

1 EINLEITUNG

Im Auftrag der Plattform Saubere Luft werden in diesem Arbeitspapier zwei aktuelle Themen behandelt, welche die Luftschadstoff-Emissionen von Diesel-Pkw und -Lkw betreffen.

In Kapitel 2 werden die Möglichkeiten und die Sinnhaftigkeit der Nachrüstung von Abgasbehandlungssystemen diskutiert.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Möglichkeiten, manipulierte Fahrzeuge zu überprüfen, zusammengefasst.

2 NACHRÜSTUNG DIESEL-PKW

2.1 Die Euroklassen und ihre Grenzwerte – Entstehungsgeschichte

Entstehung der Schadstoffe

Bei einer vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffgemischen, wie dies bei Benzin und Diesel der Fall ist, würden als Endprodukte CO₂ und Wasserstoff entstehen. Doch die vollständige Verbrennung ist real bei keinem Verbrennungsvorgang erzielbar. Somit entstehen unerwünschte, für Mensch und Umwelt teils gefährliche Nebenprodukte, wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO_x), Partikel-Emissionen (PM), Schwefeldioxid (SO₂), um nur die wichtigsten, mittlerweile gesetzlich limitierten, Schadstoffe zu nennen.

Abgasvorschriften seit 1970

In Europa traten 1970 die ersten einheitlichen Abgasvorschriften für Pkw in Kraft. Geregelt wurde dies in der RL 70/220/EWG¹. Zunächst wurden nur die Schadstoffe HC, CO und Partikel limitiert, die NO_x-Emissionen wurden erst später beschränkt. Seit dem Jahr 1970 gab es unzählige Überarbeitungen dieser Richtlinie², doch im Wesentlichen galt diese Norm bis inkl. der Abgasstufe Euro 4. Die VO (EG) Nr. 715/2007³ löste die RL 70/220/EWG für die Abgasklassen Euro 5 & 6 ab. Der zugehörige Durchführungsrechtsakt VO (EG) Nr. 692/2008⁴ wird mit der im Jahr 2017 veröffentlichten WLTP⁵ Verordnung VO (EU) 2017/1151⁶ mit 01.01.2022 abgelöst.⁷

Folgende Verordnungen bzw. Richtlinien regeln grundsätzlich die Euro Abgasklassen:

- Euro 1: (EC 93): VO (EWG) 91/441 (nur Pkw) oder RL 93/59/EWG (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge);
- Euro 2 (EC 96): RL 94/12/EG oder RL 96/69/EG;
- Euro 3/4 (2000/2005): RL 98/69/EG, weitere Abänderungen in RL: 2002/80/EG;
- Euro 5/6 (2009/2014): VO (EG) Nr. 715/2007 und verschiedene Verordnungen nach dem Komitologieverfahren.

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1567165198471&uri=CELEX:31970L0220>

² Ein Überblick über die Änderungsrechtsakte ist unter Tabelle 1.1 zu finden:
https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2014_II_272/COO_2026_100_2_104998_6.pdf

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1567165291503&uri=CELEX:32007R0715>

⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1567165398775&uri=CELEX:32008R0692>

⁵ World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure

⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1567165468938&uri=CELEX:32017R1151>

⁷ keine NEFZ typgeprüften Fahrzeuge mehr im Umlauf

2.2 Typprüfzyklen NEFZ/WLTC

Bis September 2017 bzw. 2018 mussten die Fahrzeuge zur Erlangung der Typengenehmigung den „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) absolvieren. Dieser wurde seit dem Ende der 1960er-Jahre zur Überprüfung der Emissionen herangezogen. Im Wesentlichen blieben die Prüfbedingungen unter dem NEFZ über all die Jahre unverändert, außer dass mit der Einführung der Abgasklasse Euro 3 (Typengenehmigung ab dem Jahr 2000) kein „Aufwärmbonus“ mehr gewährt wurde. Nach dem Motorstart ist der Katalysator noch kalt und kann somit keine Schadstoffe umwandeln. Bis inklusive Euro 2 war es den Herstellern erlaubt, die Emissionen aus dem 40-sekündigen Kaltstart bzw. der Aufwärmphase abzuziehen. Mit der Einführung der Abgasklasse Euro 3 müssen die Emissionen aus dem Kaltstart hinzugezählt werden – was negative Auswirkungen auf das Emissionsverhalten der Fahrzeuge hat. Für diese Erschwerung wurde jedoch der Grenzwert von der Abgasnorm Euro 2 auf Euro 3 bei Benzinfahrzeugen wieder etwas angehoben.

**Zyklus seit
60er-Jahren**

Grundsätzlich war der NEFZ ein Rollenprüfstandtest, der insgesamt knapp 20 Minuten dauert. Dieser Test bildete kein reales Fahren ab, da das Fahren nach diesem Zyklus – von der abgefragten Maximalgeschwindigkeit, den Beschleunigungsvorgängen, der Durchschnittsgeschwindigkeit, den Stoppanteilen, dem Schaltverhalten bis hin zur unrealistischen Umgebungstemperatur – nichts mit dem realen Fahren auf der Straße zu tun hatte. Viele Bereiche an Motorleistung bzw. Lastzuständen im Motorkennfeld, wie dies bei stärkerer Beschleunigung oder bei einer Steigung vorkommt, wurden nicht erfasst. So wurde der Ruf nach einem realitätsnäheren Prüfprozess immer lauter. Unter dem Dach der Vereinten Nationen (UNECE) wurde seit 2009 an einem neuen weltweit (in vielen Regionen der Erde) einheitlichen Testzyklus zur Ermittlung realistischer Kraftstoffverbrauchs- und Emissionswerte von Pkw gearbeitet. Der „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle“ (WLTC) löste den bisher gültigen, bei Weitem weniger anspruchsvollen NEFZ-Zyklus seit September 2017 für Euro-6-Zertifizierungen in Europa ab.

**Rollenprüfstandtest
NEFZ**

Auch beim WLTC handelt es sich um einen Prüfstandtest, der nicht im realen Verkehrsgeschehen durchgeführt wird. Jedoch gibt es im Vergleich zum NEFZ wesentliche Unterschiede: Grundsätzlich sind der ganze Zyklus und die Prüfzeit länger (30 Minuten), die Maximal- bzw. Durchschnittsgeschwindigkeit höher, die Stoppzeiten reduziert und die Schaltpunkte eher fahrzeugspezifisch, wodurch letztendlich realistischere Verbrauchs- und Emissionswerte pro Fahrzeug vorliegen. Zusätzlich wird in der EU zum neuen Prüfzyklus ein weiteres Prüfkriterium eingeführt: Die Fahrzeuge müssen neben dem Test auf dem Rollprüfstand die Schadstoffgrenzwerte (jedoch nicht die Verbrauchswerte) auch unter annähernd realen Fahrbedingungen auf der Straße einhalten (RDE – real driving emissions). Hierbei müssen die Fahrzeuge allerdings nicht die auf der Rolle geltenden Grenzwerte einhalten, sondern dürfen diese am Beispiel von NO_x bis 2020 um den Faktor 2,1 überschreiten (nach 2020 um das 1,5-Fache). Bei den Partikel-Emissionen gibt es einen etwas strengeren Straßen-Grenzwert schon ab 2017 – Faktor 1,5. Stufenweise müssen die Fahrzeuge unter immer strenger werdenden Umgebungsbedingungen (niedrigere Temperaturen, unterschiedliche Seehöhe) die vorgeschriebenen Schadstoffgrenzwerte auf der Straße einhalten.

**neuer Prüfzyklus
WLTC**

Prüfkriterium RDE

2.3 Grenzwerte im Labor und auf der Straße

Pkw-Grenzwerte In den nachfolgenden beiden Tabellen sind die Grenzwerte für Pkw mit einer maximalen Bezugsmasse⁸ von bis zu 2.610 kg angeführt. Benzin- und Dieselfahrzeuge werden grundsätzlich getrennt geregelt. Für die Euroklassen 0 bis 6b (für Typgenehmigungen ab 09/2014) war der NEFZ der zugrundeliegende Prüfzyklus. Seit Herbst 2017, mit der Einführung von Euro 6d_temp⁹, ist der WLTC inkl. RDE-Test die Basis für Typgenehmigungen.

Dieselfahrzeuge haben etwas strikere Vorgaben bei den Kohlenstoffmonoxid-Emissionen, dürfen dafür aber mehr Stickstoffoxide emittieren. Benzinfahrzeuge müssen erst seit der Abgasklasse Euro 5 Partikel-Emissionsgrenzwerte (Masse) einhalten. Das Einhalten von Partikelanzahl-Grenzwerten ist bei Benzinfahrzeugen ab Euro 6 und bei Dieselfahrzeugen schon ab Euro 5 verpflichtend. Ab der Abgasklasse Euro 6d_temp müssen, wie schon erwähnt, die NO_x- und Partikelanzahl-Emissionen auch im Straßen-RDE-Test eingehalten werden. Am Beispiel von NO_x sind dies 168 mg/km ab 2017 für Euro 6d_temp und 120 mg/km ab 2020 für Euro 6d.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte für Diesel-Pkw (in mg/km bzw. PN (1/km); Quelle: Umweltbundesamt).

Abgasklasse	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6d_temp	Euro 6d
Testzyklus/Prüfverfahren	NEFZ				WLTC/RDE				
Typgenehmigung neue Fahrzeugtypen	1992/07	1996/01	2000/01	2005/01	2009/09	2011/09	2014/09	2017/09	2020/01
Typgenehmigung neue Fahrzeuge	1993/01	1997/01	2001/01	2006/01	2011/01	2013/01	2015/09	2019/09	2021/01
CO	2.720	1.000	640		500			500/–	
(HC + NO _x)	970	700/900*	560	300	230		170	170/–	
NO _x	–		500	250	180		80	80/168	80/120
PM	140	80/100*	50	25	5		4,5	4,5/–	
Partikelanzahl (PN)			–				6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹ /9 × 10 ¹¹	

* Direkteinspritzung

⁸ Bezugsmasse: Masse des fahrbereiten Fahrzeugs abzüglich der Pauschalmasse des Fahrers/der Fahrerin von 75 kg und zuzüglich einer Pauschalmasse von 100 kg

⁹ temp: temporär – als Übergang zu sehen von Euro 6c zu Euro 6d

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte für Benzin-Pkw (in mg/km bzw. PN (1/km); Quelle: Umweltbundesamt).

Abgasklasse	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 6b	Euro 6d_temp	Euro 6d
Testzyklus/Prüfverfahren	NEFZ				WLTC/RDE			
Typgenehmigung neue Fahrzeugtypen	1992/07	1996/01	2000/01	2005/01	2009/09	2014/09	2017/09	2020/01
Typgenehmigung neue Fahrzeuge	1993/01	1997/01	2001/01	2006/01	2011/01	2015/09	2019/09	2021/01
CO	2.720	2.200	2.300		1.000		1.000/–	
(HC + NO _x)	970	500			–		–/–	
HC (NMHC)	–		200	100	100 (68)		100 (68)/–	
NO _x	–		150	80	60		60/126	60/90
PM		–			5*	4,5*	4,5*/–	
Partikelanzahl (PN)			–			6 × 10 ^{11*}	6 × 10 ¹¹ */9 × 10 ^{11*}	

* für Ottomotoren mit Direkteinspritzung

2.4 Die Euroklassen und ihre erforderlichen Technologien

Für die Einhaltung der immer strenger werdenden Grenzwerte sind diverse Abgasnachbehandlungstechnologien notwendig.

2.4.1 Benzinfahrzeuge

Bei den Benzinfahrzeugen ermöglichte der Drei-Wege-Kat (G-Kat) schon vor der Einführung der Abgasstufe Euro 1 die Einhaltung der Grenzwerte. Die drei limitierten Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickstoffoxide (NO_x) werden bei Betriebstemperatur zu über 90 % in chemisch harmlose Stoffe, wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff, umgewandelt.

Drei-Wege-Kat

2.4.2 Dieselfahrzeuge

Beim Dieselmotor funktioniert die Abgasnachbehandlung für die Schadstoffe HC, CO und NO_x anders. Ein Drei-Wege-Katalysator kann hier nicht verwendet werden, da der Dieselmotor ständig mit Luftüberschuss arbeitet. Das heißt, HC und CO reagieren nicht mit dem Sauerstoff aus der NO_x-Reduktion, sondern oxidieren mit Sauerstoff aus dem Luftüberschuss zu CO₂ und H₂O. Die Stickstoffoxide werden nicht abgebaut. Man spricht daher auch vom Oxi-Kat, da nur die beiden Oxidationsreaktionen durchgeführt werden. Im realen Betrieb sind die HC- und CO-Emissionen kein Problem mehr. Zur Reduktion der Stickstoffoxide stehen mehrere technische Lösungen zur Verfügung, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

Oxi-Kat

2.4.2.1 Abgasrückführung

Die Abgasrückführung (AGR) ist eine Methode, die zumindest bis zur Euroklasse 5 ausreichte um die NO_x-Grenzwerte bei der Typprüfung einzuhalten. Hierbei werden der angesaugten „Reinluft“ Abgase hinzugemischt. Der Sauerstoffgehalt im Brennraum wird reduziert – es wird weniger Kraftstoff eingespritzt. Somit sinken der Heizwert des Gemisches und auch die Reaktionsgeschwindigkeit bzw. die Verbrennungstemperatur. Durch das Absenken der Verbrennungstemperatur entsteht ein großer Teil der Stickstoffoxide erst gar nicht.

2.4.2.2 Speicherkat

Funktionsweise Der Speicherkat (LNT¹⁰) eignet sich vorwiegend für die Erfüllung der Euro 6-Grenzwerte leichter bis mittelschwerer Kraftfahrzeuge. Dieser funktioniert von der Idee her ähnlich wie ein Partikelfilter. Die Stickstoffoxide werden im Katalysator gespeichert, bis ein gewisser Füllstand erreicht ist. Dann muss der Kat mit einem fetten Gemisch durch Kraftstoff-Nacheinspritzung gereinigt werden (Einstellung von Luftmangel, diskontinuierliche Arbeitsweise). Temperatur- und Drucksensoren erkennen den Regenerationsbedarf. Der Katalysator ist mit Alkali- oder Erdalkalikomponenten beschichtet, welche die chemischen Reaktionen begünstigen. Im Auslieferungszustand beträgt die Konvertierungsrate ca. 90 %, allerdings ist die thermisch bedingte Alterung nicht zu vernachlässigen. Bereits nach 20.000 km kann die Konvertierungsrate auf ca. 40–60 % sinken.

Mehrverbrauch Ein weiterer Nachteil ist der Mehrverbrauch bei der Regeneration durch die Nacheinspritzung und eine Erhöhung der Partikelbildung. Aufgrund dieser Nachteile setzen Hersteller nur bedingt auf diese Technologie.

2.4.2.3 Selektive katalytische Reduktion

Um die Grenzwerte der Abgasklasse Euro 6 bzw. die RDE-Grenzwerte für die Straßentests ab Euro 6d_{temp} (ab September 2017) einzuhalten, gibt es die Möglichkeit, eine selektive katalytische Reduktion mittels SCR¹¹-Kat durchzuführen. Dieses System wird in Kombination mit einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator für HC und CO sowie einem Partikelfilter verbaut – da sich ein Partikelproblem bei der Verbrennung im Brennraum ergibt (siehe nächstes Kapitel).

AdBlue Bei größeren Motoren kommen vorwiegend SCR-Katalysatoren zum Einsatz, in denen eine Harnstofflösung (AdBlue) eingespritzt wird. Im Gegensatz zum NO_x-Speicherkatalysator arbeitet das SCR-System kontinuierlich. Die Stickstoffoxide reagieren mit dem Harnstoff, genauer mit Ammoniak (NH₃), und werden dadurch neutralisiert. Die Menge des eingespritzten Harnstoffs ist von den Stickstoffoxid-Emissionen und damit von der Drehzahl und dem Drehmoment abhängig. Der Verbrauch an Harnstoff-Wasser-Lösung beträgt zwischen 0,5 % und 5 % der eingesetzten Dieselmenge.

¹⁰ Lean NO_x Trap

¹¹ Selective Catalytic Reduction

Für die Hersteller stellt der SCR-Katalysator eine ingenieurtechnische Herausforderung dar. Es werden ein zusätzlicher Tank sowie Leitungen benötigt. Für die gezielte und optimale Steuerung der AdBlue-Einspritzung bedarf es zusätzlich noch aufwendiger Elektronik (Temperatur-, Druck- und Abgas-Sensoren). Neben den zusätzlichen Kosten in der Herstellung ist auch das Nachfüllen von AdBlue problematisch. Erst wenige Euro 6-Modelle besitzen einen von außen leicht zugänglichen Einfüllstutzen, bei vielen Modellen ist der AdBlue-Tank beispielsweise unter dem Kofferraum verbaut. Ein Nachfüllen ist somit oft nur in einer Vertragswerkstätte möglich. All dies führt auch zu Mehrkosten für die AutobesitzerInnen.

Herausforderungen

Die Umgebungstemperatur ist bei zwei Punkten von Bedeutung: Zum einen hat AdBlue einen Gefrierpunkt von rund -11 °C; ein Einfrieren gilt es zu verhindern. Auch wird die Effektivität des SCR-Systems durch die Umgebungstemperatur bestimmt – diese beeinflusst die chemische Zersetzung des Reduktionsmittels und die eigentliche katalytische Reaktion. Um ein einwandfreies Funktionieren zu gewährleisten ist es notwendig, die Abgastemperatur anzuheben. Dies kann durch geeignete Platzierung in Motornähe oder auch eine (elektrische) Beheizung des Katalysators geschehen. Somit kann das Aktivitätsfenster zu niedrigen Temperaturen hin verschoben werden.

Einfluss der Temperatur

2.4.2.4 Emittieren moderne Diesel-Pkw weniger NO_x-Emissionen?

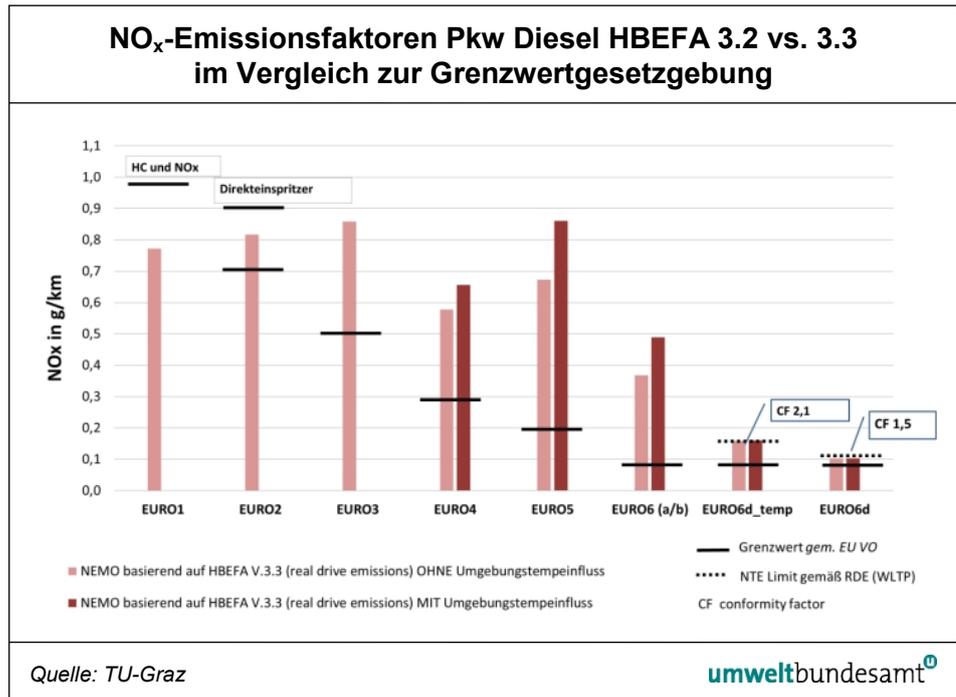
Die HBEFA-Gruppe¹² beschäftigt sich seit den 1980er-Jahren mit der Fragestellung, wie viel Fahrzeuge abseits des Prüfzyklus emittieren. Diese Messergebnisse basieren auf realitätsnäheren, dynamischeren Fahrzyklen – teilweise auch schon auf Messergebnissen, die im realen Straßenverkehr durchgeführt wurden (RDE).

Untersuchungen der HBEFA-Gruppe

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis jahrzehntelanger Messungen der HBEFA-Gruppe. Zu sehen sind die Grenzwerte pro Euroklasse per Verordnung (waagrechte schwarze Linie) und die durchschnittlichen realen Emissionsfaktoren.

¹² Eine Gruppe von unabhängigen Messlabors der Länder Deutschland, Österreich, Schweiz und weiteren unterstützenden Ländern. HBEFA: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs

Abbildung 1:
NO_x-Emissionsfaktoren
von Diesel-Pkw,
verglichen mit
Grenzwerten
entsprechend der
Typprüfung.



**Einfluss der
Umgebungs-
temperatur**

Die aktuelle HBEFA-Version (3.3) berücksichtigt erstmals, dass die NO_x-Emissionen eines betriebswarmen Motors eine Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur aufweisen. In der Vergangenheit wurde davon ausgegangen, dass ein betriebswarmer Motor unabhängig von der Außentemperatur die gleichen Emissionen aufweist. Daher wurden die Emissionsfaktoren für den betriebswarmen Motor immer standardmäßig zwischen 20 °C und 25 °C gemessen. Eine Temperaturabhängigkeit wurde in den älteren HBEFA-Versionen nur für einen kalten Motor berücksichtigt (Kaltstartzuschlag). HBEFA 3.3 beinhaltet einen für Österreich repräsentativen, durchschnittlichen Emissionszuschlag für den Einfluss der Umgebungstemperatur pro Euroklasse.

**Euro 5-Emissionen
am höchsten**

Aus Abbildung 1 ist klar ersichtlich, dass – speziell unter Beachtung der Umgebungstemperatureinflüsse – die spezifischen Emissionen bis zur Euroklasse 6 trotz deutlicher Grenzwertabsenkung noch nicht ausreichend abgenommen haben. Bei den Euroklassen 1 und 2 gab es noch keinen eigenen Grenzwert für NO_x, sondern nur für HC und NO_x in Kombination. Dieser war so hoch angesetzt, dass er auch eingehalten wurde. Ab der Euroklasse 3 gab es einen eigenen Grenzwert für NO_x, die Divergenz lag jedoch bei rund 70 %. Bei Euro 5 Pkw beträgt die Abweichung das 2,5-Fache vom erlaubten Grenzwert (850 mg), bei den Euro 6 Pkw das 3,6-Fache (480 mg). Euro 5 Fahrzeuge zeigen im Realbetrieb die höchsten NO_x-Emissionen aller Dieselfahrzeuge. Zusätzlich wiesen die neueren Diesel-Pkw einen höheren NO₂-Anteil im Abgas auf, was das Problem der NO₂-Immissionen zusätzlich verschärft (UMWELTBUNDESAMT 2019).

2.5 Hardwarenachrüstungen – Sinnhaftigkeit/Effekte/Probleme

Wie die Messergebnisse der HBEFA-Gruppe zeigen, haben die spezifischen Emissionen trotz ständig verschärfter Abgasstandards bei den Diesel-Pkw bis inkl. Euro 5 real noch nicht abgenommen. Dies ist der Grund, warum die NO₂-Belastung langsamer als angenommen in den letzten Jahren abgenommen hat oder überhaupt gleichgeblieben ist. Viele österreichische (z. B. Wien, Linz und Graz) und deutsche Städte (Stuttgart, Berlin, Köln etc.) sowie Regionen (z. B. das Inntal) kämpfen mit der Einhaltung der NO₂-Grenzwerte.

NO₂-Belastung in Städten weiterhin hoch

Die jüngste politische Debatte bezüglich Reduktionsmaßnahmen erfolgte Ende September 2018 in Deutschland. Beim sogenannten Diesel-Gipfeltreffen sprach sich Bundeskanzlerin Merkel mit Nachdruck dafür aus, nachträglich bei Euro 5 Diesel-Pkw entsprechende Hardware nachzurüsten, um die spezifischen NO_x- und demnach NO₂-Emissionen beim Einzelfahrzeug zu reduzieren. Durch diese Maßnahme sollen allgemeine Fahrverbote in belasteten Städten für rund 1,3 Mio. Euro 5 Diesel-Pkw verhindert werden. Finanzieren sollen dies die Fahrzeughersteller, die jedoch den Einbau verweigern, da sie Haftungsprobleme fürchten, wenn durch die Umrüstung Nachteile (z. B. Mehrverbrauch) für die FahrzeughalterInnen entstehen.

Hardware-nachrüstung

Im Folgenden findet eine allgemeine Bewertung möglicher Eingriffe im Sinne einer Nachrüstung in das Abgasrückführungssystem und die Nachrüstungen von Speicherkatalysatoren und SCR-Kat statt.

2.5.1 Modifikation am AGR-System

2.5.1.1 Software

Eine Änderung am AGR-System kann durch ein Update der Software durchgeführt werden. Die Modifikationen zielen darauf ab, durch Änderungen in weiten Teilen des Motorkennfeldes und unter vielen Umgebungsbedingungen (insbesondere niedrigeren Außentemperaturen) deutlich geringere NO_x-Schadstoffemissionen zu erreichen. Sinnvollerweise sind Software-Updates vom Hersteller durchzuführen.

Dem Umweltbundesamt Deutschland liegen Auswertungen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) vor, die zeigen, dass die Software-Updates an den im Rahmen des angeordneten Rückrufes (für Volkswagen) nachgebesserten Fahrzeugen (rund 2,3 Mio. Pkw) zu einer NO_x-Emissionsminderung in der Größenordnung von 2–45 % geführt haben. Das über die Fahrzeuganzahl gewichtete Mittel der NO_x-Minderungen lag bei rund 25 %. Die NO_x-Minderungen wurden auf Basis des NEFZ ermittelt, allerdings bei veränderten Rahmenbedingungen (z. B. kalt/warm) und neben Messungen auf dem Rollenprüfstand auch mit Hilfe von PEMS-Messungen¹³. Damit wurden die Reduktionspotenziale nicht RDE-konform ermittelt, geben aber eine erste Orientierung zu den möglichen NO_x-Minderungen durch Software-Updates.

Emissionsminderung

¹³ Portable Emissions Measurement System/mobile Emissionsmessgeräte

2.5.1.2 Hardware

Korrosion und Verblockung

Das AGR-System ist temperatursensibel. Bei geringen Umgebungstemperaturen besteht das Problem, dass Kondensation von Wasser und Verbrennungsprodukten im AGR-Kühler zu Korrosion und Verblockung führen kann. Dadurch ist die Effektivität des Systems stark herabgesetzt.

großer Aufwand

Aufbauend auf der Analyse der Ablagerungsbildung wurden die Komponenten weiterentwickelt, um diese bei niedrigen Temperaturen robuster zu machen. Mittlerweile gibt es verbesserte AGR-Ventile. Ein Eingriff in das AGR-System bedeutet aber einen Eingriff in den Verbrennungsablauf. Somit würden umfangreiche Maßnahmen (durch den Hersteller) notwendig sein, um einen reibungslosen Verbrennungsablauf sicherzustellen. Da der Aufwand dafür sehr groß ist, sind hardwareseitige Änderungen am AGR-System nicht empfehlenswert.

2.5.2 Nachrüstung NO_x-Speicherkat

technische Schwierigkeiten

Der Vorteil dieses Katalysators ist, dass kein zusätzlicher Tank bzw. kein zusätzliches Tanksystem (AdBlue) eingebaut werden muss. Der Nachteil ist, wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, dass der Motor für die Regeneration des Katalysators für einige Sekunden unter Luftmangel betrieben werden muss. Diese „Fettphase“ ist derart in die Betriebsstrategie integriert, dass eine Nachrüstung eine rein theoretische Maßnahme darstellt – und wenn, dann nur vom Hersteller selbst durchführbar ist. Zudem wäre kein stabiler Motorbetrieb gewährleistet – viele Komplikationen könnten dadurch auftreten. Eine Nachrüstung würde einen erheblichen Aufwand bedeuten, welcher in keinem Verhältnis zum erwarteten Nutzen besteht. Denkbar wäre es, einen bestehenden Katalysator durch einen leistungsfähigeren auszutauschen.

2.5.3 Nachrüstung SCR

AdBlue-Dosierung

Laut ExpertInnenmeinungen kann ein SCR-Katalysator grundsätzlich verbaut werden. Die entscheidende Frage ist jedoch der damit verbundene Aufwand.

Die Herausforderung beim SCR-Katalysator liegt bei der Zudosierung der Harnstofflösung. AdBlue soll gleichmäßig im Abgasstrom verteilt werden, und die Menge muss so dosiert sein, dass eine vollständige Umsetzung von NO und NO₂ möglich ist. Eine Überdosierung soll ebenfalls nicht stattfinden. Dafür braucht es eine exakte Messung des Abgasmassenstroms und die Kommunikation mit der Steuerung. Neben dem SCR-Kat an sich ist auch noch der Einbau eines AdBlue-Tanks notwendig. Dieser muss für die FahrzeugbenutzerInnen gut zugänglich sein. Da AdBlue bei -11 °C gefriert, ist auch die Beheizung des Tanks erforderlich.

SCR-Einbau möglich

Grundsätzlich wird der nachträgliche Einbau von SCR-Katalysatoren bei einigen Fahrzeugmodellen möglich sein, da Fahrzeughersteller auch für Fahrzeugtypen vor Euro 6 Abgassysteme mit SCR-Katalysatoren entwickelt haben – vor allem dann, wenn diese Fahrzeuge am amerikanischen Markt angeboten wurden. Schon seit 2004 gelten in den USA sehr strenge Grenzwert (Tier 2; Bin 5: 43 mg/km NO_x).

Die grundsätzlichen Hürden bei einem nachträglichen Einbau sind, dass der Katalysator aus thermischen Gründen motornah und im vorderen Bereich des Fahrzeuges eingebaut werden sollte, der AdBlue-Tank in den meisten Fällen jedoch nur im Kofferraum (Reserveradmulde) Platz haben wird. Motornah ist allerdings oft kein Platz mehr, da hier schon Oxikat und Partikelfilter zu finden sind. Vor allem bei Kleinwagen sowie bei Fahrzeugen mit Hinterradantrieb wird laut ExpertInnen der nachträgliche Einbau schwierig. Das ganze SCR-System muss in die Fahrzeugelektronik eingebunden werden – alle Systeme müssen aus dem Bordnetz versorgt werden. Dazu müssen Leitungen durch das ganze Fahrzeug verlegt werden.

2.5.3.1 Nachträglicher Einbau durch den Fahrzeughersteller

Der Einbau des SCR-Katalysators durch den Hersteller stellt die beste Variante dar, da so das gesamte NO_x-Reduktionspotenzial am besten genutzt werden kann. Gleichzeitig gibt es auch in anderen Bereichen, wie Fahrverhalten, Leistungsverlust, Verbrauch und Betriebssicherheit, am wenigsten Einbußen. Der Hersteller hat sämtliche Daten für den Einbau und die Implementierung zur Verfügung:

- Der Hersteller verfügt über das Wissen für eine nachträgliche Abstimmung mit anderen Komponenten, wie Oxikat, Schalldämpfer.
- Der Hersteller kann die Wechselwirkung mit anderen NO_x-mindernden Maßnahmen optimieren, wie z. B. AGR-Strategie, Einspritzzeitpunkt, AdBlue-Zudosierung, Brennverfahren.
- Der Hersteller hat Modelle für die AdBlue-Dosierstrategie und muss diese gegebenenfalls „nur“ noch auf das Einzelfahrzeug abstimmen.
- Zusätzlich können mit Software-Updates weitere Verbesserungen erzielt werden.

Vorteile für den Hersteller

Der wichtigste Vorteil des Herstellers ist, dass er für alle Fahrzeugmodelle und Fahrzeugtypen die notwendigen Informationen zur Platzverfügbarkeit und uneingeschränkten Zugriff zur Motorsteuerung hat. Es kann erwartet werden, dass bei den Fahrzeugherstellern zumindest ein Großteil der erforderlichen Komponenten bereits entwickelt ist.

Auf der ADAC-Website¹⁴ werden die Modelle verschiedener Hersteller angeführt, für die Nachrüstungen (zumindest in Deutschland) angeboten werden.

Laut Aussagen der Hersteller belaufen sich bei diesen Fahrzeugmodellen die Nachrüstkosten auf bis zu 2.000 Euro. Hier ist anzunehmen, dass der nachträgliche Einbau keine komplexen Umbauarbeiten verursachen wird. Sobald motornah kein Platz mehr ist und sich dieses Problem bei jedem Modell „etwas anders“ wiederholt, wird es teuer. Hier ist mit Kosten von mindestens 3.000 Euro zu rechnen (TU Graz).

Kosten der Nachrüstung

¹⁴ <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/abgas-diesel-fahrverbote/fahrverbote/hardware-nachruestungen/>

2.5.3.2 Nachträglicher Einbau durch Nachrüstmarkt

Die zweite Möglichkeit ist die Nachrüstung am freien Nachrüstmarkt. Hier gibt es mittlerweile viele Firmen, die angeben, die spezifischen Emissionen auf Euro 6 Niveau reduzieren zu können, wie z. B. die Firmen TWINTEC-BAUMOT, Dr. Pley SCR Technology, HJS oder Amminex.

Diese Nachrüsterfirmen bieten im Grunde autarke SCR-Systeme an. Dazu zählen Hardwarekomponenten, eine Steuereinheit für die AdBlue-Dosierstrategie und eine OBD¹⁵. Für die OBD wird auch eine Diagnoseschnittstelle benötigt.

Ammoniakgenerator von Twintec für ein Funktionieren schon bei niedrigeren Temperaturen (BNOx-System)

Erwähnenswert ist hier das System von Twintec bzw. Baumot¹⁶. Twintec verbaut z. B. vor dem SCR-Kat einen Ammoniakgenerator, der den Harnstoff des AdBlue in Ammoniak umwandelt. Da dieser elektrisch beheizbar ist, ist ein relativ frühes Anspringen der chemischen Reaktion möglich. Somit kann der Betriebsbereich des SCR auch auf niedrige Temperaturen ausgedehnt werden. Allerdings erfordert der E-Kat eine elektrische Leistung, welche nicht zwingend mit jedem Bordnetz kompatibel sein muss (das kann durch ein zweites Batteriesystem gelöst werden). Ebenso muss die Heizleistung für den AdBlue-Tank berücksichtigt werden. Die Beheizung des Ammoniakgenerators erfordert Energie, die vom Motor erzeugt werden muss, was zu einem Mehrverbrauch führt (3–5 % nach Angaben von Twintec).

Mehrverbrauch

Durch den Einbau zusätzlicher Komponenten in das Abgassystem erhöht sich auch der Gegendruck für den Motor – auch das wird zu einem Mehrverbrauch führen.

Euro 6d Grenzwerte eingehalten

Laut Angaben von Twintec soll das System 99 % der Stickstoffoxide auf dem Prüfstand und 94 % unter realen Bedingungen auf der Straße reduzieren. Sowohl die deutsche Umwelthilfe (DUH), als auch der ADAC bestätigen, dass mit den Twintec-Systemen die Euro 6d Grenzwerte sowohl am Prüfstand als auch auf der Straße eingehalten werden können. Die exakte RDE-Konformität kann hier allerdings nicht bestätigt werden.

Kosten der Nachrüstung

Laut Angaben von Twintec liegen die Kosten für einen nachträglichen Einbau (Material und Einbau) bei rund 2.000–2.500 Euro.

Busflotte London

Erprobt wird das System bereits mit umgerüsteten Busflotten. London hat im Jahr 2017 einen Auftrag für die Umrüstung von 5.800 Omnibussen bis 2019 an Baumot erteilt.

Ergebnisse ADAC (Twintec und weitere Nachrüster)

Der ADAC hat vier Diesel Euro-5 Fahrzeuge vor und nach der Hardware-Nachrüstung vermessen. Erhoben wurden der WLTC kalt, der WLTC warm bei 23 °C sowie RDE-Messungen im Straßenverkehr bei 15 °C. Abbildung 2 zeigt die NO_x-Emissionen vor der Nachrüstung.

¹⁵ On-Board-Diagnose, ein Fahrzeugdiagnosesystem

¹⁶ <https://baumot.de/>

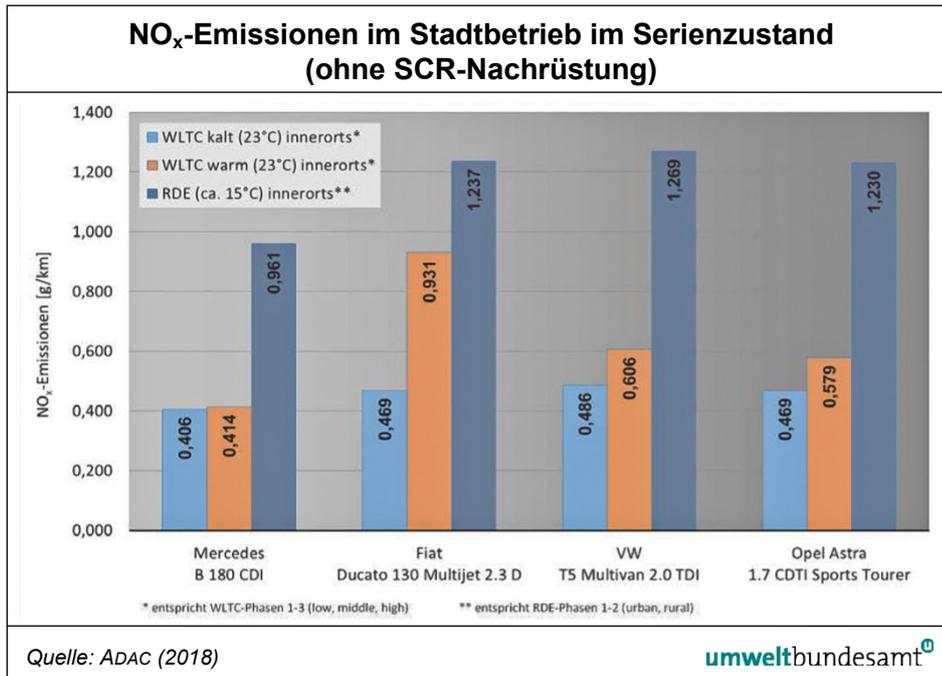


Abbildung 2:
NO_x-Emissionen innerorts (WLTC-Phasen 1–3 und RDE) im Serienzustand.

Die Messungen vor der Umrüstung zeigen, dass die NO_x-Emissionen innerorts mit 400 mg (WLTC kalt und warm) bis 1.269 mg (RDE) sehr hoch sind. Die Real-Emissionen liegen bei rund 15 °C Außentemperatur deutlich über den Prüfstandswerten. Auch zeigt die Abbildung, dass der Unterschied zwischen WLTC kalt und WLTC warm nicht zu vernachlässigen ist. Sobald die Prüfbedingungen von den Typprüfbedingungen abweichen, führt dies zu einem Anstieg der Emissionen, da die Fahrzeuge dafür nicht konditioniert wurden.

Ergebnis der Messungen

Diese vier Fahrzeuge wurden von unterschiedlichen Firmen nachgerüstet. Abbildung 3 zeigt die Minderungsraten verschiedener Nachrüstsysteme für diese Fahrzeuge innerorts und außerorts beim Kaltstart, Abbildung 4 im betriebswarmen Zustand.

Abbildung 3:
NO_x-Minderungsrate
durch verschiedene
Nachrüstsysteme im
kalten Betriebszustand.

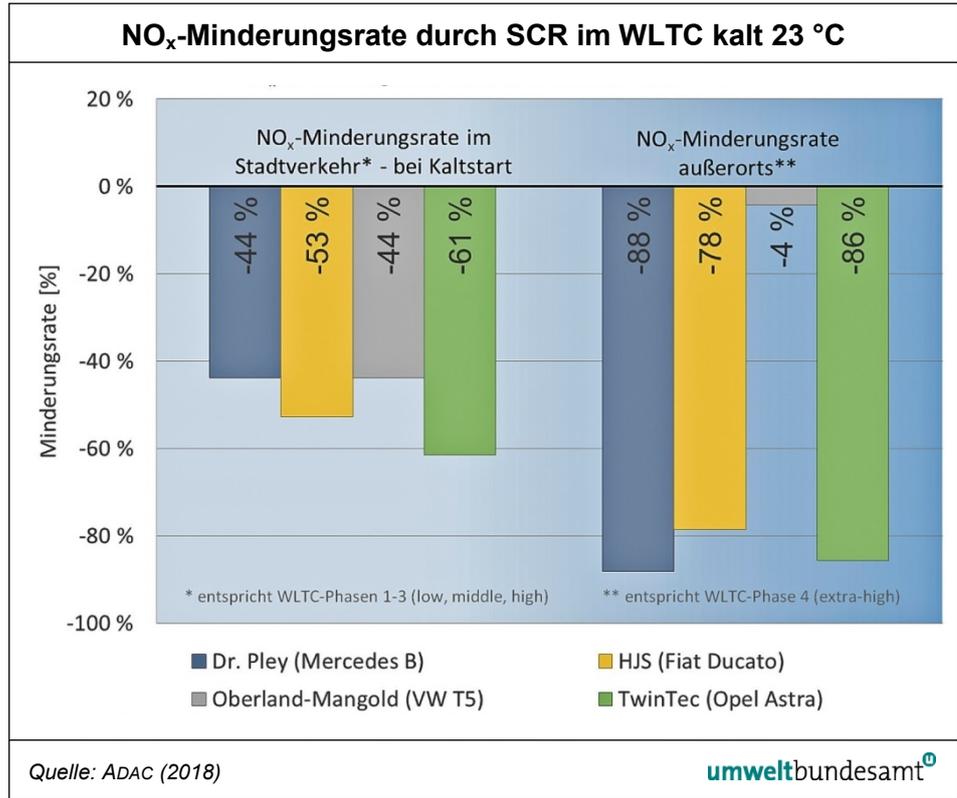
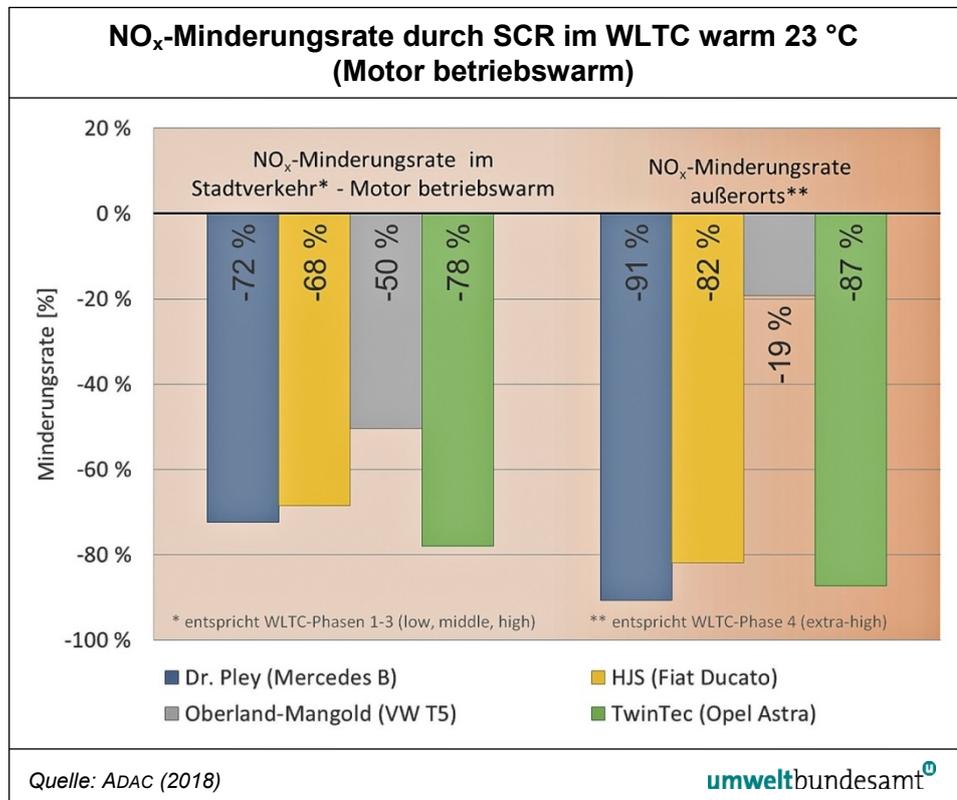


Abbildung 4:
NO_x-Minderungsrate
durch verschiedene
Nachrüstsysteme im
warmen
Betriebszustand.



Die Ergebnisse der untersuchten Fahrzeuge zeigen, dass das Reduktionspotenzial innerorts durch die Nachrüstung im WLTC kalt¹⁷ zwischen 44 % und 61 % (Twintec) liegt. Es wird somit ersichtlich, dass SCR-Systeme nach dem Kaltstart noch nicht ihre volle Leistungsfähigkeit besitzen, da der SCR-Kat eine Mindestabgastemperatur von 120–240 °C braucht (je nach Technologie). Anders verhält es sich außerorts – hier ist das Reduktionspotenzial größer, da die Betriebstemperatur schneller erreicht wird.

Wirksamkeit der Systeme

Betriebswarm¹⁸ (siehe Abbildung 4) sind grundsätzlich höhere Reduktionsraten gegeben da die Mindestabgastemperatur erreicht ist. Diese können innerorts auf ca. 70 % und außerorts auf beinahe 90 % steigen.

Abbildung 5 zeigt eine Gegenüberstellung zwischen Ergebnissen/Reduktionspotenzial der Nachrüstung und durchschnittlichen Emissionsfaktoren für Diesel Pkw Euro 5 lt. HBEFA 3.3 für Deutschland (906 mg/km).

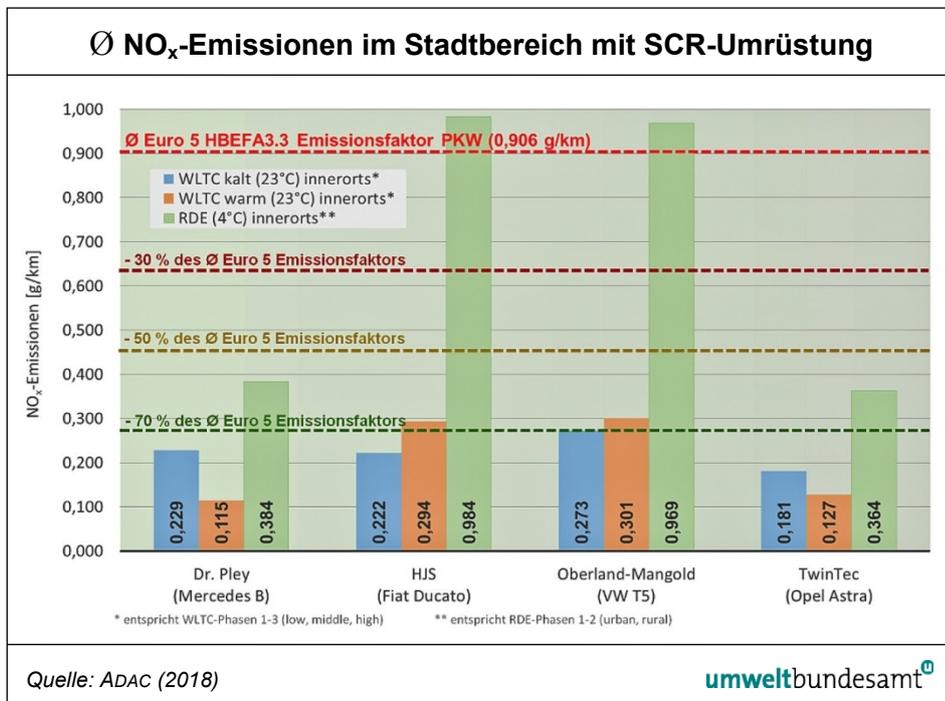


Abbildung 5: NO_x-Emissionen im Stadtbetrieb mit SCR-Nachrüstung.

Mittels Nachrüstung ist es demnach möglich, die spezifischen NO_x-Emissionen von bis zu 1.300 mg (VW, worst-case RDE) um 70 % und mehr zu reduzieren, wenn

1. die Außentemperaturen ideal sind (zwischen 20 °C und 27 °C).
2. der Motor betriebswarm ist, da dann mit einer entsprechend hohen Abgastemperatur die Abgasnachbehandlungssysteme im Betriebsoptimum sind.
3. das Fahrzeug außerorts unterwegs ist, da dann Punkt 2 gegeben ist, idealerweise unter den Bedingungen gemäß Punkt 1.

Reduktionsbedingungen

¹⁷ Diese Emissionen werden vor allem von Auspendlern/-pendlerinnen, Stadtfahrern/-fahrerinnen und abends wieder ausfahrenden Einpendlern/-pendlerinnen verursacht.

¹⁸ Dies sind vor allem FahrerInnen aus dem Umland die dann innerorts unterwegs sind.

Die Fahrzeuge der Abgasklasse Euro 5 sind generell nicht auf den WLTC ausgelegt. Die ADAC-Messungen legen nahe, dass sowohl der Euro 5 Grenzwert von 180 mg/km als auch der Euro 6d Grenzwert (80 mg/km) trotz Nachrüstung kaum erreichbar ist.

ASDS – Ammonia Storage and Delivery System von Amminex

Ebenso erwähnenswert ist die Technologie von Amminex¹⁹. Amminex hat eine neue Form der SCR-Technologie entwickelt (ASDS), die ebenfalls die NO_x-Emissionen von Dieselmotoren nachgewiesenermaßen sehr gut reduziert.

Vorteile von Amminex

Amminex verzichtet auf die wässrige Harnstofflösung. Der Ammoniak wird chemisch gebunden in fester Form (Adammine) quasi als Würfel mitgeführt, mit dem Vorteil der rund doppelten Speicherdichte gegenüber Harnstoff. Adammine wird in normierten Aluminium-Wechselkartuschen verkauft, die in Halterungen in Bus, Lkw oder in verkleinerter Form auch in Pkw passen. Hierfür sind 2 x 3,6 Liter (also je 1,6 kg Adammine) fassende Kartuschen vorgesehen, was einem AdBlue-Tankvolumen von je rund 18 Litern entspricht. Eine 2 x 11 Liter große Einheit ist für Nutzfahrzeuge erhältlich, sie entspricht einer Tankgröße von je rund 48 Litern AdBlue. Ein weiterer Vorteil der trockenen Ammoniak-Einlagerung ist eine Gewichtsersparnis von 20–40 %, der Wegfall der AdBlue-Tankbeheizung zur Frostsicherung und der Schutz vor Fehlbetankung (AdBlue in den Treibstofftank).

Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber der Harnstoff-Technologie besteht darin, dass das Ammoniak gasförmig zugeführt wird. Um es aus seinem Speicher zu lösen, muss dieser nur auf 55 °C erhitzt werden, nicht aber die Zuleitung und die Dosierdüse. Dazu sind maximal rund 150 W erforderlich. Eine Regelung der Abgastemperatur durch zusätzliche Nacheinspritzungen fällt weg, sodass ein Verbrauchsvorteil von 3–5 %, je nach Betriebsbedingungen, zu erwarten ist. Durch die gasförmige Zudosierung kann die Reaktion bereits ab 100 °C Abgastemperatur beginnen. Die SCR-Technologie mit AdBlue funktioniert hingegen erst bei rund 200 °C. Das bedeutet einen großen Vorsprung bei niedriger Temperatur von Motor und/oder Umgebung.

Kosten der Nachrüstung

Der Preis soll laut Amminex auf ähnlichem Niveau liegen wie für eine AdBlue-SCR-Nachrüstung.

Im Gegensatz zur SCR mit AdBlue-Technologie, wo ca. 2–3 l/1.000 km benötigt werden, muss die Kartusche beim Amminex-System rund alle 15.000 km getauscht werden; bei einer durchschnittlichen Pkw-Jahresfahrleistung von 15.000 km somit einmal jährlich.

Amminex hat gegenwärtig Omnibusflotten in Dänemark, Schweden und Großbritannien mit seiner Technik ausgerüstet.

Ergebnisse Amminex

Gewinner des Horizon-Preises der EK

Amminex hat im „Engine Retrofit for Clean Air-Award“²⁰ der Europäischen Kommission den Horizon-Preis mit diesem Produkt gewonnen. Dieser Preis hatte das Ziel, die Entwicklung neuer Techniken zu fördern, die auf bestehende An-

¹⁹ dänisches Unternehmen

²⁰ https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/prizes/horizon-prizes/engine-retrofit_en

triebsstränge angewendet werden können, um die Schadstoff-Emissionen unter realen Fahrbedingungen auf ein Minimum zu reduzieren – ohne die Fahreigenschaften des Autos zu beeinträchtigen.

Ein Kooperationspartner in diesem Projekt war die TU Graz, deren Auftrag es war, die Fahrzeuge vor und nach der Nachrüstung mit diesem System zu vermessen. Eingebaut wurden die Systeme weitestgehend von Amminex.

Vermessen wurden zwei Fahrzeuge (Renault Megane Euro 5, Renault Megane Euro 6) bei folgenden Zyklen:

1. NEDC Kaltstart 7 °C (Umgebungstemperatur niedriger als gegenüber Typprüfbedingungen, bei Typprüfung 20–30 °C Umgebungstemperatur);
2. WLTC, semi-warm, 10–15 Minuten nach dem NEDC bei 7 °C (kein Kaltstart mehr, Umgebungstemperatur niedriger als gegenüber Typprüfbedingungen, bei Typprüfung 20–30 °C Umgebungstemperatur und Kaltstart);
3. CADC, 4,5 Stunden nach dem WLTC bei 25 °C (Motor nicht ganz kalt);
4. RDE (25–30 °C).

**gemessene
Fahrzyklen**

Die Nachrüstung zeigt bei den meisten Zyklen eine deutliche Reduktion der NO_x-Emissionen und des NO₂- zu NO_x-Verhältnisses (siehe Abbildung 6).

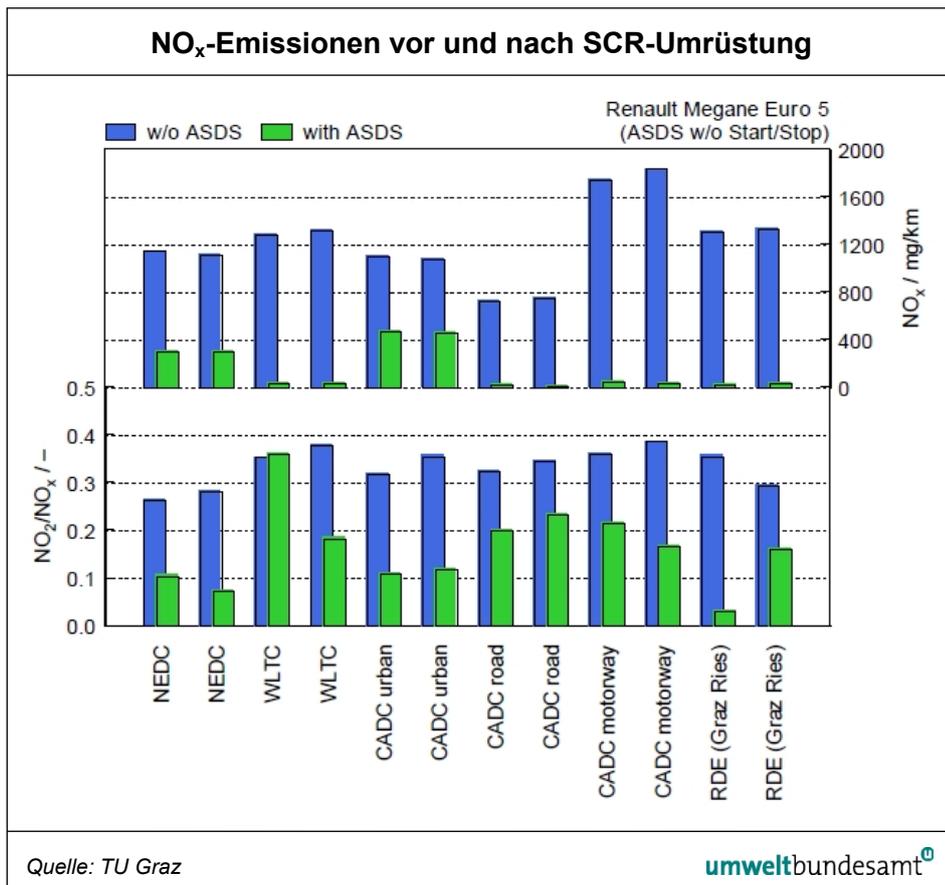


Abbildung 6: NO_x-Emissionen vor und nach SCR-Nachrüstung (System Amminex), NO₂/NO_x-Anteile vor und nach Nachrüstung.

deutliche Reduktion der Emissionen

Im oberen Teil der Abbildung sind die NO_x-Emissionen in mg/km ohne Nachrüstung (blau) und mit Nachrüstung zu sehen, im unteren Teil das Verhältnis NO₂/NO_x vor (blau) und nach der Nachrüstung. Um die Streuung der Ergebnisse aufzuzeigen, wurden immer zwei Messfahrten dargestellt. Die Messung bei den NEDC- und WLTC-Zyklen wurde bei einer anderen Umgebungstemperatur durchgeführt als bei der Typprüfung. Vor der Nachrüstung lagen die NO_x-Emissionen im NEDC bei rund 1.100 mg/km (Grenzwert Euro 5 180 mg/km), im WLTC bei rund 1.300 mg/km, beim CADC Motorway sogar bei rund 1.800 mg/km. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Fahrzeuge für die vorgegebenen Typprüfbedingungen ausgelegt sind. Die Nachrüstung hat ein großes Einsparungspotenzial, hauptsächlich bei jenen Zyklen, die motorwarm und bei warmen Umgebungstemperaturen durchgeführt wurden, da der SCR-Kat im Betriebsoptimum ist und dadurch hohe Konvertierungsraten hat.

Das NO₂-Verhältnis verbessert sich durch die Nachrüstung von durchschnittlich 35 % (Anteil direktes NO₂ an NO_x) auf rund 15 %.

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen. Innerorts kann im NEDC bei 7 °C relativ wenig konvertiert werden (-19 %) und innerorts bei halbwarmem Motor im CADC rund 57 %. Im Durchschnitt über alle Zyklen ist ein großes Potenzial gegeben.

Tabelle 3:
Reduktionspotenzial der Nachrüstung bei verschiedenen Prüfbedingungen (Quelle: TU Graz, Zusammenstellung Umweltbundesamt).

Reduktion durch Nachrüstung Euro 5			
NEDC	Urban Part	Extra-Urban-part	Total cycle
	-19%	-91%	-73%
WLTC	Low speed part	high-speed-part	Total cycle
	-96%	-99%	97,20%
CADC	Urban cycle	Motorway Cycle	Total cycle
	-57%	-97%	94%
RDE	Urban Part	Motorway Part	Total cycle
	-95%	-98%	-97%

hoher Aufwand der Nachrüstung

Laut Aussagen der TU Graz ist der Nachrüstaufwand enorm hoch; auch war es schwierig, ein geeignetes Testfahrzeug zu finden, bei dem das System motornah eingebaut werden konnte. Bei den meisten Modellen sind längere Optimierungen notwendig, was die Serienherstellung erschweren wird. Das Austauschsystem von Amminex ist grundsätzlich gut handhabbar, doch ist das Austauschen für EndbenutzerInnen aufwendiger als eine Tankbefüllung mit AdBlue.

Kosten der Nachrüstung

Kritisch muss auch gesehen werden, dass ein einwandfreies Funktionieren nur mit dem Fahrzeughersteller gemeinsam sichergestellt werden kann, da der Einbau an jede Marke und an jedes Modell angepasst werden muss. Hinzu kommt, dass das System in die Motorsteuerung bzw. in das OBD-System integriert werden muss. Zusätzlich bräuchte es ein geeignetes Testverfahren inkl. Dauerhaltbarkeit und OBD-Vorschriften. Nach Abschätzung der TU Graz wird eine Nachrüstung in den wenigsten Fällen unter 3.000 Euro möglich sein.

2.5.4 Zusammenfassung

Ein nachträglicher Einbau eines Abgasnachbehandlungssystems stellt einen signifikanten Eingriff für Motor und Fahrzeug dar. Das Betriebsverhalten (Fahrverhalten, Wartungsintervall, Lebensdauer, Sicherheit, ...) sollte aber nach der Nachrüstung gleich sein wie vorher. Die Schwierigkeit beim nachträglichen Einbau ist, dass das Fahrzeug im Grunde den gleichen Freigabeprozess durchlaufen muss wie ein neu entwickeltes Fahrzeug. Obwohl die Wirkung von Nachrüstsystemen im Einzelfall bewiesen ist, ist eine Umrüstung von Serienfahrzeugen wegen der hohen Anzahl an Fahrzeugen und den sich daraus ergebenden Randbedingungen eine große Herausforderung. Auch genügt es nicht, einen SCR-Katalysator einzubauen und die Wirksamkeit ausschließlich hinsichtlich einer NO_x-Reduktion zu überprüfen. Ein nachträglicher Einbau hat enorme Auswirkungen auf andere Bereiche, wie z. B.:

- Einfluss auf andere Abgaskomponenten (z. B. HC, CO, Partikel-Emissionen);
- Umgang mit dem Ausfall einer Komponente, z. B. AdBlue-Dosierstrategie, Beheizung AdBlue-Tank oder vom E-Kat;
- das OBD-System muss denselben Umfang haben wie bei Fahrzeugen mit serienmäßigem SCR-Kat, z. B. Füllstandsüberwachung, Alterung des SCR-Kat;
- die Motorsteuerung muss nach der Umrüstung genauso zuverlässig arbeiten wie vor der Umrüstung;
- Wechselwirkungen mit anderen Nachbehandlungssystemen, wie z. B. Partikelfilter, NO_x Speicher-Kat;
- Sicherheitsstandards im Falle eines Unfalls, wie bei Auslaufen von AdBlue und Ausdunstung von Ammoniak; Brandrisiko durch Verkabelung;
- Elektrik muss vor Feuchtigkeit geschützt werden;
- es dürfen keine unangenehmen akustischen Phänomene auftreten.

Das NO_x-Minderungspotenzial kann durch Hardware-Nachrüstung unter idealen Bedingungen bei rund 90 % liegen, d. h. bei betriebswarmem Motor und hohen Abgastemperaturen. Dies ist innerorts oder im innerstädtischen Bereich durch Geschwindigkeiten und hohe Anteile von Stop & Go oft nicht gegeben. Auch reduziert sich das Minderungspotenzial von AGR oder SCR, je niedriger die Umgebungstemperatur ist.

Um das gesamte NO_x-Reduktionspotenzial der Nachrüstung aller, noch im Verkehr befindlichen, Euro 5 Fahrzeuge abzuschätzen zu können, müsste ermittelt werden:

- Wie hoch ist der Anteil an Euro 5 Diesel Pkw, bei denen ausreichend Bauraum vorhanden ist?
- Stehen entsprechende Systeme für jeden Fahrzeugtyp zur Verfügung?
- Sind die Hersteller kooperativ? Dazu bräuchte es die enge Zusammenarbeit mit den Herstellern.

Aufgrund der Komplexität, die sich durch die unterschiedlichsten Fahrzeugmodelle und die zuvor angeführten Problemfelder ergibt, werden nach Aussage von ExpertInnen Hardware-Nachrüstungen bei Pkw rein technisch als kaum sinnvoll erachtet.

Auswirkungen einer Nachrüstung

Minderungs potenzial bis 90 %

Kriterien, um Reduktionspotenzial abzuschätzen

Nachrüstung bei Pkw meist nicht sinnvoll

**Nutzfahrzeuge im
Stadtverkehr** Aussichtsreicher erscheint es, schwere Nutzfahrzeuge im öffentlichen Verkehr, wie z. B. Stadtbusse nachzurüsten, da diese eine hohe Fahrleistung in sensiblen Gebieten erbringen.

3 MÖGLICHKEITEN DER ÜBERPRÜFUNG MANIPULIRTER LKW

Im Folgenden wird die Studie „Recherche zu technischen Möglichkeiten der Deaktivierung von AdBlue-Dosiersystemen und Vorschläge zur Detektion bei schweren Nutzfahrzeugen“ zusammengefasst (TU WIEN 2017). Die Abbildungen sind ebenfalls dieser Studie entnommen.

3.1 Studienhintergrund

Aufgrund von deutschen Medienberichten beauftragte der damalige Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie, Mag. Leichtfried, die Bundesanstalt für Verkehr (BAV) im Jahr 2017, im Rahmen der technischen Unterwegskontrollen einen besonderen Schwerpunkt auf die Manipulation der AdBlue-Dosierung bei schweren Lkw zu legen.

Die BAV beauftragte die TU Wien (Dr. Bernhard Geringer) mit der Erstellung einer Studie zu den technischen Möglichkeiten der Deaktivierung von AdBlue-Dosiersystemen, sowie der möglichen Detektion derartiger Manipulationen. Es wurde auch ein Ablaufprotokoll entwickelt, welches von den Technikerinnen und Technikern bei der Unterwegskontrolle verwendet werden konnte, um möglichst rasch solche Manipulationen aufzudecken. Dieses wurde in der Folge den Technikerinnen und Technikern der Ämter der Landesregierungen und der ASFINAG (die die technischen Unterwegskontrollen in vielen Bundesländern durchführt) im Zuge einer Sitzung der Lkw-Kontrollplattform vorgestellt.

Studie Detektion Manipulation

3.2 Allgemeines

Bei der Typengenehmigung von schweren Nutzfahrzeugen wird seit der Abgasklasse Euro VI das Emissionsverhalten des Motor- und Abgassystems sowohl unter Laborbedingungen am Motorprüfstand, als auch unter realen Bedingungen im Straßenverkehr mittels eines portablen Emissionsmessgerätes (PEMS) geprüft. So wird festgestellt ob auch unter annähernd realen Bedingungen die Schadstoffe unterhalb der festgelegten Grenzwerte liegen.

Um die Grenzwerte einzuhalten, sind seit der Euroklasse V Abgasnachbehandlungssysteme, wie Dieselpartikelfilter zur Reduktion von Feinstaub sowie Abgasrückführung und SCR-Katalysator zur Reduktion von NO_x, notwendig. Der SCR-Katalysator in seiner gängigen Form benötigt für einen einwandfreien Betrieb eine mitgeführte Harnstofflösung (AdBlue), welche dann richtig dosiert in das Abgassystem eingesprüht werden muss. Dadurch kann NO_x zu ungefährlichem Stickstoff reduziert werden.

AdBlue notwendig

Alle abgasbeeinflussenden Systeme müssen während der Fahrt mittels On-Board-Diagnose (OBD) überwacht werden. Sollte ein System fehlerhaft arbeiten, wird dies im Steuergerät gespeichert und dem Fahrer/der Fahrerin signalisiert.

Überwachung der Abgassysteme

Werden die Mängel nicht behoben, veranlasst die Fahrzeugelektronik, dass das Fahrzeug nur noch eingeschränkt nutzbar ist (z. B. durch Drosselung der Geschwindigkeit).

Kosten von AdBlue

Da das Tanken von AdBlue ein zusätzlicher Kostenfaktor für den Fahrzeugbetreiber ist, werden Euro V und Euro VI Fahrzeuge manipuliert, um die gesetzlich vorgeschriebene OBD-Überwachung der Harnstoff-Einspritzung zu umgehen. Somit kann das gesamte AdBlue-System stillgelegt werden. Im Schnitt muss mit einem AdBlue-Bedarf, je nach Technologie, von 3–10 % der Dieselmenge gerechnet werden. Für einen Flottenbetreiber kann hier pro Fahrzeug bei einem Preis von 50 Cent/Liter AdBlue und einer beispielhaften durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 100.000 km mit Zusatzkosten von bis zu 2.500 Euro gerechnet werden.

Durch das Deaktivieren des NO_x-Reduktionssystems steigen die Emissionen eines modernen Euro V/VI Lkw stark an und können dann im Bereich von Euro II Fahrzeugen oder noch schlechter liegen. Besonders hohe NO_x-Emissionen können durch das Deaktivieren des SCR-Katalysators auftreten, falls das Fahrzeug kein AGR-System hat.

3.3 Arten von Manipulationen

Es gibt unzählige Produktangebote und Anleitungen im Internet, wie ein Fahrzeug manipuliert werden kann. Diese Angebote erstrecken sich beinahe auf alle Fahrzeugkategorien. Auf Details kann hier nicht eingegangen werden.

3.4 Möglichkeiten zur Detektion von Manipulationen

Manipulationen sind verboten

Obwohl Manipulationen in Europa verboten sind, werden diese durchgeführt. Grundsätzlich muss bei der Detektion unterschieden werden, ob Indizien gesucht (Kontrollen eher bei angehaltenem Fahrzeug) werden oder ob das Emissionsverhalten des Fahrzeugs tatsächlich überprüft wird (Kontrollen im Fließverkehr).

Messtechnische Erfassung des Emissionsverhaltens

Methoden der Emissionsmessung

Für die Emissionsmessung im Fließverkehr gibt es drei unterschiedliche Methoden:

1. PEMS-Messung (portable Emissionsmesstechnik): Dies ist die genaueste Methode. Hier erfolgt die Analyse der Schadstoffe direkt am Fahrzeug. Die Apparatur wird am Heck befestigt. Ein Trichter, der direkt auf dem Auspuff montiert wird, leitet die Abgase in das PEMS-Gerät, worauf diese analysiert werden können. Die Methode ist sehr genau, aber aufwendig, da nur wenige Fahrzeuge pro Tag vermessen werden können.
2. Die zweite Möglichkeit ist das sogenannte Sniffing oder Plume Chasing. Hierbei fährt ein Messfahrzeug mit einer an der Messfahrzeugfront montierten Messsonde in der Abgasfahne direkt hinter dem zu vermessenden Fahr-

zeug. Hierbei sollten die Fahrzeugabgase dem Messgerät zeitnah zugeführt werden. Die NO_x -Konzentration von modifizierten Fahrzeugen unterscheidet sich um Größenordnungen von nicht manipulierten Fahrzeugen. Die Zuordnung des Fahrzeuges zu einer Euroklasse ist in den meisten Fällen möglich. Mit dieser Methode sind mehr Fahrzeuge pro Tag überprüfbar als mit der PEMS-Methode.

3. Die dritte Methode ist die Überprüfung des Emissionsverhaltens mittels RDS – Remote Sensing Device/Detector (siehe Abbildung 7). Auch bei dieser Methode muss das Fahrzeug nicht angehalten werden. Hier wird mittels Infrarot und UV-Laser, Reflektor und Infrarot und UV-Spektrometer die Konzentration von CO , HC , NO_x und Partikeln der Abgasfahne von vorbeifahrenden Fahrzeugen bestimmt. Die Zuordnung zu einer Euroklasse ist bei dieser Methode schwieriger, dafür kann eine große Anzahl an Fahrzeugen pro Tag vermessen werden. Vergleichsmessungen von nicht manipulierten Fahrzeugen sind bei dieser Methode sinnvoll.

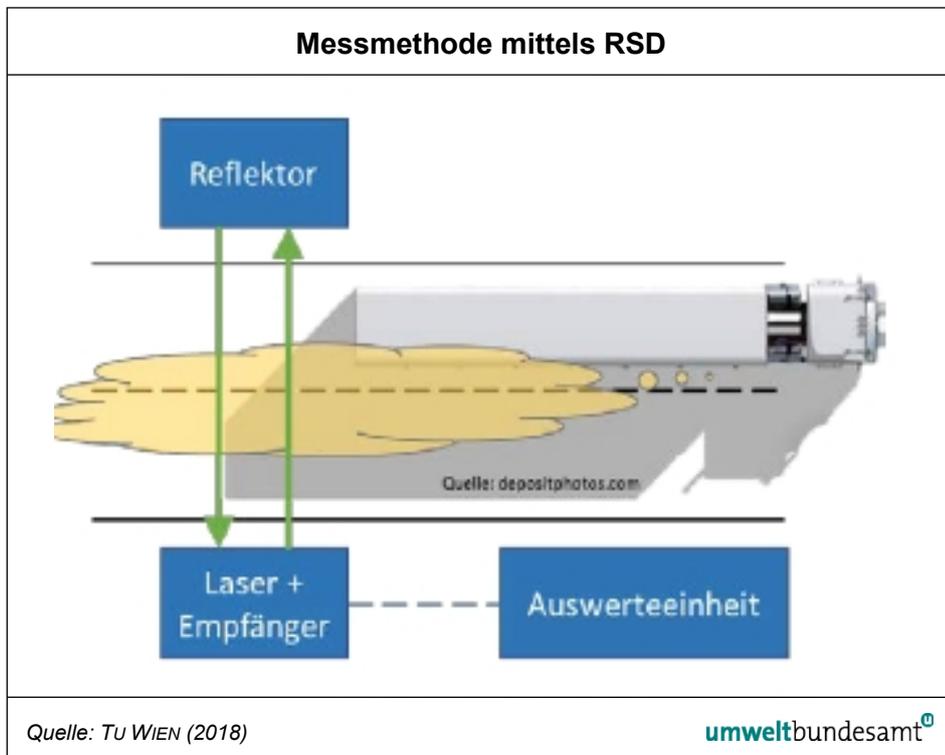
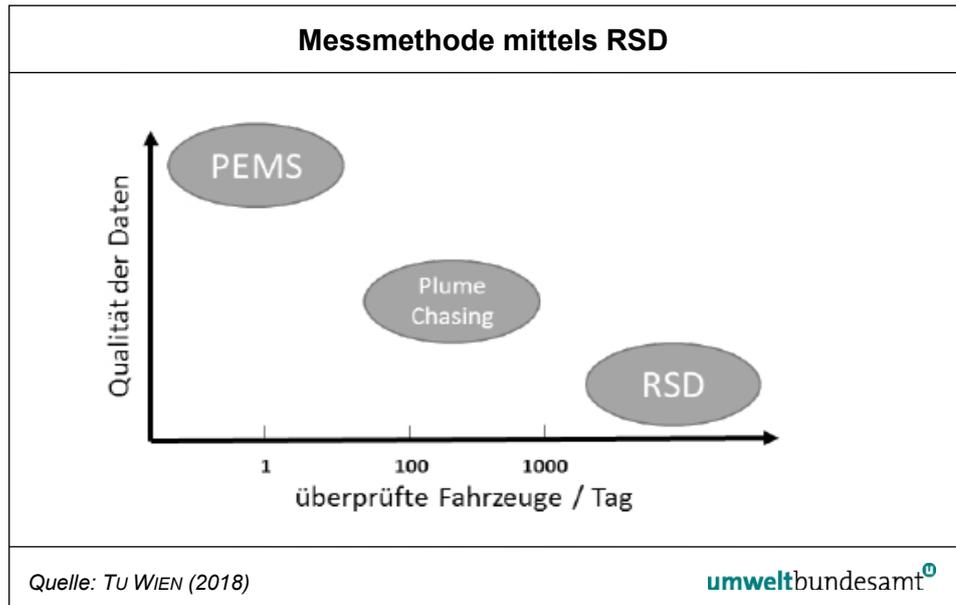


Abbildung 7:
Messmethode
mittels RSD.

Abbildung 8 zeigt einen Vergleich der verschiedenen Messmethoden.

Abbildung 8:
Vergleich der
unterschiedlichen
Detektionsmethoden.



3.5 Ergebnisse der ASFINAG-Kontrollen und Erfahrungen der Bundesländer mit AdBlue-Manipulationen und Kontrollen

fehlende rechtliche Grundlagen

Vom BMVIT wurde gemeinsam mit den Bundesländern sowie mit anderen Ministerien und Institutionen ein Arbeitskreis eingerichtet, von dem bereits drei Sitzungen durchgeführt wurden. Bei der letzten Sitzung wurde berichtet, dass die ASFINAG neben den Schwerpunktkontrollen mit den ExpertInnen der TU Wien sowie den RSD-Messungen mit begleitenden Kontrollen keine weiteren AdBlue-Kontrollen durchgeführt hat. Als Problem werden die fehlenden rechtlichen Grundlagen für Ausbaurbeiten zur Entdeckung von Emulatoren sowie zur Vorgangsweise bei gefundenem Emulator gesehen. Erstere wären aber für einen gerichtsfesten Nachweis einer Manipulation notwendig.

Dichtemessung

Problematisch werden auch der hohe Zeitaufwand und die Komplexität gesehen.

Eine Möglichkeit der Überprüfung wäre die Messung der Dichte des AdBlue. Verbleibt AdBlue über längere Zeit im Tank, ohne verbraucht zu werden, verdunstet das Wasser aus der Lösung und die Dichte ändert sich.

Situation in Deutschland

Diskutiert wurde auch die rechtliche Situation in Deutschland. Dort kann bei einem begründeten Verdacht einer Manipulation die sofortige Überprüfung in einer Markenwerkstatt angeordnet werden. Erst wenn die Werkstatt den vorschriftsmäßigen Zustand bestätigt, ist eine Weiterfahrt zulässig.

Seitens des Bundesministeriums für Inneres (BMI) wurde angemerkt, dass Verstöße gegen Lenk- und Ruhezeitvorschriften strafrechtlich relevant sind; daher können Zerlegungen, Untersuchungen in einer Werkstatt, Sicherstellungen und dergleichen durch den Staatsanwalt angeordnet werden. Dagegen liegen AdBlue-Manipulationen im Bereich des Verwaltungsrechts, ähnliche Maßnahmen sind daher nicht möglich.

Ergebnisse

RSD-Kontrollen wurden als Hilfsmittel zur Vorselektion bei der Technischen Unterwegskontrolle oder bei Schwerpunktkontrollen angewendet. Insgesamt wurden etwa 27.000 Fahrzeuge durch das RSD erfasst, mit folgendem Ergebnis:

- 32 Fahrzeuge: wurden ausgeleitet,
- 3 Fahrzeuge: Manipulation nachgewiesen,
- 5 Fahrzeuge: Defekt im Bereich der Nachgasbehandlung,
- 6 Fahrzeuge: kein SCR,
- 18 Fahrzeuge: ohne nachweislich Veränderung.

Zukünftige Schritte (gemäß 3. Sitzung des Arbeitskreises)

Eine Kontrolle auf AdBlue-Manipulationen wird allgemein als notwendig erachtet. Wünschenswert wäre es jedenfalls, wenn das vorhandene Wissen und die erworbene Erfahrung geteilt werden. Es wurde daher vereinbart, einen Arbeitskreis „AdBlue-Manipulation“ zu gründen, der auf Einladung des BMVIT diese Aufgaben wahrnimmt. Das BMI sieht die Manipulationen als großes Problem, der bereits jetzt vorhandene rechtliche Spielraum muss daher bestmöglich ausgeschöpft werden. Angeregt wird eine Mindeststrafhöhe von 5.000 Euro, um ausreichend abschreckend gegenüber der Ersparnis von mehreren Tausend Euro zu sein. Eine Mitführverpflichtung für die letzte(n) AdBlue-Rechnung(en) wird problematisch gesehen, da die Betankung von einem zentralen Tank des Frächters weit verbreitet ist. In einem solchen Fall verfügt der Lenker/die Lenkerin über keine Rechnung.

**Arbeitskreis
„AdBlue-
Manipulation“**

4 LITERATURVERZEICHNIS

- ADAC – Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. (2018): NO_x-Reduzierung an Euro 5 Dieselfahrzeugen durch Hardwarenachrüstung. Vermessung der Abgasemissionen im Zulassungszyklus WLTC und Realbetrieb (RDE) vor und nach Hardwareumrüstung. Kurzversion Schlussbericht. ADAC, Württemberg.
- BAAR, R.; BARGENDE, M.; BEIDL, C.; KOCH, T. & ROTTENGRUBER, H. (2018): Wissenschaftliche Untersuchungen hardwareseitiger NO_x-Reduzierungsmöglichkeiten im Pkw-Bereich und im Segment der leichten Nutzfahrzeuge. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Kurzstudie.
- DERC – Development Engineering Research Competence (2018): Studie über das Potenzial einer Realisierung einer Hardware-Nachrüstung für Dieselfahrzeuge EU5 (EU4) zur NO_x-Reduzierung. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- GIECHASKIEL, B.; SUAREZ-BERTOIA, R.; LÄHDE, T.; CLAIROTTE, M.; CARRIERO, M.; BONNEL, P. & MAGGIORE, M. (2018): Evaluation of NO_x emissions of a retrofitted Euro 5 passenger car for the Horizon prize “Engine retrofit”. Environmental Research, Volume 166, Pages 298–309.
- TU WIEN (2017): Geringer, B.: Recherche zu technischen Möglichkeiten der Deaktivierung von AdBlue-Dosiersystemen und Vorschläge zur Detektion bei SNFZ. Im Auftrag der Bundesanstalt für Verkehr (BAV), Wien (nicht veröffentlicht).
- UMWELTBUNDESAMT (2019): Spangl, W. & Nagl, C.: Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2018. Reports, Bd. REP-0675. Umweltbundesamt, Wien.
- UMWELTBUNDESAMT DESSAU (2017): Ergänzung der Bewertung zu marktverfügbaren fahrzeugseitigen NO_x Nachrüsttechnologien und Bewertung der Nachbesserung. Umweltbundesamt, Dessau.

Rechtsnormen und Leitlinien

- Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L; BGBl. I 115/1997 i. d. g. F.): Bundesgesetz zum Schutz vor Immissionen durch Luftschadstoffe, mit dem die Gewerbeordnung 1994, das Luftreinhaltegesetz für Kesselanlagen, das Berggesetz 1975, das Abfallwirtschaftsgesetz und das Ozongesetz geändert werden.
- Luftqualitätsrichtlinie (RL 2008/50/EG): Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. ABI. Nr. L 152/1.
- RL 2002/80/EG: Richtlinie der Kommission vom 3. Oktober 2002 zur Anpassung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt. ABI. L 291 vom 28.10.2002, S. 20–56.
- RL 91/441/EWG: Richtlinie des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. ABI. L 242 vom 30.8.1991, S. 1–106.

- RL 93/59/EWG: Richtlinie des Rates vom 28. Juni 1993 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. ABl. L 186 vom 28.7.1993, S. 21–27.
- RL 94/12/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 über Maßnahmen gegen die Verunreinigungen der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG. ABl. L 100 vom 19/04/1994 S. 42–52.
- RL 96/69/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Oktober 1996 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. ABl. L 282 vom 1.11.1996, S. 64–67.
- RL 98/69/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates. ABl. L 350 vom 28.12.1998, S. 1–57.
- RL 70/220/EWG: Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung. ABl. L 76 vom 6.4.1970, S. 1–22.
- RL: 2002/80/EG Richtlinie der Kommission vom 3. Oktober 2002 zur Anpassung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt. ABl. L 291 vom 28/10/2002 S. 20 - 56
- VO (EG) Nr. 692/2008: Verordnung der Kommission vom 18. Juli 2008 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. ABl. L 199 vom 28.7.2008, S. 1–136.
- VO (EG) Nr. 715/2007: Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. ABl. L 171 vom 29.6.2007, S. 1–16.
- VO (EU) 2017/1151: Verordnung der Kommission vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission. C/2017/3521, ABl. L 175 vom 7.7.2017, S. 1–643.