherung im SCR-Katalysator vorliegen!

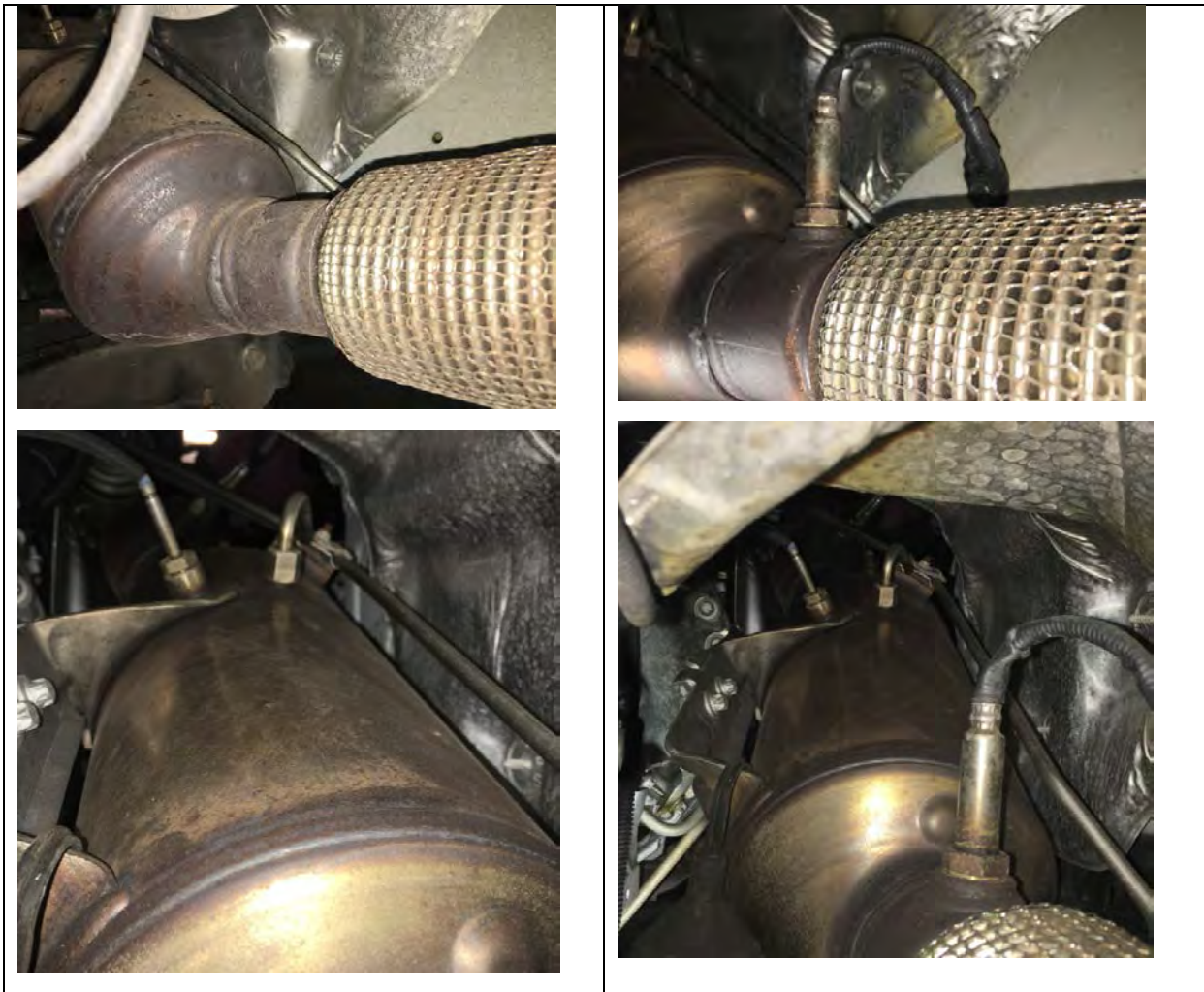


Abbildung 7: Austritt aus Dieselpartikelfilter mit NO_x Sensor bei der SCR-Variante und zusätzlicher DPF Sensorik (Differenzdruck)

In Abbildung 7 wird nochmals die Positionierung des DPF für beide Varianten aufgezeigt. Die Differenzdrucksensorik erscheint für beide Varianten identisch.

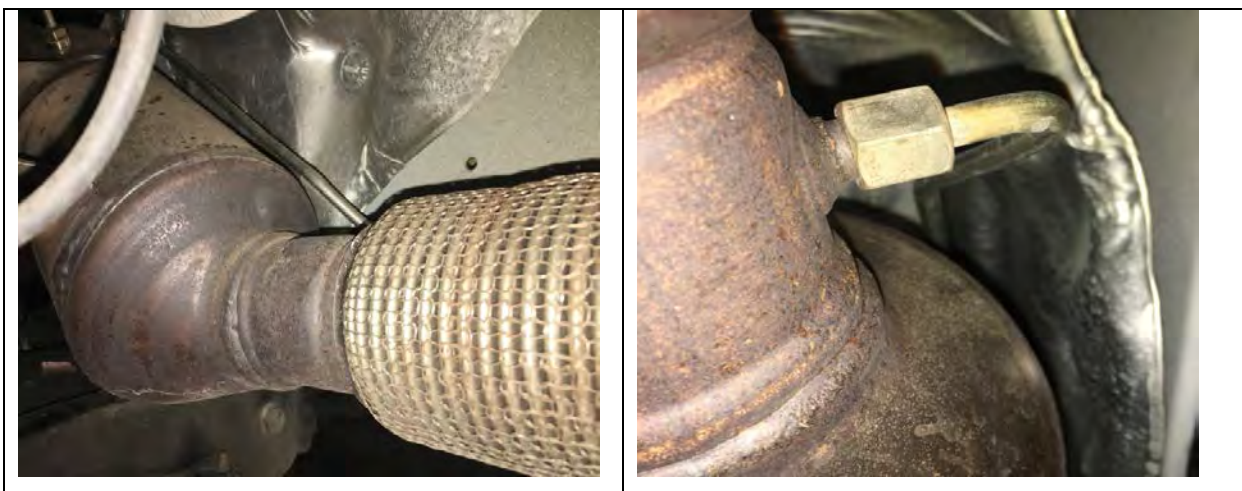


Abbildung 8: Differenzdruckmessung am DPF

Zusätzlich ist in Abbildung 8 nochmals die Aufnahme des Drucksensors in Strömungsrichtung nach DPF zu sehen. Für die EURO5 Variante (links dargestellt) existiert keine Fotografie exakt von der Messstelle. Jedoch kann zusammengefasst werden, dass keine Unterschiede der beiden Baumuster ersichtlich sind.

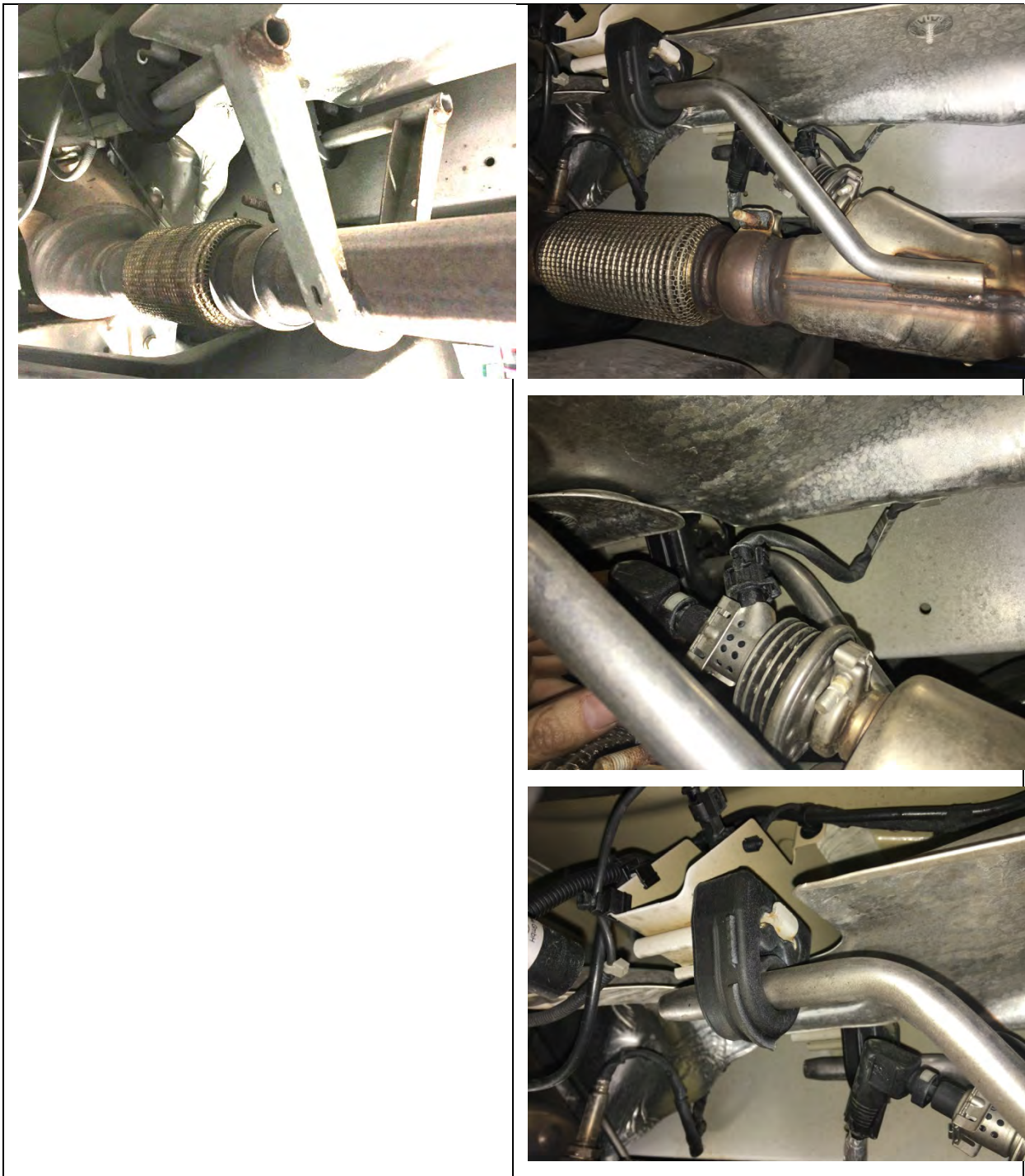


Abbildung 9: Austritt aus Dieselpartikelfilter mit NO_x Sensor bei der SCR-Variante und zusätzlicher DPF Sensorik (Differenzdruck)

Abbildung 9 zeigt zudem die Aufnahme der Abgasanlage. Bei der SCR Variante ist die Adblueeinspritzung hinter dem Bügel ansatzweise ersichtlich. Die beiden Aufnahme-punkte erscheinen bei beiden Fahrzeugen ebenfalls identisch.

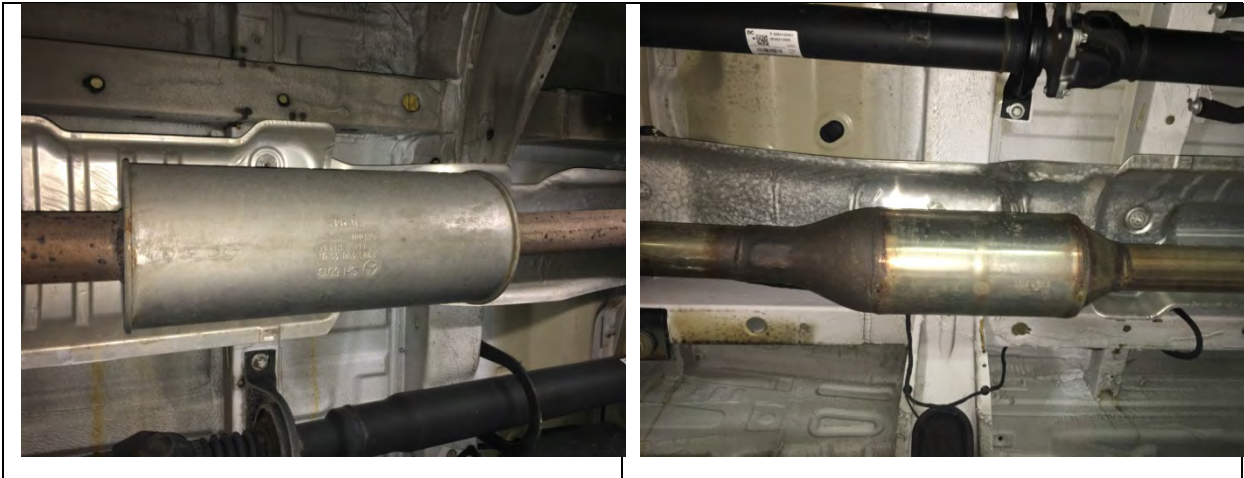


Abbildung 10: Schalldämpfer und SCR Katalysator

Ebenfalls werden keine Packaging-seitigen Restriktionen beim Verbau einer SCR-Katalysators gesehen (Abbildung 10). Der EURO5 Schalldämpfer wird durch den Katalysator substituiert. Die neueste SCR-Ausführung - in einer Vorlage noch mit Temperatursensor ausgestattet - weist keinen Temperatursensor mehr vor dem Eintritt in den SCR-Katalysator auf, zumindest bei der hier untersuchten Fahrzeugvariante EURO6b N1, Gr.III.. Es darf vermutet werden, dass die Abgastemperatur mittlerweile durch ein thermodynamisches Modell abgebildet wird, welches im Steuergerät berechnet wird.

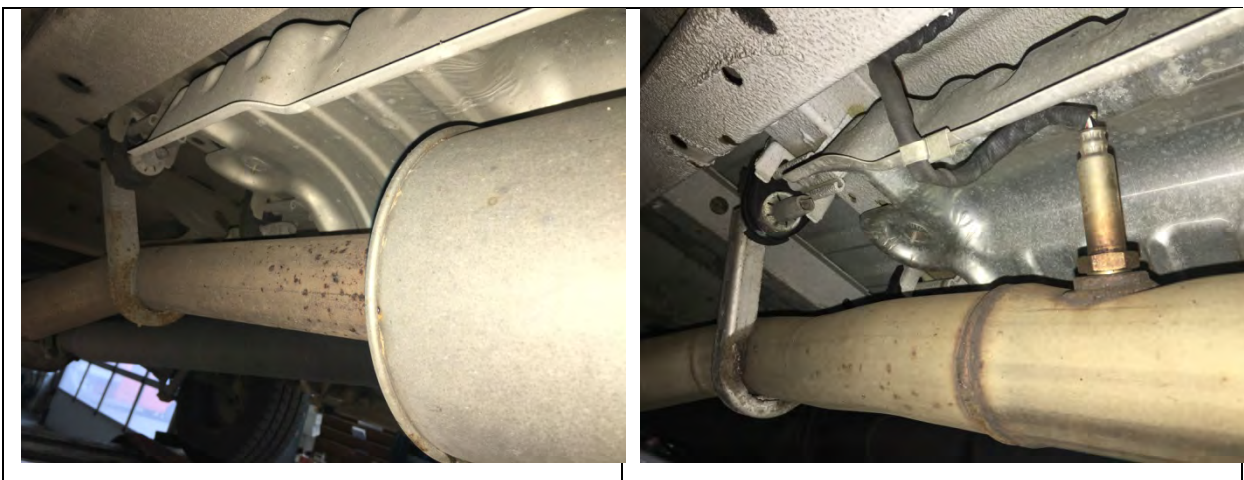


Abbildung 11: Position des NO_x Sensors nach SCR Kat für EURO6 Variante im Vergleich mit EURO5

In Abbildung 11 ist der NO_x-Sensor, der nach dem SCR-Katalysator platziert ist, rechts zu erkennen. Auch hier sind keine Packaging-seitigen Herausforderungen beim Verbau einer SCR-Anlage zu identifizieren.

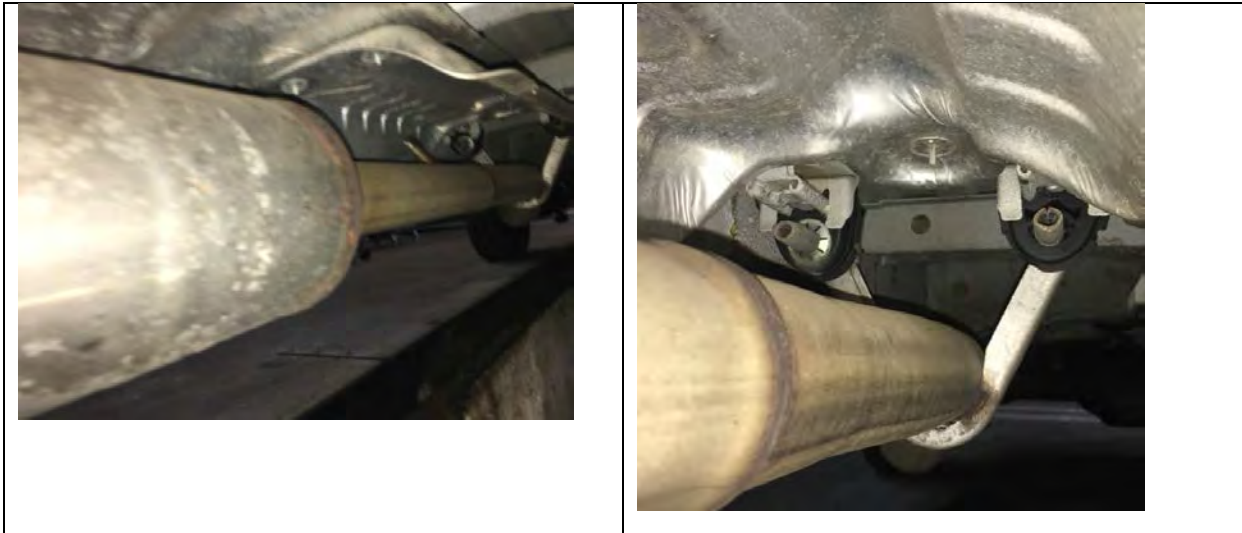


Abbildung 12: Aufnahme des cold end.

Abbildung 12 zeigt zudem die Aufnahme der Abgasanlage im Bereich des cold end. Auch hier gibt es keine zu erkennenden Unterschiede zwischen der EURO5 und der EURO6 Variante.

2. Elektrik / Elektronik

Es sind deutliche Unterschiede der Kabelsatzausführungen der EURO5 und EURO6 Variante zu erkennen. Bereits mit Abbildung 5 ist auf die unterschiedliche Position der Motorsteuerung hingewiesen worden.

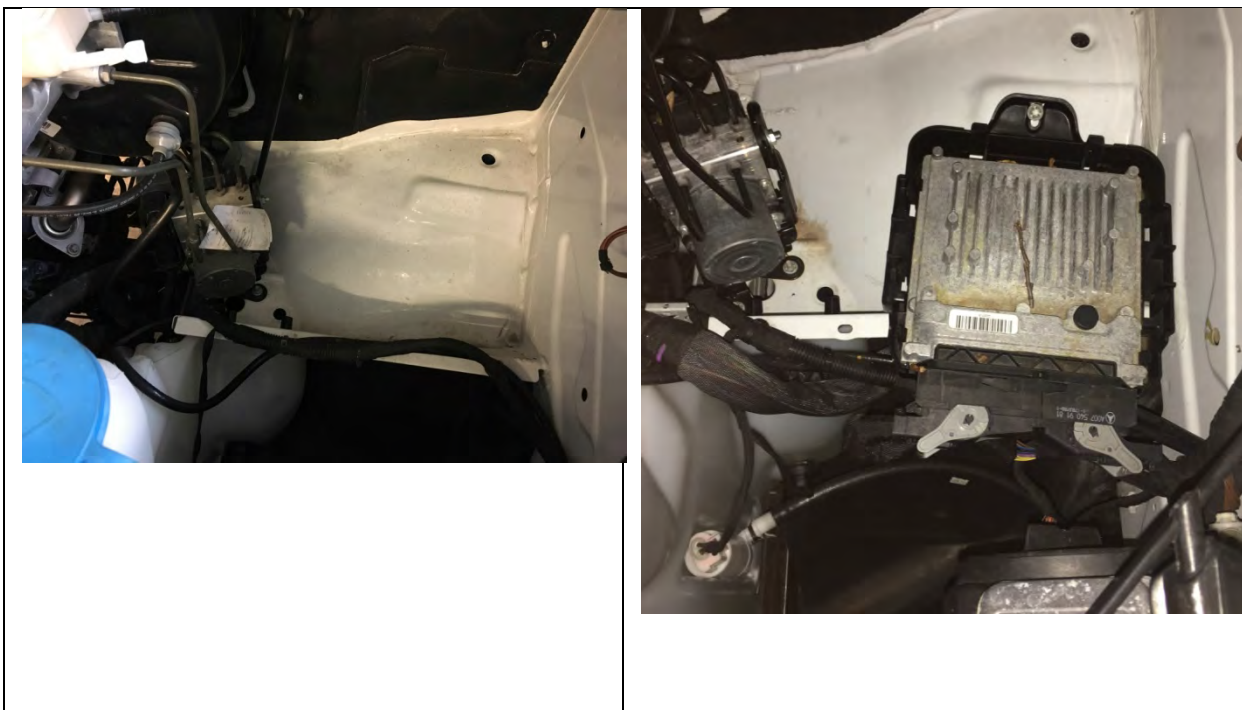


Abbildung 13: Position des Motorsteuergeräts in Fahrtrichtung links bei der EURO6 Variante mitsamt Halter, Verbindungen etc.

Fehlender Deckel der Steuergeräteabdeckung bei der EURO6 Fahrzeugvariante fehlte

Im Zuge der Diskussion mit der Daimler AG wurden plausible, vertrauliche Gründe genannt, weshalb im Rahmen der allgemeinen Qualitätsverbesserung eine Positionsverbesserung durchgeführt wurde.

Bei der SCR Variante sitzt das Motorsteuergerät nun im Motorraum in Fahrtrichtung links



Abbildung 14: Identisch positionierte Aufnahme der Druck- und Temperatursensoren p_4 , T_4

Der Vollständigkeit halber wird auf einen veränderten Musterstand des Druck- und Temperatursensors nach Turbine (p_4 , T_4) hingewiesen. Die Aufnahme im Abgasrohr ist gemäß durchgeführter Sichtung identisch. Die EURO6 Sensorvarianten unterscheiden sich jedoch. Es liegen keine Datenblätter der einzelnen Sensoren vor.

Gemäß Aussage von Daimler unterscheidet sich zudem der T_3 Sensor und der Motorkabelsatz. Beides ist nachvollziehbar und Resultat einer typischen Produktweiterentwicklung.

Offensichtlich ist der Fahrzeugkabelsatz des EURO6 Fahrzeugs deutlich unterschiedlich im Vergleich zur EURO5 Variante. Aus diesem Grund wurde bei Daimler angefragt, die Unterschiede zu visualisieren. Im gesamten Vorderwagenbereich unterscheidet sich der Kabelbaum maßgeblich. Ähnlichkeiten des Kabelsatzes im Motorraum sind kaum ersichtlich (siehe Kapitel 2.2).

Die entfernte SCR-Katalysatorposition im Unterboden des Fahrzeuges bedingt nun, wie bereits erläutert, Thermomanagement-Maßnahmen, um die Abgastemperatur auf ein Adblue-dosierfähiges Niveau von etwa 180-200°C anzuheben. Aus diesem Grund sind motorseitige Thermomanagementmaßnahmen notwendig. Die Alternative einer

elektrischen Heizung des Abgases stellt das Bordnetz vor große Herausforderungen, wie ebenfalls bereits ausgeführt wurde und ist sicherlich alleine keine Maßnahme, um eine Adblue-Dosierfreigabe zu erzielen. Natürlich könnte eine elektrische Heizung etwas unterstützen, alleine stellte diese elektrische Heizmaßnahme eine große Herausforderung für das Bordnetz dar. Bis heute ist diese elektrische Heizlösung aufgrund der energetischen Nachteile nicht in eine Serie überführt. Erst bei extrem strengen Emissionsgrenzwerten (strenger als EURO6_{dfinal}) kann diese Lösung mit Verbrauchsnachteilen unter Umständen einen Einzug in die Serie finden.

Nun sind zwei theoretische Umbauten zu diskutieren, mit denen ein EURO5 Fahrzeug mit einer SCR-Lösung ausgestattet werden könnte.

2.1 EURO5 Steuergerät verbleibt im Fahrzeug

Wie bereits ausgeführt wurde, ist eine Kommunikation zwischen der SCR-Abgasnachbehandlung und dem Motorsteuergerät alleine schon aufgrund der Abgastemperatur des SCR-Systems unabdingbar, um einen Thermomanagementbetrieb zu initiieren. Alleine dieser Kommunikationsbedarf bedingt einen Eingriff in das Motormanagement! Daraus resultiert die Notwendigkeit, in den Kabelsatz des Fahrzeuges und des Motors an einer geeigneten Stelle einzugreifen.

Dies bedeutet ebenfalls, dass das vorhandene EURO5 Motorsteuergerät die neuen SCR-Umfänge bearbeiten kann.

Nun liegt im Falle des Sprinters die Situation vor, dass für ein Zeitfenster von etwa einem Jahr eine EURO6 M1 Zertifizierung mit SCR Technologie und alter Steuergeräteposition und altem Steuergerät (in Fahrtrichtung rechts) verbaut wurde, jedoch aus genannten Qualitätsgründen dieser Ansatz von der neuen Steuergerätekonfiguration abgelöst werden musste. Die von Daimler genannten Qualitätsgründe sind nachvollziehbar und rechtfertigen den serienseitigen Wechsel auf die neue Position.

Laut Rücksprache mit Daimler liegt nun sogar der Fall vor, dass das alte EURO5 Steuergerät mit der genannten und für ein Jahr angebotenen EURO6 M1 Bedatung (2015-2016) kompatibel ist. Diese Kombination stellt bereits eine Überlagerung von Zuständen dar, die überhaupt notwendig sind. Gleichwohl sind weitere Einschränkungen gegeben.

Die übertragbare Software würde nur einen alten Entwicklungsstand darstellen und ist deshalb bezüglich folgender Fragestellungen umfänglich zu überprüfen und in Teilen zu überarbeiten

- Thermomanagement
- Überarbeitung der Partikelfilterbeladungsmodelle
- Überarbeitung der NH₃ Einspeichermodelle in den SCR-Katalysator
- Kompatibilitätsüberprüfung
- Onboard Diagnoseumfänge

An dieser Stelle muss erläutert werden, dass generell die OEMs im Zuge der generellen Optimierung der SCR Systeme insgesamt das Thermomanagement zur Anpassung der Abgastemperatur überarbeiten. Diese Maßnahme benötigt alleine etwa ein Jahr Entwicklungszeit, da mit dem Thermomanagement zahlreiche andere wesentliche Untermodelle, beispielsweise die Partikelfilterbeladungsmodelle, betroffen sind.

Die mit EURO6 angebotenen Fahrzeugleistungen unterscheidet sich mit Ausnahme von der 120kW Spitzenvariante (mit OM651) bei den Minderleistungsvarianten. Die EURO5 Fahrzeugleistungen sind nicht identisch mit den EURO6 Fahrzeugleistungen (siehe Tabelle 1).

EURO5b+	EURO6
120 kW	120 kW
95 kW	105 kW
70 kW	84 kW

Tabelle 1: Leistungsstufen des Mercedes-Sprinter mit 4-Zylinder OM651

Für ein Großteil der Fahrzeugflotte müssten also zusätzlich neue Leistungsvarianten entwickelt werden, die anschließend natürlich ebenfalls noch zertifiziert werden müssten.

Eine Klärung dieser Umfänge inklusive Absicherung beträgt also mindestens ein Jahr Entwicklungszeit und beinhaltet zahlreiche Risiken. Des weiteren ist danach für die Zertifizierung und für den Genehmigungsdurchlauf für die einzelnen Varianten ein Zeitfenster von einigen Monaten zusätzlich anzuberaumen.

Es ist unklar, ob mit einem EURO5 E/E Setup typische Weiterentwicklungshindernisse auftreten, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ersichtlich sind, da nur ein veralteter Softwarestand zur Verfügung steht.

Eine weitere Herausforderung stellen die E/E Komponenten dar.

- Einbindung der neuen Sensorik
- Vermeidung Kontaktschwierigkeiten an Steckerverbindungen
- Einbindung der elektrischen Verbraucher (v.a. Adblueheizung in das Fahrzeugenergiemanagementmodell)

Unabdingbar ist, auch wenn in diesem günstigsten Fall das Steuergerät beibehalten werden kann, dass ein neuer Motorkabelsatz und ein neuer Fahrzeugkabelsatz eingebaut werden muss. Dies bedingt unzählige Montageschritte, so ist der Motor zu demontieren, um Motor- und Fahrzeugkabelsatz zu verbauen. Es ist davon auszugehen, dass dafür mindestens zwei Arbeitstage benötigt werden.

Im Rahmen eines Serienentwicklungsprozesses sind alle diese Maßnahmen zu implementieren und unter Fahrzeugqualitätskriterien nach erfolgter Erprobung

mindestens in einer Sommererprobung und einer Wintererprobung nochmals zu überprüfen. Im vorliegenden Fall könnte zwar auf die vorhandene alte EURO6 Software zurückgegriffen werden, aufgrund der Komplexität der Softwarestruktur ist jedoch auch in diesem Best-Case einer Möglichkeit der Softwareübertragung auf den EURO5-Hardwarestand unbedingt eine Gesamtüberprüfung durchzuführen. Insbesondere für die vom Gesetzgeber vorgeschriebene Onboard Diagnose, die für EURO6 deutlich weiter entwickelt wurde, wären in diesem Fall Überprüfungen vonnöten. Hier ist weiterführender juristischer Sachverstand vonnöten, welche OBD-Anforderungen auch im Hinblick auf die Abgasuntersuchung benötigt werden.

Es kann zusammengefasst werden, dass alleine die Überprüfung des Ansatzes 2.1 "EURO5 Steuergerät verbleibt im Fahrzeug" unter Serienqualitäts Gesichtspunkten einen erheblichen Entwicklungsaufwand mit sich bringt. Auch wenn hier eine Best-Case Situation vorliegt, so ist eine E/E-Entwicklung mit gründlicher Absicherung nicht unter 12 Monaten vorstellbar, da sämtliche Untermodelle und Wechselwirkungen nochmals überprüft und in allen vorkommenden Fahrsituationen abgesichert werden müssen. Betont wird die Variantenvielfalt, die zahlreiche weitere Herausforderungen mit sich bringt.

Auch in diesem Best-Case Fall müssten weitreichende Änderungen am Kabelsatz vorgenommen werden und zeitintensive Umbauten vorgenommen werden!

All diese Entwicklungsgesichtspunkte sind natürlich weniger relevant, wenn die Fahrzeugqualität reduziert werden dürfte. In diesem Fall ist beispielsweise folgendes zu erwarten:

- Kabel werden nicht geschützt verlegt
- Keine Crashesicherheit ist gewährleistet (Kurzschlussgefahr bei auslaufendem Kraftstoff)
- Korrosionsprobleme und Kontaktprobleme an den Steckverbindungen zu ist zu erwartet!
- Stabilität Bordnetz, Batteriespannung wäre eingeschränkt
- etc.

2.2 Umrüstung des EURO5 Steuergerät auf einen EURO6 Kabelsatz

Die Alternative ist ein Umbau des Fahrzeuges auf einen kompletten EURO6 Kabelsatz, also der Ansatz 2.2.

In diesem Fall handelt es sich jedoch sicher nicht mehr um eine einfache Nachrüstlösung, sondern um einen Fahrzeugumbau.

Zu betonen ist der Sachverhalt, dass für alle 4-Zylinderdieselausführungen, gemäß Daimler mit Einführung der EURO6 N1/N2 Zertifizierung ab Q2/2016, das neue Steuergerät eingeführt wurde, welches in Fahrtrichtung links platziert ist. Somit wäre für jede Umrüstung von EURO5 auf EURO6 N1/N2 ein Umbau vonnöten. An dieser Stelle

wird nochmals auf die in Tabelle 1 dargestellten unterschiedlichen Leistungsdaten verwiesen.

Ebenfalls ist auf eine weitere Herausforderung einzugehen, der Datensatzvielfalt. Bedingt durch verschiedene Emissionsstufen

- Euro V (auf diesen Typ wird im Rahmen dieses Berichts nicht eingegangen)
- Euro 5
- Euro VI (auf diesen Typ wird im Rahmen dieses Berichts nicht eingegangen)
- Euro 6

und verschiedene Fahrzeugvarianten

- Leistung
- Getriebekonfiguration
- Achsformel

So ergibt sich eine Vielfalt von mehreren Dutzend Datensätzen. Die exakte Anzahl an Datensätzen liegt vertraulich vor. Es sind Dutzende verschiedener Varianten bekannt.

Auch bei diesem Ansatz 2.2. ist die Variantenvielfalt eine große Herausforderung, da Sonderausstattungsumfänge und verschiedene Musterstufen zu unterschiedlichen Kabelsatzkonfigurationen führen.

Abbildung 15 zeigt die Herausforderungen des Kabelsatzumbaus. Am Beispiel einer Differenzstudie (EURO6 versus EURO5) sind sämtliche Änderungsumfänge visualisiert. Zum einen sind Abgasnachbehandlungsumfänge sichtbar. Die Änderungen des Kabelsatzes sind jedoch signifikant umfangreicher. Die Analyse wurde auf Nachfrage von der Daimler AG durchgeführt und ist zur Veröffentlichung freigegeben. Ein Komplettumbau des Motor- und Fahrzeugkabelsatzes macht eine EMV-Absicherung erforderlich (elektro-magnetische Verträglichkeit).

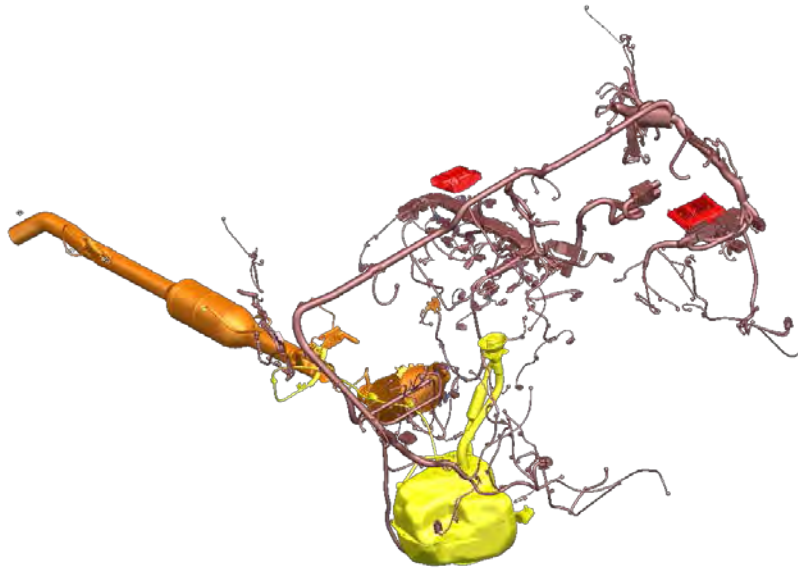


Abbildung 15: Änderungsumfänge des Kabelsatzes von EURO5 zu EURO6. Eine weitere Abhängigkeit von Sonderausstattungs umfangen ist gegeben. Ebenfalls sind sonstige Hardwareänderungsumfänge (AGN, Tank,..) dargestellt [Quelle: Daimler AG]

Ein Umbau des Fahrzeuges ist technisch sicherlich möglich und dieser Umbau stellt sicherlich keine technisch unlösbaren Herausforderungen dar. Dieser Umbau würde jedoch mindestens bedeuten

- eine komplett neue EURO6 Abgasnachbehandlungsanlage
- ein Umbau des Fahrzeugkabelsatzes
- ein Umbau des Motorkabelsatzes
- neue Kabelsatzhalter
- Nachrüstung von Sensorik, Aktuatorik, SCR Tank
- Umbau der Motorsteuergeräte.

Auch wenn der Rumpfmotor OM651 unverändert geblieben ist, so sind Weiterentwicklungsumfänge des Motors nicht exakt bekannt und auch in diesem Fall müsste der EURO5 Basismotor hinsichtlich seiner Kompatibilität mit einem EURO6 Datensatz überprüft werden. Zu klären gilt es, ob beispielsweise

- Injektormusterstände
- Abgasrückführsystem / Air-Management
- Motorinterne Regelungstechnik

absolut identisch sind. Dies könnte im Rahmen einer Erprobung geklärt werden und stellt kein entscheidendes Risiko dar, jedoch bedarf es einer Überprüfung.

Auf Rückfrage wurde von Daimler vertraulich eine Differenzanalyse der Fahrzeugbauteile mit einer Unterscheidung von EURO5 N-Zertifizierung und EURO6 N-Zertifizierung durchgeführt. In Summe wurden einige hundert Bauteile benannt, die weiterentwickelt wurden!

Es liegen verschiedene vertrauliche Differenzanalysen vor. Abhängig vom Baumustervergleich sind jedoch immer einige hundert Sachnummern unterschiedlich!

Die Umbaukosten eines Fahrzeuges, welches nach dem Umbau eine vergleichbare Serienqualität aufweist, ist von zahlreichen Faktoren abhängig. In Kombination mit den anfallenden Bauteilen sind Umbaukosten pro Fahrzeug unterhalb von mindestens 5000€ nicht vorstellbar. Wesentlich sind die Umbaukosten abhängig von folgenden Randbedingungen:

- Edelmetallgehalt der EURO6 Abgasanlage
- Umbauzeiten (2 Arbeitstage sind aufgrund der Kabelsatzthematik realistisch)
- detaillierte Lieferantenkosten der obenstehend ausgeführten Umfänge
- Kosten durch Bauteillogistik
- Umlage der Entwicklungskosten

Je nach Betrachtung können daher auch deutlich höhere Kosten oberhalb von 6000€ realistisch sein. Exakte Angaben kann hier nur der OEM tätigen. Die oftmals genannten Kosten im Bereich zwischen 1500 und 3000€ sind unrealistisch und berücksichtigen wesentliche Umfänge nicht. Weiterführende Kostenbausteine wie Ausfallkosten der oftmals gewerblich genutzten Fahrzeuge mit Sonderein- und aufbauten werden hier nicht betrachtet.

Von einer Umbaulösung (Ansatz 2.2) wird daher abgeraten. Die Variantenvielfalt erscheint innerhalb der nächsten 2-3 Jahre nicht handhabbar.

Sicherlich können im Einzelfall von Nachrüstern, mit Abstrichen bei der Qualität, Zwitterlösungen zwischen 2.1 und 2.2 gefunden werden. Diese können jedoch nicht den Ansprüchen an die Seriensicherheit und Serienqualität genügen und müssten ebenfalls neu entwickelt, erprobt, abgesichert und zertifiziert werden.

2.3 Weitere Verbesserung des EURO6 Fahrzeuges

Noch nicht thematisiert wurde eine weitere Verbesserung des EURO6 Verhaltens. Hier ist mit einem Softwareupdate zu überprüfen, ob eine weitere Erhöhung der Abgastemperatur zu erzielen ist, ohne den Verbrauch signifikant zu verschlechtern. Auch ein solches Update bedeutet beispielsweise eine vollumfängliche Überarbeitung der Partikelfilterbeladungsmodelle, eine Neuberechnung der NH₃ Einspeicherung im SCR Katalysator und der maximal zulässigen Dosierate. Die Vermeidung eines NH₃ Durchbruches muss unter allen relevanten Betriebszuständen im Versuch validiert werden!

Die OBD Herausforderungen einer solchen Lösung müssen überprüft und berücksichtigt werden.

Eine hardwareseitige Umrüstung eines EURO6 Fahrzeuges, welches bereits über SCR verfügt, ist nicht sinnvoll. Vielmehr ist durch eine Softwareoptimierung eine Abgastemperaturfreigabe zur Erreichung der Dosierfreigabe der entscheidende Schritt. Hilfreich wirkt sich das hohe Fahrzeuggewicht und die Stirnfäche des Fahrzeuges aus, da bei der höheren Last, im Vergleich zu einem PKW, eine erhöhte Abgastemperatur leichter zu erzielen ist.

3. Weitere Herausforderungen

Wie bereits obenstehend kurz erwähnt wurde, ist nach Rückfrage von Daimler eine Differenzanalyse aller Fahrzeugbauteile durchgeführt worden. Die Musterstände EURO5 nach MOPF und EURO6 als LKW-Zulassung unterscheiden sich in über 400 Sachnummern. Einen wesentlichen Anteil hat sicherlich der Kabelsatz mitsamt Steckern, Verschraubungen etc.

Wichtig ist der Hinweis, dass zur Jahresmitte 2013 eine große Modellpflege (Mopf) in die Serie eingeflossen ist. Im Rahmen dieser Modellpflege ist der komplette Vorderwagen überarbeitet worden. Diese Überarbeitung beinhaltet insbesondere auch den vorderen quer verbauten Träger, der auch zur Aufnahme der Kühlerverkleidung dient. An diesem Träger ist der Ablueeinfüllstutzen montiert und der Stoßfänger wurde ebenfalls modifiziert. Sicherlich lässt sich im Rahmen einer Neuentwicklung ein Adbluetank an ähnlicher Stelle wie bei der heutigen EURO6 Variante realisieren. Da jedoch geänderte Geometrien vorliegen, stellt dies eine Neuentwicklung im Crash-relevanten Bereich dar, weshalb hier nur mit großem Aufwand eine Lösung, die sicherlich machbar ist, entwickelt werden kann. Der Entwicklungsaufwand nähert sich einer Neuentwicklung. Zudem sind vor der Modellpflege weitere Sachnummernunterschiede zwischen den Baumustern (EURO5 vor MOPF, EURO6 nach Mopf) ersichtlich. Die Anzahl an zu prüfenden Differenzbauteilen steigt weiter an. Vor der Modellpflege ist das Fahrzeug nur in der Ausführung als EURO5 Gr.III M Zulassung verkauft worden.

An dieser Stelle wird noch auf eine weitere Herausforderung eingegangen. Im Zuge der Fahrerinformation ist ein EURO5 Kombiinstrument hinsichtlich der digitale Anzeige des Adblue-Füllstandes neu zu flashen. Die EURO5 Variante beinhaltet dies noch nicht. Die Machbarkeit des Flashens und Aufspielens eines neuen Datensatzes ist zu überprüfen. Hierbei wird ausdrücklich auf die Gefahr der Manipulation hingewiesen, da beim Neuflashen typischerweise auch die Fahrzeuglaufleistung (gefahrte Kilometer) neu eingegeben werden muss. Hier stellt der Missbrauch durch Manipulation der Fahrzeuglaufleistung eine Gefahr dar.

Ebenfalls wurde kurz eine EURO4 Konfiguration analysiert. Auch hier gilt die gleiche Aussage wie für die EURO5 Konfiguration vor der Modellpflege. Prinzipiell erscheint eine solche Umrüstung aus Packaginggründen darstellbar. Jedoch wächst der Aufwand nochmals. Der EURO4 Motor OM646 stellt ein deutlich älteres Baumuster dar. Die Realisierung einer OBD muss mit dem alten Steuergerät bezweifelt werden. Eine SCR-

Ansteuerung des Steuergerätes ist nach vorliegenden Informationen nicht möglich. Es müsste ein weiteres Steuergerät verbaut werden. Die Entwicklungsarbeiten entsprechen denen einer Neuentwicklung. Die Variantenvielfalt vergrößert die Komplexität weiter. Die Anzahl an weiteren Entwicklungsrisiken, alleine aufgrund der veralteten E/E Infrastruktur, lassen von einer detaillierte Analyse abraten.

4. Zusammenfassung

Für den Sprinter EURO6 N1/N2 wird eine softwareseitige Optimierung empfohlen, um durch Thermomanagementmaßnahmen die Temperatur im Abgas gerade im Schwachlastbetrieb anzuheben, um so wiederum eine Adblue-Dosierfreigabe zu erhalten. Eine solche Betriebsstrategie wird gerade auch für PKW Anwendungen entwickelt und stellt den einzigen gangbaren Weg dar, um bei der Fahrzeugvariantenvielfalt eine Serienqualität überhaupt aufrecht zu erhalten. Die Entwicklungsaufwendungen für eine solche Entwicklung liegen in der Größenordnung von einem Jahr und sind eventuell schon in die aktuelle Serie eingeflossen. Laut einem Bericht der automotorsport ist hier bereits eine Variante mit 6-Zylinder (OM642) mit einem Emissionsniveau von sehr niedrigen 22 mg/km getestet worden. Hier liegen keine weiteren aktuellen Ergebnisse vor. Durch das Abgastemperaturmanagement kann in einem absehbaren Zeitraum eine weitere signifikante Reduzierung der NO_x-Emissionen bis über 60 Prozent bei niedrig lastigen Anwendungen erfolgen. Die Verbesserung hängt entscheidend davon ab, wie häufig im Ausgangszustand eine Dosierfreigabe (ausreichend hohe Abgastemperatur) erreicht werden konnte. Dieses Vorgehen ermöglicht es, dass ein Großteil der Flotte mit reduzierten NO_x-Emissionen in den Ballungszentren betrieben werden kann.

Für den Sprinter EURO5b+ Gr.III ist kein SCR-System verbaut. Die oben aufgeführte Analyse zeigt auf, dass ein Umbau auf SCR unter Serienqualitäts Gesichtspunkten umfangreiche Überprüfungen und Entwicklungsarbeiten mit Entwicklungsrestrisiken mit sich bringt. Auch im Best-Case der vorhandenen Kompatibilität des EURO5 Steuergeräts mit dem EURO6 Datensatz ist ein neuer Kabelsatz zu verbauen. Der wesentliche Grund ist die neue Interaktion der Abgasnachbehandlung mit dem Motorsteuergerät. Bei einem Umbau sind insgesamt folgende Umfänge zwingend zu beachten

- neuer Fahrzeugkabelsatz und Motorkabelsatz
- Bordnetzversorgung und Bordspannungsabsicherung
- Fahrerinformationssystem
- Handhabung Inducement
- Variantenvielfalt (Allradantrieb, Getriebe, Aufbau, verschiedene Zulassungen, Sonderausstattung...)

In Summe bedeutet eine solche Lösung einen reinen Überprüfungsaufwand und Entwicklungsaufwand im absoluten Bestcase von mindestens einem Jahr. Dies erscheint eher deutlich zu kurz, da mit zahlreichen Herausforderungen im Detail zu rechnen ist und die Variantenvielfalt sicherlich noch nicht abgedeckt wäre.

Im Vergleich zu einer Nachrüstlösung eines externen Nachrüsters sind die Fahrzeugeigenschaften im Falle einer werksseitigen Überarbeitung prinzipiell deutlich zu bevorzugen. Wesentliche Gründe sind:

- Inducement
- NH₃-Durchbruch
- Alterungsverhalten
- Kundenfeldbetreuung (Haftung, Ersatzteile etc.)
- Absicherung des Crashverhaltens
- NVH (Schwingungsverhalten, störende Vibrationen etc.)
- Absicherung bei allen Betriebszuständen
- OBD gemäß EU-Vorschrift (dieser Punkt muss separat geklärt werden)

Aus mehreren Gründen wird für die EURO5 Variante eine ebenfalls aufwändige Softwarelösung empfohlen. Diese bedingt die Überprüfung und Überarbeitung von zahlreichen Untermodellen, eine intensive Entwicklung und Erprobung von etwa einem Jahr und erlaubt NO_x-Reduzierungen in der Größenordnung von ca. 20 bis 40 Prozent, abhängig vom Ausgangszustand. Aufgrund der verschiedenen Zertifizierungsvarianten (EURO5 N,M) wird empfohlen, unabhängig von der Zertifizierungsvariante einen übergreifenden NO_x-optimierten Datensatz zu entwickeln und zu verwenden.

Eine Überarbeitung der EURO4 Varianten stellt eine noch größere Herausforderung dar. Mit Abstrichen sind softwareseitige Maßnahmen prinzipiell denkbar. Bei derartig alten Fahrzeugen ist zu beachten, dass eine weitere Herausforderung die Verfügbarkeit von Ingenieuren ist, die sich mit diesem Datensatz noch auskennen, da die Entwicklung vor weit über 10 Jahren abgeschlossen war. Das Entwicklungsrisiko ist weiter erhöht.

Betont wird, dass bei allen Szenarien die normalen Entwicklungsprozesse und Absicherungsprozesse nicht mehr eingehalten werden können! Aus diesem Grund muss auch bei seriöser Arbeit aufgrund des Zeitdrucks davon ausgegangen werden, dass sich in der Flotte aufgrund der Varianten- und Betriebszustandsvielfalt neue Schwierigkeiten einstellen werden.

Die Erfahrungen mit den Volkswagenupdates zeigen, dass auch bei sorgfältiger Arbeit mit Schwierigkeiten im Feld zu rechnen ist. So sind bereits die Softwareupdates eine Maßnahme, die sicherlich zu einer Verschlechterung mancher fahrzeugseitiger Eigenschaften führen wird. Eine zusätzliche weitere Nachrüstung von SCR-Systemen würde unstrittig weitere Komplikationen im Feld hervorrufen.