

# **Studie über das Potenzial einer Realisierung einer Hardware-Nachrüstung für Dieselfahrzeuge EU5 (EU4) zur NOx-Reduzierung**

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Datum: 08.01.2018

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung/Fragestellung.....	3
2	Allgemeine Bewertung möglicher Umrüstmaßnahmen.....	3
2.1	Modifikationen am AGR-Systems.....	3
2.2	Nachrüstung mit einem NOx-Speicherkatalysator .....	3
2.3	Nachrüstung mit einem SCR-Katalysator .....	4
3	Realisierung der SCR-Nachrüstung durch den Fahrzeughersteller .....	5
4	Potenzial des Nachrüstmarktes .....	7
5	Zusammenstellung zu beachtender Fragestellungen .....	10
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	11
7	Anlage 1 .....	13

## 1 Einleitung/Fragestellung

Im Zuge des Nationalen Forums Diesel wurde von den Fahrzeugherstellern eine Verminderung der Emissionen insbesondere NO<sub>x</sub> durch Optimierungen der Software zugesagt. Da bisher noch keine konkreten Angaben über die umzusetzenden Maßnahmen bekannt sind, sollen alternativ zur Software-Optimierung mögliche Hardware-Umrüstungen untersucht werden. Deshalb sind die technischen Möglichkeiten einer Nachrüstung von bereits in Serie befindliche Fahrzeuge mit dem Ziel einer NO<sub>x</sub>-Nachrüstung herauszuarbeiten und auf deren Potenzial einer Umsetzung zu prüfen. Um eine möglichst schnelle Auswirkung auf eine NO<sub>x</sub>-Reduzierung zu erzielen, wurden Fahrzeuge mit hohen Zulassungszahlen der Emissionsklassen EU 5 und EU 6 vom BMVI ausgewählt. Je nach Ergebnis der Studien für diese Fahrzeugklassen kann zu einem späteren Zeitpunkt die Nachrüstaktion auch auf EU 4 Fahrzeuge ausgedehnt werden.

Im Rahmen dieser Studie soll auf theoretischem Wege geklärt werden, inwieweit eine Nachrüstung zur NO<sub>x</sub>-Minimierung technisch möglich und unter Berücksichtigung des Aufwandes sinnvoll ist. Nachdem keine Fahrzeuge zur Verfügung stehen, beinhaltet diese Studie keine Einbauuntersuchung. Mit dieser Studie werden zwei generell mögliche Umsetzungspfade betrachtet. Ein Pfad ist die Entwicklung/Einführung von NO<sub>x</sub>-reduzierenden Maßnahmen durch die Fahrzeughersteller selbst. Alternativ dazu werden die Angebote von Firmen, welche unabhängig von den Fahrzeugherstellern Nachrüstungen zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung anbieten, in die Betrachtungen mit einbezogen. Dabei wird eine mögliche Einbeziehung von Fahrzeugherstellern allerdings nicht ausgeschlossen.

Im Folgenden werden einerseits die Potenziale von NO<sub>x</sub>-Nachrüstmaßnahmen und deren Aussicht auf Realisierung sowie andererseits der hierfür erforderliche Aufwand und potentielle Risiken bewertet. Der Fokus liegt dabei auf die vom BMVI vorgeschlagenen Fahrzeugtypen, es wird aber auch darauf geachtet, dass die erzielten Schlussfolgerungen und Ergebnisse eine gewisse Allgemeingültigkeit haben. Es wird darauf hingewiesen, dass nachfolgende Aussagen nur auf öffentlich zugängliches Datenmaterial und den von einzelnen Nachrüstfirmen zur Verfügung gestellten Unterlagen basieren.

## 2 Allgemeine Bewertung möglicher Umrüstmaßnahmen

Im Folgenden werden mögliche Eingriffe im Sinne einer Nachrüstung in das Abgasrückführungssystem (AGR) und die Nachrüstungen von Speicherkatalysatoren und SCR-Katalysatoren bewertet.

### 2.1 Modifikationen am AGR-Systems

Mit abnehmenden Temperaturen steigt das Risiko einer erhöhten Ablagerungsbildung im AGR System. Besonders betroffen sind dabei der AGR Kühler und das AGR-Ventil. Die Ablagerungsbildung kann so weit gehen, dass es zu Ausfällen der Komponenten kommt. Deshalb gibt es das sogenannte Thermofenster, innerhalb dessen unter anderem die AGR-Menge reduziert wird. Im Zuge der Erkenntnisgewinne über die Wirkmechanismen der Ablagerungsbildung wurden die Komponenten des AGR-Systems weiterentwickelt. Beispielsweise sind heute verbesserte AGR-Ventile mit verstärktem Antrieb verfügbar. Ferner könnte man Maßnahmen zur Stabilisierung des Temperaturniveaus auch bei niedrigen Temperaturen entwickeln.

Allerdings verursacht ein Eingriff in das AGR-System und eine Veränderung der AGR-Menge eine maßgebliche Auswirkung auf die Verbrennung. Somit würden umfangreiche, applikative Maßnahmen erforderlich sein, damit unter allen Betriebsbedingungen ein robuster Verbrennungsablauf sichergestellt werden kann. Diese Entwicklung ist sinnvollerweise nur von den Fahrzeugherstellern leistbar. Da sie jedoch einen unvermeidbar hohen Aufwand bedeutet, werden Modifikationen am AGR-System nicht empfohlen.

### 2.2 Nachrüstung mit einem NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator

Der Vorteil eines NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysators liegt im Erreichen der light-off-Temperatur bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Zudem ist kein weiteres Medium für die NO<sub>x</sub>-Reduzierung erforderlich. Damit besteht keine Notwendigkeit für einen Einbau eines weiteren Tanksystems mit dem



dazugehörigen Dosiermodul. Als Nachteil eines NOx-Speicherkatalysators ist der Bedarf einer Regenerierung zu nennen, sobald die Speicherkapazität aufgebraucht ist.

Das Regenerieren des NOx-Speicherkatalysators ist nur durch einen signifikanten Eingriff in die Verbrennung möglich. Zur NOx-Speicher-Regeneration muss eine geeignete Betriebsstrategie vorhanden sein. Für die Einleitung der Regenerierungsphase muss die Verbrennung in Richtung fett eingestellt werden. Dies führt einerseits zu einem erhöhten Mehrverbrauch andererseits auch zu einer hohen Rußentstehung. Dieser erhöhte Partikeleintrag führt wiederum zu kürzeren Regenerierungsintervallen für das Partikelfilter. Der Bedarf einer Regenerierung wird am NOx-Gehalt des Abgases erkannt, welcher nach dem Speicherkatalysator mit einem NOx-Sensor gemessen wird. Bei normalen Fahrbetrieb erfolgt eine Regenerierung ca. alle 60 Sekunden. Damit wäre es theoretisch auch möglich, bei einer Nachrüstung auf den NOx-Sensor zu verzichten und die Regenerierung zeitlich basiert zu initiieren. Dies würde den Aufwand der Modifikationen an der Motorsteuerung vereinfachen.

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Eigenschaft der katalytischen Beschichtung eines NOx-Speicherkatalysators, neben NO<sub>2</sub> auch Schwefeldioxid einzulagern. Die eingelagerten Schwefeloxide verringern den Speicherwirkungsgrad. Dieser Effekt ist auch bei Kraftstoffen mit weniger als 15 ppm Schwefelgehalt vorhanden. Deshalb ist zusätzlich eine Betriebsstrategie für eine Desulfatisierung des NOx-Speicherkatalysators erforderlich.

Sowohl die normale Regenerierung als auch die Desulfatisierung erfordern erhebliche Eingriffe in die Motorsteuerung und setzen einen hohen Erprobungsaufwand voraus. Dies kann wiederum nur sinnvoll vom Fahrzeughersteller durchgeführt werden. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Einspeicherung über NO<sub>2</sub> erfolgt, das vornehmlich aus NO an den Edelmetallkomponenten des Oxidationskatalysators entsteht. Somit erfordert eine hohe NOx-Konvertierungsrate eine gute Abstimmung mit der Funktionsweise des Oxidationskatalysators.

Aus den Ausführungen geht hervor, dass eine Nachrüstung mit einem NOx-Speicherkatalysator einen erheblichen Aufwand bedeutet, welcher zu keinem Verhältnis zum erwarteten Nutzen steht. Deshalb werden Nachrüstmaßnahmen auf Basis von NOx-Speicherkatalysatoren nicht empfohlen. Als einzige Maßnahme könnte man sich vorstellen, dass Fahrzeuge, welche bereits mit einem NOx-Speicherkatalysator ausgerüstet sind, mit einem leistungsfähigeren Speicherkatalysator umgerüstet werden. Allerdings wird für diese Maßnahme das NOx-Reduzierungspotential als relativ gering bewertet.

### 2.3 Nachrüstung mit einem SCR-Katalysator

Zur Umwandlung der Stickoxide in die unschädlichen Komponenten Stickstoff und Wasser wird bei einem SCR-Katalysator Ammoniak als Reduktionsmittel benötigt. Da Ammoniak stark ätzend und giftig ist, wird dieser in Form einer wässrigen Harnstofflösung am Fahrzeug mitgeführt. Für den Ablauf der SCR-Reaktionen muss zunächst aus dem Harnstoff wieder Ammoniak gebildet werden. Mit diesem Ammoniak wird dann NO und NO<sub>2</sub> mithilfe der katalytischen Materialien in N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgewandelt. Für den sicheren Ablauf der Reaktionen muss im Katalysator ein genügend hohes Temperaturniveau (ab ca. 200 °C) vorhanden sein.

Die Herausforderung bei einem SCR-Katalysator liegt in der Zudosierung der Harnstofflösung (AdBlue). Auf der einen Seite ist es für eine hohe Katalysatoreffizienz wichtig, dass AdBlue möglichst gleichmäßig im Abgasstrom verteilt wird. Auf der anderen Seite soll die AdBlue-Menge nur so groß sein, dass sie gerade für eine vollständige Umsetzung von NO und NO<sub>2</sub> ausreichend ist. Wird zu viel AdBlue eingedüst, so entsteht ein Überangebot an Ammoniak. Bei zu geringer AdBlue-Menge kommt es zu einer unvollständigen Umsetzung von NO und NO<sub>2</sub> und damit zu erhöhten NOx-Emission. Mit einer speziellen Katalysatorschicht (Sperrkatalysator) kann überschüssiges Ammoniak zu N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgewandelt werden.

Daraus wird ersichtlich, dass der Applikation der AdBlue-Zudosierung für ein gut funktionierendes Abgasnachbehandlungssystem eine besondere Bedeutung zukommt. Um dies zu realisieren, muss der Abgasmassenstrom und dessen NOx-Gehalt der Steuerung für die AdBlue-Zudosierung als Information



vorliegen. Die Größen Abgasmassenstrom und NO<sub>x</sub>-Gehalt können über eine geeignete Messung erfasst werden oder alternativ mit Modellen berechnet werden.

Für die Speicherung von AdBlue im Fahrzeug ist ein separater Tank erforderlich. Die Befüllung mit AdBlue muss durch den Betreiber/die Betreiberin möglich sein. Damit ist am Fahrzeug eine gut zugängliche AdBlue-Tanköffnung vorzusehen. Da es sich bei AdBlue um eine wässrige Harnstofflösung handelt, friert diese bei einer Temperatur von -11 °C ein. Deshalb ist eine Beheizung des AdBlue-Tankes erforderlich.

Eine Abgasnachbehandlung mit einem SCR-Katalysator gilt als eine sehr effiziente Maßnahme zur Emissionsreduzierung. Im optimalen Temperaturfenster zwischen 250 und 450 °C können NO<sub>x</sub>-Reduktionsraten bis zu 90 % erreicht werden. Deshalb wird dieses System für eine Nachrüstung zur NO<sub>x</sub>-Reduktion vorgeschlagen. Allerdings ist dringend zu empfehlen, dass der SCR-Katalysator im Bereich des Austrittes mit einer sogenannten Sperrbeschichtung versehen wird. Diese ist in der Lage überschüssigen Ammoniak in N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umzuwandeln.

### 3 Realisierung der SCR-Nachrüstung durch den Fahrzeughersteller

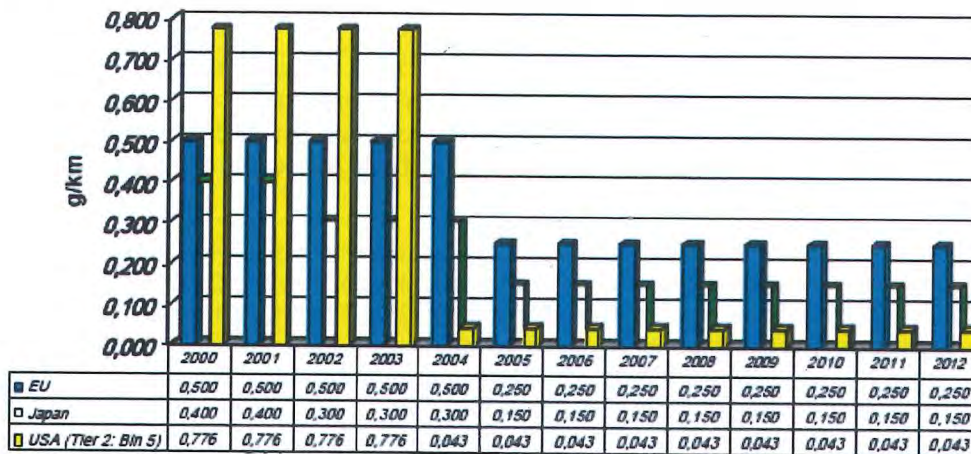
Eine Abwicklung einer Nachrüstung durch den Fahrzeughersteller stellt die optimale Variante dar. Denn nur hier besteht die Chance, das gesamte Potenzial von NO<sub>x</sub>-Reduzierungsmaßnahmen auszuschöpfen und gleichzeitig die geringst möglichen Auswirkungen auf andere Parameter (CO<sub>2</sub> Emission, Fahrverhalten, Betriebssicherheit usw.) in Kauf nehmen zu müssen. Beim Fahrzeughersteller liegt der Vorteil, dass er sämtliche Daten für den Einbau und Implementierung des SCR-Systems (Katalysator und AdBlue-Tank/-Dosiersystem) in Händen hat.

Somit lassen sich folgende Vorteile für eine Hardware-Nachrüstung durch den Fahrzeughersteller anführen:

- Der Fahrzeughersteller hat etablierte und erprobte Prozesse für die Entwicklung, Applikation und für eine serientaugliche Absicherung;
- Es besteht die Möglichkeit, eine Abstimmung zwischen den angekündigten Softwaremaßnahmen und einer SCR-Nachrüstung. Damit kann eine weitergehende NO<sub>x</sub>-Reduzierung ermöglicht werden.
- Das Brennverfahren kann für einen optimierten SCR-Betrieb z.B. für die Aufheizphase angepasst werden.
- Eine optimierte Anpassung zwischen den Wechselwirkungen anderer NO<sub>x</sub> reduzierender Maßnahmen ist möglich. Beispielsweise können AGR-Strategie, Einspritzzeitpunkt und AdBlue-Zudosierung optimal miteinander abgestimmt werden.
- Modelle für die AdBlue-Dosierstrategie sind vorhanden und müssen gegebenenfalls „nur“ auf das jeweilige Fahrzeug adaptiert werden.
- Das Wissen für eine Abstimmung des nachträglich eingebauten SCR-Systems mit allen benachbarten Komponenten (DOC, u.U. Speicherkatalysator, Schalldämpfer) ist uneingeschränkt vorhanden.

Der große Vorteil des Fahrzeugherstellers ist, dass er uneingeschränkter Zugang zur Motor-/Fahrzeugsteuerung besitzt. Nur der Fahrzeughersteller hat Zugriff auf seine Modelle, welche beispielsweise eine Vorsteuerung der AdBlue-Dosierung ermöglichen.

Es ist davon auszugehen, dass Fahrzeughersteller auch für Fahrzeugtypen bereits vor EU6 Abgassysteme mit SCR-Katalysatoren entwickelt haben. Insbesondere dann, wenn diese Fahrzeuge im US-Markt angeboten werden, da dort bereits seit 2004 sehr niedrige NO<sub>x</sub>-Grenzwerte vorgegeben werden, Abb. 1.



Quelle: [http://www.poel-tec.com/diesel\\_abgaswerte/diesel\\_abgaswerte\\_3.php](http://www.poel-tec.com/diesel_abgaswerte/diesel_abgaswerte_3.php)

Abb. 1: Vergleich NOx-Grenzwerte von Dieselfahrzeugen EU/Japan/USA

Recherchen im Internet bestätigen anhand von Pressemitteilungen und Angeboten im US-Gebrauchtwagenmarkt, dass zumindest Derivate der betrachteten Fahrzeugmodelle bereits im Jahre 2011 für den amerikanischen Markt zugelassen wurden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Anlage 1.. Selbstverständlich kann man nicht davon ausgehen, dass sich das US-Abgassystem direkt auf europäische Fahrzeuge übertragen lässt. Möglicherweise halten sich jedoch die erforderlichen Modifikationen in Grenzen. Dies kann mit verträglichen Aufwand nur der jeweilige Fahrzeughersteller beurteilen. Zumindest sollten die Betriebsstrategien und Softwaremodelle verwendbar sein.

Ein weiterer Hinweis auf eine Verfügbarkeit erweiterter Abgasnachbehandlungssysteme liegt mit dem Angebot der Fahrzeughersteller einer Nachrüstung ab Werk vor. In nachfolgender

Tabelle 1, entnommen aus <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/diesel-hardware-nachrüstung-moeglich-vw-verneint-ministerium-will-nachrüstung-12641479.html>, werden für EU5 Fahrzeuge sogenannte Upgrades mit SCR bzw. NOx-Speicherkat angeboten.

Marke	Modelle	Bezeichnung	Beispielmodell	Aufpreis	System
Audi	A4, A8 3,0 TDI	Cleandiesel	A4 Avant 3.0 TDI (2011)	1.350 Euro	SCR
BMW	1er, 3er, 5er, 7er, X3 20d, 30d	Blue Performance	320d (2011)	1.190 Euro	NOx-Speicherkat
BMW	X5, X6 30d	Blue Performance	X6 30d (2011)	1.990 Euro	SCR
Mercedes	E, G, GLK, GL, M, R, S. 220 CDI, 250 CDI, 350 CDI	Bluetec	E 350 CDI (2011)	1.300 Euro	SCR
Volkswagen	CC, Passat, Tiguan 2.0 TDI Blue TDI		Passat 2.0 TDI (2009)	1.500 Euro	SCR

Quelle: ADAC

Tabelle 1: Nachrüstpakete für EU5 Fahrzeuge

Studie über Potenzial einer Hardwarenachrüstung



Dies kann als weiterer Beleg angesehen werden, dass für eine Hardware Nachrüstung zur NOx-Reduzierung bei den Fahrzeugherstellern entsprechende Abgasnachbehandlungssysteme vorhanden sein sollten.

Somit kann erwartet werden, dass bei den Fahrzeugherstellern zumindest ein Großteil der für eine Hardware-Nachrüstung erforderlichen Komponenten bereits entwickelt sind. Zudem muss mit hoher Sicherheit davon ausgegangen werden, dass der für eine SCR-Nachrüstung erforderliche Bauraum vorhanden ist. Dies kann aus den Fahrzeugen des US-Marktes und von der ADAC-Veröffentlichung abgeleitet werden. Somit ist davon auszugehen, dass durch die Fahrzeughersteller das größte Potenzial einer schnellen und soliden Hardware-Nachrüstung gegeben ist.

#### 4 Potenzial des Nachrüstmarktes

Eine Alternative für eine Nachrüstung durch die Fahrzeughersteller ist durch die Angebote aus dem Nachrüstmarkt gegeben. Diese sogenannten Nachrüster haben bereits mit mehrfachen Beispielen demonstriert, dass eine Nachrüstung zu einer erheblichen Verminderung der NOx-Emissionen führen kann. Ein anschauliches Beispiel ist die Stadt London, dort werden öffentliche Busse durch eine Nachrüstung bezüglich der NOx Emissionen auf EU6-Niveau reduziert. Den Nachrüstmarkt bedienen weltweit sehr viele Firmen. Da das Ziel dieser Studie eine Bewertung der Möglichkeit einer generellen Nachrüstung zur NOx-Reduzierung ist, wurden stellvertretend vier Firmen (TWINTEC-BAUMOT, Dr. Pley SCR Technology, HJS und Oberland Mangold) angesprochen, welche ihren Sitz in Deutschland haben. Diese Hersteller besitzen alle die erforderliche Kompetenz für eine Hardware-Nachrüstung. Die detailliertesten Informationen wurden bis jetzt von TWINTEC-BAUMOT zur Verfügung gestellt. Falls eine Nachrüstung aus diesen Markt erfolgen soll, macht es sicherlich Sinn, das Einholen von Informationen bzw. Angeboten auf weitere Anbieter zu erweitern.

Insgesamt gesehen bieten die Nachrüster autarke SCR-Systeme an. Damit ist gemeint, dass zusätzlich zu den Hardwarekomponenten eine Steuereinheit für die AdBlue-Dosierstrategie und eine OBD-Diagnose im Lieferumfang enthalten ist. Damit wird eine Unabhängigkeit vom Fahrzeughersteller geschaffen. Für die Erfüllung der OBD-Vorgaben ist auch eine Diagnoseschnittstelle vorhanden, welche ausgelesen werden kann. Allerdings ist dann in diesem Fall bei einer Abgasuntersuchung das Auslesen von zwei Diagnoseschnittstellen erforderlich.

Im Gegensatz zu einigen Nachrüstungen von Lkw und Bussen wird von allen Firmen vorgeschlagen, kein Abgas vor der Turbine des Abgasturboladers zu entnehmen. Damit ist dieser Risikofaktor für eine Nachrüstung nicht mehr vorhanden. Allerdings wird von einigen Nachrüsterfirmen Abgas nach oder am DOC für den Teilstrom des Ammoniakgenerators entnommen. Es gibt aber auch Nachrüstungen, welche sozusagen konventionelle Komponenten vergleichbar mit den Systemen der Fahrzeughersteller verwenden.

Viele der Nachrüster schalten dem eigentlichen SCR-Katalysator einen sogenannten Ammoniakgenerator vor. Dort wird der Harnstoff des AdBlue in Ammoniak gewandelt. Dieser Ammoniakgenerator ist auch elektrisch beheizbar (E-Kat), sodass ein frühes Anspringen der chemischen Reaktionen gegeben ist. Ein weiterer Vorteil dieser Heizung ist die Ausdehnung des Betriebsbereiches des SCR-Katalysators auf niedrige Temperaturen. In diesem Punkt ist hinsichtlich NOx-Reduzierung ein Vorteil gegenüber den Original-Systemen vorhanden.

Der Einsatz eines E-Kats erfordert jedoch eine elektrische Leistung bis zu 500 W, welche dem Bordnetz entnommen werden muss. Somit muss bei einer Nachrüstung mit diesem System die mögliche Belastbarkeit des Bordnetzes geprüft werden. Dies ist umso wichtiger, je stärker man den Vorteil eines Niedrigtemperaturbetriebes nutzen möchte. Denn bei tiefen Temperaturen ist davon auszugehen, dass die Heizung des Ammoniakgenerators kontinuierlich in Betrieb sein muss. Des Weiteren ist die Heizleistung für den AdBlue-Tank bei Temperaturen niedriger - 10 °C zu berücksichtigen.



Um das Bordnetz zu entlasten, bietet beispielsweise TWINTEC-BAUMOT ein zweites Batteriesystem an. Damit kann sicherlich das Problem der Bordnetzbelastung während der Warmlaufphase gelöst werden. Ein kontinuierlicher Heizbetrieb des E-Kats wird damit ohne Bordnetzbelastung jedoch nicht möglich sein. Hier könnte man j meiner Meinung nach Heizstrategien überlegen und erproben, welche durch intermittierenden Betrieb ein ausreichendes Temperaturniveau des SCR-Katalysators aufrechterhalten können, ohne dass das Bordnetz unzulässig beansprucht wird. Derartige Überlegungen müssen jedoch noch mit dem Nachrüster oder/und dem Fahrzeughersteller weiterentwickelt werden.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die für die Heizung des Ammoniakgenerators erforderliche elektrische Energie vom Motor erzeugt werden muss. Dieses wiederum führt zu einem Mehrverbrauch an Kraftstoff. Dieser Mehrverbrauch kann mit einem einfachen Beispiel abgeschätzt werden:

Angenommen wird ein Dieselmotor mit 6 l/100 km und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h. Damit wird für eine Fahrt von 100 km die Zeit von 1,66 Stunden benötigt. Die Bereitstellung der elektrischen Energie erfolgt mit einem Wirkungsgrad von 30 %. Ferner wird der maximal angegebene Leistungsbedarf für die Heizung mit 500 W angenommen.

Bei einem kontinuierlichen Betrieb der Heizung des Ammoniakgenerators bedeutet dies einen Mehrverbrauch von 4,7 %. Als absolute Größe betrachtet wird bei maximaler, kontinuierlicher Heizleistung zusätzlich 7,5 g CO<sub>2</sub> pro 100 km emittiert. Bei einer angenommenen Einschaltdauer der Heizung von 15 % wäre der CO<sub>2</sub>-Ausstoß dann 1,1 g pro 100 km.

Durch den Einbau zusätzlicher Komponenten in das Abgassystem erhöht sich der Gegendruck für den Motor. Dies ist ebenfalls eine Quelle für einen erhöhten Kraftstoffverbrauch - wenn auch im Vergleich zur E-Kat-Heizung moderat - und damit auch für eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Emission. Wesentlich maßgeblicher ist die Tatsache, dass durch den erhöhten Gegendruck der Ladungswechsel und damit die Verbrennung beeinflusst wird. In welcher Größenordnung dies der Fall ist, muss durch Versuche ermittelt werden. Zudem wird das Originalsteuergerät eine Veränderung im Abgassystem erkennen und darauf wie auch immer reagieren. Dies ist ein offener Punkt, der geklärt werden muss. Es gibt zwar den Vorschlag, den Drucksensor im Abgassystem dann so zu positionieren, dass er gleiche Druckverhältnisse wie vor der Nachrüstung vorfindet, oder dass die Druckverluste durch die Einbauten durch strömungsgünstigere d.h. größere Abgasrohre ausgeglichen werden. Aus meiner Sicht ist dies aber keine solide Lösung. Zumindest für diesen Fall wird der Fahrzeughersteller in die Nachrüstung mit einbezogen werden müssen. Insgesamt gesehen ist ein Einbeziehen der Fahrzeughersteller sehr empfehlenswert, auch wenn eine Nachrüstung auf Basis von Systemen des Nachrüstmarktes erfolgt. Aus den Gesprächen mit den Firmen des Nachrüstmarktes ging hervor, dass dieses sehr begrüßt werden würde.

Zusammenfassend kann der Schluss gezogen werden, dass eine Nachrüstung zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung auf Basis von Systemen des Nachrüstmarktes durchaus eine erfolgversprechende Lösung ist. Es wurden auch schon z.B. von TWINTEC-BAUMOT mögliche Lösungen für die infrage kommenden Fahrzeuge skizziert, wie aus nachfolgender Tabelle 2 hervorgeht.

Hersteller	Handelsname	Motorisierung	EURO	Original	BTG
VW	PASSAT 2,0 TDI	1968 ccm / 103 kW	4	DOC, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	VW EU6 (DOC, SDPF, SCR & AOC)+ B- NO <sub>x</sub> (NH <sub>3</sub> Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
VW	TIGUAN 2,0 TDI	1968 ccm / 103 kW	5	DOC, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	VW EU6 (DOC, SDPF, SCR & AOC)+ B- NO <sub>x</sub> (NH <sub>3</sub> Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)



VW	PASSAT 2,0 TDI	1968 ccm / 110 kW	6b	DOC, SDPF, SCR & AOC, Abgasklappe (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	B- NOx NH3 Generator in das System Adaptiert
BMW	3ER REIHE	1995 ccm / 177 kW	4	DOC, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
BMW	3ER REIHE	1995 ccm / 177 kW	5	DOC, DPF / LNT, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (LNT), (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
BMW	X3 XDRIVE 20D	1995 ccm / 177 kW	6b	LNT, DPF / DOC, (S)DPF, SCR & AOC (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (LNT), (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung) / B- NOx NH3 Generator in das System Adaptiert
DAIMLER	Mercedes E 220 CDI	2148 ccm / 125 kW	4	DOC, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
DAIMLER	Mercedes C 220 CDI	2143 ccm / 125 kW	5	DOC, DPF / DOC, (S)DPF, SCR & AOC (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung) / B- NOx NH3 Generator in das System Adaptiert
DAIMLER	Mercedes E 220 CDI	2143 ccm / 125 kW	6b	DOC, (S)DPF, SCR & AOC (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung) / B- NOx NH3 Generator in das System Adaptiert
RENAULT	Megane 1,5 dci	1461 ccm / 78 kW	4	DOC, DPF & Eolys (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
RENAULT	Megane 1,5 dci	1461 ccm / 81 kW	5	DOC, DPF & Eolys (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
RENAULT	Megane 1,5 Energy dci	1461 ccm / 81 kW	6b	DOC, SCR, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, SCR, DPF B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung) / B- NOx NH3 Generator in das System Adaptiert
DAIMLER	SPRINTER (N1)	2143 ccm / 120 kW	4	DOC, DPF (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung)
DAIMLER	SPRINTER(N1)	2143 ccm / 120 kW	5	DOC, DPF / DOC, (S)DPF, SCR & AOC (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung) / B- NOx NH3 Generator in das System adaptiert
DAIMLER	SPRINTER(N1)	2143 ccm / 120 kW	6b	DOC, (S)DPF, SCR & AOC (BJ abhängig, Info nicht vorhanden.)	DOC, (S)DPF, SCR & AOC B- NOx (NH3 Generator, Dosierung, Steuerung, Tank & Verrohrung) / B- NOx NH3 Generator in das System adaptiert

Tabelle 2: Skizze Systemkonfiguration für Umrüstung von TWINTEC-BAUMOT

Die Firmen des Nachrüstmarktes bieten den Aufbau eines Prototyp-Fahrzeuges einschließlich der erforderlichen Messungen an. Die prognostizierten Kosten bewegen sich dabei von 40.000-80.000 €. Die angegebenen Zahlen können aber nur als Richtwert dienen, da der gesamte Umfang und damit auch der Aufwand für eine Absicherung und insbesondere für eine robuste Applikation noch nicht bekannt sind. Somit sind mit höheren Kosten als hier angegeben zu rechnen. Im Preis ist auch nur eine



Funktionserprobung und eine Validierung der NO<sub>x</sub>-Reduktion enthalten. Es jedoch deutlich weiter gehende Untersuchungen erforderlich, siehe Kap. 5.

Auch wenn eine Hardware-Nachrüstung als erfolgsversprechend eingestuft wird, so gibt es doch eine Vielzahl offener Punkte, welche zu klären sind. Diese werden nachfolgend zusammengestellt.

## 5 Zusammenstellung zu beachtender Fragestellungen

Ein nachträglicher Einbau eines Abgasnachbehandlungssystems stellt einen signifikanten Eingriff für Motor und Fahrzeug dar. Nach einem Umbau soll der gleiche Zustand hinsichtlich Fahrverhalten, Betriebssicherheit, Wartungsintervalle, Lebensdauer und Zuverlässigkeit wie vor dem Umbau vorhanden sein. Um dieses Ziel zu erreichen, sind umfangreiche Aktivitäten auf dem Gebiet der Applikation und der Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebsverhaltens unter allen Randbedingungen durchzuführen. Bei der Entwicklung eines Fahrzeuges und Antriebstranges müssen eine Vielzahl von Simulationen und Versuchsstunden aufgewendet werden, bis eine Freigabe für eine Serienfertigung erreicht ist. Auch wenn Nachrüstfirmen ihre Kompetenz für eine Umrüstung bereits demonstriert haben, so ist doch eine Umrüstung von Serienfahrzeugen wegen der extrem hohen Anzahl an Fahrzeugen und sich den daraus ergebenden sehr unterschiedlichen Betriebsrandbedingungen eine bei weitem größere Herausforderung. Im Prinzip muss bei einer Umrüstung der gleiche Freigabeprozess wie für ein neu entwickeltes Fahrzeug durchlaufen werden. Dies gilt für eine Nachrüstung durch die Fahrzeughersteller oder durch Nachrüstfirmen gleichermaßen.

Im Folgenden werden Themengebiete aufgelistet, welche es bei Nachrüstmaßnahmen zu beachten gilt:

- Erreichbarkeit des NO<sub>x</sub>-Zielwertes unter allen Betriebsbedingungen; die NO<sub>x</sub>-Zielwerte sind allerdings noch festzulegen.
- Das Betriebsfenster, innerhalb dessen das Erreichen des NO<sub>x</sub>-Zielwertes sichergestellt wird, ist anzugeben. Hierbei sind Umgebungseinflüsse z. B. Außentemperatur, Fahrt in großer Höhe usw. zu berücksichtigen und die Strategie einer möglichen Reaktion auf Werte außerhalb des Betriebsfensters sind anzugeben.
- Einfluss auf die Emission anderer schädlicher Komponenten im Abgas (Kohlenwasserstoffe, Partikel, CO); außerdem sollte nachgewiesen werden, dass keine weiteren, schädliche Abgaskomponenten ausgestoßen werden, welche von den Grenzwerten noch nicht berücksichtigt werden.
- Bei Ausfall einer Komponente z. B. AdBlue-Dosierungseinheit, Beheizung E-Kat und AdBlue-Tank, SCR-Katalysator (Vergiftung) müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden.
- Die OBD- Diagnose muss denselben Umfang wie bei Fahrzeugen mit serienmäßigem SCR-Katalysator haben (z. B. Füllstandsüberwachung des AdBlue-Tankes, Alterung des SCR-Katalysators, Funktion E-Kat usw.).
- Es muss sichergestellt werden, dass die Motor-/Fahrzeugsteuerung nach der Umrüstung genauso zuverlässig arbeitet wie vorher. Hierzu sind umfangreiche Erprobungen erforderlich.
- Überprüfung der Wechselwirkungen mit bereits vorhandenen Abgasnachbehandlungssystemen z.B. Partikelfilter, NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator. Wie wird auf Regenerierungsphasen reagiert?
- Einhaltung eines Mindest-Sicherheitsstandards im Falle eines Unfalls; unter diesem Punkt sind insbesondere das Auslaufen von AdBlue und das Risiko einer Ausdunstung von Ammoniak, sowie ein Brandrisiko durch den E-Kat oder generell der Verkabelung zu sehen.
- Festigkeit der eingebauten Komponenten, Halterungen Verrohrung, Verkabelung und Steckverbindungen gegenüber Schwingungs- und Stoßanregungen; hier sind einerseits das Fahren auf einer schlechten Fahrbahnoberfläche aber auch Resonanzerscheinungen zu betrachten.
- Insbesondere die Elektrik (Steckverbindungen) muss gegenüber dem Eindringen von Flüssigkeiten z. B. Wasser gesichert sein.
- Es dürfen keine unangenehmen oder sogar unzulässige akustische Phänomene auftreten.



- Es muss beachtet werden, dass innerhalb eines Fahrzeugmodellstufen dennoch Varianten auftreten können. Dies könnte kleinere Anpassungen erfordern, stellt aber die grundsätzliche Verfügbarkeit von Bauraum nicht in Frage.

Diese Liste lässt sich sicherlich noch ergänzen. Man erkennt aber daraus deutlich, dass es nicht damit getan ist, ein SCR-System einzubauen und deren Wirksamkeit hinsichtlich einer NO<sub>x</sub>-Reduktion zu verifizieren. Um einen zuverlässigen Betrieb im Alltag sicherzustellen, sind umfangreiche Untersuchungen durchzuführen, welche sich wie oben dargestellt auf mannigfaltige Einflussfaktoren erstrecken. Selbstverständlich kann man noch festlegen, welcher Standard für die Erfüllung einer sogenannten Serientauglichkeit der Umrüstung anzusetzen ist. Aus meiner Sicht müssen jedoch alle Sicherheitsaspekte ausnahmslos erfüllt werden.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Evaluation möglicher Hardware-Nachrüstungen zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emission zeigt, dass eine Nachrüstung durch die Fahrzeughersteller eindeutig die beste und sicherste Lösung darstellt. Nur die Fahrzeughersteller selbst haben das gesamte Wissen über die Funktionsweise und den Wechselwirkungen zwischen der motorischen Verbrennung, den Komponenten der Abgasnachbehandlung bis hin zur Schalldämpfung. Aus meiner Sicht haben nur die Fahrzeughersteller die Chance, eine Nachrüstung ohne wesentliche Verschlechterung des Kraftstoffverbrauches darzustellen. Die NO<sub>x</sub>-Reduzierung durch den SCR-Katalysator könnte dahingehend genutzt werden, dass die Verbrennung mit stärkerem Fokus auf den Verbrauch appliziert wird. Allerdings würde dies einen hohen Applikationsaufwand bedeuten. Zudem beherrschen die Fahrzeughersteller den Prozess vom Konzept bis hin zur letztendlichen Serienfreigabe. Sie haben für den gesamten Prozess das Know-how und die Versuchsausrüstungen für eine Validierung zur Verfügung.

Wie bereits ausgeführt besteht die große Chance, dass Fahrzeughersteller auf bereits entwickelte Komponenten für einzelne Fahrzeugmodelle zurückgreifen können. Dennoch werden sich Anpassungsmaßnahmen nicht vermeiden lassen. Dies kann aber nur durch eine Diskussion mit den Fahrzeugherstellern geklärt werden.

Alternativ dazu kann man sich durchaus für Hardware-Nachrüstungen aus dem sogenannten Nachrüstmarkt bedienen. In diesem Markt sind weltweit viele Firmen zu finden, deren Kompetenz jedoch kritisch zu prüfen ist. Die für diese Studie betrachteten Anbieter werden meinerseits als vertrauenswürdig und für eine Nachrüstung kompetent genug eingeschätzt. Sie haben ja auch mit einigen Beispielen bereits bewiesen, dass sie eine wirksame Nachrüstung durchführen können. Die vorgeschlagenen Systeme sind in der Lage die gesetzten Ziele auch zu erreichen. Möglicherweise haben sie sogar auch Vorteile in Bezug auf eine Ausdehnung des Betriebsfensters des SCR-Katalysators hin zu niedrigen Temperaturen. Dieser Vorteil wird jedoch mit einem erhöhten Kraftstoffverbrauch bzw. CO<sub>2</sub>-Ausstoß erkauft werden müssen.

Für Lösungen aus dem Nachrüstmarkt ist eine genaue Spezifizierung des Freigabeprozesses zur Sicherstellung der Funktionsweise im Alltagsbetrieb erforderlich. Deshalb sollte als unmittelbar nächster Schritt eine FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) durchgeführt werden. Damit können in strukturierter Form alle auftretenden Risiken und deren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten zusammengestellt und bewertet werden. Das Ergebnis der FMEA kann dann als Basis für die Spezifizierung des Freigabeprozesses dienen. Diese Ergebnisse lassen sich natürlich auch auf Nachrüstungen durch die Fahrzeughersteller anwenden. Die Erstellung dieser FMEA kann beispielsweise durch die Gutachtergruppe erfolgen. Aber auch Teilnehmer aus Kreisen der Fahrzeughersteller und Nachrüstfirmen sind sicherlich sehr hilfreich.

Aus den Reihen der Firmen des Nachrüstmarktes wurden Kosten für eine Hardware-Nachrüstung gestaffelt nach Stückzahlen von 1000-3000 € genannt. Aus meiner Sicht sind diese Kosten etwas zu optimistisch geschätzt. Einschließlich der Kosten für die Einbauarbeiten werden sich wohl Kosten von ca. 3000 € ergeben. Dennoch kann daraus abgeleitet werden, dass aus Gesichtspunkten der Kosten

eine Hardware-Umrüstung durchaus umsetzbar ist. Eine Zusammenarbeit zwischen Nachrüstfirma und Fahrzeughersteller wäre ideal, im Falle, dass der Fahrzeughersteller nicht selbst eine Nachrüstung anbietet.

Nach heutigem Erkenntnisstand ist aus meiner Sicht eine Nachrüstung von EU5-Fahrzeugen mit verträglichem Aufwand möglich. Es muss dabei aber sehr sorgfältig vorgegangen werden, damit später keine vermeidbaren Risiken im Alltagsbetrieb auftreten. Dies bedeutet aber auch einen gewissen Aufwand für die Applikation und der Absicherung. Dies wiederum beeinflusst die Zeitspanne, welche für eine Einführung von Hardware-Nachrüstungen erforderlich ist.

Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie sind nachfolgend nochmals in Stichpunkten zusammengefasst:

- Der Bauraum für eine SCR-Nachrüstung ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vorhanden, da es entsprechende Fahrzeugmodelle im US-Markt gibt, welche mit SCR-Katalysatoren ausgerüstet sind. Zudem geht aus der ADAC-Veröffentlichung hervor, dass bereits für den lokalen Markt Fahrzeuge mit SCR-Katalysatoren angeboten werden.
- Ein Einbeziehen der Fahrzeughersteller bietet das größte Potential für eine Nachrüstung. Dabei kann die Nachrüstung durch den Fahrzeughersteller selbst oder in Zusammenarbeit mit einem Anbieter des Nachrüstmarktes erfolgen.
- Anbieter des Nachrüstmarktes haben autarke SCR-Nachrüstungen entwickelt. Damit wäre eine Hardware-Nachrüstung auch ohne Beitrag eines Fahrzeugherstellers durchführbar. Damit könnte sicherlich nicht die theoretisch optimalste Lösung erreicht werden, im Sinne einer Hardware-Nachrüstung wären die Lösungen des Nachrüstmarktes jedoch ebenfalls ausreichend.
- Aus jetzigen Abschätzungen geht hervor, dass sich der Kostenrahmen für eine Hardware-Nachrüstung in einer realisierbaren Größenordnung bewegt.

München, 08.01.2018



Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister



## 7 Anlage 1

Hinweise auf eine Verfügbarkeit der Fahrzeugmodelle im US-Markt

11.01.2011

**VW präsentiert auf der Detroit Auto Show (NAIAS), die dieser Tage startet, den neuen Passat. Er ist länger als der Vorgänger und nicht nur aufgrund der Abmessungen irgendwie US-amerikanisch. Kein Wunder, so ist dieser neue Passat erstmals nur für Nordamerika erdacht und gemacht worden.**

Unter der Haube werkeln drei Motoren. Den PS-Einstieg verschafft der 140 PS leistende 2.0 Clean TDI, der aufgrund seiner speziellen Abgasnachbehandlung für den US-Markt optimiert ist. Der notwendige Harnstoff-Tank ist immerhin 18,6 Liter groß und befindet sich im Dieseltank des Passat. Die Limousine soll rund 5,5 Liter auf 100 Kilometer benötigen.

<http://ww2.autoscout24.de/vorstellung/vw-passat-us-version/nicht-fuer-diese-welt/44275/203711/>

First Drive Review

### 2012 Volkswagen Tiguan TDI

America's Tiguan gets a nifty face lift, but not this sweetheart engine.

July 2011 By JUSTIN BERKOWITZ

We sampled the 2012 Tiguan with the powertrain American enthusiasts would say they want: the all-wheel-drive diesel with a six-speed manual. Underhood, this VeeDub features the corporate 2.0-liter turbo-diesel, good for 140 hp and 236 lb-ft of torque.

<https://www.caranddriver.com/reviews/2012-volkswagen-tiguan-tdi-first-drive-review>

### Used 2011 BMW 3 Series Diesel For Sale

<https://www.edmunds.com/bmw/3-series/2011/diesel/#edm-entry-vehicle-cards>

### Used 2011 Mercedes-Benz E-Class Diesel For Sale

<https://www.edmunds.com/mercedes-benz/e-class/2011/diesel/#edm-entry-vehicle-cards>

November 29 2015

### NEW RENAULT MEGANE

The new Megane will be available with six highly-efficient engines from launch - three ENERGY dCi diesels delivering 90, 110 or 130hp, and three TCE petrol units with outputs

<http://www.french-cars-in-america.com/2015/11/new-renault-megane.html>



## Used 2011 Mercedes-Benz Sprinter

---

### [Get AutoCheck Vehicle History](#)

Mileage 41,346  
Body Style Van  
Drive Type 2 wheel drive - rear  
Engine Information Unavailable  
Transmission Information Unavailable  
Fuel Diesel

Stock # Information Unavailable  
VIN WD3PE8CC0A549688  
7  
ATC Car ID AT-1B31AA03

<https://www.autotrader.com/cars-for-sale/vehicledetails.xhtml?listingId=456239619&referrer=%2Fcars-for-sale%2Fsearchresults.xhtml%3FstartYear%3D2011%26sortBy%3DderivedpriceDESC%26incremental%3Dall%26firstRecord%3D0%26endYear%3D2011%26modelCodeList%3DMBSPRINTER%26makeCodeList%3DMB&startYear=2011&numRecords=25&firstRecord=0&endYear=2011&modelCodeList=MBSPRINTER&makeCodeList=MB&makeCode1=MB&modelCode1=MBSPRINTER>