

---

## Überprüfung der Funktions- und Leistungsfähigkeit hardwareseitig umgerüsteter Euro 5-Dieselfahrzeuge im Alltagsbetrieb

Durchführung eines Alltagstests über 50.000 km  
mit regelmäßiger Vermessung der Abgasemissionen  
im Zulassungszyklus WLTC und Realbetrieb (RDE)

### Projektleiter:

ADAC Württemberg e.V.  
ADAC e.V. Test und Technik

### Zuwendungsgeber:

Verkehrsministerium Baden-Württemberg

### Zuwendungsempfänger:

ADAC Württemberg e.V.

# Inhalt

1	Einleitung .....	3
1.1	Projektbeteiligte.....	4
2	Zielsetzung.....	5
3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	6
4	Vorgehensweise und Methodik.....	15
4.1	Prämissen .....	15
4.2	Testfahrzeuge .....	15
4.3	Hardware-Nachrüstungen .....	15
4.4	So wird getestet .....	16
4.5	So wird ausgewertet.....	20
5	Abbildungsverzeichnis.....	21
6	Tabellenverzeichnis.....	21
7	Quellenverzeichnis .....	22
8	Glossar.....	23

# 1 Einleitung

Für den ADAC steht die Gesundheit der Menschen an erster Stelle. Entsprechend sollten alle Maßnahmen konsequent ausgeschöpft werden, die dazu geeignet sind, die Luft in unseren Städten sauberer zu machen, möglichst ohne die individuelle Mobilität durch Fahrverbote einzuschränken.

Deshalb geht der Einsatz des ADAC für die Hardware-Nachrüstung zur Reduktion der Stickoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ) von Dieselfahrzeugen weiter. Dazu haben der ADAC Württemberg e.V. und der ADAC e.V. ein Gemeinschaftsprojekt aufgelegt, das vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg gefördert wird. Ziel des Projekts ist es, die Funktions- und Leistungsfähigkeit von SCR-Systemen im alltäglichen Dauerbetrieb zu testen.

Diese zweite Testreihe war die Fortsetzung eines ersten, vom baden-württembergischen Verkehrsministerium geförderten Projekts des ADAC Württemberg e.V. im vergangenen Winter 2017/18. Dessen Ergebnisse wurden am 20. Februar 2018 bei einer Pressekonferenz in Stuttgart der Öffentlichkeit vorgestellt [1]. Dabei belegten die Messungen des ADAC Technik Zentrums in Landsberg am Lech vor und nach der Umrüstung klar die grundsätzliche Wirksamkeit der Technologie. Damit konnten die Stickoxidemissionen von vier nachgerüsteten Euro 5-Dieselfahrzeugen um mindestens 50 bis zu mehr als 70 Prozent reduziert werden.

Den Kern des aktuellen Projekts bildete ein Alltagstest, bei dem die bereits im ersten Förderprojekt des ADAC Württemberg e.V. eingesetzten Fahrzeuge nach Optimierung durch die Nachrüster mindestens 50.000 Kilometer zurücklegen haben – im Stadtverkehr sowie auf Landstraßen und Autobahnen. Dabei wurde die Funktionsstabilität der Systeme unter verschiedenen klimatischen Bedingungen wie Hitze, Kälte, Regen und Schnee untersucht. Um die  $\text{NO}_x$ -Emissionen regelmäßig zu ermitteln, mussten sich die Testwagen alle 10.000 Kilometer auf den Abgasprüfstand einer Untersuchung nach WLTC unterziehen. Zum Untersuchungsumfang des Projekts gehörten auch mehrere Emissionsmessungen im realen Straßenverkehr.

Der Projektplan sah auch eine Reihe Sondermessungen vor. Dazu gehörten etwa Messungen von nichtlimitierten Schadstoffen wie Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) oder des klimagefährdenden Lachgases ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Prüfungen des Tieftemperaturverhaltens.

Neben dem von der Firma Twintec Baumot umgerüsteten Opel Astra 1.7 CDTI waren zwei leichte Nutzfahrzeuge (VW T5 von Oberland-Mangold und Fiat Ducato von HJS) im Test. Wegen eines unverschuldeten Verkehrsunfalls mit nicht reparablem Fahrzeugschaden musste der Dauerfahrttest mit dem Fiat Ducato in dem vorliegenden Berichtszeitraum nach 33.000 km vorzeitig beendet werden. Der Mercedes B 180 CDI der Firma Dr. Pley SCR-Technology GmbH hatte aus unternehmensinternen Gründen nicht mehr an diesem Projekt teilgenommen.

In einem ersten Schritt bekamen die beteiligten Nachrüsterunternehmen im Juli/August 2018 die Gelegenheit, ihre jeweiligen Prototypen in den Testfahrzeugen technisch auf den damals neuesten Stand zu bringen. Das Lastenheft schrieb den Nachrüstern unter anderem vor, alle Fahrzeuge mit Informationssystemen auszustatten, die etwa den Füllstand im AdBlue<sup>®</sup>-Tank sowie die Funktionsfähigkeit des SCR-Katalysators laufend überprüfen und dem Fahrer anzeigen. Die Fahrzeuge wurden mit den weiterentwickelten Systemen einer ersten Abgasmessung auf dem Prüfstand und auf der Straße unterzogen und die Ergebnisse mit denen aus der ersten Entwicklungsstufe verglichen.

Ende August 2018 begann der Dauerfahrttest und endete im Januar 2019, somit konnte das breite klimatische Spektrum von Sommerhitze bis Winterkälte abdeckt werden.

## 1.1 Projektbeteiligte

### Projektleitung:

ADAC Württemberg e.V.  
Carl-Eugen Metz, Vorstand Verkehr und Umwelt  
Am Neckartor 2  
70190 Stuttgart

ADAC e.V. Test und Technik  
Dino Silvestro, Leiter Fahrzeugtest  
Otto-Lilienthal-Straße 2  
86899 Landsberg am Lech

### Projektbeteiligte:

HJS Emission Technology GmbH & Co. KG  
Dieselweg 12  
58706 Menden/Sauerland

Oberland Mangold Katalysatortechnik GmbH  
In der Enz 1  
82438 Eschenlohe

Twintec Baumot Group  
BAUMOT Technologie GmbH  
Stockumer Str. 28, B14  
58453 Witten

### Wissenschaftliche Begleitung:

Prof. Dr.-Ing. Hermann Koch-Gröber  
Automotive Systems Engineering (ASE)  
Hochschule Heilbronn  
Max-Planck-Str. 39  
74081 Heilbronn

## 2 Zielsetzung

Die grundsätzliche Funktionalität der SCR-Nachrüsttechnik wurde im Projekt „NO<sub>x</sub>-Reduzierung an Euro 5 Dieselfahrzeugen durch Hardware-Nachrüstung“ bereits festgestellt [1].

Im aktuellen Folgeprojekt wurde nun geprüft, ob die mittels Hardware nachgerüsteten Dieselfahrzeuge der Schadstoffklasse Euro 5 auch im Alltagsbetrieb eine dauerhafte Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen erreichen und ob sich die generelle Leistungsfähigkeit über einen gewissen Nutzungszeitraum unter unterschiedlichen Randbedingungen verändert. Das hier angesetzte Projekt diente der exemplarischen Dokumentation über die Funktions- und Leistungsfähigkeit der bei den Funktionsprototypen eingebauten SCR-Abgasnachbehandlungssysteme und entsprach keiner umfassenden Funktions- und Dauerläuferprobung zur Funktionsabsicherung gemäß den Standards der Automobilindustrie.

### **Alltagstest über 50.000 km zur Überprüfung der mechanischen Belastbarkeit und der Systemstabilität**

Die in diesem Projekt nachgerüsteten Fahrzeuge wurden über eine Distanz von mindestens 50.000 km gefahren und besondere Vorkommnisse oder mögliche Systemausfälle in einem Testtagebuch dokumentiert. Alle 10.000 km wurden die Abgasemissionen im WLTC- und BAB-Zyklus auf dem Abgasprüfstand ermittelt, um die Leistungsfähigkeit der SCR-Systeme über die Laufzeit zu dokumentieren.

### **Dokumentation der NO<sub>x</sub>-Reduktionsleistung und des AdBlue®-Verbrauchs bei unterschiedlichen Temperaturen**

Während des Alltagstests erfolgte eine kontinuierliche Dokumentation relevanter Abgasdaten mittels Datenlogger. Neben den NO<sub>x</sub>-Emissionen vor und nach SCR wurden auch die Abgas Temperaturen sowie der AdBlue®-Verbrauch dokumentiert. Ziel war es, die NO<sub>x</sub>-Reduktion und den AdBlue®-Verbrauch über den Testzeitraum bei unterschiedlichen Außentemperaturen zu erfassen.

### **Überprüfung des Nieder-/Hochtemperaturverhaltens**

Um das Systemverhalten bei unterschiedlichen Außentemperaturen zu dokumentieren, wurden bei besonderen Temperatur-/Wetterlagen (Sommer, Herbst, Winter) PEMS-Messungen auf der Straße durchgeführt. Der Verlauf der Teststrecke schloss Stadtfahrten bei niedriger Motorlast und infolgedessen niedrigen Abgastemperaturen ein. Ebenso kam es zu einer Anzahl von Kaltstarts bei unterschiedlichen Außentemperaturen.

### **Messung von nichtlimitierten Schadstoffen**

Unter gewissen Umständen können sich über die katalytische Abgasnachbehandlung oder durch Überdosierung von AdBlue® Sekundäremissionen bilden, die es unbedingt zu vermeiden gilt. Es wurde daher auch der Ausstoß von nichtlimitierten Schadstoffen wie Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) untersucht.

### 3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Am 21. Dezember 2018 wurden durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die Anforderungen für SCR-Nachrüstsysteme im Pkw-Bereich verabschiedet. Die Richtlinie mit dem Titel „*Technische Anforderungen an Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Minderungssysteme mit erhöhter Minderungsleistung für die Nachrüstung von Pkw und Pkw-ähnlichen Fahrzeugen (NO<sub>x</sub>MS-Pkw)*“ definiert die Eigenschaften und Minderungsleistungen von Nachrüstsystemen. Die Richtlinie wurde am 11. Januar 2019 im Bundeanzeiger veröffentlicht [2].

Den Kernpunkt der Richtlinie bildet der definierte NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 270 mg/km, der bereits im Herbst 2018 im Entwurf der Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) genannt wurde [3]. Das Prüf- und Genehmigungsverfahren sieht vor, dass der NO<sub>x</sub>-Grenzwert im Realbetrieb (RDE) in einem Temperaturbereich von 5 °C bis 30 °C eingehalten werden muss. Bei niedrigeren Temperaturen (4 °C bis -3 °C) dürfen die geminderten NO<sub>x</sub>-Werte um den Faktor 2 höher liegen (540 mg/km), bei Temperaturen über 30°C liegt der Faktor bei 1,6 (432 mg/km). Zudem wurde in der Richtlinie festgelegt, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch SCR-Nachrüstung um maximal 6 % ansteigen darf.

Die Dauerhaltbarkeit der NO<sub>x</sub>-Minderungssysteme muss laut Richtlinie durch entsprechenden Nachweis des Herstellers bestätigt werden. Die Funktionsfähigkeit des Systems muss bei bestimmungsgemäßem Betrieb über eine Kilometerleistung von 100.000 km oder über eine Lebensdauer von bis zu fünf Jahren (je nachdem, was zuerst erreicht wird) gewährleistet werden.

#### **Auch nach 50.000 km Alltagstest sind die SCR-Nachrüstsysteme noch voll leistungsfähig – die Zuverlässigkeit muss für den Serieneinsatz aber verbessert werden**

Fünf Monate dauerte es, bis die Testfahrzeuge die 50.000 km Alltagstest absolviert hatten. 72-mal wurde dabei die 700 km lange Dauerlaufstrecke umrundet. Nach Abschluss des Tests zeigt sich in den Ergebnissen ein differenziertes Bild.

Erfreulich: Die prinzipielle Leistungsfähigkeit der SCR-Katalysatoren hat auch nach 50.000 km nicht nachgelassen. Die Minderungsraten liegen auf ähnlichem Niveau wie zu Beginn des Alltagstest. Eine kontinuierlich nachlassende Performance z.B. durch Alterung der SCR-Katalysatoren konnte innerhalb der 50.000 km nicht festgestellt werden.

Dieser positive Befund gilt für die Zuverlässigkeit nur mit Abstrichen: Die in wenigen Wochen durch die Nachrüster aufgebauten und auf das jeweilige Testfahrzeug abgestimmten SCR-Systeme waren in diesem Entwicklungsstadium noch nicht in der Lage, eine durchgehend zuverlässige Funktion zu gewährleisten: Temporäre Systemausfälle und mechanische Defekte an SCR-Komponenten zeigten sich ebenso wie ein zeitweilig instabiles Energiemanagement. Die Folge: Mehrere Nachbesserungen durch die Nachrüster an mechanischen Komponenten, Sensorik und Energieversorgung waren nötig.

Für den möglichen Serieneinsatz gilt: Die mechanische Dauerhaltbarkeit der SCR-Komponenten, die Vermeidung von Ablagerungen sowie ein stabiles und effizientes Energiemanagement scheinen die bisher größte Herausforderungen einer serientauglichen SCR-Nachrüstung zu sein. Hier müssen die Nachrüster ansetzen, um angelehnt an die in der Nachrüstrichtlinie festgelegten Dauerhaltbarkeitsanforderungen den Kunden entsprechende zeit-

sowie lauffleistungsbezogene Garantien auf ihre Nachrüstsysteme zu gewähren. Denn der Autofahrer muss sich darauf verlassen können, ein zuverlässiges und dauerhaftes Produkt zu erwerben, das ohne Sorge vor Folgekosten die Mobilität in den kommenden Jahren sichert.

### **SCR-Nachrüstsysteme mit weitgehend serienproben Komponenten funktionierten im Alltagstest zuverlässiger als Systeme mit speziell entwickelten Bauteilen**

Weitgehend aus serienproben Komponenten besteht das SCR-System des Fiat Ducato: Das Testtagebuch verzeichnet mit Ausnahme von zwei temporären Systemausfällen (Details siehe Testtagebuch) keine relevanten Störungen. Bis zur 30.000 km Zwischenmessung zeigte das Fahrzeug eine stabile NO<sub>x</sub>-Reduktion und spulte ohne nennenswerte Defekte den Alltagstest ab. Kurz nach Start der vierten Etappe des Dauerlaufs geriet das Fahrzeug jedoch unverschuldet in einen Verkehrsunfall. Wegen des nicht reparablen Fahrzeugschadens musste der Alltagstest mit diesem Fahrzeug vorzeitig abgebrochen werden. Auch wenn die letzten 20.000 km des Alltagstests nun fehlen, kann zumindest für die absolvierte Teststrecke ein positives Fazit gezogen werden: HJS setzt beim Ducato weitgehend auf Serienteile der Modellvariante mit Euro 6b. Dieses Konzept scheint in großen Teilen zuverlässig zu funktionieren und bietet somit das Potential, zeitnah zu einem serienreifen SCR-Nachrüstsystem weiterentwickelt zu werden.

Oberland Mangold setzt beim VW T5 teilweise auf Serienteile, die im VW T6 zum Einsatz kommen. Diese Bauteile, bestehend aus AdBlue<sup>®</sup>-Tankeinheit inklusive aller Leitungen, sind bereits dauererprobt und erwiesen sich auch im Alltagstest als robust. Lange Zeit spulte auch der VW den Test ohne Auffälligkeit ab. Doch nach 30.000 km zeigte sich eine plötzliche Verschlechterung der NO<sub>x</sub>-Emissionswerte. Der Grund: Im von Oberland Mangold entwickelten externen Hydrolyse-Reaktor, der für die AdBlue<sup>®</sup>-Aufbereitung zuständig ist, bildeten sich mit der Zeit Ablagerungen, die in der Folge die Funktionsfähigkeit des Systems einschränkten. Die Fehlfunktion konnte durch Oberland Mangold zwar schnell behoben werden, indem die Ablagerungen entfernt wurden. Für einen Serieneinsatz wäre das allerdings keine Lösung. Hier muss bis zur Serienreife noch Entwicklungsarbeit geleistet werden, um die Dauerhaltbarkeit garantieren zu können. Entwicklungsbedarf gibt es auch noch bei den NO<sub>x</sub>-Minderungsraten. Insbesondere bei höheren (Autobahn-)Geschwindigkeiten fällt die Minderungsrate noch sehr gering aus.

Der dritte im Bunde ist der Opel Astra. Ein Fahrzeug, das unabhängig von der SCR-Nachrüstung im Alltagstest nicht gerade mit Zuverlässigkeit punktete und mehrmals außerplanmäßig in der Werkstatt vorstellig werden musste. Es sei jedoch angemerkt, dass der Astra die mit Abstand höchste Gesamtfahrleistung auf dem Tacho stehen hat (140.000 km). Das SCR-System für den Opel musste von der Nachrüfstirma Twintec bereits im ersten Projekt von 2017/2018 über die grundsätzliche Machbarkeit und Wirksamkeit komplett neu entwickelt und angepasst werden, da für dieses Fahrzeug keinerlei SCR-Serienbauteile verfügbar waren. Sowohl die eingeschränkten Platzverhältnisse als auch die ungünstig verbaute Abgasanlage stellten für die Entwickler eine besondere Herausforderung dar. Die Ergebnisse des Alltagstest zeigen, dass hier noch erhöhter Entwicklungsaufwand notwendig ist. Das Testtagebuch verzeichnet mehrere Ausfälle und entsprechende Nachbesserungen. Dazu gehören eine undichte Kühlwasserleitung, eine nicht funktionierende Füllstandanzeige des AdBlue<sup>®</sup>-Tanks, sowie ein mechanischer Defekt einer Abgasleitung zum Hydrolyse-Reaktor. Auch das Energiemanagement bzw. die Energieversorgung erwiesen sich als noch nicht serientauglich. Die Zusatzbatterie im Kofferraum konnte durch den fahrzeugseitigen Generator nicht unter allen Bedingungen zuverlässig aufgeladen werden. In der Folge wurde das SCR-System unter bestimmten Fahrsituationen vorsichtshalber deaktiviert bzw. die Dosierraten herabgesetzt, um die stabile Energieversorgung der (sicherheitsrelevanten) Fahrzeugsysteme durch Überlastung des Bordnetzes nicht zu gefährden.

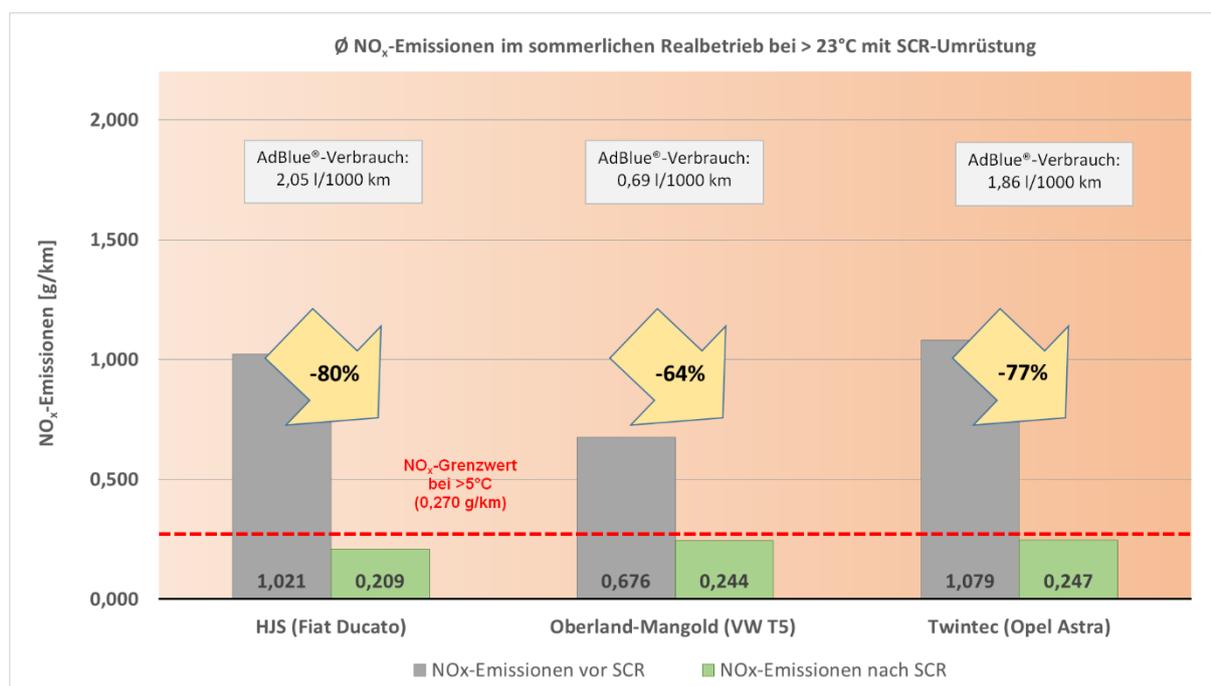
Trotz dieser offenkundigen Schwierigkeiten beweist das System von Twintec, dass SCR-Nachrüstung prinzipiell auch bei solch ungünstigen Fahrzeugtypen möglich ist. Die Entwicklung von serienreifen Lösungen für solche Fahrzeuge erfordert jedoch weitere technische Kreativität und wohl auch noch etwas Zeit.

### Bei sommerlichen Temperaturen wird der NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 270 mg/km im Realbetrieb durch SCR-Nachrüstung erreicht oder sogar unterschritten

Vor Beginn des Alltagstests wurden Ende August die warmen Außentemperaturen genutzt, um eine RDE-Fahrt im sommerlichen Betrieb durchzuführen. Das hohe Niveau der Serienemissionen ist einerseits erschreckend, die Messungen mit SCR-Nachrüstung stimmen aber zuversichtlich.

Selbst unter günstigen äußeren Bedingungen bei Temperaturen ab 23 °C werden von den drei Testfahrzeugen im Realbetrieb ungereinigte Serienemissionen von rund 700 bis 1.100 Milligramm Stickoxid (NO<sub>x</sub>) pro Kilometer emittiert. Obwohl die Werte um ein Vielfaches über dem Prüfstand-Grenzwert der Abgasnorm Euro 5 liegen, gelang es allen drei SCR-Systemen, durch die Nachbehandlung der Abgase mithilfe von Katalysatoren und dem Harnstoff AdBlue® die Emissionen deutlich zu vermindern. Die gemessenen Reduktionsraten liegen im RDE-Test zwischen 64 und 80 Prozent und drücken den NO<sub>x</sub>-Ausstoß der getesteten Fahrzeuge auf oder unter den Grenzwert von 270 mg/km, der laut Nachrüstrichtlinie im Temperaturbereich von +5 °C bis +30 °C unterschritten werden muss.

Abbildung 1 NO<sub>x</sub>-Emissionen im sommerlichen Realbetrieb (RDE-Messung)



### Herbstliche Temperaturen lassen die Serienemissionen der Fahrzeuge drastisch ansteigen. SCR-Nachrüstung wirkt auch hier mit beachtlicher NO<sub>x</sub>-Reduktionsrate

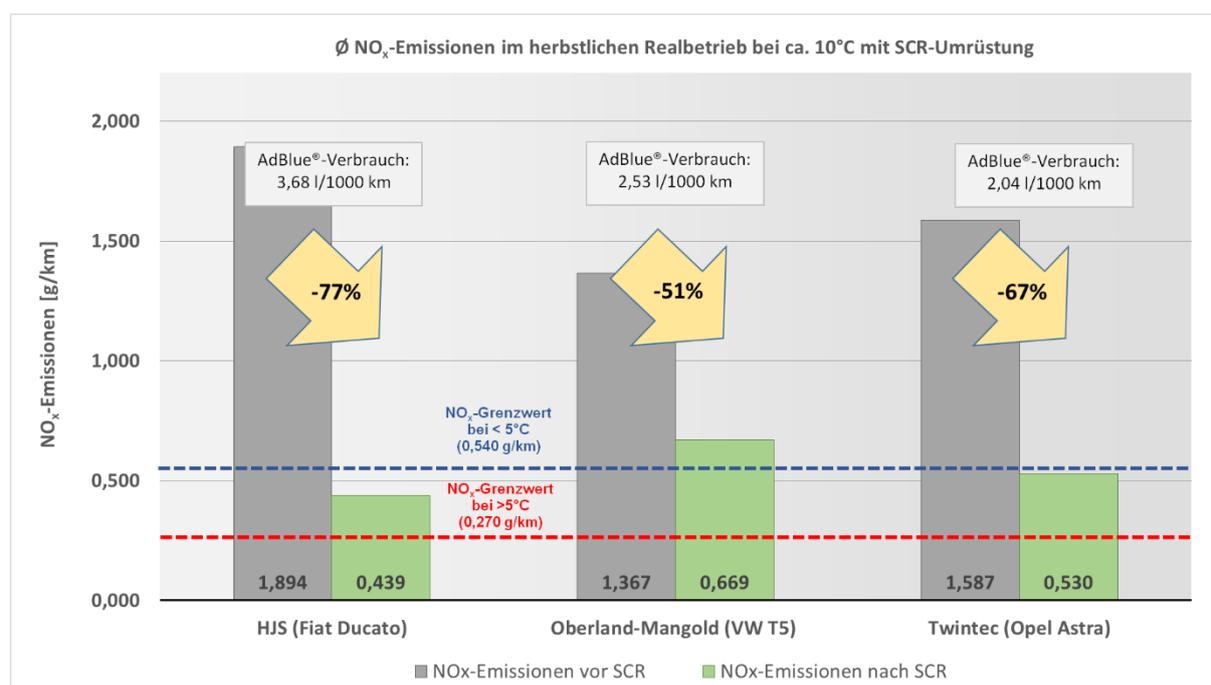
Niedrige Außentemperaturen sorgten für deutlich erhöhte Serienemissionen der drei umgerüsteten Fahrzeuge - teilweise verdoppelten sich die Serienemissionen gegenüber der RDE-Messung bei sommerlichen Temperaturen auf bis zu knapp zwei Gramm Stickoxid pro Kilometer. Und das, obwohl sich die herbstlichen Messungen noch in einem Temperaturbereich

bewegten, der der deutschen Jahresdurchschnittstemperatur entspricht (ca. 9,5°C). Die SCR-Nachrüstsysteme zeigten bei 10°C Außentemperatur immer noch eine hohe Minderungsleistung, auch wenn diese insgesamt etwas geringer ausfiel, als noch bei sommerlichen Temperaturen. Das liegt vor allem daran, dass die SCR-Systeme unabhängig von der Motorsteuerung arbeiten und nach Kaltstart länger benötigen, um auf Temperatur zu kommen. Die gemessenen NO<sub>x</sub>-Reduktionsraten lagen aber immer noch bei hohen 51 bis 77 Prozent. Der Ausstoß an Stickoxiden sinkt dadurch zwar deutlich, der absolute NO<sub>x</sub>-Wert liegt jedoch selbst dann noch bei mindestens 400 mg/km.

Die herbstlichen Messungen zeigen, dass die Serienemissionen bereits bei Temperaturen um 10 °C massiv ansteigen. Obwohl die getesteten Nachrüstsysteme auch in diesem Temperaturbereich einen noch guten Wirkungsgrad aufweisen, lagen die geminderten Emissionen deutlich über den 270 mg/km, der Minderungswert von 540 mg/km für niedrige Temperaturen könnte jedoch erreicht werden. Die Messungen zeigen, dass die Serienemissionen bereits bei Temperaturen von rund +13 °C je nach Modell stark ansteigen können (Stichwort Thermofenster). Der Verschlechterungsfaktor für niedrige Temperaturen greift jedoch erst bei +5°C.

Es scheint, als gehöre der Temperaturbereich zwischen +5°C und +13°C zu den größten Herausforderungen, den Grenzwert einzuhalten. Denn der Gesetzgeber geht in der Nachrüstrichtlinie davon aus, dass sich das Fahrzeug hier noch im Betriebsmodus für normale Temperaturen befindet und kein Verschlechterungsfaktor notwendig ist. Die Praxis zeigt aber, dass die Fahrzeughersteller ein anderes Verständnis für niedrige Außentemperaturen aufweisen und die serienmäßige Abgasreinigung bereits in diesem Temperaturbereich stark drosseln. Die sehr hohen Serienemissionen bekommen dann selbst wirkungsvolle Nachrüstsysteme nicht mehr ausreichend in den Griff, auch wenn die Stickoxide absolut gesehen um bis zu 1.400 mg/km reduziert werden können. Ein Update der Motorsteuerung durch den Fahrzeughersteller, welche z.B. die Nutzung der Abgasrückführung in diesem Temperaturbereich verbessert, hätte das Potenzial, die absolute Minderung der SCR- Nachrüstsysteme noch einmal deutlich zu verbessern.

**Abbildung 2 NO<sub>x</sub>-Emissionen im herbstlichen Realbetrieb (RDE-Messung)**

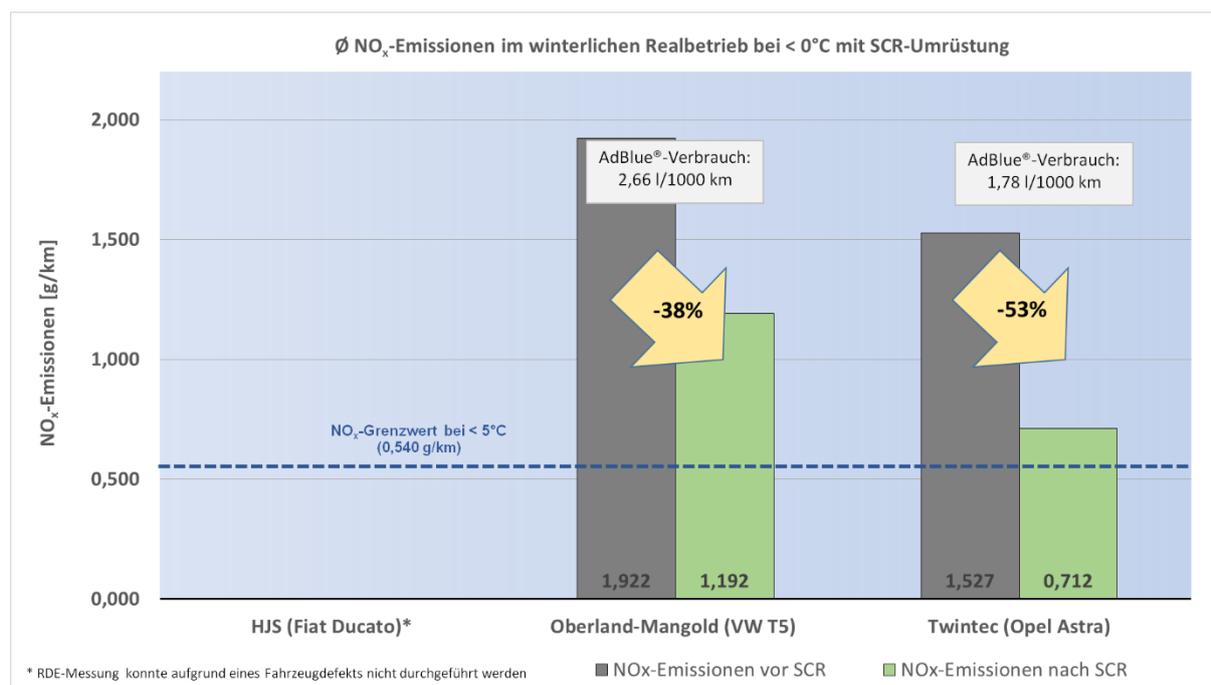


## Im Winter nimmt die Leistungsfähigkeit der SCR-Nachrüstsysteme zwar deutlich ab, eine annehmbare NO<sub>x</sub>-Reduktion findet aber dennoch statt

Bei winterlichen Außentemperaturen um den Gefrierpunkt können die Serienemissionen wie im Falle des VW T5 Multivan weiter ansteigen. Der Opel Astra zeigt dagegen, dass sich ab einem gewissen Temperaturniveau die Serienemissionen auf stabilem Niveau einpendeln. Die Außentemperatur an sich hat also kaum Einfluss auf die Höhe des Stickoxidausstoßes, sondern viel mehr die Strategie des Fahrzeugherstellers, wann und in welchem Umfang die Abgasnachbehandlung zurückgefahren wird. Da die Nachrüster diese Strategie nicht kennen, ist die Systemapplikation über den gesamten Temperaturbereich besonders herausfordernd.

Die Minderungsraten im winterlichen Betrieb liegen immer noch bei annehmbaren 38 bis 53 Prozent. Die absoluten geminderten NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen zwischen 700 mg (Opel) und 1.200 mg (VW). Der NO<sub>x</sub>-Grenzwert für niedrige Temperaturen (540 mg/km) wird so zwar teils recht deutlich überschritten, liegt aber zumindest im Falle des Opel im technisch machbaren Bereich. Ein besonders ausgereiftes Energiemanagement, eine effiziente Aufheizstrategie des SCR-Systems und eine gute Wärmekapselung der SCR-Komponenten können dazu beitragen, diesen ambitionierten Grenzwert zu erreichen.

Abbildung 3 NO<sub>x</sub>-Emissionen im winterlichen Realbetrieb (RDE-Messung)



## Bei kühlen Außentemperaturen steigen nicht nur die Serienemissionen, auch die Warmlaufphase des SCR-Systems verlängert sich

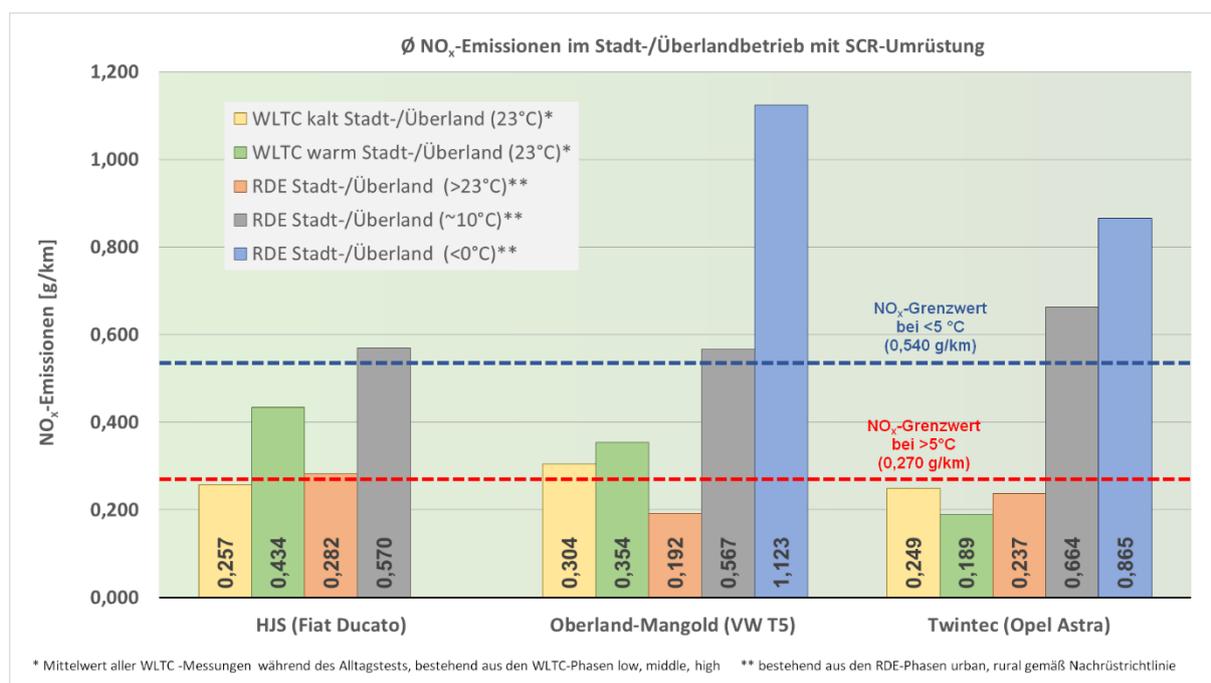
Betrachtet man den Stadt- und Überlandbetrieb, liegen die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Opel Astra im WLTC sowohl direkt nach Motorstart als auch mit betriebswarmem Motor deutlich unter dem vorgeschlagenen NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 270 mg/km. Das bestätigt auch die RDE-Messung bei sommerlichen Temperaturen. Die beiden Transporter können diesen Wert dagegen trotz beachtlicher NO<sub>x</sub>-Reduktionsrate im WLTC nicht gänzlich unterschreiten. Es gilt jedoch zu beachten, dass sowohl der Fiat Ducato, als auch der VW T5 nach Abgasnorm Euro 5 N1 III bzw. nach Euro 5 M1 (M1 für soziale Zwecke) homologiert sind. Daher gilt für beide Fahrzeuge ein

NO<sub>x</sub>-Zulassungswert von 280 mg/km (statt 180 mg/km für Pkw). Rechnet man nun wie bei den Pkw mit dem Faktor 1,5 zum Zulassungswert, würde der NO<sub>x</sub>-Grenzwert um von Fahrverboten ausgeschlossen zu werden bei 420 mg/km liegen.

Im herbstlichen Betrieb steigen die Serienemissionen deutlich an. Hinzu kommt die längere Warmlaufphase, bis die Abgastemperatur für den Betrieb des SCR-Nachrüstsystem ausreichend hoch ist. In der Summe steigen somit die absoluten Emissionen im Stadt-/Überlandteil gegenüber den Messungen bei wärmeren Temperaturen deutlich an.

Bei sehr niedrigen Temperaturen im Winter wird deutlich, wie wichtig eine effiziente Aufheizstrategie und gut isolierte SCR-Komponenten sind. Die Emissionen direkt nach dem Kaltstart liegen sehr hoch.

**Abbildung 4 NO<sub>x</sub>-Emissionen Stadt-/Überland im WLTC kalt/warm und RDE**



**Erhöhter Energiebedarf von SCR-Nachrüstsystem lässt den Kraftstoffverbrauch ansteigen – für den Serieneinsatz ist ein effizientes Energiemanagement gefordert**

In der Pkw-Nachrüstrichtlinie wurde festgelegt, dass der Mehrverbrauch bzw. der Mehrausstoß an CO<sub>2</sub> max. 6 Prozent betragen darf. Diese Begrenzung des Mehrverbrauchs ist sinnvoll, um den Mehrausstoß des Treibhausgases CO<sub>2</sub> zu limitieren und vor allem die Mehrkosten für den Autofahrer aufgrund eines Verbrauchsanstiegs möglichst gering zu halten.

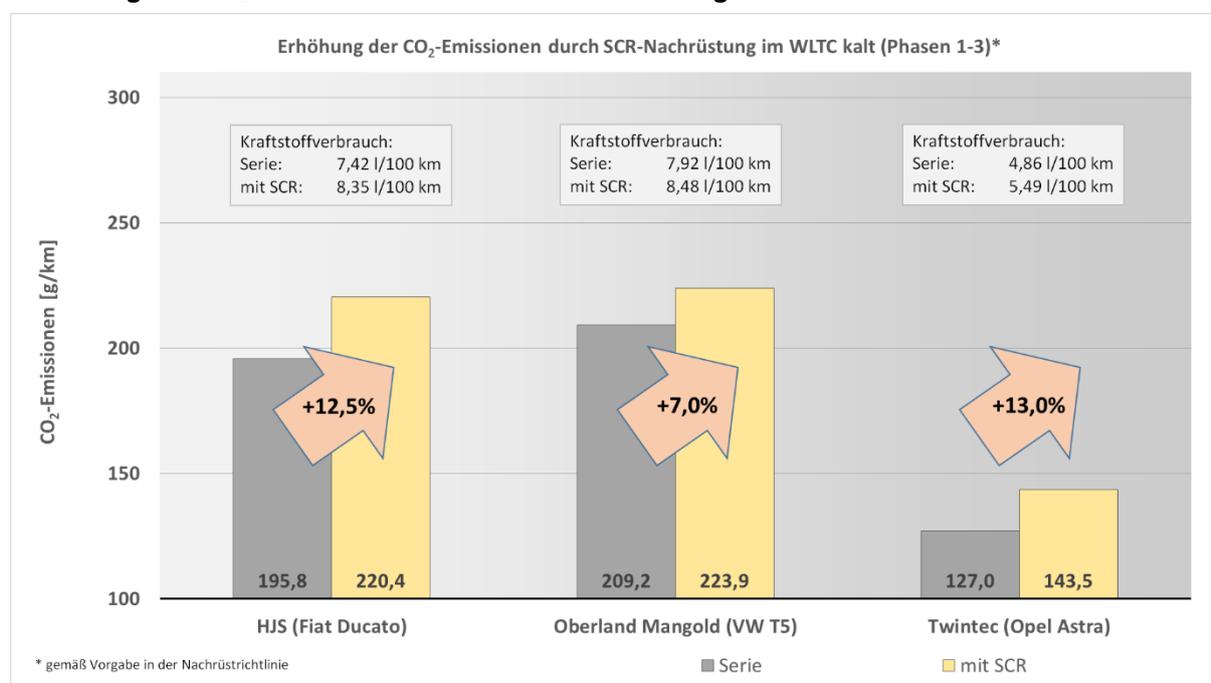
Als Prüfverfahren wurde in der Richtlinie eine Vermessung des Fahrzeuges auf dem Prüfstand vor und nach Umrüstung definiert. Das gibt durchaus Sinn, da nur im Labor reproduzier- und somit vergleichbare Werte zum Kraftstoffverbrauch ermittelt werden können. Eine RDE-Messfahrt ist hierzu ungeeignet, da die Verkehrsbedingungen und der Fahrstil einen wesentlichen Einfluss auf den Verbrauch haben. Die Auswertung des Mehrverbrauchs über die ersten drei Phasen des WLTC berücksichtigt gezielt den direkt nach dem Kaltstart höheren Energieverbrauch, der zum Aufheizen des SCR-Systems nötig ist. Die Anforderungen sind für die Nachrüster besonders herausfordernd, was die Auswertungen der WLTC-Messungen während des Alltagstests zeigen. Der Mehrverbrauch und Mehrausstoß an CO<sub>2</sub> liegt bei allen drei Fahrzeugen teils deutlich über dem zulässigen Erhöhungsfaktor. Während das System von Oberland-Mangold im VW T5 mit einem Mehrverbrauch von 7 Prozent auskommt und nahe

am zulässigen Mehrverbrauch liegt, liegen der Wert des Fiat Ducato (HJS) und des Opel Astra (Twintec) mit 12 bis 13 Prozent deutlich darüber. Beim Opel Astra ist eine Überarbeitung des Energiemanagementsystems nötig, das für den hohen Mehrverbrauch verantwortlich ist. Beim Fiat Ducato konnte aufgrund des vorzeitigen Ausfalls des Fahrzeuges durch einen Unfall die Ursache nicht mehr endgültig ermittelt werden. Der elektrische Heizkatalysator, der zur Anhebung der Abgastemperatur nach dem Kaltstart verbaut wurde, kann hier Anteil haben. Es gilt zu beachten, dass beim Ducato keine Prüfung erfolgen konnte, ob sich der Kraftstoffverbrauch im Serienzustand im Laufe des Alltagstests verändert hat und ein Teil des Mehrverbrauchs somit fahrzeugseitig ursächlich ist.

Betrachtet man den Kraftstoffmehrverbrauch über alle durchgeführten Messungen und Betriebszustände, fällt dieser deutlich geringer aus, als bei Betrachtung des reinen Zulassungstests, der speziell den schlechtesten Fall mit Kaltstart abbildet. Im Durchschnitt über alle durchgeführten Messungen steigt der Verbrauch um rund neun Prozent. Der absolute Mehrverbrauch liegt je nach Messzyklus zwischen 0,46 Liter (Opel Astra) und 0,68 Liter (Fiat Ducato) pro 100 Kilometer. Während nach dem Kaltstart der Mehrverbrauch am höchsten ausfällt, wird bei warmem Motor auf der Autobahn kaum zusätzliche Energie benötigt. Der Mehrverbrauch liegt bei Autobahnfahrt bei nur noch zwei bis vier Prozent.

In der Nachrüstrichtlinie wird lediglich ein zulässiger prozentualer CO<sub>2</sub>-Anstieg vorgegeben und kein absoluter Wert. Besonders sparsame Fahrzeuge sind somit benachteiligt, weil der absolute zulässige Mehrverbrauch sehr gering ausfällt. Der absolute Mehrverbrauch des Opel Astra liegt auf ähnlichem Niveau wie beim VW T5. Da der Serienverbrauch des VW T5 jedoch deutlich höher liegt, liegt der prozentuale Mehrverbrauch bei lediglich 7,0 Prozent, während der Opel Astra bei 13,0 % Prozent. Die Entwicklung einer SCR-Nachrüstung ist für sparsame Fahrzeugmodelle dadurch deutlich anspruchsvoller, als für Fahrzeuge mit hohem Kraftstoffverbrauch.

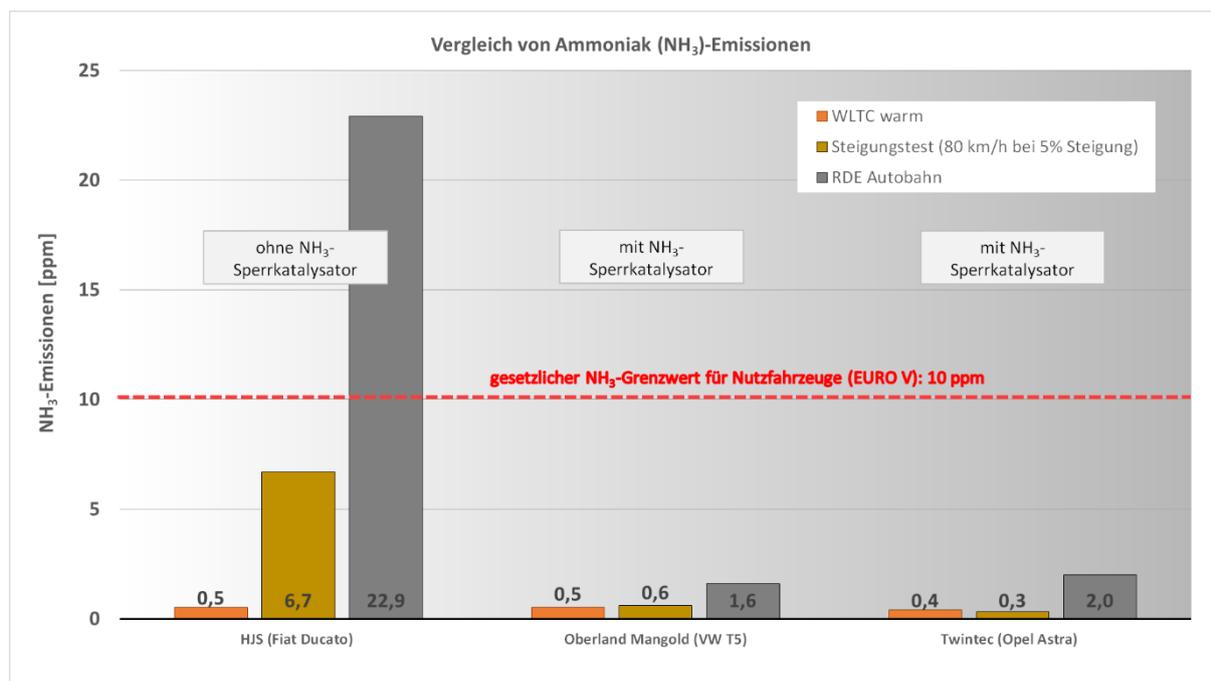
**Abbildung 5 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch SCR-Nachrüstung**



## Sekundäremissionen wie Ammoniak oder Lachgas lassen sich bei SCR-Nachrüstung zuverlässig vermeiden – wenn die richtige Technik verbaut ist

Der im Fahrzeug verwendete Harnstoff wird im Katalysator zunächst in Ammoniak (NH<sub>3</sub>) umgewandelt. Eine Überdosierung von Ammoniak und dessen Austritt in die Umwelt gilt es unter allen Umständen zu vermeiden. Eine entsprechende Vorgabe zum Verbau eines NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysators ist bereits in der Nachrüstrichlinie vorgesehen [2]. Dass dieser Ammoniak-Sperrkatalysator sinnvoll ist, damit Ammoniak-Schlupf zuverlässig vermieden werden kann und überdosiertes NH<sub>3</sub> sicher oxidiert wird, zeigt das Beispiel des Fiat Ducato. Der im Ducato verbaute SCR-Katalysator (Serienteil des Ducato Euro6b) besitzt noch keinen entsprechenden Sperrkatalysator. Im WLTC-Fahrtzyklus, der auch den typischen Stadtbetrieb abbildet, sind keine NH<sub>3</sub>-Emissionen feststellbar. Die gemessenen Werte liegen innerhalb der Messoleranz. Bei speziellen Fahrsituationen, wie einem Steigungstest bei dem lange mit hoher Last gefahren wird oder im Realbetrieb auf der Autobahn besteht die Gefahr einer kurzfristigen Überdosierung, was zu einem Anstieg der NH<sub>3</sub>-Emissionen führen kann. Ohne NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysator können wie im Falle des Fiat Ducato die NH<sub>3</sub>-Werte bei über 20 ppm liegen. Zur Einordnung: Der Grenzwert für Nutzfahrzeuge der Abgasnorm EURO V liegt bei 10 ppm. Mit verbautem NH<sub>3</sub>-Sperrkat kann Ammoniakschlupf dagegen zuverlässig vermieden werden, wie die Messungen des VW T5 und Opel Astra zeigen.

Abbildung 6 Ammoniak (NH<sub>3</sub>)-Emissionen



Unter gewissen Umständen können sich über die katalytische Abgasnachbehandlung Sekundäremissionen wie Lachgas (N<sub>2</sub>O) bilden. Ursächlich hierfür können AdBlue®-Überdosierung, ein ungünstiges NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis oder Beschichtungen der SCR-Katalysatoren sein. Die Nachrüster müssen sicherstellen, dass die Bildung dieses klimaschädlichen Treibhausgases weitgehend vermieden wird. Die Messungen zeigen, dass der Ausstoß von Lachgas bei allen Fahrzeugen vernachlässigbar gering ausfällt. Selbst im schlechtesten Fall (Opel Astra im Autobahnteil des RDE-Zyklus) liegt die Lachgaskonzentration im Abgas bei nur 8 ppm. Lachgas ist zwar 298-fach klimaschädlicher als CO<sub>2</sub>, aber aufgrund der geringen Menge weniger relevant. Umgerechnet in CO<sub>2</sub>-äquivalent würde der maximale zusätzliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf der Autobahn bei rund 3 g/km liegen.

## **Der Geltungsbereich der jeweiligen Nachrüstrichtlinien für Pkw und Handwerker-/Lieferfahrzeuge ist nicht ausreichend spezifiziert – das sorgt für Unsicherheit und unnötige Verzögerungen bei der Serieneinführung von NO<sub>x</sub>-Minderungssystemen**

Die Ergebnisse des Alltagstest zeigen, dass in der Pkw-Nachrüstrichtlinie weitgehend alle relevanten Anforderungen definiert wurden, die für eine zügige und erfolgreiche Einführung von NO<sub>x</sub>-Minderungssystemen notwendig sind. So kann durch Nachrüstung ein effektiver Beitrag zur Luftreinhaltung bei gleichzeitiger Vermeidung von Fahrverboten geleistet werden. Dasselbe gilt auch für die Nachrüstrichtlinie für Handwerker- und Lieferfahrzeuge [4].

Bei der Ausgestaltung beider Richtlinien lässt der genannte Geltungsbereich jedoch Interpretationsspielraum, was insbesondere bei den Nachrüstern für Verunsicherung und somit Entwicklungsverzögerungen sorgt. Die Begrenzung des zulässigen Gesamtgewichts auf 2,8 Tonnen ist in der Pkw-Richtlinie nicht eindeutig erläutert. Insbesondere ist unklar, ob die Beschränkung nur für Nutzfahrzeuge (N1) gilt, oder auch die Pkw-Klassen M1 und M2 betrifft. Zudem ist unklar, ob privat genutzte Nutzfahrzeuge über 2,8 Tonnen nachgerüstet werden können, da sich die technischen Anforderungen im Anhang der Förderrichtlinie befinden. Die Förderrichtlinie adressiert wiederum lediglich gewerblich genutzte Nutzfahrzeuge (Handwerker- oder Lieferfahrzeuge).

Der Geltungsbereich der Richtlinien muss daher schnellstmöglich eindeutiger spezifiziert werden, um den Nachrüstern und Autofahrern Rechtssicherheit bezüglich der Möglichkeit einer SCR-Nachrüstung zu gewährleisten.

## 4 Vorgehensweise und Methodik

### 4.1 Prämissen

Die nachgerüsteten Fahrzeuge wurden einem Alltagstest unterzogen. Die drei Testfahrzeuge wurden durch den ADAC Württemberg e.V. gekauft und vor Start des Alltagstests erneut auf einwandfreien technischen Zustand überprüft.

Alle Emissionsmessungen wurden im ADAC Technik Zentrum in Landsberg am Lech durchgeführt. Das hauseigene Abgaslabor ist vom KBA zertifiziert (Nr. KBA-P 00069-07) und erfüllt die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025:2005 sowie der DIN EN ISO/IEC 17020:2012.

### 4.2 Testfahrzeuge

Neben dem von der Firma Twintec Baumot umgerüsteten Opel Astra 1.7 CDTI gingen zwei leichte Nutzfahrzeuge (VW T5 von Oberland-Mangold und Fiat Ducato von HJS) in den Langzeittest. Der Mercedes B 180 CDI der Firma Dr. Pley SCR-Technology GmbH konnte aus unternehmensinternen Gründen nicht am Test teilnehmen.

Im Opel Astra kommt ein 1,7 l großer Dieselmotor zum Einsatz, der in vielen unterschiedlichen Opel-Modellen verbaut wurde. Die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte liegen gemäß der für diese Fahrzeuge gültigen Abgasnorm Euro 5 (M1) bei 180 mg/km.

Die beiden Transporter sind ebenfalls nach Abgasnorm Euro 5 mit dem bisherigen Testzyklus NEFZ zugelassen, für sie gilt jedoch ein NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 280 mg/km. Das Zulassungsverfahren ist mit dem der Pkw-Modelle identisch, es gelten jedoch die höheren Grenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge. Ausgewählt wurden ein Fiat Ducato Kastenwagen 130 Multijet mit einem Hubraum von 2,3 l und ein VW T5 Multivan mit dem weit verbreiteten 2,0 TDI Dieselmotor. Für den VW T5 gilt ebenfalls der höhere NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 280 mg/km, da das ausgewählte Fahrzeug nach Euro 5 M1 (M1 für soziale Zwecke) homologiert ist.

### 4.3 Hardware-Nachrüstungen

Die Hardware-Nachrüstungen wurden im Rahmen des ersten Projekts [1] von den Nachrüsterfirmen durchgeführt. Jeder Nachrüster musste in einem engen Zeitraum von vier Wochen ein Fahrzeug mit entsprechender Technik zur Reduzierung der Stickoxidemissionen umbauen. Das Ziel war, die Wirksam- und Machbarkeit verschiedener SCR-Systeme in unterschiedlichen Fahrzeugen darzustellen. Entsprechend handelt es sich bei allen vier damals umgerüsteten Fahrzeugen um Funktionsprototypen, die eine prinzipielle Machbarkeit darstellen. Für den Betrieb der Fahrzeuge mit nachgerüstetem SCR-System wurden entsprechende temporäre Ausnahmegenehmigungen des Regierungspräsidiums Stuttgart gemäß § 70 StVZO ausgestellt. Die entsprechenden Gutachten gemäß § 19 (2) / 21 StVZO und § 70 StVZO liegen vor. Vor Start des Alltagstests hatten die Nachrüster sechs Wochen die Gelegenheit, die Nachrüstersysteme weiterzuentwickeln.

#### 4.4 So wird getestet

Vor Beginn des Alltagstests hatten die Nachrüstfirmen die Möglichkeit, ihre SCR-Nachrüstsysteme zu ertüchtigen, d.h. entsprechende Software-Updates der SCR-Steuergeräte sowie mögliche technische Neuerungen in die Fahrzeuge einzubauen, welche in den Detailberichten dokumentiert sind. Weiterhin mussten die Fahrzeuge mit Informationssystemen ausgestattet werden, welche den AdBlue®-Füllstand und die SCR-Funktionsfähigkeit anzeigen. Die Fahrzeuge wurden zudem mit Datenloggern ausgestattet, die über entsprechende Sensoren das Abgasverhalten während des Dauerlaufs kontinuierlich aufzeichnen, etwa die NO<sub>x</sub>-Emissionen vor und hinter dem SCR-System, Abgastemperaturen und AdBlue®-Verbrauch.

Abbildung 7 Projektplanung und Meilensteine



Bevor der Alltagstest über 50.000 Kilometer startete, wurden die Abgasemissionen der drei Fahrzeuge nach ADAC Ecotest-Prozedur ermittelt. Um uneingeschränkt vergleichbare und reproduzierbare Messergebnisse vor und nach Hardware-Umrüstung zu erhalten, sind Labormessungen unumgänglich. Nur im Abgaslabor kann sichergestellt werden, dass sowohl die Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck), als auch das Fahrprofil immer identisch sind und somit die Ergebnisse mehrerer Messungen unter genau gleichen Randbedingungen erzeugt wurden. Im Abgaslabor wurde der seit 1. September 2017 für alle neuen Fahrzeugmodelle gültige Fahrzyklus WLTC gewählt. Um höhere Motorlasten abzudecken, wird zusätzlich der ADAC Autobahnzyklus gefahren.

Die Abgasmessungen wurden gemäß Zulassungsvorschrift bei einer Lufttemperatur von 23 °C durchgeführt. Es wurde sowohl eine Messung mit kaltem Motor (WLTC kalt), als auch eine Messung mit betriebswarmem Motor durchgeführt. Damit können auch die Unterschiede der Emissionen zwischen kaltem und warmem Motor dargestellt werden. Da typische SCR-Systeme erst ab einer gewissen Abgastemperatur funktionieren, konnte durch den Kaltstart auch dargestellt werden, welche Emissionsminderung direkt nach dem Kaltstart möglich ist.

Die Messungen erfolgten sowohl im Abgaslabor auf einem Abgasprüfstand, als auch im realen Straßenverkehr mittels portabler Abgasmessanlage (PEMS). Die Messungen im Abgaslabor und Realbetrieb sind – soweit bei Euro 5-Fahrzeugen anwendbar – an die seit 1. September 2017 gültige Abgasgesetzgebung (WLTP, RDE) angelehnt.



Abbildung 8 VW T5 mit mobiler Abgasmessanlage (PEMS)

Abbildung 9 WLTC-Fahrzyklus

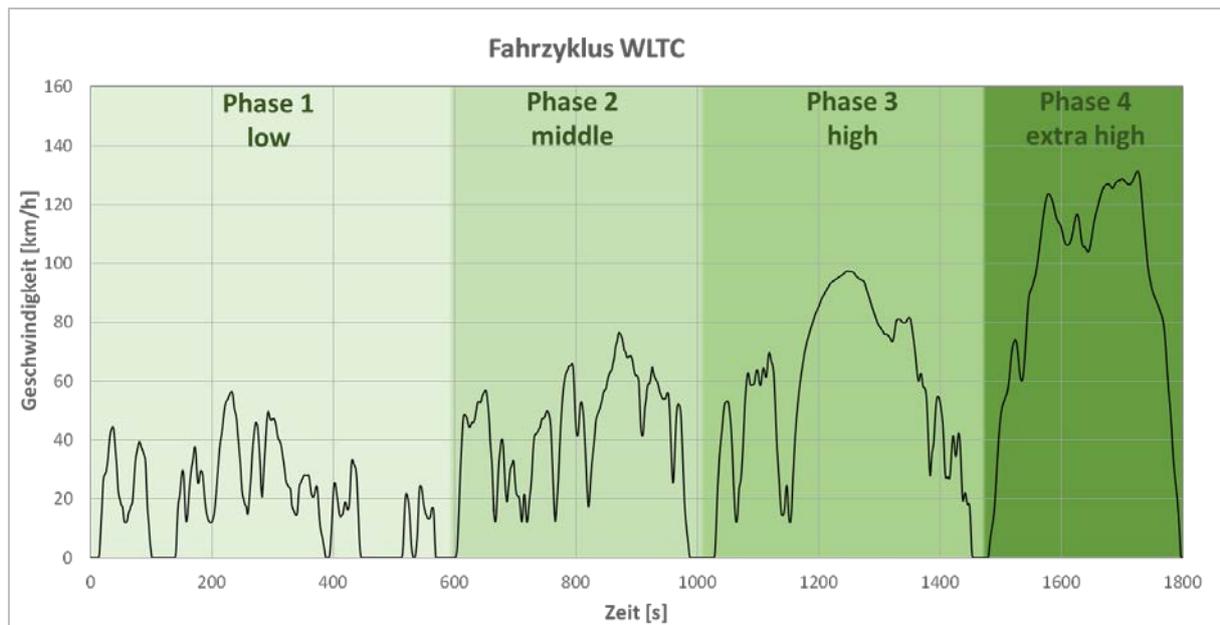
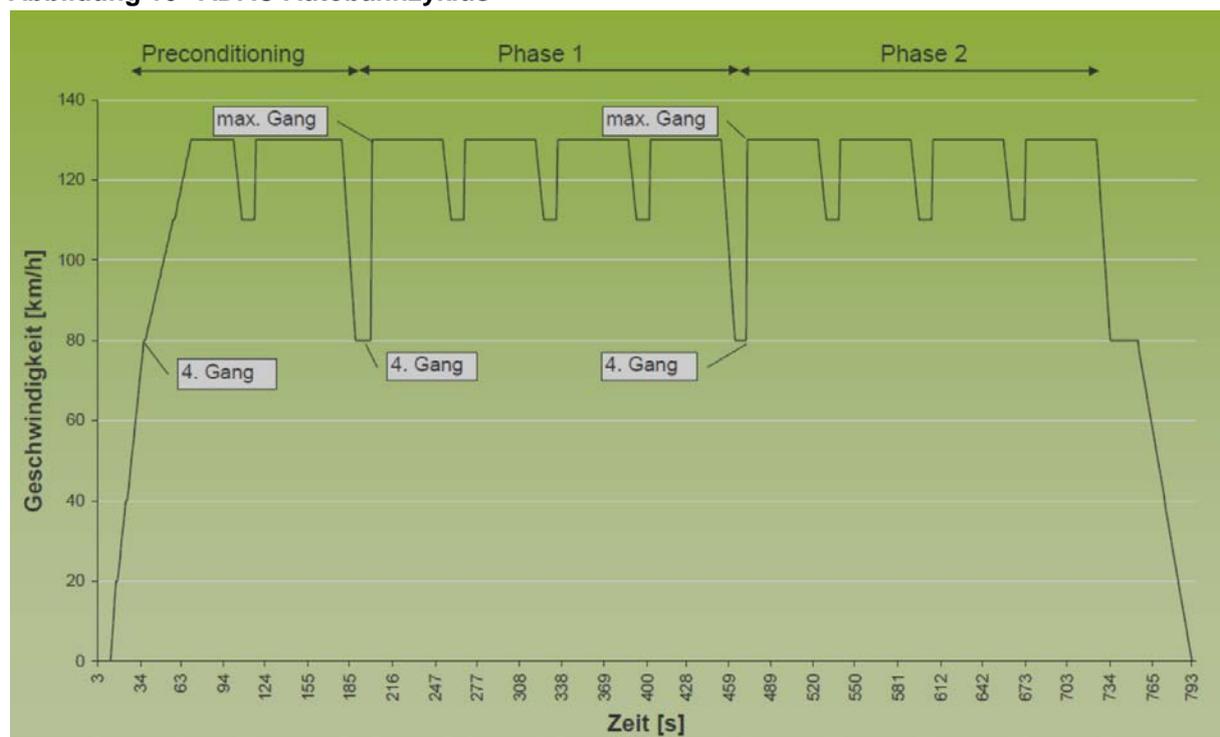


Abbildung 10 ADAC Autobahnzyklus



Als Nachweis der Wirksamkeit der Nachrüstung im realen Verkehr es ist zudem erforderlich, die Emissionen mittels mobiler Abgasmessanlage (PEMS) zu überprüfen. Es muss jedoch beachtet werden, dass RDE-Fahrten in erster Linie dazu dienen, die Robustheit der Systeme im Realbetrieb zu prüfen. So muss sichergestellt sein, dass die Emissionswerte auch unter extremen Bedingungen ein gewisses Limit nicht überschreiten. Da die nicht konstanten Umwelt-

bedingungen nicht nur Einfluss auf die Fahrzeugemissionen haben sondern auch die Messgenauigkeit der mobilen Abgasanlagen beeinflussen, wurden die höheren Anforderungen an eine mobile Messtechnik vom Gesetzgeber berücksichtigt. In der Euro 6d-TEMP Abgasgesetzgebung wird daher bei RDE-Messungen ein Konformitätsfaktor (CF) von 2,1 gegenüber dem Grenzwert für die Stickoxidemissionen zugelassen.

Bei den Labormessungen wurden folgende Abgaskomponenten untersucht und ausgewertet:

**Tabelle 1 Gemessene Abgaskomponenten WLTC**

Kraftstoffverbrauch*	FC [l/100 km]
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub> [g/km]
Kohlenmonoxid	CO [g/km]
Kohlenwasserstoff	HC [g/km]
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub> [g/km]
Stickstoffmonoxid	NO [g/km]
Stickstoffdioxid	NO <sub>2</sub> [g/km]
Partikelmasse	PM [g/km]
Partikelanzahl	PN [1/km]

\* berechnet über kohlenstoffhaltige Komponenten im Abgas

Bei den RDE-Fahrten wurden folgende Emissionen erfasst und ausgewertet:

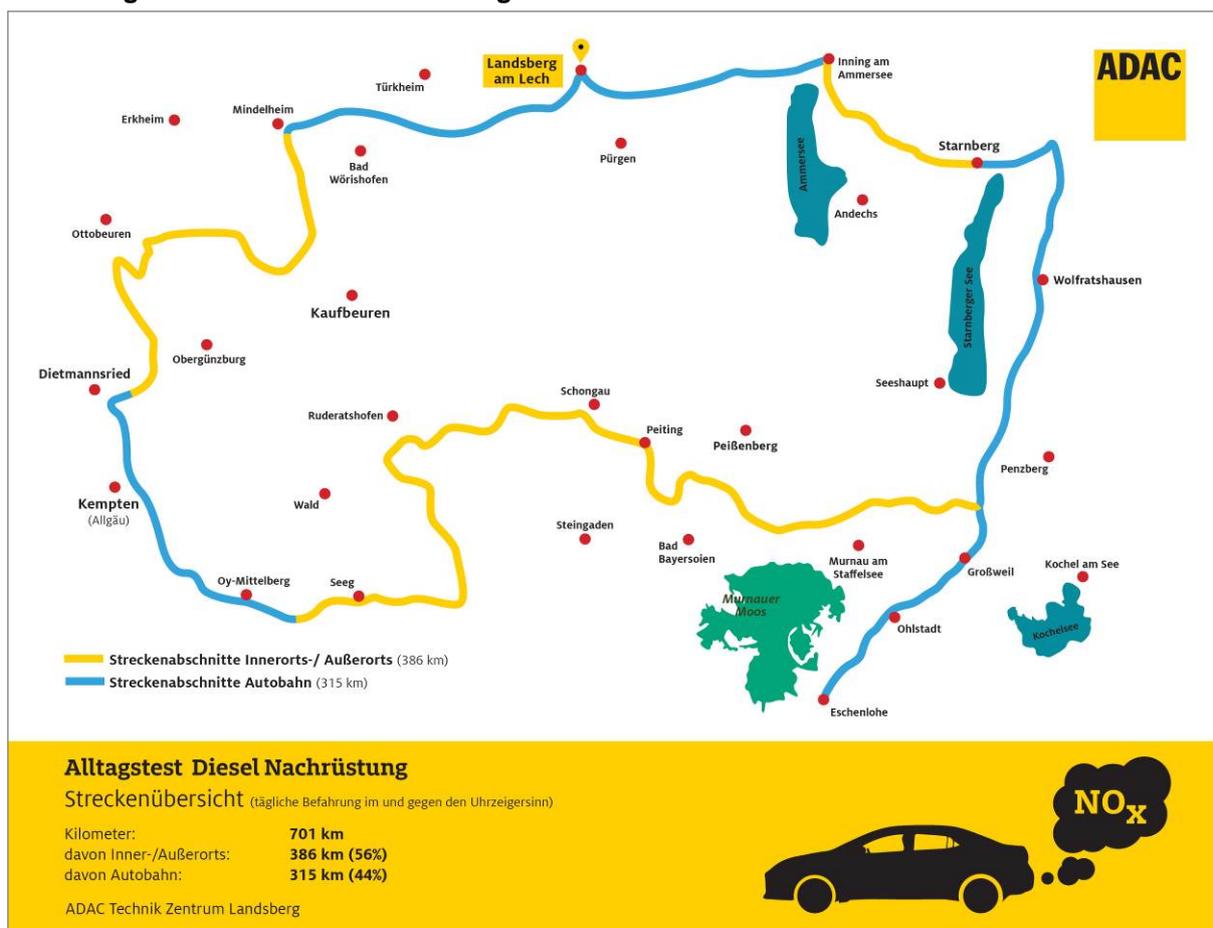
**Tabelle 2 Gemessene Abgaskomponenten RDE**

Kraftstoffverbrauch*	FC [l/100 km]
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub> [g/km]
Kohlenmonoxid	CO [g/km]
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub> [g/km]
Stickstoffmonoxid	NO [g/km]
Stickstoffdioxid	NO <sub>2</sub> [g/km]
Partikelanzahl	PN [1/km]

\* berechnet über kohlenstoffhaltige Komponenten im Abgas

Anschließend starteten die Testfahrzeuge in den Alltagstest und fuhren dabei täglich eine fest definierte Strecke von rund 700 km, die geographisch betrachtet aus 56 Prozent Inner- und Außerortsanteil sowie rund 44 Prozent Autobahn besteht. Täglich wurde dabei ein Kaltstart bei unterschiedlichen Außentemperaturen abgebildet. Die Streckenlänge betrug einfach ca. 350 km und wurde täglich einmal im und einmal gegen den Uhrzeigersinn gefahren. Die ausgewählte Strecke nutzt der ADAC bereit seit rund zehn Jahren zur Durchführung von Reifenverschleißtests. Durch den Einsatz von erfahrenen Testfahrer/-innen die regelmäßig die Fahrzeuge durchwechselten, wurde ein möglichst vergleichbares Fahrprofil erreicht. Die Alltagsfahrten fanden tagsüber im normalen Verkehr mit möglichst defensiver und vorausschauender Fahrweise statt. Der tägliche Kraftstoffverbrauch und Außentemperaturen wurden zusätzlich zu den über den Datenlogger aufgezeichneten Werten dokumentiert.

**Abbildung 11 Streckenübersicht Alltagstest**



Alle 10.000 Kilometer wurden die Abgasemissionen erneut im Abgaslabor überprüft, um die Wirksamkeit der SCR-Nachrüstung und ggf. Veränderungen des Abgasverhaltens über den Testzeitraum zu dokumentieren.

Während des Alltagstests mussten sich die drei umgerüsteten Euro 5-Dieselfahrzeuge mehreren Zusatztests unterziehen. Dazu gehörten etwa Messungen von nichtlimitierten Schadstoffen (z.B. Ammoniak NH<sub>3</sub> und Lachgas N<sub>2</sub>O), Prüfungen des Tieftemperaturverhaltens bis hin zur mechanischen Belastbarkeitsprüfung der SCR-Komponenten auf Schlechtwegstrecken.

Zur Messung der nicht limitierten Schadstoffe ( $\text{NH}_3$  und  $\text{N}_2\text{O}$ ) kam ein mobiles FTIR-Spektrometer (Abkürzung für Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) der Firma Ansyco Gasmeter zum Einsatz. Eine zuverlässige Messung des Ausstoßes an Isocyanursäure ( $\text{HNCO}$ ) war mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik nicht möglich.

#### 4.5 So wird ausgewertet

Über die gesamte Dauer des Alltagstests, der Anfang September 2018 startete und sich bis zum Januar 2019 hingezogen hat, wurden über die in den Fahrzeugen verbauten Datenlogger täglich über Sensoren die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen vor und nach SCR, sowie die durchschnittliche Außentemperatur und die eingespritzte AdBlue®-Menge aufgezeichnet. In einem Testtagebuch wurden alle Ereignisse während des Dauertests dokumentiert und ggf. erläutert.

Zur Bewertung der  $\text{NO}_x$ -Minderung wurden angelehnt an die ADAC Ecotest-Prozedur sowohl der WLTC kalt (mit Kaltstart) als auch der WLTC warm (mit betriebswarmem Motor) vor und nach Umrüstung gegenübergestellt. Um eine möglichst realistische Abbildung des Stadtverkehrs zu erhalten, wurden gemäß Prüfverfahren in der Pkw-Nachrüstrichtlinie insbesondere die ersten drei Phasen des WLTC (low, middle, high) ausgewertet. Die vierte Phase (extra-high) bildet dagegen den typischen Außerortsverkehr auf Landstraßen und Autobahnen ab und wurde daher separat dargestellt. Zusätzlich wurden die  $\text{NO}_x$ -Emissionen unter hoher Last auf der Autobahn (ADAC Autobahnzyklus) ausgewertet.

Um auch im Realverkehr (RDE) den typischen innerstädtischen Betrieb abzubilden, wurden speziell die Phasen „urban“ und „rural“ ausgewertet. Diese beiden Phasen liegen in einem ähnlichen Last-/Drehzahlkollektiv wie die oben genannten WLTC-Phasen. Die RDE-Phase „motorway“ wurde dagegen separat dargestellt. Zu einer ähnlichen Bewertungsempfehlung kommen auch die Experten, die im UBA-Bericht zur  $\text{NO}_x$ -Nachrüsttechnologien aus dem Juli 2017 zitiert werden [5].

Da sich die Serienemissionen eines Fahrzeuges je nach Außentemperatur stark verändern können, ist es bei RDE-Messungen – anders als im Abgaslabor, wo immer gleiche Bedingungen herrschen – nicht uneingeschränkt möglich, die Messergebnisse vor und nach Umrüstung gegenüberzustellen. Daher werden bei den RDE-Messungen zusätzlich die über den Datenlogger aufgezeichneten  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ausgewertet und auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen vor SCR zurückgerechnet. Es gilt zu beachten, dass die  $\text{NO}_x$ -Daten vor SCR aus dem Datenlogger nur als Anhaltspunkt dienen und nicht messtechnisch abgesichert sind.

## 5 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1	NO <sub>x</sub> -Emissionen im sommerlichen Realbetrieb (RDE-Messung) .....	8
Abbildung 2	NO <sub>x</sub> -Emissionen im herbstlichen Realbetrieb (RDE-Messung) .....	9
Abbildung 3	NO <sub>x</sub> -Emissionen im winterlichen Realbetrieb (RDE-Messung).....	10
Abbildung 4	NO <sub>x</sub> -Emissionen Stadt-/Überland im WLTC kalt/warm und RDE.....	11
Abbildung 5	CO <sub>2</sub> -Emissionen durch SCR-Nachrüstung.....	12
Abbildung 6	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )-Emissionen .....	13
Abbildung 7	Projektplanung und Meilensteine .....	16
Abbildung 8	VW T5 mit mobiler Abgasmessanlage (PEMS).....	16
Abbildung 9	WLTC-Fahrzyklus .....	17
Abbildung 10	ADAC Autobahnzyklus .....	17
Abbildung 11	Streckenübersicht Alltagstest.....	19

## 6 **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1	Gemessene Abgaskomponenten WLTC .....	18
Tabelle 2	Gemessene Abgaskomponenten RDE .....	18

## 7 Quellenverzeichnis

- [1] Schlussbericht „*NO<sub>x</sub>-Reduzierung an Euro 5 Dieselfahrzeugen durch Hardwarenachrüstung*“ vom 20. Februar 2018. Veröffentlicht unter: [www.adac.de/scr](http://www.adac.de/scr)
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BAnz AT 11.01.2019 B3: "*Bekanntmachung der Technischen Anforderungen an Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Minderungssysteme mit erhöhter Minderungsleistung für die Nachrüstung an Pkw und Pkw-ähnlichen Fahrzeugen (NO<sub>x</sub>MS-Pkw)*" vom 21.12.2018
- [3] Gesetzentwurf der Bundesregierung: *Entwurf eines Dreizehnten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*, Stand: 30.10.2018  
<https://www.bmu.de/gesetz/gesetzesentwurf-eines-dreizehnten-gesetzes-zur-aenderung-des-bundes-immissionsschutzgesetzes/>
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BAnz AT 28.12.2018 B6: "*Bekanntmachung der Förderrichtlinie für die Nachrüstung von mit Selbstzündungsmotor angetriebenen gewerblichen leichten Handwerker- und Lieferfahrzeugen der Klassen N1 und N2 mit einer zulässigen Gesamtmasse von 2,8 Tonnen bis zu 3,5 Tonnen der Schadstoffklassen Euro 3, 4, 5 und 6 mit Stickoxidminderungssystemen*" vom 10.12.2018
- [5] Umweltbundesamt: *Ergänzung der Bewertung zu marktverfügbaren fahrzeugseitigen NO<sub>x</sub>-Nachrüsttechnologien und Bewertung der Nachbesserung*, Stand: Juli 2017  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/uba\\_bericht\\_nachruistung\\_ii\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/uba_bericht_nachruistung_ii_0.pdf)

## 8 Glossar

<b>Abgasprüfstand</b>	<p>Um eine maximale Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen Abgasmessungen auf anerkannten Rollenprüfständen durchgeführt werden. Dabei wird das Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand fixiert. Die Rollen werden permanent geregelt und bilden so die Fahrwiderstände einer Straßenfahrt kontinuierlich ab, also Roll- und Luftwiderstand sowie Steigungen und Beschleunigungen.</p> <p>Um das Verhalten eines jeden Fahrzeuges möglichst genau abzubilden werden sogenannte Fahrwiderstandsdaten (siehe Glossar) eingespielt.</p>
<b>Abgasrückführung (AGR)</b>	<p>Gekühlte Abgase werden über ein kontinuierlich arbeitendes Ventil mit der Einlassluft gemischt und senken so den Sauerstoffgehalt im Brennraum und damit die Verbrennungstemperatur. Dadurch entstehen weniger Stickoxide.</p>
<b>AdBlue®</b>	<p>AdBlue® ist der vom Verband der Automobilindustrie (VDA) geschützte Handelsname für den Harnstoff AUS 32, der zur Reduktion von Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) mittels SCR-System eingesetzt wird.</p> <p>Es handelt sich hierbei um eine hochreine, wasserklare, synthetisch hergestellte 32,5 %ige wässrige Harnstofflösung (chemische Formel: H<sub>2</sub>N-CO-NH<sub>2</sub>). Die Anforderungen an AdBlue® sind in der Norm ISO 22241 festgeschrieben.</p>
<b>Ammoniak (NH<sub>3</sub>)</b>	<p>Ammoniak (NH<sub>3</sub>) ist eine chemische Verbindung von Stickstoff und Wasserstoff. Es ist ein stark stechend riechendes, farbloses und giftiges Gas, das schon bei geringen Konzentrationen zu Tränen reizt und erstickend wirkt.</p>
<b>Ammoniak-Sperrkatalysator</b>	<p>Durch Nachschalten eines Oxidationskatalysators (Sperrkatalysator) an die SCR-Einheit kann ein nicht umgesetzter Ammoniak-Anteil zu N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgewandelt werden.</p>
<b>CAN-Datenbus</b>	<p>Controller Area Network: meist zwei Kupferleitungen, die verschiedene Steuergeräte verbinden und auf die die Steuergeräte sowohl Informationen "senden" als auch Informationen anderer Steuergeräte "empfangen" können.</p>
<b>Dieselpartikelfilter (DPF)</b>	<p>System bei Dieselmotoren, das schädliche Rußpartikel aus dem Abgas filtert und durch sogenannte Regeneration von Zeit zu Zeit den gesammelten Ruß nachverbrennt.</p>

<b>Emissionen</b>	Emission ist der Ausstoß von gasförmigen oder festen Stoffen. Diese können zur Verunreinigung von Luft, Boden oder Wasser führen. Verursacher von Emissionen sind sogenannte Emittenten (die Sender). Als einer der Hauptverursacher für Luftverunreinigung gilt der Verkehr.
<b>Emissionsfaktoren</b>	<p>Das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) stellt Emissionsfaktoren (spezifische Emissionen in g/km) für alle gängigen Fahrzeugkategorien (Pkw, Lieferwagen, schwere Nutzfahrzeuge, Busse und Motorräder) bereit. Die Emissionsfaktoren decken für verschiedene europäische Länder eine breite Auswahl von Verkehrssituationen, Fahrzeuggrößen und Emissionsstufen ab. Die Datenbank beinhaltet alle regulierten und die wichtigsten nicht regulierten Luftschadstoffe sowie den Kraftstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen.</p> <p>Das HBEFA ist ein Werkzeug, das vom Umweltbundesamt im Auftrag der Bundesregierung durch Wissenschaftler in Österreich und der Schweiz entwickelt wurde, um z.B. Emissionskataster zu erstellen.</p>
<b>Emissionsklassen</b>	Für die Genehmigung neuer Fahrzeugtypen werden im Rahmen der europäischen Typgenehmigungsrichtlinie bestimmte Emissionsgrenzwerte festgeschrieben. Diese Stufen Euro 1 bis Euro 6d sind mit den vorgeschriebenen Prüfverfahren Kernelement der europäischen Gesetzgebung zur Begrenzung von Emissionen bei Pkw.
<b>Fahrwiderstandsdaten</b>	<p>Die Fahrwiderstände eines Fahrzeugs im Straßenbetrieb setzen sich aus dem Anfahrwiderstand, dem Luftwiderstand, innerer Reibung (Antriebsstrang, Lager) und dem Rollwiderstand der Reifen zusammen. Durch Ausrollversuche wird eine Fahrwiderstandskennlinie über die Koeffizienten <math>f_0</math>, <math>f_1</math>, <math>f_2</math> erstellt. Anhand dieser Fahrwiderstandswerte kann die Last, die das Fahrzeug im realen Fahrbetrieb überwinden muss, am Rollenprüfstand simuliert werden. Die Ausnutzung von im Prüfprozess erlaubten Toleranzen (z.B. Reifenluftdruck) führte insbesondere beim Verbrauch über tendenziell niedrige Fahrwiderstandswerte zu günstigen Prüfstandergebnissen.</p> <p>Stehen diese Fahrwiderstandsdaten nicht zur Verfügung, können laut 70/220/EWG Fahrzeuge alternativ in Schwungmassenklassen eingeteilt werden (Anh. III, Anl.2, „Andere Einstellmethode“). Die Fahrzeuge werden dann entsprechend ihres Gewichts einer Schwungmassenklasse zugeordnet und die Koeffizienten für die Fahrwiderstandskennlinie der Tabelle entnommen.</p>
<b>Homologation</b>	Typgenehmigung (Zulassung) von Fahrzeugen und Fahrzeugteilen durch eine Behörde (in Deutschland durch das KBA), um eine Genehmigung zum Verkauf zu erhalten.

<p><b>Immissionen</b></p>	<p>Unter Immissionen fasst das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) alle auf Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen zusammen.</p> <p>Durch gesetzlich festgelegte Höchstwerte ist für viele Stoffe die zulässige Immissionskonzentration (i.d.R. in Masse pro Kubikmeter Luft) festgelegt. Der Ausstoß aus der Quelle wird Emission genannt. Jede Immission kann folglich auf einen oder mehrere Emittenten zurückgeführt werden.</p>
<p><b>Isocyan Säure (HNCO)</b></p>	<p>Bei der Thermolyse von Harnstoff entsteht nicht nur das für die Reaktion im SCR-Kat gewünschte Ammoniak, sondern auch Isocyan Säure HNCO. Sie ist sehr reaktiv und neigt als Zwischenprodukt zwangsweise zu Polymerisation und zur Bildung von Folgeprodukten. Isocyan Säure entsteht auch bei Waldbränden und wird im Zigarettenrauch gefunden. Bei niedrigen Konzentrationen (über 1 pptv) werden von der im Körper gut löslichen Isocyan Säure und Cyanat-Ionen gesundheitliche Effekte beobachtet, etwa Arterienverkalkung, Schädigung der Augen, entzündliche Prozesse und Rheuma.</p>
<p><b>Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)</b></p>	<p>Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ist eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Es ist ein unbrennbares, saures und farbloses Gas, das bei niedrigen Konzentrationen geruchlos ist. Es ist gut wasserlöslich. CO<sub>2</sub> ist kein Luftschadstoff im engeren Sinne, es ist zu etwa 0,04 % Bestandteil der „natürlichen“ Luft. CO<sub>2</sub> ist ein Treibhausgas, seine Emission trägt zur anthropogenen Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes bei. CO<sub>2</sub>-Emissionen sind weitgehend proportional zum Kraftstoffverbrauch.</p>
<p><b>Kohlenstoffmonoxid (CO)</b></p>	<p>Kohlenstoffmonoxid (CO) ist eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Es ist ein farb-, geruch- und geschmackloses sowie toxisches Gas. Es entsteht u.a. bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen bei unzureichender Sauerstoffzufuhr. CO wird vom Hämoglobin um 200- bis 300-mal stärker gebunden als Luftsauerstoff, es behindert den O<sub>2</sub>-Transport im Blut und damit die Sauerstoffversorgung des Körpers. Konzentration oberhalb von 0,5 % führen binnen Minuten zum Tod. CO ist eine wichtige Verbindung im Komplex chemischer Umwandlungsprozesse bei der Entstehung von Sommersmog.</p>
<p><b>Kohlenwasserstoffe (HC)</b></p>	<p>Kohlenwasserstoffe sind eine Stoffgruppe chemischer Verbindungen, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Diese Stoffgruppe ist vielfältig, da Kohlenwasserstoffe Kohlenstoffketten, -ringe oder Kombinationen daraus enthalten können. Es gibt mehrere Untergruppen wie Alkane, Alkene, Alkine und Aromaten (Arene). Kohlenwasserstoffe (HC) sind hauptsächlich Bestandteil des Kraftstoffs.</p>

<b>Konformitätsfaktor (CF)</b>	Der Konformitätsfaktor gibt an, um welchen Faktor die NO <sub>x</sub> -Emissionen bei Messung auf der Straße (RDE, Real Driving Emissions) vom Euro 6-Grenzwert abweichen dürfen. Es bildet auch den Einfluss von Ungenauigkeiten des Messverfahrens ab.
<b>Lachgas (N<sub>2</sub>O)</b>	Distickstoffmonoxid (N <sub>2</sub> O), auch als Lachgas bekannt, ist eine chemische Verbindung aus Stickstoff und Sauerstoff und gehört zur Gruppe der Stickoxide. Es ist ein farbloses Gas. In geringen Konzentrationen wirkt N <sub>2</sub> O narkotisch und wurde daher häufig zur Narkose bei leichteren, operativen Eingriffen verwendet. Das Gas kommt in der Atmosphäre zwar nur in Spuren vor, ist aber 298-mal so wirksam wie CO <sub>2</sub> .
<b>NEFZ</b>	Der NEFZ (Neue Europäische Fahrzyklus) war bis 1. September 2017 Grundlage für die Ermittlung der Schadstoff- und CO <sub>2</sub> -Emissionen sowie des Kraftstoff- bzw. Stromverbrauches im Rahmen des Typgenehmigungsverfahrens von Pkw. Die Messungen erfolgen auf anerkannten Rollenprüfständen.  Der erste Teil des NEFZ (Phase 1) repräsentiert den innerstädtischen Fahrbetrieb, bei dem das Fahrzeug am Morgen gestartet (nachdem es über Nacht abgestellt war) und anschließend im Stop-and-Go-Betrieb mit einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h gefahren wird. Der zweite Teil (Phase 2) des Fahrzyklus repräsentiert den außerstädtischen Fahrbetrieb mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Die Testdauer beträgt 1.180 Sekunden bei einer Streckenlänge von 11,01 km (Phase 1 ca. 4 km, Phase 2 ca. 7 km). Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 33,6 km/h (ohne Leerlaufphasen 44,0 km/h).  Die Beschleunigungen sind mit 26 s für 0-50 km/h wenig realitätsnah definiert, sodass die Motoren nur im Bereich niedriger Leistung betrieben werden.
<b>OBD</b>	On-Board-Diagnose: Das seit 2004 in allen Fahrzeugen vorgeschriebene Diagnosesystem überwacht alle abgasrelevanten Systeme und meldet eine Fehlfunktion. Über eine genormte OBD2-Schnittstelle lässt sich über Diagnosegeräte der Fehlerpeicher eines Fahrzeuges auslesen. Das OBD-System greift auf den CAN-Datenbus zu.
<b>Oxidationskatalysator (DOC)</b>	Oxidationskatalysatoren werden zur Abgasreinigung von Dieselmotoren eingesetzt. Die im Abgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) werden in Wasser (H <sub>2</sub> O) und Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) umgewandelt. Mit entsprechender Beschichtung lässt sich das NO <sub>2</sub> /NO Verhältnis im Abgas erhöhen, was für eine stabile Funktion von SCR-Katalysatoren notwendig ist.
<b>PEMS</b>	Portable Messtechnik (PEMS, Portable Emissions Measurement Systems) zur Messung der Emissionen bei Fahrt auf der Straße (RDE, Real Driving Emissions).

<b>RDE</b>	<p>Um die Abgasemissionen im realen Fahrbetrieb besser abbilden zu können, wurden im Rahmen des europäischen Abgasgesetzgebungsverfahrens neben den Emissionsmessungen im vorgeschriebenen Typgenehmigungszyklus auf Abgasprüfständen direkte Messungen der Emissionen bei Fahrt auf der Straße (RDE, Real Driving Emissions) unter Einsatz portabler Messtechnik (PEMS, Portable Emissions Measurement Systems) aufgenommen. So soll sichergestellt werden, dass die Automobilindustrie Abgastechniken einsetzt, die wirksam Emissionen über alle Betriebszustände verringern.</p> <p>Teil der RDE-Gesetzgebung ist eine Prozedur der Bewertung von Straßenfahrten, die ein ausgewogenes Verhältnis von Stadt-, Land- und Autobahnfahrt sicherstellt und extreme Fahrweisen ausschließt.</p>
<b>Referenzkraftstoff</b>	<p>Die Anforderungen an Referenzkraftstoffe (Bezugskraftstoffe) für Emissionsmessungen sind in Anhang IX der VO (EU) 2017/1151 festgeschrieben. Damit wird sichergestellt, dass nur qualitätsgeprüfte Kraftstoffe für die Messungen verwendet werden.</p>
<b>SCR-Technik</b>	<p>Bei der SCR-Technologie (Selective Catalytic Reduction) werden die Stickoxidemissionen (<math>\text{NO}_x</math>), die während des Verbrennungsprozesses im Dieselmotor entstehen, nachmotorisch in einem Katalysator in elementarem Stickstoff (<math>\text{N}_2</math>) und Wasser (<math>\text{H}_2\text{O}</math>) umgewandelt. Notwendig hierfür ist Ammoniak als Reduktionsmittel, das im Fahrzeug aus AdBlue<sup>®</sup> gebildet wird. Es wird in einem separaten Tank im Fahrzeug mitgeführt und wird bedarfsgerecht in den Abgastrakt eingespritzt.</p>
<b>Stickoxide (<math>\text{NO}_x</math>)</b>	<p>Unter Stickoxiden (<math>\text{NO}_x</math>) werden Stickstoffmonoxid (<math>\text{NO}</math>) und Stickstoffdioxid (<math>\text{NO}_2</math>) subsumiert. Zwischen <math>\text{NO}</math> und <math>\text{NO}_2</math> stellt sich nach der Emission ein chemisches Gleichgewicht ein (unter Sommersmog-Bedingungen innerhalb von Sekunden bis Minuten). Daher trägt auch der <math>\text{NO}</math>-Anteil an den <math>\text{NO}_x</math>-Emissionen zur <math>\text{NO}_2</math>-Immissionsbelastung bei.</p>
<b>Stickstoffdioxid (<math>\text{NO}_2</math>)</b>	<p><math>\text{NO}_2</math> ist ein Reizgas für den Atemtrakt, löst sich in Schleimhäuten und erhöht die Anfälligkeit gegenüber Krankheitserregern. Ferner bildet es die Grundlage für weitere schädlich wirkende Stoffe des Sommersmog-Komplexes wie z.B. Ozon (<math>\text{O}_3</math>).</p>
<b>Stickstoffmonoxid (<math>\text{NO}</math>)</b>	<p>Aus <math>\text{NO}</math> kann sich unter Einwirkung von Sauerstoff und anderen Oxidationsmitteln <math>\text{NO}_2</math> bilden. Dementsprechend ist es also wesentlich, sich bei der Minderung von <math>\text{NO}_x</math> nicht nur auf <math>\text{NO}_2</math> zu fokussieren, sondern auch die Emissionen von <math>\text{NO}</math> zu verringern, da sich daraus rasch <math>\text{NO}_2</math> bilden kann – mit den dargestellten negativen Auswirkungen.</p>

<p><b>WLTC</b></p>	<p>Der WLTC (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle) ist der Prüfzyklus im Rahmen des neuen Messverfahren WLTP (Worldwide harmonized Light Duty Test Procedure) und löst somit den NEFZ ab. Die Messungen erfolgen auf anerkannten Rollenprüfständen.</p> <p>Der WLTC umfasst je nach Fahrzeugklasse verschiedene Teil-Zyklen, welche mittlere Fahrweisen von innerstädtischen bis Autobahn-Verkehr abbilden (siehe WLTP). Die Dauer der einzelnen Teil-Zyklen ist in den drei Klassen identisch: low 589 Sekunden, medium 433 Sekunden, High 455 Sekunden, extra-high 323 Sekunden. Sie unterscheiden sich jedoch in den Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerten.</p>
<p><b>WLTP</b></p>	<p>Um realitätsnähere Verbrauchsangaben zu erhalten, hat die UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) im Auftrag der EU-Kommission einen neuen Prüfzyklus WLTC (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle) und ein neues Messverfahren WLTP (Worldwide harmonized Light Duty Test Procedure) zur Ermittlung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie des Kraftstoff- bzw. Stromverbrauches entwickelt. Das neue Prüfverfahren wurde mit VO (EU) 2017/1151 in das Typgenehmigungsverfahren übernommen und ist seit 1. September 2017 für neue Pkw-Modelle vorgeschrieben.</p> <p>Im WLTP sind zahlreiche Bedingungen definiert, dazu zählen unter anderem Schaltvorgänge, Gesamtfahrzeuggewicht (einschließlich Zusatzausstattung, Fracht und Passagiere), Kraftstoffqualität, Umgebungstemperatur sowie Reifenwahl und -druck.</p> <p>Das WLTP definiert drei Fahrzeugklassen entsprechend dem Leistungsgewicht <math>P_{mr}</math> (Motorleistung/Leergewicht in W/kg), für die mehrere Messzyklen WLTC festgelegt wurden. Die Dauer der einzelnen Teil-Zyklen ist in den drei Klassen identisch, sie unterscheiden sich aber in den Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerten.</p> <p>Klasse 1: Fahrzeuge mit <math>P_{mr} \leq 22</math> W/kg; Zyklen: low, medium, low</p> <p>Klasse 2: Fahrzeuge mit <math>22</math> W/kg <math>&lt; P_{mr} \leq 34</math> W/kg; Zyklen: low, medium, high, extra-high</p> <p>Klasse 3: Fahrzeuge mit <math>P_{mr} &gt; 34</math> W/kg; Zyklen: low, medium, high, extra-high. Klasse 3 wird abhängig von der Höchstgeschwindigkeit noch weiter in 3-1 (<math>&lt; 120</math> km/h) und 3-2 (<math>&gt; 120</math> km/h) unterteilt.</p> <p>Für den deutschen Automarkt ist weitgehend nur die Klasse 3b relevant, da Fahrzeuge mit einem Leistungsgewicht <math>&lt; 34</math> W/kg kaum vorkommen und auf Autobahnen schneller als 120 km/h gefahren werden darf.</p>