

TEXTE

22/2020

Fortentwicklung der Abgasuntersuchung

Abschlussbericht

TEXTE 22/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl FKZ 37 17 57 1010
FB000130

Fortentwicklung der Abgasuntersuchung

Abschlussbericht

von

Frank Schneider
Verband der TÜV e. V., Berlin

Harald Hahn
ASA-Verband, Vaterstetten

Prof. Dr. Wolfgang H. Schulz
IERC GmbH, Meerbusch

Helge Schmidt
TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, Essen

Gerhard Wangrin, Manfred Wecking, Fabian Langwald
TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH, Köln

Gerhard Müller
TÜV SÜD Auto Service GmbH, München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

VdTÜV
Friedrichstraße 136
10117 Berlin

Abschlussdatum:

August 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Helge Jahn

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Fortentwicklung der Abgasuntersuchung

Die periodische Abgasuntersuchung (AU) leistet einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität. Durch die AU können hoch emittierende Fahrzeuge detektiert und eine Reparatur bzw. Stilllegung angeordnet werden. Aufgrund neuartiger Abgasreinigungssysteme muss die AU allerdings an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden, um ihre Qualität und Aussagekraft zu optimieren. In diesem Bericht wird untersucht, welche Messverfahren geeignet sind, um defekte und/oder manipulierte stickstoffoxidemissionsmindernde Bauteile und Systeme im Rahmen einer AU an Dieselfahrzeugen erkennen zu können. Stickstoffoxide (NO_x) entstehen im Dieselmotor insbesondere unter Last. Daher können NO_x-mindernde Systeme am aussagekräftigsten unter Aufbringung einer externen Last überprüft werden. Es werden die beiden Messmethoden Rollenprüfstand und Straßenfahrt näher untersucht. Für eine transparente und reproduzierbare NO_x-Messung ist die Einhaltung von Umgebungsparametern wie z.B. einer definierten Temperatur der Abgasnachbehandlungssysteme elementar. Eine sichere Aussage über die Funktion dieser Systeme ist nur möglich, wenn diese bei der Prüfung in Ihrem Arbeitsbereich betrieben werden. Um diese Parameter zu überprüfen ist ein Zugang zu erweiterten OBD-Informationen erforderlich. Es wird eine Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) zur ökonomischen Bewertung einer AU mit neuem Messverfahren durchgeführt. Auch wenn verschiedene Parameter aufgrund noch nicht vorhandener Daten abgeschätzt werden mussten, spricht das Ergebnis der NKA ökonomisch für die Einführung eines neuen Messverfahrens im Rahmen der AU.

Abstract: Further development of exhaust emissions testing

Exhaust emission testing as part of the periodic technical inspection (PTI) makes a vital contribution to improving air quality. Exhaust emissions testing can identify high-polluting vehicles and cause them to undergo repairs or be decommissioned. However, due to the prevalence of new exhaust gas purification systems, exhaust emissions testing needs to be adapted to the current state of the art in order to optimise its quality and validity. This report examines which measurement methods are suitable for detecting defective and/or manipulated components and systems for NO_x emissions reduction in diesel vehicles within the framework of exhaust emissions testing. Diesel engines produce nitrogen oxides (NO_x), especially under heavy load. Therefore, the most effective way to test NO_x-reducing systems is by applying an external load. Two measurement methods, chassis dynamometer and road testing, are examined in greater detail. To ensure transparent and reproducible NO_x measurements, compliance with environmental parameters, such as a pre-defined temperature for exhaust emissions after-treatment systems, is essential. A reliable assessment of the functioning of these systems is only possible if they are tested within their operating range. Access to extended OBD information is required in order to verify these parameters. A benefit cost analysis (BCA) is carried out to provide an economic evaluation of exhaust emissions testing using a new measurement procedure. Even though various parameters had to be estimated because certain data were not yet available, the results of the BCA indicate that the introduction of a new measurement procedure would be economically justified.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	13
1 Ausgangssituation	15
1.1 Hintergrund	15
1.2 Luftqualität in der EU und in Deutschland	15
1.3 Dieselfahrzeuge als eine wesentliche Ursache der verkehrsnahen NO _x - Grenzwertüberschreitungen	16
1.3.1 Abgasrückführung (AGR)	16
1.3.2 Selektive Katalytische Reaktion (SCR)	17
1.3.3 NO _x -Speicherkatalysator oder Lean NO _x -Trap (LNT)	18
1.3.4 Dieselpartikelfilter (DPF)	18
1.3.5 Kombination mehrerer Abgasnachbehandlungssysteme	18
1.4 Gesetzlich vorgeschriebene Emissionsprüfungen	21
1.4.1 Typprüfung	21
1.4.2 Periodische Abgasuntersuchung (AU)	22
2 Internationale Literaturrecherche zu bestehenden Verfahren der Stickstoffoxidmessung	24
2.1 Messgeräte	24
2.2 Äußere Einflüsse auf die Höhe der Stickstoffoxidemissionen	24
2.2.1 Einfluss der Motorlast und Motordrehzahl	24
2.2.2 Einfluss der Außentemperatur	24
2.2.3 Einfluss der Abgasnachbehandlungssysteme und deren Betriebsstrategien	25
2.3 Auswahl von Prüfverfahren	28
2.3.1 Prüfverfahren mit externer Last	28
2.3.1.1 Powercurve und Lug-down Short Test	28
2.3.1.2 KD147 Short Test	30
2.3.1.3 DT80 Short Test und DT60 Short Test	31
2.3.1.4 ASM2050 Short Test	31
2.3.1.5 Testfahrt mit Mini-PEMS	32
2.3.1.6 Zusammenfassung der Prüfverfahren mit externer Last	36
2.3.2 Prüfverfahren ohne externer Last	37
2.3.2.1 Free Acceleration Test nach SAE J1667	37
2.3.2.2 Capelec AGR-Test	38
2.3.2.3 AVL Beschleunigungsrampe	41

2.3.2.4	Spheretech Bosch Methode	42
3	Geeignet erscheinende Prüfverfahren zur Stickstoffoxidmessung im Rahmen der periodischen AU.....	43
3.1	Bewertungsmatrix	43
3.2	Auswahl der weiter zu untersuchenden Prüfverfahren	44
4	Evaluierung der möglichen Prüfverfahren durch Labormessungen (Arbeitspaket 1)	45
4.1	Prüffahrzeug Evaluierungsphase	45
4.2	Lastenheft Fehlerverbau Evaluierungsphase.....	46
4.2.1	Mechanische Manipulation der AGR	46
4.2.2	Mechanische Manipulation des SCR-Systems.....	47
4.2.3	Softwareseitige Manipulationen.....	49
4.2.4	Messreihen und allgemeine Randbedingungen.....	49
4.3	Mini-PEMS	50
4.4	ASM2050.....	53
4.4.1	Messaufbau	53
4.4.2	Messdatenauswertung.....	55
4.4.3	Fazit ASM2050.....	59
4.5	AVL/Capelec.....	59
4.5.1	Testzyklus	59
4.5.2	Messtechnik	60
4.5.3	Messreihen.....	61
4.5.4	Messergebnisse.....	62
4.5.4.1	Serienstand (ohne Fehlerverbau).....	62
4.5.4.2	SCR-Fehler	63
4.5.4.3	AGR-Fehler.....	64
4.5.5	Bewertung der Messergebnisse.....	65
5	Erprobung und Validierung der Messmethoden	66
5.1	Fehlerverbau der Prüffahrzeuge.....	66
5.1.1	Prüffahrzeug „Peugeot“	66
5.1.2	Prüffahrzeug „Mercedes“	67
5.1.2.1	AGR-Fehlerverbau	68
5.1.2.2	SCR-Fehlerverbau	70
5.1.3	Prüffahrzeug „VOLVO“	71
5.2	ASM2050.....	73
5.2.1	ASM2050 / 500N (Rollenprüfstand).....	76
5.2.1.1	Prüffahrzeuge „Peugeot“	76

5.2.1.2	Prüffahrzeug „Mercedes“	82
5.2.1.3	Prüffahrzeug „VOLVO“	86
5.2.2	ASM2050 / 1000N (Rollenprüfstand).....	89
5.2.2.1	Prüffahrzeug „Peugeot“	89
5.2.2.2	Prüffahrzeug „Mercedes“	93
5.2.2.3	Prüffahrzeug „VOLVO“	98
5.2.3	ASM2050 / Straßenfahrt	101
5.2.3.1	Prüffahrzeug „Peugeot“	101
5.2.3.2	Prüffahrzeug „Mercedes“	103
5.2.3.3	Prüffahrzeug „VOLVO“	105
5.3	„Kurztest Straßenfahrt“ (mit Mini-PEMS).....	106
5.4	Ergebnisse/ Zusammenfassung/ Diskussion der Ergebnisse	108
5.4.1	ASM-Zyklus auf dem Rollenprüfstand.....	108
5.4.2	Mini-PEMS Testfahrt/ Kurztest Straßenfahrt	109
6	Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)	110
6.1	Ziel der NKA	110
6.2	Die Einordnung der AU als ökonomisches Gut	110
6.3	Methodische Vorgehensweise	112
6.3.1	Grundlagen der Nutzen-Kosten-Analyse.....	112
6.3.2	Zeithorizont	113
6.3.3	Diskontierungsfaktor	113
6.3.4	Diesel-PKW Euro-6d: Bestandsentwicklung und jährliche Fahrleistung	113
6.3.5	Monetäre Bewertung und Bewertungssatz für NO _x -Emissionen.....	114
6.4	Ermittlung der Nutzen	115
6.5	Ermittlungen der Kosten.....	119
6.5.1	Zeitaufwand und Personalkosten	119
6.5.2	Kosten für die Messgeräte	120
6.6	Nutzen-Kosten-Ergebnisse.....	122
6.7	Limitationen.....	124
6.8	Abschätzung des künftigen Preises für die AU von Diesel-Fahrzeugen.....	125
7	Revisionsvorschlag für die Anpassung der Richtlinie 2014/45/EU und der AU-Richtlinie	126
8	Zusammenfassung	130
9	Quellenverzeichnis.....	134
10	Anhang.....	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Jährliche Durchschnittswerte von NO ₂ im Jahr 2013 für alle EU Mitgliedstaaten [3]	15
Abbildung 2:	Entwicklung der NO ₂ -Jahresmittelwerte 2000-2016 [4]	16
Abbildung 3:	Prinzip des SCR-Systems	17
Abbildung 4:	Effektivität einzelner Nachbehandlungssysteme nach Motorbetriebsbereich [6]	19
Abbildung 5:	Evolution der Motorleistung über 20 Jahre [7]	19
Abbildung 6:	Vergleich von NO _x -Emissionen und Standards für verschiedene EURO Klassen in g/km [11]	21
Abbildung 7:	NO _x -Emissionen über der Motordrehzahl und in Abhängigkeit der Motorlast [20].....	24
Abbildung 8:	Temperatureinfluss auf NO _x . Diesel-Pkw A-F; E: Diesel-Pkw mit LNT, F: Diesel-Pkw mit SCR [21].....	25
Abbildung 9:	NO _x -Emissionen bei WLTP (25°C) E: Diesel mit LNT, F: Diesel mit SCR [21].....	26
Abbildung 10:	NO _x -Emissionen bei CADC (25°C) – E: Diesel mit LNT, F: Diesel mit SCR [21].....	26
Abbildung 11:	Fahrzeug E (LNT): NO _x -Emissionen WLTP (25°C) bei Kalt- und Warmstart [21]	27
Abbildung 12:	Fahrzeug F (SCR): NO _x -Emissionen WLTP (25°C) bei Kalt- und Warmstart [21]	27
Abbildung 13:	Lug-down 3 mode Test [22]	29
Abbildung 14:	Powercurve Short Test [23]	29
Abbildung 15:	KD147 Test (Profil = schwarze Kurve) [25]	30
Abbildung 16:	DT80 Short Test [26]	31
Abbildung 17:	ASM2050 Short Test [26].....	32
Abbildung 18:	Abgasentnahme Mini-PEMS	34
Abbildung 19:	Mini-PEMS Auswerteeinheit.....	34
Abbildung 20:	Mini-PEMS verbaut am Fahrzeug	34
Abbildung 21:	Vergleich EFM und MAF (mass air flow).....	36
Abbildung 22:	Vergleich NO _x Emissionen gemessen mit Mini-PEMS und dem für die Typprüfung eingesetzten PEMS.....	36
Abbildung 23:	Free Acceleration Test nach SAE J1667 [8].....	38
Abbildung 24:	Capelec AGR-Test [26]	39
Abbildung 25:	Ergebnisse SET II [26].....	40
Abbildung 26:	Ergebnisse französische Studie [28]	40
Abbildung 27:	AVL Beschleunigungsrampe [29]	41

Abbildung 28:	Spheretech Bosch Zyklus [29].....	42
Abbildung 29:	Prüffahrzeug Peugeot 308SW (2.0d).....	46
Abbildung 30:	Fahrzeugschein Abgasnorm EU6b inkl. ZB Teil 1.....	46
Abbildung 31:	Detaildarstellungen der AGR-Manipulation 1.....	47
Abbildung 32:	Detaildarstellungen der AGR-Manipulation 2.....	47
Abbildung 33:	Detaildarstellungen der SCR-Manipulation 1.....	48
Abbildung 34:	Detaildarstellungen der SCR-Manipulation 2.....	48
Abbildung 35:	Detaildarstellungen der SCR-Manipulation 3.....	48
Abbildung 36:	Vergleich NTK NCEM / ECM.....	50
Abbildung 37:	ASM2050, Fahrzeug ohne Fehler.....	51
Abbildung 38:	ASM2050, AGR off.....	52
Abbildung 39:	ASM2050, AGR und SCR off.....	52
Abbildung 40:	Messaufbau ASM2050.....	54
Abbildung 41:	Untersuchte ASM2050-Variante.....	54
Abbildung 42:	ASM2050: Parameter ohne Manipulation (Serienstand).....	56
Abbildung 43:	ASM2050: Parameter bei AGR-Fehler.....	57
Abbildung 44:	ASM2050: Parameter bei SCR-Fehler.....	57
Abbildung 45:	ASM2050: Hohe Kat.-Aktivität durch hohe Last.....	58
Abbildung 46:	ASM2050: Verhalten bei DPF-Regenerationsphase.....	59
Abbildung 47:	AVL/Capelec Prüfprozedur.....	60
Abbildung 48:	Messtechnik Fa. Capelec.....	61
Abbildung 49:	Messtechnik Fa. AVL DiTEST.....	61
Abbildung 50:	AVL DiTest-Ergebnisse SCR-Fehler.....	63
Abbildung 51:	AVL DiTest-Ergebnisse AGR-Fehler.....	64
Abbildung 52:	Prüffahrzeug Peugeot 308 BlueHDi 180 EAT8 GT (2.0d), Abgasnorm EU6d-temp.....	66
Abbildung 53:	Fahrzeugschein vom Prüffahrzeug Peugeot 308 BlueHDi 180 EAT8 GT (2.0d).....	67
Abbildung 54:	Prüffahrzeug Mercedes A-Klasse 180d.....	67
Abbildung 55:	Zulassungsbescheinigung Teil 1 des Prüffahrzeuges Mercedes A- Klasse 180d.....	68
Abbildung 56 a-d:	a.) / b.) Motorraum (oben) c.) Schlauch zum ND-AGR (unten links) d.) ND-AGR-Ventil (unten rechts).....	69
Abbildung 57 a-c:	Blende für Hochdruck-AGR-Ventil – a.) Motorraum b.) HD-AGR- Schlauch c.) Blende vor HD-AGR-Schlauch.....	70
Abbildung 58 a-b:	a.) Harnstoffdüse und Abdichtung der Öffnung zur Harnstoffeinspritzung b.) Blindscheibe zur Abdichtung.....	71

Abbildung 59:	VOLVO XC60.....	72
Abbildung 60 a-b:	Detaildarstellungen der AGR-Manipulation	72
Abbildung 61 a-b:	Detaildarstellungen der SCR-Manipulation	73
Abbildung 62:	Fahrprofil einer Messung – mit den Auswertebereichen (Rot 20km/h / Grün 50km/h).....	73
Abbildung 63:	Temperaturverlauf SCR-Kat Peugeot 308 im ASM2050 – Serienstand und AGR-Fehler.....	74
Abbildung 64:	Bereichsdarstellung Konstantfahrt im ASM2050 Straßenfahrt am Peugeot 308 (AGR & SCR-Fehler)	75
Abbildung 65:	Bereichsdarstellung Peakwerte im ASM2050 Straßenfahrt am Peugeot 308 (AGR & SCR-Fehler)	76
Abbildung 66 a-c:	ASM2050 – Rollenlast 500N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / AGR-Fehler	77
Abbildung 67:	Screenshot Fehlerspeicher mit verbautem AGR-Fehler	78
Abbildung 68 a-c:	ASM2050 – Rollenlast 500N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / SCR-Fehler	79
Abbildung 69 a-c:	ASM2050 – Last 500N – Peugeot 308 – Serie / AGR-Fehler(A) / SCR-Fehler(B) / AGR+SCR-Fehler(A+B).....	80
Abbildung 70 a-c:	ASM2050 Serie 500N Mercedes	82
Abbildung 71 a-c:	ASM2050 Fehler AGR 500N Mercedes	83
Abbildung 72 a-c:	ASM2050 Fehler SCR 500N Mercedes.....	84
Abbildung 73 a-c:	ASM2050 Fehler AGR+ SCR 500N Mercedes	85
Abbildung 74:	ASM2050 – Last 500N – Mercedes– Serie / AGR-Fehler(A) / SCR-Fehler(B) / AGR+SCR-Fehler(A+B).....	85
Abbildung 75:	ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, ohne Fehler	86
Abbildung 76:	ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, AGR-Fehler	87
Abbildung 77:	ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, SCR-Fehler	87
Abbildung 78:	ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, AGR- und SCR-Fehler	87
Abbildung 79:	ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, Zusammenfassung.....	88
Abbildung 80 a-c:	ASM2050 – Rollenlast 1000N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / AGR-Fehler	89
Abbildung 81 a-c:	ASM2050 – Peugeot 308 – Serie – Vergleich Rollenlast 500N / 1000N	90
Abbildung 82 a-c:	ASM2050 – Rollenlast 1000N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / SCR-Fehler	91
Abbildung 83 a-c:	ASM2050 – Last 1000N – Peugeot 308 – Serie / AGR-Fehler(A) / SCR-Fehler(B) / AGR+SCR-Fehler(A+B).....	92
Abbildung 84 a-c:	ASM2050 Serie 1000N Mercedes	94
Abbildung 85 a-c:	ASM2050 Fehler AGR 1000 N Mercedes	95

Abbildung 86 a-c: ASM2050 Fehler SCR 1000 N Mercedes	96
Abbildung 87 a-c: ASM2050 Fehler AGR+ SCR 1000 N Mercedes	97
Abbildung 88: ASM2050 – Last 1000 N – Mercedes– Serie / AGR-Fehler / SCR-Fehler / AGR+SCR-Fehler	97
Abbildung 89: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, ohne Fehler	98
Abbildung 90: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, AGR-Fehler	99
Abbildung 91: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, SCR-Fehler	99
Abbildung 92: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, AGR- und SCR-Fehler	99
Abbildung 93: ASM2050 – 1000N, VOLVO XC60, Zusammenfassung.....	100
Abbildung 94: Vergleich ASM2050 – 500 N und ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, AGR- und SCR-Fehler	101
Abbildung 95 a-d: Mini-PEMS Messung am Prüffahrzeug „Peugeot“, a.) Fahrzeug ohne Fehler - b.) AGR-Fehler – c.) SCR-Fehler – d.) AGR+SCR-Fehler.....	102
Abbildung 96 a-d: Mini-PEMS Messung am Prüffahrzeug „Mercedes“, a.) Fahrzeug ohne Fehler - b.) AGR-Fehler – c.) SCR-Fehler – d.) AGR+SCR-Fehler.....	103
Abbildung 97 a-d: Mini-PEMS Messung am Prüffahrzeug „VOLVO“, a.) Fahrzeug ohne Fehler - b.) AGR-Fehler – c.) SCR-Fehler – d.) AGR+SCR-Fehler.....	105
Abbildung 98: Profil des “Kurztest Straßenfahrt“	107
Abbildung 99: Mini-PEMS zur Messung von CO, CO ₂ , NO _x und PN.....	108
Abbildung 100: Entwicklung des Euro-6d-Diesel-Pkw Bestandes im Zeitraum von 2021 bis 2033.....	114
Abbildung 101: Anzahl der bei der AU untersuchten Diesel-Pkw mit Euro-6d pro Jahr für den Zeitraum von 2024 bis 2033	115
Abbildung 102: Übersicht über die Verschlechterungsfaktoren für AGR-Fehler, SCR- Fehler und AGR-SCR-Fehler bei 500 N Rollenast.....	117
Abbildung 103: Übersicht über die Verschlechterungsfaktoren für AGR-Fehler, SCR- Fehler und AGR-SCR-Fehler bei 1000 N Rollenast.....	117
Abbildung 104: Höhe der durch die AU vermeidbaren NO _x -Emissionen in Tonnen bei einer Schadensquote von 1 v.H.	118
Abbildung 105: Jährlicher Nutzen eingesparter NO _x -Emissionen infolge der AU für Zeitraum von 2024 bis 2033 (in Millionen Euro	118
Abbildung 106: Jährliche Personalkosten in Millionen Euro.....	120
Abbildung 107: Anzahl der pro Jahr angeschafften Abgasmessgeräte für den Zeitraum von 2024 bis 2033.....	122
Abbildung 108: Jährliche Investitionskosten in Euro für den Zeitraum von 2024 bis 2033	122
Abbildung 109: Jährliche Nutzen-Kosten-Quotienten für den Untersuchungszeitraum von 2024 bis 2033.....	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Chemische Reaktionen bei einem SCR-Katalysator.....	17
Tabelle 2:	Vergleich von NO _x -Emissionen und Standards für verschiedene EURO Klassen in g/km [11]	20
Tabelle 3:	Exemplarische Auflistung von Ländern mit NO _x -Messung im Zuge der periodischen AU	28
Tabelle 4:	Vergleich Mini-PEMS und für die Typprüfung eingesetztes PEMS.....	35
Tabelle 5:	Stufen des Capelec AGR-Test.....	38
Tabelle 6:	Bewertung des Capelec AGR-Test	39
Tabelle 7:	Bewertung AVL Beschleunigungsrampe [29]	41
Tabelle 8:	Bewertungsmatrix der Prüfverfahren (basierend auf den Bewertungen in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2).....	43
Tabelle 9:	Bewertungsansatz zu Tabelle 8	44
Tabelle 10:	Matrix der Manipulationsmöglichkeiten	49
Tabelle 11:	Messwertliste AVL-Diagnosetool.....	49
Tabelle 12:	NO _x - und CO ₂ -Konzentrationen bei verschiedenen Zuständen des Fahrzeugs (Mittelwert über je 10 Messungen)	53
Tabelle 13:	NO _x - und CO ₂ Konzentrationen bei verschiedenen Zuständen des Fahrzeugs (Mittelwert über je 10 Messungen)	53
Tabelle 14:	ASM2050: Temperaturen (Messgerät: AVL Diagnosegerät)	55
Tabelle 15:	ASM2050 Ergebnisübersicht - Ohne Fehler und mit AGR-Fehler	55
Tabelle 16:	ASM2050 Ergebnisübersicht – SCR-Fehler und AGR+SCR-Fehler.....	55
Tabelle 17:	Capelec-Ergebnisse Serienstand.....	62
Tabelle 18:	Capelec-Ergebnisse SCR-Fehler	63
Tabelle 19:	Capelec-Ergebnisse AGR-Fehler.....	64
Tabelle 20:	Dauer der Phasen bei den durchgeführten Messungen.....	75
Tabelle 21:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 20 km/h – Peugeot 308	81
Tabelle 22:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 50 km/h – Peugeot 308	81
Tabelle 23:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500N und 20km/h – Mercedes A180d	86
Tabelle 24:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500N und 50km/h – Mercedes A180d	86
Tabelle 25:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 20 km/h – VOLVO XC60	88
Tabelle 26:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 50 km/h – VOLVO XC60	88

Tabelle 27:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 20 km/h – Peugeot 308	93
Tabelle 28:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 50 km/h – Peugeot 308	93
Tabelle 29:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 20 km/h – Mercedes A180d	98
Tabelle 30:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 50 km/h – Mercedes A180d	98
Tabelle 31:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 20 km/h – VOLVO XC60	100
Tabelle 32:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 50 km/h – VOLVO XC60	100
Tabelle 33:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 20 km/h – Peugeot 308.....	103
Tabelle 34:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 50 km/h – Peugeot 308.....	103
Tabelle 35:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 20 km/h – Mercedes A180d.....	104
Tabelle 36:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 50 km/h – Mercedes A180d.....	104
Tabelle 37:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 20 km/h – VOLVO XC60.....	106
Tabelle 38:	Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 50km/h – VOLVO XC60.....	106
Tabelle 39:	Ergebnisse im „Kurztest Straßenfahrt“ des Testfahrzeugs „Peugeot“ (Mittelwert über je 3 Messungen).....	107
Tabelle 40:	Ergebnisse im „Kurztest Straßenfahrt“ des Testfahrzeugs „Mercedes“ (Mittelwert über je 3 Messungen).....	107
Tabelle 41:	Beschreibung der Parameter aus der „Nutzen-Kosten-Koeffizient“-Berechnung.....	112
Tabelle 42:	Abstufungen des Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV)	112
Tabelle 43:	Geschätzter Zeitaufwand für die AU	120
Tabelle 44:	Geschätzter Zeitaufwand einer gemeinsam durchgeführten PN- und NOX-Messung	125
Tabelle 45:	Ergänzung der Richtlinie 2014/45/EU	126
Tabelle 46:	„Overview of the main technologies for the control of NO _x emissions from Euro 6 Diesel passenger cars.“ (Taken from Yang et al., 2015).	137
Tabelle 47:	Diesel technology requirements for control of conventional pollutants. EU regulations. (Taken from Posada et al., 2012)	139
Tabelle 48:	Overview specifications NO _x equipment [26].....	140

Tabelle 49:	Messergebnisse ASM2050.....	145
Tabelle 50:	Messergebnisse „Kurztest Straßenfahrt“	146

Abkürzungsverzeichnis

AdBlue	Wässrige Harnstofflösung / eingetragene Handelsmarke des VDA
AGR, EGR	Abgasrückführung, Exhaust Gas Recirculation
ASM	Acceleration Simulation Mode
AU	Abgasuntersuchung
BAR31	Oregon Bureau of Automotive Repair test
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CARB	California Air Resources Board
CUEDC	Composite Urban Emission Drive Cycle
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Diesel Oxidationskatalysator)
DPF	Dieselpartikelfilter
ECU	Electronic Control Unit (Motorsteuergerät)
EFM	Exhaust Flow Meter (Abgasdurchflussmesser)
EOBD	Europäische On-Board Diagnose
Et al.	und andere
etc.	et cetera (und die übrigen)
EU	Europäische Union
FI	Fehlerindikator (Fehlerfaktor)
°C	Grad Celsius
g	Gramm
GPS	Global Positioning System
HU	Hauptuntersuchung
Hz	Hertz
i.d.R.	in der Regel
i.O.	in Ordnung
km	Kilometer
Km/h	Kilometer je Stunde
LNT	Lean NO _x -Trap (Abgasreinigungssystem)
m	Meter
m³	Kubikmeter
Max.	Maximal
mbar	Millibar
mg	Milligramm

AdBlue	Wässrige Harnstofflösung / eingetragene Handelsmarke des VDA
MIL	Malfunction Indicator Lamp
Min.	Minuten
µg	Mikrogramm
N	Newton
NEFZ, NEDC	Neuer Europäischer Fahrzyklus, New European Driving Cycle
NO_x	Stickstoffoxide
OBD	On-Board Diagnose
PEMS	Portable emissions measurement system
PKW	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter (Partikelmasse)
PN	Particulate Number (Partikelanzahl)
ppm	parts per million
PTI	Periodisch Technische Inspektion (Hauptuntersuchung)
RDE	Real drive emission
sec. / Sek.	Sekunden
SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektive Katalytische Reduktion)
UBA	Umweltbundesamt
UpM, rpm	Umdrehungen pro Minute, revolutions per minute
WHO	World Health Organisation (Weltgesundheitsorganisation)
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure

1 Ausgangssituation

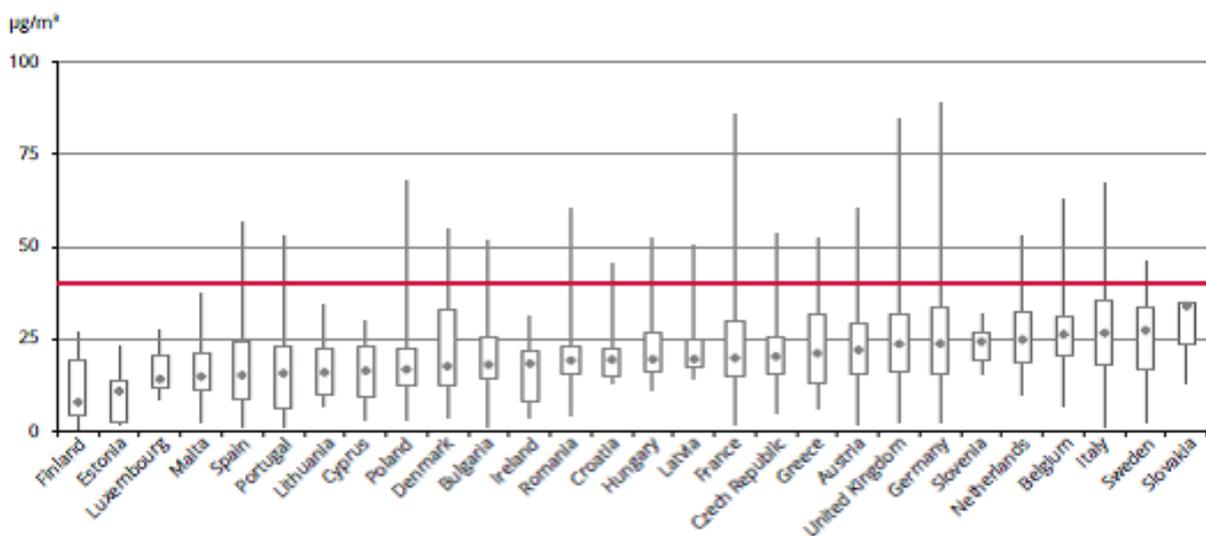
1.1 Hintergrund

Zulässige Stickstoffdioxid (NO_x)-Immissionsgrenzwerte werden in Deutschland insbesondere in urbanen Regionen regelmäßig überschritten. Neben Vertragsverletzungsverfahren der Europäischen Kommission drohen den am stärksten belasteten Städten auch gerichtlich angeordnete Fahrverbote, sogar für moderne Dieselfahrzeuge. Seitdem schenkt sowohl die Bevölkerung als auch die Politik dem Thema Emissionen von Dieselfahrzeugen eine erhöhte Aufmerksamkeit. Zudem führen erhöhte Schadstoffkonzentrationen auch zu einem höheren Gesundheitsrisiko [1]. Von den aus modernen Dieselfahrzeugen emittierten Schadstoffkomponenten stehen neben den Partikeln insbesondere die gesundheitsschädlichen Stickstoffdioxide (NO_x) im Focus [2].

1.2 Luftqualität in der EU und in Deutschland

Die Stickstoffdioxidimmissionen sind generell in der Europäischen Union ein Problem. Ein großer Anteil der Mitgliedstaaten schafft es zum Beispiel nicht, den durchschnittlichen Jahresgrenzwert für NO_2 einzuhalten. Wie in Abbildung 1 dargestellt, zeigten in 2013 die Daten von 19 der 28 EU-Mitgliedstaaten eine Überschreitung des Jahreslimits an mindestens einer ihrer Messstationen. Auch Deutschland findet sich unter diesen 19 Ländern.

Abbildung 1: Jährliche Durchschnittswerte von NO_2 im Jahr 2013 für alle EU Mitgliedstaaten [3]

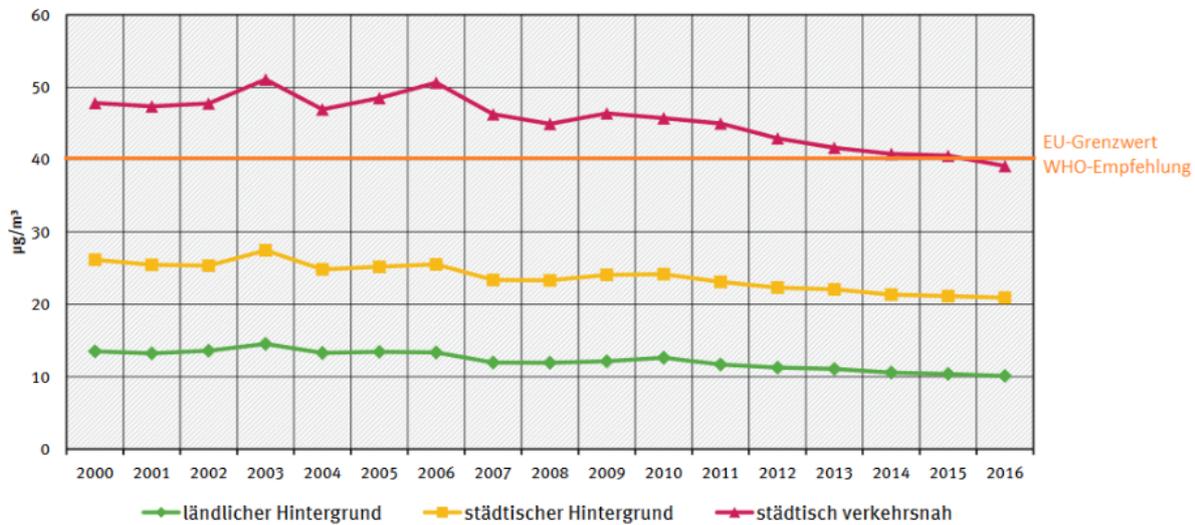


Die Grafik basiert auf den jährlichen Durchschnittskonzentrationen (berechnet aus stündlichen Daten) für jeden Mitgliedstaat. Für jedes Land werden die niedrigsten, höchsten und mittleren Werte (in $\mu\text{g} / \text{m}^3$) an den Stationen angegeben. Der in der EU-Gesetzgebung festgelegte Grenzwert ist durch die rote Linie markiert.

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der vom deutschen Umweltbundesamt (UBA) gemessenen NO_2 -Jahresmittelwerte in Deutschland über einen längeren Zeitraum. Zu erkennen ist, dass der EU-Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, welcher auch der Empfehlung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) entspricht, im verkehrsnahen städtischen Bereich teilweise deutlich überschritten wurde und nicht mit der für Neufahrzeuge in diesem Zeitraum vorgeschriebenen deutlichen Reduzierung der NO_x -Emissionen korreliert.

Abbildung 2: Entwicklung der NO₂-Jahresmittelwerte 2000-2016 [4]

Entwicklung der NO₂-Jahresmittelwerte im Mittel über ausgewählte* Messstationen im jeweiligen Belastungsregime, Zeitraum 2000-2016



* Ausgewählt wurden diejenigen Stationen, die über den ganzen Zeitraum hinweg gemessen haben.

Quelle: Umweltbundesamt 2017

Mittels einer aus Vorjahresdaten abgeleiteten Hochrechnung schätzt das UBA den Anteil der verkehrsnahen Stationen mit Grenzwertüberschreitung im Jahr 2016 auf 57%. In den Städten Stuttgart und München wurde im selben Jahr ein Jahresmittel von teilweise über 75 µg/m³ ermittelt. Lokal betrachtet ist das Problem der Stickstoffoxide folglich sogar noch größer als die Analyse der deutschlandweiten Ergebnisse vermuten lässt. Die Empfehlung der WHO bezüglich des jährlichen Stundenmittelwertes für NO₂ besagt, dass keine Messstation einen Wert von 200 µg/m³ überschreiten sollte. Auch dies wurde in Deutschland von 6% der verkehrsnahen Stationen nicht eingehalten [4].

1.3 Dieselfahrzeuge als eine wesentliche Ursache der verkehrsnahen NO_x-Grenzwertüberschreitungen

Wie im vorangegangenen Kapitel bereits ersichtlich wurde, trägt der Verkehrssektor wesentlich zur Schadstoffbelastung der Luft bei. Deutlich wird dies bei Betrachtung der Differenz zwischen den Kurven städtischer Hintergrund (gelb) und städtisch verkehrsnah (rot) in Abbildung 2. Tatsächlich verursacht der Verkehrssektor ungefähr 40% der europäischen NO_x-Emissionen. Diese werden wiederum zu 80% von Dieselfahrzeugen ausgestoßen. Der Grund dieser starken NO_x-Bildung ist die hohe Verbrennungstemperatur in Verbindung mit dem konzeptbedingten Sauerstoffüberschuss des Dieselmotors ($\lambda > 1$). Genauestens beschrieben wird dieser Zusammenhang mit dem Zeldovich-Mechanismus, auf den hier aufgrund der Komplexität nicht weiter eingegangen wird. Erschwerend kommt hinzu, dass der Anteil des schädlichen NO₂ in NO_x bei Selbstzündern bei 10 – 30% liegt; wesentlich höher als der Anteil bei Fahrzeugen mit Ottomotor [3]. Es ergibt sich der dieseltypische Zielkonflikt: eine Verringerung von NO_x-Emissionen ruft eine Erhöhung der Partikelemissionen hervor und umgekehrt. Durch innermotorische Maßnahmen (Optimierung Einspritzsystem etc.) lassen sich aktuelle Abgasgrenzwerte nicht mehr einhalten. Eine Abgasnachbehandlung ist unumgänglich. Die vier heute etablierten Systeme zur Dieselemissionsreduzierung werden im Folgenden kurz erläutert. Eine zusammenfassende Tabelle in englischer Sprache ist im Anhang zu finden.

1.3.1 Abgasrückführung (AGR)

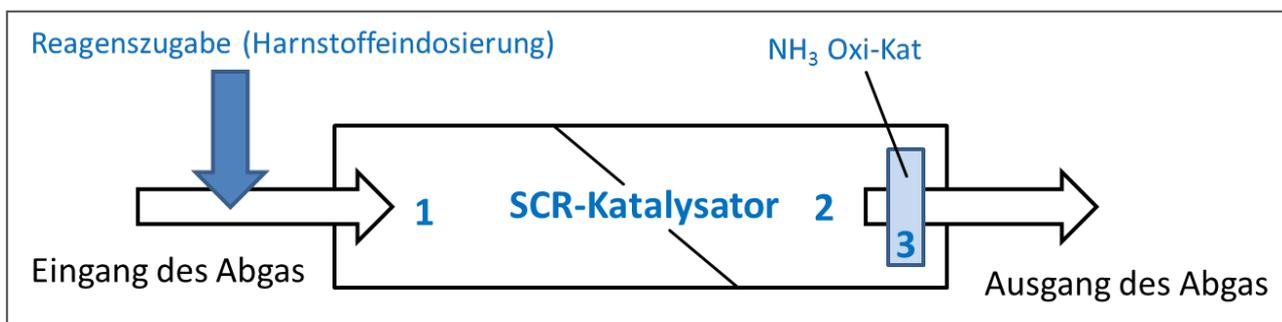
Abgasrückführung (AGR) zählt im Gegensatz zu den untenstehenden drei Nachbehandlungssystemen zu den innermotorischen Maßnahmen. Bei der AGR wird am Abgaskrümmer eine definierte Menge

Abgas entnommen und der Ansaugluft beigemischt. Dadurch wird der Sauerstoffanteil im Kraftstoff-Luft-Gemisch verringert und so die Verbrennungstemperatur in den Zylindern abgesenkt. Unterstützt wird dieser Effekt durch die hohe Wärmekapazität der Hauptbestandteile des Abgases, Kohlendioxid und Wasser. Oftmals wird der Abgasstrom noch zusätzlich gekühlt, bevor er in den Ansaugtrakt geleitet wird. Hohe Abgasrückführaten ziehen zwar geringe Stickstoffoxidemissionen nach sich, fördern jedoch auch die Bildung von Rußpartikeln während der Verbrennung. Da beides durch die Gesetzgebung limitiert ist, gilt hier genau abzuwägen, wie viel Abgas zurückgeführt werden kann. Bei steigender Motorlast nimmt zum Beispiel die Neigung des Dieselmotors zur Emission von Rußpartikeln zu. In solchen Betriebszuständen ist dafür Sorge zu tragen, dass die zusätzlich rußfördernde, hohe Rückführrate zurückgenommen wird. Die Rückführrate ist also stark betriebspunktabhängig. Die Regelung des AGR-Ventils übernimmt das Motorsteuergerät, welches entsprechende Kennfelder hinterlegt hat.

1.3.2 Selektive Katalytische Reaktion (SCR)

Stickstoffoxide können nicht durch einfache Oxidation in unschädliche Stoffe umgewandelt werden, sondern nur durch Abgabe des Sauerstoffs (Reduktion) wieder in den gewünschten elementaren Stickstoff zurückversetzt werden. Die SCR-Technologie bringt Ammoniak in Form des Trägermittels AdBlue (Harnstoff) in den Abgasstrang vor einem SCR-Katalysator ein, mit dessen Hilfe Stickstoffoxide selektiv zu elementarem Stickstoff reduziert werden können. Die Menge des Harnstoffs muss exakt dosiert werden um eine Freisetzung von nicht umgesetztem Ammoniak zu vermeiden (NH₃-Schlupf, Einsatz zusätzlicher NH₃-Schlupfkatalysatoren). Konvertierungsraten können unter optimalen Randbedingungen (Temperatur, Motorbetriebszustand etc.) über 90% betragen. Mit diesem System kann der Dieselzielkonflikt entschärft werden: magerer Betrieb ist nun möglich, da die Steigerung der NO_x-Konzentration mittels SCR kompensiert wird. Ein Nachteil des Systems ist die hohe Mindesttemperatur; unter 200°C reagieren die beteiligten Stoffe nur eingeschränkt miteinander. Abbildung 3 zeigt das Prinzip und Tabelle 1 die ablaufenden chemischen Reaktionen bei einem SCR Katalysator.

Abbildung 3: Prinzip des SCR-Systems



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Tabelle 1: Chemische Reaktionen bei einem SCR-Katalysator

Schritt	Chemische Reaktionsgleichung	Reaktionsname	Beschreibung
1	$(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2$	Thermolyse / Hydrolyse	Ammoniak (NH ₃)-Bildung durch Hydrolyse des Reagens (Harnstoff) bei Temp. > 200°C
2	$4 \text{NO} + \text{O}_2 + 4 \text{NH}_3 \rightarrow 4 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	Standard SCR-Reaktion	NO _x -Reduktion durch selektive katalytische Reduktion. Reaktion abhängig vom NO/NO ₂ Verhältnis
2	$\text{NO} + \text{NO}_2 + 2 \text{NH}_3 \rightarrow 2 \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	Schnelle SCR-Reaktion	
2	$6 \text{NO}_2 + 8 \text{NH}_3 \rightarrow 7 \text{N}_2 + 12 \text{H}_2\text{O}$	NO ₂ SCR-Reaktion	
3	$4 \text{NH}_3 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$		Oxidation am NH ₃ -Schlupfkatalysator

1.3.3 NO_x-Speicherkatalysator oder Lean NO_x-Trap (LNT)

Bei einem LNT werden die Stickstoffoxide während des mageren Motorbetriebs gespeichert. Sobald die maximal speicherbare Menge erreicht ist, wird NO_x reduziert. Der Prozess läuft in diesen drei Schritten ab:

1. Konvertieren von NO zu NO₂ im Speicherkatalysator mittels Edelmetallen
2. Speicherung des NO₂
3. Regeneration durch einen ca. zwei Sekunden andauernden fetten Motorbetrieb

Das enge Temperaturfenster des Systems beträgt 250 – 500°C. Der LNT ist mit ca. 80%-Konvertierungsrate weniger effizient als das SCR-System und wird hauptsächlich in Kleinwagen eingesetzt, bei denen ein SCR-System zu viel Bauraum benötigen würde. Der LNT ist aus diesem Grund in der Regel für die Erfüllung künftiger Abgasnormen nicht geeignet [6].

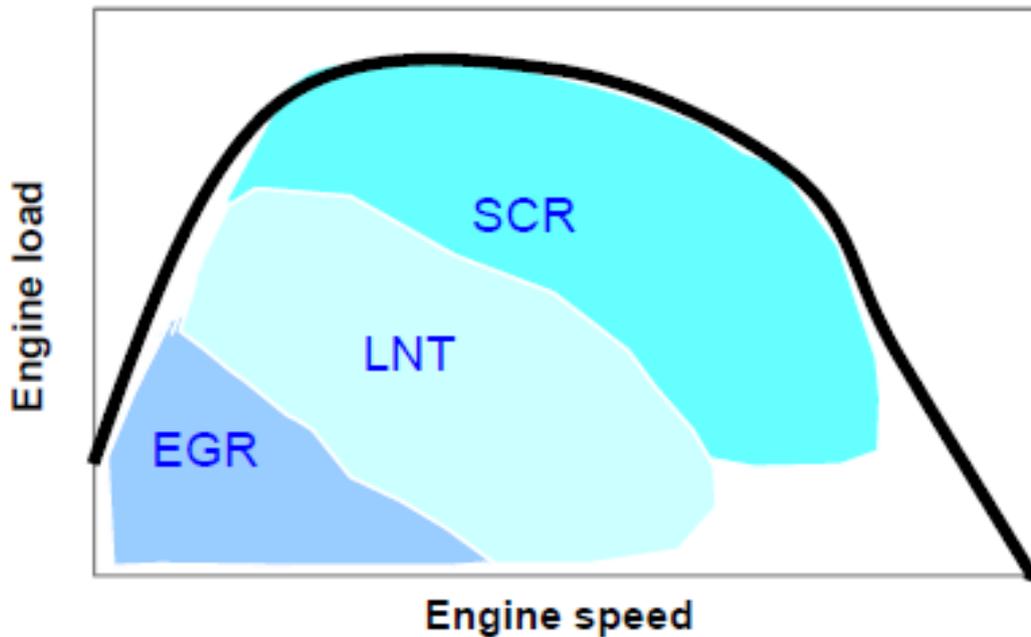
1.3.4 Dieselpartikelfilter (DPF)

Es gibt zwei Arten von Dieselpartikelfiltern (DPF): Wandstromfilter (geschlossenes System) und Nebenstromfilter (offenes System). In der Automobilindustrie kommen überwiegend Wandstromfilter zum Einsatz. Bei diesen wird der Abgasstrom durch die Geometrie dazu gezwungen, eine poröse Wand bestehend aus Filtermaterial zu passieren. Durch Adhäsion bleiben die Partikel am Filter hängen, während sie versuchen durch selbigen zu diffundieren. Das wirksame Volumen des Filters nimmt folglich mit der Motorbetriebsdauer ab und der Gegendruck im Abgassystem steigt. Bei einem Gegendruck, der den Abgasausstoß zu stark behindert, wird von der Motorsteuerung die Regenerationsphase eingeleitet. Diese erfolgt durch Verbrennung der eingelagerten Partikel, wobei der Ruß in CO₂ umgewandelt wird. Dafür ist eine genügend hohe Abgastemperatur notwendig. Günstigster Weise wird diese im normalen Fahrbetrieb erreicht, wie es z. B. auf längeren Autobahnfahrten der Fall ist. Wird das Auto allerdings hauptsächlich innerorts oder auf Kurzstrecken betrieben, müssen andere Maßnahmen ergriffen werden, um die Temperatur zu erhöhen: Nacheinspritzung von Kraftstoff, elektrische Heizspirale oder das Zumischen von Kraftstoffadditiven sind einige der möglichen Lösungen. Nicht zu vernachlässigen ist auch der durch den steigenden Gegendruck, aber vor allem bei der Regeneration entstehende Kraftstoffmehrverbrauch. Die für die Luftqualität relevanten Emissionen PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ und PM_{0,1} werden mit einem einwandfrei funktionierenden Wandstromfilter wirkungsvoll reduziert.

1.3.5 Kombination mehrerer Abgasnachbehandlungssysteme

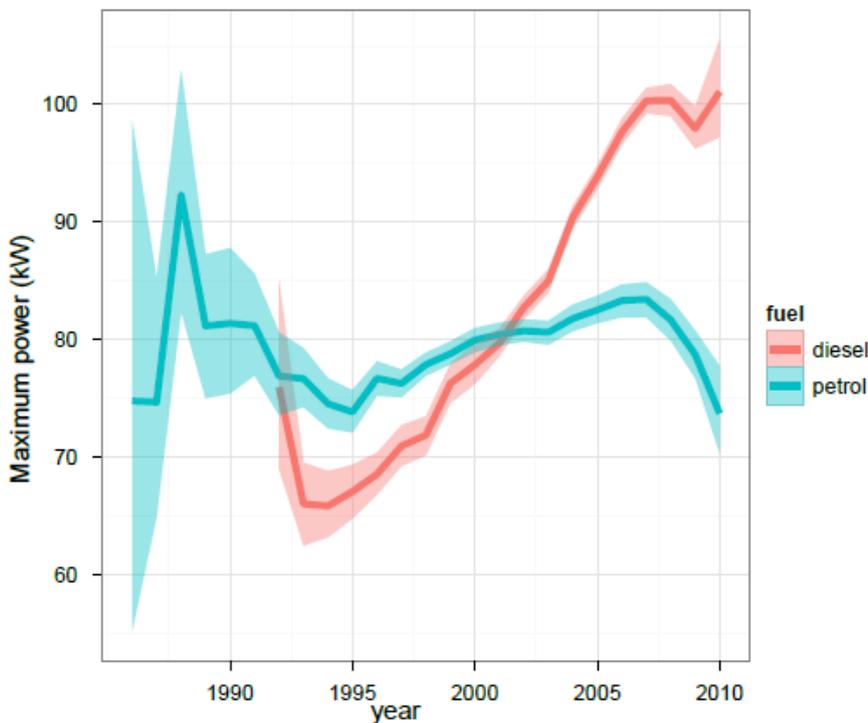
Bei vielen Fahrzeugen sind mehrere der hier erörterten Systeme verbaut. Dies ist sinnvoll, da jedes von ihnen nur einen beschränkten Betriebsbereich hat und sie sich so ergänzen können. Der Komplexität ist dabei kaum Grenzen gesetzt: je nach Fahrzeugklasse, -gewicht etc. werden die Systeme individuell abgestimmt. Auch die in den Steuergeräten abgelegten Kennfelder müssen bei Kombinationen erweitert werden. Aus diesen Gründen gibt es unzählige Möglichkeiten der Abstimmung, sodass die einzelnen Systeme zur Emissionsreduzierung in jedem Modell verschiedene Betriebsbereiche haben. Einen groben Überblick darüber, wann welches System besonders effektiv arbeitet gibt Abbildung 4.

Abbildung 4: Effektivität einzelner Nachbehandlungssysteme nach Motorbetriebsbereich [6]



Neben dem Verbrennungsprozess ist ein weiterer Grund für die höhere NO_x- und Partikelemissionsrate des Dieselmotors im Vergleich zum Benzinmotor die starke Leistungssteigerung der Dieselmotoren über zwei Dekaden. Während die Leistung der Ottomotoren zwischen 1990 und 2010 relativ konstant blieb, verzeichnete der Dieselmotor einen Zuwachs von bis zu 50% (vgl. Abbildung 5). Emissionen und Motorleistung hängen direkt miteinander zusammen [7,9].

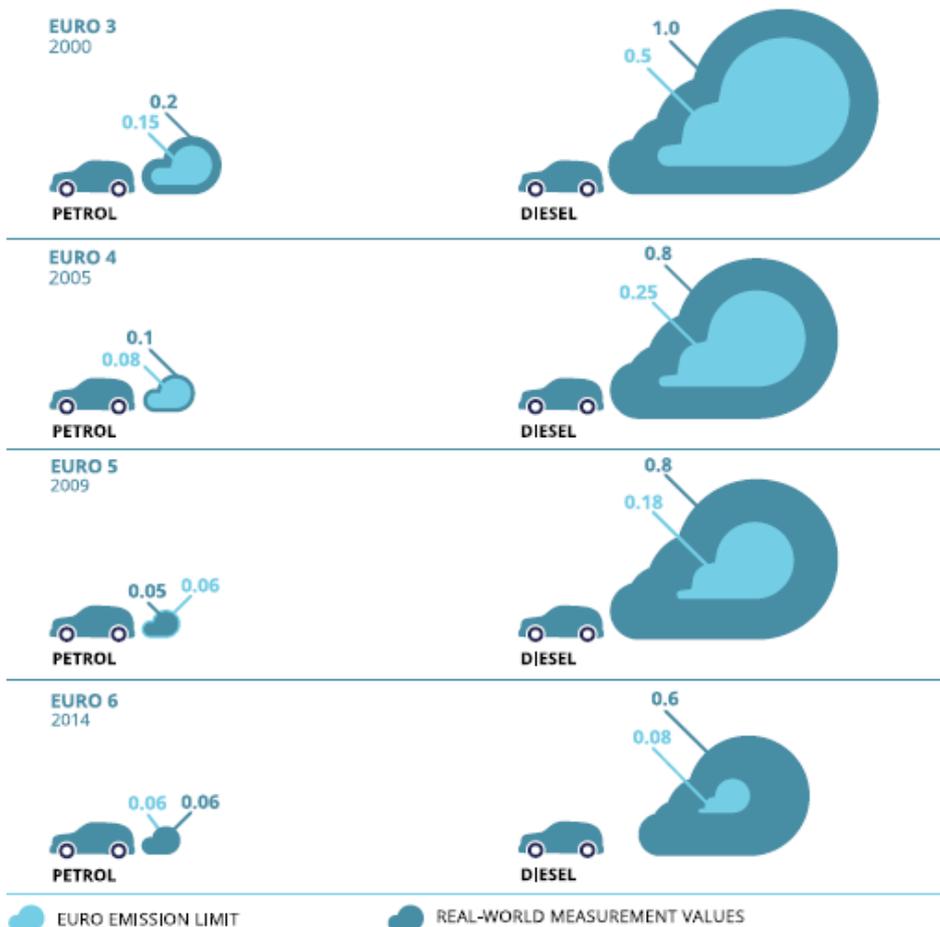
Abbildung 5: Evolution der Motorleistung über 20 Jahre [7]



Um den Zusammenhang von Dieselfahrzeugen zu den Grenzwertüberschreitungen und der teils schlechten Luftqualität in Europa herzustellen, muss zudem der hohe Marktanteil der Diesel-PKW von 53% betrachtet werden. Durch die höhere Verbrennungseffizienz und den daraus resultierenden niedrigen Dieserverbrauch hat der Pkw-Halter Kostenvorteile, die durch geringere Dieselmotorkraftstoffpreise gegenüber Benzin verstärkt werden. In Ländern ohne Preisunterschiede ist die Dieselmotortechnologie unter PKW-Käufern unbeliebter (Marktanteil USA: 0,8%) [8]. Wie in Kapitel 1.2 bereits aufgezeigt, hat sich der verkehrsnahere Jahresmittelwert in Deutschland für NO₂ im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren kaum verbessert – trotz fortschreitender Technik und strenger werdender Abgasvorschriften. Zurückführen lässt sich dies nur teilweise auf ein gestiegenes Verkehrsaufkommen. Laut dem Statistischen Bundesamt stieg der motorisierte Individualverkehr zwischen 2004 und 2010 um lediglich ca. 2% [9]. Erklären lässt sich die Entwicklung der NO₂-Immissionen durch einen Vergleich der Emissionen während des Typprüfzyklus NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) im Labor und den tatsächlichen Emissionen im realen Straßenverkehr. Es ist bekannt, dass der CO₂-Ausstoß und somit der Kraftstoffverbrauch bei diesem Vergleich im Realbetrieb um 20 – 40% höherliegt [10]. Die Differenz ist in Bezug auf NO_x sogar noch deutlicher, wie Tabelle 2 und Abbildung 6 zeigen. Mit den immer strenger werdenden Abgasvorschriften im Zuge neuer EURO-Klassen wuchs diese Diskrepanz weiter, wie das Verhältnis der zwei Blautöne verbildlicht. Die realen NO_x-Emissionen von Fahrzeugen mit Dieselmotor haben sich im Zeitraum von 2000 bis 2016 demnach kaum verbessert, was sich eben auch in den Daten zur Luftqualität widerspiegelt. Bei Benzinfahrzeugen ist der Unterschied dagegen vernachlässigbar gering.

Tabelle 2: Vergleich von NO_x-Emissionen und Standards für verschiedene EURO Klassen in g/km [11]

Abgasnorm	Fahrabschnitt	Otto	Diesel
EURO 3	NEFZ [mg/km]	0,15	0,5
	realer Straßenverkehr [mg/km]	0,2	1
	Differenz	33,3 %	100 %
EURO 4	NEFZ [mg/km]	0,08	0,25
	realer Straßenverkehr [mg/km]	0,1	0,8
	Differenz	25 %	220 %
EURO 5	NEFZ [mg/km]	0,06	0,18
	realer Straßenverkehr [mg/km]	0,05	0,8
	Differenz	-16,7 %	344,4 %
EURO 6	NEFZ [mg/km]	0,06	0,08
	realer Straßenverkehr [mg/km]	0,06	0,6
	Differenz	0 %	650 %

Abbildung 6: Vergleich von NO_x-Emissionen und Standards für verschiedene EURO Klassen in g/km [11]

Die beobachteten Unterschiede resultieren aus verschiedensten Faktoren. Der offensichtlichste ist dabei der Fahrzyklus NEFZ selbst, welcher wenig realistisch ist, denn der Zyklus ist kaum repräsentativ für eine Fahrweise im Straßenverkehr. Des Weiteren erlauben die Euro-Normen den Fahrzeugherstellern eine große Flexibilität, die es ermöglicht, das Testfahrzeug hinsichtlich Verbrauch und Schadstoffausstoß zu optimieren. Dazu gehören zum Beispiel die Erhöhung des Reifenluftdruckes oder die Anpassungen der Motorsteuerung. Das Fehlen von praxisnahen Testmethoden sowie kontinuierlich verschärfte Grenzwerte für CO₂- und Schadstoffemissionen haben die Lücke zwischen Laborversuch und Realität weiter vergrößert [12].

1.4 Gesetzlich vorgeschriebene Emissionsprüfungen

1.4.1 Typprüfung

Wie gezeigt, ist der bisher für die Typprüfung vorgeschriebene NEFZ hinsichtlich der realen Emissionen nicht sehr aussagekräftig. Eine Anpassung dieser unzureichenden Methodik war erforderlich. Deshalb wurden die Vorschriften für die Zulassung neuer Fahrzeuge verschärft. Für neu zu genehmigende Fahrzeugtypen gilt ab 01. September 2017 der neue Prüfzyklus WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure), welcher einen deutlich größeren Last- und Drehzahlbereich abdeckt. Vor allem die Verbrauchswerte werden durch die Umstellung auf den WLTP realitätsnäher. Zudem wurde für die Verbesserung der Emissionsmessung ergänzend zum Prüfstandstest WLTP das RDE (Real Driving Emissions)-Testverfahren eingeführt. Schadstoffgrenzwerte für u. a. Stickstoffoxide und Partikelanzahl müssen hierbei bei einer realen Straßenfahrt nachgewiesen werden. Dafür werden

PEMS-Geräte (Portable Emission Measurement System) am Testfahrzeug befestigt und so direkt der Schadstoffanteil in den Abgasen während der Realfahrt ermittelt. Auch wenn diese Regelungen zum Teil bereits gelten, wird es noch einige Zeit dauern, bis eine größere Anzahl so getesteter Kraftfahrzeuge auf dem Markt verfügbar sind. Die meisten Hersteller haben ihre Fahrzeuge noch vor dem o. g. Stichtag typpenehmigen lassen. Diese Fahrzeuge wurden somit noch nach dem alten Verfahren geprüft. Die ersten mit RDE getesteten Dieselfahrzeuge sind seit 2018 für die Kunden verfügbar. Eine nennenswerte Marktdurchdringung dieser Fahrzeuge von ca. 50%, und damit einhergehend eine signifikante straßenverkehrsbedingte Emissionsreduzierung, ist, bei einem durchschnittlichen Alter der Fahrzeugflotte in Europa von ca. 13 Jahren (Deutschland ca. 10 Jahre), erst bis ca. 2030 zu erwarten. Diese Maßnahme wird sich also erst längerfristig auswirken.

1.4.2 Periodische Abgasuntersuchung (AU)

Die periodische Abgasuntersuchung (AU) leistet, neben der aufwendigen Emissionsmessung im Rahmen der Typprüfung, einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität. Sie stellt sicher, dass alle Kraftfahrzeuge über den gesamten Nutzungszeitraum die vorgeschriebene Abgasemissionsgrenzwerte einhalten. Unzulässige Verschlechterungen des Abgasverhaltens, z. B. durch Alterung, Verschleiß oder Manipulation des Abgasreinigungssystems, können festgestellt und die Fahrzeughalter zur Mangelbeseitigung aufgefordert werden. Damit wirken sich Anpassungen der gesetzlichen Vorschriften bei der AU bereits innerhalb einer Prüfperiode von 2 Jahren positiv auf das Emissionsverhalten der gesamten Fahrzeugflotte und damit auf die Luftqualität aus. Eine Verbesserung der Luftqualität kann somit kurzfristig durch eine an die moderne Abgasreinigungstechnologie angepasste periodische AU unterstützt werden. Nachfolgende Studienergebnisse untermauern die Zweckmäßigkeit der periodischen AU zur Steigerung der Luftqualität: Anyon, Jones, Real & Jamieson beschrieben bereits 1996 den Einfluss vom Alter, der Laufleistung und der Wartung der Fahrzeuge auf die Menge der emittierten Schadstoffe. Wie erwartet steigen die Emissionen, je mehr Kilometer gefahren wurden, je älter das Fahrzeug ist und je schlechter es gewartet ist. Regelmäßige Wartung führte zu einer Schadstoffminderung von 10 – 25% im Vergleich zu einem schlecht gewarteten Fahrzeug. Dabei wurde festgestellt, dass die Reparatur von lediglich 20% der Fahrzeuge zu einem insgesamt 80% geringeren Schadstoffausstoß führte [13]. Dass Verschleiß und Schadstoffausstoß in Verbindung stehen, konnte auch McCormick (et al.) feststellen. Auf einen negativen Partikeltest folgte eine Reparatur verschlissener Bauteile, wie z.B. Einspritzdüsen, Kraftstoffpumpe etc. Daraufhin stiegen wegen des Dieselzielkonfliktes (NO_x- und Partikelemissionen verhalten sich reziprok) die messbaren NO_x-Konzentrationen an. Verschlossene Komponenten der Kraftstoffförderung, Einspritzung und ähnliche führen also nicht nur zu mehr Partikeln im Abgas, sondern verringern auch die Verbrennungstemperatur und somit das NO_x-Aufkommen [14]. Eine weitere Studie vom amerikanischen National Research Council (2001) konnte ähnliche Schlüsse wie Anyon bezüglich der Verteilung ziehen. Demnach verursachen weniger als 10% der gesamten Fahrzeugflotte mehr als 50% aller emittierten Stoffe [15]. Dies wurde von einer texanischen Behörde 2013 nochmals bestätigt [16]. Auch die Europäische Kommission kam 2012 in einem Impact Assessment zu einer ähnlichen Einschätzung: 5 % aller Fahrzeuge verursachen ca. 25 % der Schadstoffemissionen [17]. Allein durch die Ermittlung einer relativ geringen Anzahl (ca. 5% - 7%) der stark emittierenden Kraftfahrzeuge kann eine signifikante Verbesserung der Luftqualität erreicht werden. Der Fokus der AU liegt dementsprechend auf diesen sogenannten High Emittlern. Die heute gültigen Grenzwerte und Vorschriften zur AU sind allerdings nicht mehr in der Lage diese Aufgabe zu erfüllen. In den letzten Jahren wurde die AU zwar weiterentwickelt, jedoch ist es ihr nicht gelungen mit der Entwicklung moderner Motoren- und Abgasreinigungstechnologie Schritt zu halten. Auf Europäischer Ebene gilt ab Mai 2018 die Richtlinie 2014/45/EU vom 3. April 2014, die einige Verschärfungen der Vorschriften für die AU vorsieht (z. B. Absenkung des Trübungsgrenzwertes), grundsätzlich aber an den bestehenden Messverfahren einschließlich der zu überprüfenden Schadstoffe festhält. Somit bleibt auch die Überprüfung der NO_x-Emissionen weiterhin unberücksichtigt [18]. Die EU-Mitgliedstaaten haben über die geltende Richtlinie hinaus die Möglichkeit, eigene, strengere Vorschrif-

ten für ihre nationale AU festzulegen. Die Bundesrepublik Deutschland macht davon Gebrauch. Im Verkehrsblatt 19/2017 [19] wurden u. a. folgende national geltende strengere Anforderungen festgelegt:

- ▶ Ab dem 01.01.2018: Verpflichtende Messung des Abgasstroms (Endrohrmessung)
- ▶ Ab dem 01.01.2019: Neuer Grenzwert für die Abgastrübung bei Euro 6 Dieselfahrzeugen: 0,25 m⁻¹
- ▶ Ab dem 01.01.2021: Einführen eines Verfahrens zur Partikelanzahlmessung

Diese zusätzlichen verschärfenden Vorschriften werden die Aussagekraft der AU künftig deutlich verbessern, insbesondere die Einführung der Partikelanzahlmessung stellt einen wirksamen Fortschritt dar. Aus bereits genannten Gründen erscheint es aber erforderlich, künftig auch die Überprüfung der NO_x-Emissionen in die periodische AU zu integrieren.

2 Internationale Literaturrecherche zu bestehenden Verfahren der Stickstoffoxidmessung

Es gibt weltweit bereits einige Länder, in denen mit jeweils unterschiedlichen Messmethoden und Grenzwerten eine Überprüfung der NO_x -Emissionen im Rahmen einer periodischen AU erfolgt. Im Rahmen einer internationalen Literaturrecherche wurden diese Prüfverfahren identifiziert und bewertet. Anschließend wurden daraus grundsätzlich für die AU in Deutschland geeignet erscheinende Prüfverfahren abgeleitet.

2.1 Messgeräte

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Messgeräte, die grundsätzlich zur Messung von Stickstoffoxidemissionen im Rahmen der AU geeignet sind. Ein Überblick mit ergänzenden Informationen dazu ist im Anhang zu finden.

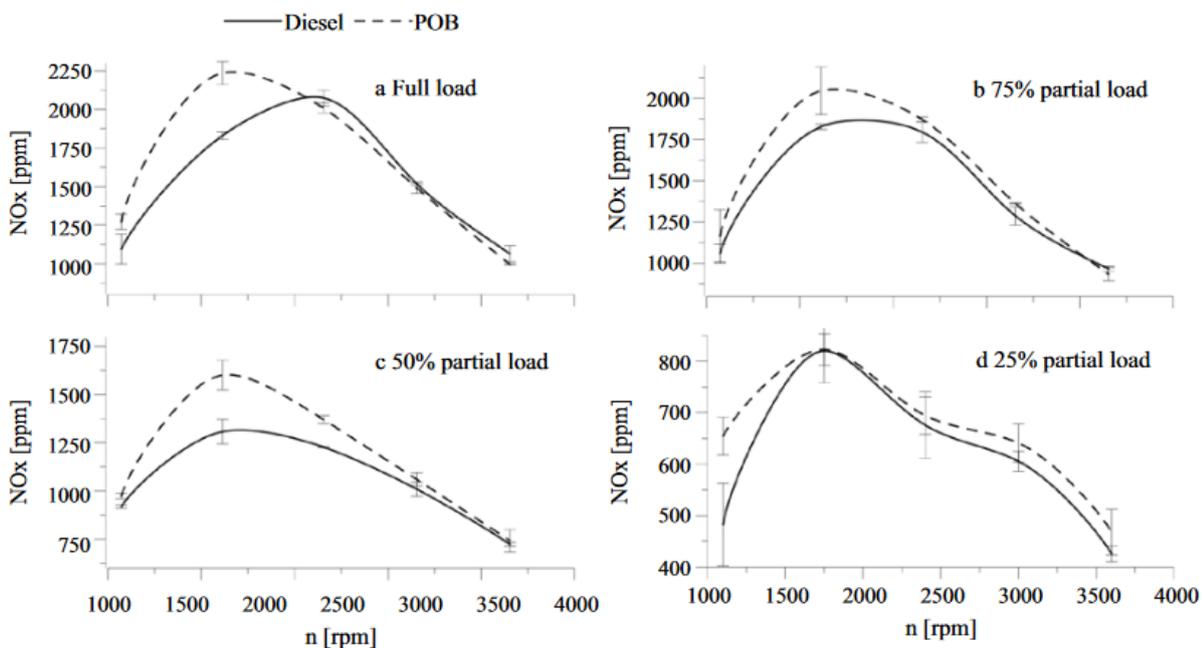
2.2 Äußere Einflüsse auf die Höhe der Stickstoffoxidemissionen

Die Menge an ausgestoßenen Stickstoffoxiden von Dieselmotoren hängt auch von verschiedenen äußeren Faktoren ab. Diese Aspekte müssen bei der später erfolgenden Auswahl geeigneter Prüfzyklen und auch bei der Auswertung von Messergebnissen berücksichtigt werden.

2.2.1 Einfluss der Motorlast und Motordrehzahl

Wie in Abbildung 7 ersichtlich liegt eine eindeutige Korrelation zwischen Motorlast und der Entstehung von NO_x -Emissionen vor: je höher die Last und damit die Verbrennungstemperatur desto höher die NO_x -Emissionen. Außerdem ist eine Abhängigkeit von NO_x -Emissionen und Motordrehzahl ersichtlich. Der Stickstoffoxidwert steigt hier allerdings nicht stetig mit der Drehzahl an, der Peakwert ist bereits bei mittleren Drehzahlen erreicht.

Abbildung 7: NO_x -Emissionen über der Motordrehzahl und in Abhängigkeit der Motorlast [20]

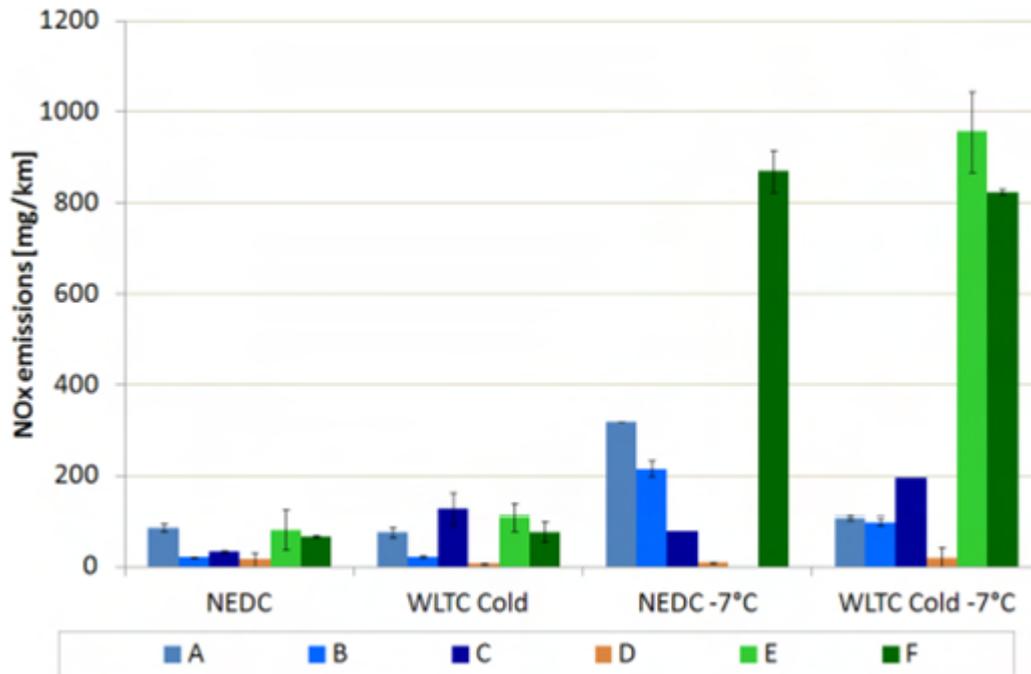


2.2.2 Einfluss der Außentemperatur

Die Testtemperatur beeinflusst die NO_x -Emissionen stark. So haben Untersuchungen für den NEFZ- bzw. WLTP-Zyklus gezeigt, dass die Umgebungstemperatur einen wesentlichen Einfluss auf das Ab-

gasverhalten im Testzyklus hat (Abbildung 8). Grund dafür ist der Arbeitsbereich der Abgasnachbehandlungssysteme (SCR: ab 200°C, LNT: ab 250°C Abgastemperatur).

Abbildung 8: Temperatureinfluss auf NO_x. Diesel-Pkw A-F; E: Diesel-Pkw mit LNT, F: Diesel-Pkw mit SCR [21]



2.2.3 Einfluss der Abgasnachbehandlungssysteme und deren Betriebsstrategien

Deutliche Unterschiede in der Stickstoffoxidkonzentration können auch durch die verschiedenen Nachbehandlungssysteme und deren Konfigurationen zustande kommen. Wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 zu sehen ist, scheint das LNT-System von Fahrzeug E, im Gegensatz zum SCR-System von Fahrzeug F die Stickstoffoxide von Beginn des WLTP an einzudämmen. Bei höheren Geschwindigkeiten verliert das LNT-System an Effizienz. Während des CADC-Fahrzyklusses haben beide Systeme dagegen fast die gleiche Effizienz im urbanen Teil des Tests. Im Schnellstraßenteil ab ca. 2000s steigen die NO_x-Werte unterschiedlich stark an. Die fahrzeugeigenen Systeme zur Emissionsreduzierung scheinen außerdem besser bei einem Kaltstart als bei einem Warmstart zu funktionieren (Abbildung 11 und Abbildung 12). Laut [30] liegt das an den fahrzeugspezifischen Betriebsstrategien der beiden Systeme.

Abbildung 9: NO_x-Emissionen bei WLTP (25°C) E: Diesel mit LNT, F: Diesel mit SCR [21]

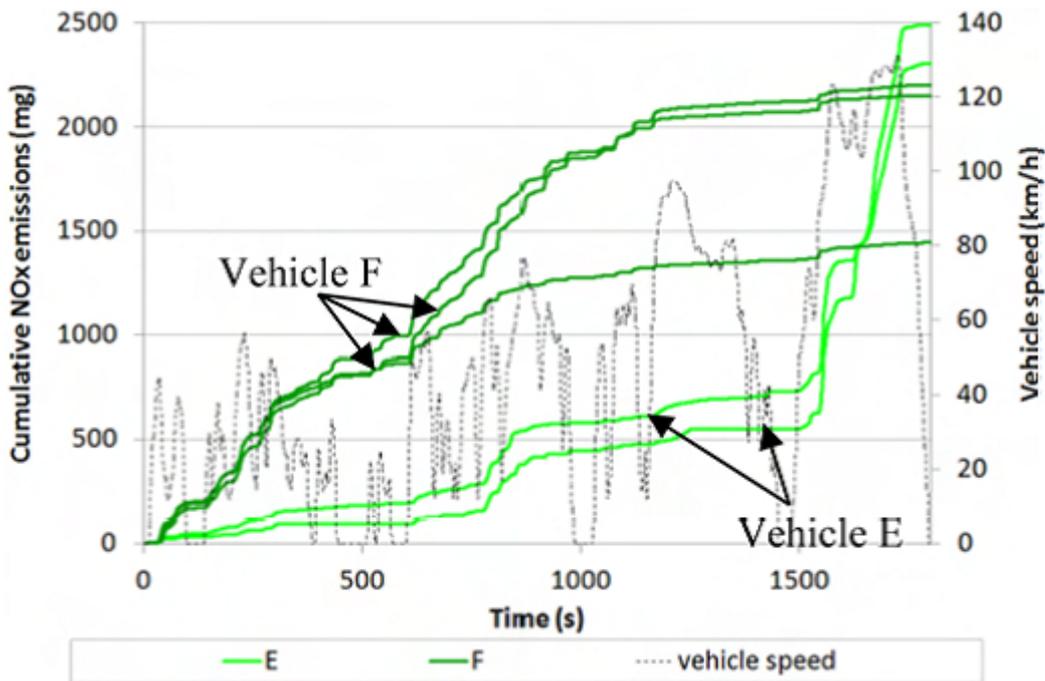


Abbildung 10: NO_x-Emissionen bei CADC (25°C) – E: Diesel mit LNT, F: Diesel mit SCR [21]

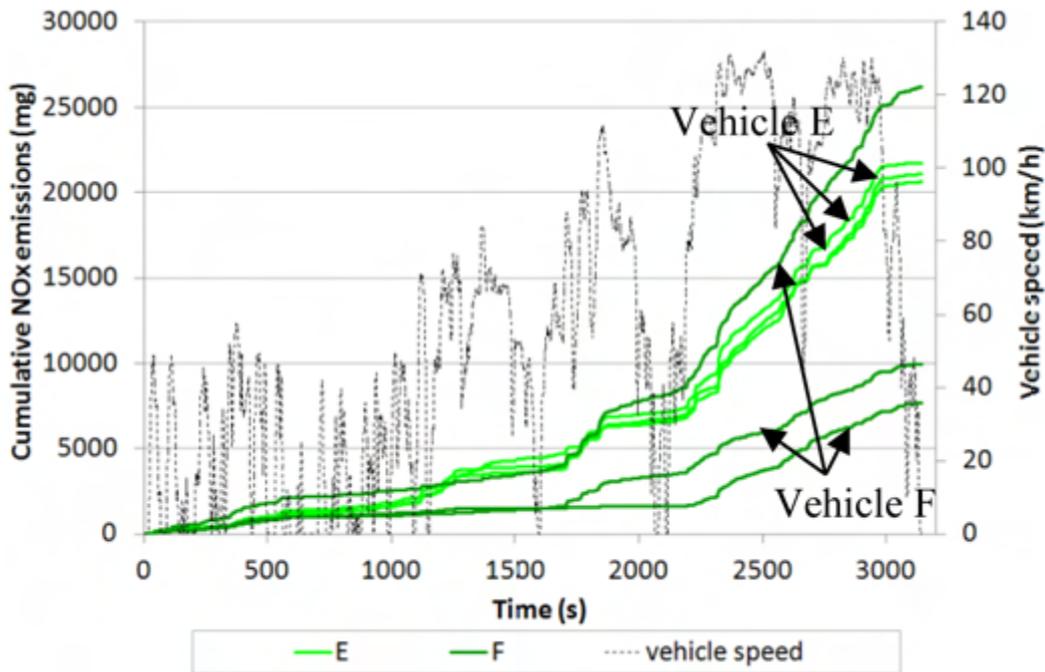


Abbildung 11: Fahrzeug E (LNT): NO_x-Emissionen WLTP (25°C) bei Kalt- und Warmstart [21]

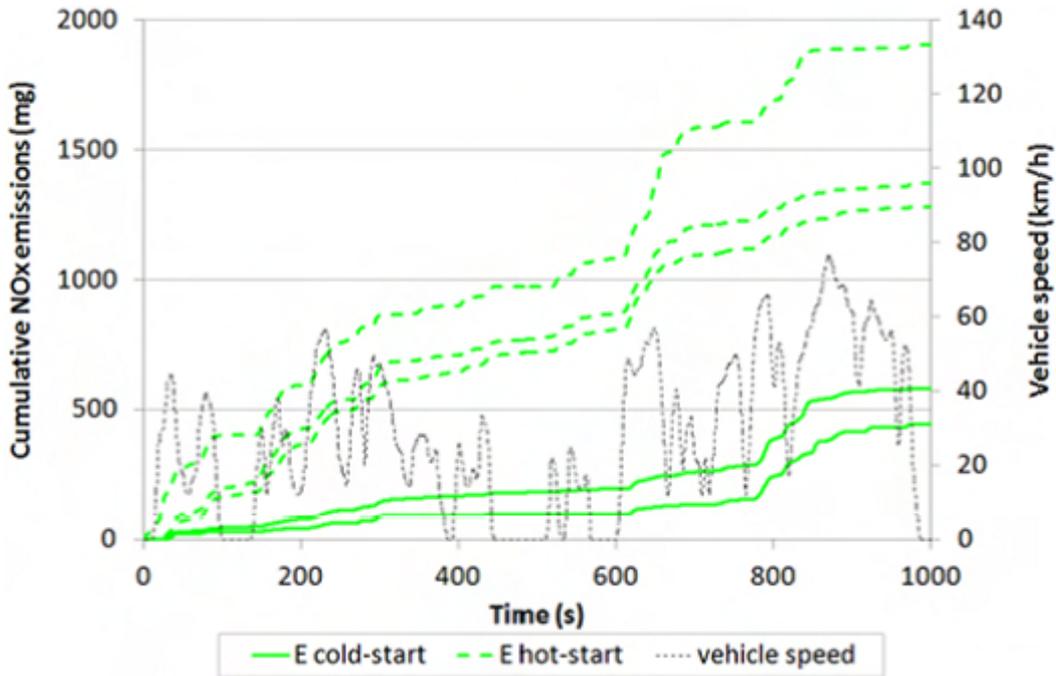
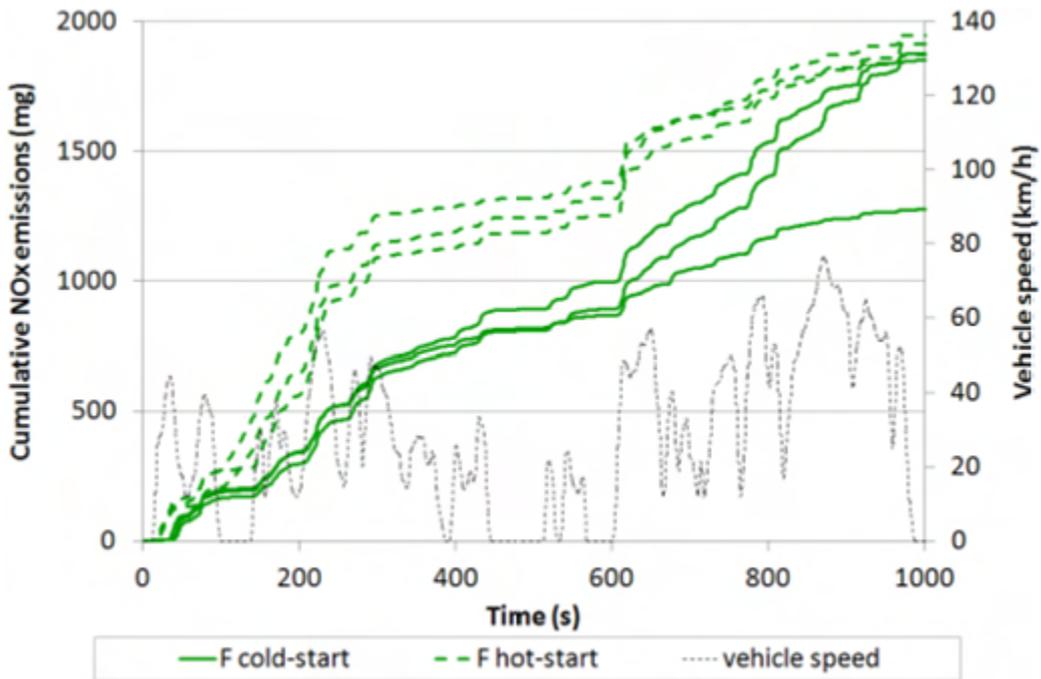


Abbildung 12: Fahrzeug F (SCR): NO_x-Emissionen WLTP (25°C) bei Kalt- und Warmstart [21]



2.3 Auswahl von Prüfverfahren

Es existieren zwei Arten zur Überprüfung der Dieselfahrzeuge im Hinblick auf Stickstoffoxidemissionen während einer periodischen AU:

- ▶ Tests mit extern aufgebrachtener Last: solche Kurztests können an Rollenprüfständen und auf der Straße stattfinden
- ▶ Tests ohne extern aufgebrachte Last: hier stellt die rotatorische Massenträgheit der Motor-komponenten die einzige Motorlast dar, das Fahrzeug steht still

Wie die Literaturrecherche zeigte, wird in einigen Staaten bereits eine Stickstoffoxidmessung während der periodischen technischen Inspektion durchgeführt (vgl. Tabelle 3)

Tabelle 3: Exemplarische Auflistung von Ländern mit NO_x-Messung im Zuge der periodischen AU

Land, Stadt	Gemessene Schadstoffe	Prüfstandtest	Fahrzyklus, Testprozedur
Australien	NO _x , PM, Trübung	Ja	DT80, DT60
China (Peking)	NO _x , HC, CO, Trübung,	Nein	Free Acceleration
USA (Portland, Oregon)	NO _x , HC, CO, Trübung	Ja	BAR31, idle, OBDII
China (Hong Kong)	Trübung	Ja	Lug-down
South Korea	Trübung	Ja	KD147

Nachfolgend sind grundsätzlich geeignet erscheinende Prüfverfahren aufgelistet. Die Bewertung der einzelnen Verfahren erfolgte anhand von entsprechenden Untersuchungen bzw. Erfahrungen aus Studien mit den jeweiligen Prüfverfahren. Ziel der Bewertung ist es, zwei für die AU geeignete Prüfverfahren zu identifizieren, die im nächsten Schritt weiteren praktischen Untersuchungen im Labor unterzogen werden. Für diesen Zweck wurde am Ende ein Vergleich in einer Bewertungsmatrix durchgeführt.

2.3.1 Prüfverfahren mit externer Last

Vorteile:

- ▶ Aufgrund des Einflusses der Motorlast auf die Höhe der NO_x-Emissionen erscheinen solche Tests grundsätzlich geeigneter als ohne Last
- ▶ Fahrzeugspezifische Einschränkungen, wie z. B. die Begrenzung der Abregeldrehzahl, haben hier keinen Einfluss

Nachteile:

- ▶ Teilweise ergeben sich höhere Rüstzeiten für die Vorbereitung der Prüfung (z. B. Sicherung des Fahrzeugs)
- ▶ Die Kosten für die Prüfgeräte sind tendenziell höher und der Platzbedarf größer
- ▶ Die Durchführung der Tests ist i. d. R. aufwendiger

2.3.1.1 Powercurve und Lug-down Short Test

Beide Prüfverfahren finden auf einem Prüfstand statt und werden an dieser Stelle aufgrund ihrer Ähnlichkeit zusammengefasst. Beim Lug-down Test muss mit dem Testfahrzeug eine definierte Geschwindigkeit gehalten werden, während der Rollenprüfstand langsam die Last erhöht. Wenn der Fahrer das Gaspedal bis zum Anschlag drücken muss, um die Geschwindigkeit zu halten, ist das Fahrzeug folglich an der Maximalleistung angelangt und der Prüfstand hält die Last für eine gewisse Zeit. In Abbildung 13 ist der Lug-down 3 mode zu sehen. Dies ist eine Variante des Tests, bei der die Last sogar noch über

die Maximalleistung angehoben wird, was eine Senkung der Geschwindigkeit nach sich zieht. Abbildung 14 zeigt den Powercurve Test von der Kalifornischen Behörde CARB (California Air Resources Board). Der Unterschied zum Lug-down Test ist, dass das Fahrzeug von Beginn an mit Vollgas gegen die steigende Last des Prüfstandes beschleunigt wird. Sobald der Punkt mit Maximalleistung erreicht wurde und die Geschwindigkeit der Rollen sinkt, ist der Test beendet. Der Zyklus wurde in einer Studie zur Effektivität von Stickstoffoxidmessungen an LKWs verwendet, um eine möglichst große Last zu erreichen [32].

Abbildung 13: Lug-down 3 mode Test [22]

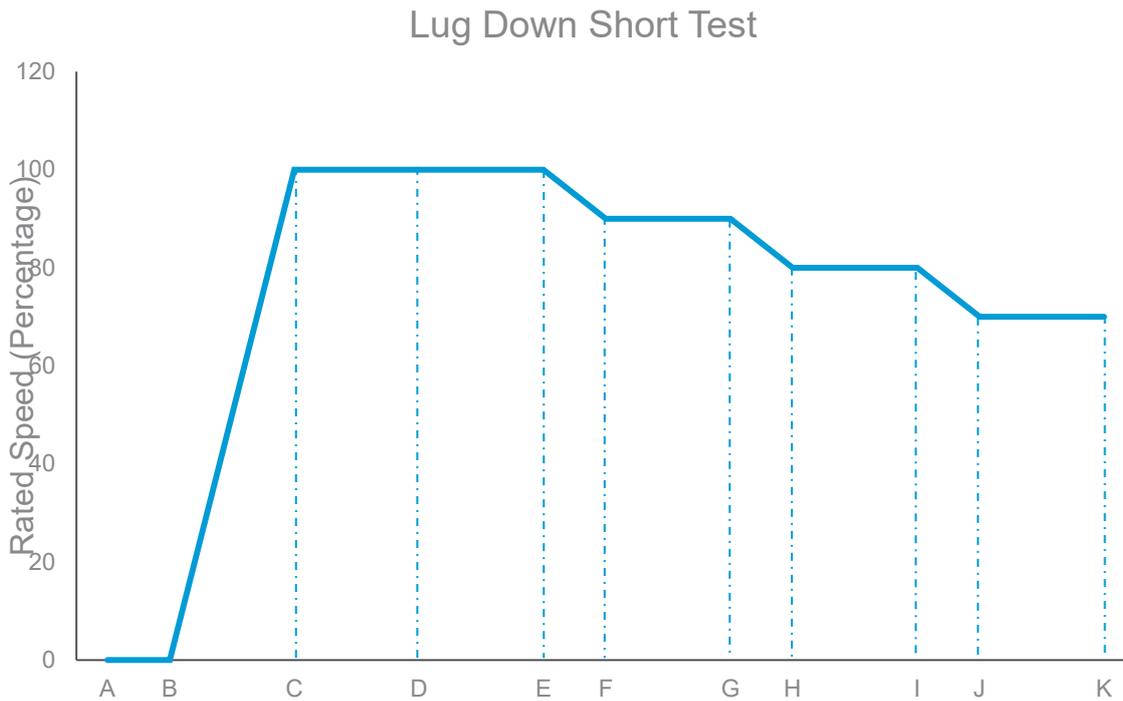
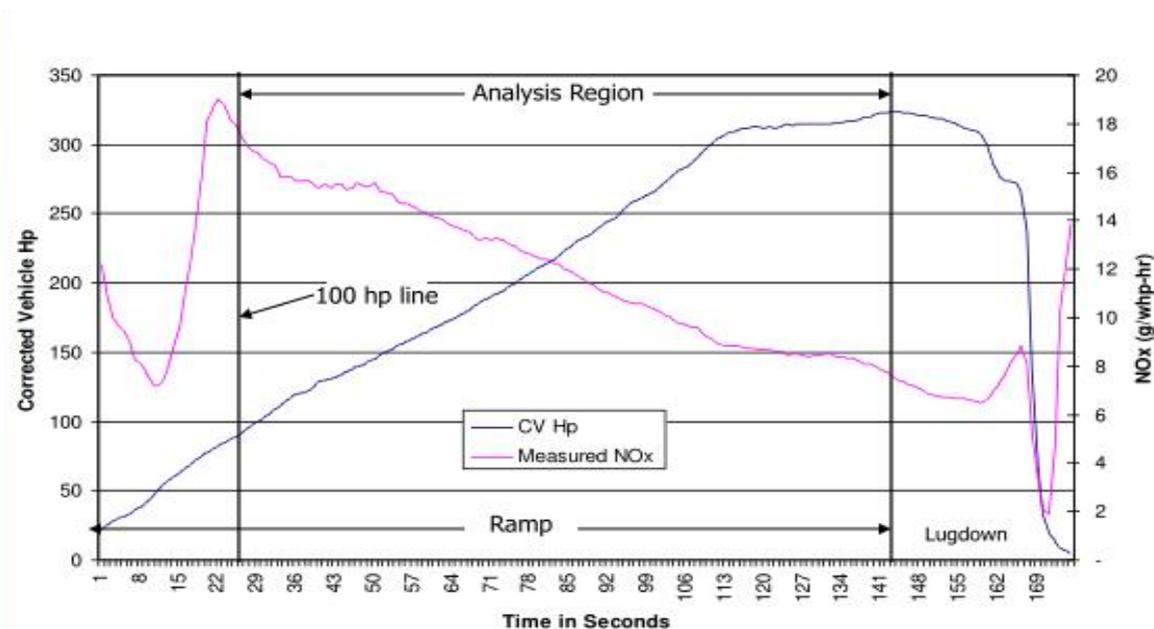


Abbildung 14: Powercurve Short Test [23]



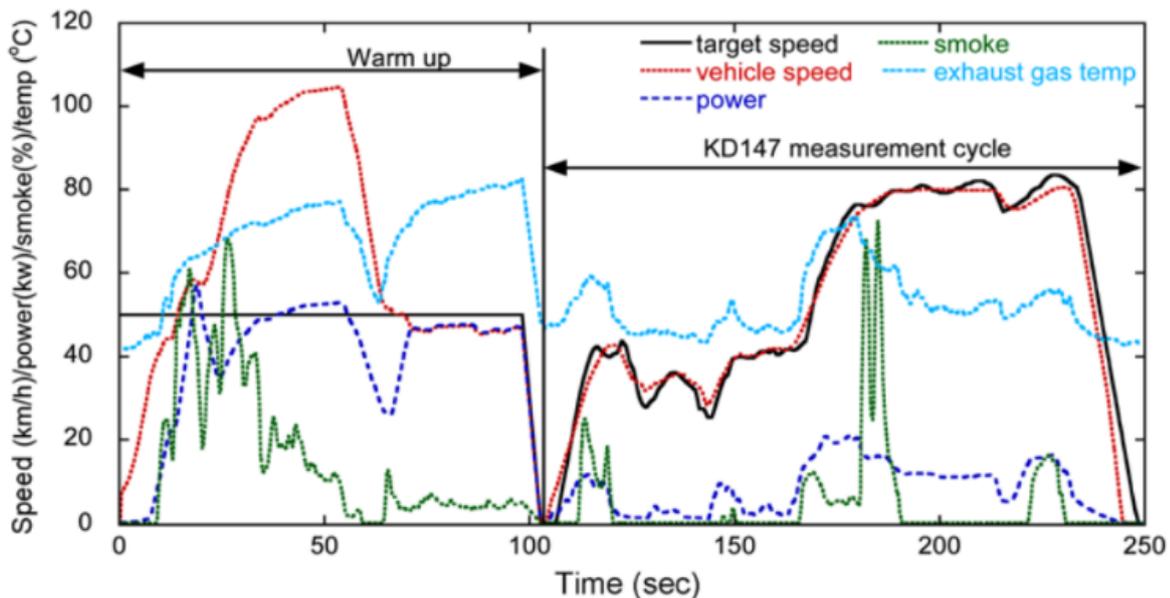
Nachteile:

- ▶ Lug-down: Vergleichsweise mäßige Korrelation (60%) der NO_x-Messwerte mit den Messergebnissen des deutlich aufwändigeren und längeren Referenzzyklus CUEDC¹ [24]
- ▶ Lug-down: Nach Posada et al. [9] ungeeignet für NO_x-Messungen, da für ältere Dieselfahrzeuge entwickelt
- ▶ Geringe Kundenakzeptanz
- ▶ Aufwändige Sicherung am Prüfstand aufgrund des Betriebs mit Maximalleistung erforderlich
- ▶ Leistungsfähiger und damit aufwändiger Prüfstand nötig (hohe Last)
- ▶ Relativ lange Dauer (ca. 170 Sekunden)

2.3.1.2 KD147 Short Test

Der koreanische KD147 Test (Abbildung 15) wurde ursprünglich für das Messen des Trübungswertes mittels Opazimeter erdacht. Er beinhaltet eine ca. 100 Sekunden andauernde Warmlaufphase sowie den eigentlichen 147 Sekunden dauernden Test. Dieser gestaltet sich als sehr transient und hat eine Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h. Die Toleranz beim Nachfahren des Profils ist mit geringen 3 km/h angegeben [25]. In anderen Studien bezüglich NO_x blieb dieser Zyklus stets unberücksichtigt, weshalb bei dieser Bewertung nur auf wenige Daten zurückgegriffen werden kann.

Abbildung 15: KD147 Test (Profil = schwarze Kurve) [25]



Vorteil:

- ▶ Scheinbar gute Reflexion von realem Fahrbetrieb

Nachteile:

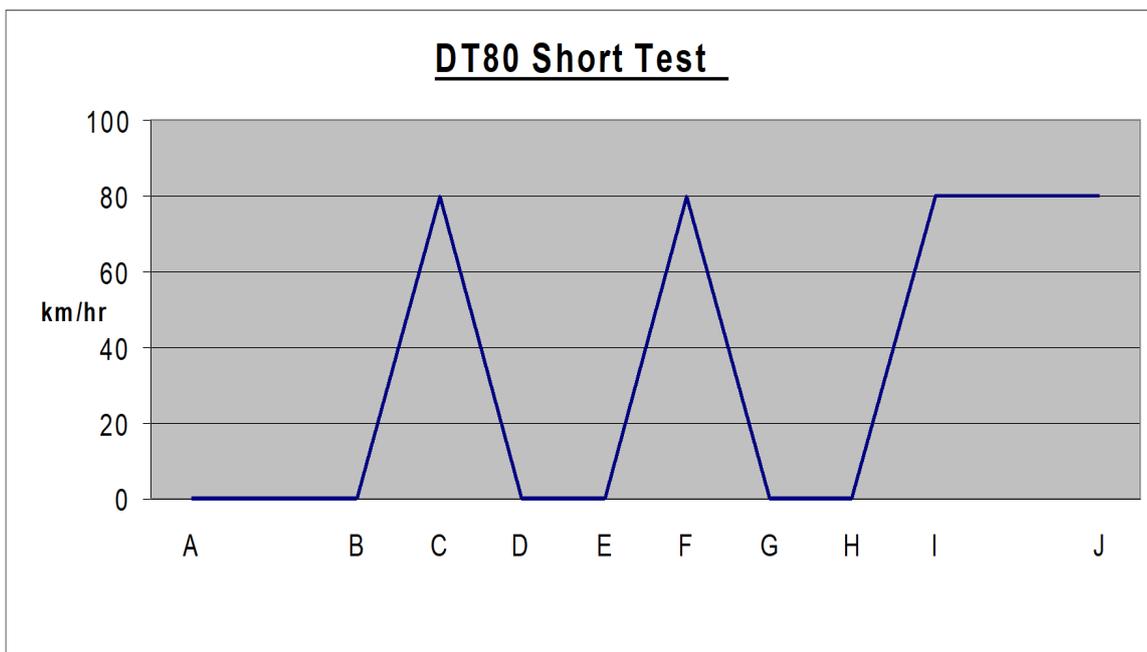
- ▶ Gebläse zur Kühlung erforderlich wegen mehreren Bremsungen
- ▶ Sehr schwierig nachzufahrendes Profil (fehleranfällig)
- ▶ Höchstgeschwindigkeit 80 km/h stellt hohe Anforderung an den Prüfstand
- ▶ Relativ lange Dauer (Mind. 150 Sek.)

¹ CUEDC = Composite Urban Emission Drive Cycle. Entwickelt von der New South Wales Environmental Protection Agency in Australien. Dieser enthält vier Segmente, von denen jede eine alltägliche Verkehrssituation abbildet (stockender Verkehr, innerorts, außerorts, Autobahn)

2.3.1.3 DT80 Short Test und DT60 Short Test

Wie in Tabelle 3 ersichtlich, wird in Australien der DT60 und der DT80 Test zur Prüfung von NO_x bei einer periodischen AU eingesetzt. Das DT80-Profil ist in Abbildung 16 ersichtlich. Es inkludiert drei, zeitlich nicht näher definierte Beschleunigungen aus dem Stand auf 80 km/h, wobei zwischen und vor diesen für jeweils 10 Sekunden der Motorleerlauf gehalten werden soll. Nach dem letzten Beschleunigungsvorgang wird die Geschwindigkeit über einen Zeitraum von 60 Sekunden gehalten. Vom Prüfstand wird eine Last aufgebracht, welche die Fahrwiderstände aus der Realität simuliert. Als Berechnungsgrundlage für Roll-, Luft- und Beschleunigungswiderstand dient die Masse des Testfahrzeuges, welches zur Hälfte beladen ist: Testmasse = Fahrzeugleergewicht + Max. Zuladung/2. Der DT60 Test ist weitestgehend gleich, nur wird hier zwei Mal auf nur 60 km/h beschleunigt. Die folgende Bewertung bezieht sich aufgrund der Menge an vorliegenden Daten und Ergebnissen auf den DT80 Test.

Abbildung 16: DT80 Short Test [26]



Vorteil:

- ▶ Vergleichsweise beste Korrelation (90%) der NO_x -Messwerte mit den Messergebnissen des deutlich aufwändigeren und längeren Referenzzyklus CUEDC [24]

Nachteile:

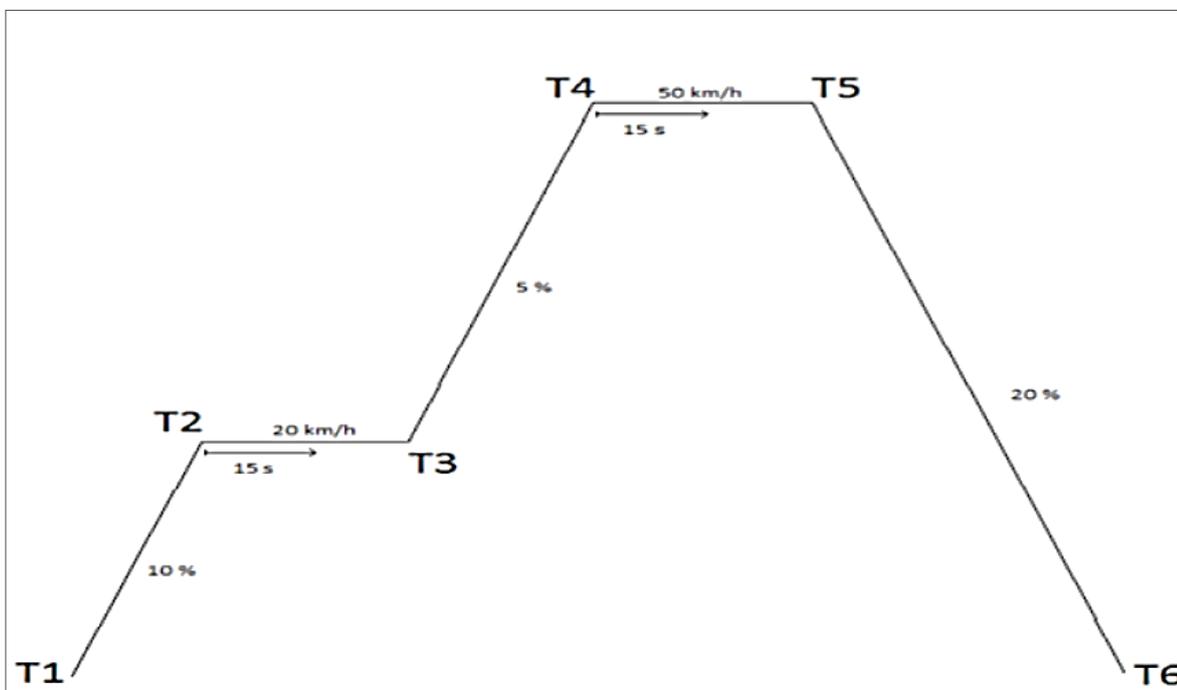
- ▶ Schlechte Fehlerindikation: Fahrzeuge mit vorsätzlich eingebrachten Defekten zeigten einen um den Faktor 1,5 erhöhten NO_x -Messwert im Vergleich zum fehlerlosen Zustand [26]
- ▶ Relativ lange Dauer (ca. 180 Sek.)
- ▶ Höchstgeschwindigkeit 80 km/h stellt hohe Anforderung an den Prüfstand

2.3.1.4 ASM2050 Short Test

Der Verlauf des ASM2050 (Acceleration Simulation Mode) -Kurztests ist in Abbildung 17 veranschaulicht. Unter einer definierten Last (10% der Nennleistung des Testfahrzeuges) wird zuerst auf 20 km/h beschleunigt und die Geschwindigkeit 15 Sekunden lang gehalten. Im zweiten Schritt wird unter halbiertes Last weiter auf 50 km/h beschleunigt und wieder für 15 Sekunden gehalten. Um die Bremsen zu schonen, wird das Fahrzeug im Anschluss durch eine Last von 20% zum Stillstand ge-

bracht. Die Stickstoffoxidemissionen werden während der 15 sekündigen Konstantfahrt gemessen und gemittelt. Für Fahrzeuge mit manuellem Getriebe gibt es bei der Durchführung zwei Möglichkeiten: fahren im 1. – 2. Gang oder im 1. – 3. Gang. Spanische Behörden untersuchten den ASM2050 bereits ausführlich. Grundsätzlich wurde er als geeignet zur Stickstoffoxidmessung eingestuft, jedoch wurde vorgeschlagen, die Konstantphasen von 15 Sek. auf 25 Sek. zu verlängern. Die ersten fünf Sekunden sollen als Stabilisierungsphase dienen, damit während der Messung die richtige Geschwindigkeit anliegt. Die Messung selbst soll folglich auf 20 Sekunden erhöht werden, um den Mittelwert belastbarer zu machen [29]. Allgemein gibt es ASM Tests in mehreren Varianten, die sich durch unterschiedliche Geschwindigkeiten unterscheiden. Der ASM5080 beispielsweise besitzt Konstantphasen bei 50 und 80 km/h. Diese anderen Varianten wurden hier nicht weiter untersucht, da keine Daten zur Auswertung vorhanden sind. Außerdem sind die NO_x -Emissionen von der Motorlast und von der Motordrehzahl abhängig. Die Fahrzeuggeschwindigkeit selbst spielt keine Rolle, da durch die Gangwahl die gewünschte Motordrehzahl angesteuert werden kann. Es kann deshalb keine große Diskrepanz bezüglich der NO_x -Emissionen zwischen solchen ASM-Varianten erwartet werden.

Abbildung 17: ASM2050 Short Test [26]



Vorteile:

- ▶ Gute Korrelation mit Ergebnissen aus der Typprüfung [26]
- ▶ Sehr gute Fehlerindikation: Fahrzeuge mit vorsätzlich eingebrachten Defekten zeigten einen um den Faktor 4,0 erhöhten NO_x -Messwert im Vergleich zum fehlerlosen Zustand [26]
- ▶ Geringe Anforderungen an den Prüfstand

2.3.1.5 Testfahrt mit Mini-PEMS

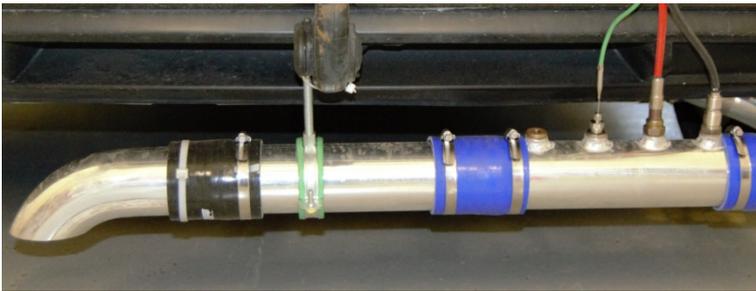
Die im Rahmen der Abgastypprüfung verwendeten PEMS-Analysatoren basieren auf der im Labor verwendeten Messtechnik und sind sehr aufwändig und teuer. Zurzeit werden so genannte Mini-PEMS entwickelt, bei denen die Messung der Abgaskonzentrationen mit Hilfe von Sensoren erfolgt. Diese Geräte sind sehr viel kompakter, leichter und preisgünstiger, als die im Rahmen der Emissionstypprüfung verwendeten PEMS. Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Einsatz von Mini-PEMS im Rahmen der periodischen AU prinzipiell vorstellbar. Die Messung könnte u. U. mit der im Rahmen der Periodisch Technischen Inspektion (PTI) vorgeschriebenen Probefahrt verbunden werden.

Im Sommer 2017 wurde beim TÜV NORD ein Mini-PEMS System eingesetzt und die Messgenauigkeit in mehreren Vergleichsmessungen überprüft. Gemessen wurden die NO_x-Konzentration, die CO-Konzentration und die CO₂-Konzentration mit Hilfe von Sensoren. Die Abgasemissionen wurden bei Fahrten im realen Verkehr mit Hilfe des Mini-PEMS ermittelt und mit den Ergebnissen eines im Rahmen der Typprüfung eingesetzten PEMS verglichen. Die Bewertung der Ergebnisse ist in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

2.3.1.5.1 Gerätebeschreibung

Das Mini-PEMS besteht aus mehreren Sensoren zur Bestimmung der Konzentration von verschiedenen Abgaskomponenten. Für die Probennahme wurde ein Abgasmessrohr verwendet, das am Abgasrohr des untersuchten Fahrzeugs angebracht wird. Zusätzlich sind Informationen über die Fahrstrecke und die Fahrgeschwindigkeit erforderlich, die mit Hilfe eines GPS ermittelt wurden. Für die Bestimmung der Abgasemissionen aus den Abgaskonzentrationen ist zudem die Ermittlung des Abgasmassenstroms erforderlich. Die Bestimmung des Abgasmassenstroms kann mit Hilfe der OBD-Daten oder durch Auslesen des Signals des Luftmassenmessers erfolgen. Abbildung 18 bis Abbildung 20 zeigen das verwendete System.

Abbildung 18: Abgasentnahme Mini-PEMS



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 19: Mini-PEMS Auswerteeinheit



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 20: Mini-PEMS verbaut am Fahrzeug



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

2.3.1.5.2 Installation und Handhabung von Mini-PEMS

Der Einbau des eigentlichen Mini-PEMS ist relativ einfach. Bei den ersten Versuchen erfolgte die Gasentnahme mit Hilfe eines Messrohrs, das am Abgasendrohr befestigt wurde. Von dem Messrohr aus wurden die Abgase zu den Sensoren geleitet. Zum Messen des Abgasmassenstromes wird im Rahmen der Typprüfung ein sog. Exhaust Flow Meter (EFM) eingesetzt. Die Vorgehensweise zum Einbau des Messrohrs ist vergleichbar mit dem Einbau eines EFM bei einem PEMS Gerät für die Typprüfung und ist sehr aufwändig. Die Zeit für den Einbau hängt ab von der Gestaltung und Anordnung des Abgasendrohrs und kann mehrere Stunden dauern. Alternativ ist die Verwendung einer Abgasentnahmesonde möglich. Dadurch kann der Aufwand für die Installation auf wenige Minuten reduziert werden (vgl. Kapitel 6.5.1).

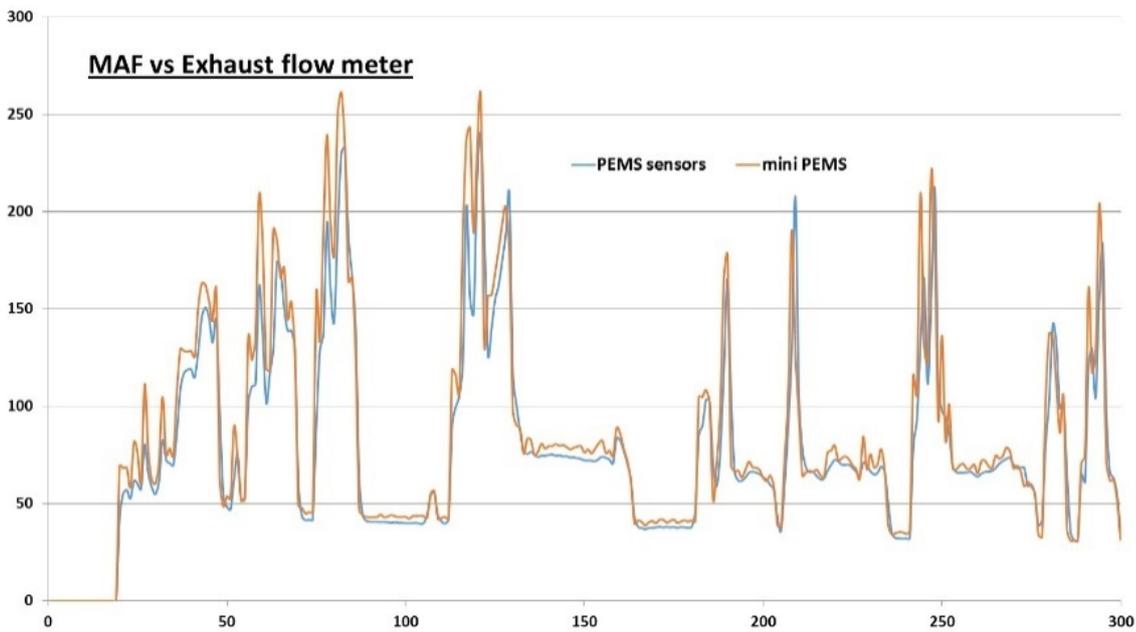
2.3.1.5.3 Messergebnisse mit Mini-PEMS

Das Mini-PEMS wurde in mehreren Fahrten im realen Verkehr mit einem für die Abgastypprüfung verwendeten PEMS verglichen. Dabei zeigte sich eine gute Korrelation zwischen den mit den verschiedenen Geräten ermittelten Abgasemissionen. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse einer Messfahrt beispielhaft dargestellt. Die Messung wurde auf der PEMS Route des TÜV NORD mit einer Strecke von 96 km durchgeführt. In Abbildung 21 ist die Korrelation des gemessenen Abgasmassenstroms und der Information zum Luftmassenstrom aus dem OBD-System dargestellt. Abbildung 22 vergleicht die Messergebnisse der NO_x-Emissionsmessungen mit Mini-PEMS mit den für die Typprüfung eingesetzten PEMS.

Tabelle 4: Vergleich Mini-PEMS und für die Typprüfung eingesetztes PEMS

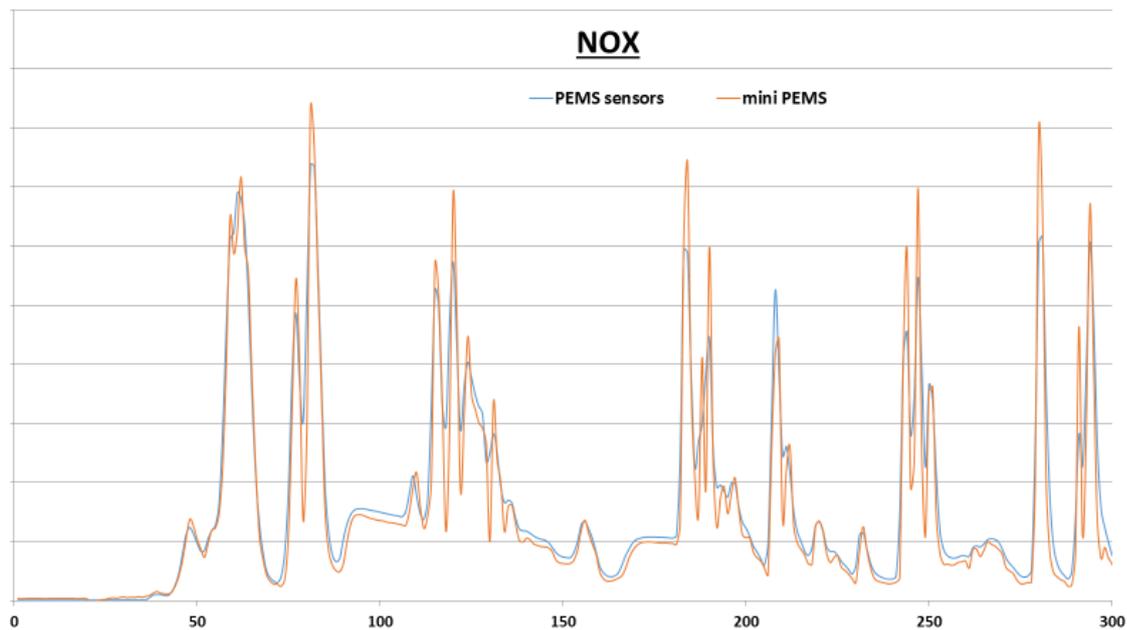
Messgröße	Testphase	PEMS	Mini-PEMS	Absolute Abweichung	Relative Abweichung [%]
Fahrstrecke [km]	Stadt	32,74	32,64	0,10	0,3
	Land	28,18	28,10	0,08	0,3
	Autobahn	35,03	35,15	0,12	0,3
	Total	95,95	95,89	0,06	0,2
NO_x [mg/km]	Stadt	905	854	51	5,6
	Land	940	891	49	5,2
	Autobahn	515	535	20	3,9
	Total	787	760	27	3,4

Abbildung 21: Vergleich EFM und MAF (mass air flow)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 22: Vergleich NO_x Emissionen gemessen mit Mini-PEMS und dem für die Typprüfung eingesetzten PEMS



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

2.3.1.6 Zusammenfassung der Prüfverfahren mit externer Last

- ▶ Geschwindigkeit und gefahrene Strecke werden mit Hilfe des GPS Systems mit ausreichender Genauigkeit ermittelt.
- ▶ NO_x-Konzentrationen können mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.
- ▶ CO₂-Konzentrationen können mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.
- ▶ CO-Konzentrationen können mit ausreichender Genauigkeit nur bei einem Lambda-Wert von unter 1,4 ermittelt werden. D.h. die CO Messung ist bei Dieselfahrzeugen nicht sinnvoll.

- ▶ Der Abgasmassenstrom wurde aus dem Signal des Ansaugluftensors und dem Kraftstofffluss mit ausreichender Genauigkeit ermittelt.
- ▶ Der aus dem analogen Signal des Luftmassenmessers ermittelte Wert für den Luftmassenstrom korrelierte bei den untersuchten Fahrzeugen sehr gut mit der Information aus dem OBD System.
- ▶ Der Einbau des Abgasmessrohrs ist sehr aufwändig, sinnvoll wäre alternativ die Verwendung einer Abgasentnahmesonde.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das Mini-PEMS prinzipiell dazu geeignet ist, die Abgasemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen zu bestimmen und zu bewerten. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden nur NO_x-, CO- und CO₂-Emissionen berücksichtigt. Die Messung der Partikelemissionen muss in weiterführenden Untersuchungen betrachtet werden. Für die Bewertung der Abgasemissionen im Rahmen der periodischen Untersuchung steht nur ein begrenzter Zeitrahmen zur Verfügung. Die verwendeten Messgeräte müssen einfach im Fahrzeug zu installieren und zu handhaben sein. Der Einbau des bisher verwendeten Messrohres ist zu zeitaufwändig. Die alternative Verwendung einer Abgasentnahmesonde ist zu untersuchen. Im Rahmen der Abgastypprüfung werden mit Hilfe von PEMS die Abgasemissionen ermittelt. Eine Beschränkung auf die Abgaskonzentrationen könnte die Messung stark vereinfachen. Es ist zu überprüfen, ob die Ermittlung der Schadstoffkonzentrationen für eine aussagefähige Bewertung des Abgasverhaltens im Rahmen der periodischen Untersuchung ausreichend ist. Kurztests mit extern aufgebrachtener Last weisen eine sehr große Vielfalt auf. In beinahe jedem Land werden unterschiedliche Profile für Abgasmessungen benutzt. Die Zusammenstellung der Prüfverfahren mit externer Last beinhaltet nicht alle existierenden Zyklen (vgl. Kap. 2.3.1). Sie deckt allerdings durchaus alle Typen von Tests ab. Die nicht aufgeführten (z. B. ASM2525) unterscheiden sich jeweils nur marginal von einem der hier behandelten Zyklen.

2.3.2 Prüfverfahren ohne externer Last

Prüfverfahren ohne extern aufgebrachte Last werden unterteilt in Prüfverfahren mit einem NO_x-Grenzwert als Bewertungskriterium für den Zustand des Fahrzeuges, sowie Prüfverfahren, welche die Funktionsfähigkeit von emissionsrelevanten Komponenten prüfen.

Vorteile:

- ▶ I. d. R. geringerer (Zeit-) Aufwand, einfacher Prüfablauf und damit kostengünstiger

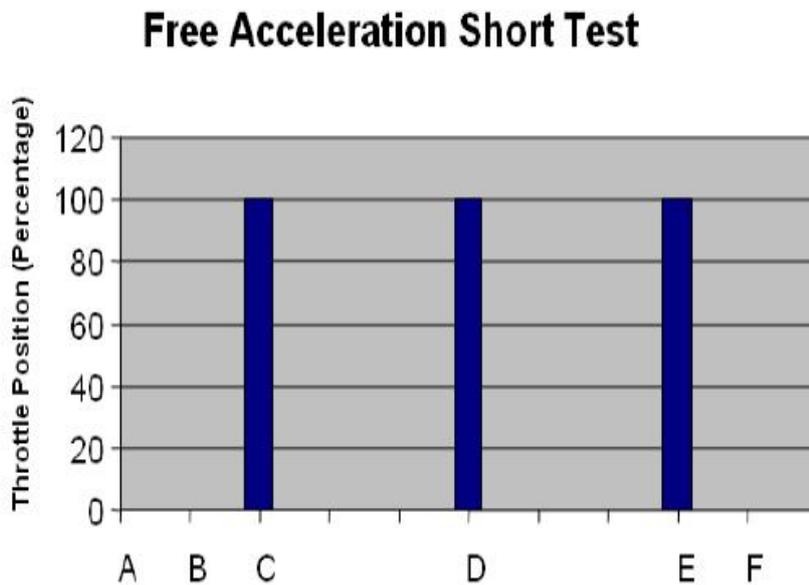
Nachteile:

- ▶ Bei Fahrzeugen mit Begrenzung der Abregeldrehzahl nur eingeschränkt nutzbar
- ▶ Prüfverfahren für Komponentenprüfung: Fokus auf AGR, kaum Aussagekraft über Abgasnachbehandlungssysteme zu erwarten.
- ▶ Nur geringe Last, somit nur geringe NO_x-Konzentrationen mit relativ hoher Streuung zu erwarten

2.3.2.1 Free Acceleration Test nach SAE J1667

Bei stehendem Fahrzeug wird der Motor vom Leerlauf, durch dreimaliges, plötzliches geben von Vollgas auf die Maximaldrehzahl gebracht. Der Mittelwert der drei ermittelten Schadstoff-Peakwerte dient als Bewertungskriterium. Der Test ist schon lange Zeit in Verbindung mit einem Opazimeter bei der AU im Einsatz, wofür er auch entwickelt wurde. In Peking findet das Verfahren auch bei der Stickstoffoxidmessung Verwendung.

Abbildung 23: Free Acceleration Test nach SAE J1667 [8]



Vorteile:

- ▶ Sehr einfach durchzuführen
- ▶ Relativ kurze Dauer (ca. 60 Sek.)

Nachteile:

- ▶ Einschränkung bei Fahrzeugen mit Begrenzung der Abregeldrehzahl
- ▶ Ungeeignet für PM- und NO_x-Messungen. Entwickelt für Dieselfahrzeuge mit mechanischen Systemen [8].
- ▶ Schlechte Reproduzierbarkeit [23]
- ▶ Vergleichsweise schlechte Korrelation (47%) der NO_x-Messwerte mit den Messergebnissen des Referenzzyklus CUEDC [24]

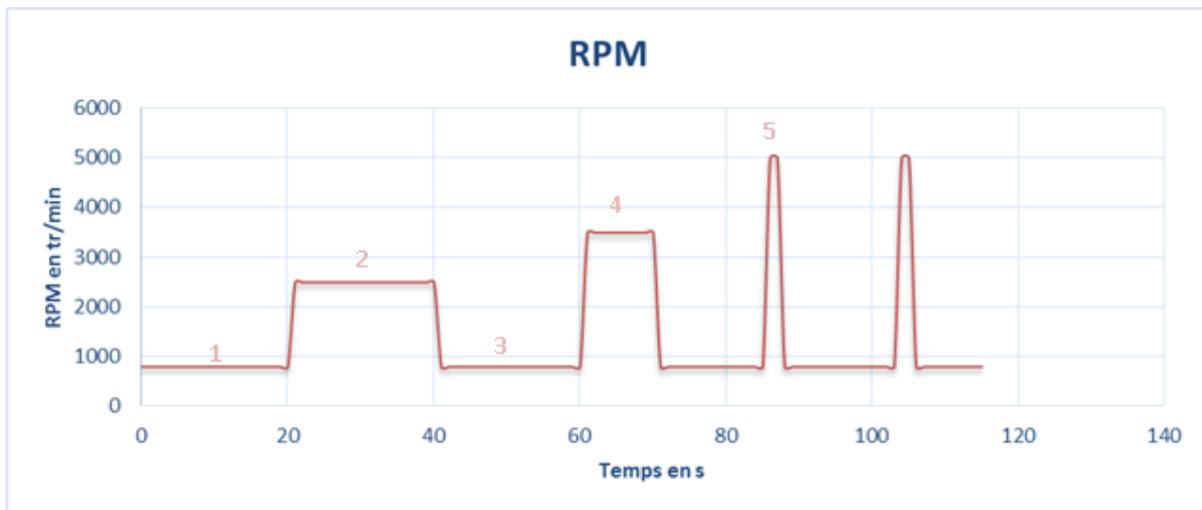
2.3.2.2 Capelec AGR-Test

Der von der Firma Capelec entwickelte Test prüft mittels fünf Kriterien das AGR-Ventil auf Funktionstüchtigkeit. Dafür wird ein fünfstufiger Test nach Tabelle 5 und Abbildung 24 durchgeführt. Der Motorfüllungsgrad p wird mithilfe von OBD-Daten und der manuell vom Prüfer einzugebenden Brennraumgröße berechnet.

Tabelle 5: Stufen des Capelec AGR-Test

	Zeit	Motordrehzahl	Messwert
1	20 s	Leerlaufdrehzahl	NO _x -Wert 1 und Motorfüllungsgrad p_1 (NO _{x_1} / p_1)
2	20 s	erhöhter Leerlauf (2500 UpM)	NO _{x_2} / p_2
3	20 s	Leerlaufdrehzahl	NO _{x_3} / p_3
4	10 s	Hohe Drehzahl (>3500 UpM)	NO _{x_4} / p_4
5		2 freie Beschleunigungen auf Maximaldrehzahl	Peakwerte NO _{x_51} und NO _{x_52} sowie p_{51} und p_{52}

Abbildung 24: Capelec AGR-Test [26]



Die Bewertung des AGR-Ventils basiert auf dem Wissen, dass das Ventil im erhöhten Leerlauf (Schritt 2) offen sein sollte und beim Halten hoher Drehzahl (Schritt 4) schließen sollte. Die angesprochenen Bewertungskriterien sind in Tabelle 6 aufgelistet. Jede zutreffende Ungleichung deutet auf ein funktionierendes AGR-Ventil hin.

Tabelle 6: Bewertung des Capelec AGR-Test

	Bedingung	Schlussfolgerung
1	$p2 < 1$	Ventil offen im erhöhten Leerlauf
2	$p4 > 1$	Ventil geschlossen bei erhöhter Drehzahl
3	$NO_{x_3} / NO_{x_1} > 1.5$ oder $NO_{x_1} < 50$ ppm und $NO_{x_3} < 50$ ppm	Wenn die beiden NO_x -Werte in beiden Leerlaufphasen voneinander abweichen, fand wie gewollt ein Umschalten des Ventils statt
4	$NO_{x_4} / NO_{x_2} > 1.2$	Höhere NO_x -Werte, wenn AGR-Ventil geschlossen
5	$p51, p52 > 1$	Ventil geschlossen bei den beiden freien Beschleunigungen

Alternativ kann der Test auch verkürzt durchgeführt werden. Dabei fallen die beiden freien Beschleunigungen und Kriterium Nummer 5 weg. Im Zuge der SET II Studie der CITA [35] und einer Untersuchung einer französischen Verkehrsbehörde [28] konnte das Capelec-Prüfverfahren näher betrachtet werden. Bei beiden Studien wurden nur die Kriterien 1 bis 4 in die Bewertung mit einbezogen. Jedes Kriterium konnte maximal einen Punkt geben. Die Summe aller vier ergab so eine Punktzahl zwischen 1 und 4 (Abbildung 25). Eine eindeutige Regel für die Einteilung der Fahrzeuge in i.O. und n.i.O. existiert offensichtlich nicht. Schwierig zu bewerten sind die Testergebnisse mit mittlerer Punktzahl. Zur französischen Studie bezog Capelec Stellung und gab einen Erklärungsversuch für diese Fahrzeuge ab. Die meisten der Fahrzeuge mit mittlerer Punktzahl sind auf Schwankungen und/oder Fehler in der Versuchsdurchführung zurückzuführen. So gab es z.B. Fälle von falsch eingegebener Brennraumgröße. Capelec empfiehlt außerdem den Test zu wiederholen, wenn die gemessenen NO_x -Werte auf einem sehr niedrigen Niveau sind. Bei niedrigen Werten sind die Schwankungen anscheinend zu hoch für eine Bewertung. Positiv fällt die Verteilung der i.O. bzw. n.i.O. getesteten Fahrzeuge auf. Die Durchfallquote betrug bei der CITA SET II Studie ca. 11%.

Abbildung 25: Ergebnisse SET II [26]

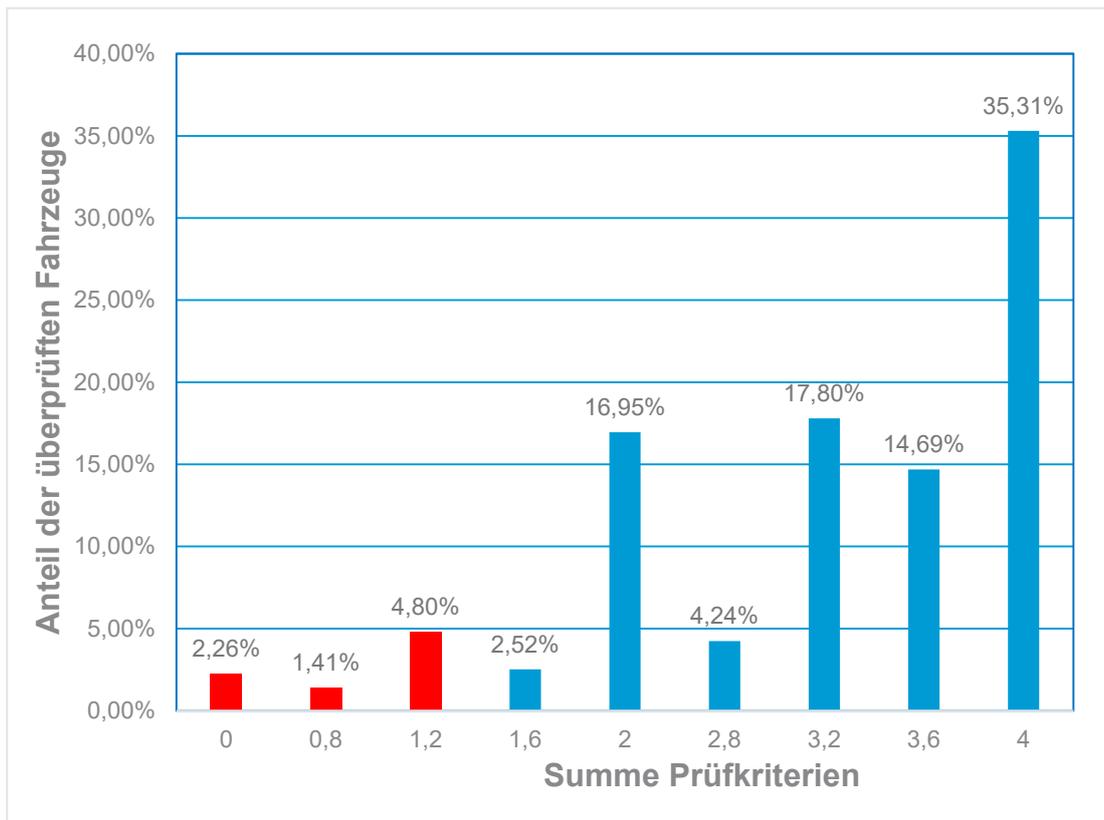
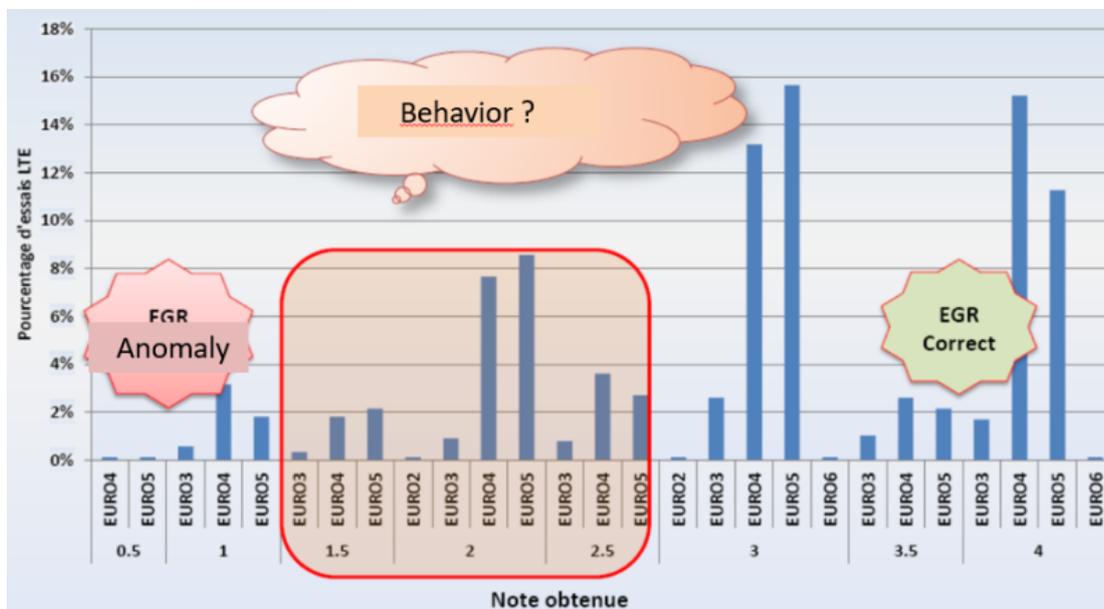


Abbildung 26: Ergebnisse französische Studie [28]



Nachteile:

- ▶ Schlechte Fehlerindikation: Erhöhung der Messwerte um Faktor 1,2 [26]
- ▶ Nur 2 Kriterien nutzbar bei Fahrzeugen mit Begrenzung der Abregeldrehzahl
- ▶ Fokus auf AGR, keine Aussagekraft für Nachbehandlungssysteme zu erwarten

2.3.2.3 AVL Beschleunigungsrampe

Von der Fa. AVL stammt die in Abbildung 27 dargestellte Beschleunigungsrampe. Innerhalb einer definierten Rampe muss hierbei vom Leerlauf aus auf eine Motordrehzahl von 2500 UpM beschleunigt werden. Als Randbedingung wird eine Kühlmitteltemperatur von mindestens 80°C vorgegeben. Außerdem liefert AVL eine Tabelle um die Funktionalität des EGR-Ventils anhand der Messergebnisse einstufen zu können. Die Rampe kann mit kleinem Aufwand in den oben beschriebenen Capelec-Verfahren integriert werden, da dort der erste Abschnitt auch mit 2500 UpM gefahren wird.

Abbildung 27: AVL Beschleunigungsrampe [29]

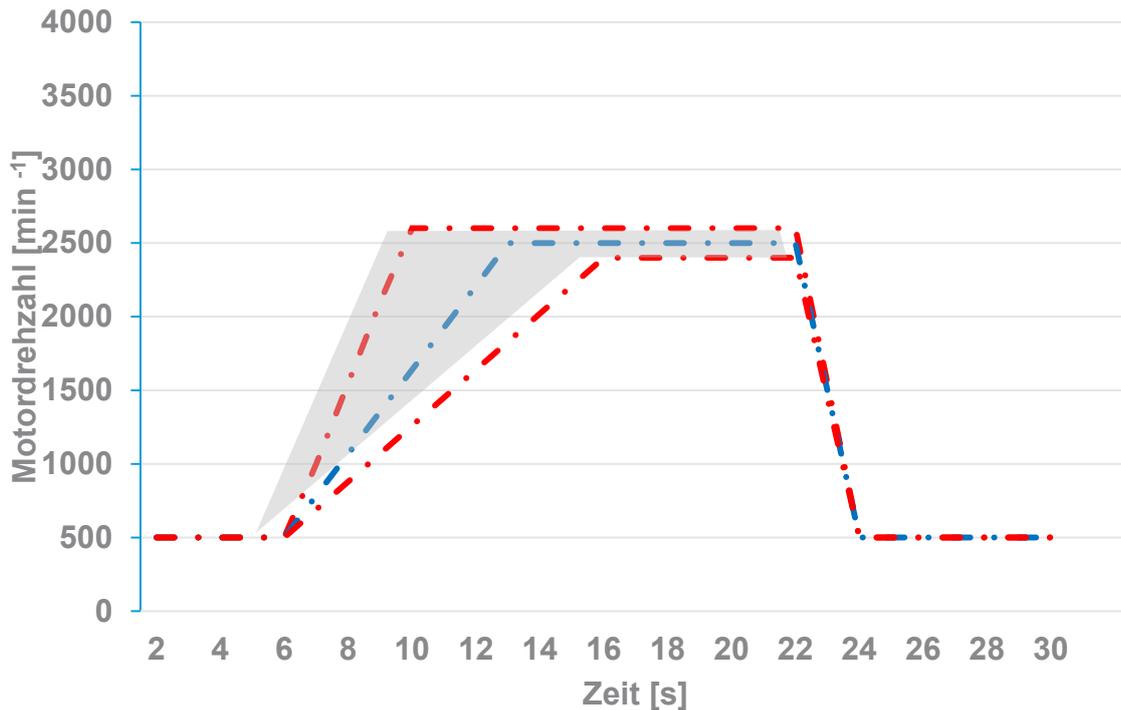


Tabelle 7: Bewertung AVL Beschleunigungsrampe [29]

Fehler	NO _x -Emissionen
i.O.	< 20 ppm
Speicherkat voll (fettes Gemisch)	230 ppm
EGR klemmt, 20% geschlossen	100 ppm
EGR klemmt, 30% geschlossen	140 ppm
EGR klemmt, 50% geschlossen	260 ppm
EGR klemmt, geöffnet	110 ppm

Vorteil:

- ▶ Einfaches Testverfahren

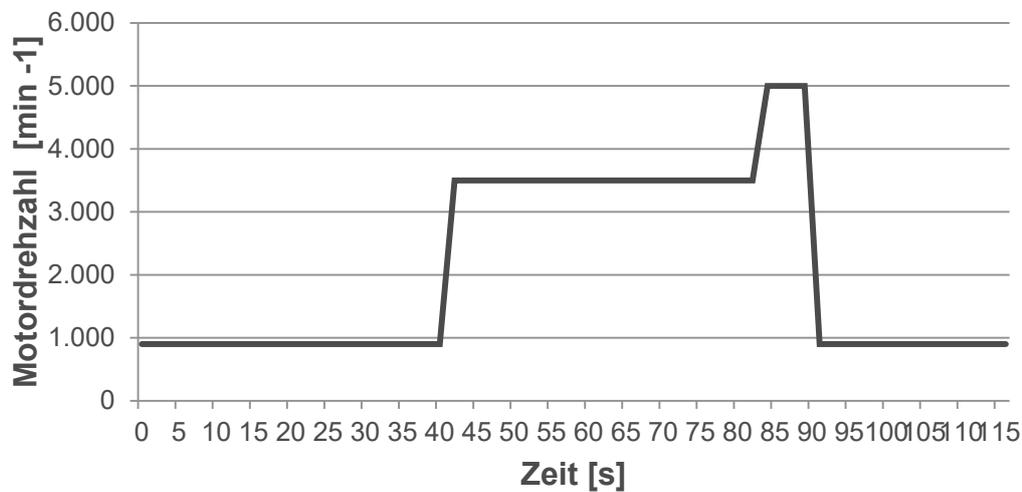
Nachteile:

- ▶ (Siehe Capelec-Prüfzyklus)

2.3.2.4 Sphertech Bosch Methode

Während dieses vierstufigen Profils wird die Zusammensetzung des Abgases messtechnisch überwacht. Eine Software kann aus der Zusammensetzung der verschiedenen Gasfraktionen einen Fehler am Fahrzeug erkennen und diagnostizieren. Dafür benötigt das Programm einige Daten des Testfahrzeuges wie Alter, Laufleistung, Modell, Motortechnologie und andere. Anhand dieser kann eine auf statistischen Daten basierende Beurteilung vorgenommen werden. Laut dem Hersteller können über 130 Defekte und Kombinationen von Defekten an Abgasnachbehandlungssystemen und Komponenten die mit der Kraftstoffverbrennung zusammenhängen ermittelt werden [29]. Auch wenn diese Messmethodik bereits in einer französischen Studie benutzt wurde, gibt es aktuell noch wenig weiterführende Informationen und Versuchsdaten. Aktuell wurde das System im Zuge der CITA SET II Studie im Hinblick auf Stickstoffoxidmessung analysiert, jedoch gibt es auch hierzu nur wenige Daten.

Abbildung 28: Sphertech Bosch Zyklus [29]



3 Geeignet erscheinende Prüfverfahren zur Stickstoffoxidmessung im Rahmen der periodischen AU

Bei der Auswahl geeignet erscheinender Prüfverfahren zur Stickstoffoxidmessung im Rahmen der periodischen AU wurde grundsätzlich unterschieden zwischen Verfahren mit und ohne externe Last.

Die in Kapitel 2.3 näher beschriebenen Prüfverfahren wurden hinsichtlich verschiedener Kriterien (z. B. Anschaffungskosten, Zeitaufwand Test, Rüstzeit etc.) verglichen und bewertet. Die zusammenfassende Bewertungsmatrix ist in Tabelle 8 dargestellt. Für alle Prüfverfahren wurden für alle Beurteilungskriterien (Anschaffungskosten, Zeitaufwand, Rüstzeit, Korrelation, Fehleranfälligkeit, Akzeptanz, Fehlerindikation) die jeweiligen Ausprägungen ermittelt und gewichtet. Diese Skalierung und das daraus abgeleitete Ranking der Prüfverfahren ist in Tabelle 9 dargestellt.

3.1 Bewertungsmatrix

Tabelle 8: Bewertungsmatrix der Prüfverfahren (basierend auf den Bewertungen in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2)

Prüfverfahren		Anschaffungskosten ²	Zeitaufwand Test ³	Rüstzeit ³	Korrelation	Fehleranfälligkeit	Akzeptanz	Fehlerindikation	Σ
	Nr.	1.1	1.2	1.3	2	3	4	5	
	Gew.	0,05	0,075	0,075	0,2	0,2	0,1	0,3	1
Eigenschaftsgrößen	Detailbeschreibung	Prüfgeräte	Prüfzeit	Sichern FZ/Daten/OBD	Typprüfung/CUEDC	Durchführung	Akzeptanz Kunde	Messwert-Anstieg	
	Skalierung	Indexwert ¹	Indexwert ¹	Indexwert ¹	Ordinalskala	Ordinalskala	Ordinalskala	Ordinalskala	
ASM2050 (Prüfstand)	Ausprägung	170	130	150	gut	mittel	mittel	sehr gut	
	Ranking	5	8	7	7	6	5	9	
	Gew. Wert	0,25	0,6	0,525	1,4	1,2	0,5	2,7	7,2
DT80 (Prüfstand)	Ausprägung	225	180	225	sehr gut	mittel	sehr schlecht	schlecht	
	Ranking	1	4	1	9	6	2	3	
	Gew. Wert	0,05	0,3	0,075	1,8	1,2	0,2	0,9	4,5
Power curve / Lug-down (Prüfstand)	Ausprägung	225	170	225	mittel	gut	sehr schlecht	keine Daten	
	Ranking	1	3	1	5	8	2	0	
	Gew. Wert	0,05	0,225	0,075	1	1,6	0,2	0	3,2
KD147 (Prüfstand)	Ausprägung	225	150	225	keine Daten	schlecht	sehr schlecht	keine Daten	
	Ranking	1	4	1	0	3	2	0	
	Gew. Wert	0,05	0,3	0,075	0	0,6	0,2	0	1,2
Mini-PEMS (Testfahrt)	Ausprägung	210	150	225	gut	schlecht	mittel	mittel	
	Ranking	2	3	1	7	3	6	6	
	Gew. Wert	0,1	0,225	0,075	1,4	0,6	0,6	1,8	4,8
Capelec EGR inkl. AVL Test	Ausprägung	100	160	130	keine Daten	mittel	mittel	schlecht	
	Ranking	10	6	8	0	6	6	3	
	Gew. Wert	0,5	0,45	0,6	0	1,2	0,6	0,9	4,3
Spheretech Bosch	Ausprägung	100	170	140	keine Daten	mittel	mittel	keine Daten	
	Ranking	10	5	7	0	6	6	0	

Prüfverfahren		Anschaffungskosten ²	Zeitaufwand Test ³	Rüstzeit ³	Korrelation	Fehleranfälligkeit	Akzeptanz	Fehlerindikation	Σ
Snap-Idle Test	Gew. Wert	0,5	0,375	0,525	0	1,2	0,6	0	3,2
	Ausprägung	100	130	130	sehr gering	gut	mittel	sehr schlecht	
	Ranking	10	8	8	1	7	5	1	
	Gew. Wert	0,5	0,6	0,6	0,2	1,4	0,5	0,3	4,1

- ▶ ¹ Die Ermittlung der Indexwerte basiert nicht auf wettbewerbsbestimmten Preisen, sondern auf derzeitige Marktpreisen für Technologien
- ▶ ² Anschaffungskosten normiert auf aktuelle (Oktober 2017) Preise von Geräten für die heutige AU = 100
- ▶ ³ Kosten für Zeitaufwand Test und Rüstzeit normiert auf aktuelle (Oktober 2017) Kosten für Arbeitszeit

Tabelle 9: Bewertungsansatz zu Tabelle 8

Ranking	Ausprägung	
10/9	100-125	sehr gut
8/7	126-150	gut
6/5	151-175	mittel
4/3	176-200	schlecht
2/1	201-225	sehr schlecht
0	0	keine Daten

3.2 Auswahl der weiter zu untersuchenden Prüfverfahren

Wie der Bewertungsmatrix zu entnehmen ist, erhält bei den Verfahren mit externer Last der sog. ASM2050 Test, bei den Verfahren ohne externe Last der sog. kombinierte Capelec/AVL Test die höchste Bewertung und erscheint demnach für eine periodische AU am geeignetsten. Deshalb werden diese beiden Verfahren in ergänzenden Laboruntersuchungen weiter evaluiert. Außerdem wird empfohlen, auch die Verwendungsmöglichkeiten von sog. Mini-PEMS in einer sehr kurzen Testfahrt tiefergehend zu untersuchen, da reale Fahrttests grundsätzlich eine hohe Aussagekraft erwarten lassen und eine geeignete Alternative zu Prüfstandtests darstellen können.

4 Evaluierung der möglichen Prüfverfahren durch Labormessungen (Arbeitspaket 1)

Im sich nun anschließenden Projektabschnitt gilt es die drei zuvor ausgewählten Prüfverfahren ASM2050, Capelec / AVL-Test und Mini-PEMS in ihrer Funktion und Wirkung für die Eignung einer periodischen AU zu evaluieren. In Absprache mit dem Auftraggeber wurde dafür ein geeignetes Prüffahrzeug ausgewählt. Für jedes Prüfverfahren wurde ein Lastenheft erstellt. Um die zu untersuchenden Fehler für alle Messverfahren gleichermaßen simulieren und reproduzierbar gestalten zu können, wurde auch dafür ein individuelles Lastenheft zum Verbau der Fehler verfasst.

4.1 Prüffahrzeug Evaluierungsphase

Als Prüffahrzeug wurde für die Evaluierungsphase von 12/17 bis 02/18 ein Peugeot 308SW (2.0d), Abgasnorm EU6b (2015/45W) mit folgenden verbauten, emissionsmindernden Bauteilen: AGR, SCR (DPF, DOC) angemietet.

Abbildung 29: Prüffahrzeug Peugeot 308SW (2.0d)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 30: Fahrzeugschein Abgasnorm EU6b inkl. ZB Teil 1

B	19.02.2016	3003	ATT00044	02	01	0110/04000	209
J	M1	AF		- - 04585		- - 1804	
E	VF3LJAHXWGS		9	1460 - 1470		01495 - 01608	
D1	PEUGEOT			-	00071	0	-
L				0109	002000	002000	
J				01100	00980	-	
D2	AHXW-R2B000			01100	00980	-	
				77	03000	69	
D3	308			01400	0740	005	-
2	PEUGEOT (F)			225/40 R18 (88H)			
	FZ.Z.PERS.BEF.B. 8 SPL.			225/40 R18 (88H)			
5	MEHRZWECKFAHRZEUG						
11	715x2007*2015/45W						
12	EURO6w;PI/CI; M, NI 1						
P1	DIESEL						
10	0002	36W0	01997				
22	DATUM ZUR EMISSIONSKLASSE: 19.02.2016*						

Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

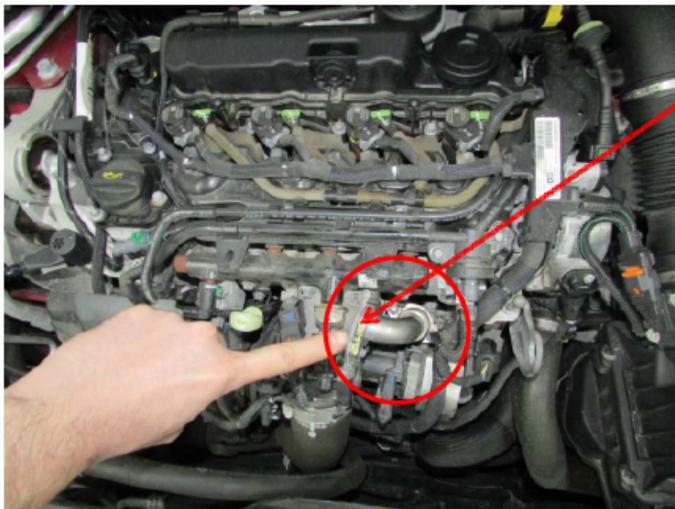
4.2 Lastenheft Fehlerverbau Evaluierungsphase

Die Erarbeitung des Lastenheftes zum Fehlerverbau verfolgt das Ziel, einheitliche und für alle Projektbeteiligten reproduzierbare Prüfprozeduren festzulegen. Dabei soll der Einfluss der Manipulationen an den emissionsmindernden Bauteilen in Hinblick auf die messbaren NO_x-Emissionen betrachtet werden. Die Durchführung der beschriebenen Manipulationen erfolgt ohne Erkennung durch die Fahrzeugdiagnose (OBD). Der Einfluss von Manipulationen am DPF wurde in dieser Studie, wie im Vorfeld vereinbart nicht betrachtet.

4.2.1 Mechanische Manipulation der AGR

Die AGR-Manipulation erfolgte durch den Einbau einer Blende in das AGR-System vor der Rückführung in den Ansaugtrakt (Metallplättchen). Die Funktion des serienmäßigen AGR-Ventils bleibt dabei erhalten.

Abbildung 31: Detaildarstellungen der AGR-Manipulation 1

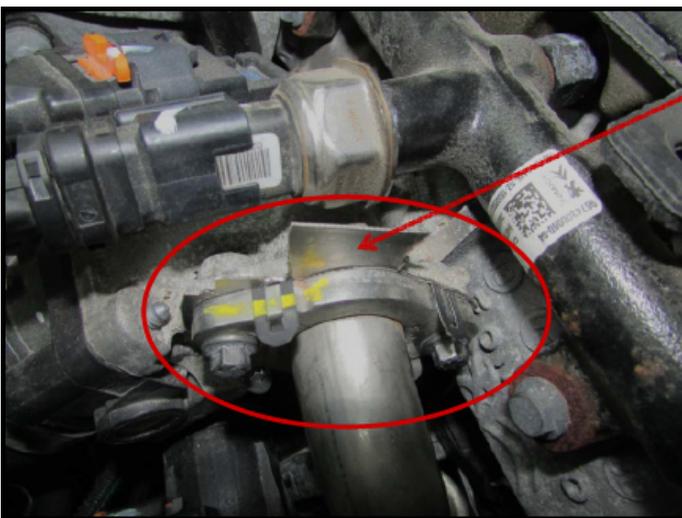


Metallplättchen (Blende) einbauen



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 32: Detaildarstellungen der AGR-Manipulation 2



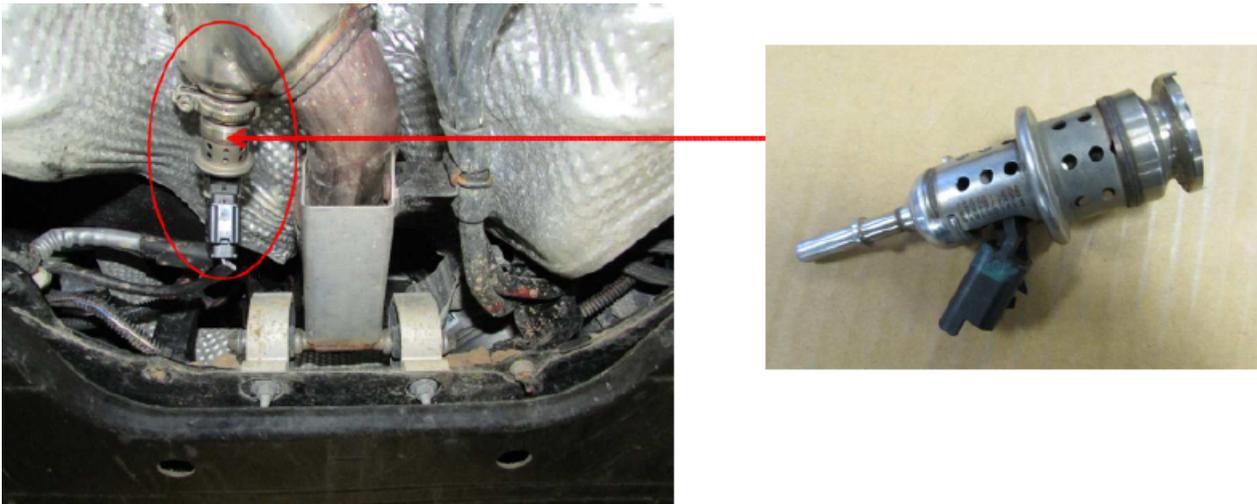
Metallplättchen (Blende) im eingebauten Zustand

Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

4.2.2 Mechanische Manipulation des SCR-Systems

Das SCR-System des Peugeot wurde durch den Ausbau des Harnstoff-Einspritzventil im Abgasstrang und durch den Verschluss durch eine Blindscheibe beeinflusst. Wichtig dabei war, dass die serienmäßige Antaktung des Einspritzventils erhalten blieb. Dazu wurde der elektrische Stecker, sowie die Harnstoffleitung am Einspritzventil nicht entfernt. Das frei hängende SCR-Ventil musste dabei in einen entsprechenden Behälter (z.B. Kunststoffkanister) gelegt werden, damit mögliche AdBlue-Einspritzmengen aufgefangen werden konnten. Alternativ kann auch ein Kunststoffschlauch über das Einspritzventil gesteckt und nach außen geführt werden.

Abbildung 33: Detaildarstellungen der SCR-Manipulation 1



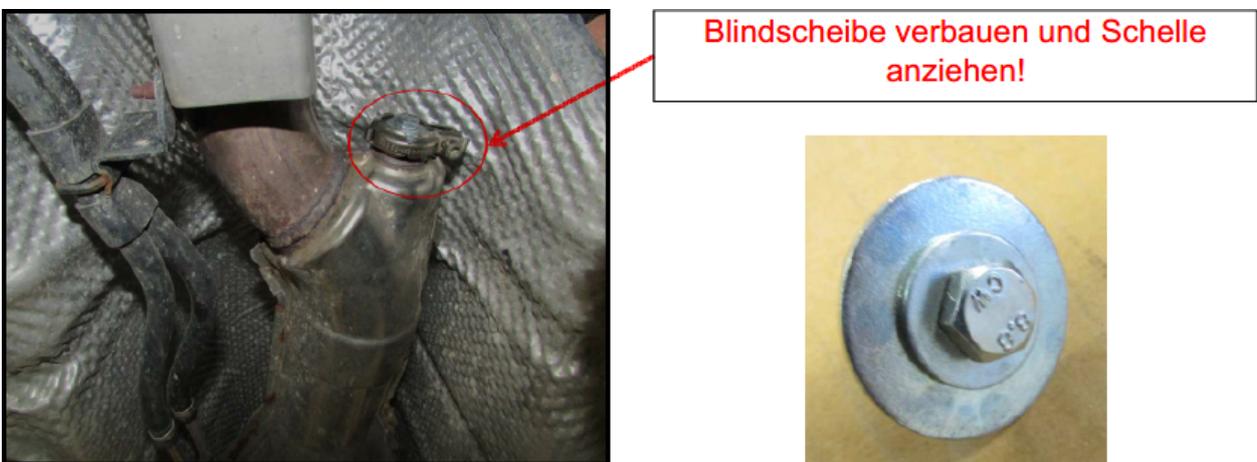
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 34: Detaildarstellungen der SCR-Manipulation 2



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 35: Detaildarstellungen der SCR-Manipulation 3



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

4.2.3 Softwareseitige Manipulationen

Grundsätzlich wäre es auch möglich, die emissionsmindernden Bauteile über das Motormanagement (ECU) zu manipulieren. Dies bedingt nach eigener Recherche jedoch spezielles Fachwissen im Umgang mit entsprechenden Programmierertools. Aus diesem Grund wurde eine solche Betrachtung in dieser ersten Evaluierungsphase in Absprache mit dem Auftraggeber nicht durchgeführt.

4.2.4 Messreihen und allgemeine Randbedingungen

Die vorgenannten Manipulationsmöglichkeiten ergeben somit die Messmatrix in Tabelle 10:

Tabelle 10: Matrix der Manipulationsmöglichkeiten

Messreihe	1	2	3	4
AGR	Serie	Serie	manipuliert	manipuliert
SCR	Serie	manipuliert	Serie	manipuliert

Die obige Messmatrix wurde sowohl bei 20°C, wie auch bei 15°C Raumtemperatur durchgeführt. Vor- und nach der Durchführung der Messreihen muss das Fahrzeug auf mögliche Fehlerspeichereinträge abgefragt werden. Dies kann mit Hilfe eines Scantools mit AVL XDS 1000 Software erfolgen. Die entsprechenden Protokolle sind zur Dokumentation abzuspeichern. Bei ergebnisrelevanten Fehlern im Fehlerspeicher wäre zu prüfen, ob die Messungen wiederholt werden müssen. Um das Fahrzeugverhalten im Hinblick auf die zu untersuchenden Messgrößen besser verstehen zu können, sollten gewisse Motorparameter während der Prüfläufe bei allen Projektbeteiligten mit aufgezeichnet und später analysiert werden. Hierfür stellt die Firma AVL DiTEST ein Diagnosetablett mit der Software XDS 1000 zur Verfügung. Über einen Entsprechenden OBD-Stecker können beliebige Motorparameter ausgelesen und aufgezeichnet werden. Tabelle 11 zeigt die Liste mit den aufzuzeichnenden Fahrzeugparametern, welche im Vorfeld für die Evaluierungsphase definiert wurden.

Tabelle 11: Messwertliste AVL-Diagnosetool

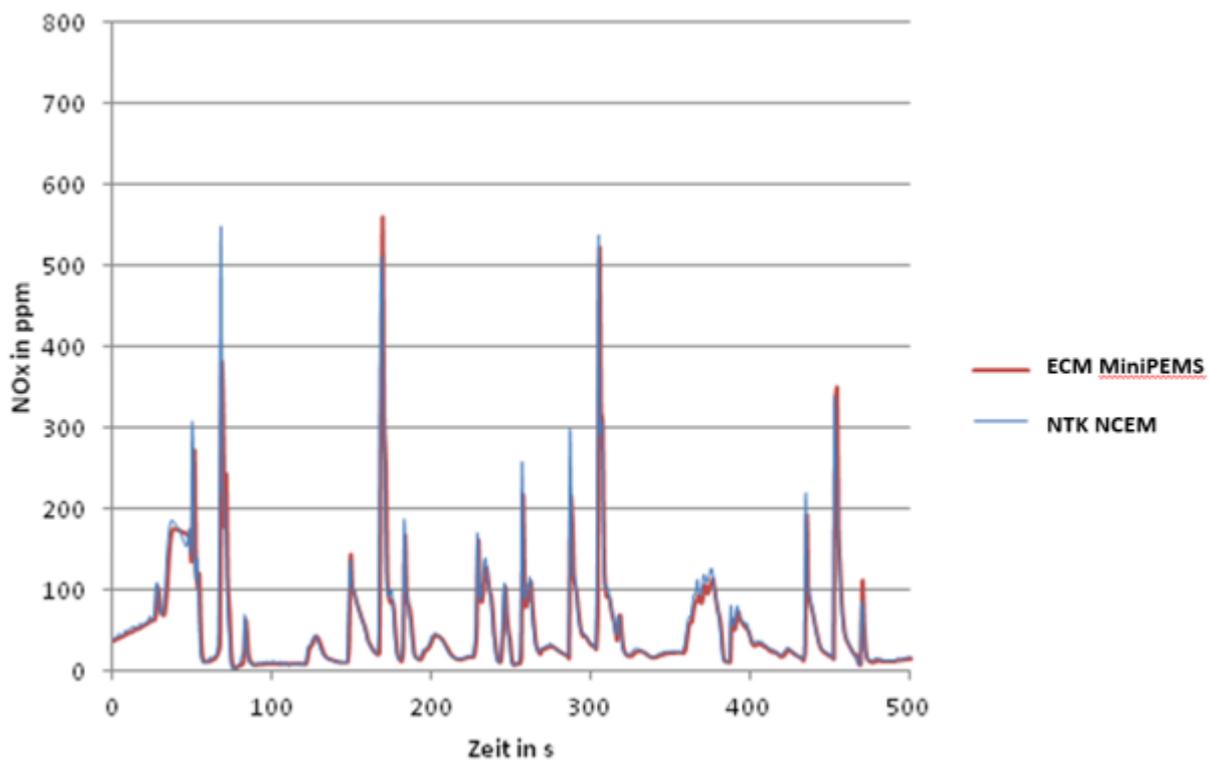
Messwert	Einheit
Abgasrückführung Drosselventil Referenzwert	%
Abgasrückführventil PWM-Steuerung	%
Abgasrückführventil Stellung	V
AdBlue Temperatur	°C
Außenluftdruck	mbar
Außentemperatur	°C
Batterieladestatus	%
Beladungszustand Regeneration (dynamisch)	%
DeNO _x -Katalysator Harnstoffkonzentration	g
Differenzdruck Partikelfilter	bar
Drosselklappenstellung	%
eingespritzte Menge Harnstoff	mg/s
Harnstoff Leitungsdruck	bar
Harnstoffstand Additiv-System	l
Kühlflüssigkeitstemperatur	°C

Messwert	Einheit
Motordrehzahl	1/min
NO _x -Konzentration hinter NO _x -Katalysator	ppm
NO _x Sensor Abgasdruck	mbar
Öffnungsverhältnis Abgasrückführventil	%
Öltemperatur	°C
Rußgehalt Partikelfilter	g
Stellung Abgasrückführventil	%
Temperatur NO _x -Katalysator	°C
Verbleibende Menge Additiv im Vorratsbehälter	ml

4.3 Mini-PEMS

Das Lastenheft für das Messprogramm mit der Mini-PEMS-Anlage ist im Anhang dargestellt. Im Rahmen der Phase der Evaluierungsmessungen wurden zwei unterschiedliche Mini-PEMS Geräte eingesetzt. In Abbildung 36 ist eine Vergleichsmessung der beiden Geräte von den Geräteherstellern NTK und ECM dargestellt. Die untersuchten Geräte lieferten vergleichbare Ergebnisse. Der Einbau und die Handhabung der Geräte sind sehr einfach und nach kurzer Einarbeitung umsetzbar. Die Messung der Abgaskonzentrationen ohne Verwendung eines EFM vereinfacht die Installation der Messgeräte erheblich. Die Geräte sind mit verschiedenen Sensoren für zusätzliche Abgaskomponenten erweiterbar.

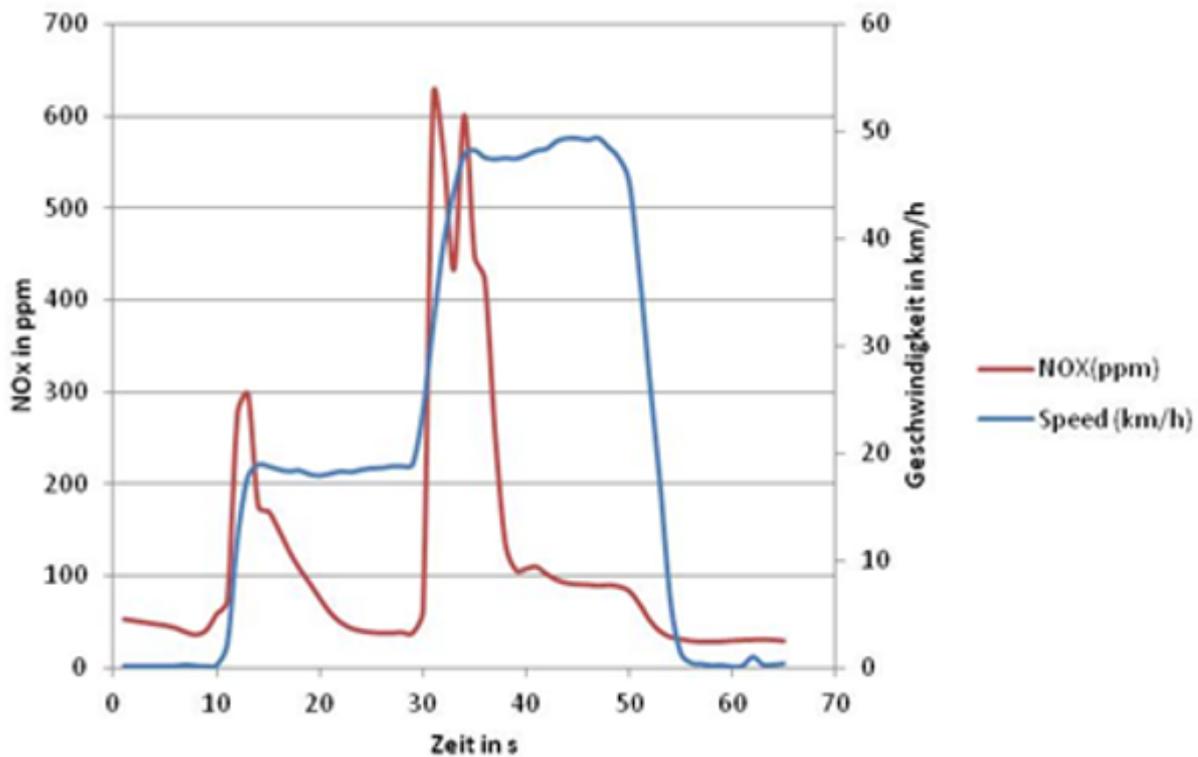
Abbildung 36: Vergleich NTK NCEM / ECM



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

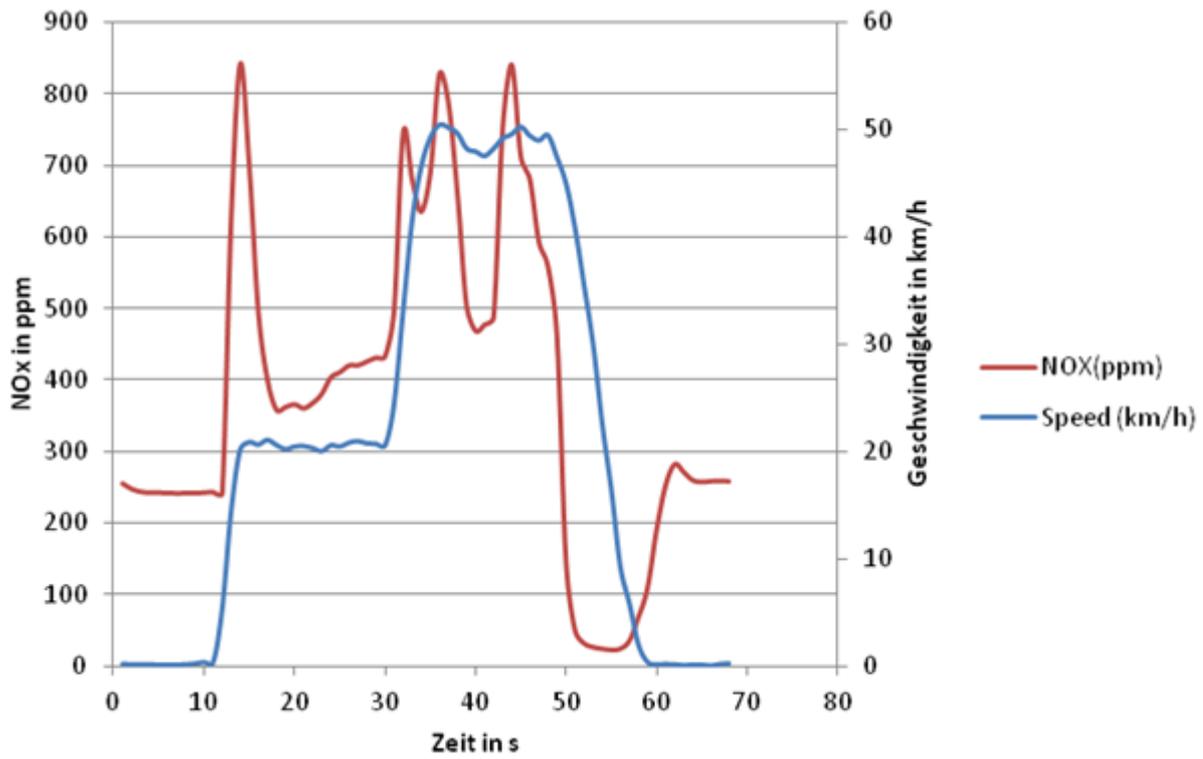
Um die Auswirkungen der in das Testfahrzeug eingebauten Fehler mit Mini-PEMS zu bewerten, wurde auf der Straße der ASM2050 nachgefahren und dabei die Abgaskonzentrationen modal erfasst. Je Zustand des Fahrzeugs (ohne Fehler, SCR off, AGR off, AGR und SCR off) wurden jeweils 10 Zyklen gefahren. Zusatzinfos aus dem OBD System wurden mit Hilfe des AVL DiTEST Testers ausgelesen (u.a. SCR Kat Temperatur, eingespritzte Harnstoffmenge, Außentemperatur, Öltemperatur). Bei allen eingebauten Fehlern blieb die Malfunction Indicator Lamp des OBD Systems (MIL) aus. Während der Durchführung der Messungen herrschte etwa 0°C Umgebungstemperatur. In Abbildung 37 bis Abbildung 39 sind für die verschiedenen Zustände des Fahrzeugs beispielhaft jeweils ein Verlauf der NO_x Konzentrationen über der Fahrgeschwindigkeit im ASM2050 aufgetragen.

Abbildung 37: ASM2050, Fahrzeug ohne Fehler



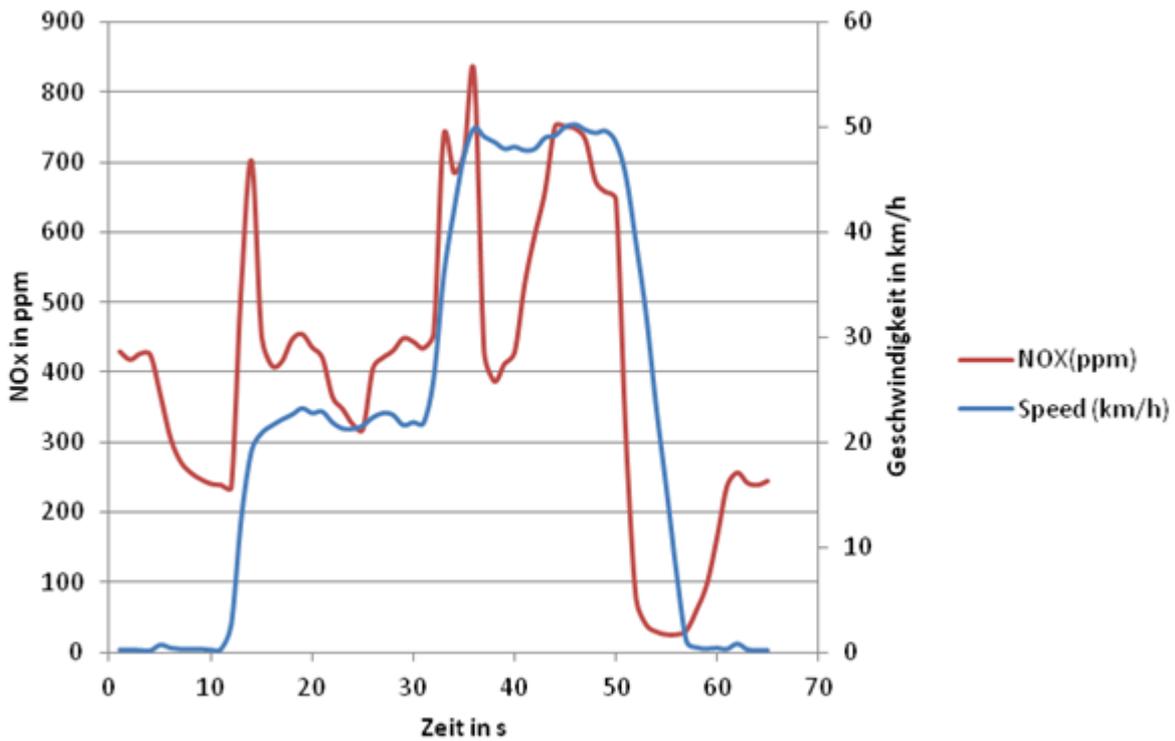
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 38: ASM2050, AGR off



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 39: ASM2050, AGR und SCR off



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Mittelwerte der gemessenen NO_x- und CO₂-Werte. Der Mittelwert wurde aus den Mittelwerten der Einzelmessungen gebildet. Zusätzlich ist der rechnerisch aus dem Verhältnis der NO_x-Konzentrationen zu den CO₂-Konzentrationen ermittelte Emission Index angegeben.

Tabelle 12: NO_x- und CO₂-Konzentrationen bei verschiedenen Zuständen des Fahrzeugs (Mittelwert über je 10 Messungen)

	MW NO _x [ppm]	MW CO ₂ [%]	Emission Index (NO _x [mg] / CO ₂ [g])
Fzg. i.O.	117,2	5,39	2,27
AGR OFF	382,5	4,93	8,11
AGR+SCR OFF	399,51	4,88	8,56

Mit Hilfe der Mini-PEMS Geräte und des ASM2050 auf der Straße ließen sich alle Fehler detektieren. Die Messungen deuten darauf hin, dass eine Messung bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h ausreicht, um die NO_x-Konzentrationen bewerten zu können. In diesem Fall ist eine deutlich verkürzte Fahrstrecke ausreichend. Neben dem ASM wurden weitere Fahrten auf der Straße durchgeführt (Stadtfahrt in einem Industriegebiet). In Tabelle 13 sind die Mittelwerte der gemessenen NO_x- und CO₂-Werte. Zusätzlich sind die NO_x-Emissionen, berechnet aus den NO_x Konzentrationen und mit Hilfe von OBD Daten errechnetem Abgasmassenstrom, angegeben.

Tabelle 13: NO_x- und CO₂ Konzentrationen bei verschiedenen Zuständen des Fahrzeugs (Mittelwert über je 10 Messungen)

	MW NO _x [ppm]	NO _x [mg/km]
Fzg. i.O.	69,9	347,18
AGR OFF	345,7	1686,58
SCR OFF	178,3	896,86

Ergebnisübersicht Mini-PEMS:

- ▶ Mit Hilfe der Abgas-Konzentrationen lassen sich Aussagen zu dem Zustand der Fahrzeuge treffen. Dadurch kann ein aufwändiger Einbau eines EFM vermieden werden.
- ▶ Aus NO_x über CO₂ Konzentration [%] lassen sich NO_x Emissionen [mg] abschätzen
- ▶ Mini-PEMS ist eine sinnvolle Alternative / Ergänzung zum Rollenprüfstand.
- ▶ Einbau des Mini-PEMS ist mit einfachen Mitteln möglich (ohne Massenstrommessung)
- ▶ Bewertung eines Fahrzeugs im Hinblick auf NO_x, CO und Partikel mit Hilfe einer kurzen Testfahrt möglich.
- ▶ Die eingebauten Fehler lassen sich erkennen.
- ▶ Für die Bewertung reichen die Konzentrationen aus, eine Bestimmung des Abgasmassenstroms ist nicht zwingend erforderlich.
- ▶ Umgebungsbedingungen und Fahrzeug-Konditionierung beeinflussen Ergebnisse.
- ▶ OBD Daten erhöhen die Sicherheit bei der Bewertung (z.B. Abgastemperatur, SCR Kat Temperatur Umgebungstemperatur, AdBlue Dosierung)
- ▶ Allradfahrzeuge können ohne Mehraufwand geprüft werden

4.4 ASM2050

4.4.1 Messaufbau

Die Messungen zu diesem Prüfverfahren wurden bei TÜV SÜD im Abgasprüflabor in Heimsheim durchgeführt. Das Lastenheft für das ASM2050 Messverfahren ist in Anhang dargestellt. Das Testfahr-

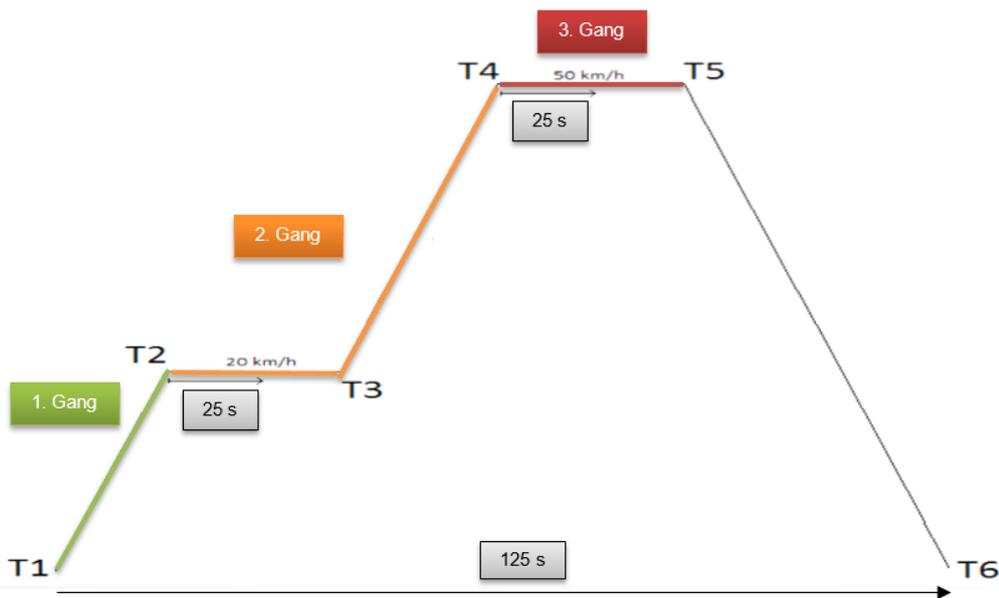
zeug wurde dabei auf einem Allrad-Rollenprüfstand vermessen. Um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten, wurde der Zyklus stets in den Schaltstufen eins bis drei gefahren. Zudem wurde die oben genannte Empfehlung der an der SET II Studie beteiligten spanischen Prüforganisationen befolgt und die Zeit der Konstantfahrten von ursprünglich 15 auf 25 Sekunden erhöht.

Abbildung 40: Messaufbau ASM2050



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 41: Untersuchte ASM2050-Variante



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Messungen wurden mit einer Rollenlast von 50 N, 200 N und 1000N durchgeführt, um den Lasteinfluss auf die Messergebnisse zu untersuchen. Das Testfahrzeug wurde vor Versuchsbeginn vollgetankt, der Reifenluftdruck nach Herstellervorgabe für halbbeladenen Zustand eingestellt (VA: 2,5 bar, HA: 2,4 bar) und bis auf Betriebstemperatur warmgefahren. Als Messgerät wurde beim ASM2050 das AVL DiTEST MDS Drive 188 Diagnosegerät benutzt. In Tabelle 14 sind die ausgelesenen Temperaturwerte während der Messungen aufgelistet.

Tabelle 14: ASM2050: Temperaturen (Messgerät: AVL Diagnosegerät)

Messpunkt	Temperatur [°C]
Öl	100
Kühlwasser	100
SCR-Katalysator	200 ... 280
Umgebungstemperatur	23

4.4.2 Messdatenauswertung

Zur Analyse herangezogen wurden jeweils die während der beiden Konstantfahrten gemessenen Stickstoffoxidkonzentrationen. Die Messwerte wurden über die letzten 15 Sekunden gemittelt. Die ersten 10 Sekunden der Konstantfahrten wurden nicht ausgewertet. Dieser Zeitraum wird als Einpendelzeitraum betrachtet und dient dazu, Abweichungen zum vorgegebenen Fahrprofil, hervorgerufen durch den Fahrereinfluss und des Schaltvorganges, zu eliminieren. Eine Messreihe beinhaltet fünf hintereinander gefahrene ASM2050 Zyklen. Die Stickstoffoxiddatenmittelwerte der 20 km/h bzw. 50 km/h schnellen Konstantfahrten wurden für jeden einzelnen dieser Durchläufe ermittelt und für die jeweils installierten Fehler der Fehlerindikator FI (Quotient Emissionen mit und ohne Fehler) ermittelt.

Tabelle 15: ASM2050 Ergebnisübersicht - Ohne Fehler und mit AGR-Fehler

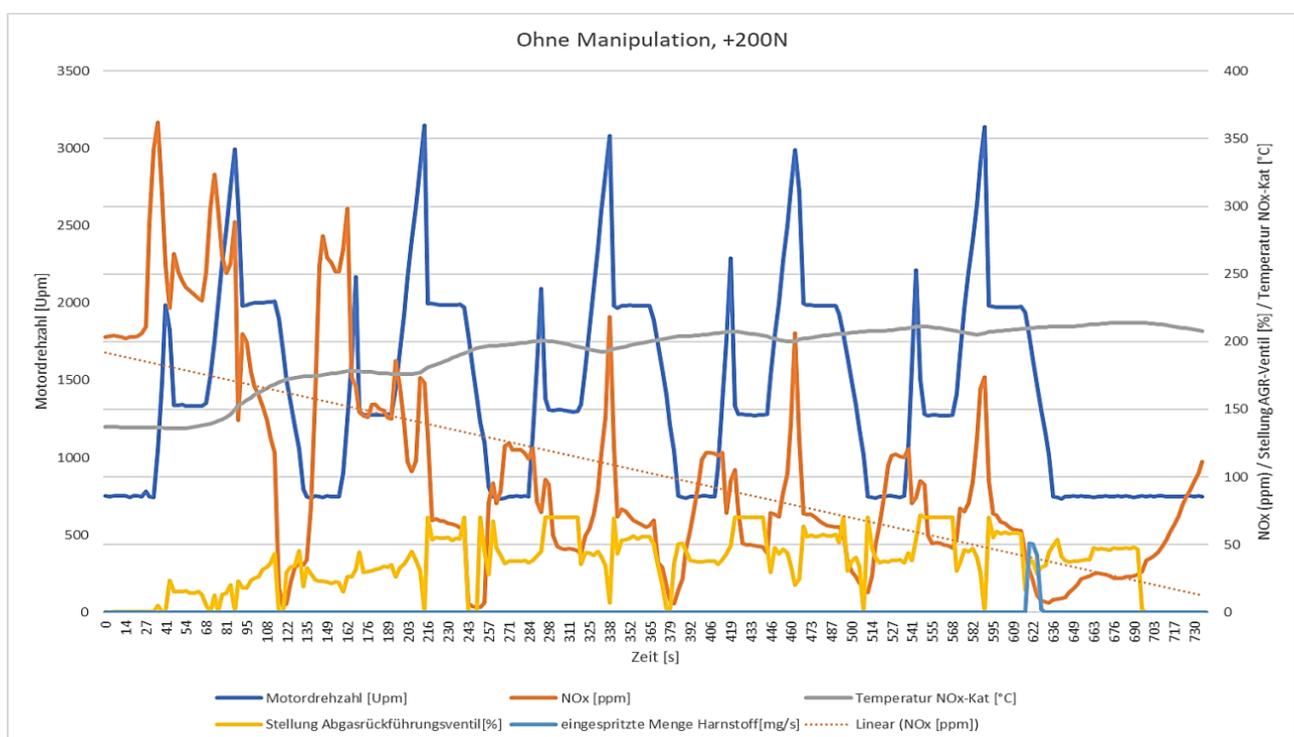
Manipulation	Serie				AGR-Fehler	
Ausgewertete Zyklen	3 – 5				1 - 5	
Last (N)	0	50	200	1000	0	200
NO_x-MW 20km/h (ppm)	48	52	49	-	194	279
NO_x-MW 50km/h (ppm)	53	61	66	-	202	224
FI 20km/h	-	-	-	-	4,05	5,67
FI 50km/h	-	-	-	-	3,79	3,41

Tabelle 16: ASM2050 Ergebnisübersicht – SCR-Fehler und AGR+SCR-Fehler

Manipulation	SCR-Fehler				AGR + SCR-Fehler	
Ausgewertete Zyklen	1 - 5	2 - 5	3 – 5	1 - 5	1 - 5	
Last (N)	0	50	200	1000	0	200
NO_x-MW 20km/h (ppm)	48	54	64	98	352	334
NO_x-MW 50km/h (ppm)	65	67	67	122	252	296
FI 20km/h	1,01	1,04	1,31	-	7,34	6,78
FI 50km/h	1,23	1,09	1,02	-	4,73	4,50

In Tabelle 15 und Tabelle 16 wurden die Mittelwerte der beiden Konstantfahrten nicht immer über alle fünf gefahrenen Zyklen gemittelt. Die Gründe dafür veranschaulicht Abbildung 42. Die ersten beiden Durchführungen weisen erheblich höhere NO_x -Emissionen auf als die restlichen drei. Mit ein Grund dafür ist das Verhalten des AGR-Ventils: das Ventil-Öffnungsverhältnis ist erst ab dem dritten Test auf konstantem hohem Niveau. Da der SCR-Katalysator nicht auf Betriebstemperatur ist, wird vermutlich die Abgastemperatur durch eine geringere AGR-Rate erhöht. In dieser Phase steigen die NO_x -Roh- und Endrohremissionen an. Die Tatsache, dass bei verbautem AGR-Fehler eine erhöhte Abgastemperatur vorhanden war und somit alle fünf Zyklen ausgewertet werden konnten, unterstreicht diesen Zusammenhang. Die SCR-Katalysatortemperatur hat offenbar Einfluss auf die eingespritzte Harnstoffmenge. Alle Komponenten des Abgasreinigungssystems beeinflussen sich gegenseitig und müssen bei der Auswertung auch als Gesamtsystem betrachtet werden. Der SCR-Katalysator war zu Beginn der Messreihe im Serienstand nicht auf Betriebstemperatur (ab ca. 200°C), da das Fahrzeug zwischen Vorkonditionierung und dem Test ca. 5 Minuten im Leerlauf betrieben wurde, was zum Absenken der SCR-Kat Temperatur unter 200°C führte.

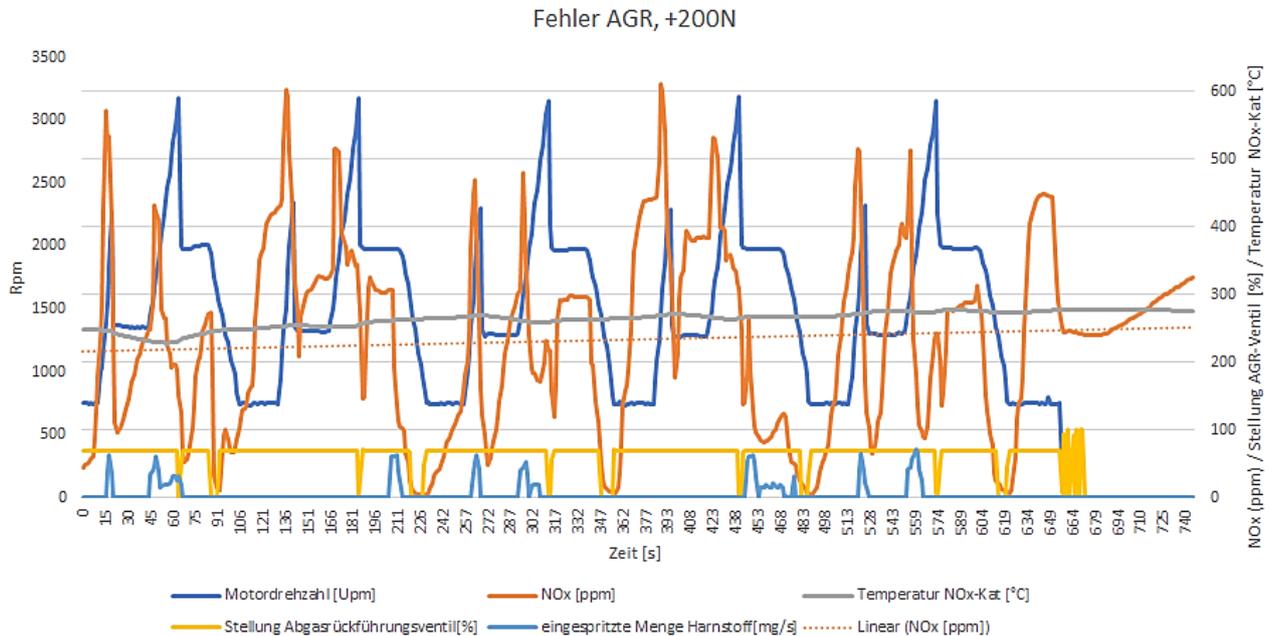
Abbildung 42: ASM2050: Parameter ohne Manipulation (Serienstand)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei der Messreihe mit AGR-Fehler und 200 N Last (Abbildung 43) konnten bei funktionierender Harnstoffeinspritzung alle fünf Zyklen ausgewertet werden. Bei diesem Durchlauf wurde der ASM2050 unmittelbar nach dem Warmfahren gestartet. Durch eine geeignete Vorkonditionierung kann also gewährleistet werden, dass emissionsmindernde Systeme ab der ersten Durchföhrung des ASM2050 ordnungsgemäß arbeiten. Das Erreichen der Betriebstemperatur des Katalysators ist folglich essentiell. Fehler im AGR-System können bei geringen Lasten sehr gut festgestellt werden, wie die Fehlerindikatoren (FI) von wenigstens 3,41 aufzeigen (siehe Tabelle 15). Besonders interessant ist die unregelmäßige, aber vor allem erhöhte Harnstoff-Einspritzrate aufgrund erhöhter NO_x -Werte im Rohabgas bei verbautem AGR-Fehler.

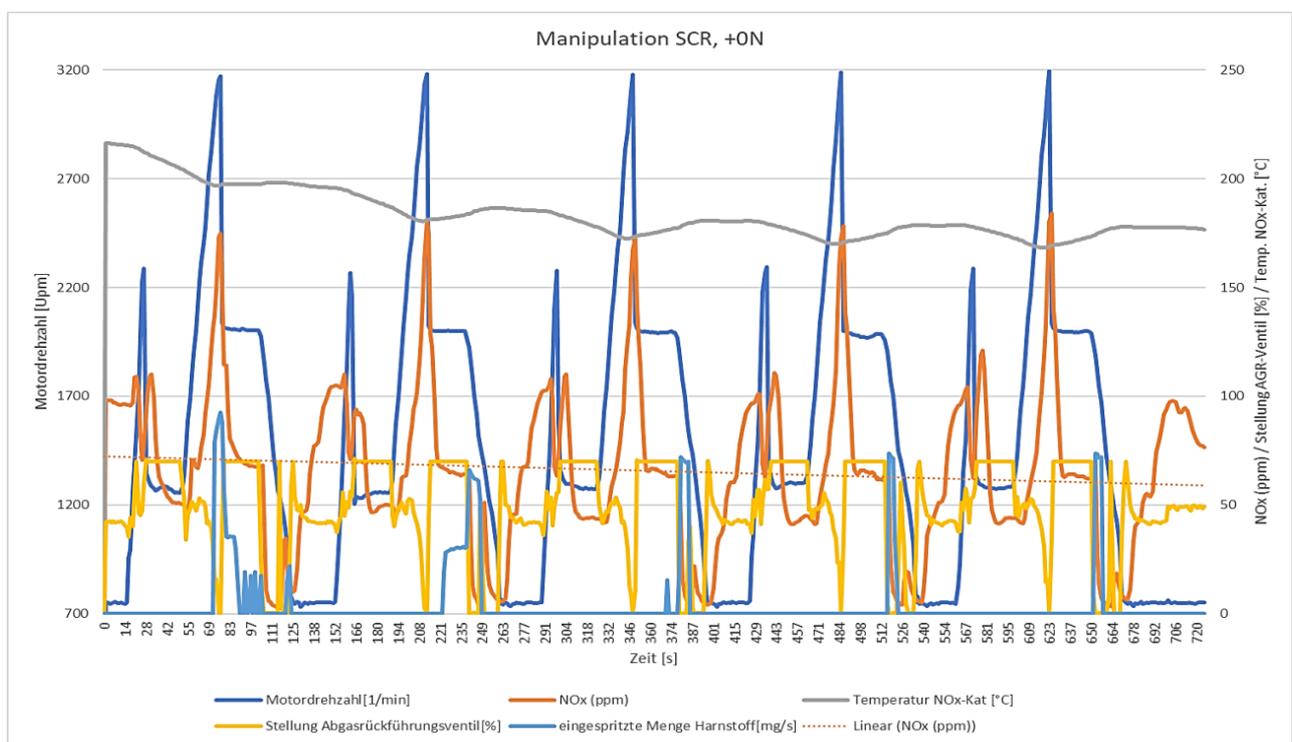
Abbildung 43: ASM2050: Parameter bei AGR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Beim Betrachten der Fehlerindikatoren in Tabelle 16 bei manipuliertem SCR-System fallen niedrige NO_x-Emissionen auf. Das SCR-System kommt aufgrund der geringen Lasten (Abbildung 44) kaum zum Einsatz, so dass es nur bedingt bewertet werden kann. Voraussetzung für eine Bewertung des SCR-Systems ist eine hohe Harnstoff-Einspritzrate.

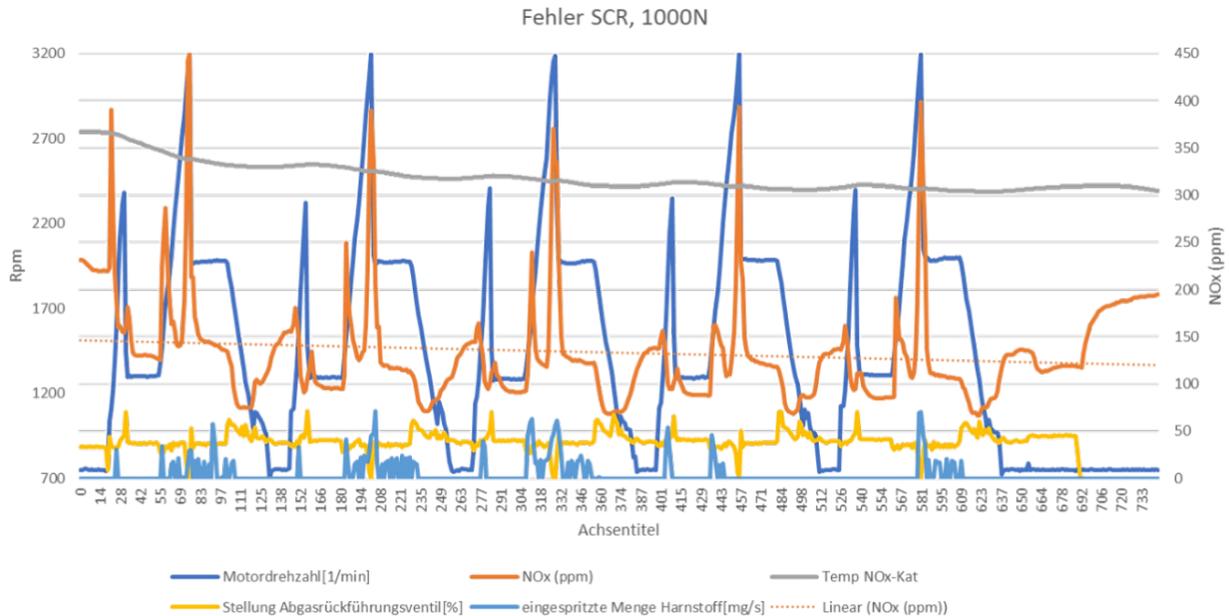
Abbildung 44: ASM2050: Parameter bei SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Es wurde exemplarisch ein Versuch mit Fehler im SCR-System sowie mit 1000 N Last gefahren. Es ist eine erhebliche Steigerung der Einspritzrate durch die hohe Last erkennbar. Zudem wird in jedem der fünf Zyklen Harnstoff eingespritzt.

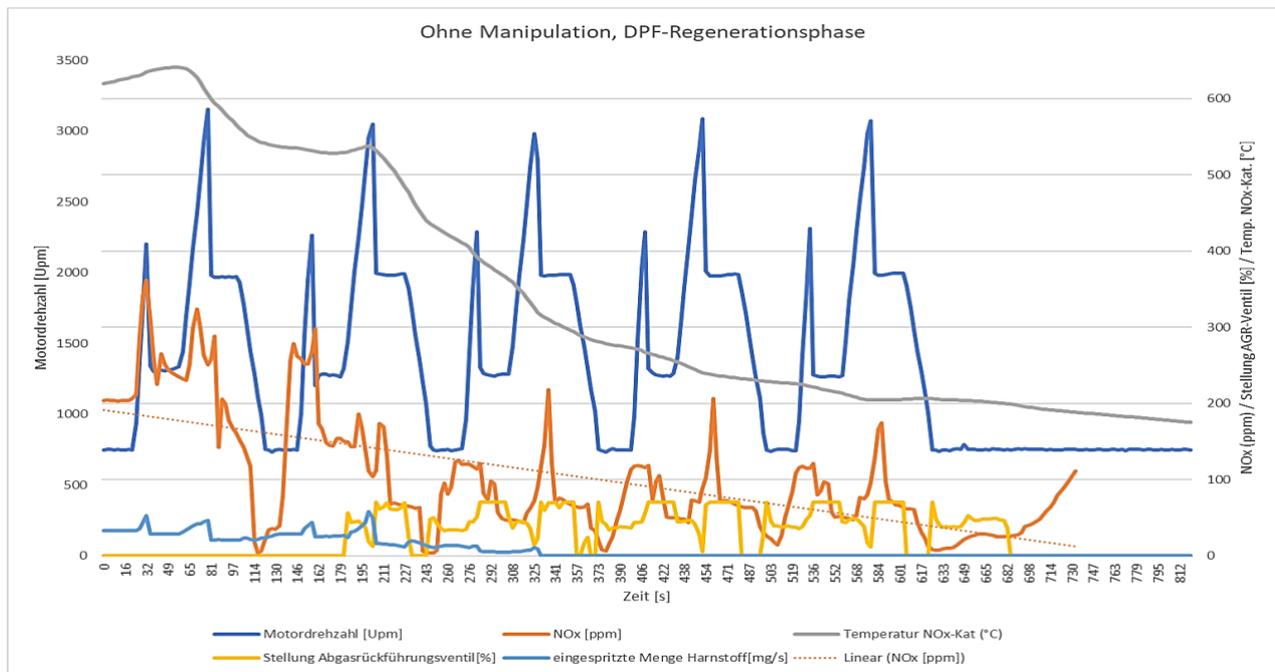
Abbildung 45: ASM2050: Hohe Kat.-Aktivität durch hohe Last



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei einer Messreihe fiel eine extrem hohe Katalysatortemperatur von über 600°C auf (Abbildung 46). Gleichzeitig war die Harnstoff-Einspritzrate sehr hoch und die AGR-Rate null, was hohe Stickstoffoxidkonzentrationen hervorbrachte. Dieses außergewöhnliche Systemverhalten lag an einer von der Motorsteuerung initiierten DPF-Regenerationsphase. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer AU zufälligerweise eine solche Phase abläuft ist zwar sehr gering, trotzdem muss ein solcher Zustand bei einer AU erkannt werden können.

Abbildung 46: ASM2050: Verhalten bei DPF-Regenerationsphase



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

4.4.3 Fazit ASM2050

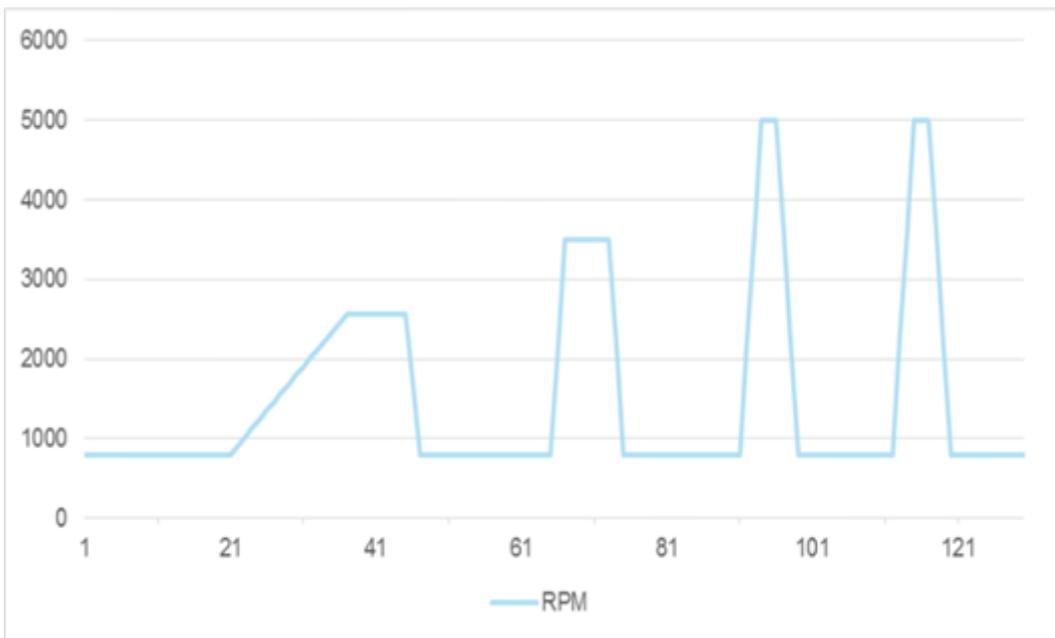
Zusammenfassend ist der ASM2050 Short Test grundsätzlich geeignet, Fehler am AGR- bzw. SCR-System mit ausreichender Reproduzierbarkeit zu erkennen. Um ungünstige Einflüsse bzw. Fehlmessungen zu vermeiden und das Fahrzeug entsprechend zu konditionieren, sind Messreihen mit jeweils fünf hintereinander folgenden ASM2050 Zyklen durchzuführen. Der Focus auf AGR- und SCR-Systeme sowie die verwendeten Fehlereinbauten erscheinen sinnvoll, da diese nicht nur einem natürlichen Verschleiß unterliegen, sondern auch von Fahrzeughaltern zur Leistungssteigerung manipuliert werden. Der eingebaute Defekt im AGR-System lässt sich bereits im unteren Lastbereich gut erkennen. Das SCR-System benötigt demgegenüber höhere Lasten, bis es aktiv wird und damit auch beurteilt werden kann. Auch ist davon auszugehen, dass sich die Abgasnachbehandlungssysteme gegenseitig beeinflussen. Deshalb erscheint es am zielführendsten, weitere Versuche mit Lasten größer als 200 N zu fahren. Weiterhin muss untersucht werden, ob der zweistufige ASM2050-Zyklus evtl. gekürzt werden kann, da der Geschwindigkeitseinfluss offenbar eine untergeordnete Rolle spielt und bereits 20km/h ausreichend sein kann. In weiteren Untersuchungen wird daher geprüft, ob ein ASM20 genügt.

4.5 AVL/Capelec

4.5.1 Testzyklus

Bei dem AVL / Capelec Zyklus handelt es sich um einen definierten Testablauf ohne extern aufgebrachte Last (prüfstandsunabhängig). Hierbei wird ein fünfstufiger Test im Stand abgefahren und anschließend hinsichtlich der gemessenen Emissionen und Motorparameter analysiert. Die erste Beschleunigungsrampe stammt hierbei aus Forschungsergebnissen der Fa. AVL, der Rest aus einer erstellten Prüfprozedur der Fa. Capelec. Somit haben wir es hier mit einem kombinierten Verfahren zu tun, welches Abbildung 47 darstellt:

Abbildung 47: AVL/Capelec Prüfprozedur



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

4.5.2 Messtechnik

Die Durchführung der Prüfungen erfolgte mit der von Capelec zur Verfügung gestellten Prüftechnik (siehe Abbildung 48). Der Bediener wird Schritt für Schritt durch das Menü geleitet, muss einige Fahrzeugangaben tätigen und kann schließlich die einzelnen Messschritte mit entsprechenden Toleranzgrenzen anfahren. Das System gibt zeitnah eine Plausibilitätsprüfung aus und bewertet die Abfolge. Werden die Testbedingungen nicht eingehalten, wird der Bediener informiert und muss die Messreihe wiederholen. Die Capelec Prüftechnik besteht aus einem Bedien-PC und einer Messsonde für NO_x , sowie einem Bluetooth OBD-Auslesetool für den Abgriff der Motordrehzahl und der Abfrage von benötigten Motorparametern für die Auswertung. Mit einem von der Firma AVL DiTEST zur Verfügung gestellten OBD-Auslesetool, welches via Y-Splitter ebenfalls an die OBD-Fahrzeugschnittstelle angeschlossen wurde, werden die Motorparameter zusätzlich aufgezeichnet (siehe Abbildung 49). Ziel ist eine bessere Interpretation der Messergebnisse und somit des Motorverhaltens.

Abbildung 48: Messtechnik Fa. Capelec



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 49: Messtechnik Fa. AVL DiTEST



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

4.5.3 Messreihen

Wie im Fehlerlastenheft (vgl. Kapitel 10 Anhang) beschrieben, wurden bei unterschiedlichen Fahrzeugzuständen (Serie, Manipulation SCR, Manipulation AGR, sowie Manipulation SCR & AGR) Messungen nach der besagten Prüfprozedur durchgeführt und analysiert. Hierbei wurden je Zustand drei möglichst reproduzierbare Messungen nacheinander gefahren. Vor- und nach allen Messreihen wurde

ein Fahrzeugdiagnoseprotokoll ausgelesen und gespeichert, um mögliche Veränderungen nach Testdurchführung feststellen zu können. Um konstante Bedingungen darzustellen, wurde das Fahrzeug auf Betriebstemperatur vorkonditioniert (Kühlwassertemperatur > 80°C). Hier zeigte sich jedoch, dass eine Erwärmung im Leerlauf (ohne Last) sehr lange dauert und das Fahrzeug somit auf dem Rollenprüfstand warmgefahren wurde, bis sich die gewünschten Temperaturen eingestellt hatten. Dem gegenüber wurde auch eine Messreihe mit kaltem Motor (Kühlwassertemperatur <80°C) gefahren, um den Einfluss auf die messbaren NO_x-Werte aufzuzeigen. Ebenso wurde auch die Fahrzeugumgebungstemperatur als mögliche Einflussgröße auf das Motor- und somit Emissionsverhalten untersucht. Es wurden Messreihen bei 15°C und 20°C im konditionierten Abgasprüfstand durchgeführt.

4.5.4 Messergebnisse

Es wurden die Ergebnisse der Capelec Auswertung mit den aufgenommenen Motorparameterdaten verglichen und interpretiert. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf den NO_x-Emissionen und der AGR-Ventilstellung bezogen auf die Motordrehzahl. Weitere emissionsrelevante Größen wurden mit dem AVL OBD-Tool aufgezeichnet und ebenfalls analysiert. Anhand dieser Messdaten wurden neue Erkenntnisse zum Motorverhalten, sowie den vorliegenden Emissionsregelstrategien gewonnen. Allgemein zeigte sich, je mehr Motorparameter über den Fahrzeugdiagnoseanschluss ausgelesen wurden, desto schlechter war die Messwertauflösung (Abtastrate). Eine direkte Vergleichbarkeit mit dem Messdatenverlauf der Capelec-Software (1Hz) war somit nur bedingt möglich. Eventuelle Messwertspitzen könnten hierbei unentdeckt bleiben. Die Ergebnisbewertung nach Capelec zielt auf eine Abfrage von Ungleichungen hinsichtlich Motorfüllgrad und NO_x-Verhältnissen in den entsprechenden Prüfphasen. Des Weiteren basiert das Ganze auf dem Wissen der AGR-Ventilstellung bei bestimmten Drehzahlen. Anhand dieser Punkte soll die AGR-Funktion beurteilt werden. Bei unserer Prüfprozedur mit den entsprechenden Manipulationen zeigte sich diese Vorgehensweise jedoch als unbrauchbar, da die implementierten Fehler nicht erkannt wurden.

4.5.4.1 Serienstand (ohne Fehlerverbau)

Die höchsten NO_x-Peaks traten direkt in den einzelnen Beschleunigungsrampen am Anfang jeder Phase auf, wobei die Werte nach dem Einregeln der Drehzahl auf ein deutlich geringeres Niveau abfallen. Generell liegen die NO_x-Werte auf einem niedrigen Niveau, was unter anderem auch die Funktion des AGR-Ventils zeigt. Hier haben wir es mit einer Teilaktivität des AGR-Ventils zu tun, eine AdBlue-Einspritzung lag jedoch zu keinem Zeitpunkt vor. Die Messwerte des OBD-Auslesetools der Fa. AVL zeigten ein vergleichbares Verhalten (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Capelec-Ergebnisse Serienstand

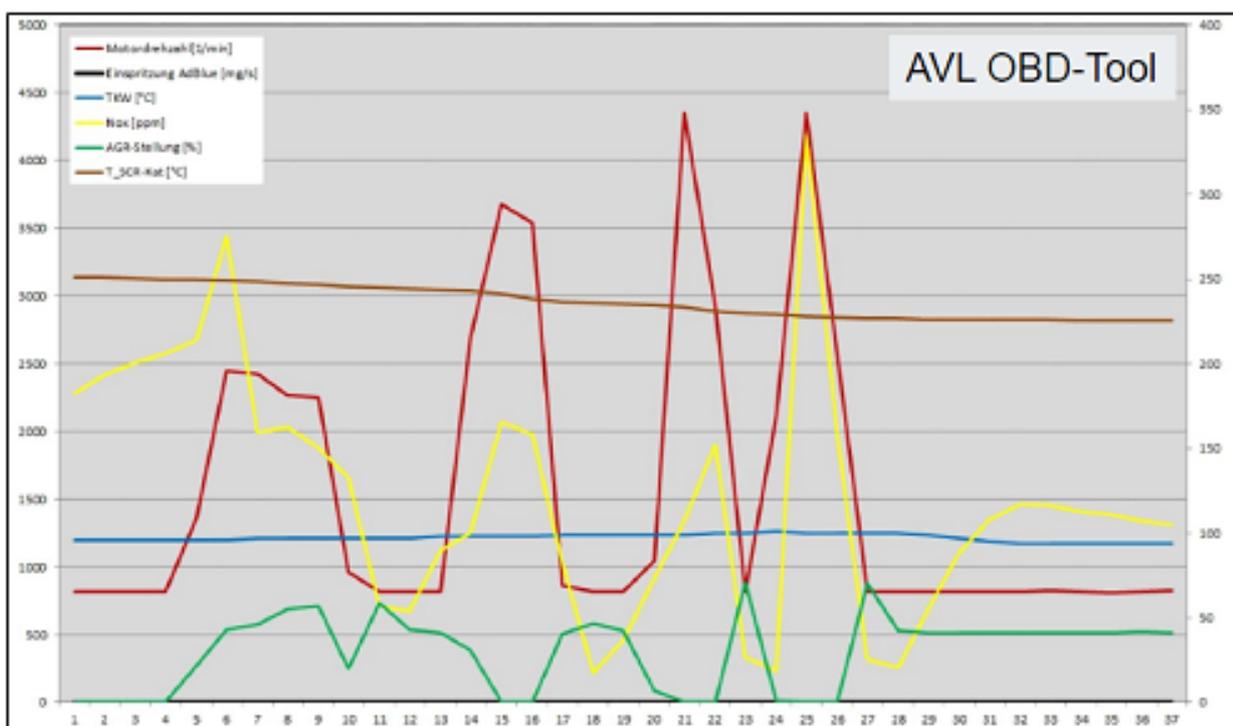
Messung	Umin	NO _x (ppm)	Motorfüllgrad	Luftmenge	% der Öffnung des AGR-Ventils	Luftdruck
Idle 1	820	181,86	0,81	12,9	0	103
RPM = 2000-3000	2712	153,17	0,74	39,53	36,1	112
Idle 2	819	34,18	0,45	7,06	42,7	100
RPM > 3500	3595	200,75	1,07	73,65	0	132
C1	4357	197,31				
Idle C1	816	40,14				
C2	4359	235,8				
Idle C2	816	28,09				

4.5.4.2 SCR-Fehler

Tabelle 18: Capelec-Ergebnisse SCR-Fehler

Messung	Umin	NO _x (ppm)	Motorfüllgrad	Luftmenge	% der Öffnung des AGR-Ventils	Luftdruck
Idle 1	818	180,23	0,82	13,03	0	103
RPM = 2000-3000	2645	141,2	0,71	36,34	40	112
Idle 2	820	27,25	0,45	7,21	43,1	100
RPM > 3500	3688	192,2	1,08	76,96	0	135
C1	4369	313,53				
Idle C1	814	40,01				
C2	4358	243,2				
Idle C2	814	31,86				

Abbildung 50: AVL DiTest-Ergebnisse SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

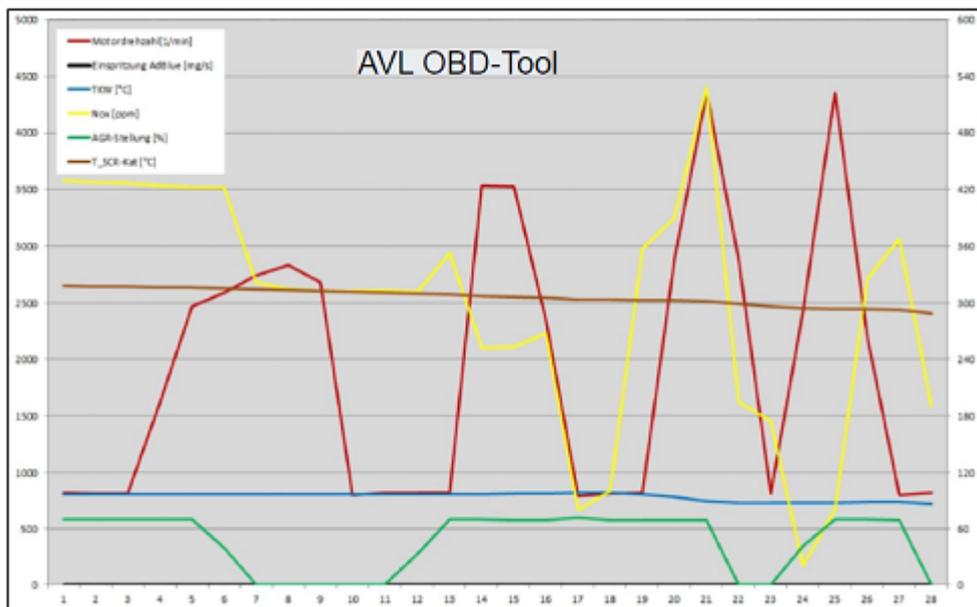
Die Ergebnisse bei verbautem SCR-Fehler zeigen ein ähnliches Emissions- und AGR-Verhalten wie bei der Messreihe im Serienzustand. Anhand der Motormessdaten zum SCR-System kann man keine Harnstoffeinspritzung erkannt werden (Abbildung 50). Der Fehlereinfluss durch ein manipuliertes SCR-System ist daher mit dieser Prozedur (ohne Last) nicht darstellbar (vgl. Tabelle 18). Die genaue Strategie der Harnstoffeinspritzung wäre noch näher zu untersuchen um weitere Rückschlüsse auf die Funktionsweise gewinnen zu können (Einfluss SCR-Temperatur, Last, etc.).

4.5.4.3 AGR-Fehler

Tabelle 19: Capelec-Ergebnisse AGR-Fehler

Messung	Umin	NO _x (ppm)	Motorfüllgrad	Luftmenge	% der Öffnung des AGR-Ventils	Luftdruck
Idle 1	819	271,37	0,78	12,4	0	104
RPM = 2000-3000	2448	261,61	0,63	30,25	69,8	82
Idle 2	818	55,4	0,51	8,28	69,8	70
RPM > 3500	3595	509	1,08	72,12	0	140
C1	4355	383,43				
Idle C1	792	40,08				
C2	4360	256,29				
Idle C2	792	27,39				

Abbildung 51: AVL DiTest-Ergebnisse AGR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die verbaute Blende im AGR-Trakt führt zu einem höheren NO_x-Niveau im Prüfzyklus. Dadurch öffnet das AGR-Ventil komplett, um eine größere Abgasmenge zurückzuführen (siehe Abbildung 51). Weiterhin findet keine NO_x-Reduzierung durch eine mögliche Harnstoffeinspritzung statt. Eine Fehlererkennung gegenüber dem Serienzustand ist mit dieser Prüfmethode grundsätzlich möglich (siehe Tabelle 19). Kennt man jedoch den Serienzustand nicht, ist eine Interpretation eher schwierig, da das AGR-Ventilregelverhalten unbekannt ist und keine NO_x-Vergleichswerte vorliegen. Die Messreihen stellen die Sinnhaftigkeit dieser Prüfprozedur in Frage, beide Manipulationen gleichzeitig zu untersuchen. Die nicht vorhandene SCR-Funktion im Leerlaufbetrieb (ohne Last) würde zu ähnlichen Ergebnissen wie bei verbautem AGR-Fehler führen.

4.5.5 Bewertung der Messergebnisse

- ▶ Einfache und zügige Versuchsdurchführung
- ▶ Fehler im AGR-Trakt war aufzeigbar
- ▶ Keine SCR-Funktion (Harnstoffeinspritzung) ohne Last -> Manipulation nicht darstellbar
- ▶ Fahrzeugkonditionierung ohne Last auf eine Motorbetriebstemperatur >80°C nur sehr schwierig realisierbar (Zeitdauer)
- ▶ Insgesamt geringes NO_x-Niveau, was eine klare Beurteilung von Fehlern schwierig macht
- ▶ Funktion AGR-Ventil unabhängig von der Motortemperatur des Fahrzeugs
- ▶ Viele der derzeitigen Dieselfahrzeuge sind bereits bei geringen Motordrehzahlen (z.B. 2500 1/min) abgeregelt und lassen sich dadurch nur teilweise mit diesem Prüfverfahren beurteilen
- ▶ Um genaue Bewertungsgrundlagen aufstellen zu können, müssten weitere Fahrzeuge untersucht werden. Eventuell wäre ein NO_x-Referenzwert für bestimmte Prüfdrehzahlen in der Typprüfung erforderlich (ähnlich Rauchgastrübungswert)
- ▶ Die Aufzeichnung der Motorparameter mit einem entsprechendem OBD-Auslesetool ist zwingend erforderlich um das Motor- bzw. Abgasverhalten besser verstehen zu können

5 Erprobung und Validierung der Messmethoden

Neben den systemspezifischen Auslegungen der in Kapitel 4 beschriebenen Prüfmethode n gilt es nun mit der Betrachtung von drei unterschiedlichen Fahrzeugherstellern die verschiedenen Abgasnachbehandlungsstrategien mit den beiden Prüfverfahren auf ihre Eignung und Reproduzierbarkeit für eine periodische AU zu prüfen. Von der ursprünglichen Fahrzeugauswahl gemäß dem Leistungsangebot wurde, in Absprache mit dem Auftraggeber, abgewichen. Gewählt wurden Fahrzeuge, welche nach der Abgasnorm Euro 6d-TEMP typgeprüft wurden und daher ein Grenzwert für die realitätsnahe Straßenfahrt (RDE-Fahrt) einhalten müssen. Vor diesem Hintergrund gestaltete sich die Beschaffung der für die Validierungsphase benötigten Euro 6d-TEMP Fahrzeuge schwierig, da die Verfügbarkeit am Markt zum Zeitpunkt der Untersuchungen sehr eingeschränkt war.

Für das betrachtete Messverfahren ASM2050 (500/1000 N) wurden nach Abschluss der Messungen folgende Erkenntnisse gewonnen: Die Umsatzrate des SCR Katalysators ist von der Katalysator-Temperatur und somit von der Abgastemperatur abhängig. Die Messergebnisse zeigen für die ausgewählten Fahrzeuge, dass die optimale Umsatzrate des SCR-Katalysators zwischen 250°C und 400°C liegt. Dieser optimale Temperaturbereich wurde im Fahrzyklus des ASM2050 erst ab dem zweiten bzw. dritten Durchlauf erreicht. Deswegen werden zur Quantifizierung der aufgezeichneten NO_x-Emissionen im ASM2050 Verfahren die Zyklen 3-5 zur Auswertung herangezogen.

5.1 Fehlerverbau der Prüffahrzeuge

Die Messungen an den drei ausgewählten Prüffahrzeugen erfolgten jeweils

- ▶ im Serienstand (= ohne verbauten Fehler)
- ▶ mit AGR-Fehler
- ▶ mit SCR-Fehler
- ▶ mit AGR+SCR-Fehler

5.1.1 Prüffahrzeug „Peugeot“

Bei dem Prüffahrzeug handelt es sich um einen Peugeot 308 BlueHDi 180 EAT8 GT (2.0d) mit der Abgasnorm Euro 6d-TEMP (vgl. Abbildung 52 und Abbildung 53). Die Abgasnachbehandlung besteht aus AGR, SCR, DOC und DPF. Dieses Fahrzeug ist vom Aufbau dem angemieteten Peugeot 308 (Euro 6b) aus der Evaluierungsphase sehr ähnlich. Daher konnten der AGR-Fehler sowie der SCR-Fehler nach demselben Verfahren und mit denselben Blenden, wie bei dem bereits vermessenen Fahrzeug, verbaut werden (vgl. 4.2.1 und 4.2.2).

Abbildung 52: Prüffahrzeug Peugeot 308 BlueHDi 180 EAT8 GT (2.0d), Abgasnorm EU6d-temp



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 53: Fahrzeugschein vom Prüffahrzeug Peugeot 308 BlueHDi 180 EAT8 GT (2.0d)

06.06.2018	3003	AZB 00003	02	01	0130/03750	225
M1	AB		- 04253		- 1804	
VF3LHEHZRJS		2	1461 - 1472		01395 - 01593	
PEUGEOT				00075		
L			156	001930	001930	
H			01070	00900		
EHZR-C2B000			01070	00900		
			076	02813	069	
308			01600	0695	005	
PEUGEOT (F)			225/45 R17 91V			
Fz.z.Pers.bef.b. 8 Spl.			225/45 R17 91V			
Schräghecklimousine						
715/2007*2017/1347*BG			Blau		5	
EURO6;WLTP;BG;PI/CI; M, N1 I			e2*2007/46*0405*18			
Diesel			20.10.2017	K	EX622815	
0002	36BG	1997	Selbstfahrer			
Korr.NEFZ-CO2W:116*Techn.zul.Ges-Masse d.Zugkombinatio n:3520kg*						

Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.1.2 Prüffahrzeug „Mercedes“

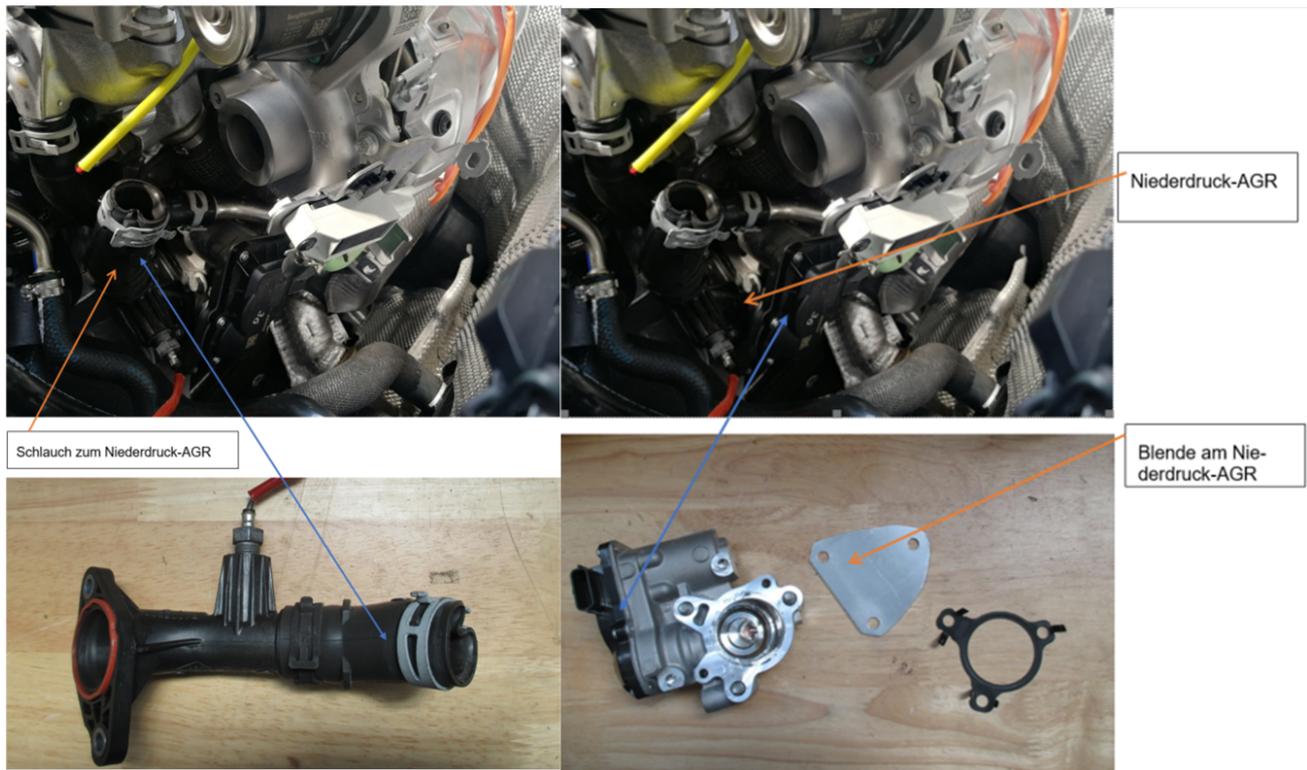
Bei dem Prüffahrzeug handelt es sich um einen Mercedes Benz A-Klasse 180 Euro 6d-TEMP (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55). Die Abgasnachbehandlung besteht aus AGR, SCR, DPF und DOC.

Abbildung 54: Prüffahrzeug Mercedes A-Klasse 180d



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 56 a-d: a.) / b.) Motorraum (oben) c.) Schlauch zum ND-AGR (unten links) d.) ND-AGR-Ventil (unten rechts)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Abbildung 57 a-c: Blende für Hochdruck-AGR-Ventil – a.) Motorraum b.) HD-AGR-Schlauch c.) Blende vor HD-AGR-Schlauch



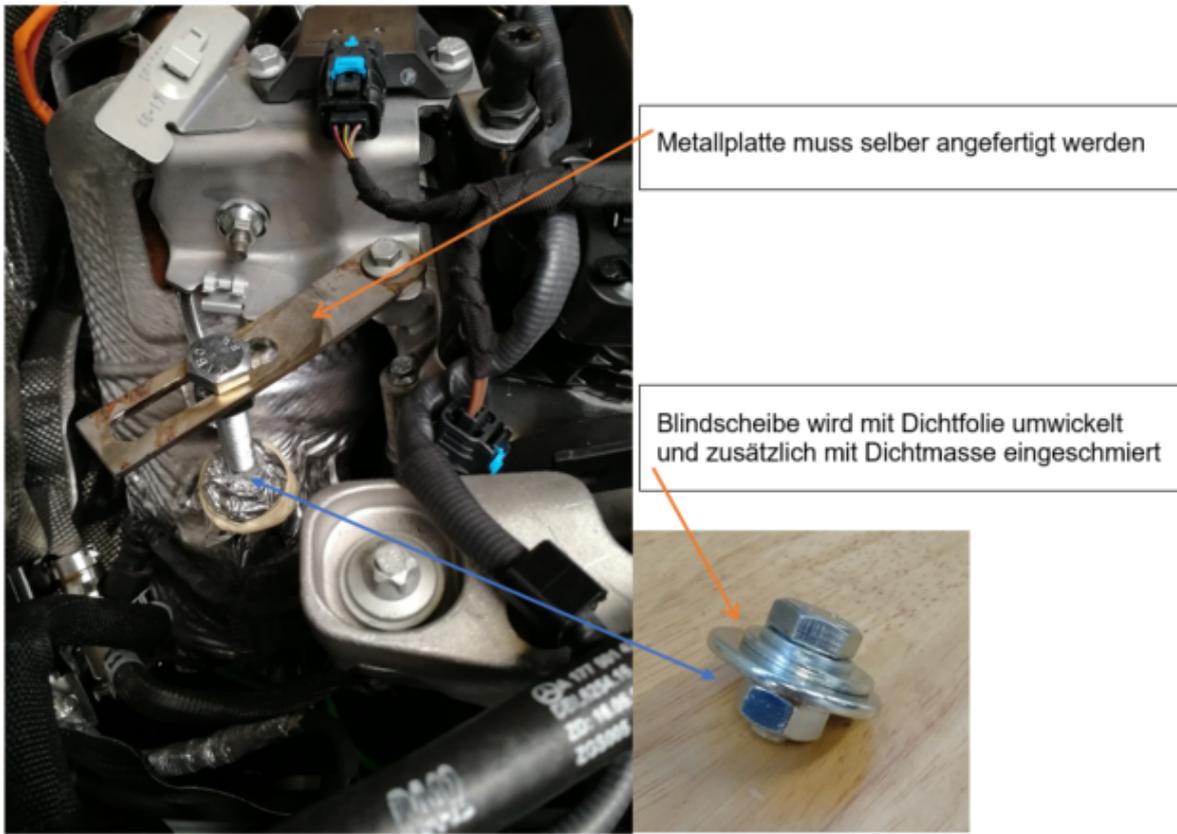
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.1.2.2 SCR-Fehlervorbau

Im zweiten Schritt der Manipulation wird das Ventil für die Harnstoffeinspritzung ausgebaut und kein Harnstoff mehr in den SCR-Katalysator eingespritzt (Blick auf Einspritzventil von vorne rechts). Für den Ein- bzw. Ausbau müssen folgende Maßnahmen erfolgen.

- ▶ Es muss die Schelle an der Harnstoffdüse entfernt werden. Um die Funktion des Einspritzventils weiterhin zu gewährleisten müssen alle Anschlüsse und Stecker mit dem Ventil verbunden bleiben (vgl. Abbildung 58).
- ▶ Um die ausgetretene Flüssigkeit aufzufangen, wird das Einspritzventil in einen Kunststoffbehälter gesteckt.
- ▶ Das offene Rohr im Abgassystem wird nun mittels einer Blindscheibe abgedichtet. Die Blindscheibe besteht aus verschiedenen großen Unterlegscheiben, sodass das Loch perfekt abgedeckt wird. Mit einer am Motor befestigten Metallplatte wird die Blindscheibe durch eine Schraube auf die Öffnung gepresst.

Abbildung 58 a-b: a.) Harnstoffdüse und Abdichtung der Öffnung zur Harnstoffeinspritzung b.) Blindscheibe zur Abdichtung



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.1.3 Prüffahrzeug „VOLVO“

Als weiteres Prüffahrzeug wurde ein VOLVO XC60, Diesel, Hubraum 1969cm³, Motorleistung 140 kW, Abgasnorm Euro 6d-TEMP durch TÜV NORD in Schweden beschafft (vgl. Abbildung 59). Die Abgasnachbehandlung besteht aus AGR, DOC, DPF und SCR. Analog zu den anderen Prüffahrzeugen wurden bei diesem Prüffahrzeug, Fehler an der Abgasrückführung und an dem SCR System simuliert.

Abbildung 59: VOLVO XC60



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die AGR-Manipulation erfolgte durch den Einbau einer Blende in das Hochdruck AGR-System vor der Rückführung in den Ansaugtrakt (vgl. Abbildung 60). Die Funktion des serienmäßigen AGR-Ventil bleibt dabei erhalten.

Abbildung 60 a-b: Detaildarstellungen der AGR-Manipulation

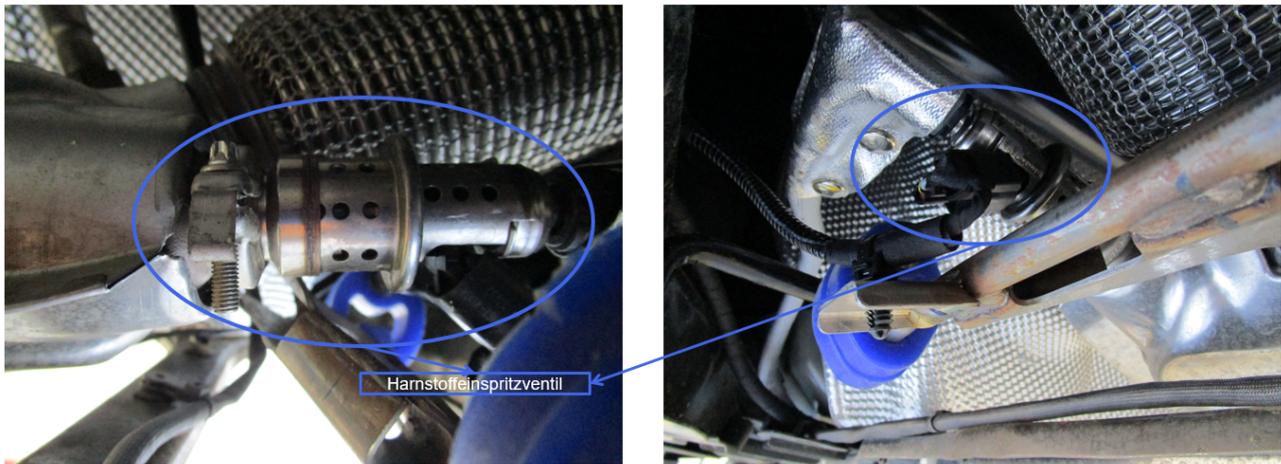


Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Das SCR-System des VOLVO wurde durch den Ausbau des Harnstoff-Einspritzventil im Abgasstrang und sowie durch den Verschluss durch eine Blindscheibe beeinflusst (vgl. Abbildung 61). Die serien-

mäßige Antaktung des Einspritzventils muss erhalten bleiben. Dazu dürfen der elektrische Stecker, sowie die Harnstoffleitung am Einspritzventil nicht entfernt werden.

Abbildung 61 a-b: Detaildarstellungen der SCR-Manipulation

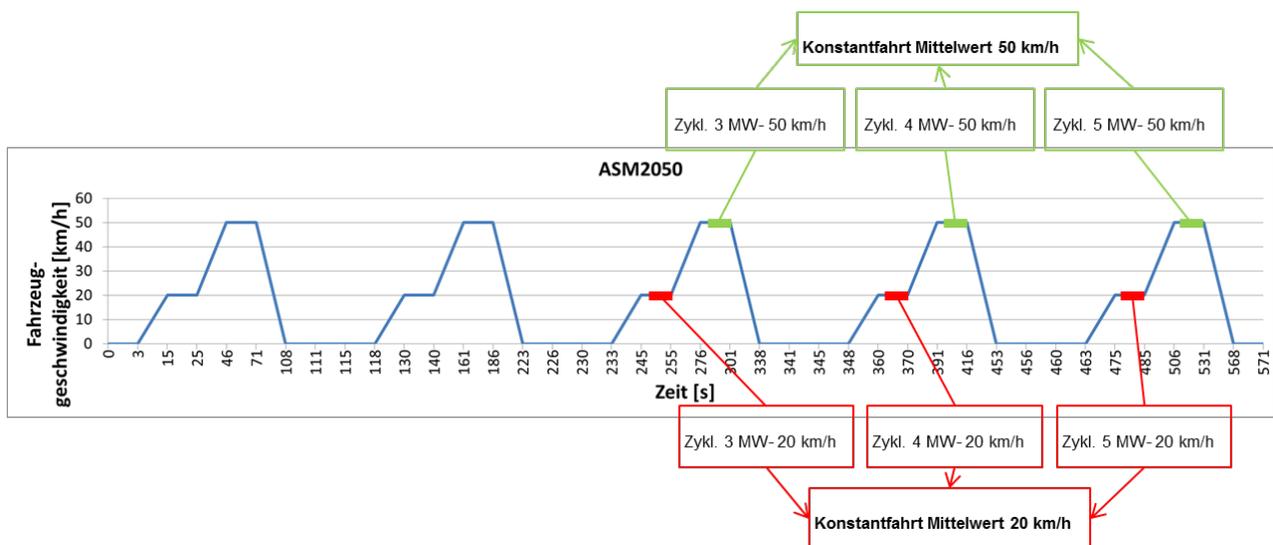


Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.2 ASM2050

Um die Messergebnisse im Anschluss an die Messreihen auswerten und vergleichen zu können, ist eine einheitliche und transparente Auswertung notwendig. Eine Messung besteht aus fünf Wiederholungen des in Kapitel 4.4 beschriebenen ASM2050 Zyklus (vgl. Abbildung 62). Die Wiederholungen des ASM2050 Profils werden im Folgenden Zyklen genannt. Zwischen den Zyklen steht das Fahrzeug für 10 Sekunden still. Die Messreihen werden auf einem Rollenprüfstand mit einer konstanten Rollenlast von 500 N und 1000 N durchgeführt. Auf die Simulation einer zusätzlichen Schwungmasse wurde verzichtet, da primär die Konstantphasen bewertet werden. Die Schwungmasse ist nur in den Beschleunigungsphasen relevant. Neben den Messungen auf dem Rollenprüfstand wird der Zyklus auch auf der Straße nachgefahren und mit einem Mini-PEMS Gerät gemessen.

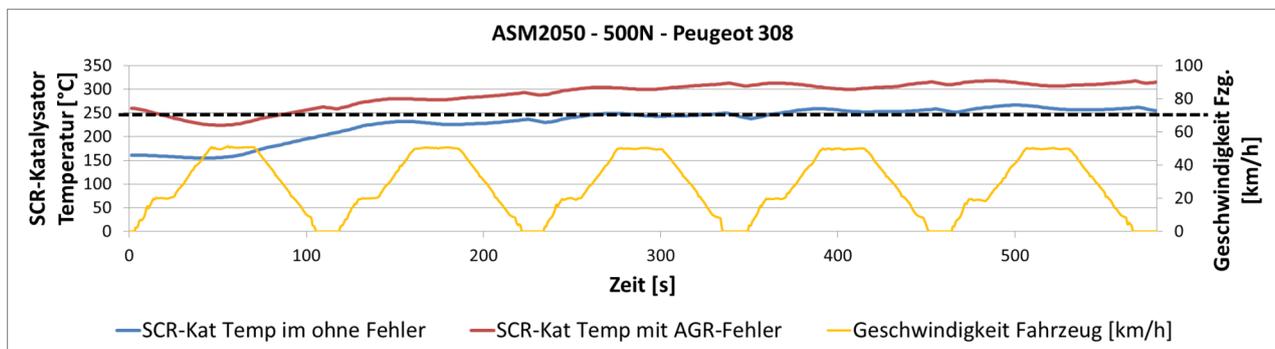
Abbildung 62: Fahrprofil einer Messung – mit den Auswertebereichen (Rot 20km/h / Grün 50km/h)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Es werden zwei Mittelwerte für die Phasen mit konstanter Geschwindigkeit gebildet. Die zeitlichen Bereiche, welche zur Mittelwertbildung herangezogen werden, sind in Abbildung 62 gekennzeichnet. Zur Bewertung werden nur die Zyklen drei bis fünf verwendet, da die Abgasnachbehandlungssysteme ab dem dritten Zyklus stabil im Arbeitsbereich liegen und reproduzierbare NO_x -Konzentrationen gemessen werden konnten. Dies ist v.a. darauf zurückzuführen, dass die gemessene NO_x -Konzentration stark von dem NO_x -Umsatzwirkungsgrad des SCR-Katalysators abhängt. Ein SCR-Katalysator weist erst ab einer Katalysatortemperatur von ca. 250°C einen Umsatzwirkungsgrad von über 50% auf. Optimale Umsatzraten werden im Temperaturfenster von 250°C - 400°C erzielt [31]. In Abbildung 63 ist beispielhaft zu sehen, dass die für stabile NO_x -Konzentrationen erforderliche Temperatur des SCR-Katalysators ab dem dritten Zyklus erreicht wird. Hierbei ist zu beachten, dass das Fahrzeug vor der Messung auf eine Motoröltemperatur von mindestens 80°C konditioniert wurde. Die SCR-Kat Temperatur reagiert dynamischer als die Motoröltemperatur und hängt von der Abgastemperatur ab. Die Pause von ca. 2-3 Minuten zwischen der Konditionierung und dem Start der Messung reichte aus, um die SCR-Kat Temperatur deutlich abzusenken, obgleich die Motoröltemperatur noch den erforderlichen Mindestwert von 80°C aufzeigte. Außerdem ist zu erkennen, dass die Abgastemperatur ohne AGR erhöht ist.

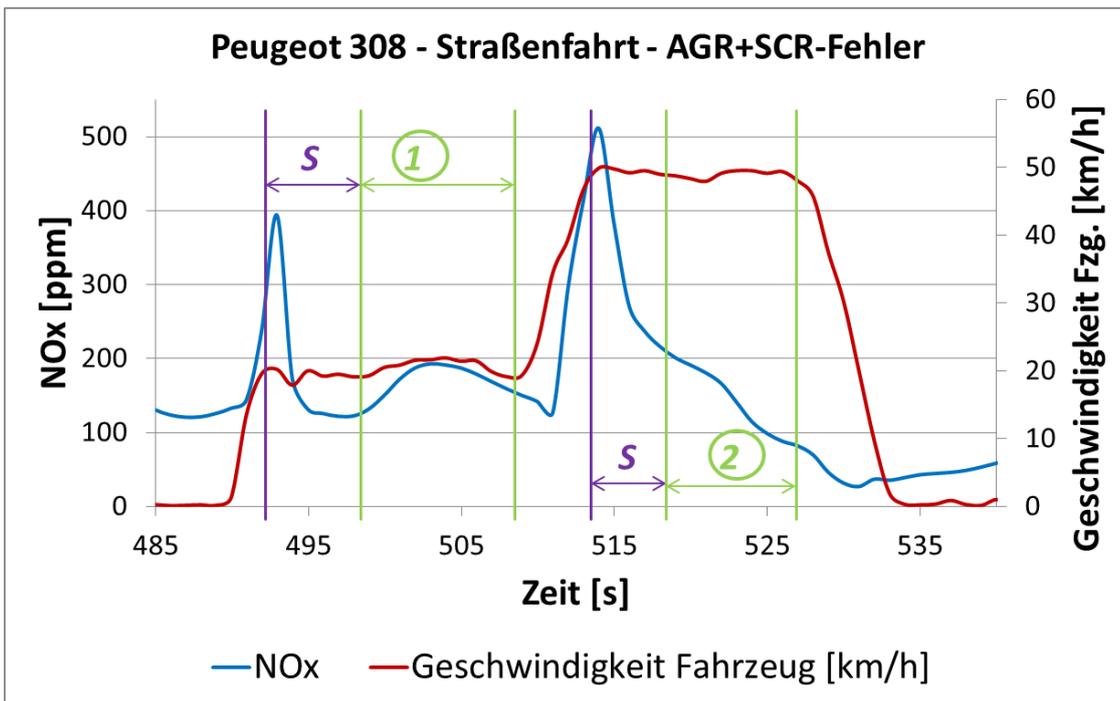
Abbildung 63: Temperaturverlauf SCR-Kat Peugeot 308 im ASM2050 – Serienstand und AGR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Der Zeitbereich, in dem der Mittelwert während der Konstantfahrt gebildet wird, hat Einfluss auf das Ergebnis. In Abbildung 64 wird beispielhaft die NO_x -Konzentration während eines ASM2050 Zyklus dargestellt. Nach dem NO_x -Peak am Ende der Beschleunigungsphase folgt eine Stabilisationsphase (S), in welcher der NO_x -Peak wieder abklingt. Daran anschließend folgt die Messphase (1) bzw. (2), über die der Mittelwert der NO_x -Konzentration für den entsprechenden Zyklus gebildet wird. Durch die Stabilisationsphase wird vermieden, dass der NO_x -Peakwert, welcher durch die Beschleunigungsphase verursacht wird, den Konstantfahrt-Mittelwert zu stark beeinflusst.

Abbildung 64: Bereichsdarstellung Konstantfahrt im ASM2050 Straßenfahrt am Peugeot 308 (AGR & SCR-Fehler)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Dauer der Konstantfahrten und Stabilisationsphasen, sowie die Dauer der zur Mittelwertbildung genutzten Messphasen sind in Tabelle 20 aufgelistet. Die Dauer von 15 Sekunden bei der Straßenfahrt ergibt sich aus dem für die Messung verfügbaren Straßenabschnitt. Der zur Bewertung herangezogene Konstantfahrt-Mittelwert für die gesamte Messung, berechnet sich aus den gemittelten Werten der Zyklen drei bis fünf (siehe Abbildung 62).

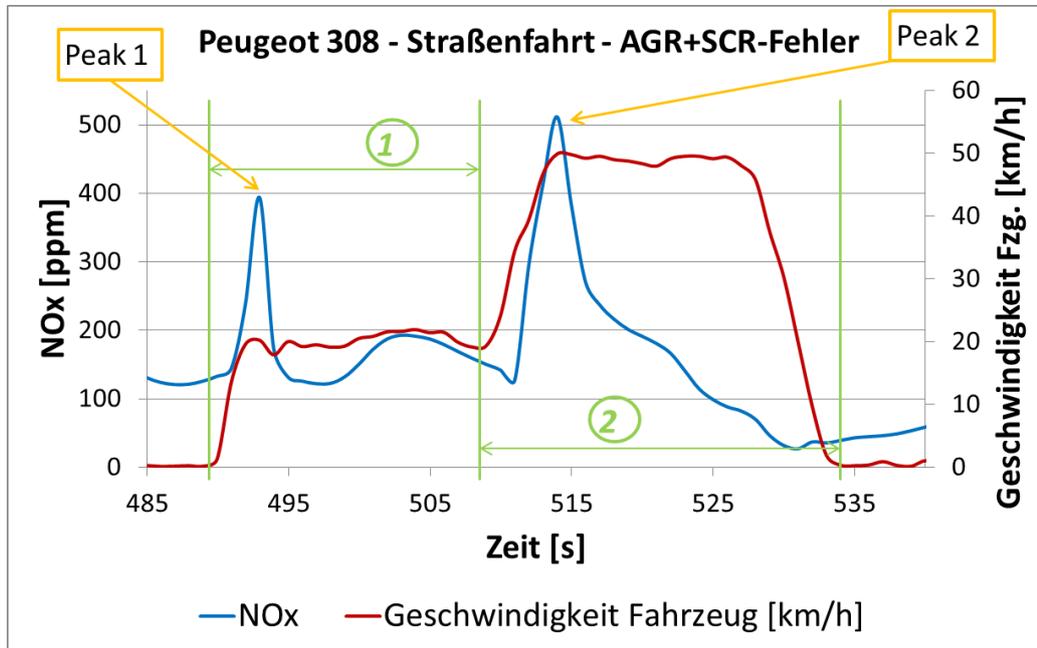
Tabelle 20: Dauer der Phasen bei den durchgeführten Messungen

Zyklus	Prüfstand/ Straße	Fahrzeug	konstante Ge- schwindigkeit	Konstant- fahrt	Stabilisati- onsphase	Auswertung MW über
ASM2050	Rollenprüf- stand	Peugeot	20km/h	10s	2s	8s
ASM2050	Rollenprüf- stand	Mercedes	20km/h	25s	5s	20s
ASM2050	Rollenprüf- stand	Peugeot/ Mercedes	50km/h	25s	5s	20s
ASM2050	Straße	Peugeot/ Mercedes/ VOLVO	20kmh/50km/h	15s	4s	11s

Neben dem Mittelwert für die Konstantfahrt wird auch der NO_x-Peakwert (Maximalwert) in zwei Bereichen eines ASM2050 Zyklus betrachtet (Abbildung 65). Bereich 1 beinhaltet die Beschleunigung auf 20 km/h und die Konstantfahrt mit 20 km/h. Bereich 2 beinhaltet die Beschleunigung von 20 km/h auf 50 km/h, die anschließende Konstantfahrt mit 50 km/h, sowie die Verzögerung bis zum Stillstand. Der tatsächliche Peakwert tritt i.d.R immer gegen Ende der Beschleunigungsphase auf. Die zur Bewer-

tung herangezogenen Peakmittelwerte 1 und 2 für die gesamte Messung, berechnen sich aus dem einzelnen Peakwerten von Zyklus drei bis fünf.

Abbildung 65: Bereichsdarstellung Peakwerte im ASM2050 Straßenfahrt am Peugeot 308 (AGR & SCR-Fehler)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen Peakwert und Mittelwert-Konstantfahrt zu finden, wird aus diesen beiden Werten ein Quotient gebildet und in der Ergebnistabelle mit angegeben. Der Quotient wird jeweils für 20km/h und 50km/h gebildet.

$$Quotient_{20/50} = \frac{Peakwert_{20/50}}{Konstantfahrt - MW_{20/50}}$$

Zur Bewertung der Auswirkung des Fehlers bezogen auf den Serienstand wird für jeden Fehler bei jeder Messung der Fehlerfaktor FI ermittelt.

$$FI = \frac{Konstantfahrt - MW_{Fehler}}{Konstantfahrt - MW_{Serie}}$$

Alle Messergebnisse aus den Messreihen in Kapitel 5 sind im Anhang in Tabelle 49 und Tabelle 50 zusammengefasst.

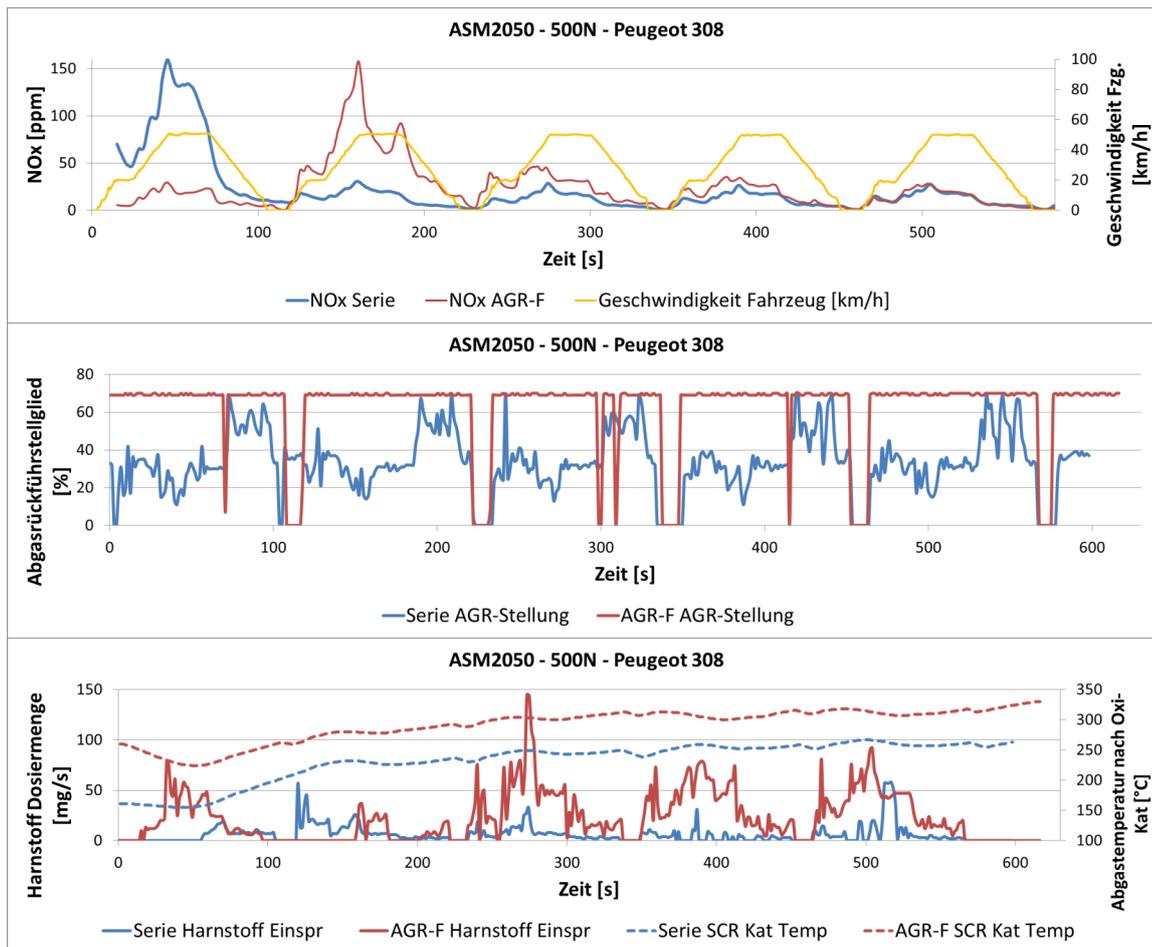
5.2.1 ASM2050 / 500N (Rollenprüfstand)

5.2.1.1 Prüffahrzeuge „Peugeot“

5.2.1.1.1 Serie und AGR-Fehler

In Abbildung 66 ist der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand und der AGR-Fehler miteinander verglichen.

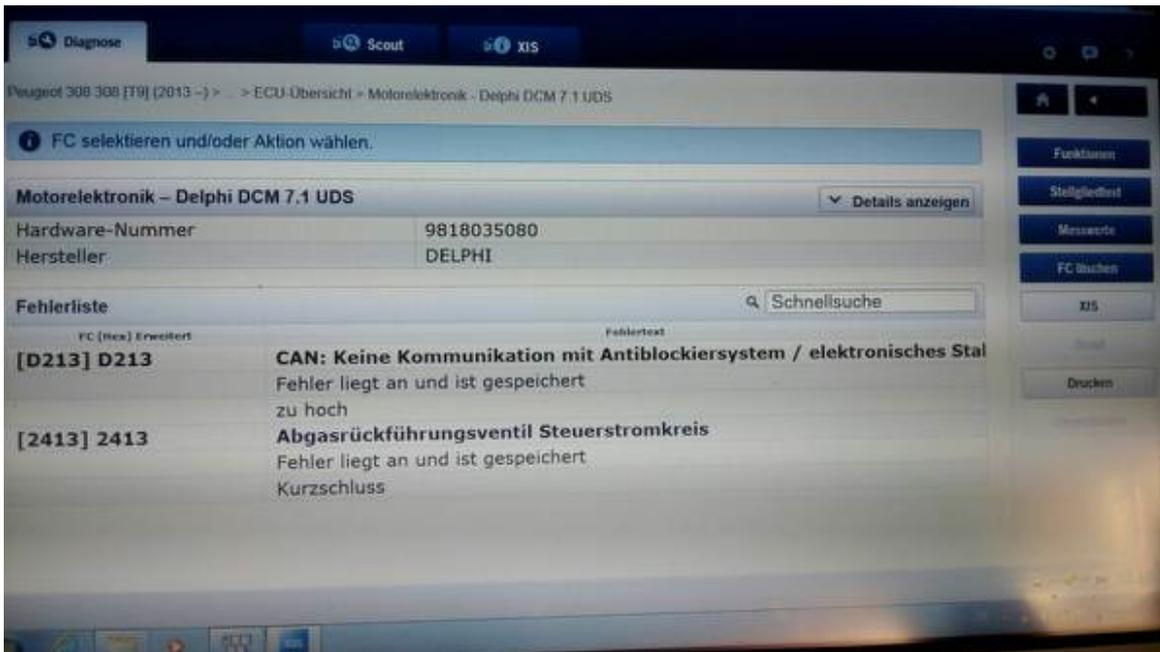
Abbildung 66 a-c: ASM2050 – Rollenlast 500N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / AGR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei der Ergebnisbetrachtung im Serienstand ist im ersten Zyklus eine erhöhte NO_x-Konzentration zu erkennen. Dies liegt an dem in 5.2 erwähnten Effekt, dass die Arbeitstemperatur des SCR-Katalysators noch nicht erreicht ist. Die Temperatur liegt im ersten Zyklus noch unter 200°C. Der Verlauf der NO_x Konzentration von Zyklus zwei bis fünf ist ähnlich und stabil. Das AGR-Ventil arbeitet in jedem Zyklus nahezu identisch. Sobald der SCR-Katalysator ab dem zweiten Zyklus die Arbeitstemperatur erreicht hat, wird Harnstoff eingespritzt. Während der Messreihe mit dem AGR-Fehler wurde im Fehlerspeicher der Fehler „Abgasrückführungsventil Steuerstromkreis“ hinterlegt (siehe Abbildung 67). Die Motorkontrolllampe (MIL) leuchtete nicht auf.

Abbildung 67: Screenshot Fehlerspeicher mit verbautem AGR-Fehler



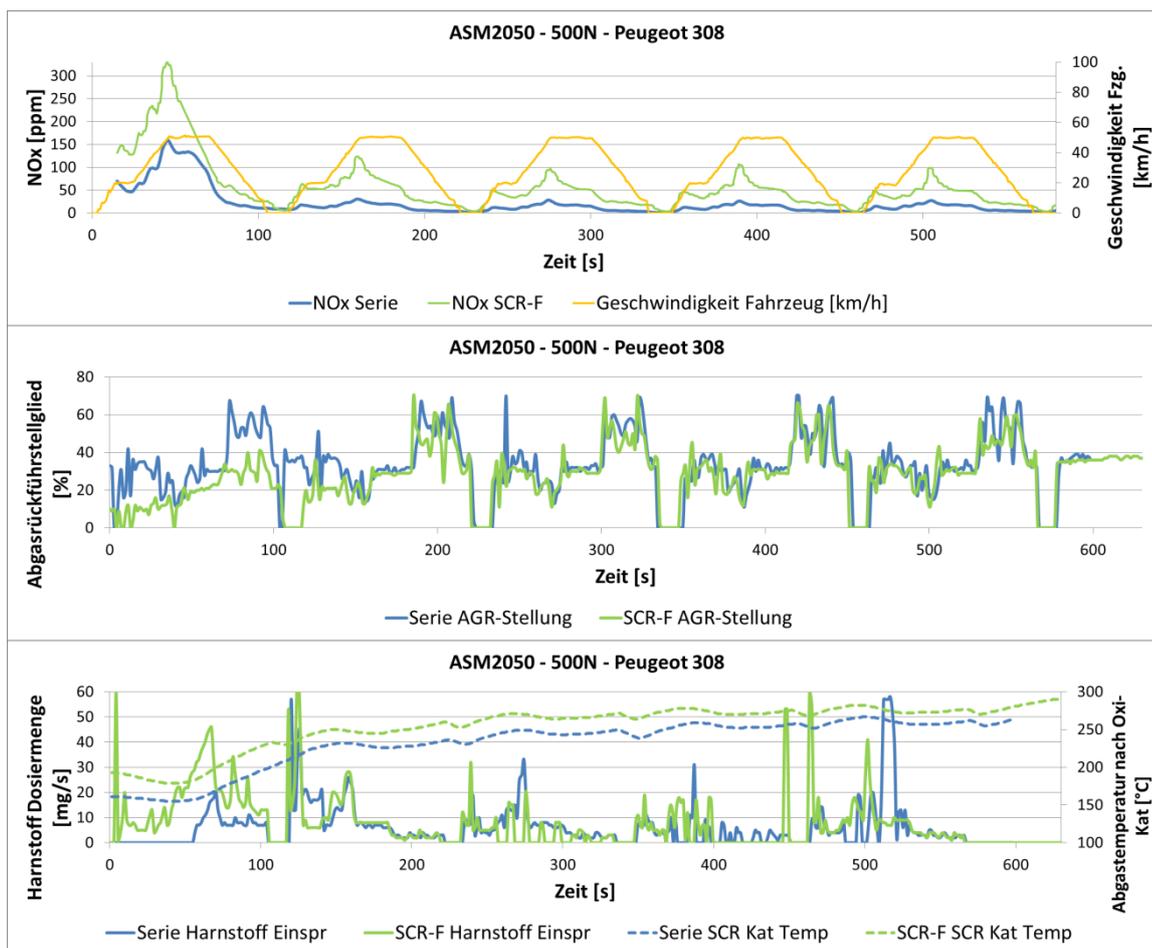
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei verbautem AGR-Fehler wird das AGR-Ventil von der Motorsteuerung komplett geöffnet. Eine vollständige Öffnung des AGR-Ventils entspricht hierbei einem Positionswert von 70% in Abbildung 66. Beim kurzzeitigen Ausschalten des Motors zwischen den Zyklen wird das AGR-Ventil geschlossen. Die Messung mit AGR-Fehler beginnt bei einer höheren Abgastemperatur als im Serienstand. Da der SCR-Kat von Beginn an auf Arbeitstemperatur ist, wird die Harnstoffeinspritzung ab dem ersten Zyklus freigegeben. Im zweiten Zyklus wird zunächst kein Harnstoff eingespritzt. Es liegt nahe, dass ein Parameter (Druck/Temperatur) oder das Berechnungsmodell für den NH_3 -Schlupf eine Harnstofffreigabe untersagen. Die Folge ist eine erhöhte NO_x Konzentration im zweiten Zyklus. Insbesondere in Zyklus drei bis fünf ist gegenüber dem Serienstand eine erhöhte Einspritzung an Harnstoff zu beobachten. Dies lässt darauf schließen, dass der Stickstoffoxidsensor vor dem Katalysator aufgrund der fehlenden AGR eine erhöhte NO_x -Konzentration misst und somit das Steuergerät entsprechend mehr Harnstoff für den SCR-Kat freigibt. Da die Abgastemperatur aufgrund der fehlenden AGR höher liegt als im Serienstand, und somit der SCR-Kat einen besseren Umsetzungswirkungsgrad aufweist, wird der Fehler mit jedem Zyklus besser „kompensiert“. Im fünften Zyklus liegen die NO_x -Konzentration vom Serienstand und AGR-Fehler auf ähnlichem Niveau (bei erhöhtem Harnstoffverbrauch). Die Mittelwerte der NO_x -Konzentration bei Konstantfahrt liegen bei 20km/h bei verbautem AGR-Fehler um den Faktor 1,8 höher (vgl. Tabelle 21 und Tabelle 22). Bei 50km/h um den Faktor 1,44. Der Peak Wert liegt sowohl bei der Serie als auch beim AGR-Fehler ca. um den Faktor 1,5 höher als der Konstantfahrt-Mittelwert. Da der NO_x -Wert mit AGR-Fehler nur um den Faktor 1,8 über der Serie liegt und auch aus den Peak-Werten keine weiteren Informationen abgelesen werden können, müsste die Reproduzierbarkeit des Fehlerfaktors an weiteren Wiederholungsmessungen validiert werden.

5.2.1.1.2 SCR-Fehler

In Abbildung 68 werden der Verlauf der NO_x -Konzentration, die Position des AGR-Ventils, sowie die Harnstoffeinspritzung und SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand und der SCR-Fehler miteinander verglichen.

Abbildung 68 a-c: ASM2050 – Rollenlast 500N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / SCR-Fehler



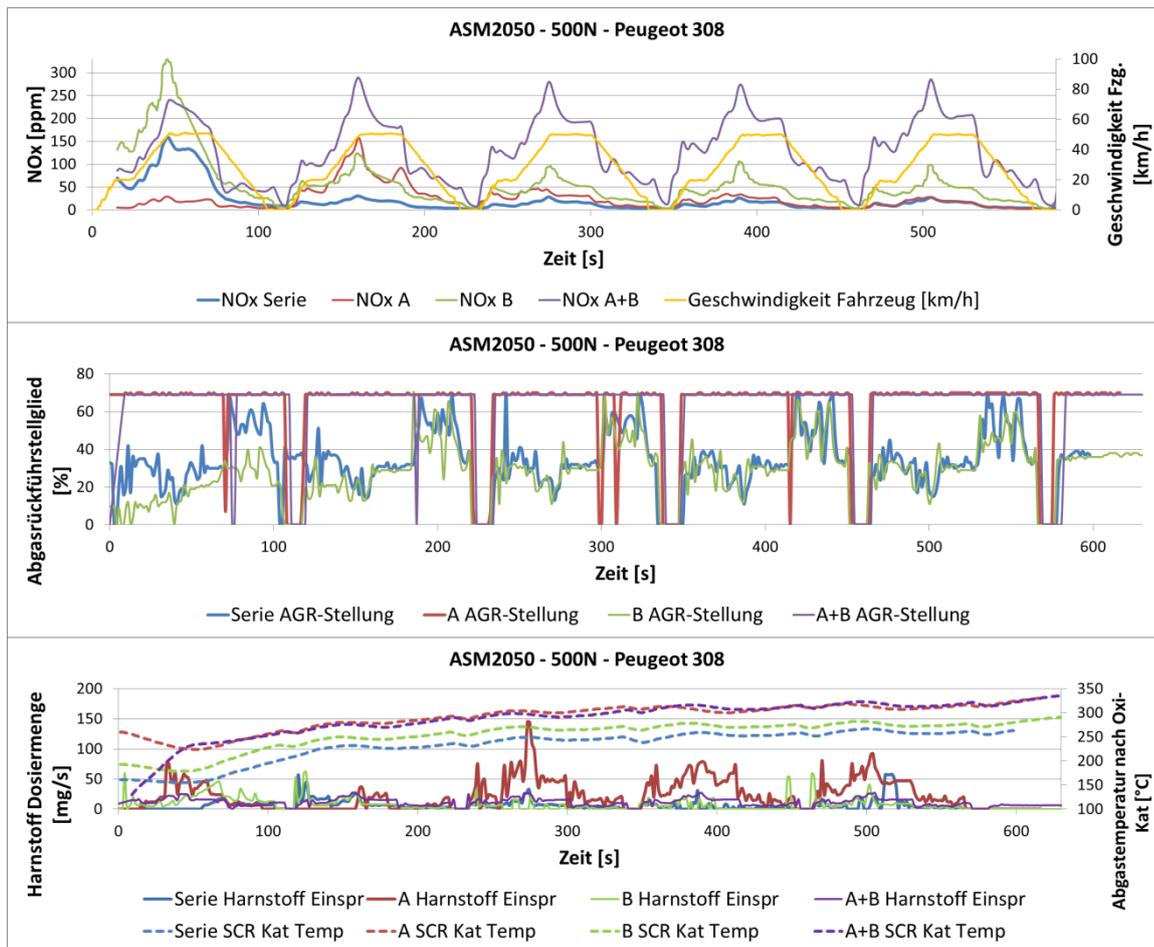
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei verbautem SCR-Fehler war kein hinterlegter Fehler in der Standard-Diagnose mit dem AVL-Tester sichtbar. Der Verlauf der NO_x Konzentration zeigt stabile Werte ab dem zweiten Zyklus. Die erhöhten Werte im ersten Zyklus lassen sich über das weniger geöffnete AGR-Ventil und der somit geringeren AGR-Rate erklären. Für eine Interpretation dieses Verhaltens wird ein Zugriff auf die AGR-Kennfelder im Motorsteuergerät benötigt. Ab dem zweiten Zyklus ist der Verlauf der AGR-Ventilposition mit der Serie identisch. Das bedeutet, dass der SCR-Fehler nicht über die AGR-Rate „kompensiert“ wird. Es wird bei verbautem SCR-Fehler weiterhin eine ähnliche Menge Harnstoff wie im Serienstand freigegeben. Diese Harnstoffmenge hat bei diesem Fehler allerdings keinen Effekt auf die Abgasnachbehandlung, da sie in einen Behälter abgeführt wird und nicht in den SCR-Katalysator gelangt. Die NO_x -Konzentrationen liegen bei der Konstantfahrt bei 20 km/h um den Faktor 3,8 höher als bei der Serie. Bei 50 km/h liegen Sie um Faktor den 3,17 höher. Die Peak-Werte liegen zwischen den Faktor 1,3-1,8 über dem Mittelwert der Konstantfahrt. Der gemessene Fehlerfaktor zwischen 3 und 4 lässt eine Aussage darüber zu, dass ein Fehler vorliegt. Dieser Faktor muss jedoch an weiteren Messreihen auf Reproduzierbarkeit geprüft werden um diese Aussage festigen zu können.

5.2.1.1.3 AGR+SCR-Fehler

In Abbildung 69 ist der Verlauf der NO_x -Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand, AGR-Fehler(A), SCR-Fehler(B) und AGR+SCR-Fehler(A+B) miteinander verglichen.

Abbildung 69 a-c: ASM2050 – Last 500N – Peugeot 308 – Serie / AGR-Fehler(A) / SCR-Fehler(B) / AGR+SCR-Fehler(A+B)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei dem Verbau von beiden Fehlern gleichzeitig (AGR+SCR-Fehler) liegen die NO_x -Konzentrationen um den Faktor 11,6 - 13,9 über den Serienwerten (vgl. Tabelle 21 und Tabelle 22). Dieser deutliche Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass die, durch fehlende AGR, erhöhte NO_x -Konzentration im Rohabgas nicht über eine erhöhte Harnstoffeinspritzung „kompensiert“ werden kann. Es ist zu erkennen, dass das Verhalten des AGR-Ventils und die erhöhte Abgastemperatur bei verbautem AGR-Fehler und auch in Kombination der Fehler AGR+SCR nahezu gleich sind. Bei funktionierender AGR sind die Abgastemperaturen geringer und die AGR-Ventilposition ist bis auf den ersten Zyklus nahezu identisch, unabhängig davon ob die Harnstoffeinspritzung manipuliert ist.

5.2.1.1.4 Zusammenfassung 500N Rollenlast – Peugeot 308

Nachfolgend sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 die Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500N für den Peugeot 308 dargestellt. Der AGR-Fehler ist mit einem Fehlerfaktor (FI) von unter 2 schwer zu identifizieren. Der SCR-Fehler lässt sich hingegen mit einem FI zwischen 3 und 4 gut bestimmen. Die Reproduzierbarkeit muss jedoch anhand weiterer Messreihen validiert werden. Aufgrund des starken Anstiegs der NO_x -Konzentration bei gleichzeitigem Fehlerverbau (AGR- & SCR-Fehler) wird diese „Manipulation“ deutlich erkannt. Der Quotient aus dem Peakwert und dem Mittelwert liegt bei allen Messungen zwischen eins und zwei und bringt hier keine Erkenntnisse. Die absolut gemessene NO_x -Konzentration liegt bei 50 km/h um den Faktor 1,5 höher als bei

20 km/h. Der FI liegt bei 20km/h bei allen Fehler leicht über dem FI bei 50 km/h. Somit wäre eine Messung bei 20 km/h aussagekräftig genug, mögliche „Manipulationen“ erkennen zu können.

Tabelle 21: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 20 km/h – Peugeot 308

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant- MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
500	Serie	9,26	1,00	13,40	1,45
500	AGR	16,62	1,80	25,97	1,56
500	SCR	35,20	3,80	48,39	1,37
500	AGR+SCR	128,52	13,88	149,31	1,16

Tabelle 22: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 50 km/h – Peugeot 308

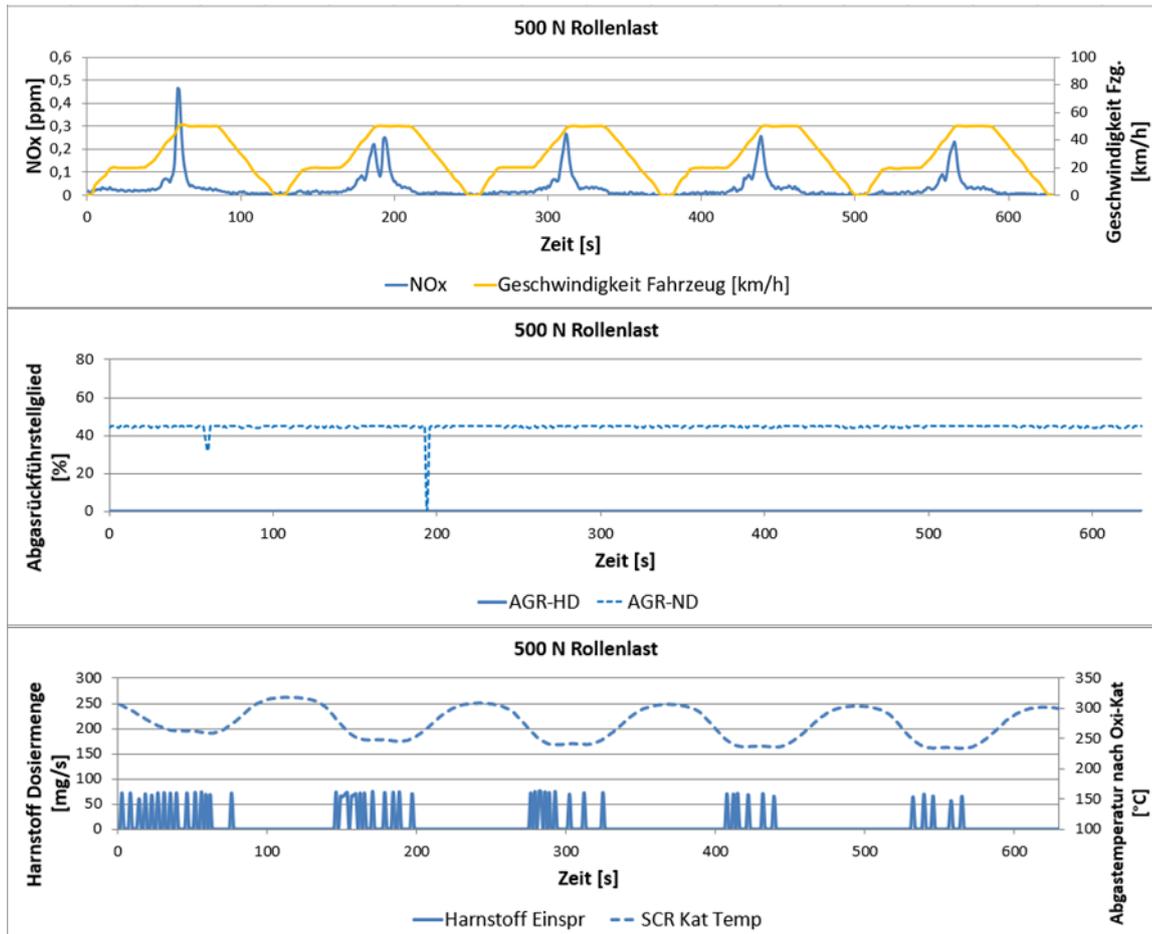
Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant- MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
500	Serie	17,25	1,00	27,57	1,60
500	AGR	24,90	1,44	36,76	1,48
500	SCR	54,66	3,17	100,76	1,84
500	AGR+SCR	199,93	11,59	280,18	1,40

5.2.1.2 Prüffahrzeug „Mercedes“

5.2.1.2.1 Serienstand

In Abbildung 70 ist der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und SCR-Kat-Temperatur aufgetragen.

Abbildung 70 a-c: ASM2050 Serie 500N Mercedes



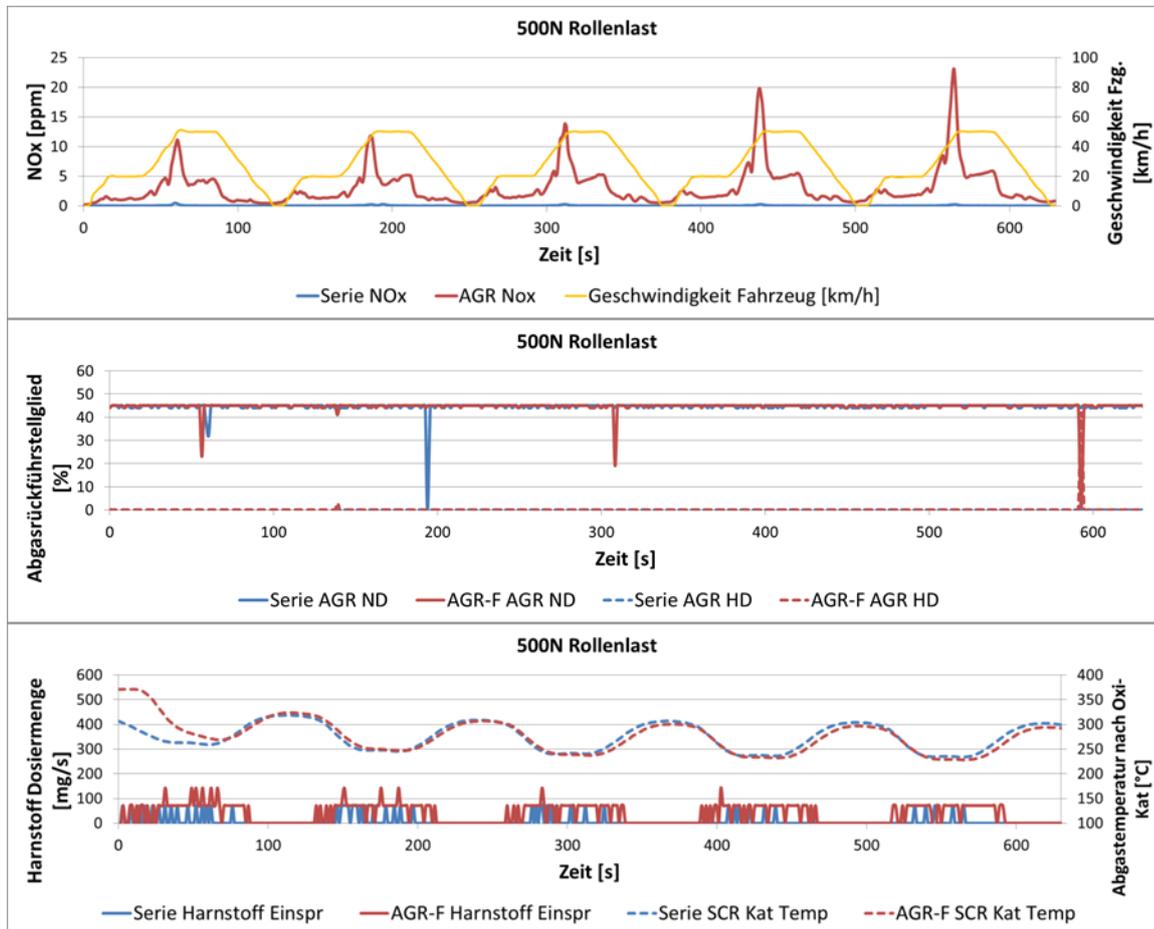
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Um einen stabilen Messwert zu erlangen, wird der ASM2050-Zyklus fünf Mal hintereinander durchgeführt. Bei einer Last von 500 N und Serienzustand zeigen sich sehr niedrige Werte für die Stickstoffoxidemissionen. Der Spitzenmittelwertwert liegt bei 0,02 ppm (20 km/h) bzw. 0,25 ppm (50 km/h). Bei den Mittelwerten der Konstantfahrten reduzieren sich die Stickstoffoxidemissionen auf einen deutlich geringeren Wert von 0,01 ppm (20 km/h) und 0,04 ppm (50 km/h). Die Abbildung 70 zeigt die Abgastemperatur nach dem Oxidationskatalysator, die Regelung des Abgasrückführventils und die Menge der Harnstoffeinspritzung. Die Temperatur liegt zwischen 250°C und 400°C und befindet sich somit in dem Arbeitstemperaturbereich des SCR-Katalysators. Dies trifft auch für alle folgenden Messungen am Mercedes zu. Harnstoff wird nur in den Beschleunigungsphasen eingespritzt. Die AGR ist annähernd über den gesamten Fahrzyklus geöffnet.

5.2.1.2.2 AGR-Fehler

In Abbildung 71 ist der Verlauf der NO_x -Konzentration, die Position des AGR-Ventils, sowie die Harnstoffeinspritzung und SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand und der AGR-Fehler miteinander verglichen.

Abbildung 71 a-c: ASM2050 Fehler AGR 500N Mercedes



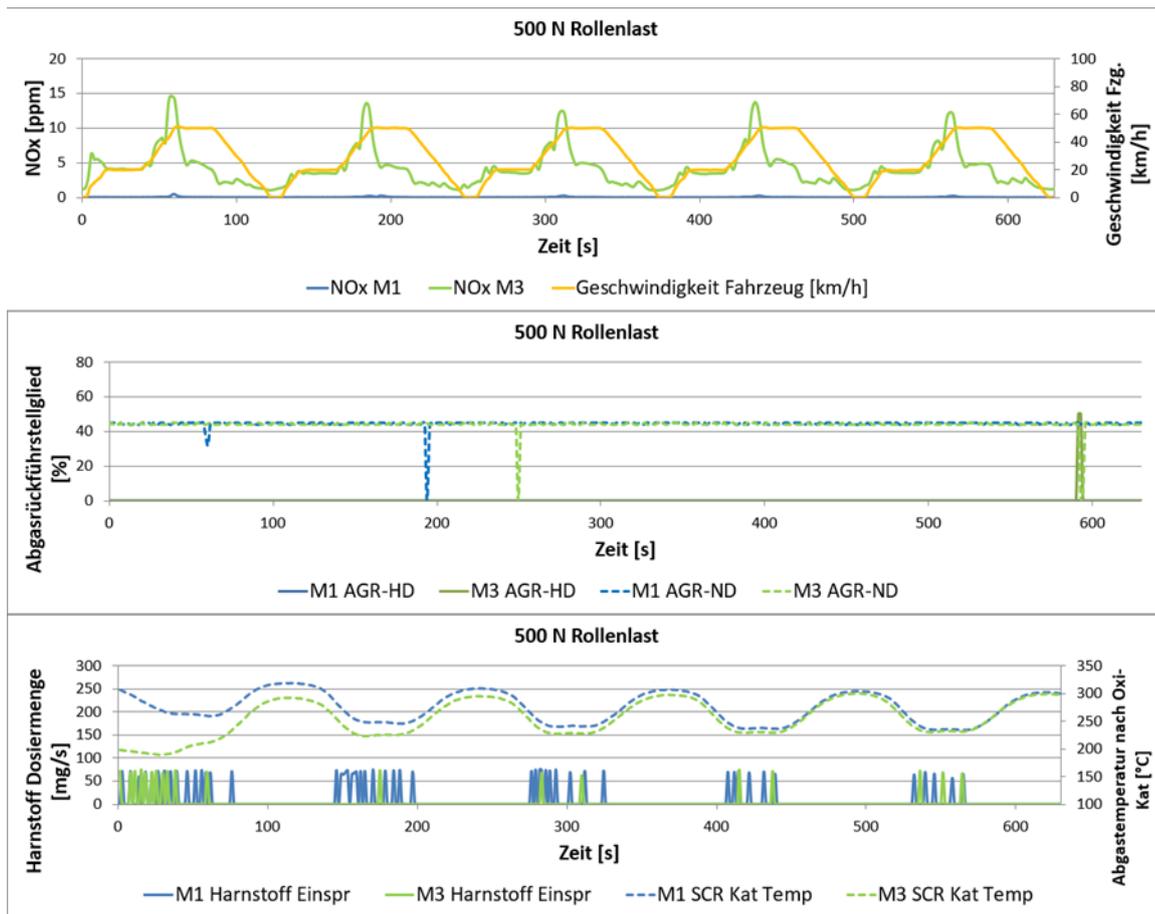
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei der Manipulation der Hoch- und Niederdruck-AGR fällt im Gegensatz zum Originalzustand auf, dass bei nahezu gleichem Verhalten der AGR deutlich mehr Harnstoff eingespritzt wird. Anscheinend wird die Fehlfunktion der AGR erkannt und versucht, diese Abweichung durch eine erhöhte Harnstoffmenge auszugleichen. Die Spitzenmittelwerte der Stickstoffoxidkonzentration betragen 2,81 ppm (20 km/h) bzw. 18,94 ppm (50 km/h). Auch die Mittelwerte der Konstantfahrten steigen mit 1,62 ppm (20 km/h) bzw. 5,32 ppm (50 km/h) an.

5.2.1.2.3 SCR-Fehler

In Abbildung 72 werden der Verlauf der NO_x -Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat Temperatur aufgetragen. Dabei wird der Serienzustand und der SCR-Fehler miteinander verglichen. M1 steht im Diagramm für den Serienzustand und M3 für den SCR-Fehler.

Abbildung 72 a-c: ASM2050 Fehler SCR 500N Mercedes



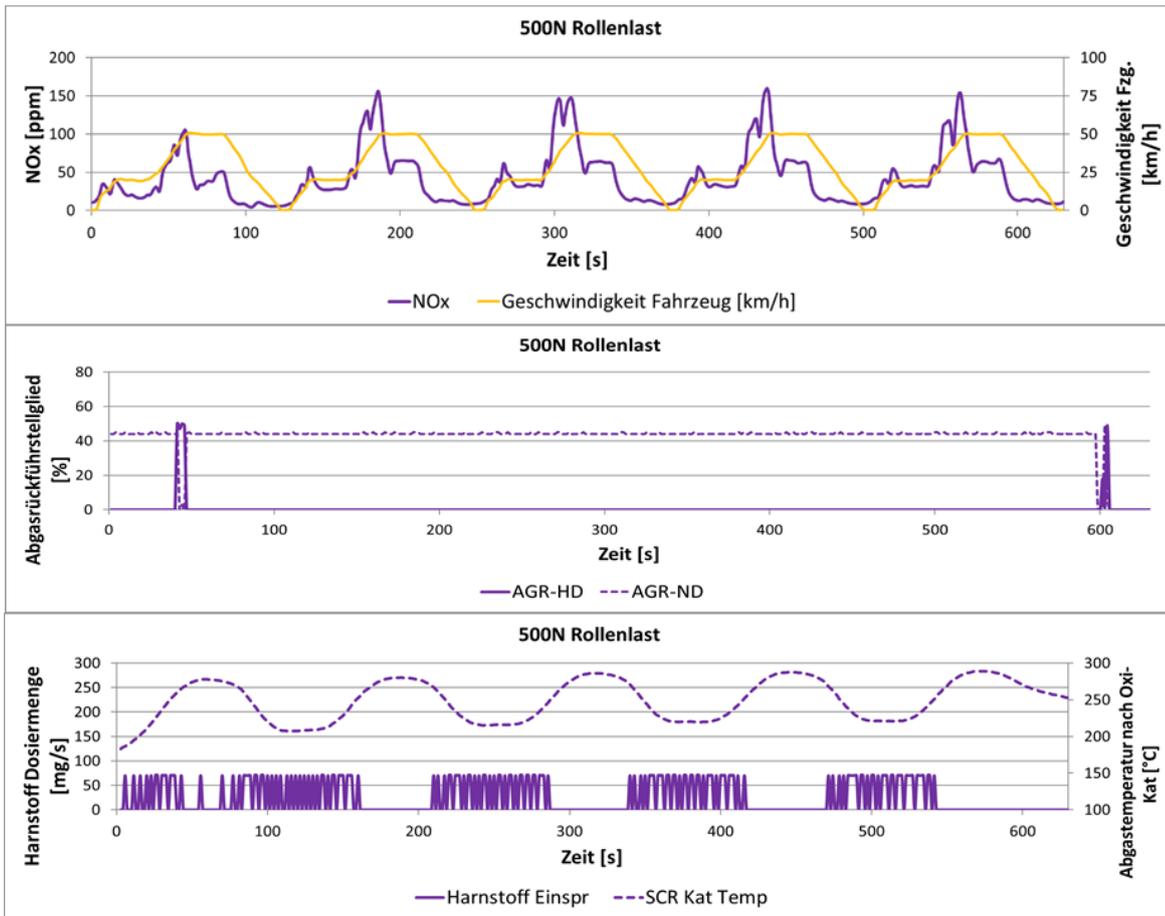
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei der Manipulation an der Harnstoffeinspritzung wird das Einspritzventil zwar angesteuert, aber kein Harnstoff in das System eingespritzt. Dies wird ebenfalls von der Motorsteuerung erkannt. Aufgrund des schon komplett geöffneten AGR-Ventils kann lediglich eine teilweise Kompensation erzielt werden. Die Mittelwerte des Stickstoffoxidemissionen liegen dementsprechend etwas höher als beim AGR-Fehler, nämlich in der Spitze bei 4,46 ppm (20 km/h) und 12,82 ppm (50 km/h) bzw. bei der Konstantfahrt bei 3,55 ppm (20 km/h) und 5,06 ppm (50 km/h).

5.2.1.2.4 AGR+SCR-Fehler

In Abbildung 73 ist der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, sowie die Harnstoffeinspritzung und SCR-Kat Temperatur aufgetragen. Es ist bei dieser Messung der AGR- und SCR-Fehler verbaut.

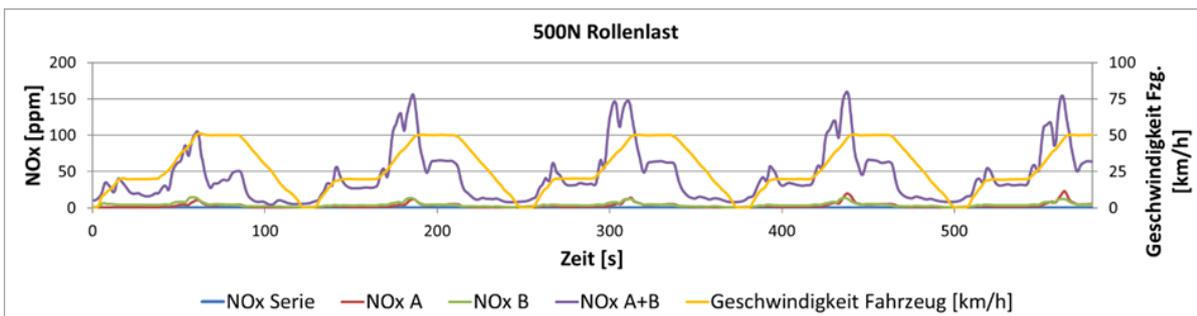
Abbildung 73 a-c: ASM2050 Fehler AGR+ SCR 500N Mercedes



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Sind beide Systeme manipuliert, zeigen diese eine verstärkte Aktivität. Das AGR-Ventil ist durchgehend geöffnet. Aufgrund der Blende im AGR-System versucht das Motormanagement dies durch eine erhöhte Harnstoffeinspritzung zu kompensieren. Beide Systeme haben allerdings keinen Einfluss mehr auf die Abgasnachbehandlung. Deshalb steigen die Stickstoffoxidemissionen wie in Abbildung 74 zu sehen ist deutlich gegenüber den Tests mit einzeln verbauten Fehlern bzw. dem Serienzustand an. Es wird ein Spitzenmittelwert von 57,59 ppm (20 km/h) bzw. 153,64 ppm (50 km/h) und ein Mittelwert über die Konstantfahrten von 32,85 ppm (20 km/h) bzw. 62,92 ppm (50 km/h) erreicht. In Abbildung 74 ist der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienzustand, AGR-Fehler(A), SCR-Fehler(B) und AGR+SCR-Fehler(A+B) miteinander verglichen.

Abbildung 74: ASM2050 – Last 500N – Mercedes– Serie / AGR-Fehler(A) / SCR-Fehler(B) / AGR+SCR-Fehler(A+B)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Tabelle 23: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500N und 20km/h – Mercedes A180d

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
500	Serie	0,01²	1,00	0,02	1,64
500	AGR	1,62	144,32	2,81	1,74
500	SCR	3,55	316,96	4,46	1,26
500	AGR+SCR	32,85	2934,06	57,59	1,75

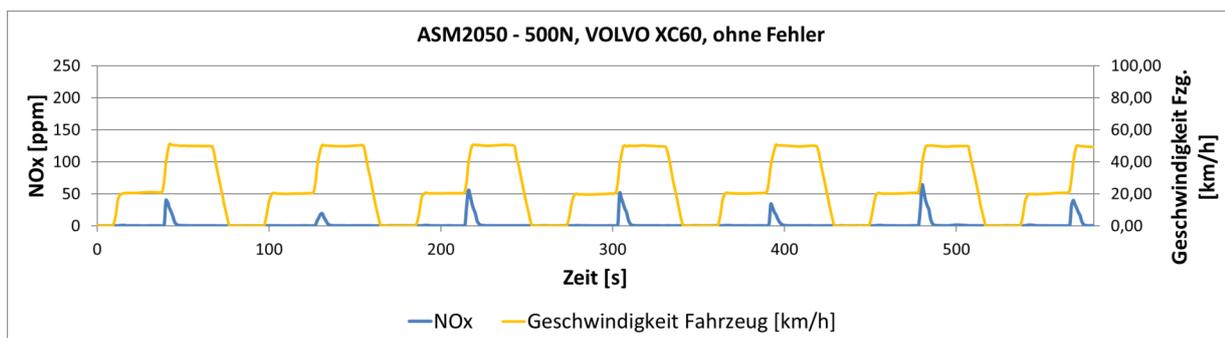
Tabelle 24: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500N und 50km/h – Mercedes A180d

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
500	Serie	0,042	1,00	0,25	6,26
500	AGR	5,32	132,57	18,94	3,56
500	SCR	5,06	126,16	12,82	2,53
500	AGR+SCR	62,92	1569,21	153,64	2,44

5.2.1.3 Prüffahrzeug „VOLVO“

In Abbildung 75 bis Abbildung 79 sind die NO_x-Konzentrationen über der Fahrgeschwindigkeit im ASM2050 mit 500 N Last für den VOLVO XC60 auf dem Rollenprüfstand dargestellt.

Abbildung 75: ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, ohne Fehler

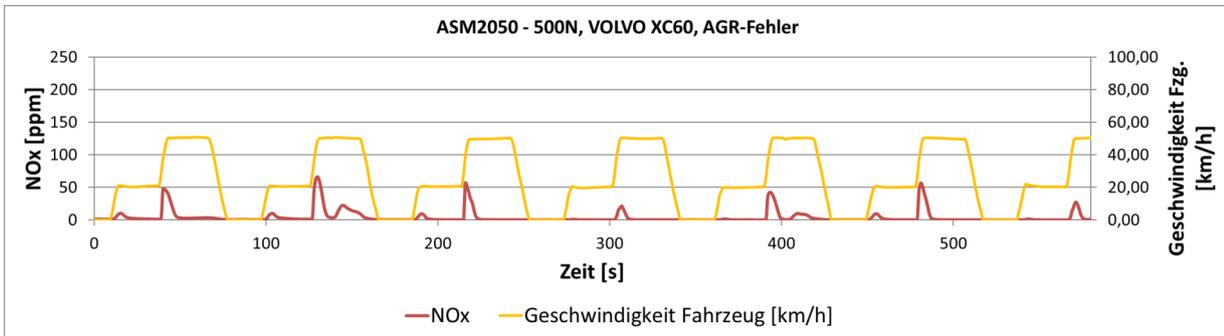


Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

² Bei einigen Tests wurden NO_x-Konzentrationen gemessen, die sich im Bereich der zulässigen Messfehler bewegen. In Verordnung (EU) 2017/1151 ist in Anhang XXI, Unteranhang 5 Prüfausrüstung und Kalibrierungen für den Typ 1 Test unter 4.1.4.1.2. vorgegeben „Sofern nichts anderes bestimmt ist, dürfen Messfehler nicht mehr als ± 2 Prozent (Eigenfehler des Analysators) betragen, wobei der Bezugswert der Kalibriergase unberücksichtigt bleibt.“ D.h. der zulässige Messfehler ist abhängig von dem jeweils verwendeten Messbereich. Bei der Messung von NO_x-Konzentrationen in diesen Größenordnungen ist daher auf die Verwendung eines geeigneten Messgerätes zu achten. Derzeit sind Analysatoren mit 10ppm oder 3ppm Messbereich verfügbar.

Der VOLVO XC60 zeigt im Serienzustand im ASM2050 mit 500 N Last sehr niedrige NO_x-Emissionen. Nur bei der Beschleunigung auf 50 km/h ist ein Anstieg der NO_x-Konzentrationen messbar.

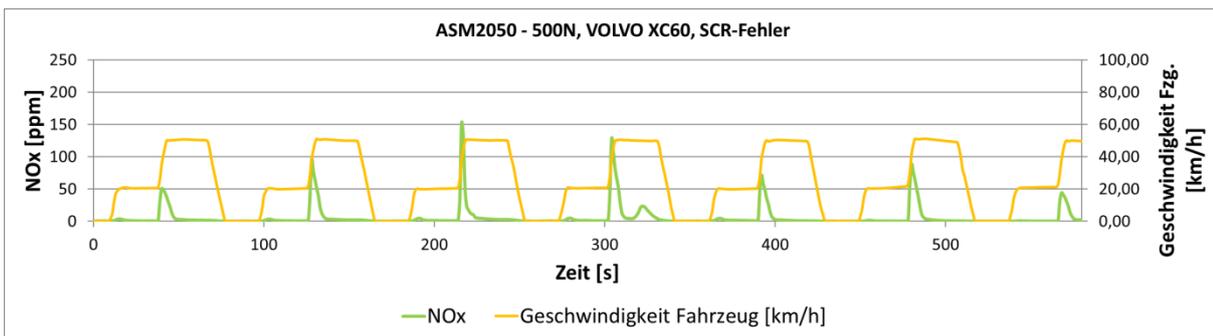
Abbildung 76: ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, AGR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Messungen im ASM2050 mit 500 N Last an dem VOLVO mit AGR-Fehler zeigen nur eine leichte Erhöhung der NO_x Konzentrationen gegenüber dem Fahrzeug ohne Fehlersimulation. Der Fehler des AGR wird im ASM2050 bei 500 N Last offensichtlich durch das SCR-System kompensiert.

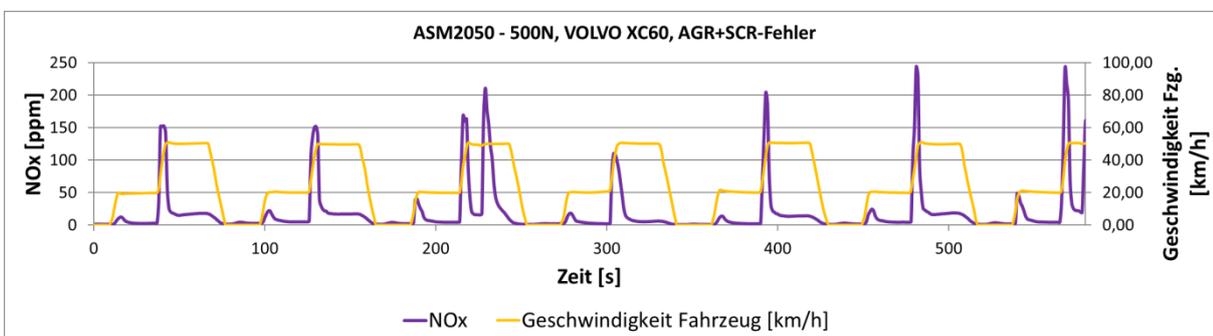
Abbildung 77: ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Der SCR-Fehler konnte aufgrund der signifikant erhöhten NO_x-Messwerte im ASM2050 mit 500 N Last eindeutig identifiziert werden. Das gilt insbesondere für den Peakwert bei 50 km/h.

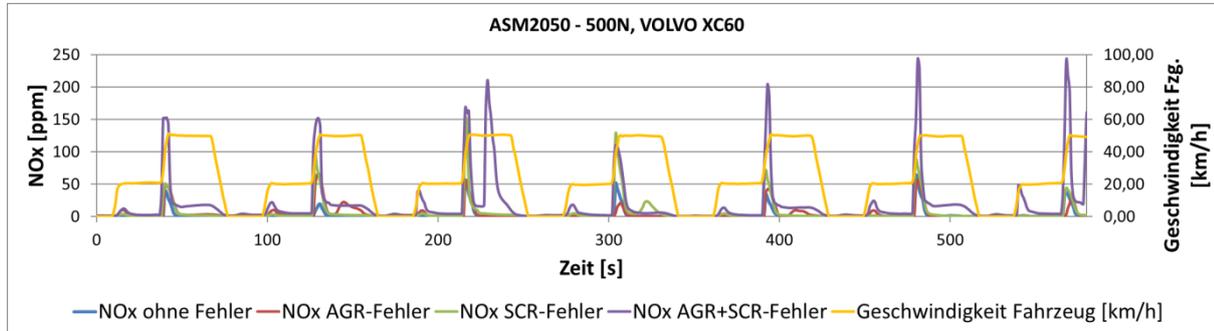
Abbildung 78: ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, AGR- und SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Kombination von AGR- und SCR-Fehler führt beim VOLVO XC60 im ASM2050 mit 500N Last zu einer signifikanten Erhöhung der NO_x-Konzentrationen gegenüber dem Serienzustand. Das gilt für die Mittelwerte und insbesondere auch für die Peakwerte der NO_x-Konzentrationen.

Abbildung 79: ASM2050 – 500N, VOLVO XC60, Zusammenfassung



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

In der Tabelle 25 und Tabelle 26 sind die Ergebnisse für den VOLVO XC60 im ASM2050 mit 500 N Last zusammengestellt. Grundsätzlich ist bei diesem Fahrzeug die Erhöhung der NO_x-Konzentrationen aufgrund der simulierten Fehler bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h größer als bei 20 km/h, dennoch lassen sich der SCR-Fehler und die Kombination von AGR- und SCR-Fehler auch bei 20km/h anhand der erhöhten NO_x Werte identifizieren.

Tabelle 25: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 20 km/h – VOLVO XC60

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
500	Serie	0,22	1,00	0,74	3,33
500	AGR	0,36	1,60	3,93	11,05
500	SCR	1,30	5,88	4,79	3,68
500	AGR+SCR	3,72	16,81	24,10	6,48

Tabelle 26: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 500 N und 50 km/h – VOLVO XC60

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
500	Serie	0,33	1,00	46,83	140,63
500	AGR	1,89	5,68	40,01	21,14
500	SCR	5,24	15,72	116,72	22,29
500	AGR+SCR	27,03	81,16	174,89	6,47

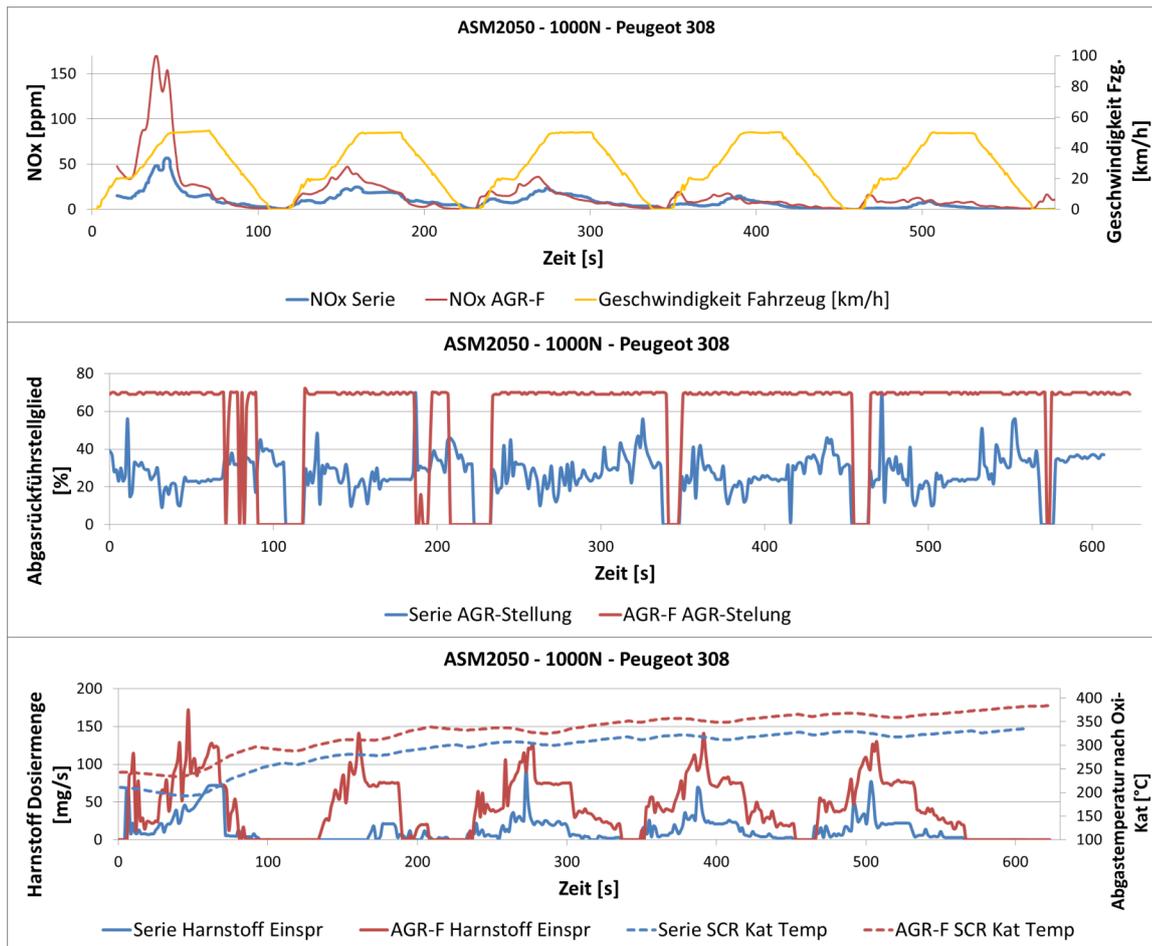
5.2.2 ASM2050 / 1000N (Rollenprüfstand)

5.2.2.1 Prüffahrzeug „Peugeot“

5.2.2.1.1 Serie und AGR-Fehler

In Abbildung 80 sind der Verlauf der NO_x -Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand und der AGR-Fehler miteinander verglichen.

Abbildung 80 a-c: ASM2050 – Rollenlast 1000N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / AGR-Fehler

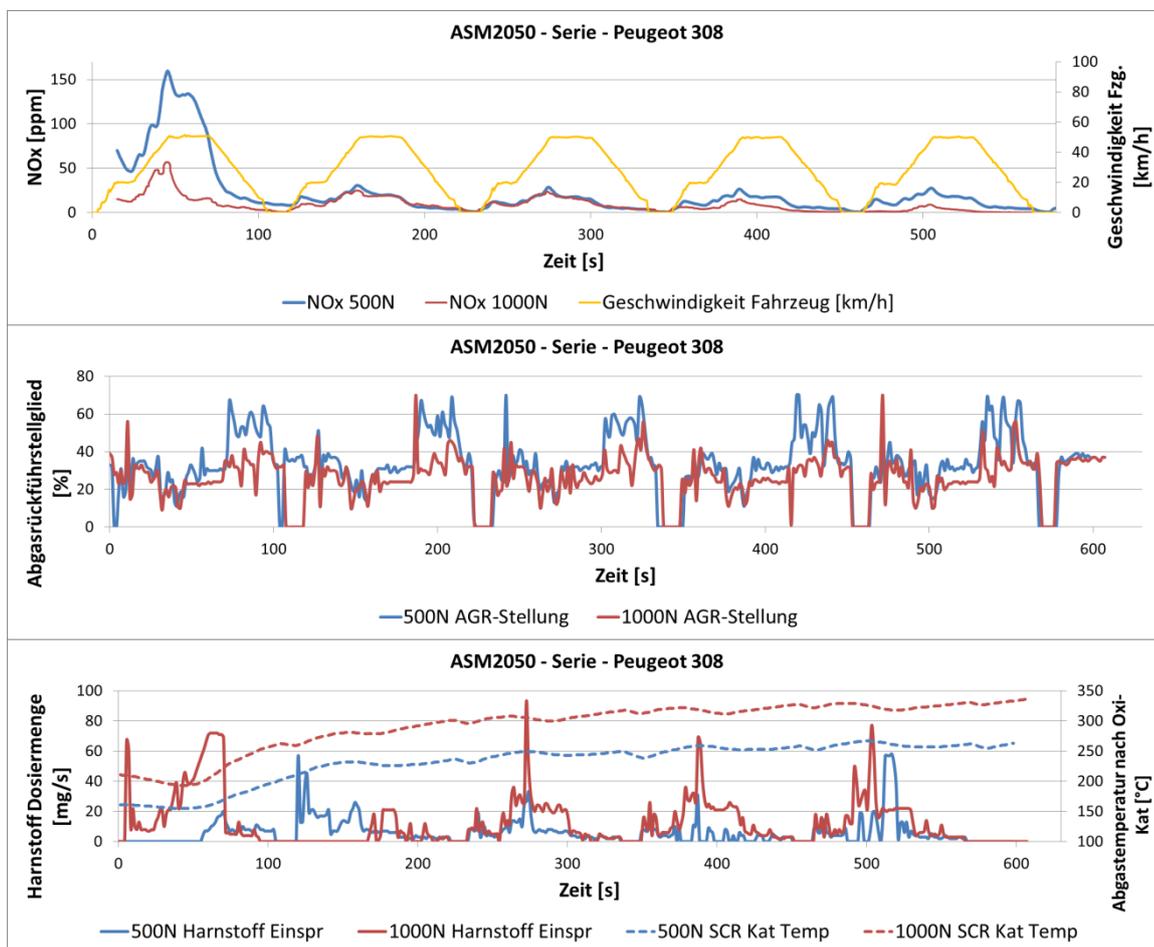


Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Im Serienstand ist im ersten Zyklus eine erhöhte NO_x -Konzentration zu erkennen. Dies liegt an dem in 5.2 erwähnten Effekt, dass die Arbeitstemperatur des SCR-Katalysators noch nicht erreicht ist. Der Effekt fällt bei dieser Messung geringer aus als bei 500 N (vgl. 5.2.1.1.1). Dies liegt daran, dass die Abgastemperatur bereits bei Messbeginn bei über 200°C liegt. Der Verlauf der NO_x Konzentration von Zyklus zwei bis fünf ist ähnlich und stabil. Der NO_x -Konzentrationswert sinkt mit jedem Zyklus leicht, da die SCR-Kat-Temperatur über die Messung permanent leicht ansteigt und somit ein besserer NO_x -Umsetzungswirkungsgrad erreicht wird. Im zweiten Zyklus wird kein Harnstoff eingespritzt. Dieses Verhalten der Harnstoffeinspritzung wurde auch bei 500 N mit AGR-Fehler beobachtet (vgl. 5.2.1.1.1). Das Verhalten des AGR-Ventils ist identisch mit dem bei 500 N Rollenlast. Eine erhöhte Einspritzung an Harnstoff gegenüber der Serie „kompensiert“ den AGR-Fehler. Die Wirkmechanismen sind die gleichen wie bei einer Last von 500 N. Der Konstantfahrt- NO_x -Mittelwert bei 20 km/h liegt um den Faktor 2,46 höher als im Serienstand (vgl. Tabelle 27). Bei 50 km/h liegt der Wert nur um das 1,08-fache

über dem Serienwert (vgl. Tabelle 28). Mehrere Effekte sorgen dafür, dass der AGR-Fehler über die NO_x -Konzentration schwer zu identifizieren ist. In Abbildung 81 ist der Vergleich der Messungen des Peugeot 308 im Serienstand bei 500 N und 1000 N Rollenlast aufgetragen. Es ist bei 1000 N eine deutlich höhere Abgastemperatur zu erkennen. Diese bringt den SCR-Katalysator in einen besseren NO_x -Umsetzungswirkungsgrad. Zudem wird aufgrund der höheren Last mehr Harnstoff eingespritzt. Dies führt dazu, dass ein AGR-Fehler bei 1000 N besser „kompensiert“ werden kann als bei 500 N. Darüber hinaus sinkt die AGR-Rate bei steigender Last, was an dem geringer geöffneten AGR-Ventil bei 1000 N abzulesen ist. Dadurch verringert sich die Differenz zwischen dem Serienstand und dem AGR-Fehler (AGR-Rate = 0). Die NO_x -Konzentration hängt darüber hinaus stark vom Motorbetriebspunkt und der Motorapplikation ab, was daran zu erkennen ist, dass der Fehlerfaktor (FI) bei 20 km/h mit 2,46 eine Aussage über einen Fehler zulässt, wohingegen der Mittelwert bei 50 km/h mit einem FI von 1,08 keine Erkenntnisse bringt.

Abbildung 81 a-c: ASM2050 – Peugeot 308 – Serie – Vergleich Rollenlast 500N / 1000N

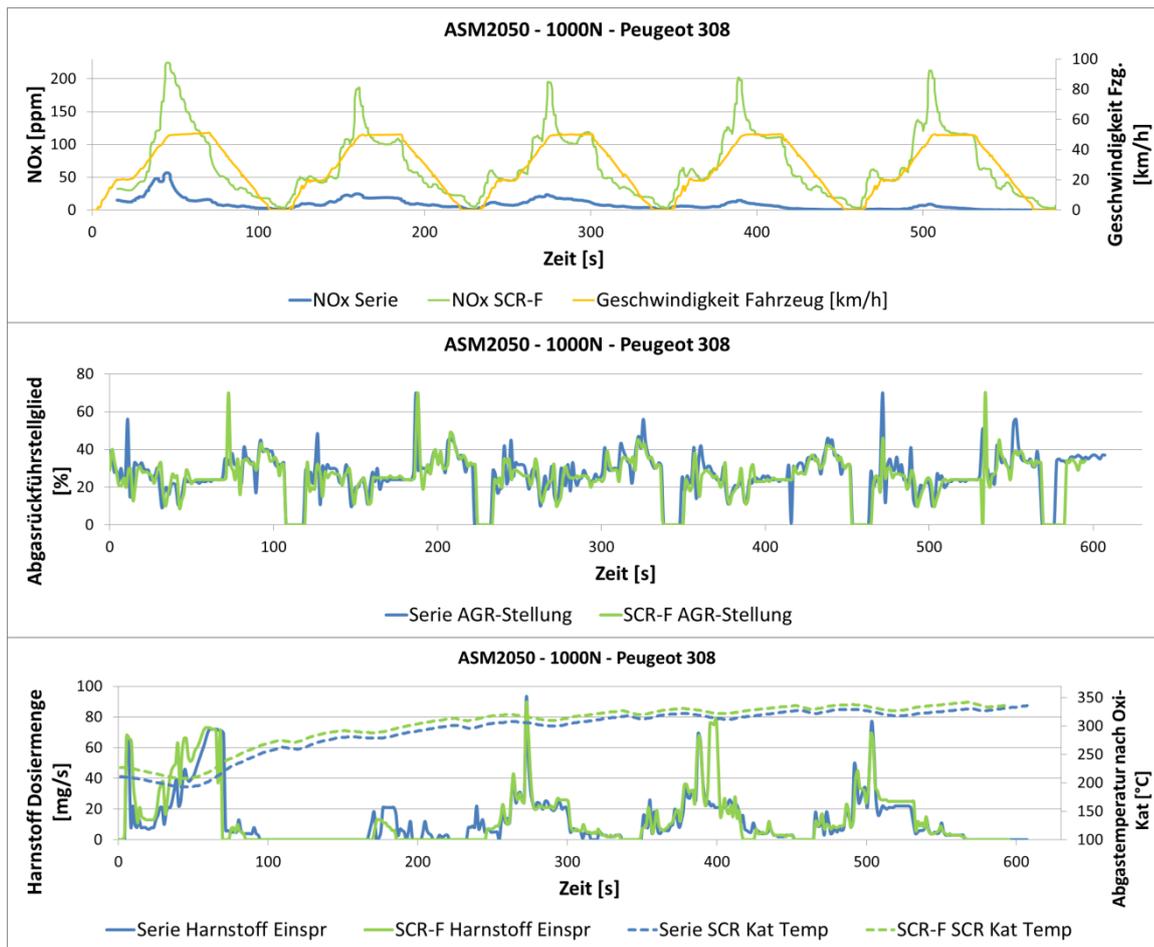


Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.2.2.1.2 SCR-Fehler

In Abbildung 82 werden der Verlauf der NO_x -Konzentration, die Position des AGR-Ventils, sowie die Harnstoffeinspritzung und SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienzustand und der SCR-Fehler miteinander verglichen.

Abbildung 82 a-c: ASM2050 – Rollenlast 1000N – Peugeot 308 - Vergleich Serie / SCR-Fehler



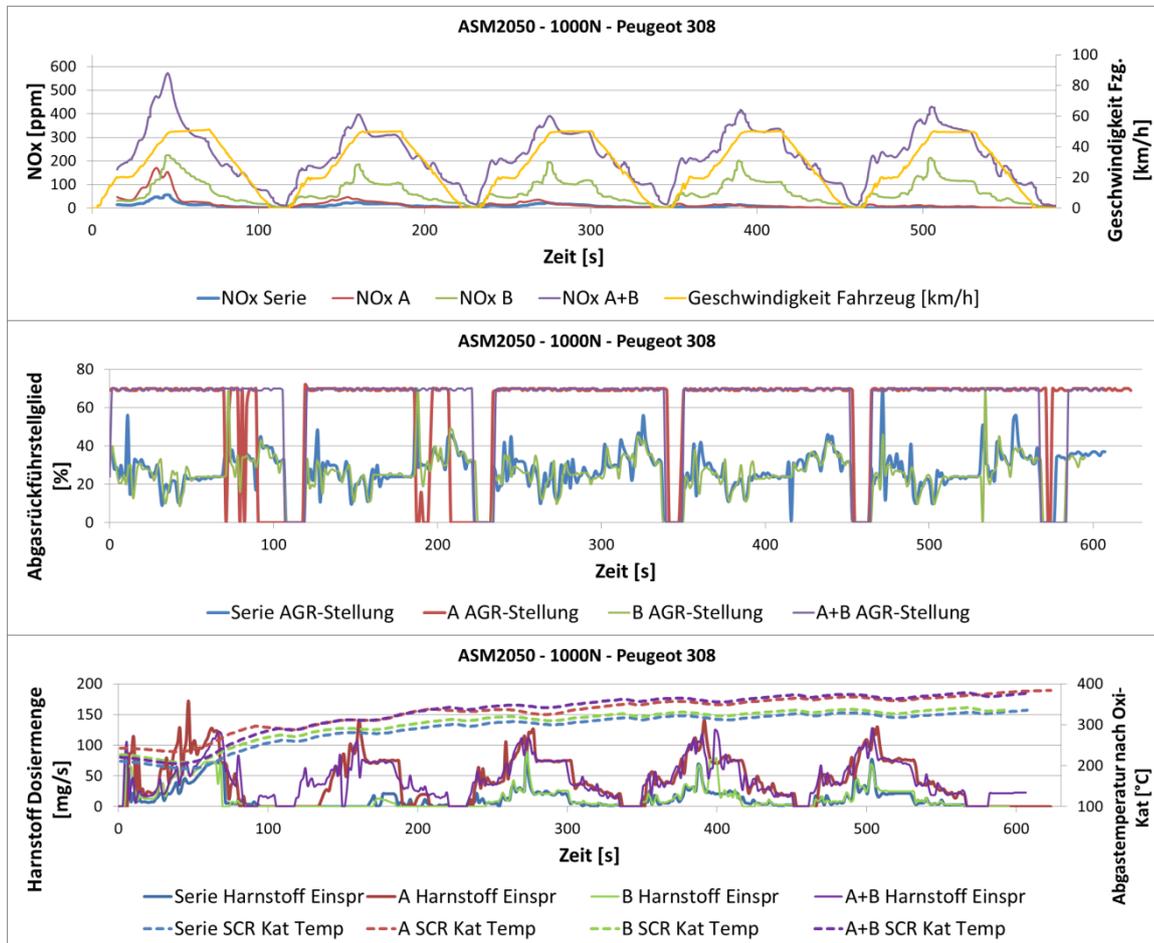
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die NO_x-Konzentrationen sind bei verbautem SCR-Fehler über alle Zyklen konstant. Da der SCR-Katalysator ohne Harnstoffeinspritzung keine NO_x-mindernde Wirkung bewirkt, ist die SCR-Katalysator-Temperatur unerheblich. Die freigegebene Harnstoffmenge ist im Serienzustand und verbautem SCR-Fehler nahezu identisch. Auffällig ist, dass, wie im Serienzustand, im zweiten Zyklus kein Harnstoff freigegeben wird. Die Position des AGR-Ventils deckt sich mit der im Serienzustand. Dies zeigt, dass der SCR-Fehler nicht durch die AGR-Rate kompensiert wird. Die Fehlerfaktoren (FI) bei 20 km/h von 10,61 und 13,97 bei 50 km/h lassen eine eindeutige Aussage über das Auftreten eines Fehlers zu (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 28).

5.2.2.1.3 AGR+SCR-Fehler

In Abbildung 83 sind der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand, AGR-Fehler(A), SCR-Fehler(B) und AGR+SCR-Fehler(A+B) miteinander verglichen.

Abbildung 83 a-c: ASM2050 – Last 1000N – Peugeot 308 – Serie / AGR-Fehler(A) / SCR-Fehler(B) / AGR+SCR-Fehler(A+B)



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Sind beide Fehler gleichzeitig verbaut, ergeben sich deutlich höhere NO_x-Konzentrationen als bei den einzelnen Fehlern (vgl. Tabelle 27). Es resultieren Fehlerfaktoren von 46,62 bei 20 km/h und 37,52 bei 50 km/h. Es gelten die gleichen Zusammenhänge und Wirkmechanismen wie bei einer Rollenlast von 500 N (vgl. 5.2.1.1.3).

5.2.2.1.4 Zusammenfassung 1000N Rollenlast – Peugeot 308

Nachfolgend sind in Tabelle 27 und Tabelle 28 die Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N für den Peugeot 308 dargestellt. Der AGR-Fehler lässt sich aus den oben beschriebenen Gründen nur schwer identifizieren; dies gilt insbesondere bei 50 km/h. Der SCR-Fehler differenziert sich mit einem FI zwischen 10 und 13 sehr gut von der Serie. Der Einfluss des SCR-Fehlers nimmt mit steigender Rollenlast zu, weshalb auch der FI bei steigender Last zunimmt (500N ca. FI=4 / 1000 N ca. FI=10). Sind der AGR- und der SCR-Fehler gleichzeitig verbaut, lässt sich dies anhand der stark erhöhten NO_x-Konzentration ebenfalls gut identifizieren. Der Quotient aus

Peakwert und Mittelwert ermöglicht keine zusätzlichen Erkenntnisse. Die absolut gemessene NO_x-Konzentration liegt bei 50 km/h um Faktor 1 - 2 höher als bei 20 km/h. Der FI ist liegt bei 20 km/h bei allen Fehlern, außer bei dem SCR-Fehler leicht über dem FI bei 50 km/h. Somit wäre eine Messung bei 20 km/h aussagekräftig genug, mögliche Defekte und Manipulationen erkennen zu können.

Tabelle 27: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 20 km/h – Peugeot 308

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
1000	Serie	4,45	1,00	6,56	1,47
1000	AGR	10,97	2,46	18,76	1,71
1000	SCR	47,21	10,61	62,40	1,32
1000	AGR+SCR	207,54	46,62	221,83	1,07

Tabelle 28: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 50 km/h – Peugeot 308

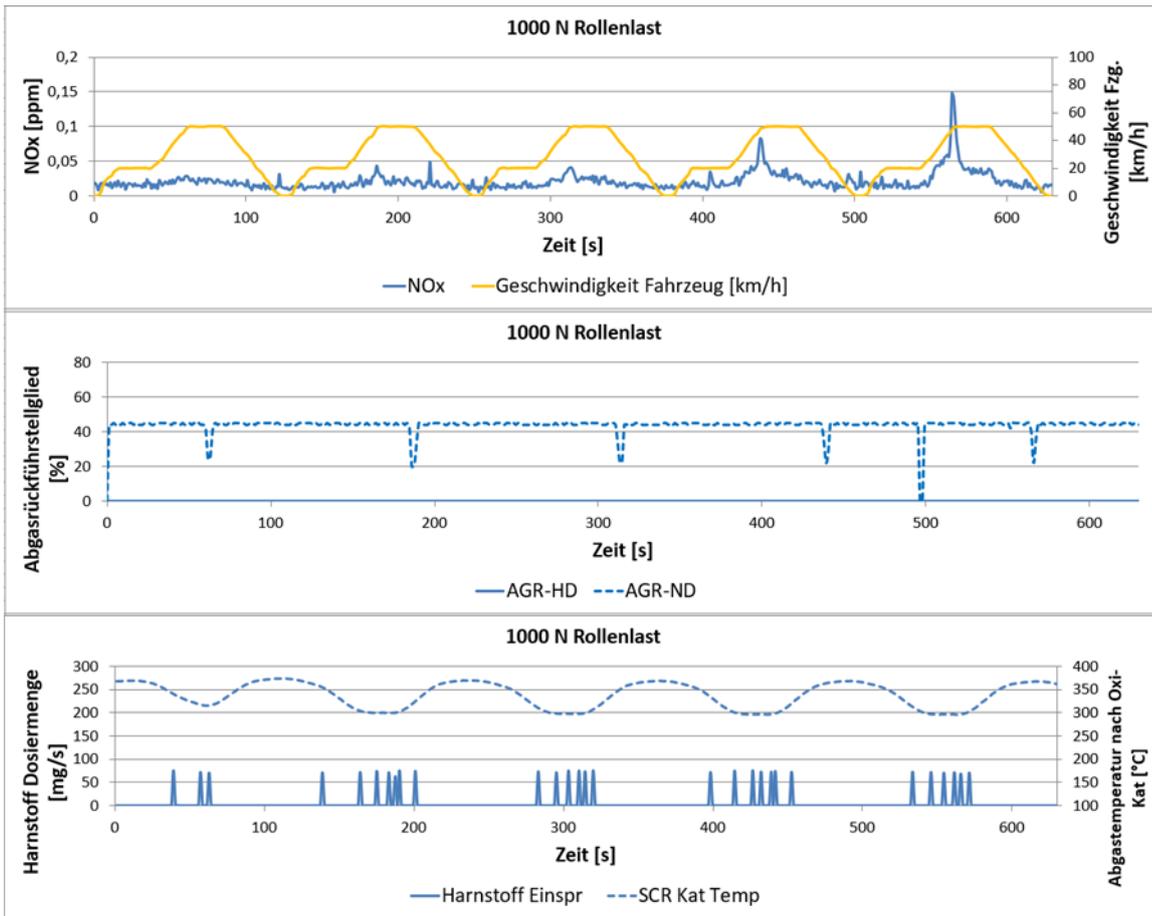
Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
1000	Serie	8,74	1,00	15,85	1,81
1000	AGR	9,43	1,08	22,35	2,37
1000	SCR	113,40	12,97	203,56	1,80
1000	AGR+SCR	327,93	37,52	412,78	1,26

5.2.2.2 Prüffahrzeug „Mercedes“

5.2.2.2.1 Serienzustand

In Abbildung 84 sind der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, sowie die Harnstoffein-spritzung und SCR-Kat-Temperatur aufgetragen.

Abbildung 84 a-c: ASM2050 Serie 1000N Mercedes



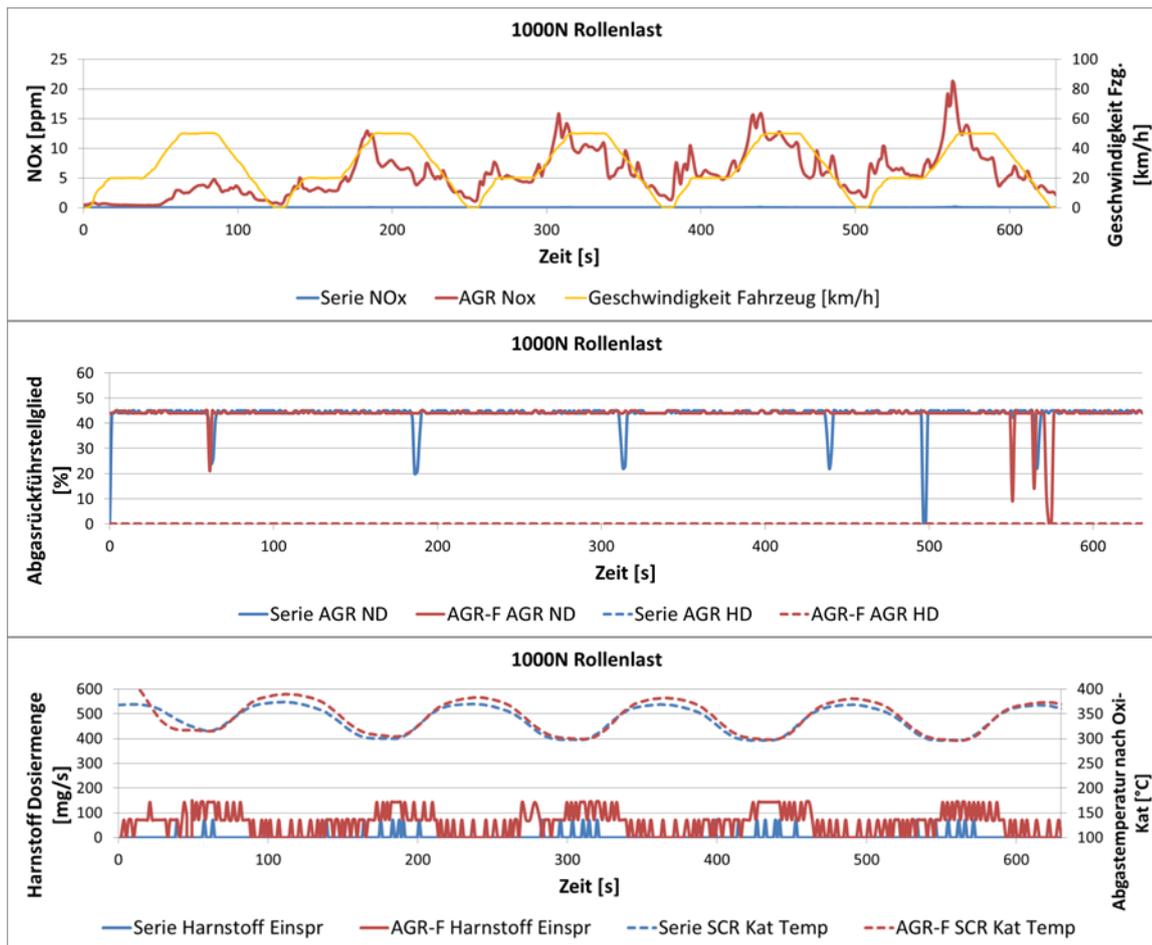
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Im Serienzustand liegen die NO_x-Emissionen bei einer Last von 1000 N in ähnlicher Größenordnung wie bei 500 N. Auffällig ist, dass der Spitzenmittelwert der NO_x-Emissionen bei 50 km/h sogar auf 0,09 ppm gesunken ist.

5.2.2.2.2 AGR-Fehler

In Abbildung 85 sind der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand und der AGR-Fehler miteinander verglichen.

Abbildung 85 a-c: ASM2050 Fehler AGR 1000 N Mercedes



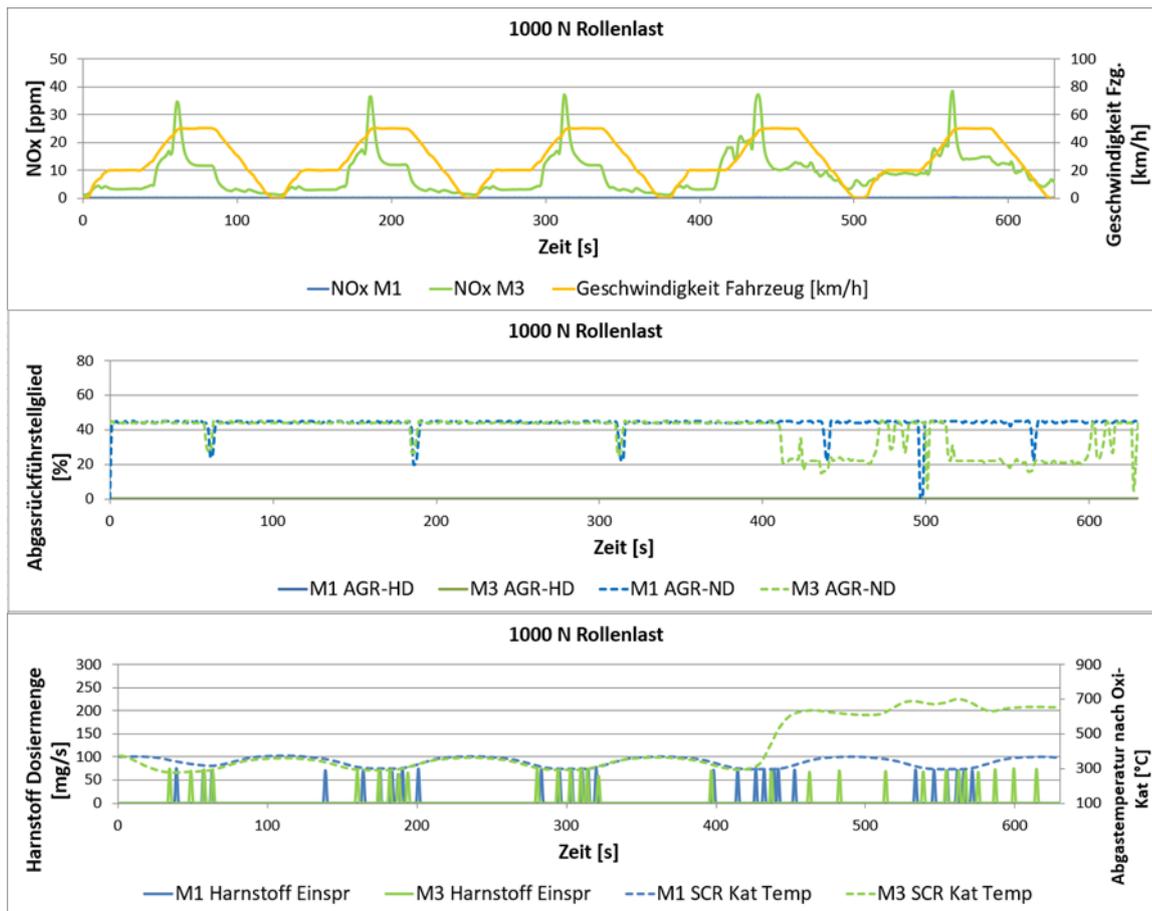
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Manipulation der AGR bei 1000 N Last führt für den Spitzenmittelwert mit 9,50 ppm bei 20 km/h sowie für die beiden Konstantfahrmittelwerte mit 5,41 ppm (20 km/h) bzw. 10,75 ppm (50 km/h) zu höheren Emissionen als bei 500 N Last. Der Spitzenmittelwert bei 50 km/h liegt mit 17,67 ppm etwas niedriger. Durch das blockierte AGR-Ventil wird erneut eine höhere Menge an Harnstoff eingespritzt um den Fehler im AGR-System auszugleichen. Da eine höhere Last gefahren wird, muss die Harnstoffmenge noch weiter erhöht werden.

5.2.2.2.3 SCR-Fehler

In Abbildung 86 werden der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienzustand und der SCR-Fehler miteinander verglichen. M1 steht im Diagramm für den Serienzustand und M3 für den SCR-Fehler.

Abbildung 86 a-c: ASM2050 Fehler SCR 1000 N Mercedes



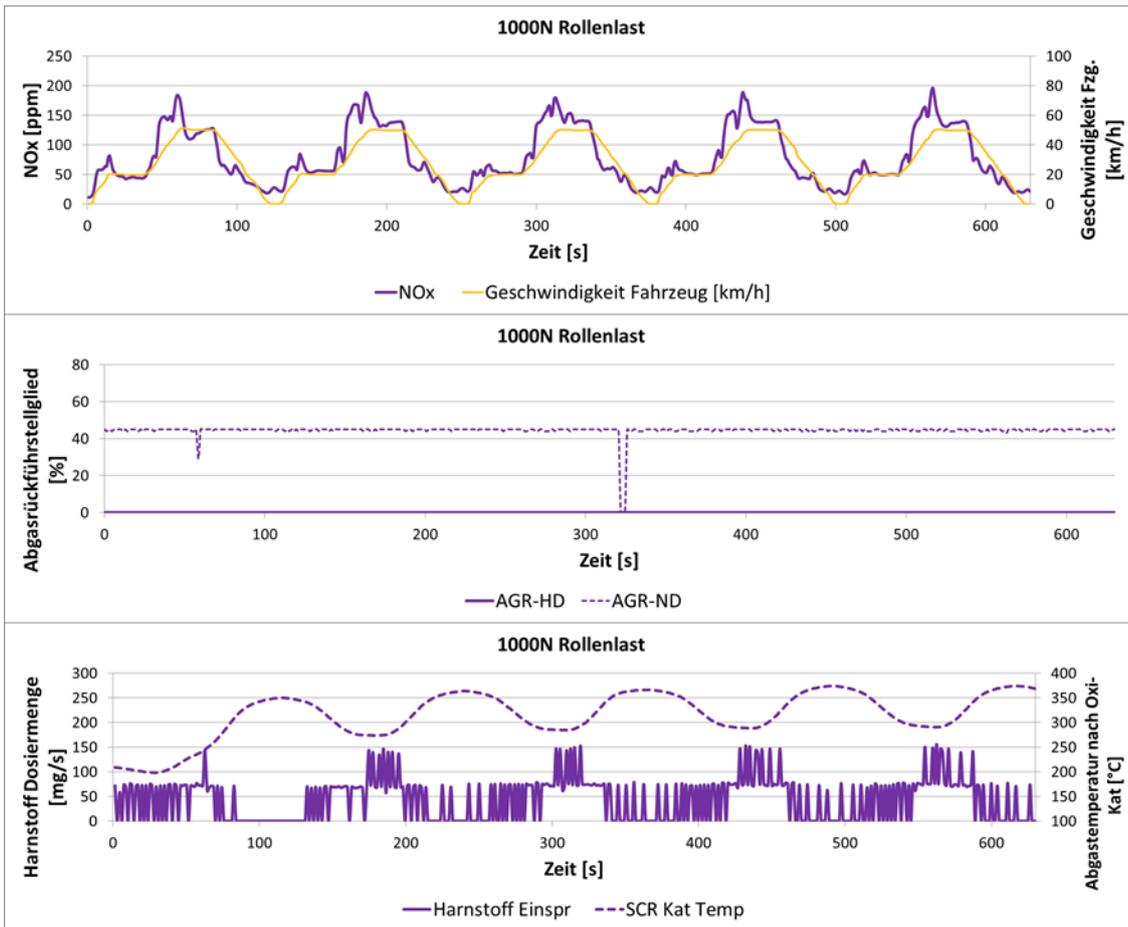
Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Das Harnstoffventil wird angesteuert, hat aber aufgrund des Ausbaus es keinen Einfluss auf die Abgasreinigung. Das AGR-Ventil kann diesen Fehler nicht kompensieren, da es schon komplett geöffnet ist. Dies hat bei einer Last von 1000 N gegenüber 500 N einen Anstieg der NO_x-Emissionen zur Folge und es ergeben sich Spitzenmittelwerte von 4,25 ppm (20 km/h) bzw. 35,95 ppm (50 km/h). Auch die Konstantfahrtsmittelwerte steigen auf 3,17 ppm (20 km/h) bzw. 12,26 ppm (50 km/h) an. Die Besonderheit an dieser Messfahrt ist eine Temperaturerhöhung und ein unständig regelndes AGR-Ventil ab dem vierten ASM2050-Durchlauf. Dies deutet auf eine Regeneration hin. Die Regenerationsphase verfälscht die Ergebnisse und kann nicht bewertet werden. Da die ersten drei Zyklen sehr stabil verlaufen sind, wurden deshalb diese für die Auswertung betrachtet. Im Vergleich zu den Werten der ersten drei Zyklen haben die Spitzenmittelwerte 6,05 ppm (20 km/h) und 18,91 ppm (50 km/h) sowie die Konstantfahrtsmittelwerte für die Zyklen während der Regenerationsphase 7,88 ppm (20 km/h) und 12,71 (50 km/h).

5.2.2.2.4 AGR + SCR-Fehler

In Abbildung 87 ist der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es ist bei dieser Messung der AGR- und SCR-Fehler verbaut.

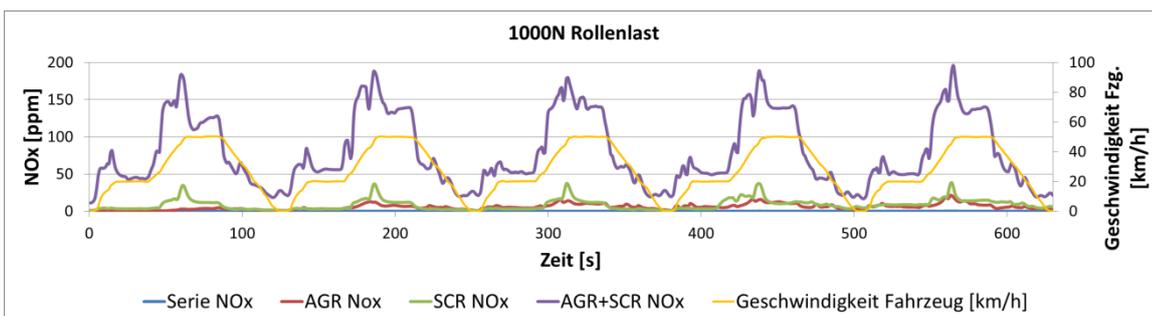
Abbildung 87 a-c: ASM2050 Fehler AGR+ SCR 1000 N Mercedes



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Manipulation beider Systeme bei einer Messfahrt von 1000 N verhält sich grundsätzlich ähnlich wie bei 500 N, hat allerdings auf die Ergebnisse noch größerer Auswirkungen. Insbesondere fällt eine höhere Einspritzmenge an Harnstoff auf, was auf die größere Last zurückzuführen ist. Da in diesem Fall wiederum keine gegenseitige Kompensation stattfinden kann, ergeben sich für die Stickstoffoxidemissionen Maximalwerte: die Spitzenmittelwerte liegen bei 70,72 ppm (20 km/h) bzw. 188,25 ppm (50 km/h) und die Konstantföhrmittelwerte bei 51,7 ppm (20 km/h) bzw. 140,63 ppm (50 km/h). In Abbildung 88 ist der Verlauf der NO_x-Konzentration, die Position des AGR-Ventils, die Harnstoffeinspritzung und die SCR-Kat-Temperatur aufgetragen. Es werden der Serienstand, AGR-Fehler, SCR-Fehler und AGR+SCR-Fehler miteinander verglichen.

Abbildung 88: ASM2050 – Last 1000 N – Mercedes– Serie / AGR-Fehler / SCR-Fehler / AGR+SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Tabelle 29: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 20 km/h – Mercedes A180d

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
1000	Serie	0,02	1,00	0,03	2,10
1000	AGR	5,41	357,21	9,50	1,75
(Zykl. 1-3) 1000	SCR	3,17	208,91	4,25	1,34
1000	AGR+SCR	51,70	3411,00	70,72	1,37

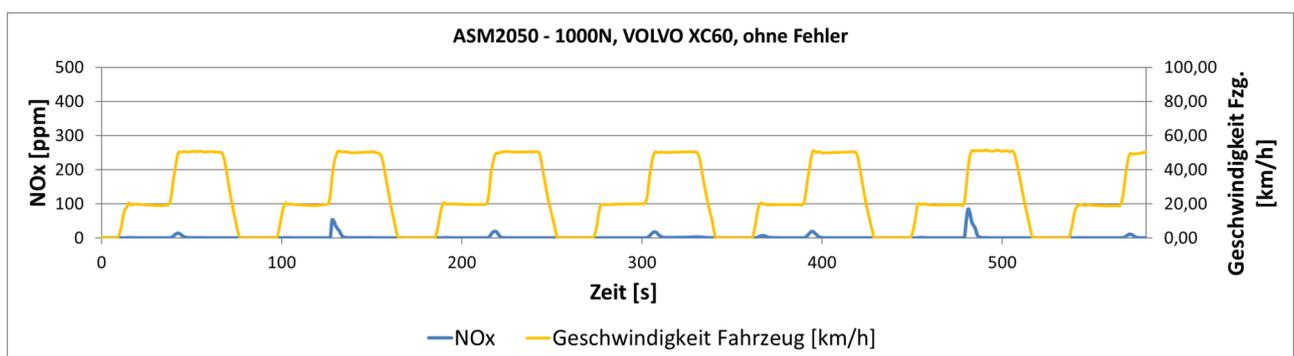
Tabelle 30: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 50 km/h – Mercedes A180d

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
1000	Serie	0,03	1,00	0,09	2,78
1000	AGR	10,75	331,22	17,67	1,64
(Zykl. 1-3) 1000	SCR	12,26	377,94	35,95	2,93
1000	AGR+SCR	140,63	4333,91	188,25	1,34

5.2.2.3 Prüffahrzeug „VOLVO“

In Abbildung 89 bis Abbildung 93 sind die NO_x-Konzentrationen über der Fahrgeschwindigkeit im ASM2050 mit 1000 N Last für den VOLVO XC60 auf dem Rollenprüfstand dargestellt.

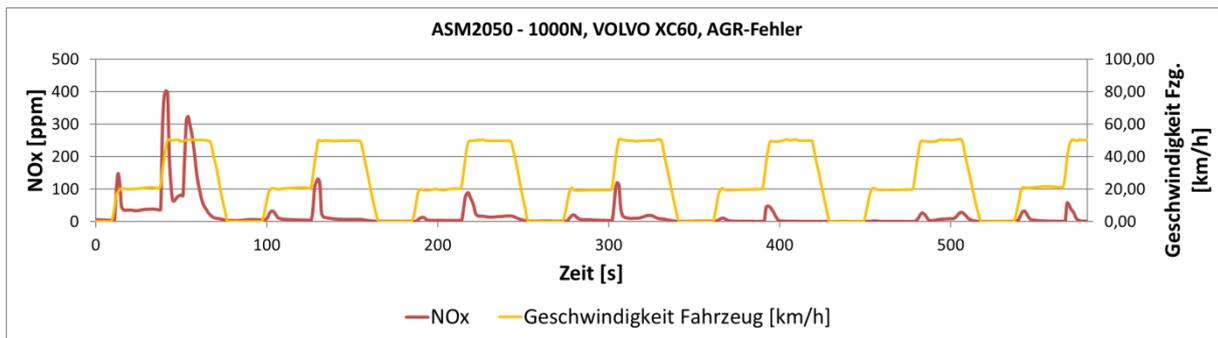
Abbildung 89: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, ohne Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Im Serienzustand liegen die NO_x-Emissionen beim VOLVO XC60 bei einer Last von 1000 N in einer ähnlichen Größenordnung wie bei 500 N Last. Auffällig ist, dass der Peakwert der NO_x-Emissionen bei 50 km/h im Vergleich zum ASM2050 mit 500 N Last gesunken ist.

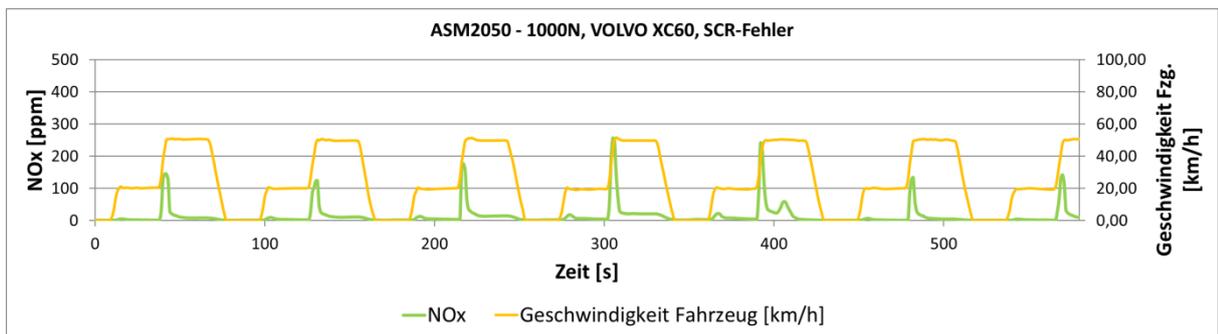
Abbildung 90: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, AGR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Der AGR-Fehler bei dem VOLVO XC60 verursacht im ASM2050 bei 1000 N Last erhöhte NO_x -Konzentrationen gegenüber dem Serienzustand. Dieser Fehler führt sowohl bei den Mittelwerten für die Konstantfahrten als auch bei den Peakwerten im ASM2050 mit 1000 N zu höheren NO_x -Konzentrationen als im ASM2050 mit 500 N Last. Interessant ist, dass die Höhe der NO_x -Werte mit der Anzahl der gefahrenen Tests abnimmt. Es ist davon auszugehen, dass mit steigender Fahrtdauer und steigender Temperatur des Abgasnachbehandlungssystems der AGR-Fehler durch das SCR-System kompensiert wird.

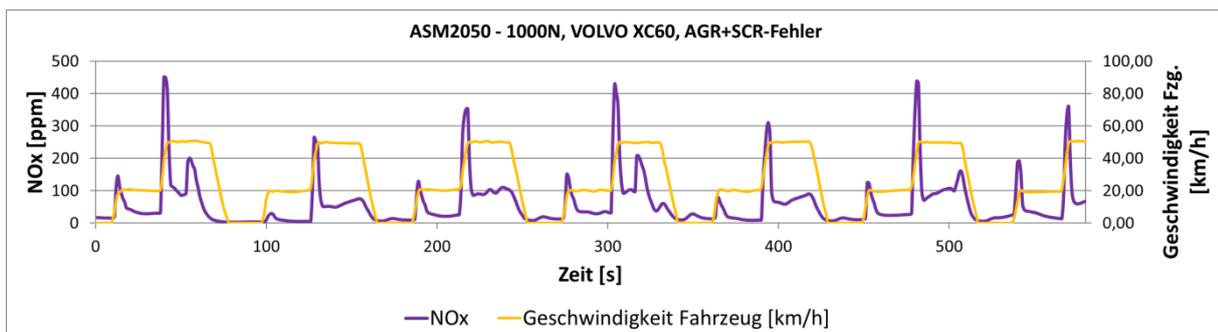
Abbildung 91: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Der SCR-Fehler führt bei dem VOLVO XC60 im ASM2050 bei 1000 N zu einem signifikanten Anstieg der NO_x -Konzentrationen gegenüber dem Serienzustand. Das gilt insbesondere für den Peakwert bei 50 km/h. Die Erhöhung der NO_x -Konzentrationen fällt beim ASM2050 mit 1000N deutlicher aus als bei 500 N Last.

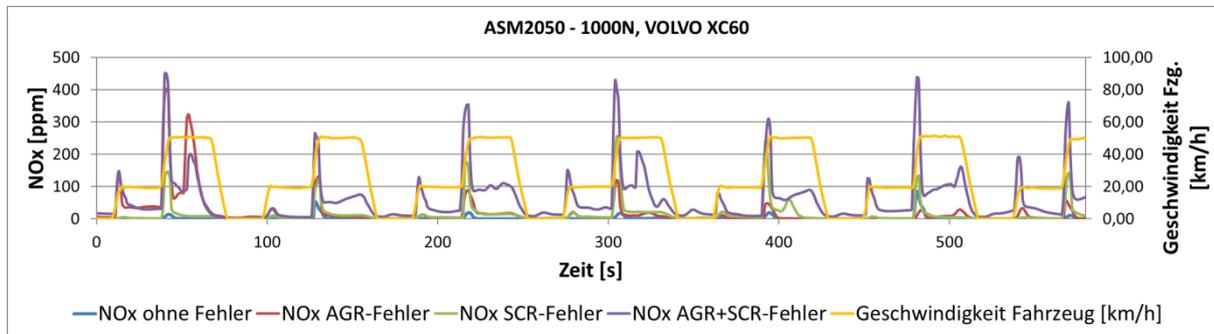
Abbildung 92: ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, AGR- und SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Kombination aus AGR- und SCR-Fehler führt bei dem VOLVO XC60 im ASM2050 mit 1000 N Last zu einem starken Anstieg der NO_x-Konzentrationen gegenüber dem Serienzustand. Das gilt sowohl für die Mittelwerte bei den Konstantfahrten als auch für die Peakwerte. Die Erhöhung der NO_x-Konzentrationen fallen beim ASM2050 mit 1000 N deutlich größer aus als bei 500 N Last.

Abbildung 93: ASM2050 – 1000N, VOLVO XC60, Zusammenfassung



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

In Tabelle 31 und Tabelle 32 sind die Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N für den VOLVO XC60 dargestellt. Alle verbauten Fehler lassen sich anhand der NO_x-Konzentrationen identifizieren. Der Anstieg der NO_x-Werte bei den Peakwerten bei 50 km/h ist besonders deutlich, aber auch eine Messung bei 20 km/h erscheint aussagekräftig genug, um die simulierten Fehler erkennen zu können.

Tabelle 31: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 20 km/h – VOLVO XC60

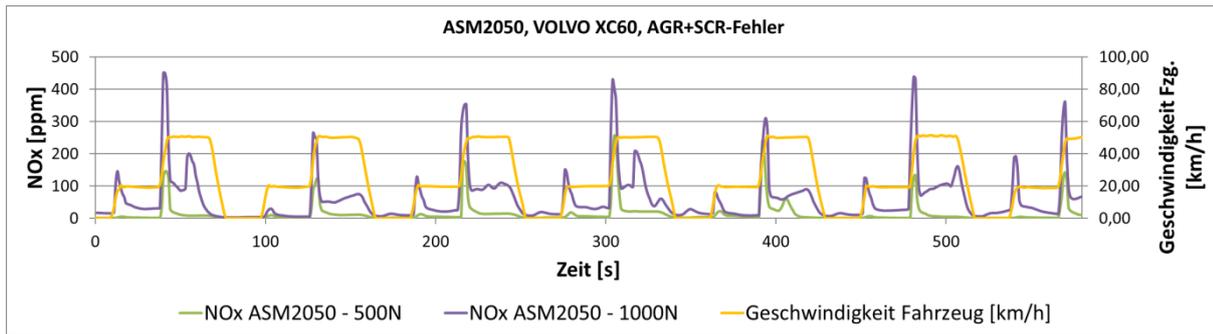
Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
1000	Serie	0,33	1,00	2,81	8,63
1000	AGR	3,37	10,37	14,85	4,41
1000	SCR	5,73	17,63	17,71	3,09
1000	AGR+SCR	24,50	75,33	119,84	4,89

Tabelle 32: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 auf dem Rollenprüfstand bei einer Last von 1000 N und 50 km/h – VOLVO XC60

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
1000	Serie	0,79	1,00	18,60	23,56
1000	AGR	9,88	12,52	85,34	8,64
1000	SCR	19,48	24,67	224,40	11,52
1000	AGR+SCR	92,39	117,05	363,80	3,94

In Abbildung 94 sind die NO_x-Konzentrationen für den kombinierten AGR- und SCR-Fehler im ASM2050 mit 500 N Last und 1000 N Last dargestellt. Bei einer Last von 1000 N fällt die Erhöhung der NO_x-Werte deutlicher aus, aber 500 N Last im ASM2050 reichen aus, um diese Fehler bei dem VOLVO XC60 identifizieren zu können.

Abbildung 94: Vergleich ASM2050 – 500 N und ASM2050 – 1000 N, VOLVO XC60, AGR- und SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.2.3 ASM2050 / Straßenfahrt

Die ersten Prüfergebnisse mit dem Mini-PEMS haben gezeigt, dass die untersuchten abgasrelevanten Fehler allein mit Hilfe der Messung der Abgaskonzentrationen bewertet werden können. Daher wurde im Rahmen der in den folgenden Abschnitten dargestellten Messungen auf eine Erfassung des Abgasmassenstroms verzichtet. Durch diese Vereinfachung lässt sich der Einbau des Messgerätes stark beschleunigen, so dass Prüfzeiten realisiert werden können, die für eine periodische AU praktikabel erscheinen. Um das Abgasverhalten der Testfahrzeuge mit Mini-PEMS zu bewerten, wurde auf der Straße der ASM2050 nachgefahren. Dabei wurden die Abgaskonzentrationen mit dem Mini-PEMS modal erfasst. Je Zustand des Fahrzeugs (ohne Fehler, AGR-Fehler, SCR-Fehler, AGR- + SCR-Fehler) wurden jeweils mehrere Zyklen gefahren. Bei den Testfahrzeugen „Peugeot“ und dem „Mercedes“ wurden Zusatzinfos aus dem OBD System mit Hilfe des AVL DiTEST Testers ausgelesen (u. a. SCR-Kat-Temperatur, eingespritzte Harnstoffmenge, Außentemperatur, Öltemperatur). Bei dem Testfahrzeug „VOLVO“ war aufgrund des vom Fahrzeughersteller verwendeten Übertragungsprotokolls ein Auslesen dieser Daten nicht möglich. Bei allen eingebauten Fehlern blieb die Motorkontrolllampe (MIL) aus. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass vor den Messreihen, jeweils die Fehlercodes des FehlerSpeichers der OBD zurückgesetzt wurden. Vor Abschluss der Messung wurden nicht alle Überwachungsfunktionen durchgeführt, sodass die MIL vermutlich erst nach weiteren Motorstarts und Fahrzyklen mit dem verbauten Fehler angesprungen wäre.

Der Vorteil der Messung mit Mini-PEMS gegenüber einer Messung auf einem Rollenprüfstand ist, dass das Prüffahrzeug die gleiche Motorlast aufbringen muss wie im realen Straßenverkehr, während auf dem Rollenprüfstand mit Hilfe einer Schwungmasse und einer aufgebrachten Kraft die auftretende Belastung simuliert wird. In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der Abgasmessungen mit Mini-PEMS für die untersuchten Testfahrzeuge dargestellt.

5.2.3.1 Prüffahrzeug „Peugeot“

In der Abbildung 95 a-d sind für die verschiedenen Zustände des Peugeot der Verlauf der mit Mini-PEMS gemessenen NO_x Konzentrationen über der Fahrgeschwindigkeit im ASM2050 aufgetragen.

Abbildung 95 a-d: Mini-PEMS Messung am Prüffahrzeug „Peugeot“, a.) Fahrzeug ohne Fehler - b.) AGR-Fehler – c.) SCR-Fehler – d.) AGR+SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Messungen mit dem Mini-PEMS an dem Testfahrzeug „Peugeot“ mit AGR-Fehler zeigten keine signifikante Erhöhung der NO_x Konzentrationen gegenüber dem Fahrzeug ohne Fehlersimulation. Der Fehler des AGR wird offensichtlich durch das SCR-System kompensiert. Daher ist der AGR-Fehler mit Hilfe des Mini-PEMS im ASM2050 nicht eindeutig zu erkennen. Der SCR-Fehler und die Kombination von AGR- und SCR-Fehler konnten aufgrund der deutlich erhöhten NO_x -Messwerte eindeutig identifiziert werden. Dabei reicht eine Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h für die Erkennung des SCR-Fehlers und die Kombination von AGR- und SCR-Fehler aus.

Tabelle 33: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 20 km/h – Peugeot 308

Straßenfahrt	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
	Serie	7,30	1,00	29,52	4,05
	AGR	6,68	0,92	28,42	4,25
	SCR	75,82	10,39	182,76	2,41
	AGR+SCR	194,06	26,60	334,74	1,72

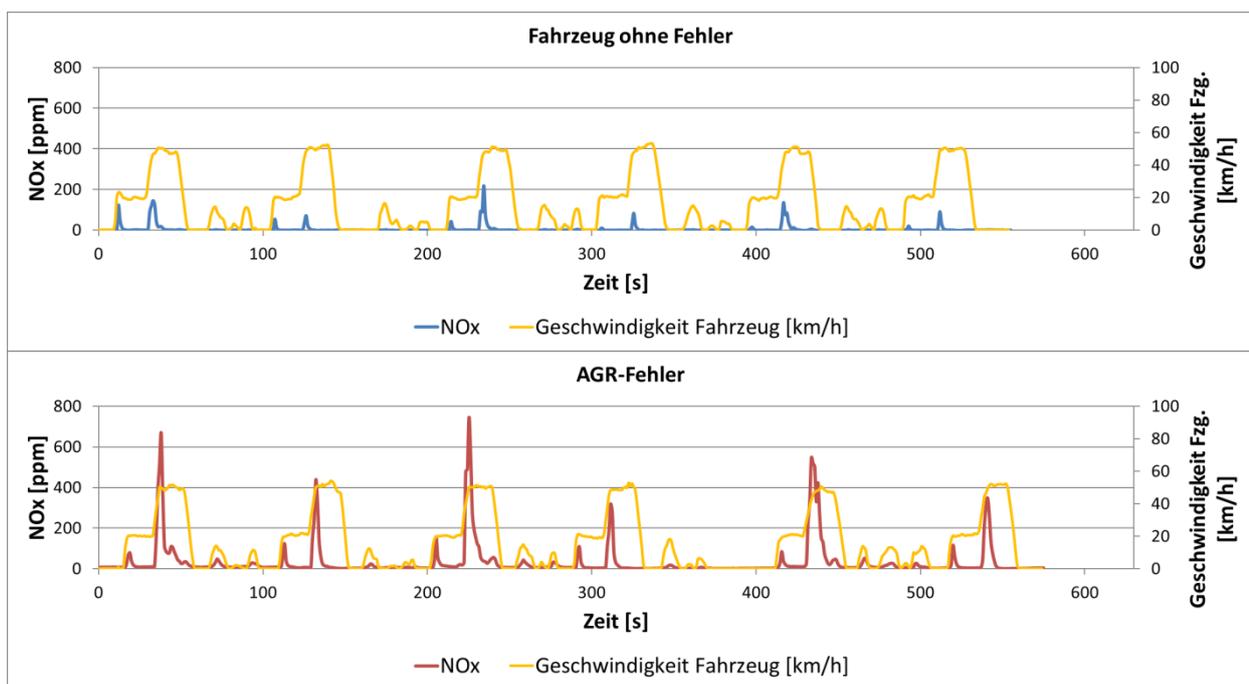
Tabelle 34: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 50 km/h – Peugeot 308

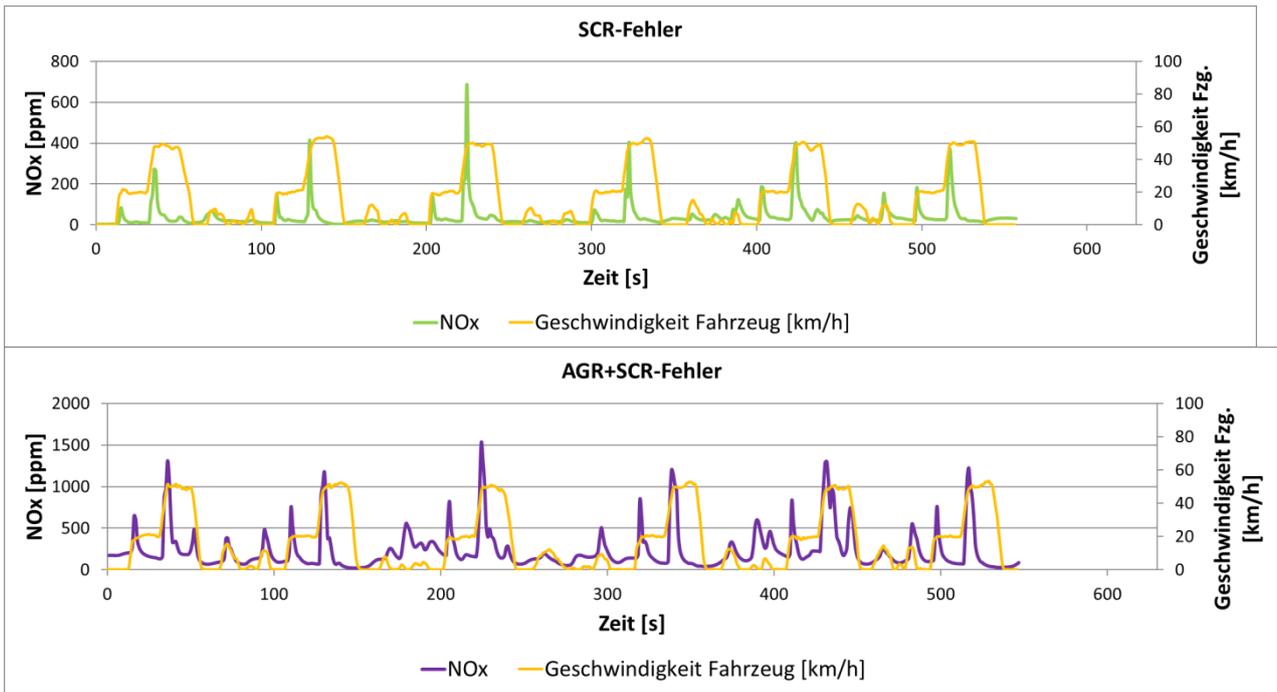
Straßenfahrt	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
	Serie	12,17	1,00	48,68	4,00
	AGR	5,97	0,49	30,03	5,03
	SCR	129,22	10,61	291,79	2,26
	AGR+SCR	225,14	18,49	459,61	2,04

5.2.3.2 Prüffahrzeug „Mercedes“

In der Abbildung 96 a-d sind für die verschiedenen Zustände des Testfahrzeugs „Mercedes“ der Verlauf der mit Mini-PEMS gemessenen NO_x-Konzentrationen über der Fahrgeschwindigkeit im ASM2050 aufgetragen.

Abbildung 96 a-d: Mini-PEMS Messung am Prüffahrzeug „Mercedes“, a.) Fahrzeug ohne Fehler - b.) AGR-Fehler – c.) SCR-Fehler – d.) AGR+SCR-Fehler





Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Messungen mit dem Mini-PEMS an dem Testfahrzeug „Mercedes“ zeigen bei allen simulierten Fehlern eine signifikante Erhöhung der NO_x-Konzentrationen gegenüber dem Fahrzeug ohne Fehlersimulation. Bei diesem Fahrzeug ist eine Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h ausreichend, um anhand der Erhöhung der NO_x-Konzentrationen alle Fehler eindeutig identifizieren zu können.

Tabelle 35: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 20 km/h – Mercedes A180d

Straßenfahrt	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/Konstant-MW 20 km/h
	Serie	0,25	1,00	87,05	347,37
	AGR	9,78	39,04	382,75	39,12
	SCR	24,23	96,70	132,61	5,47
	AGR+SCR	153,85	613,94	828,56	5,39

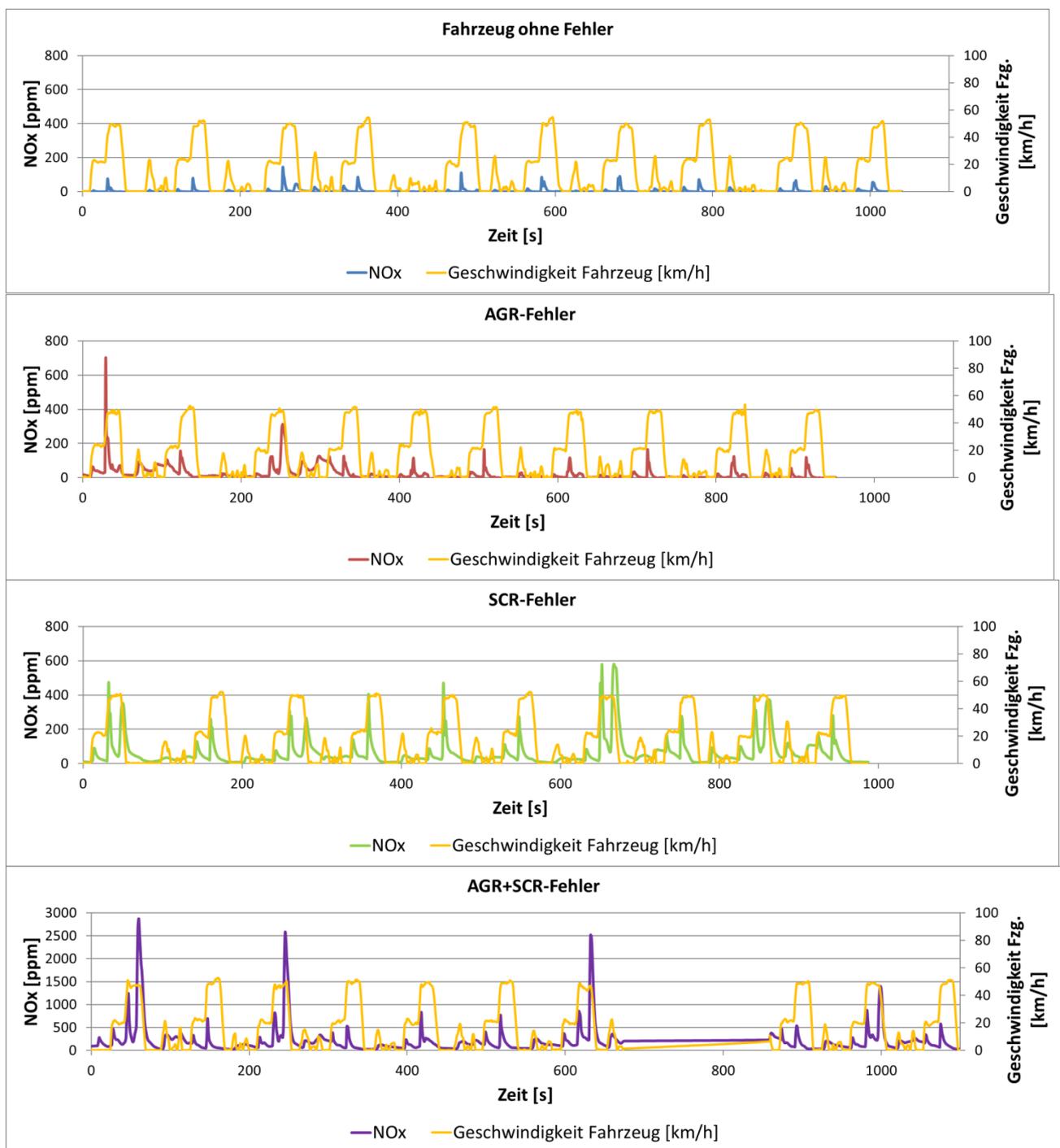
Tabelle 36: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 50 km/h – Mercedes A180d

Straßenfahrt	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/Konstant-MW 50 km/h
	Serie	2,35	1,00	74,89	31,86
	AGR	27,00	11,49	372,27	13,79
	SCR	40,37	17,18	497,07	12,31
	AGR+SCR	284,95	121,22	1341,82	4,71

5.2.3.3 Prüffahrzeug „VOLVO“

In der Abbildung 97 a-d sind für die verschiedenen Zustände des Testfahrzeug „VOLVO“ der Verlauf der mit Mini-PEMS gemessenen NO_x Konzentrationen über der Fahrgeschwindigkeit im ASM 2050 aufgetragen.

Abbildung 97 a-d: Mini-PEMS Messung am Prüffahrzeug „VOLVO“, a.) Fahrzeug ohne Fehler - b.) AGR-Fehler – c.) SCR-Fehler – d.) AGR+SCR-Fehler



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Die Messungen mit dem Mini-PEMS an dem Testfahrzeug „VOLVO“ mit AGR-Fehler zeigen eine Erhöhung der NO_x-Konzentrationen gegenüber dem Fahrzeug ohne Fehlersimulation. Mit zunehmender

Anzahl der Testzyklen nimmt diese Erhöhung ab. Der Fehler des AGR wird offensichtlich durch das SCR-System kompensiert. Dennoch ist der AGR-Fehler mit Hilfe der Mini-PEMS Messung im ASM2050 zu erkennen. Der SCR-Fehler und die Kombination von AGR- und SCR-Fehler konnten aufgrund der deutlich erhöhten NO_x-Messwerte eindeutig identifiziert werden. Grundsätzlich ist bei diesem Fahrzeug die Erhöhung der NO_x-Konzentrationen bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h größer als bei 20 km/h, dennoch lassen sich der SCR-Fehler und die Kombination von AGR- und SCR-Fehler auch bei 20 km/h anhand der erhöhten NO_x Konzentrationen eindeutig identifizieren.

Tabelle 37: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 20 km/h – VOLVO XC60

Straßenfahrt	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Peak 20 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 20 km/h
	Serie	0,57	1,00	19,76	34,69
	AGR	16,27	28,57	55,66	3,42
	SCR	34,16	59,99	102,32	3,00
	AGR+SCR	87,85	154,25	303,16	3,45

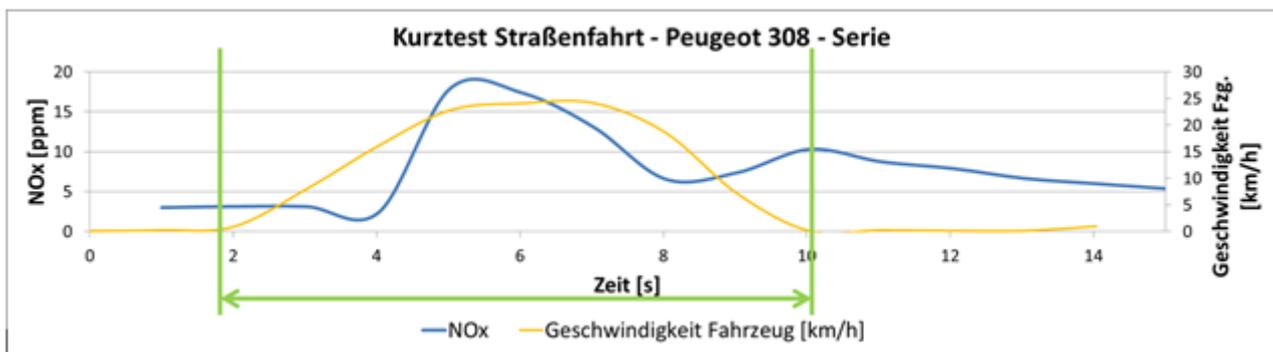
Tabelle 38: Mittelwerte der Messreihe ASM2050 Straßenfahrt bei 50km/h – VOLVO XC60

Straßenfahrt	Fehler	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h	NO _x Peak 50 km/h [ppm]	Quotient Peak/ Konstant-MW 50 km/h
	Serie	4,07	1,00	112,33	27,58
	AGR	55,05	13,52	184,31	3,35
	SCR	57,95	14,23	391,33	6,75
	AGR+SCR	132,43	32,52	1308,10	9,88

5.3 „Kurztest Straßenfahrt“ (mit Mini-PEMS)

Die Ergebnisse im ASM2050 mit Mini-PEMS haben gezeigt, dass bereits bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h die simulierten Fehler anhand der gemessenen NO_x-Konzentrationen identifiziert werden können. Daher wurde bei den Testfahrzeugen „Peugeot“ und „Mercedes“ zusätzlich zum ASM2050 ein „Kurztest Straßenfahrt“ durchgeführt. Dieser Test war ursprünglich nicht im Messprogramm für dieses Projekt vorgesehen. Aufgrund der vergleichsweise einfachen und schnellen Umsetzungsmöglichkeit und der Gelegenheit des direkten Vergleiches der Messergebnisse, wurde dieser Test außerplanmäßig durchgeführt. Bei der Messmethode „Kurztest Straßenfahrt“ wird das Fahrzeug aus dem Stand auf 20 km/h beschleunigt, diese Geschwindigkeit für ca. 3-5 Sekunden gehalten und abschließend wieder bis zum Stillstand abgebremst (vgl. Abbildung 98). Dieser Test beinhaltet somit keine definierten Konstantphasen. Für einen derartigen Test ist eine Fahrstrecke von etwa 35 Metern ausreichend. Um die NO_x-Konzentration zu bewerten, wird ein Mittelwert über den Zeitraum gebildet, in dem das Fahrzeug in Bewegung ist. Dieser Zeitraum beträgt bei den Messungen zwischen 8 und 12 Sekunden. Zusätzlich wird der NO_x-Peakwert mit aufgezeichnet. Der „Kurztest Straßenfahrt“ wurde in jedem Fehlerstand dreimal durchgeführt. Zur Ermittlung des Fehlerfaktors FI wurde jeweils der Mittelwert der drei durchgeführten Versuche herangezogen. Der Fehlerfaktor FI wird wie beim ASM2050 Zyklus gebildet (vgl. 5.2). Die Ergebnisse des „Kurztest Straßenfahrt“ sind für die Testfahrzeuge „Peugeot“ und „Mercedes“ in Tabelle 39 und Tabelle 40 dargestellt.

Abbildung 98: Profil des „Kurztest Straßenfahrt“



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Tabelle 39: Ergebnisse im „Kurztest Straßenfahrt“ des Testfahrzeugs „Peugeot“ (Mittelwert über je 3 Messungen)

	Mittelwert NO _x [ppm]	Peakwert NO _x [ppm]	Fehlerfaktor
Ohne Fehler	9,80	20,54	1,00
AGR-Fehler	11,19	31,18	1,14
SCR-Fehler	114,29	182,48	11,66
AGR+SCR Fehler	210,07	383,93	21,43

Tabelle 40: Ergebnisse im „Kurztest Straßenfahrt“ des Testfahrzeugs „Mercedes“ (Mittelwert über je 3 Messungen)

	Mittelwert NO _x [ppm]	Peakwert NO _x [ppm]	Fehlerfaktor
Ohne Fehler	2,03	10,05	1,00
AGR-Fehler	19,61	71,31	9,67
SCR-Fehler	104,07	262,54	51,32
AGR+SCR Fehler	264,40	843,52	130,40

Die Ergebnisse zeigen, dass bei dem Testfahrzeug „Peugeot“ alle mit dem ASM2050 erkennbaren Fehler auch mit dem „Kurztest Straßenfahrt“ identifiziert werden können. Auch bei dem Testfahrzeug „Mercedes“ konnten alle mit dem ASM2050 erkennbaren Fehler auch mit dem „Kurztest Straßenfahrt“ identifiziert werden. Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Mini-PEMS Messungen wurden mit Hilfe eines Messrohres durchgeführt, in dem die verschiedenen elektrochemischen Sensoren angebracht sind. Dieses Messrohr muss mit dem Auspuffrohr verbunden werden. Je nach Lage und Design des Auspuffrohres kann der Anbau des Messrohres schwierig und zeitaufwendig sein, was für eine periodische AU nicht geeignet erscheint. In Zukunft werden Mini-PEMS Geräte zur Verfügung stehen, bei denen die Abgase mit Hilfe einer Sonde im Abgasrohr entnommen und mit Hilfe eines Schlauches in das eigentliche Messgerät gefördert werden, das z.B. im Kofferraum des Testfahrzeuges untergebracht werden kann. Dadurch wird der Aufwand für die Vorbereitung derartiger Messungen deutlich reduziert. Bei diesen Messgeräten ist neben der Messung von NO_x, CO und CO₂ auch die Messung der Partikelanzahl möglich. In Abbildung 99 ist ein derartiges Messsystem dargestellt.

Abbildung 99: Mini-PEMS zur Messung von CO, CO₂, NO_x und PN

Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

5.4 Ergebnisse/ Zusammenfassung/ Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund der lediglich an drei unterschiedlichen Fahrzeugen durchgeführten Untersuchungen lassen sich grundsätzlich keine generell verbindlichen Aussagen für alle Diesel-Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 treffen. Allerdings konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, um eine erste Einschätzung hinsichtlich der Validität sowie der Anwendbarkeit der untersuchten Messmethoden im Rahmen einer periodischen AU abzugeben. Zur Absicherung der Schlussfolgerung sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

5.4.1 ASM-Zyklus auf dem Rollenprüfstand

Es zeigte sich eine signifikante Zunahme der NO_x-Emissionen (gemittelte Werte aus Konstantfahrten bzw. aus Peakwerten) bereits nach Einbau eines der beiden Fehler, wobei der SCR-Fehler zu höheren Emissionswerten als der AGR-Fehler führte. Allerdings stiegen die Emissionen überproportional stärker an, wenn beide Fehler gleichzeitig verbaut wurden. Das lässt vermuten, dass bei Ausfall lediglich eines Abgasreinigungssystems eine teilweise Kompensation durch das funktionierende System erfolgt. Der Einfluss der aufgebrachten Last von 500 N bzw. 1000 N hat eher einen geringen Einfluss auf die gemessenen NO_x-Emissionen am Endrohr. Die bereits bei 500 N gemessenen erhöhten Werte nach Fehlereinbau sind ausreichend signifikant gegenüber dem Originalzustand, um Fehler erkennen zu können. Das Aufbringen einer Last von 1000 N bringt keine zusätzlichen Erkenntnisse und erscheint deshalb nicht erforderlich. Ähnlich verhält es sich bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten von 20 km/h und 50 km/h. Die bereits bei 20 km/h gemessenen erhöhten Werte nach Fehlereinbau sind ausreichend signifikant gegenüber dem Originalzustand, um Fehler erkennen zu können. Das Prüfen mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h erscheint im Verhältnis zu dem zusätzlichen Aufwand und den daraus zusätzlich zu gewinnenden Erkenntnissen nicht erforderlich. Im OBD-Speicher wurden die Fehler nur teilweise abgespeichert. So wurde z. B. der Fehler „Kurzschluss AGR“ festgestellt. Die un-

terbrochene Harnstoffeinspritzung wurde im Rahmen des Tests nicht abgespeichert. Evtl. wäre dies nach mehrmaligem Auftreten des Fehlers noch erfolgt.

5.4.2 Mini-PEMS Testfahrt/ Kurztest Straßenfahrt

Die kurzen Testfahrten auf der Straße, bei denen der ASM2050-Zyklus nachgefahren wurde, zeigten sehr ähnliche Ergebnisse wie die simulierten Fahrten auf dem Prüfstand. Bereits der Einbau eines Fehlers führt zu signifikant höheren NO_x-Emissionen. Eine Ausnahme davon zeigte die Messung mit dem Peugeot 308 mit eingebautem AGR-Fehler. Hier lagen die NO_x-Emissionen teilweise sogar unterhalb der Emissionen im Originalzustand. Der Fehler des AGR wird offensichtlich durch das SCR-System kompensiert. Werden beide Fehler gleichzeitig verbaut, steigen die NO_x-Emissionen ebenfalls überproportional stärker an. Auch hier liegt nahe, dass sich die Abgasreinigungssysteme gegenseitig kompensieren, wenn nur ein Fehler eingebaut ist. Bei einer verkürzten Testfahrt von ca. 10 s und einer Beschleunigung auf lediglich ca. 20 km/h war ein ähnliches Verhalten (mit Ausnahme des Peugeot 308 mit AGR-Fehler) festzustellen mit ausreichender Signifikanz zur Fehlererkennung. Das Prüfen mittels einer Testfahrt auf der Straße bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h erscheint im Verhältnis zu dem zusätzlichen Aufwand und den daraus zu gewinnenden Erkenntnissen nicht erforderlich.

6 Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)

6.1 Ziel der NKA

Das Ziel des sechsten Kapitels ist es, die Aufwendungen und Emissionseinsparungen infolge einer zusätzlichen NO_x -Messung im Rahmen der periodischen AU zu ermitteln und monetär zu bewerten. Da der monetäre Bewertungssatz für die Emissionseinsparungen auf volkswirtschaftlichen Modellen, die den Ressourcenverbrauch messen, beruht, müssen die betriebswirtschaftlichen Aufwendungen in volkswirtschaftliche Kosten umgerechnet werden. Die so ermittelten volkswirtschaftlichen Nutzen und Kosten können gegenübergestellt werden, um eine Aussage über die gesamtwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer zusätzlichen NO_x -Messung zu ermöglichen.

6.2 Die Einordnung der AU als ökonomisches Gut

Die AU ist seit Januar 2010 Bestandteil der HU und kann im Vorfeld der HU oder während der HU durchgeführt werden. Bis Ende 2017 konnte die AU als sogenannte OBD-AU (On-Board-Diagnostic) ausgeführt werden. Eine On-Board-Diagnose-System (OBD-System) ist ein an Bord des Fahrzeugs installiertes Diagnosesystem für die Emissionsüberwachung, welches in der Lage sein muss, mit Hilfe rechnergespeicherter Fehlercodes, Fehlfunktionen und deren wahrscheinliche Ursachen anzuzeigen. Die AU wurde danach als zweistufiges Verfahren durchgeführt. Wurde beim Auslesen der OBD kein Fehler entdeckt, konnte auf die Endrohrmessung verzichtet werden. Seit 1. Januar 2018 wurde die verbindliche Endrohrmessung für alle AU-pflichtigen Fahrzeuge wiedereingeführt. Das BMVI begründet diesen Schritt damit, dass die Endrohrmessung besser geeignet ist, um Defekte oder Manipulationen der Abgasreinigung zu nachzuweisen [32]. Allerdings wurde die AU bislang inhaltlich lediglich geringfügig erweitert (z.B. Absenkung der Grenzwerte für CO Vol.% und Rauchgastrübung für EURO 6 Fahrzeuge), so werden zum Beispiel bisher die NO_x -Emissionen bei Diesel-Pkw nicht gemessen. Dieser Schritt des BMVI trägt der Tatsache Rechnung, dass das OBD-System eines Automobilherstellers aus der Sicht der ökonomischen Theorie ein sogenanntes Vertrauensgut ist. Schulz und Schuldenzucker (2010) haben dargelegt, dass die Hauptuntersuchung von Pkw ökonomisch begründet ist, weil Pkw die Voraussetzung von Vertrauensgütern erfüllen [33]. Vor dem Hintergrund der AU ist entscheidend, dass sowohl der Pkw an sich als auch die im Pkw verbauten Systeme (hier die OBD) aus ökonomischer Perspektive ein Vertrauensgut darstellen. Mit dem Begriff Vertrauensgut wird ausgedrückt, dass der Nutzer bzw. der Käufer eines Gutes nicht über alle Informationen verfügt (= Informationsasymmetrien), um die Eigenschaften eines Gutes richtig einschätzen zu können. Die Ursachen für den Informationsunterschied können dabei im Zeitpunkt des Kaufes unterschiedlich sein:

- ▶ Der Verkäufer kennt alle Eigenschaften des Gutes, gibt aber nicht alle Informationen freiwillig an den Käufer weiter (zum Beispiel weiß der Verkäufer, dass das Abgassystem defekt ist, aber informiert nicht den Käufer über diesen Defekt).
- ▶ Der Verkäufer kennt alle Eigenschaften des Gutes, gibt aber nur selektiv Informationen weiter. Das sind in der Regel die Informationen, die dem Verkäufer nützlich sind, um das Gut zu verkaufen. Dagegen werden schlechte Eigenschaften des Gutes verschwiegen. Märkte, auf denen sich die Verkäufer in dieser Art und Weise verhalten, werden als „Lemon markets“ bezeichnet.
- ▶ Der Verkäufer selbst kann vom Hersteller nicht alle Informationen erhalten haben, weil sich der Hersteller ebenso, wie in Punkt 1 und 2 dargestellt, verhält (zum Beispiel: der Automobilhersteller weiß, dass die OBD nicht immer die richtigen Werte anzeigt, aber er informiert nicht den Verkäufer über diesen Sachverhalt).

Des Weiteren gilt für den Zeitraum ab Kauf - also die Nutzung des Fahrzeuges - für den Fahrzeugnutzer folgendes:

- ▶ Der Käufer verfügt in der Regel nicht über den Sachverstand, um durch eine Eigeninspektion die Eigenschaften des Pkw zu erkennen.

- ▶ Folglich kann der Fahrzeugnutzer Fehler bei der Abgasreinigung nicht selbstständig erkennen.
- ▶ Weiterhin kann er den Informationen des Herstellers, die dieser über die OBD bereitstellt nicht trauen, weil er selbst nicht in der Lage ist zu prüfen, ob die bereitgestellten Informationen der OBD wahr sind.

Würde der Käufer über den Sachverstand verfügen, wäre der Pkw im Sinne der ökonomischen Theorie nicht mehr ein Vertrauensgut, sondern ein Inspektionsgut. Für den Pkw, der gefahren wird, bedeutet das, dass der durchschnittliche Nutzer sicher nicht über den Sachverstand verfügen wird, um den technischen Zustand seines Fahrzeuges angemessen beurteilen zu können. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass der Pkw als Vertrauensgut betrachtet werden kann. Mit zunehmender Nutzung nimmt die Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen zu. Wenn der Fahrzeugnutzer diesen Umstand in seinem Nutzungskalkül nicht berücksichtigt, bedeutet das, dass sein Vertrauen in die Funktionsfähigkeit des Pkw über den Nutzungszeitraum zunimmt. Wenn der Fahrzeugnutzer den Sachverhalt kennt, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit mit zunehmenden Fahrzeualter zunimmt, müsste er sein Fahrzeug freiwillig häufiger zur Inspektion abgeben. Dieses Verhalten wird jedoch vor allem von der Einkommenssituation des Fahrzeugnutzers abhängen. Je geringer das Einkommen des Fahrzeugnutzers ist, desto eher ist es wahrscheinlich, dass der Fahrzeugnutzer auf die Funktionsfähigkeit seines älter werdenden Pkw vertraut, um so Ausgaben für zusätzliche Inspektionen zu vermeiden. Wenn HU oder AU nicht existieren würden, müsste der Pkw-Halter, um entsprechend der gesetzlichen Normen einen technisch funktionsfähigen Zustand seines Fahrzeuges zu gewährleisten, Inspektionsfachverstand einkaufen. Weil er aber nicht abschätzen kann, ob der Zustand seines Fahrzeuges den gesetzlich geforderten Voraussetzungen entspricht, wird er zusätzliche Inspektionen in Abhängigkeit seiner Einkommenssituation, seiner Risikobereitschaft infolge von technischen Mängeln zu verunfallen, sowie seines ökologischen Bewusstseins durchführen. Die Fahrzeugeigentümer folgen demnach bei der Entscheidung über freiwillige Inspektionen ihren eigenen subjektiven Interessen. Hier stellt sich die Frage, ob davon ausgegangen werden kann, dass der Pkw-Halter so diszipliniert ist oder ausreichende marktliche Anreize bestehen, dass er rechtzeitig vor dem Auftreten eines technischen Mangels, sein Fahrzeug von einer Kfz-Werkstatt untersuchen lässt. Es bestehen doch erhebliche empirische und theoretische Indizien, dass freiwillige Inspektionen nicht die Effizienz einer HU beziehungsweise AU erreichen werden:

- ▶ Im Bereich der Straßenverkehrssicherheit besteht eine Diskrepanz zwischen subjektiver und objektiver Risikoeinschätzung hinsichtlich der Unfallwahrscheinlichkeit und der Schadstoffemissionshöhe. Die Pkw-Fahrer unterschätzen systematisch das persönliche Unfallrisiko und die Schadstoffemissionshöhe. Das betrifft dann natürlich auch das Risiko, infolge eines technischen Mangels zu verunglücken. Ihre eigene systematische Unterschätzung erhöht damit für andere Verkehrsteilnehmer das Unfallrisiko.
- ▶ Wenn aber durch eine HU das Unfallrisiko gesenkt werden kann und durch eine AU die Schadstoffemissionsmenge, dann würden auch andere Verkehrsteilnehmer durch eine geringere Unfallwahrscheinlichkeit sowie die Gesellschaft durch ein niedrigeres Emissionsniveau profitieren, ohne dass sie den Pkw-Halter, der den technischen Mangel reparieren ließ, für diesen externen Nutzen monetär entschädigen. Da aber diese Kompensation nicht stattfindet und zudem das Unfallrisiko sowie die Schadstoffemissionsmenge systematisch unterschätzt werden, ist der Anreiz für die freiwillig induzierte Beseitigung technischer Mängel relativ schwach ausgeprägt.

Die Informationsasymmetrien beim Kauf eines Pkw, die Gütereigenschaft des Pkw als Vertrauensgut während der Nutzungsdauer, die systematische Unterschätzung der Unfallwirkungen und der Schadstoffemissionshöhe infolge technischer Mängel sowie die Interdependenzen des eigenen Verhaltens mit dem Unfallrisiko der anderen Verkehrsteilnehmer und den ökologischen Konsequenzen des zu

hohen Schadstoffausstoßes sind ökonomische Tatbestände, die ein Marktversagen beschreiben. Daraus folgt, dass ein freiwilliges System der Selbstkontrolle für die technische Überprüfung von Pkw nicht funktionieren wird. HU und AU sind ökonomisch ein Regulierungselement, um die Funktionsfähigkeit des Marktes für die Beseitigung technischer Mängel der Pkw wiederherzustellen. Der empirische Befund bestätigt die theoretischen Vermutungen und zeigt, dass der Ersatz einer auf dem Prinzip der Freiwilligkeit basierenden Fahrzeuginspektion durch ein regelbasiertes Fahrzeuginspektionssystem die Verkehrsunfälle deutlich senken kann [34, 35].

6.3 Methodische Vorgehensweise

6.3.1 Grundlagen der Nutzen-Kosten-Analyse

Eine Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) ist ein traditionelles Verfahren, was ursprünglich eingeführt wurde, um den effizienten Einsatz öffentlicher Finanzmittel (Maximierung des idealtypischen Sozialproduktes) zu gewährleisten, indem direkte (= interne) und indirekte (= externe) Kosten und Nutzen zusammengefasst werden. Mittlerweile hat sich die NKA etabliert, um grundsätzlich Maßnahmen zu beurteilen, die eine Wirkung auf die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt haben. Grundlage für die Beurteilung der gesamtwirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit sind die sogenannten potenziellen Pareto- bzw. Kaldor-Hicks-Wohlfahrtskriterien. Eine Maßnahme ist danach gesamtwirtschaftlich vorteilhaft, wenn die volkswirtschaftlichen Nutzen größer als die Kosten sind (d.h. die Nutzen-Kosten-Differenz ist größer als 0 bzw. der Nutzen-Kosten-Quotient größer als 1). Es gilt folgender Zusammenhang:

$$CBR = \frac{\sum_{t=0}^n Bt(1+i)^{-t}}{\sum_{t=0}^n Ct(1+i)^{-t}}$$

mit:

Tabelle 41: Beschreibung der Parameter aus der „Nutzen-Kosten-Koeffizient“-Berechnung

Parameter	Beschreibung
CBR	Nutzen-Kosten-Koeffizient
t	Untersuchungszeitraum
Bt	Nutzen in Jahr t
Ct	Kosten in Jahr t
i	Zinssatz

Die Rentabilitätsschwelle liegt bei einem Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) von größer 1. In diesem Fall übersteigen die Nutzen die Kosten. In der Literatur werden dabei folgende Abstufungen vorgenommen:

Tabelle 42: Abstufungen des Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV)

NKV	Abstufung
NKV = 1	„schwach“
1 < NKV < 3	„akzeptabel“
NKV > 3	„exzellent“

Um den Nutzen zu bewerten, werden die eingesparten Kosten ermittelt (Kosten als entgangener Nutzen). Infolge der AU werden Diesel-Pkw mit defekten Katalysatoren entdeckt, so dass eine Reparatur des Defektes durchgeführt werden kann. Damit reduziert die AU die Kosten der NO_x-Emissionen. Der Nutzen bestimmt sich damit aus der Differenz zwischen den NO_x-Emissionen, die der Pkw ohne AU weiterhin emittiert hätte abzüglich der NO_x-Emissionen, die der Pkw ohne defekten Katalysator emittiert hätte.

tieren würde. Den gesamtwirtschaftlichen Nutzen müssen die gesamtwirtschaftlichen Kosten gegenübergestellt werden. Bei den gesamtwirtschaftlichen Kosten ist zu beachten, dass diese nicht identisch mit den betriebswirtschaftlichen Kosten sind. Betriebswirtschaftliche Kosten enthalten Elemente wie Steuern, Abgaben und Gewinne, die aus volkswirtschaftlicher Sicht keinen Ressourcenverzehr darstellen, sondern nur eine Art der monetären Umverteilung repräsentieren. Diese Kostenelemente müssten, soweit es möglich ist, aus den volkswirtschaftlichen Kostensätzen herausgerechnet werden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Aussagekraft der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) auf die Ressourcenersparnisse (= allokativer Wirkung) einer Maßnahme beschränkt ist. Das Erkenntnisziel der NKA ist es, die Ressourceneinsparung zu ermitteln. Der Wert der Ressource ist dabei ein Teil des „Gesamtwertes“ der betrachteten Volkswirtschaft.

6.3.2 Zeithorizont

Im Rahmen der NKA muss geklärt werden, zu welchem Zeitpunkt die Bewertung der Nutzen- und Kostenströme, die über einen Zeitraum anfallen, erfolgen soll. Für diese Untersuchung erfolgt die Bewertung der Nutzen und Kosten in Preisen des Jahres 2016. Das Jahr 2016 wurde als Basisjahr gewählt, weil die Kostensätze für NO_x-Emissionen sich auf den Preisstand des Jahres 2016 beziehen [40]. Mit der Wahl eines in der Vergangenheit liegenden Basisjahres ist es nicht mehr notwendig, die künftigen Preisänderungen im Untersuchungszeitraum zu prognostizieren. Damit wird ein Prognoserisiko bei den Berechnungen der Nutzen-Kosten-Verhältnisse vermieden. Als Untersuchungszeitraum wird der Zehnjahreszeitraum von 2024 bis 2033 gewählt. Als Startjahr für den Untersuchungszeitraum wurde das Jahr 2024 gewählt, weil die Abgasnorm Euro 6d für die Typgenehmigung von Diesel-Pkw zum 01.01.2020 eingeführt wird und für die Erstzulassung von Diesel-Pkw ab 01.01.2021 verpflichtend ist. Es wurde nur ein Zehnjahreszeitraum gewählt, weil davon ausgegangen werden kann, dass die Euro 6d-Abgasnorm durch eine neue Abgasnorm bis dahin abgelöst wird. Seit der Einführung der Abgasnorm Euro 1 vergehen im Durchschnitt bei der Typgenehmigung bis zur Einführung einer neuen Abgasnorm 34,6 Monate und bei der Erstzulassung bis zur Einführung einer neuen Abgasnorm bis zu 36 Monate. Demnach müsste im Jahr 2024 eine neue Abgasnorm, die Euro 6d ablöst, in Kraft treten.

6.3.3 Diskontierungsfaktor

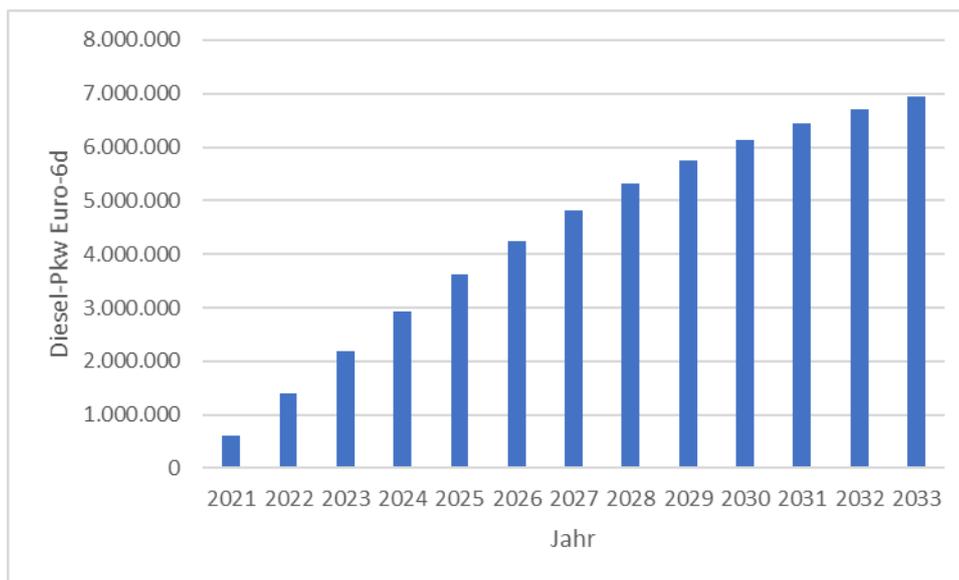
Der Diskontierungsfaktor ist der Zinssatz, mit dem künftige Kosten und Nutzen in Barwerte abgezinst werden. Für die Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) 2030 wurde ein einheitlicher Diskontierungszinssatz von 1,7 % p. a. vereinbart. Die Diskontierung wird vorgenommen aufgrund der Annahme, dass künftige Nutzen und Kosten aus heutiger Perspektive eine geringere Bedeutung haben als heute anfallende Nutzen und Kosten gleicher Höhe. Dazu wird im Methodenhandbuch zum BVWP 2030 folgende Vorgehensweise beschrieben [36]. „Durch Multiplikation der jährlichen Nutzen und Kosten mit den Diskontierungsfaktoren werden die Barwerte der Nutzen und Kosten der jeweiligen Jahre berechnet. Deren Summe wird in den Wirtschaftswissenschaften als Kapitalwert der Nutzen bzw. Kosten bezeichnet. In der Historie der Bundesverkehrswegeplanung werden diese Summen jedoch ebenfalls als Barwerte benannt. Aus Konsistenzgründen wird diese Bezeichnung hier ebenfalls verwendet.“ Der Diskontierungsfaktor wird in dieser Untersuchung angewendet, um die jährlichen Investitionskosten für die Messgeräte zu ermitteln.

6.3.4 Diesel-PKW Euro-6d: Bestandsentwicklung und jährliche Fahrleistung

Die Entwicklung der Pkw mit Euro 6d stellt das Mengengerüst dar, weil sich durch den Bestand ergibt, für wie viele Diesel-Pkw ab 2024 jährlich eine AU durchgeführt wird. Die Anzahl der untersuchten Diesel-Pkw pro AU determiniert sowohl die möglichen volkswirtschaftlichen Nutzen durch geringere NO_x-Emissionen als auch die jährlich aufzuwendenden gesamtwirtschaftlichen Kosten für die AU. Der Anteil der zur Personenbeförderung eingesetzten Fahrzeuge kann jedoch nicht bestimmt werden. Die Bestandsentwicklungen wurden vom UBA mit dem Prognosemodell (TREMODO) zur Verfügung gestellt. TREMODO wurde entwickelt, um die Entwicklung der Luftschadstoffemissionen und Klimagasemissio-

nen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland vorherzusagen. Das Modell wird u.a. vom Umweltbundesamt, den Bundesministerien, dem Verband der Automobilindustrie (VDA) und der Deutschen Bahn AG genutzt [37] und es können Trend- und Szenarien-Rechnungen für den Zeitraum von 1960 bis 2050 erstellt werden. Bei TREMOD handelt es sich um ein Umschichtungsmodell, das heißt die Pkw-Bestandentwicklung wird nicht basierend auf historischen Daten zeitreihenanalytisch fortgeschrieben, sondern mit Hilfe einer Simulationsrechnung ermittelt. Dadurch können ex-ante mögliche verkehrspolitische Maßnahmen und/oder gesellschaftliche Änderungen Szenarien ermittelt werden [38]. Insgesamt können Veränderungen schnell eingearbeitet werden. Die Entwicklung der Diesel-Pkw mit Euro 6d wurde im Dezember 2018 vom UBA übermittelt mit dem Hinweis, dass diese Daten zurzeit überarbeitet werden, da davon auszugehen ist, dass der „Dieselskandal“ das Kaufverhalten auch noch weit in die Zukunft beeinflussen wird. Die Überarbeitung wird voraussichtlich erst im Juli 2019 abgeschlossen sein. Weiterhin ist zu beachten, dass die Daten abweichend von der KBA-Systematik nicht als Bestände zum 1. Januar des jeweiligen Jahres zu verstehen sind, sondern Jahresmittelwerte repräsentieren. Neben dem Diesel-Pkw-Bestand ist für die Berechnung der Emissionswirkung die jährliche Fahrleistung eine entscheidende Größe. Im TREMOD-Modell wird derzeit für Diesel-Pkw eine Jahresfahrleistung in Höhe von 21.000 km pro Jahr (Bezugsjahr 2017) angesetzt. In Abbildung 100 wird die Entwicklung des Euro-6d-Diesel-Pkw-Bestandes für den Zeitraum von 2021 bis 2033 dargestellt.

Abbildung 100: Entwicklung des Euro-6d-Diesel-Pkw Bestandes im Zeitraum von 2021 bis 2033



Quelle: UBA 2018 [39]; eigene Darstellung.

Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2021 insgesamt 614.596 Diesel-Pkw, die die Euro-6d-Norm erfüllen, in Deutschland verkauft worden sind. Dabei wird unterstellt, dass es sich bei 0,74% der Diesel-Pkw um Fahrzeuge mit einem Plug-in-Hybrid handelt. Plug-in-Hybride sind Fahrzeuge, deren Akkumulator sowohl über den Verbrennungsmotor als auch über das Stromnetz geladen werden kann. Der Anteil der Plug-in-Hybride an der Diesel-Pkw-Euro-6d-Flotte steigt im geometrischen Mittel um 16% pro Jahr an, sodass im Jahr 2033 der Anteil der Plug-in-Hybride an der Diesel-Pkw-Flotte mit Euro-6d ca. 5% beträgt. Der gesamte Bestand an Diesel-Pkw mit Euro-6d wächst dabei im geometrischen Mittel um 14% pro Jahr an.

6.3.5 Monetäre Bewertung und Bewertungssatz für NO_x-Emissionen

Das Umweltbundesamt hat eine Methodenkonvention zur Schätzung der externen Umweltkosten entwickelt, die derzeit in der aktualisierten Version 3.0 seit Dezember 2018 vorliegt. Der aktuelle Kosten-

satz für die durchschnittlichen Umweltkosten der Luftverschmutzung durch NO_x-Emissionen im Verkehr liegt bei 18.500 Euro (in € 2016 / t Emission) [40]. Der Kostensatz berücksichtigt sowohl die Gesundheitsschäden als auch die nichtgesundheitlichen Schäden durch NO_x. Der Kostensatz nur für gesundheitliche Schäden von NO_x liegt bei 15.000 Euro (in € 2016 / t Emission). Dementsprechend liegt der Kostensatz für die nichtgesundheitlichen Schäden von NO_x bei 3.500 Euro (in € 2016 / t Emission).

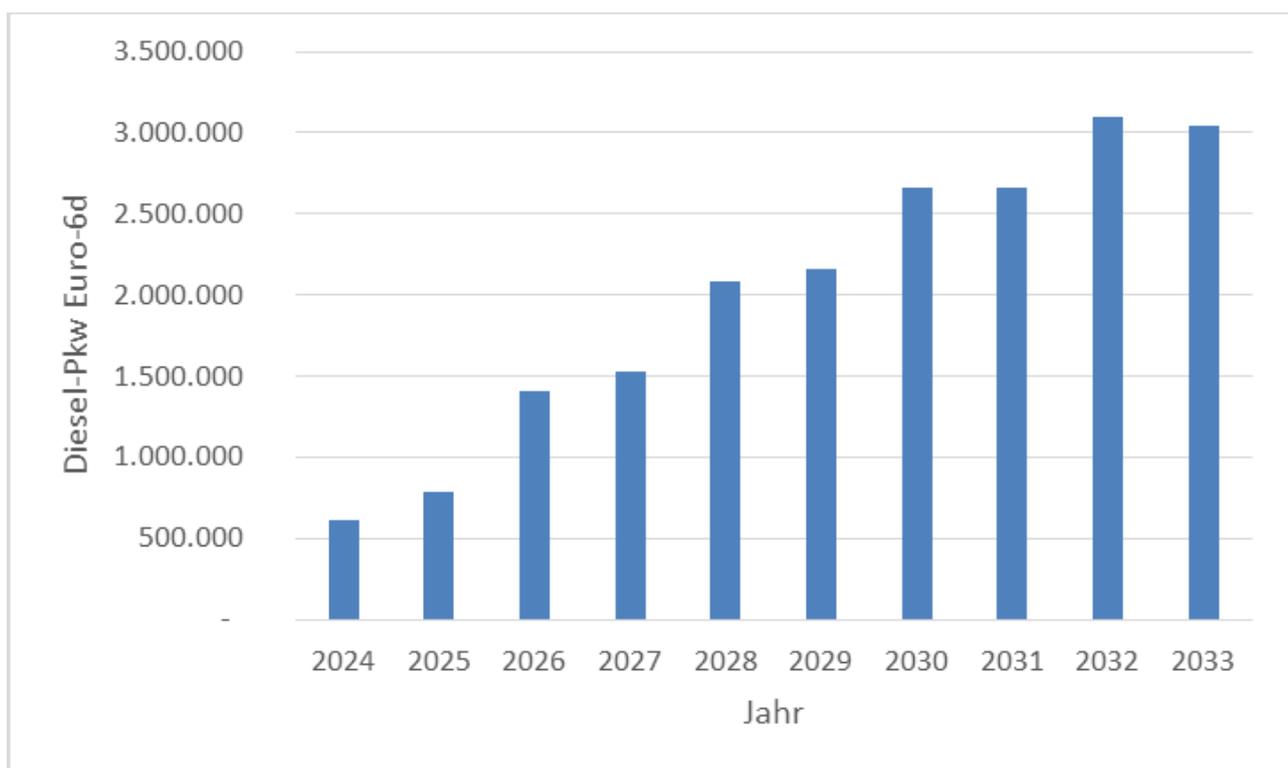
6.4 Ermittlung der Nutzen

Um den Nutzen der AU für Diesel-Pkw mit Euro-6d zu ermitteln, wird wie folgt vorgegangen:

- ▶ Es wird zunächst die Anzahl der Diesel-Pkw ermittelt, die ab dem Jahr 2024 der AU-Pflicht unterliegen. Diese Ermittlung erfolgt auf der Grundlage der Bestandsprognosen für die Diesel-Pkw mit Euro-6d.
- ▶ Für die Schadenswahrscheinlichkeit der Katalysatoren liegen naturgemäß keine Erfahrungswerte vor. Daher wird von einer Schadensquote in Höhe von 1% ausgegangen.
- ▶ Weiter muss ermittelt werden, wie viele Kilometer im Durchschnitt mit einer Fehlfunktion der Katalysatoren zurückgelegt werden.
- ▶ Weiterhin ist die Höhe der zusätzlichen Emissionen zu ermitteln, die aufgrund von Defekten der Katalysatoren, freigesetzt wurden. Dazu wird auf die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Emissionsmessungen zurückgegriffen.

Abbildung 101 zeigt die im Zeitraum von 2024 bis 2033 jährlich zu untersuchenden Diesel-Pkw Euro-6d. Die Entwicklung ergibt sich aus der vorliegenden Bestandsentwicklung und berücksichtigt den AU-Zyklus, wonach die AU nach der Erstzulassung nach 3 Jahren und dann alle zwei Jahre erfolgen muss.

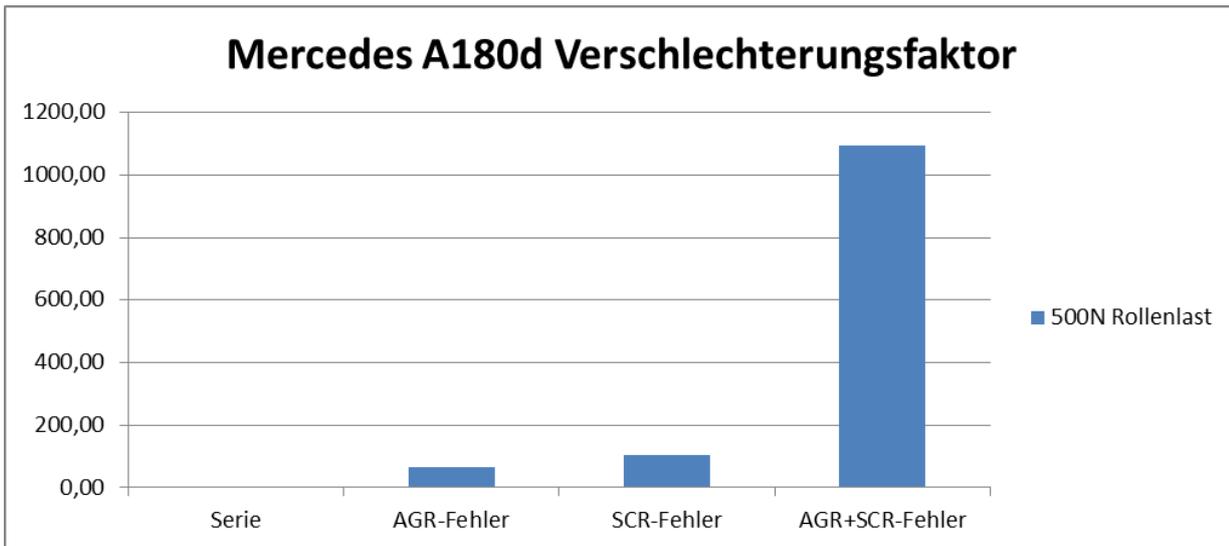
Abbildung 101: Anzahl der bei der AU untersuchten Diesel-Pkw mit Euro-6d pro Jahr für den Zeitraum von 2024 bis 2033



Quelle: Eigene Darstellung und eigene Berechnungen der Auftragnehmer [46]

Im Untersuchungszeitraum müssen über 20 Millionen Diesel-Pkw mit Euro-6d zur AU. Wenn im Rahmen der AU ein Schaden der Abgasnachbehandlungssysteme festgestellt wird, stellt sich die Frage, wie viele Kilometer dieser Pkw mit dem defekten Abgasnachbehandlungssystem zurückgelegt wird. Für die Nutzenbetrachtung muss unterschieden zwischen den Schadstoffemissionen, die aufgrund eines Defektes vor der AU entstanden sind und den Schadstoffemissionen, die infolge der AU vermieden werden können. Da keine empirischen Kenntnisse dazu vorliegen, wann das Schadensereignis vor der AU auftritt, wird eine Durchschnittsbetrachtung angestellt. Wenn ein Neufahrzeug nach drei Jahren AU-pflichtig ist, hat es insgesamt bei einer jährlichen Fahrleistung in Höhe von 21.000 km pro Jahr 63.000 km zurückgelegt. Da nicht bestimmbar ist, wann das Schadensereignis aufgetreten ist, wird davon ausgegangen, dass die Schäden der Abgasnachbehandlungssysteme über den Fahrzeitraum normalverteilt auftreten. Für Neufahrzeuge, die nach drei Jahren AU-pflichtig sind, bedeutet das, dass für den Fall eines defekten Abgasnachbehandlungssystems angenommen wird, dass mit dem defekten Abgasnachbehandlungssystem insgesamt 31.500 km zurückgelegt wurden. Für Pkw, die nur noch alle zwei Jahre AU-pflichtig sind, ergibt sich für den Fall eines schadhafte Abgasnachbehandlungssystems, dass davon ausgegangen wird, dass 21.000 km im defekten Zustand zurückgelegt wurden. Wenn bei der AU ein Defekt festgestellt wird, können nur künftige Schadstoffemissionen vermieden werden. Wenn es die AU nicht geben würde, dann würde der Defekt nur stochastisch entdeckt. Wenn der Defekt bei einer AU nicht entdeckt wird, dann kann er spätestens nach zwei Jahren – bei der nächsten AU – entdeckt werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass ein entdeckter Defekt dazu führt, dass über einen Zeitraum von zwei Jahren erhöhte NO_x -Emissionen vermieden werden können. Das entspricht einer gesamten Fahrleistung pro Pkw in Höhe von 42.000 km. Der tatsächliche volkswirtschaftliche Schaden infolge eines Defektes am Abgasnachbehandlungssystem setzt sich dann zusammen aus den vor der AU gefahrenen Kilometer mit einem Defekt und den noch zu fahrenden Kilometern bis zur nächsten AU. Also ergeben sich für ein Neufahrzeug im Falle eines Defektes insgesamt 73.500 Schadenskilometer. Für alle anderen Dieselfahrzeuge errechnen sich 63.000 Schadenskilometer. Demgegenüber besteht der Nutzen der AU nur darin, dass die künftigen Schadenskilometer nach der AU vermieden werden. Die Schadenskilometer, die durch die AU vermieden werden können, betragen pro Fahrzeug 42.000 km unter der Annahme, dass nach der ersten AU alle zwei Jahre eine weitere AU stattfindet. Diese Vorgehensweise unterschätzt tendenziell die Anzahl der gefahrenen Kilometer, weil unterstellt wird, dass die künftigen Schadstoffemissionen nur über einen Zeitraum von zwei Jahren entstehen. Wenn es keine AU gibt, dann ist eigentlich offen, wann der Defekt repariert wird, so dass es durchaus dazu kommen kann, dass erhöhte NO_x -Emissionen über einen längeren Zeitraum emittiert werden. Weiter muss ermittelt werden, um wie viel höher die NO_x -Emissionen infolge des Defektes waren. Der NO_x -Grenzwert für Diesel-Pkw liegt bei der Euro-6d-Norm bei 80 mg/km. Es wird angenommen, dass die Fahrzeughersteller tatsächlich Werte zwischen 20 und 60 mg/km erreichen, um einen Puffer gegenüber dem Grenzwert zu haben [45]. Die in die Untersuchung einbezogenen Prüffahrzeuge weisen bei dem ASM2050-Testverfahren aufgrund der simulierten Defekte Verschlechterungsfaktoren von 2 bis über 1000 auf. Dabei ist zu beachten, dass bei Euro-6dTemp-Fahrzeugen, die auch schon ein sehr geringes Emissionsniveau haben, bei Defekten hohe Verschlechterungsfaktoren auftreten. Hier gilt der Zusammenhang: je niedriger der durch den Katalysator erreichte NO_x -Emissionsausstoß ist, umso höher sind die NO_x -Emissionsmengen, die infolge eines Defektes der Abgasnachbehandlungssysteme freigesetzt werden. Abbildung 102 und Abbildung 103 geben einen Überblick über die gemessenen Verschlechterungsfaktoren jeweils für 500 N Rollenlast und 1000 N Rollenlast für AGR-Fehler, SCR-Fehler und AGR-SCR-Fehler.

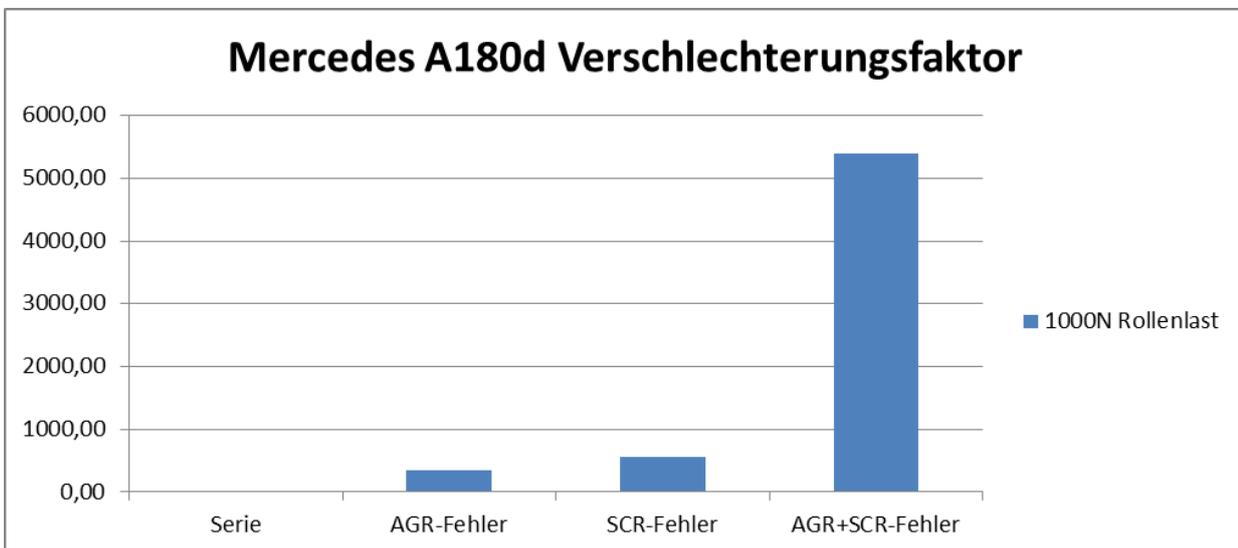
Abbildung 102: Übersicht über die Verschlechterungsfaktoren für AGR-Fehler, SCR-Fehler und AGR-SCR-Fehler bei 500 N Rollenast



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei 500 N Rollenlast ergibt sich für den AGR-Fehler ein Verschlechterungsfaktor in Höhe von 66. Der Verschlechterungsfaktor für den SCR-Fehler liegt bei 102. Für den Fall, dass sowohl AGR- als auch SCR-Fehler auftreten, liegt der Verschlechterungsfaktor bei 1.095.

Abbildung 103: Übersicht über die Verschlechterungsfaktoren für AGR-Fehler, SCR-Fehler und AGR-SCR-Fehler bei 1000 N Rollenast

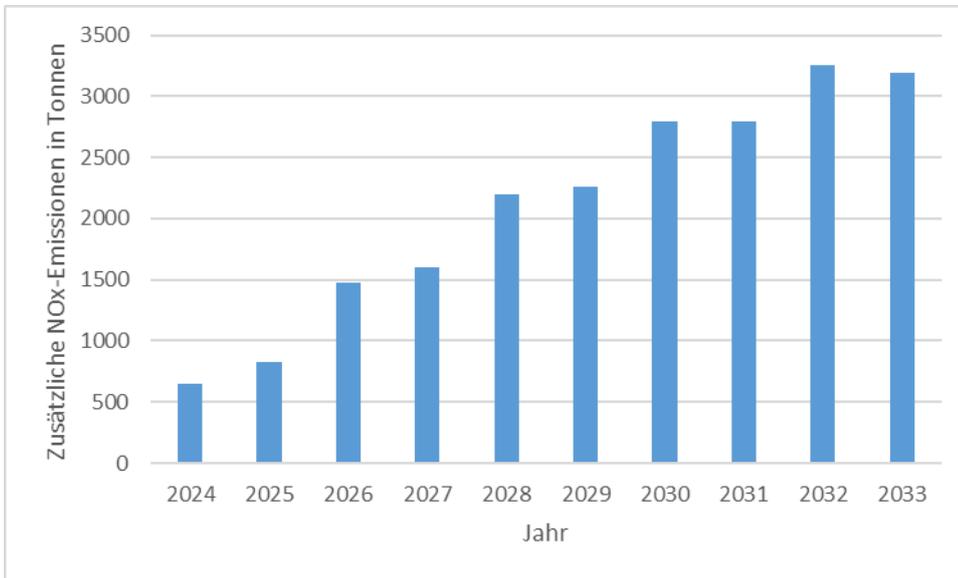


Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Bei einer Rollenlast in Höhe von 1000 N ist der Verschlechterungsfaktor bei einem AGR-Fehler 341, bei einem SCR-Fehler 563 und bei einem AGR-SCR-Fehler 5.385. Es stellt sich die grundsätzliche Frage, welcher Verschlechterungsfaktor für die Nutzen-Kosten-Analyse angesetzt werden soll, weil die Messuntersuchungen aufgrund der geringen Fahrzeugzahl natürlich nicht repräsentativ sind. Daher wird ein vorsichtiger Ansatz gewählt und lediglich ein Verschlechterungsfaktor in Höhe von 50 gewählt, der damit noch unter dem geringsten Verschlechterungsfaktor in Höhe von 66 liegt. Abbildung 104 gibt einen Überblick über die infolge der AU vermeidbaren NO_x-Emissionen für den Zeitraum von 2024 bis

2033. Insgesamt lassen sich über diesen Zeitraum infolge der AU bei einer Schadensquote von 1% 21.036 Tonnen NO_x-Emissionen vermeiden.

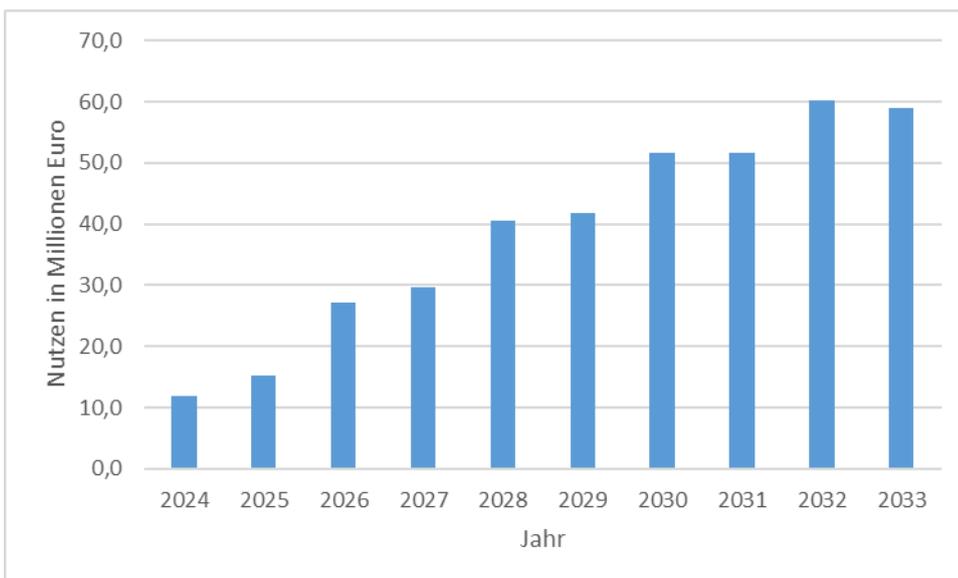
Abbildung 104: Höhe der durch die AU vermeidbaren NO_x-Emissionen in Tonnen bei einer Schadensquote von 1 v.H.



Quelle: Eigene Darstellung und eigene Berechnungen der Auftragnehmer [46]

Werden die eingesparten NO_x-Emissionen bewertet, ergibt sich ein volkswirtschaftlicher Nutzen infolge von vermiedenen NO_x-Emissionen über den gesamten Zeitraum von 2024 bis 2033 in Höhe von 389,2 Millionen Euro. Abbildung 105 gibt einen Überblick über den jährlichen Nutzenverlauf.

Abbildung 105: Jährlicher Nutzen eingesparter NO_x-Emissionen infolge der AU für Zeitraum von 2024 bis 2033 (in Millionen Euro)



Quelle: Eigene Darstellung und eigene Berechnungen der Auftragnehmer [46]

6.5 Ermittlungen der Kosten

Bei der Ermittlung der Kosten im Rahmen der Nutzen-Kosten-Analyse muss zunächst einmal klargestellt werden, dass die volkswirtschaftlichen Kosten sich von den betriebswirtschaftlichen Kosten in der Höhe unterscheiden, weil Steuern und Abgaben keinen Ressourcenverzehr darstellen. Steuern und Abgaben können dabei in ihrer Höhe beliebig sein, weil sie vom Staat festgesetzt werden. Insofern spielen sie für die Messung des tatsächlichen Ressourcenverbrauchs keine Rolle und müssen herausgerechnet werden. Der Ressourcenaufwand infolge der AU ergibt sich aus den Personalkosten, die entstehen, weil ein Prüflingenieur die Messungen durchführen muss, und aus den Investitionsaufwendungen für die eingesetzten Messgeräte. Diese beiden Kostenarten werden in den beiden folgenden Unterkapiteln erörtert und ihre monetäre Dimension bestimmt.

6.5.1 Zeitaufwand und Personalkosten

Um den Zeitaufwand monetär bewerten zu können, muss ein Netto-Stundenlohn für Prüflingenieure ermittelt werden. Ausgangspunkt für die Berechnung des Netto-Stundenlohns ist der Brutto-Stundenlohn für einen Kfz-Prüflingenieur, für den folgende Annahmen getroffen werden:

- ▶ Es wird ein Jahresbruttolohn in Höhe von 51.500 Euro angenommen [41].
- ▶ Die Urlaubstage betragen 29,8 [42].
- ▶ Die Arbeitszeit beträgt 8 Stunden pro Tag.

Damit errechnet sich ein Brutto-Stundenlohn in Höhe von 29 Euro pro Stunde. Im Rahmen der NKA muss dieser Brutto-Lohnsatz um den Anteil der Abgaben (Lohnsteuer, Sozialbeiträge Arbeitnehmer, abzgl. Transfers) bereinigt werden. Es wird von einem durchschnittlichen Abgabensatz in Höhe von 32% ausgegangen [43]. Der durchschnittliche Abgabensatz berücksichtigt die folgenden Einkommensgruppen:

- ▶ Alleinerziehend, 2 Kinder, 67% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Ehepaar, 2 Kinder, 100% u. 0% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Ehepaar, 2 Kinder 100% u. 33% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Ehepaar, 2 Kinder 100% u. 67% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Ehepaar, 0 Kinder 100% u. 33% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Single, 67% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Single, 100% des Durchschnittsbrutto,
- ▶ Single, 167% des Durchschnittsbrutto.

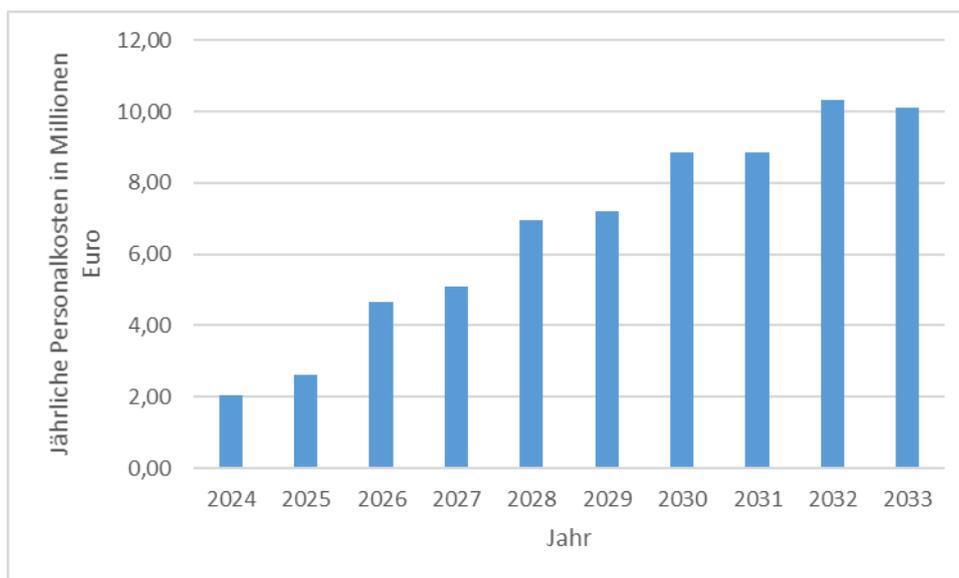
Der volkswirtschaftlich relevante Stundenlohn für einen Prüflingenieur beträgt dann pro Stunde etwa 20 Euro. Die Lohnkosten, die anteilig auf die AU entfallen, hängen vom Zeitaufwand für die AU-Prüfung (Prüfaufwand) ab. Tabelle 43 fasst die in dieser Untersuchung gemachten Erfahrungen für den Zeitaufwand der einzelnen Arbeitsschritte zusammen. Danach ergibt sich für einen Prüflingenieur ein Zeitaufwand in Höhe von 20 Minuten. Dieser Zeitaufwand spiegelt die Durchführung der AU mit den im Rahmen der Untersuchung zur Verfügung stehenden Messgeräten wider. Hierbei handelt es sich noch nicht um einen standardisierten Prozess. Insofern ist davon auszugehen, dass der Zeitablauf bei Einführung der AU deutlich geringer ausfallen wird. Nach Schätzung der technischen Überwachungsverfahren wird eine kombinierte AU aus Partikelmessung und NO_x-Messung nicht länger als 20 Minuten dauern. Daher wird für die NKA unterstellt, dass der Zeitaufwand für NO_x-Messungen nicht mehr als 10 Minuten betragen wird. Die volkswirtschaftlich relevanten Lohnkosten liegen folglich bei 3,33 Euro pro AU.

Tabelle 43: Geschätzter Zeitaufwand für die AU

	Vorgabe Zeit [min]	Inhalt der einzelnen Schritte
Fahrzeugvorbereitung	9	Fahrzeug auf Rollenprüfstand fahren (1) OBD-Stecker verbinden, Messsonde anbringen (1) Fahrzeug fixieren (Abschlepphaken zur Befestigung des Fixiergestänges suchen, Abdeckung entfernen oder alternative Befestigungspunkte finden) (5) Fahrzeug konditionieren (Betriebs- bzw. Prüftemperatur) (2)
3x ASM2050	6	Zyklus 3x durchfahren (6)
Rückrüstung	5	Messsonde/OBD-Stecker entfernen (1)
Zeit gesamt	Ca. 20	

In Abbildung 106 werden die jährlichen Personalkosten infolge der AU für den Untersuchungszeitraum von 2024 bis 2033 dargestellt. Die gesamten Personalkosten über den Untersuchungszeitraum betragen 66,8 Millionen Euro.

Abbildung 106: Jährliche Personalkosten in Millionen Euro



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

6.5.2 Kosten für die Messgeräte

Welche Messgeräte eingesetzt werden, hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab. So kommen sowohl mobile Messgeräte (Mini-PEMS) als auch Kombiprüfstände mit NO_x-Applikationen in Betracht. Nach derzeitigem Kenntnisstand wird es bei den Messgeräten keinen Preisunterschied geben. Der Markt für Messgeräte, mit denen die NO_x-Emissionen gemessen werden können, ist kein typischer Massenmarkt, so dass kaum Betriebsgrößenvorteile infolge einer Degression der Stückkosten erreicht werden können. Die Marktstruktur des Marktes für Abgasmessgeräte entspricht nicht einem kompetitiven Markt mit vielen Anbietern und vielen Nachfragern. Es handelt sich beim Markt für Abgasmessgeräte eher um ein sogenanntes bilaterales Oligopol, das bedeutet, dass wenige mittlere Anbieter wenigen mittleren Nachfragern gegenüberstehen. Anbieter und Nachfrager haben zusätzlich das Verhalten der Nachfrager beziehungsweise der Anbieter zu berücksichtigen, was dazu führen wird, dass keine Markseite eine dominante Position einnehmen wird, so dass hinsichtlich der Preissetzung davon auszugehen ist,

dass aufgrund der ausgewogenen Marktstruktur, die im Rahmen durchgeführte Kostenschätzung vertrauenswürdig ist. Dass es zu einer Preisgleichheit zwischen den Geräten für die beiden Messmethoden kommt, kann mit dem Gesetz von Jevons über die Unterschiedslosigkeit der Preise begründet werden. Der Einsatz des Messverfahrens hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab, so dass beide Messtechniken nicht in einer substitutiven Beziehung stehen, was dazu führen wird, dass sich über einen kurzen Anpassungsprozess ein einheitlicher Preis für beide Messmethoden einstellen wird. Im Rahmen des Projektteams wird geschätzt, dass die volkswirtschaftlichen relevanten Investitionskosten bei 15.000 Euro pro Messgerät liegen werden. Um die jährlichen Investitionskosten zu ermitteln, muss die Annuitätenmethode angewendet werden. Es werden folgenden Annahmen getroffen:

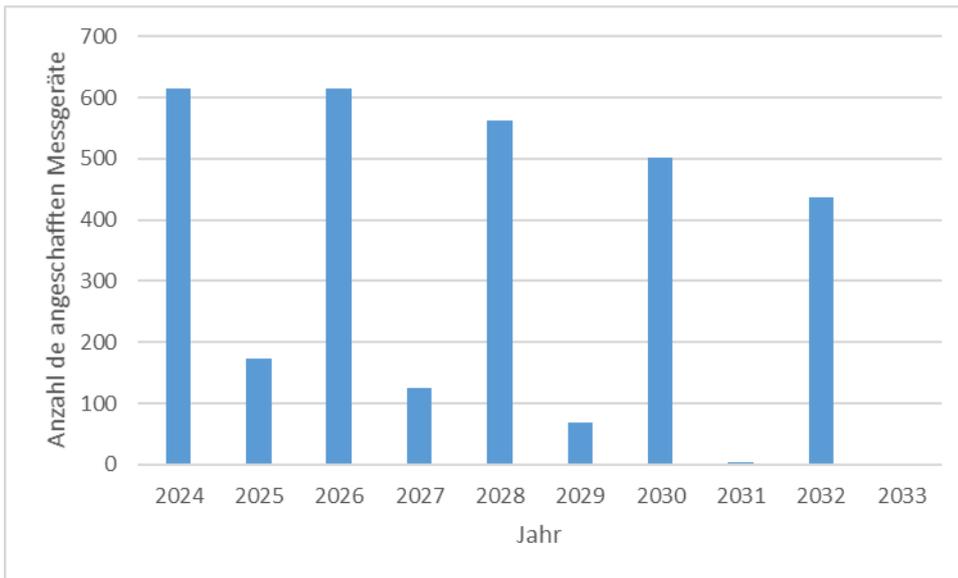
- ▶ Der Abschreibungszeitraum für die Messgeräte liegt bei 8 Jahren. Die tatsächliche Nutzungszeit beträgt demgegenüber 16 Jahre. Diese Werte orientieren an sich den bisherigen Erfahrungen der Technischen Überwachungsvereine (u.a. TÜV Süd, TÜV Rheinland, TÜV Nord) mit Abgasmessgeräten.
- ▶ Der Zinssatz liegt bei 1,7%.
- ▶ Die Investitionskosten werden auf das Jahr 2016 preisbereinigt, weil als Preisstand das Jahr 2016 gewählt.

Es errechnet sich ein Annuitätenfaktor in Höhe von 0,13475. Damit ergeben sich jährliche Investitionskosten in Höhe von 2.021 Euro. Diese Kosten gelten für das Jahr 2018 und müssen daher preisbereinigt für das Jahr 2016 ermittelt werden. Das geschieht mit Hilfe der Verbraucherpreisindexwerte für das Jahr 2017 (109,3) und 2016 (107,4) [44]. Es errechnen sich für den Preisstand 2016 jährliche Investitionskosten in Höhe von 1.984 Euro. Die Höhe der gesamten jährlichen Investitionskosten hängt allerdings davon ab, wie viele Messgeräte angeschafft werden müssen. Um die gesamten jährlichen Investitionskosten zu ermitteln, wird wie folgt vorgegangen:

- ▶ Es wird davon ausgegangen, dass entsprechend des jährlichen Bedarfs die Messgeräte angeschafft werden. Der jährliche Bedarf an Messgeräten ergibt sich aus der Anzahl der zu prüfenden Pkw. Insofern hat die Entwicklung des Diesel-Pkw-Bestandes einen Einfluss auf die Anzahl der benötigten Messgeräte.
- ▶ Ein Messgerät wird wirtschaftlich betrieben, wenn mit einem Gerät im Durchschnitt 1.000 Abgasmessungen pro Jahr durchgeführt werden. Dementsprechend kann ermittelt werden, wie viele Messgeräte pro Jahr angeschafft werden müssen, um sicherzustellen, dass eine ausreichende Angebotskapazität der AU-Nachfrage gegenübersteht.
- ▶ Die Messgeräte werden ab dem Anschaffungszeitpunkt über einen Zeitraum von 8 Jahren abgeschrieben.

Abbildung 107 gibt einen Überblick über die in den Untersuchungsjahren Anzahl der angeschafften Messgeräte. Über den gesamten Untersuchungszeitraum werden 3.098 Messgeräte angeschafft.

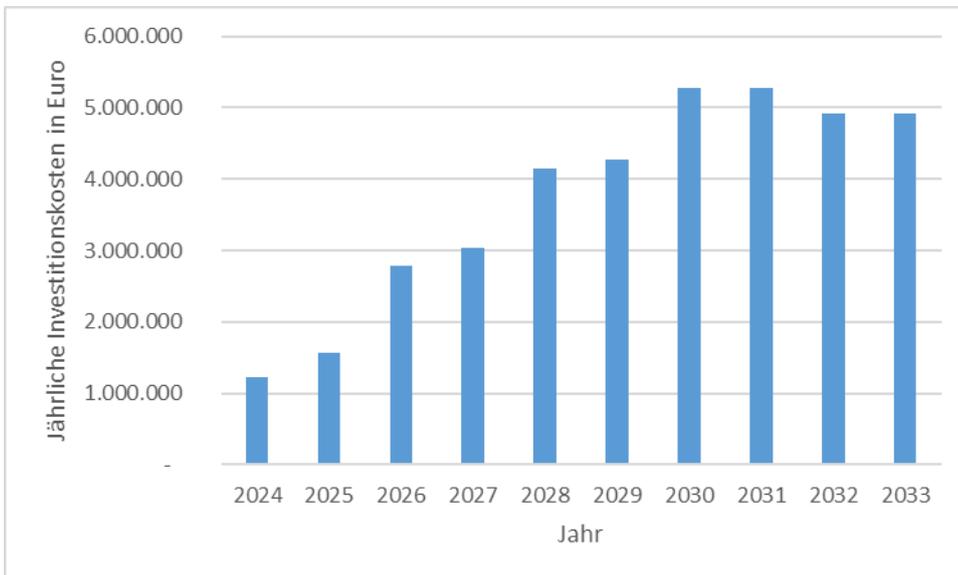
Abbildung 107: Anzahl der pro Jahr angeschafften Abgasmessgeräte für den Zeitraum von 2024 bis 2033



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Mit diesen Angaben ist es möglich, die jährlichen Investitionskosten zu ermitteln, die in Abbildung 108 dargestellt werden. Die gesamte Investitionssumme über den Untersuchungszeitraum beläuft sich auf 37,4 Millionen Euro.

Abbildung 108: Jährliche Investitionskosten in Euro für den Zeitraum von 2024 bis 2033



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

6.6 Nutzen-Kosten-Ergebnisse

Für die Berechnung der Nutzen und Kosten mussten einige Annahmen getroffen werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Annahmen nochmals gelistet, bevor die Nutzen-Kosten-Ergebnisse präsentiert werden. Auf der Nutzenseite wurden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der AU bei 1% der Diesel-Pkw ein AGR-Fehler oder SCR-Fehler oder ein AGR-SCR-Fehler entdeckt wird.

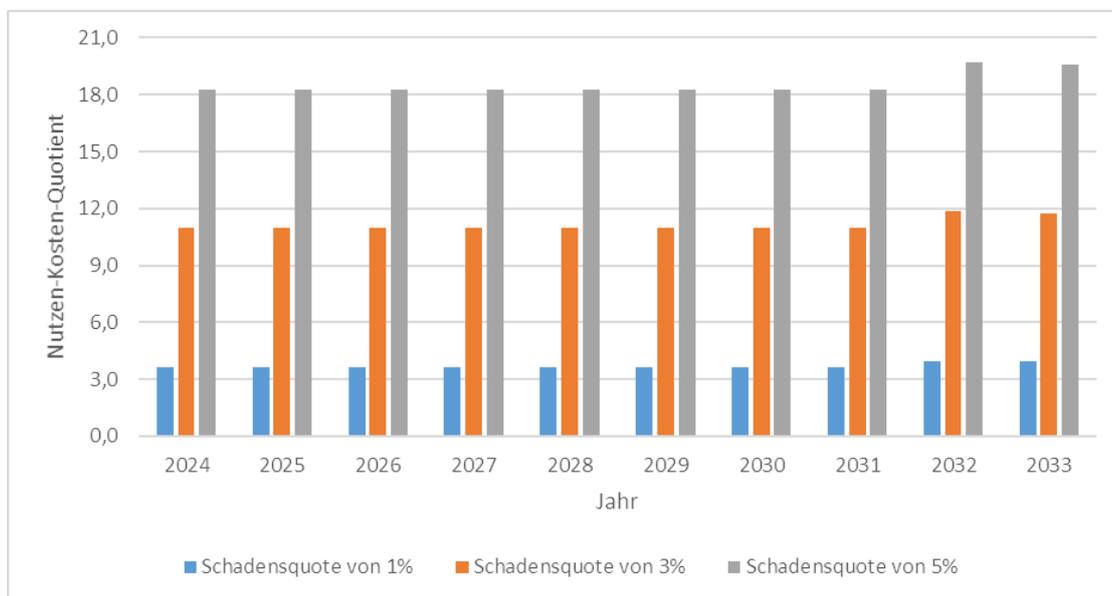
- ▶ Wenn dieser Fehler nicht entdeckt worden wäre, dann würde der Diesel-Pkw insgesamt zwei Jahre mit diesem Defekt weiterfahren.
- ▶ Durch den Defekt erhöhen sich die NO_x-Emissionen um das 50fache.
- ▶ Die NO_x-Emissionen ohne Defekt liegen für Euro-6d Diesel-Pkw bei 50 mg/km.

Auf der Kostenseite wurden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Der Zeitaufwand für die Durchführung der AU beträgt 10 Minuten.
- ▶ Am Markt wird sich ein einheitlicher Preis für die Mobilien Messgeräte (Mini-PEMS) und die Kombiprüfstände mit NO_x-Applikationen durchsetzen. Die einheitlichen volkswirtschaftlichen Kosten der Messgeräte belaufen sich auf 15.000 Euro.
- ▶ Die optimale wirtschaftliche Auslastung der Messgeräte/Prüfstände liegt bei 1.000 Untersuchungen pro Gerät.
- ▶ Die Messgeräte/Prüfstände werden sukzessive angeschafft, so dass der jährliche AU-Aufwand immer bewältigt werden kann.

Abbildung 109 zeigt die Entwicklung der zu erwartenden jährlichen Nutzen-Kosten-Verhältnisse. Das durchschnittliche Nutzen-Kosten-Verhältnis beträgt 3,7. Der Median liegt ebenfalls bei 3,7. Die Spannweite der Nutzen-Kosten-Verhältnisse liegt zwischen 3,7 und 3,9. Die Nutzen-Kosten-Verhältnisse liegen im Zeitraum von 2024 bis 2032 konstant bei 3,7, was darin begründet ist, dass zwischen Personalkosten, Investitionskosten und Anzahl der defekten Diesel-Pkw eine proportionale Beziehung besteht. Ab 2032 entkoppeln sich die Investitionskosten, weil die Anzahl der Geräte nicht mehr so stark aufgebaut werden muss, so dass sich das Nutzen-Kosten-Verhältnis erhöht. Im Jahr 2035 wird ein Nutzen-Kosten-Verhältnis in Höhe von 4,2 erreicht. Dieses Jahr liegt allerdings außerhalb des festgelegten Untersuchungszeitraums.

Abbildung 109: Jährliche Nutzen-Kosten-Quotienten für den Untersuchungszeitraum von 2024 bis 2033



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Eine Annahme, die kritisch hinterfragt werden kann, ist die Annahme, dass der Diesel-Pkw mit einem Abgasnachbehandlungssystemdefekt zwei Jahre lang mit diesem Defekt weiterfahren würde, was einer Gesamtfahrleistung in Höhe von 42.000 km entspricht. Ob weniger oder mehr Kilometer mit einem Defekt gefahren werden, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht mit Hilfe von empirischen Werten geklärt, weil keine weitergehenden Erkenntnisse vorliegen. Wird davon ausgegangen, dass der Defekt

vom Fahrer im Rahmen einer fahrzeugüblichen Inspektion entdeckt wird, wird in der Sensitivitätsrechnung unterstellt, dass nur 21.000 km mit dem Defekt gefahren werden. In diesem Fall errechnet sich ein durchschnittlicher Nutzen-Kosten-Quotient in Höhe von 1,9. Der Median liegt bei 1,8. Selbst dieses NKV rechtfertigt aus volkswirtschaftlicher Sicht die Einführung einer AU. Wird nun die Reaktionselastizität (RE) des NKV in Bezug auf die mit einem Defekt zurückgelegte Pkw-Fahrleistung (DFL) berechnet, ergibt sich ein Elastizitätswert in Höhe von 0,973.

Wenn sich die DFL um 10 % erhöht, steigt das NKV um +9,7 %, also leicht unterproportional, an. Wenn die DFL um 10 % sinkt, dann sinkt das NKV um 9,7 %. Es gilt:

$$RE_{DFL} = \frac{\partial NKV}{\partial DFL} \frac{DFL}{NKV}$$

Wenn sich der Zeitaufwand (ZA) von 10 Minuten auf 20 Minuten verdoppelt, ergibt sich ein durchschnittliches NKV in Höhe von 2,3. Für die Reaktionselastizität des NKV in Bezug auf den Zeitaufwand (ZA) gilt:

$$RE_{ZA} = \frac{\partial NKV}{\partial ZA} \frac{ZA}{NKV}$$

Die Reaktionselastizität des NKV in Bezug auf ZA hat einen Wert in Höhe von 0,38. Wenn sich der Zeitaufwand um 10 % erhöht, sinkt das NKV um 3,8%. Wenn der Zeitaufwand um 10 % sinkt, steigt das NKV um 3,8 %. Als nächstes wird die Reaktionselastizität des NKV in Bezug auf die Veränderung der Investitionskosten (IK) untersucht. Es gilt:

$$RE_{IK} = \frac{\partial NKV}{\partial IK} \frac{IK}{NKV}$$

Es errechnet sich ein Elastizitätswert in Höhe von 0,27. Wenn die Investitionskosten um 10 % steigen, sinkt das NKV um 2,7 %. Sinken die Investitionskosten um 10 %, steigt das NKV um 2,7 %. Als letztes werden die Veränderungen der Personalkosten auf die Höhe des NKV untersucht. Für die Reaktionselastizität des NKV in Bezug auf die Personalkosten (PK) gilt:

$$RE_{PK} = \frac{\partial NKV}{\partial PK} \frac{PK}{NKV}$$

Die Reaktionselastizität für Veränderung des NKV ausgelöst durch Veränderungen der Personalkosten ergibt einen Wert in Höhe von 0,38. Wenn die Personalkosten um 10 % steigen, sinkt das NKV um 3,8 %. Gelingt es die Personalkosten zu senken, indem beispielsweise die AU nicht durch Prüfeningenieure, sondern durch Kfz-Mechaniker durchgeführt wird, steigt bei einer 10 % Senkung der Personalkosten das NKV um 3,8 %. Den stärksten Einfluss auf das NKV hat eine Veränderung der gefahrenen Kilometer, die mit einem Defekt zurückgelegt werden. Veränderung des Zeitaufwandes und der Personalkosten für die Durchführung der AU haben den gleichen Elastizitätswert, wirken aber nur stark unterproportional auf das NKV. Den geringsten Einfluss mit einem Elastizitätswert in Höhe von 0,27 haben die volkswirtschaftlichen Investitionskosten für die Messgeräte.

6.7 Limitationen

Zunächst einmal muss festgehalten werden, dass die Untersuchung sowohl theoretisches und empirisches Neuland betritt, weil nur wenige Erfahrungswerte vorliegen. Im Rahmen der ökonomischen Untersuchung wurden die Annahmen vorsichtig ausgewählt und hinsichtlich ihrer Plausibilität begründet. Eine der wesentlichen Limitationen ist die Entwicklung der Diesel-Pkw mit Euro-6d. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die bisherigen Abschätzungen des Diesel-Pkw-Bestandes mit dem TREMOD-Modell aufgrund der aktuellen Entwicklungen überarbeitet werden. Die Ergebnisse der Überarbeitung liegen allerdings noch nicht vor und konnten daher nicht berücksichtigt werden. Eine Sensitivitätsüberprüfung, wie sich das NKV infolge von Änderungen des Diesel-Bestandes verändert, ist nicht ohne weiteres möglich. Hier müsste eine tiefergehende Analyse durchgeführt werden, um

grundsätzlich zu prüfen, ob der Markt stabil ist oder so instabil wird, dass möglicherweise ein Marktzusammenbruch droht.

6.8 Abschätzung des künftigen Preises für die AU von Diesel-Fahrzeugen

Es wurde beschlossen, in Deutschland ab 2021 für Diesel-Fahrzeuge ab einer noch festzulegenden Schadstoffklasse anstelle der heutigen Trübungsmessung die Partikelanzahlmessung (PN-Messung) einzuführen.

Gegenüber der Trübungsmessung, für die i. d. R. drei aufeinanderfolgende Gasstöße bis zur Motor-Abregeldrehzahl erforderlich sind, ist nach aktuellem Kenntnisstand eine Messung bei Leerlaufdrehzahl ausreichend. Dabei sollen nach einer 30 s dauernden Stabilisierungsphase drei Messungen à 35 s (60 s) erfolgen, daraus der Mittelwert gebildet und abschließend über 35 s zur Plausibilisierung die Anzahl der Partikel in der Umgebung gemessen werden. Es liegt nahe, künftig beide Messverfahren, die PN-Messung und die NOX-Messung in einer AU zu verbinden.

Da für die Kalkulation eines künftigen Preises eine Vielzahl von Annahmen getroffen werden müssen, kann es sich bei dieser Betrachtung lediglich um eine grobe Schätzung handeln. Im Wesentlichen müssen zusätzliche Gerätekosten bzw. Kosten für größeren Zeitaufwand berücksichtigt werden. Wie in der Nutzen/Kosten-Analyse aufgezeigt, werden zusätzliche Gerätekosten von 15.000 € sowie ein Nutzungszeitraum von 8 Jahren angenommen. Außerdem wird von durchschnittlich ca. 1000 AU pro Gerät und Jahr ausgegangen. Daraus ergeben sich zusätzliche kalkulatorische Gerätekosten von ca. 1,90 € (netto) pro AU.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchung wird außerdem angenommen, dass eine Geschwindigkeit von 20 km/h auf dem Prüfstand bzw. für die kurze Testfahrt ausreicht. In diesem niedrigen Geschwindigkeitsbereich ist bei der Prüfstandsmessung ein Verzurren des Fahrzeugs nicht erforderlich.

Vergleicht man den Zeitaufwand für eine heutige Trübungsmessung mit dem einer zukünftig gemeinsam durchgeführten PN- und NOX-Messung, ergibt sich ein zusätzlicher Zeitbedarf von ca. 3 Minuten (vgl. Tabelle 44).

Tabelle 44: Geschätzter Zeitaufwand einer gemeinsam durchgeführten PN- und NOX-Messung

Arbeitsschritt	Trübungsmessung	PN-Messung	NOx-Messung
Erfassung FZ-Daten	2 min		2 min
Fahrzeugvorbereitung/ Konditionierung	4 min		4 min
Messung	7 min	4 min	6 min
Abschluss/ Auswertung	2 min		2 min
Zeitaufwand gesamt	15 min		18 min

Setzt man einen durchschnittlichen Preis für die AU von aktuell ca. 44,50 € (netto) voraus, ergeben sich für den zusätzlichen Zeitbedarf von ca. 3 Minuten kalkulatorische Kosten in Höhe von ca. 8,90 € (netto).

Zusammen mit den zusätzlichen Gerätekosten von ca. 1,90 € würde sich der Preis für eine zukünftige AU, bestehend aus PN- und NOX-Messung, um ca. 10,80 € (netto) bzw. 12,80 € (inkl. MWSt) erhöhen – und damit zu einer jährlichen Mehrbelastung für den Fahrzeughalter von ca. 6,40 € (inkl. MWSt) führen.

7 Revisionsvorschlag für die Anpassung der Richtlinie 2014/45/EU und der AU-Richtlinie

Die Richtlinie 2014/45/EU bildet für alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union den Rahmen für die Durchführung der periodisch technischen Überwachung von Kraftfahrzeugen. Der Erwägungsgrund 4 der Richtlinie räumt den Mitgliedstaaten ein, strengere Prüfkriterien als in dieser Richtlinie gefordert festzulegen. In den Erwägungsgründen 7 bis 9 stellt der europäische Richtliniengeber fest, dass Fahrzeuge mit schlecht funktionierenden Emissionsminderungssystemen in höherem Maße zur Umweltverschmutzung beitragen als angemessen gewartete Fahrzeuge. Demnach trägt ein System regelmäßiger technischer Überwachung zu einem besseren Umweltschutz durch Verringerung der durchschnittlichen Fahrzeugemissionen bei. Darüber hinaus sollten die Mitgliedstaaten geeignete Maßnahmen in Betracht ziehen, um unsachgemäßen Manipulationen oder Eingriffen an Fahrzeugteilen und Komponenten vorzubeugen, die die erforderlichen sicherheits- und umwelttechnischen Eigenschaften des Fahrzeugs beeinträchtigen könnten. Der regelmäßigen technischen Überwachung wird hier in diesem Zusammenhang besondere Bedeutung beigemessen. Der Erwägungsgrund 9 der Richtlinie 2014/45/EU ist quasi der ursächliche Auftrag für den hier vorliegenden Forschungsbericht. Bereits zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der Richtlinie wurde konstatiert, dass zwar zum einen in den letzten 20 Jahren die Anforderungen für die Typgenehmigung im Bereich der Fahrzeugemissionen kontinuierlich verschärft wurden, aber sich die Luftqualität, trotz verschärfter Emissionsnormen für Fahrzeuge, vor allem im Hinblick auf Stickstoffoxide (NO_x) und Feinstaub nicht in dem prognostizierten Maße verbesserte. „Um Lösungen für die Zukunft zu erarbeiten, sollten Möglichkeiten einer Verbesserung der Prüfzyklen zur Simulation realer Betriebsbedingungen umfassend geprüft und Testmethoden für die Messung der NO_x-Werte sowie Grenzwerte für den NO_x-Ausstoß festgelegt werden“. Vor diesem Hintergrund wird in den nachfolgenden Übersichten, basierend auf den Erkenntnissen aus den durchgeführten Messungen und daraus abgeleiteten Prüfmethoden, ein Vorschlag für die Erweiterung der NO_x-Messung im Rahmen der periodischen Fahrzeugüberwachung gemacht. Hierzu müssten in der Richtlinie 2014/45/EU die „Inhalte und Methoden der Prüfung sowie Bewertung von Mängeln an Fahrzeugen“ unter Ziffer 8.2 „Auspuffemissionen“ wie folgt ergänzt werden:

Tabelle 45: Ergänzung der Richtlinie 2014/45/EU

Position	Methode	Grund der Mängel	Bewertung						
8.2.2.3 NO _x Messung	<p>Bei Fahrzeugen ab Euro 6d-TEMP Messung der NO_x Konzentration unter Last mit einer Kraft von mind. 500 N und einer Geschwindigkeit von 20 km/h.</p> <p>Alternativ kann auch eine Kurzfahrt mit Beschleunigung auf 20 km/h und anschließendem abbremsen auf 0 km/h (1. Gang) ausgeführt werden.</p> <p>1. Vorkonditionierung des Fahrzeugs: Der Motor hat die volle Betriebstemperatur von mind. 80 °C erreicht. Der SCR-Kat hat die Betriebstemperatur</p>	<p>NO_x Konzentration übersteigt den vom Hersteller angegebenen Wert.</p> <p>Falls dieser Wert nicht anwendbar/verfügbar ist: NO_x Konzentration übersteigt den Wert von (40) ppm</p>	<table border="1"> <tr> <td>gering</td> <td>erhebl.</td> <td>gefährl.</td> </tr> <tr> <td></td> <td>X</td> <td></td> </tr> </table>	gering	erhebl.	gefährl.		X	
gering	erhebl.	gefährl.							
	X								

Position	Methode	Grund der Mängel	Bewertung
	<p>nach Herstellervorgaben erreicht. NO_x Prüfbereitschaft gegeben (EOBD Mode 1 - Readinesscode). Messung ist unmittelbar und unvermittelt auszuführen (Abkühlung vermeiden)</p> <p>2. Prüfverfahren: Messung der NO_x Konzentration über ein geeignetes Messgerät unter Last mit einer Kraft von mind. 500 N und 20 km/h (0-20 km/h in 15 s, 25 s konstant, 20 km/h auf 0 in 15 s)</p> <p>oder alternativ Kurzfahrt mit Beschleunigung von 0 auf 20 km/h (ca. 3 s konstant 20 km/h) und abbremsen auf 0 km/h (entspricht einer Messstrecke von ca. 40m)</p> <p>Die Prüfung ist nur dann als nicht bestanden zu werten, wenn das arithmetische Mittel von mindestens drei Messzyklen den Grenzwert überschreitet. Bei der Berechnung dieses Wertes werden Messungen, die erheblich (> 30 %) vom gemittelten Messwert abweichen, oder das Ergebnis anderer statistischer Berechnungen, die die Streuung der Messungen berücksichtigen, außer Acht gelassen.</p> <p>Die Mitgliedstaaten können die Zahl der durchzuführenden Prüfzyklen begrenzen. Damit keine unnötigen Prüfungen durchgeführt werden, können die Mitgliedstaaten die Prüfung eines Fahrzeugs als bestanden werten, dessen Messwerte nach weniger als drei Messzyklen deutlich unter dem Grenzwert liegen (< 30 %).</p>		

Für die Anpassung bzw. Ergänzung der nationalen Vorschriften bedarf es der Aufnahme eines möglichen NO_x-Messverfahrens in die einschlägigen Vorschriften der Straßenverkehrszulassungs-Verordnung (StVZO) bzw. künftig der Fahrzeuguntersuchungsverordnung (FUV) und der AU-Richtlinie. StVZO und FUV befinden sich, aufgrund der Herauslösung der Anforderungen für die Hauptuntersuchung aus der StVZO, in der kompletten Überarbeitung bzw. Neufassung, so dass für diese Regelwerke derzeit kein Anpassungs- bzw. Ergänzungsvorschlag gemacht werden kann. Für die Anpassung/Ergänzung der AU-Richtlinie wird nachfolgend ein Anpassungsvorschlag für die NO_x-Messung gemacht. Nach dem Punkt 3.5.4.6 ist in der AU-Richtlinie die Funktionsprüfung Abgas mit NO_x Messung einzufügen:

Funktionsprüfung NO_x Messung (für Fahrzeuge ab Euro 6dtemp)

- ▶ Fahrzeugkonditionierung:
 1. Kühlmitteltemperatur mind. 80 °C
 2. NO_x Prüfbereitschaft durch Auslesen des Readinesscodes feststellen (NO_x unterstützt und ausgeführt)
 3. NO_x-Messung unmittelbar nach der Konditionierung ausführen, Abkühlung vermeiden, unvermittelt ohne Motor abschalten auf den Prüfstand fahren bzw. Kurzfahrt ausführen
- ▶ Fahrzeug auf Prüfstand bringen und Prüfzyklus ausführen (mit 500 N Last, 20 km/h)
 1. Fahrzeug von 0 auf 20 km/h beschleunigen (innerhalb 15 s)
 2. 20 km/h für 25 s konstant halten
 3. Danach verzögern von 20 km/h auf 0 km/h innerhalb 15 s
 4. 15 s abwarten
- ▶ Bewertung Prüfzyklus Lastrolle
 1. 5 s nach Erreichen der Prüfgeschwindigkeit von 20 km/h NO_x Messung starten und Mittelwert über 20 s bilden
- ▶ Steht kein Prüfstand zur Verfügung kann die Messung auch mit Hilfe einer Kurzfahrt ausgeführt werden
 1. Fahrzeug vom Stand aus auf 20 km/h beschleunigen (in max. 5 Sekunden)
 2. Geschwindigkeit ca. 3 s auf 20 km/h halten
 3. Danach Fahrzeug abbremsen bis auf 0 km/h
- ▶ Bewertung Prüfzyklus Kurzfahrt
 1. NO_x Messung unmittelbar nach der Beschleunigung des Fahrzeugs starten und Mittelwert über den gesamten Bewegungszyklus des Fahrzeuges bilden
- ▶ Prüfzyklus so lange wiederholen bis die letzten drei Prüfzyklen innerhalb einer Bandbreite von +/- 20 % (oder festen Wert von z.B. 10 ppm) des Mittelwertes aus drei Prüfzyklen liegen
- ▶ Bewertung Gesamtergebnis
 1. Mittelwert aus den drei letzten Prüfzyklen bilden
 2. Ergebnis < Herstellerwert i.O.
 3. Ergebnis > Herstellerwert n.i.O
 4. Falls Herstellerwert nicht verfügbar Grenzwert NO_x 40 ppm.

Im Rahmen der Abgastypprüfung werden neben den Messungen der Abgasemissionen auf dem Rollenprüfstand (Prüfung Typ 1, Auspuffemissionen nach Kaltstart) und im realen Straßenverkehr (Prüfung Typ 1a, RDE) auch die Leerlaufemissionen ermittelt (Typ 2 Prüfung). Die Typ 2 Prüfung wird direkt im Anschluss an die Typ 1 Prüfung durchgeführt und dient ebenfalls der Ermittlung von Daten für die technische Überwachung. Für Fahrzeuge mit Fremdzündungsmotor werden die CO-Konzentrationen sowie der Lambda-Wert im Leerlauf und bei einer erhöhten Leerlaufdrehzahl ermittelt. Für Fahrzeuge mit Kompressionszündungsmotor wird die Typ 2 Prüfung bisher nicht angewendet. Für eine Bewertung der NO_x-Konzentrationen von Dieselfahrzeugen im Rahmen der periodischen

AU wäre eine Ermittlung geeigneter Vergleichsdaten bereits bei der Typprüfung sehr hilfreich. Eine Definition der entsprechenden Typ 2 Prüfung einschließlich der Ermittlung von Daten für die Technische Überwachung müsste in die europäischen Vorschriften für die Abgastypprüfung aufgenommen werden. Neben den gemessenen NO_x-Konzentrationen sollten auch die bei der Technischen Überwachung zu berücksichtigenden Randbedingungen wie Motortemperatur und Temperatur am SCR-Katalysator ermittelt werden. So könnten für die Bewertung der NO_x-Konzentrationen von Fahrzeugen mit Kompressionszündungsmotoren bei der periodischen AU typspezifische Grenzwerte herangezogen werden. Nur für den Fall, dass derartige spezifische Werte nicht vorliegen, ist ein noch zu definierender genereller Grenzwert heranzuziehen.

Des Weiteren sind in der aktuellen OBD Norm SAE J 1979 viele Einträge (Daten) vorgesehen, die bei ausreichender und vollumfänglicher Bedatung die AU wesentlich effizienter und zielgerichteter durchführen ließen. So wäre es extrem wichtig, dass folgende PIDs zwingend bedatet wären:

PID 01 Readinesscodes (non continuous)

bit 1 (NO_x), **bit 5** (Exhaust gas sensor monitoring), **bit 6** (PM filter monitoring) und **bit 7** (EGR system monitoring)

PID 2C Commanded EGR (EGR rate)

PID 2D EGR Error

PID 78/79 Exhaust Gas Temperature (EGT) Bank 1/2

PID 7A/7B Diesel Particulate Filter Pressure (DPF) Bank 1/2

PID 7C Diesel Particulate Filter Temperature (DPF)

PID 7D NO_x NTE control area status

PID 7E PM NTE control area status

PID 83 NO_x Sensor (supported and concentration)

PID 85 NO_x Control System (Information about Reagent)

PID 86 Particulate Matter Sensor (PM)

PID 88 SCR inducement system actual state

PID 8B Diesel Aftertreatment System

PID 8F Particulate Matter Sensor Output

8 Zusammenfassung

Die periodische AU leistet einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität. Durch die AU können hoch emittierende Fahrzeuge detektiert und zur Reparatur bzw. Stilllegung gezwungen werden. Aufgrund neuartiger Abgasreinigungssysteme muss die AU allerdings an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden, um ihre Qualität und Aussagekraft zu optimieren. In der Vergangenheit sind insbesondere die in den Städten gemessenen NO_2 -Immissionswerte nicht in dem gleichen Maße gesunken, wie es durch die Herabsetzung der NO_x -Grenzwerte bei der Typgenehmigung neuer Fahrzeuge zu erwarten gewesen wäre. Daraufhin wurde im ersten Schritt ein anspruchsvollerer Fahrzyklus (WLTC) sowie eine realitätsnahe RDE-Straßenmessfahrt in die Typgenehmigung integriert. Die Abgasnorm Euro 6d-TEMP sieht einen Übereinstimmungsfaktor von 2,1 für die Messung im realen Fahrbetrieb vor. Um die Grenzwerte der Euro 6d-TEMP Norm einzuhalten, verfügen die Fahrzeuge über eine aufwändige Abgasnachbehandlungstechnik, welche sich aus Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, SCR-Katalysator, Dieselpartikelfilter und ggf. weiteren Systemen zusammensetzt. Eine Aussage über die Funktion dieser Systeme ist mit der aktuellen AU kaum möglich. Es wurde deshalb untersucht, ob eine Messung der Stickstoffoxidemissionen eine differenzierte Aussage über den Zustand der Abgasnachbehandlungssysteme geben kann, welche Messmethoden sich dazu eignen und welche Randbedingungen beachtet werden müssen. Stickstoffoxide entstehen vermehrt beim dieselmotorischen Verbrennungsprozess aufgrund des Sauerstoffüberschusses in Verbindung mit einer hohen Verbrennungstemperatur. Da sich bei einer erhöhten Motorlast ein erhöhter Brennraumdruck und somit eine erhöhte Brennraumtemperatur einstellt, entsteht ein direkter Zusammenhang zwischen Motorlast und Stickstoffoxidemissionen im Rohabgas. Darüber hinaus haben Untersuchungen ergeben, dass verschiedene Abgasnachbehandlungskonzepte unterschiedlich sensibel auf Temperaturänderungen (Umgebungstemperatur/Kaltstart/Warmstart) reagieren.

Es existieren bereits Stickstoffoxidemessverfahren, welche zum Teil in anderen Ländern bei der periodischen AU eingesetzt werden. Sie unterscheiden sich darin, ob auf den Motor eine zusätzliche Last (Prüfstand/Straßenfahrt) aufgebracht wird oder nur gegen die rotatorische Masse des Motors im Leerlauf beschleunigt wird. Eine Bewertung der Verfahren hat gezeigt, dass eine qualitative Aussage über die Funktionsfähigkeit aller emissionsmindernden Systeme nur gewährleistet werden kann, wenn auf den Motor eine externe Last aufgebracht wird. Dies liegt zum einen an dem oben erwähnten Zusammenhang zwischen Motorlast und NO_x -Rohemissionen – und zum anderen daran, dass Abgasnachbehandlungssysteme, wie SCR-Katalysatoren, im Leerlauf häufig nicht im temperaturabhängigen Arbeitsfenster liegen und somit auch nicht im Hinblick auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft werden können. Bei den Messungen dieses Projektes wurden an drei Versuchsfahrzeugen das AGR- und das SCR-System mechanisch manipuliert. Der Verbau einer Blende im AGR-System könnte vorsätzlich durch den Fahrzeughalter erfolgen, um die Abgasrückführung zu unterbinden. Der weitaus häufiger auftretende Fall ist jedoch, dass das AGR-Ventil durch Rußpartikel aus dem Abgas verkocht. Dieser Ausfall durch Verschleiß wird hier in seiner höchsten Stufe simuliert. Das mechanische Trennen der Verbindung vom Harnstoffeinspritzventil zum Abgasstrang täuscht den Ausfall des SCR-Systems vor, da dieses ohne eine Harnstoffeinspritzung unwirksam ist. Diese Manipulation kann ggf., wie auch der AGR-Fehler, mit den entsprechenden Programmierertools und Fachwissen auch über die Software des Motormanagements vorgenommen werden. Um eine Aussage für eine Messmethode zu erhalten, reicht jedoch die mechanische Manipulation aus. Das Verhalten der Stickstoffoxidemissionen ohne Harnstoffeinspritzung konnte damit untersucht werden. Im Rahmen der Evaluierungsphase wurde die Erkenntnis untermauert, dass nur ein Prüfverfahren mit extern aufgebrachtener Last eine Bewertung des gesamten Abgasnachbehandlungssystems zulässt. Zudem stellte sich heraus, dass für eine Fehlererkennung die NO_x -Konzentration in (ppm) für eine Bewertung ausreicht und nicht zwingend der Abgasmassenstrom gemessen werden muss. Es muss jedoch sichergestellt sein, dass alle emissionsmindernden Systeme vorkonditioniert sind. Dies gilt insbesondere für den SCR-Katalysator, welcher ab einer Temperatur von 200°C - 250°C wirkt und einen großen Anteil zur NO_x -Reduzierung beiträgt. Der

SCR-Katalysator kann motornah oder unter dem Fahrzeug verbaut sein. Je nach Einbauort verändert sich die Dauer, bis die SCR-Katalysatortemperatur den wirksamen Arbeitsbereich erreicht hat. Die Konditionierung des Fahrzeuges ist für eine transparente und reproduzierbare Messung zwingend erforderlich. Um die Systeme auf ihre Parameter, wie die Katalysatortemperatur, zu prüfen, muss vorausgesetzt sein, dass eine umfassende Auswertung und Beurteilung der im OBD-System bereits vorhandenen Informationen (z. B. Einspritzmenge Harnstoff, Temperatur SCR-Katalysator, Aktivität AGR-Ventil) erfolgt. Zudem ist ein Abgleich der aktuell gültigen mit der im Fahrzeug vorhandenen Softwareversion vorzunehmen, um z. B. Manipulationen an der Elektronik feststellen zu können. Dafür muss über das OBD-System ein Zugang zu den erforderlichen Daten in standardisierter Form ermöglicht werden, wie er für Diagnosegeräte im Werkstattbereich üblich ist. Damit ließen sich außerdem bestimmte Fahrzeugzustände feststellen, bei denen eine AU nicht durchgeführt werden könnte, wie z. B. während einer Regenerationsphase des Diesel-Partikelfilters.

Darüber hinaus sind Informationen über das Systemkonzept der Abgasnachbehandlung erforderlich, um evtl. Zustände identifizieren zu können, innerhalb derer die Systeme teilweise oder umfänglich abgeschaltet werden können (z. B. tiefe Umgebungstemperaturen). Es wurde festgestellt, dass bereits ein Test mit einer Beschleunigung auf 20 km/h, unabhängig ob auf dem Prüfstand oder bei einer kurzen Testfahrt auf der Straße, ausreicht, um signifikante Erhöhungen der NO_x-Emissionen aufgrund von vorhandenen Fehlern in den Abgasreinigungssystemen feststellen zu können. Dabei genügt bei Tests auf dem Prüfstand das Aufbringen einer Last von 500 N, um eine messbare NO_x-Konzentration zu erzeugen. Der im Umfang reduzierte „Kurztest Straßenfahrt“ zeigte ähnliche Ergebnisse wie der längere ASM2050 Zyklus. Der kurze Beschleunigungstest auf der Straße sollte in weiteren Untersuchungen näher betrachtet werden. Die Vorteile einer realen Straßenfahrt gegenüber einem Test auf dem Rollenprüfstand sind, dass die tatsächlichen Fahrwiderstände auf das Fahrzeug wirken und unabhängig vom Antriebskonzept kein Mehraufwand für die Prüfung entsteht. Zudem muss an den AU-Prüfplätzen kein Platz für einen weiteren Prüfstand geschaffen werden. Dem gegenüber steht die Notwendigkeit, dass an jedem AU-Prüfplatz mit vertretbarem Aufwand die Möglichkeit gegeben sein muss, einen Straßentest durchführen zu können. Die Vorgaben und Randbedingungen für einen solchen Straßentest müssen exakt definiert werden. Unter der Einschränkung, dass lediglich drei Fahrzeuge geprüft wurden, sind beide Verfahren – Test auf dem Prüfstand oder kurze Fahrt auf der Straße – aufgrund der gemessenen NO_x-Emissionen zur Validierung der Funktion des Abgasreinigungssystems im Rahmen einer periodischen AU geeignet. Zur Stabilisierung der Systeme müssen mindestens drei Zyklen gefahren werden. Wenn der noch festzulegende Grenzwert überschritten wurde, könnten noch zwei weitere Zyklen gefahren werden, um die AU zu bestehen. Legt man die bei den in dieser Untersuchung betrachteten Fahrzeuge festgestellten Werte für NO_x-Emissionen zur Festlegung eines Grenzwertes zugrunde und orientiert man sich an den höchsten gemessenen Werten im Serienzustand, erscheint ein Grenzwert in den Größenordnungen von 20 ppm bis 50 ppm für Fahrzeuge der Emissionsklasse Euro 6d-TEMP sinnvoll. Die in diesem Forschungsprojekt untersuchten drei Fahrzeugtypen verfügen über unterschiedliche Abgasnachbehandlungskonzepte und Motorisierungen. Um die gewonnenen Erkenntnisse statistisch abzusichern, bedarf es jedoch einer Vergrößerung des Stichprobenumfangs, da festgestellt wurde, dass bereits die drei untersuchten Fahrzeuge sehr unterschiedliche absolute NO_x-Emissionen aufweisen. Um künftig Fahrzeuge individuell beurteilen zu können, müssen bereits im Rahmen der Typgenehmigung fahrzeugspezifische Grenzwerte für eine spätere Prüfprozedur zur periodischen Abgasprüfung festgelegt werden, die dann während der gesamten Nutzungsdauer einzuhalten sind. Daraus ergibt sich, dass ein künftiges, für die periodische AU geeignetes NO_x-Messverfahren erst noch in die Typgenehmigungsprüfung integriert werden muss, um typspezifische Grenzwerte heranziehen zu können. Für den Fall, dass derartige spezifische Werte nicht vorliegen, ist ein noch zu definierender, genereller Grenzwert in der oben genannten Größenordnung heranzuziehen.

Im Rahmen der ökonomischen Analyse sollte mit Hilfe der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) überprüft werden, ob die AU aus gesamtwirtschaftlicher Sicht vorteilhaft ist. Die NKA ist ein etabliertes Verfah-

ren, um den Einsatz öffentlicher Finanzmittel oder die Durchführung ordnungspolitischer Maßnahmen zu bewerten und sicherzustellen, dass die Maßnahmen auf jeden Fall die gesellschaftliche Wohlfahrt verbessern. Es wird ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) ermittelt. Wenn das NKV größer als 1 ist, ist der Einsatz der öffentlichen Finanzmittel oder die Durchführung der ordnungspolitischen Maßnahmen aus gesellschaftlicher Sicht erwünscht. Ist das NKV kleiner als 1, sollten die Ausgaben gestoppt und die ordnungspolitischen Maßnahmen nicht durchgeführt werden. Bei der AU handelt es sich um eine ordnungspolitische Maßnahme, weil sie einem Marktkontrollmechanismus (= technische Überprüfung, ob die NO_x-Emissionsgrenzwerte tatsächlich eingehalten werden) entspricht. Um das Nutzen-Kosten-Verhältnis für die künftige AU zu ermitteln, ist es erforderlich, sowohl die volkswirtschaftlichen Kosten für die Durchführung der AU als auch den volkswirtschaftlichen Nutzen, der sich durch reduzierte NO_x-Emissionen ergibt, zu ermitteln. Die Rentabilitätsschwelle für eine Maßnahme liegt bei einem Nutzen-Kosten-Verhältnis größer 1. Ein Nutzen-Kosten-Verhältnis größer als 3 wird dagegen als exzellent bewertet. Um die Nutzen der AU für Diesel-Pkw mit Euro 6d-TEMP zu ermitteln, wurde zunächst die Anzahl der Diesel-Pkw ermittelt, die ab dem Jahr 2024 regelmäßig zur AU müssen. Es wurde eine Schadensquote in Höhe von 1% für einen AGR-Fehler, SCR-Fehler oder AGR- und SCR-Fehler unterstellt. Weiterhin wurde die Höhe der zusätzlichen NO_x-Emissionen ermittelt, die aufgrund von Defekten der Katalysatoren freigesetzt werden. Dazu wird auf die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Emissionsmessungen zurückgegriffen. Um die volkswirtschaftlichen Kosten zu ermitteln, wurde zunächst der Zeitaufwand für die AU abgeschätzt und die damit verbundenen Personalkosten berechnet. Weiterhin wurden die Investitionskosten für die Messgeräte ermittelt. Insgesamt errechnet sich über den Untersuchungszeitraum von 2024 bis 2033 ein durchschnittliches NKV in Höhe von 3,7.

Die Einführung der AU führt damit zu deutlichen positiven gesamtwirtschaftlichen Effekten und hat ein exzellentes NKV. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass mit diesem Projekt sowohl theoretisches als auch empirisches Neuland betreten wurde, sodass eine Reihe von Annahmen getroffen werden mussten. Diese sind zwar plausibel, können aber durchaus kritisch hinterfragt werden. Daher wurde die Nutzen-Kosten-Analyse einer Sensitivitätsprüfung für die Reagibilität des Nutzen-Kosten-Verhältnisses auf Veränderungen wichtiger Eingangsgrößen unterzogen. Dazu wurden sogenannte Reaktionselastizitäten berechnet. Die Reagibilität wurde untersucht für Veränderungen der mit einem Defekt zurückgelegten Pkw-Fahrleistungen, des Zeitaufwandes für die Durchführung der AU, der Personalkosten sowie für Veränderung der Investitionskosten, die für die Messgeräte aufgewendet werden müssen. Es hat sich gezeigt, dass partielle Veränderungen des Zeitaufwandes, der Personalkosten und der Gerätekosten nur unterproportionale Wirkungen auf das NKV haben. Wenn alle drei Größen gleichzeitig um 10% ansteigen würden, dann würde das NKV von 3,7 auf 3,3 sinken, was immer noch einen exzellenten Wert darstellt. Wenn sich die Anzahl der mit einem Defekt der Abgasnachbehandlungsanlage zurückgelegten Kilometer um 10% verringert, verringert sich das NKV um 9,7% und ist weiterhin größer als 3. Die NKA zeigt insgesamt, dass die Einführung der AU gesamtwirtschaftlich erwünscht ist. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt eine hohe Stabilität des Nutzen-Kosten-Verhältnisses gegenüber Veränderungen von wichtigen Eingangsgrößen. Limitationen bestehen allerdings vor allem darin, dass die Bestandsentwicklung der Diesel-Pkw mit Euro-6d, aufgrund aktueller Entwicklungen, nur schwer vorhersehbar ist.

Der vorliegende Untersuchungsbericht zeigt deutlich, dass die Ergänzung des AU-Messprogramms um den Luftschadstoff NO_x mit den vorgenannten Messmethoden grundsätzlich messtechnisch leistbar und gesamtwirtschaftlich sinnvoll ist. Das vorliegende Messprogramm verfolgte ausschließlich das Ziel, ein technisch mögliches Messverfahren zu entwickeln. Die Messergebnisse zeigen, dass die Messung unter Last, entweder auf einem Prüfstand oder bei einer Testfahrt auf der Straße, durchgeführt werden muss. Um die Methode jedoch statistisch abzusichern, bedarf es weiterführender Untersuchungen.

Eine Schätzung des künftigen Preises für die AU von Diesel-Fahrzeugen hat ergeben, dass, zusammen mit den zusätzlichen Gerätekosten von ca. 1,90 €, die AU, bestehend aus PN- und NO_x- Messung, um ca. 10,80 € (netto) bzw. 12,80 € (inkl. MWSt) erhöhen – und damit zu einer jährlichen Mehrbelastung für den Fahrzeughalter von ca. 6,40 € (inkl. MWSt) führen würde.

9 Quellenverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt. (2017). Wirkungen auf die Gesundheit. Abgerufen am 01.11.2017 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit>.
- [2] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Wirkungen auf den Menschen. Abgerufen am 01.11.2017 von <https://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18796/>.
- [3] European Environment Agency. (2015). Air quality in Europe — 2015 report. EEA report No 5/2015, Luxemburg, ISBN 978-92-9213-702-1, ISSN 1977-8449, doi:10.2800/62459.
- [4] Umweltbundesamt. (2017). Luftqualität 2016. Abgerufen am 01.11.2017 von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2016>.
- [5] Dipl.-Ing. Ralph Pütz - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV (2014). Schadstoffreduktion bei bestehenden Linienbussen – Technische Möglichkeiten. Abgerufen am 07.11.2017 von <http://slideplayer.org/slide/901787/>.
- [6] Yang, L., Franco, V., Campestrini, A., German, J. & Mock, P. (2015). NOX control technologies for Euro 6 Diesel passenger cars - Market penetration and experimental performance assessment. ICCT 2015, International Council on Clean Transportation, Neue Promenade 6, 10178 Berlin.
- [7] Carslaw, Williams, Tate & Beevers. (2013). The importance of high vehicle power for passenger car emissions. Atmospheric Environment, 68, S. 8-16.
- [8] Posada, F., Yang, Z. & Muncrief, R. (2015). Review of Current Practices and New Developments in Heavy-Duty Vehicle Inspection and Maintenance Programs. ICCT 2015, International Council on Clean Transportation, 1225 , Street NW Suite 900, Washington DC 20005 USA.
- [9] Statistisches Bundesamt. (2013). Verkehr auf einen Blick – Broschüre – Ausgabe 2013. Abgerufen am 02.11.2017 von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile.
- [10] Tietge, U., Diaz, S., Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Ligterink, N. (2016). From Laboratory to Road. A 2016 update of official and 'Real-world' fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe. White Paper ICCT November 2016. Abgerufen am 02.11.2017 von <https://cleantechnica.com/2016/11/21/icct-average-gap-official-fuel-consumption-figures-actual-fuel-use-eu-hit-42/>.
- [11] European Environment Agency. (2016). Explaining road transport emissions - A non-technical guide. Abgerufen am 02.11.2017 von https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions/at_download/file.
- [12] Transport and Environment. (2013). Mind the Gap! Why official car fuel economy figures don't match up to reality. Transport and Environment, März 2013.
- [13] Anyon P., Jones D., Real J. & Jamieson R. (1996). Motor Vehicle Pollution in Australia. Report on the National in-Service Vehicle Emissions study. Federal Office of Road Safety, Canberra, Australia, Mai 1996. Abgerufen am 02.11.2017 von <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission/pdf/natinservicestudy.pdf>.
- [14] McCormick, R., Graboski, M., Alleman, T., & Alvarez J. (2003). Quantifying the Emission Benefits of Opacity Testing and Repair of Heavy-Duty Diesel Vehicles. Energy and Environmental Analysis, Inc., Arlington, VA 22209. Environmental science and technology, February 2003, doi: 10.1021/es0256919.
- [15] National Research Council. (2001). Evaluating Vehicle Emissions Inspection and Maintenance Programs. the National Academy of Sciences , National Academy Press 2101 Constitution Ave., NW Box 285 Washington, DC 20055 800–624–6242 202–334–3313.
- [16] Texas A&M Transportation Institute. (2013). Heavy-Duty Diesel Inspection and Maintenance Pilot Program. October 2013. Abgerufen am 02.11.2017 von http://www.nctcog.org/trans/air/hevp/documents/NCTCOG_DieselIIM_Final_Report_UpdatedOctober2013.pdf.
- [17] European Commission. (2012). Impact Assessment SWD 2012.

- [18] European Union. (2014). Directive 2014/45/EU of the European parliament and of the council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers and repealing Directive 2009/40/EC. Official Journal of the European Union OJ L 127, 29.4.2014: [Link zum Download der Richtlinie 2014/45/EU](#) .
- [19] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). Verkehrsblatt 19/2017.
- [20] John Agudelo, Pedro Benjumea, Adriana Patricia Villegas. (2009). Evaluation of nitrogen oxide emissions and smoke opacity in a HSDI diesel engine fuelled with palm oil biodiesel. Abgerufen am 04.11.2017 von <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n51/n51a07.pdf>.
- [21] May, J., Favre, C. & Bosteels D. (2013). Emissions from Euro 3 to Euro 6 light-duty vehicles equipped with a range of emission control technologies. AECC, November 2013.
- [22] U.S. Environmental Protection Agency Certification and Compliance Division. (2001). Status of Vehicle Inspection Programs for Light-Duty Diesel Vehicles and Heavy-Duty Gasoline and Diesel Vehicles - Report No. SR01-11-01. Abgerufen am 02.11.2017 von http://www.westar.org/Committees/MSDOcs/wp3-10_HD%20REPORT.pdf.
- [23] Chernich, D. (2003). Development of a chassis based inspection and Maintenance Program for Heavy-Duty Diesel Powered Vehicles. 13th CRC Workshop, April 2003. Retrieved on 3/03/2016 from www.arb.ca.gov/msprog/m17/m17crc.ppt#sthash.i9j5i500.dpuf.
- [24] Anyon, P., Brown S., Pattison, D., Beville-Anderson, J., Walls, G. & Mowle, M. (2000). In-Service Emissions Performance - Phase 2: Vehicle Testing. National Environment Protection Council, Adelaide, Australia. ISBN 0 642 323 348. Abgerufen am 04.11.2017 von <http://www.scew.gov.au/system/files/resources/45fee0f3-1266-a944-91d7-3b98439de8f8/files/dve-prepww-project2-2.pdf>.
- [25] Park, J. (2015). The effects of the emission test using a chassis dynamo in Korea. [PowerPoint slides in PDF document]. CITA Conference Dubai U.A.E., 2015, Korea Transport Safety Authority. Abgerufen am 04.11.2017 von <http://citainsp.org/wp-content/uploads/2016/01/4.-Workshop-D-Final-Presentation.pdf>.
- [26] CITA International Motor Vehicle Inspection Committee. (2017). CITA SET II Project – Sustainable Emissions Testing.
- [27] Junta de Andalucia. (2017). Experiencia en el control de los NOx con el vehículo en carga.
- [28] Georges Petelet. (2017). Status of the French study LTE: Article 65.
- [29] Petelet, G. (2015). CAP3050 - NOx measurement & Diesel engines euro 4/5/6. CITA WG2, 8th meeting 7th & 8th October 2015, London.
- [30] TÜV NORD, eigene Erhebungen.
- [31] Konrad Reif, Dieselmotor-Management (2012) – Springer Vieweg.
- [32] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2018). Ab 1. Januar 2018: Endrohrmessung bei allen Fahrzeugen verpflichtend. Abgerufen am 29.12.2018 von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/2018-endrohrmessung.html>.
- [33] Schulz, W. H., & Schuldenzucker, U. (2010). Gesamtwirtschaftliche Nutzen-Kosten Analyse für die Hauptuntersuchung bei Pkw. Köln: DEKRA e.V..
- [34] Schulz, W. H., & Scheler, S. (2017). Intermediate Results - Impact Study to estimate road safety and economic effects of the introduction of PTI in Turkey. Abgerufen am 29.12.2018 von [Link zum Download](#).
- [35] CITA (2019). Study on the inclusion of light trailers and two- or three-wheel vehicles in the scope of the periodic roadworthiness testing - Final Report. Bericht bei der Europäischen Kommission eingereicht, Veröffentlichung folgt.
- [36] PTV Planung Transport Verkehr AG, PTV Transport Consult GmbH, TCI Röhling – Transport Consulting International, & Mann, H.-U. (2016). Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Abgerufen am 15.12.2018 von https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile.
- [37] Umweltbundesamt. (2018). Emissionsdaten. Abgerufen am 15.12.2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#textpart-2>.
- [38] Kickhöfer, B., & Brokate, J. (2017). Die Entwicklung des deutschen Pkw-Bestandes: Ein Vergleich bestehender Modelle und die Vorstellung eines evolutionären Simulationsansatzes. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 88(02), 71-103.

[39] Umweltbundesamt. (2018). Zahlen basierend auf Auswertung des TREMOD-Modells durch das Umweltbundesamt.

[40] Matthey, A., & Bünger, B. (2018). Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Abgerufen am 29.12.2018 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-05_methodenkonvention-3-0_kostensaetze.pdf.

[41] Glassdoor. (2019). Gehälter bei TÜV Rheinland Abgerufen am 04.01.2019 von <https://www.glassdoor.de/Gehalt/T%C3%9CV-Rheinland-Geh%C3%A4lter-E252108.htm>.

[42] Frankfurter Allgemeine Zeitung. (2018). Deutsche haben im Schnitt 28,9 Tage Urlaub im Jahr. Abgerufen am 29.12.2018 von Link zum Artikel in der FAZ.

[43] OECD. (2010). Steuer- und Abgabenlast für Arbeitnehmer in Deutschland im vergangenen Jahr gesunken [Pressemitteilung]. Abgerufen am 28.08.2018 von Link zur OECD.

[44] Statistisches Bundesamt. (2018). GENESIS-Online: Ergebnis - 61111-0001 - Verbraucherpreisindex für Deutschland. Abgerufen am 29.12.2018 von [Link zum Statistischen Bundesamt](#).

[45] Apel, H. (2019), Saubere Dieselmotoren. Deutsches Reinheitsgebot. Neues Messverfahren, null Sorgen? Moderne Diesel unterbieten die strengste Abgasnorm 6d-TEMP deutlich. Volle Transparenz aber herrscht nicht. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 12.02.2019 in Technik und Motor.

[46] Eigene Darstellung der Auftragnehmer: Verband der TÜV e.V., ASA-Verband, IERC GmbH, TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG, TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH, TÜV SÜD Auto Service GmbH

10 Anhang

Tabelle 46: „Overview of the main technologies for the control of NO_x emissions from Euro 6 Diesel passenger cars.“ (Taken from Yang et al., 2015).

	Lean NO _x trap (LNT)	Selective catalytic reduction (SCR)	Exhaust gas recirculation	Combined SCR and LNT (SCR + LNT)
Typical application	Light-duty vehicles with engine displacements below 2 liters.	Light-duty vehicles with engine displacements above 2 liters.	Widespread deployment from EURO 3 to EURO 6. The application of EGR and other NO _x control technologies is not mutually exclusive; SCR tends to be used in combination with EGR.	Light-duty vehicles (high end, larger vehicles)
Estimated cost per vehicle*	\$ 320 (engines < 2L) \$ 509 (engines > 2L)	\$ 418 (engines < 2L) \$ 494 (engines > 2L)	\$ 142 (engines < 2L) \$ 160 (engines > 2L)	
Advantages	70-90% efficiency at low loads Good durability and NO _x reduction performance More economical for engines < 2L No additional reductant tank is needed (lower packaging constraints) Reductant fluid not required (no refills needed)	Up to 95% of NO _x conversion efficiency More economical for engines > 2L, may provide better fuel economy/lower CO ₂ emission	No additional onboard hardware is needed Reductant fluid not required	Good NO _x control performance at low temperatures Reductant fluid not required (in some configurations)
Limitations	NO _x storage capacity is limited by physical size of LNT Highway and uphill driving can overwhelm the capacity of LNT, leading to high NO _x emission events For engines > 2L, more frequent trap regeneration events are required, leading to additional fuel penalties (around 2%) Precious metal usage is	Limited NO _x conversion at low-load driving conditions (vanadium catalyst), sensitive to fuel sulfur content (copper-zeolite catalyst) For light-duty vehicles, exhaust temperature during urban driving conditions is usually below 200 °C, whereas the vapor-	Most effective at low engine load High real-world NO _x emissions during high load driving instances because the maximum applicable exhaust recirculation rate decreases with engine load Tradeoff between NO _x performance and fuel economy	High cost Packaging constraints (combined aftertreatment solutions take up more space than single technology solutions) Calibration difficulties due to added complexity.

	Lean NOx trap (LNT)	Selective catalytic reduction (SCR)	Exhaust gas recirculation	Combined SCR and LNT (SCR + LNT)
	high (approx.. 10 to 12 g per a 2 L engine) NOx adsorbers also adsorb sulfur oxides resulting from the fuel sulfur content, and thus requires fuels with a very low sulfur content (<10ppm). Sulfur compounds are more difficult to desorb, so the system has to periodically run a short "desulfation" cycle	ization of urea into ammonia requires an exhaust temperature of at least 180 °C. Requires additional urea distribution infrastructure (possibly periodic refills by users), on-board storage and heating, anti-tampering provisions, and injection systems (packaging constraints)		
Application examples	VW Polo, VW Golf, BMW 2-Series	Peugeot 308, Mercedes-Benz C200, Audi A5	Mazda 3, Mazda 6, Mazda CX-5	US market versions of BMW 3-, 5- and X5-Series

Hinweis: Kostenschätzungen von Possada et al. (2012) "Estimated Cost of Emission Reduction Technologies for Light-Duty Vehicles". Für die AGR wird eine Turboladung mit variabler Geometrie angenommen.

Tabelle 47: Diesel technology requirements for control of conventional pollutants. EU regulations. (Taken from Posada et al., 2012)

DIESEL	PASSENGER CARS AND COMMERCIAL VEHICLES (M1, N1), MAX WEIGHT < 3500 KG				
	EURO 1 TO EURO 2	EURO 2 TO EURO 3	EURO 3 TO EURO 4	EURO 4 TO EURO 5	EURO 5 TO EURO 6
Regulated pollutants	HC+NO _x / PM / CO	NO _x / PM / CO / HC*	NO _x / PM / CO / HC*	NO _x / PM / CO / HC*	NO _x / PM / CO / HC*
Emissions target, g/km	0.7 / 0.08 / 1	0.5 / 0.05 / 0.64 / 0.06	0.25 / 0.025 / 0.5 / 0.05	0.18 / 0.005 / 0.5 / 0.05	0.08 / 0.0045 / 0.5 / 0.09
Emissions reduction	38% / 55% / %68	- / 37.5% / 36%/-	50% / 50% / 22%	28% / 80% / 0	66% / 10% / 0
Base technology and comments	Basic Euro 1: <ul style="list-style-type: none"> Fuel injection systems: based on Rotary or distributor pump. Fuel metering and timing are mech. operated. Fuel metering/timing variation was limited to specific load- speed conditions. Mechanical or electrical fuel control Indirect diesel injection (IDI) combustion Low pressure injection (700-800 bar) EGR based mostly on low-pressure mechanic operation 	Based on Euro 2 technology <ul style="list-style-type: none"> Some vehicles still use IDI (30% of PC market), mostly smaller diesel vehicles. <p>Note: Elimination of first 40-second warm-up period during the test cycle (NEDC 2000) presents cold start challenges</p>	Based on Euro 3 technology <ul style="list-style-type: none"> DI becomes the standard technology 	Based on Euro 4 technology <p>Emission control heavily focused on:</p> <ul style="list-style-type: none"> Air-fuel management and combustion system improvements (R&D) Engine tuning and mapping 	Based on Euro 5 technology <ul style="list-style-type: none"> PM control will likely follow the use of DOC + DPF. NO_x control will depend highly on in-cylinder combustion and CO₂ emission requirements. Using SCR may be beneficial for large engines (Vd~3 liters) because the engine can be tuned for high FE and low PM emissions.
Engine -out emissions, A/F management	<ul style="list-style-type: none"> ECU based control Rotary/distributor pump with electronic assistance. Electronically controlled IDI and DI incorporate solenoid-operated valves for improved fuel metering and timing. Cooled EGR required in some vehicles. 	<ul style="list-style-type: none"> Rotary pump injection timing control improved (for cold start and fast idle) Common-rail systems became available for Euro 3 vehicles. DI comb+ high-pressure fuel injection (HPFI). Pressure 900-1,300 bar Cooled EGR. The EGR system is electronically operated and integrated with the ECU. 	<ul style="list-style-type: none"> High pressure fuel injection 1300-1600 bar Air-fuel management and combustion system (nozzle, valves, piston, heads geometry) improvements (R&D) Engine tuning and mapping Four valves per cylinder Turbocharging with intercooling *Cooled EGR with DC motor actuator 	<ul style="list-style-type: none"> High pressure fuel injection 1600-1900 bar Variable geometry turbo. (VGT) for improved air-fuel management for large vehicles. Variable fuel injection timing for DPF active regeneration through injection delay Variable valve timing (VVT) may also be used for DPF regeneration and improved F 	<ul style="list-style-type: none"> High pressure fuel injection 1800-2100 bar Dual loop, cooled EGR systems with motor actuator Combustion research PCCI, LTC Variable geometry turbocharger (VGT) may be used in most passenger cars and commercial vehicles. Improves fuel economy (FE)
Aftertreatment systems		<ul style="list-style-type: none"> DOC for PM reduction (SOF fraction) 	Same as Euro 3 <ul style="list-style-type: none"> Although not required for Euro 4 compliance, some vehicles were fitted with DPF in advance of Euro 5 regulations. 	<ul style="list-style-type: none"> DOC + DPF DPF is regenerated through active or passive regeneration with high-temperature exhaust downstream the DOC and taking advantage of its NO_x yield. 	Strongly depends on FE approach <ul style="list-style-type: none"> DOC+DPF+LNT if 1.4 < Vd < 2.5 L DOC+DPF+SCR if Vd> 2.5-3.0L

Tabelle 48: Overview specifications NO_x equipment [26]

	Instru- ment 1	Instru- ment 2	Instru- ment 3	Instru- ment 4	Instru- ment 5	Instru- ment 6	Instru- ment 7	Instru- ment 8	Instru- ment 9	Instrument 10	Instrument 11	Instrument 12
Company name	MAHA	Sensors Inc.	Sensors Inc.	SAXON-Junkalor	Capelec	Robert Bosch	Brain Bee	Automotive Test	AVL DITEST	ACTIA	TEN	TEXA
Product name	MET 6.3	SEMTECH NO _x	SEM-TECH-DS	Infralyt ELD	CAP3050	BEA 060, BEA 055 with NO	AGS-688	P550	AVL DITEST MDS/CDS	AT505	INNOVA 2800+NO _x	GASBOX AUTO-POWER
Parameters	NO, NO ₂ (O ₂ , CO, CO ₂ , HC)	NO, NO ₂	NO, NO ₂ , O ₂ , CO, CO ₂ , HC	NO, NO ₂ (O ₂ , CO, CO ₂ , HC)	NO _x (a)	NO, O ₂ , CO, CO ₂ , HC	NO	NO	NO, CO, CO ₂ , HC, O ₂	NO, NO ₂ (O ₂ , CO, CO ₂ , HC)	NO, NO ₂ (O ₂ , CO, CO ₂ , HC)	NO (O ₂ , CO, CO ₂ , HC)
Measurement method(s) for NO and/or NO ₂	NO: electro-chemical NO ₂ : CCFET ³	NDUV	NDUV	Electro-chemical	Zirconia ceramic	NO: electro-chemical	NO: electro-chemical	NO: Solid State NO ₂ Solid State CO, CO ₂ , O ₂ Particulate	NO: Electro-chemical	Electro-chemical	Electro-chemical	NO: electro-chemical
Range	NO: 0-5,000 ppm NO ₂ : 0-500 ppm	NO: 0-3,000 ppm NO ₂ : 0-500 ppm	NO: 0-2500 ppm NO ₂ : 0-500 ppm	NO: 0-2,000 ppm NO ₂ : 0-500 ppm	NO _x : Range: 0 – 5000ppm O ₂ : Range:0-25%	NO: 0-5,000 ppm	NO: 0-5,000 ppm, resolution: 1 ppm	NO: 0-4,995 ppm	NO: 0-5,000 ppm	NO: 0-5,000 ppm NO ₂ : 0-500 ppm	NO: 0-5,000 ppm resolution 1 ppm	NO: 0-5.000 ppm (res. 1 ppm)
Accuracy	NO: 32-120 ppm NO ₂ : 32-120 ppm	N/A	NO: ±3% of reading or ±15 ppm NO ₂ : ±3% of reading or ±10 ppm	NO: ±5% NO ₂ : ±5%	NO _x : ± 15ppm (0 to 1000) ± 1,5% from 1000 O ₂ : Precision: ±0,4% around 0 ± 0,8% on the range	4% 0-4000 ppm +- 25ppm 8% 4000-5000ppm	N/A	N/A	NO: ± 5ppm Or ± 1% o.M.	NO: ±3% of full scale NO ₂ : N/A	Range 0...4000 ppm ± 4% or 25 ppm Range 4000-5000 ppm ± 8%	
Calibration interval	1 year	3-6 months	3-6 months	1 year	6 months	6 months	1 year	6 months	3 months	6 months	1 year	1 year
Weight	5 kg	13 kg	35.4 kg	9 kg	500 g (bench)	9 kg	5 kg	5 kg	2,2 kg	6 kg	15 kg	6 kg
Dimensions: length x height x width (cm)	40.6 x 22.5 x 16.0	30.8 x 13.6 x 43.6	55 x 36 x 43	29.4 x 23.8 x 35.5	13 x 7 x 7	41.4 x 33.0 x 28.0	43.4 x 19.0 x 29.1	29.0 x 14.0 x 18.0	344 x 252 x 85 mm	N/A		46 x 27 x 24
Data interface available	USB	CAN, RS232, Ethernet, USB. Options available.	Wireless	RS232, USB, Bluetooth , Adapter available	RS232, USB, Bluetooth	USB, Bluetooth	USB, RS232, Bluetooth.	RS232. Data logging optional extra	BT, USB	RS232, USB	RS232	RS232, BLUETOOTH
Cost per unit				7.175,- Euro net EXW (list-price)		€ 3700 stand-alone	4750€+IV A With NO _x and					€ 3.360

³ CCFET = Capacitive-Coupled Field-Effect Transistor

	Instru- ment 1	Instru- ment 2	Instru- ment 3	Instru- ment 4	Instru- ment 5	Instru- ment 6	Instru- ment 7	Instru- ment 8	Instru- ment 9	Instrument 10	Instrument 11	Instrument 12
							Diesel special probe included					
Time per test				T90- ca. 20 se- conds	Reaction time < 1s Proce- dure : 60s	Depen- ding on test proce- dure						
Covering Petrol and/or Diesel vehicles?				Petrol and Diesel vehicles	Diesel vehicles	Covers both Diesel and petrol vehicles	Petrol (with standard probe)and Diesel (with special probe)				Petrol and diesel after Euro4	Petrol (and also diesel)
Are you ready to participate to the CITA Set II Study?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Depen- ding on time scale	Yes	Yes	Yes	Yes
Procedure dedicated to NO _x	Yes Dynamic (roller)	No	No	No	Yes Static		No	No	Yes Static	No	No	No

Lastenheft Mini-PEMS für UBA Forschungsvorhaben „Fortentwicklung der AU an Kfz, FKZ 37 17 57 1010“

Testfahrzeuge

- ▶ Diesel mit AGR, SCR und/oder NO_x Speicherkatalysator
- ▶ geeignet sind Fahrzeuge mit Typzulassung nach Euro 6c und Euro 6d

Messtechnik:

- ▶ geeignet scheinen Systeme der Hersteller ECM oder NGK

Installation des Mini PEMS

- ▶ die Installation erfolgt nach Vorgabe des Mini PEMS Herstellers

Aufzuzeichnende Daten:

- ▶ NO_x; PN; CO und CO₂ Konzentration
- ▶ MAF (mass air flow) über OBD (falls möglich)

Messprogramm

- ▶ nach Installation des Mini PEMS erfolgt Validierung nach 2017/1151 Anhang IIIA; Anlage 3
- ▶ Messung in zuvor entwickeltem Prüfzyklus (siehe unten), des jeweiligen Fahrzeugs, ohne und mit eingebautem Fehler der Abgasnachbehandlung
- ▶ vor der Messung muss sichergestellt sein, dass Motor betriebswarm ist

Anforderungen an zu entwickelnden Prüfzyklus

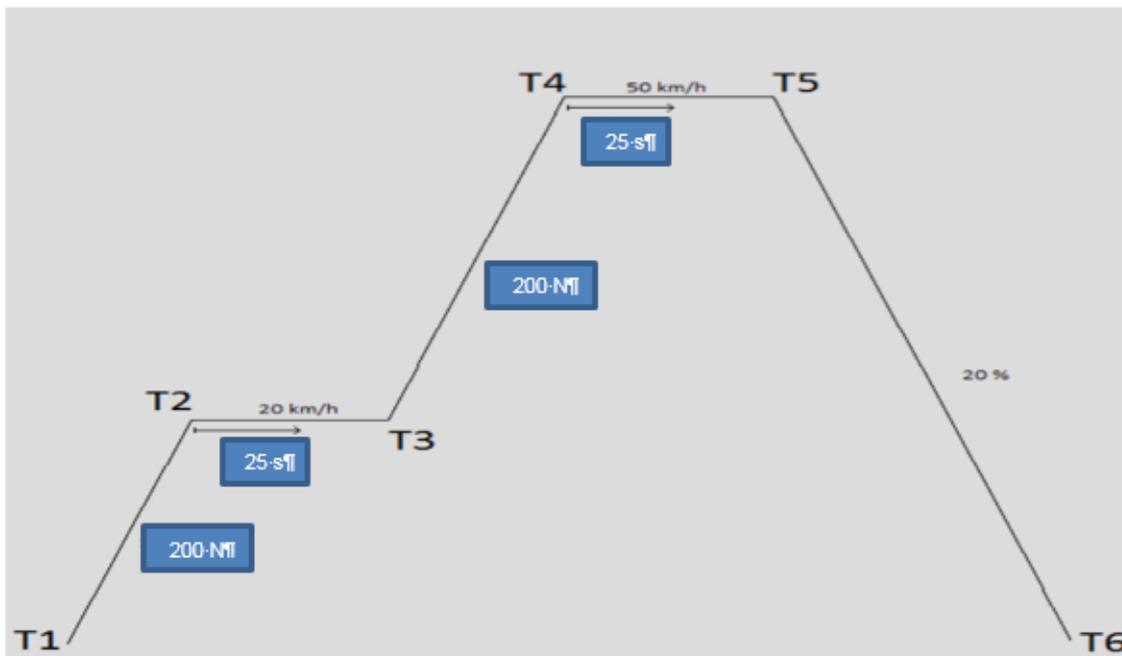
- ▶ Reproduzierbarkeit muss gegeben sein
- ▶ möglichst kurze Distanz, um Messungen an fast jedem Prüfort zu ermöglichen
- ▶ klare Definition der Gangwahl bei Fahrzeugen mit manuellem Getriebe
- ▶ klare Definition der Geschwindigkeit
- ▶ Zyklus muss so definiert sein, dass mit jedem Fahrzeug fahrbar
- ▶ Aussagekraft auch wenn nur Abgaskonzentrationen gemessen werden
- ▶ Durchführung auf ebener Straße ohne oder mit nur geringer/m Steigung/Gefälle

Lastenheft ASM2050 (Stand 14.02.2018)

Der ASM2050 Zyklus stellt eine Art eines innerstädtischen Fahrzyklusses dar.

Es gibt zwei Varianten des ASM2050. Beide sind vom Ablauf gleich und werden in der Abbildung dargestellt. Bei Variante 1 wird der Zyklus ab dem Punkt T2 im zweiten Gang zu Ende gefahren, bei Variante 2 wird im Punkt T4 vom zweiten Gang in den dritten Gang geschaltet und somit die 50 km/h im dritten Gang gefahren:

Abbildung 113: Darstellung des ASM2050 Zyklusses



Quelle: Eigene Darstellung der Auftragnehmer [46]

Informationen zum Fahrzeug

Grundsätzlich sind folgende Informationen vor jedem Test vom Fahrzeug zu erfassen:

- ▶ Plakettenwert (Trübungswert)
- ▶ Abgasklasse (EURO-Klasse)
- ▶ Verbaute Abgasreinigungssysteme
- ▶ Hersteller
- ▶ Fahrzeugtyp und -modell
- ▶ Motorvariante (Hubraum/Leistung)
- ▶ FIN
- ▶ Kilometerstand
- ▶ Erstzulassung

Fahrzeug

- ▶ Das Fahrzeug muss sich im betriebswarmen Zustand befinden, die Kühlmitteltemperatur muss mindestens 80° C betragen.
- ▶ EURO 6c mit SCR-Kat
- ▶ Schaltgetriebe
- ▶ Vollgetankt
- ▶ Reifenluftdruck nach Herstellervorgabe (halbbeladener Zustand)

Umgebungsbedingungen

Die Umgebungstemperatur beträgt 15° C bzw. 25° C. Der Umgebungsluftdruck max. 890 hPa (entspricht 1000 m ü.n.N.)

Messgeräte

Sensors

- ▶ PN Evaluation Meter

TSI 3795

- ▶ NPET

Testo

- ▶ PEPA

Messumgebung

- ▶ Geschwindigkeitsmesser
- ▶ Entnahmesonde im Auspuffendrohr
- ▶ Kontinuierliche Datenaufzeichnung während des gesamten Tests
- ▶ EOBD Schnittstelle zur Erhebung von Motordaten (Öltemperatur, Drehzahl, Fehlerinformationen etc.) mittels AVL Diagnosegerät

Messverfahren

Im Folgenden wird der Ablauf beider Varianten genauer beschrieben.

Grundsätzlich sind die Zeitvorgaben für die Beschleunigungsphase analog dem NEFZ zu übernehmen.

Variante 1 (Fahrt im ersten und zweiten Gang):

T1 nach T2: Beschleunigung im ersten Gang mit 200 N Lastvorgabe auf 20 km/h.

- ▶ T2: Gangwechsel vom ersten Gang in den zweiten Gang.
- ▶ T2 nach T3: Konstantfahrt mit 20 km/h im zweiten Gang für 25 s.
- ▶ T3 nach T4: Beschleunigung im zweiten Gang mit 200 N Lastvorgabe auf 50 km/h.
- ▶ T4 nach T5: Konstantfahrt mit 50 km/h im zweiten Gang für 25 s.
- ▶ T5 nach T6: Abbremsen bis zum Stillstand.

Variante 2 (Fahrt im ersten, zweiten und dritten Gang):

- ▶ T1 nach T2: Beschleunigung im ersten Gang mit 200 N Lastvorgabe auf 20 km/h.
- ▶ T2: Gangwechsel vom ersten Gang in den zweiten Gang.
- ▶ T2 nach T3: Konstantfahrt mit 20 km/h im zweiten Gang für 25 s.
- ▶ T3 nach T4: Beschleunigung im zweiten Gang mit 200 N Lastvorgabe auf 50 km/h.
- ▶ T4: Gangwechsel vom zweiten in den dritten Gang.
- ▶ T4 nach T5: Konstantfahrt mit 50 km/h im dritten Gang für 25 s.
- ▶ T5 nach T6: Abbremsen bis zum Stillstand.

Tabelle 49: Messergebnisse ASM2050

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h
Peugeot 308					
500	Serie	9,26	1,00	17,25	1,00
500	AGR	16,62	1,80	24,90	1,44
500	SCR	35,20	3,80	54,66	3,17
500	AGR+SCR	128,52	13,88	199,93	11,59
1000	Serie	4,45	1,00	8,74	1,00
1000	AGR	10,97	2,46	9,43	1,08
1000	SCR	47,21	10,61	113,40	12,97
1000	AGR+SCR	207,54	46,62	327,93	37,52
Straßenfahrt	Serie	7,30	1,00	12,17	1,00
Straßenfahrt	AGR	6,68	0,92	5,97	0,49
Straßenfahrt	SCR	75,82	10,39	129,22	10,61
Straßenfahrt	AGR+SCR	194,06	26,60	225,14	18,49
Mercedes A180d					
500	Serie	0,01	1,00	0,04	1,00
500	AGR	1,62	144,32	5,32	132,57
500	SCR	3,55	316,96	5,06	126,16
500	AGR+SCR	32,85	2934,06	62,92	1569,21
1000	Serie	0,02	1,00	0,03	1,00
1000	AGR	5,41	357,21	10,75	331,22
1000	SCR	3,17	208,91	12,26	377,94
1000	AGR+SCR	51,70	3411,00	140,63	4333,91
Straßenfahrt	Serie	0,25	1,00	2,35	1,00
Straßenfahrt	AGR	9,78	39,04	27,00	11,49
Straßenfahrt	SCR	24,23	96,70	40,37	17,18
Straßenfahrt	AGR+SCR	153,85	613,94	284,95	121,22
VOLVO XC60					
500	Serie	0,22	1,00	0,33	1,00
500	AGR	0,36	1,60	1,89	5,68
500	SCR	1,30	5,88	5,24	15,72
500	AGR+SCR	3,72	16,81	27,03	81,16

Last [N]	Fehler	NO _x Konstant-MW 20 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 20 km/h	NO _x Konstant-MW 50 km/h [ppm]	FI Konstant-MW 50 km/h
1000	Serie	0,33	1,00	0,79	1,00
1000	AGR	3,37	10,37	9,88	12,52
1000	SCR	5,73	17,63	19,48	24,67
1000	AGR+SCR	24,50	75,33	92,39	117,05
Straßenfahrt	Serie	0,57	1,00	4,07	1,00
Straßenfahrt	AGR	16,27	28,57	55,05	13,52
Straßenfahrt	SCR	34,16	59,99	57,95	14,23
Straßenfahrt	AGR+SCR	87,85	154,25	132,43	32,52

Tabelle 50: Messergebnisse „Kurztest Straßenfahrt“

Versuch	Fehler	Mittelwert NO _x [ppm]	Peakwert NO _x [ppm]	Fehlerfaktor Mittelwert NO _x
Peugeot 308				
1	Serie	9,65	17,94	
2	Serie	9,23	19,57	
3	Serie	10,53	24,11	
Mittelwert	Serie	9,80	20,54	1,00
1	AGR	10,68	21,14	
2	AGR	10,52	35,23	
3	AGR	12,37	37,18	
Mittelwert	AGR	11,19	31,18	1,14
1	SCR	115,12	189,34	
2	SCR	117,44	177,78	
3	SCR	110,30	180,32	
Mittelwert	SCR	114,29	182,48	11,66
1	AGR+SCR	208,42	365,19	
2	AGR+SCR	216,26	364,82	
3	AGR+SCR	205,52	421,78	
Mittelwert	AGR+SCR	210,07	383,93	21,43

Versuch	Fehler	Mittelwert NO _x [ppm]	Peakwert NO _x [ppm]	Fehlerfaktor Mit- telwert NO _x
Mercedes A180d				
1	Serie	0,93	5,46	
2	Serie	1,45	7,19	
3	Serie	3,70	17,52	
Mittelwert	Serie	2,03	10,05	1,00
1	AGR	13,25	46,41	
2	AGR	9,66	45,63	
3	AGR	35,91	121,37	
Mittelwert	AGR	19,61	71,13	9,67
1	SCR	104,39	317,13	
2	SCR	93,81	203,87	
3	SCR	114,00	266,63	
Mittelwert	SCR	104,07	262,54	51,32
1	AGR+SCR	252,44	812,41	
2	AGR+SCR	268,73	859,75	
3	AGR+SCR	272,04	858,40	
Mittelwert	AGR+SCR	264,40	843,52	130,40