

TEXTE

102/2026

Abschlussbericht

Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen

**Wissenschaftliche Beratung im Rahmen der
Entwicklung der Euro 7-Norm**

von:

Stefan Hausberger, Konstantin Weller, Martin Opetnik, Silke Lipp, Maurice Tödling
Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen (FVT) und Thermodynamik mbH, Graz

Christoph Heidt, Michel Allekotte,
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), Heidelberg

Norbert Ligterink, Rob Cuelenaere, Arian Eijk, Jessica de Ruiten, Armando Indrajana, Ruud
Verbeek, M. Paalvast
TNO, Den Haag

Benedikt Notter
INFRAS AG, Bern

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 102/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 51 102 0

Abschlussbericht

Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen

Wissenschaftliche Beratung im Rahmen der Entwicklung
der Euro 7-Norm

von

Stefan Hausberger, Konstantin Weller, Martin Opetnik,
Silke Lipp, Maurice Tödling

Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen
(FVT) und Thermodynamik mbH, Graz

Christoph Heidt, Michel Allekotte,

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
(ifeu), Heidelberg

Norbert Ligterink, Rob Cuelenaere, Arian Eijk, Jessica de
Ruiter, Armando Indrajana, Ruud Verbeek, M. Paalvast
TNO, Den Haag

Benedikt Notter

INFRAS AG, Bern

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

Durchführung der Studie:

Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg
Land (Bitte nur angeben, wenn nicht Deutschland)

Abschlussdatum:

Mai 2025

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 - Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Martin Kortschack, Martin Lange

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8052>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2026

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

Kurzbeschreibung: Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen

Am 8.5.2024 wurde mit der Verordnung (EU) 2024/1257 die Euro 7 Norm beschlossen, welche die zukünftigen Emissionsgrenzwerte für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge festlegt. Deren Entwicklung wurde über mehrere Jahre in den EU-Gremien verhandelt und in Form des CLOVE-Konsortiums wissenschaftlich begleitet. Um diesen Prozesses auf nationaler Ebene zu unterstützen, wurden im Rahmen des Projekts „Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen“ verschiedene Aspekte zu Euro 7 untersucht und die Ergebnisse dem Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt. Zentrale Fragestellungen hierbei waren a) Erfassung aller relevanten Fahrzustände und Betriebsbereiche, b) Weitere Absenkung der Grenzwerte gegenüber Euro 6/VI, c) zusätzliche Schadstoffe/Komponenten, d) Sicherstellung niedriger Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebenszeit und e) Optimierung der Messverfahren und des Typgenehmigungsprozesses. Neben der laufenden Beratung im Euro 7-Prozess wurden neue Emissionsfaktoren für das Handbuch Emissionsfaktoren Straßenverkehr für Euro 7-Fahrzeuge und zusätzliche Schadstoffe erstellt, Methoden zur Limitierung von Reifenabriebemissionen untersucht und Wirkungsabschätzungen für Euro 7 auf die Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland durchgeführt. Das Konsortium aus den vier Projektpartnern FVT, ifeu, INFRAS und TNO führte hierzu eigene Fahrzeugmessungen und Literaturrecherchen durch und bediente sich Simulationsmodellen wie PHEM, HBEFA oder TREMOD.

Abstract: National and international emission legislation for passenger cars, light and heavy commercial vehicles

On May 8, 2024, the Euro 7 standard was adopted with Regulation (EU) 2024/1257, which defines the future emission limits for passenger cars, light and heavy commercial vehicles. Its development was negotiated over several years in the EU bodies and scientifically monitored in the form of the CLOVE consortium. In order to support this process at national level, various aspects of Euro 7 were investigated as part of the project “National and international emissions legislation for passenger cars, light and heavy commercial vehicles” and the results were made available to the Federal Environment Agency. The central issues here were a) recording all relevant driving conditions and operating ranges, b) further reduction of the limit values compared to Euro 6/VI, c) additional pollutants/components, d) ensuring low emissions over the entire vehicle service life and e) optimization of the measurement procedures and the type approval process. In addition to providing ongoing advice on the Euro 7 process, new emission factors were created for the Road Transport Emission Factors Manual for Euro 7 vehicles and additional pollutants, methods for limiting tire abrasion emissions were investigated and impact assessments for Euro 7 on road traffic emissions in Germany were carried out. The consortium of the four project partners FVT, ifeu, INFRAS and TNO carried out their own vehicle measurements and literature research and used simulation models such as PHEM, HBEFA and TREMOD.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	17
Summary	23
1 Untersuchte Fragestellungen im Rahmen von Euro 7	30
2 Grenzwertefunktionen und Limitabsenkung	36
3 Relevanz neuer Schadstoffe und Ableitung von Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1	37
3.1 Messergebnisse.....	38
3.2 Zeitreihen Euro 0 bis Euro 6.....	50
4 Limit-Methoden für die Reifenabriebemissionen	57
4.1 Die Testmethode nach UN ECE 117	57
4.2 Datengrundlagen zum Abriebverhalten	59
4.3 Die Simulationsmethode PHEM/HBEFA 5.1.....	61
4.4 Ergebnisse Simulation Abrieb nach Segmenten	67
4.4.1 Istzustand.....	68
4.4.2 Mit Grenzwerten.....	72
4.5 Zusammenfassung und Empfehlungen.....	78
5 Ableitung von Euro 7- Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1.....	80
5.1 Pkw und LNF.....	80
5.2 Schwere Nutzfahrzeuge	85
6 Wirkungsabschätzung der Euro 7 Gesetzgebung für die Gesamtemissionen des Verkehrs in Deutschland bis 2040	91
6.1 Emissionsfaktoren.....	91
6.2 Fahrleistungen	94
6.3 Ergebnisse und Fazit	97
7 Quellenverzeichnis	100
A Durchführung von Messungen an Pkw und SNF.....	102
A.1 Aufgabenstellung	102
A.2 Methodik.....	102
A.2.1 Messungen PKW und LNF	102
A.2.2 Messungen SNF.....	103
A.3 Messprogramm PKW	104

A.3.1	Fahrzeug 1.....	105
A.3.2	Fahrzeug 2.....	110
A.4	Messprogramm schwere Nutzfahrzeuge.....	114
A.4.1	Vehicle and installation.....	114
A.4.2	Test program.....	117
A.4.3	Test results.....	121
A.4.4	Conclusions	123
A.4.5	Anhang.....	124
B	Grenzwertefunktionen und Limitabsenkung	141
B.1	Tasks.....	141
B.2	Flexible Emission Limits.....	141
B.2.1	Application for LDVs.....	145
B.2.2	Application for HDVs.....	165
B.3	Reduction of Emission Limits	176
B.3.1	Passenger Cars and LDVs	177
B.3.2	HDVs.....	184
B.4	Summary and Recommendations.....	199
B.4.1	Light-duty vehicles	199
B.4.2	Heavy-duty vehicles	200
B.5	Annex	202
B.5.1	Equations and Parameters Flexible Functions.....	202
B.5.2	Additional Figures for UBA data	204
B.5.3	Additional Figures On-road Monitoring.....	209
C	Biased driving (WBA).....	212
C.1	Einleitung	212
C.2	Fahren von Haltestelle zu Haltestelle; jede Fahrt besteht aus Teilzyklen	212
C.3	Verkehr in Verbindung mit hoher Arbeit	214
C.4	Sekundäre Themen	215
D	Analyse alternativer Methoden zur RDE-Testauswertung von schweren Nutzfahrzeugen in Euro 7 (TU Graz, Mai 2023)	217
D.1	Zusammenfassung	217
D.2	Aufgabenstellung	220
D.3	Mögliche Adaptionen am Vorschlag der EU-Kommission	220
D.4	5 Untersuchte Alternativen zur SNF Testauswertung.....	222
D.4.1	Option Eu 7.1	222

D.4.2	Option Eu 7.2	224
D.4.3	Option Eu 7.3	226
D.4.4	Option Eu 7.4	228
D.5	Anwendung der Optionen an EURO 6 Messwerten	230
E	On Board Monitoring (OBM)	245
E.1	Introduction	245
E.2	Observations for OBM in Euro-7	245
E.2.1	The use of sensors in emission control	245
E.2.2	Limited effectiveness of OBD for emissions	246
E.2.3	Lack of vehicle availability for ISC testing	246
E.2.4	Deterioration beyond the ISC requirements	246
E.3	Possible purposes of OBM	247
E.3.1	Reporting emissions	247
E.3.2	Readiness for ISC testing	247
E.3.3	Vehicle selection for ISC and MaSu	248
E.3.4	Non-compliance based on fleet data	248
E.3.5	Enforcing repair of defects	248
E.3.6	Simplifying PTI	249
E.4	Technical aspects of OBM	249
E.4.1	Translation concentrations into mass flow	249
E.4.2	Available sensors and their limitations	249
E.4.3	Cold start emissions and warm-up periods	250
E.4.4	Small sample bias for skewed distributions	250
E.5	Linking OBM and ISC/RDE	250
E.5.1	Trip level results, cold start emissions	251
E.5.2	Issues with evaluation methods	251

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der zukünftigen NO _x -Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland mit Euro 7 im finalen Rechtsakt vs. Kommissionsvorschlag	22
Abbildung 2:	An einem EURO 6d-TEMP PKW gemessene NO _x -Emissionen nach Kaltstart.....	36
Abbildung 3:	Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH ₃ CHO) von PKW und LNF nach Warmstart.....	39
Abbildung 4:	Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH ₃ CHO) von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C	40
Abbildung 5:	Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH ₃ CHO) von SNF nach Warmstart	40
Abbildung 6:	Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH ₃ CHO) von SNF nach Kaltstart bei 23°C.....	41
Abbildung 7:	Messergebnisse zu Formaldehyden (HCHO) von PKW und LNF nach Warmstart.....	41
Abbildung 8:	Messergebnisse zu Formaldehyden (HCHO) von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C	42
Abbildung 9:	Messergebnisse zu Formaldehyd (HCHO) von SNF nach Warmstart	42
Abbildung 10:	Messergebnisse zu Formaldehyd (HCHO) von SNF nach Kaltstart bei 23°C.....	43
Abbildung 11:	Messergebnisse zu Isocyan Säure (HNCO) Emissionen von PKW und LNF nach Warmstart.....	44
Abbildung 12:	Messergebnisse zu Isocyan Säure (HNCO) Emissionen von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C	44
Abbildung 13:	Messergebnisse zu Isocyan Säure Emissionen (HNCO) von SNF nach Warmstart.....	45
Abbildung 14:	Messergebnisse zu Isocyan Säure Emissionen (HNCO) von SNF nach Kaltstart bei 23°C	45
Abbildung 15:	Messergebnisse zu salpetriger Säure (HNO ₂) Emissionen von PKW und LNF nach Warmstart	46
Abbildung 16:	Messergebnisse zu salpetriger Säure (HNO ₂) Emissionen von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C	46
Abbildung 17:	Messergebnisse zu salpetriger Säure Emissionen (HNO ₂) von SNF nach Warmstart.....	47
Abbildung 18:	Messergebnisse zu salpetriger Säure Emissionen (HNO ₂) von SNF nach Kaltstart bei 23°C	47
Abbildung 19:	Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von PKW und LNF nach Warmstart.....	48
Abbildung 20:	Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C	48

Abbildung 21:	Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von SNF nach Warmstart	49
Abbildung 22:	Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von SNF nach Kaltstart bei 23°C.....	49
Abbildung 23:	Verfügbare Messdaten zu Formaldehyd-Emissionen (HCHO) von PKW mit Ottomotoren in betriebswarmem Zustand	52
Abbildung 24:	Verfügbare Messdaten zu Formaldehyd-Emissionen (HCHO) von PKW mit Dieselmotoren in betriebswarmem Zustand.....	53
Abbildung 25:	Verfügbare Messdaten zu Acetaldehyd-Emissionen (CH ₃ CHO) von PKW mit Dieselmotoren in betriebswarmem Zustand.....	54
Abbildung 26:	Mittlere Reifenabriebrate aus den ADAC Reifentests nach Dimension und Modelljahr jeweils für alle getesteten Reifen und für die 50% Reifen mit niedrigstem Abrieb (50 Perzentil)	60
Abbildung 27:	Reifenabriebrate aus den ADAC Reifentests nach Dimension und Modelljahr jeweils für alle getesteten Reifen aufgetragen nach steigender Abriebrate.....	61
Abbildung 28:	in (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) gemessener Abrieb bei Längskräften, einmal aufgetragen über Radleistung (links) und einmal über Rad-Schlupfleistung (rechts)	62
Abbildung 29:	Schematische Darstellung von Fahrtrichtung, Reifenmittenebene und Schräglaufwinkel α bei einer Kurvenfahrt.....	63
Abbildung 30:	Charakteristische Reifenabrieb-Polygone für die PM ₁₀ Emissionen bei Längs- und Querschlupf für die Simulation in PHEM sowie verfügbare Mess- und Literaturdaten	64
Abbildung 31:	Simulierter Reifenabrieb je km und je km/t für eine Variation der Fahrzeugmasse mit generischen Kurvenradien (alle anderen Parameter wie Euro 7 Otto PKW in HBEFA 5.1).....	66
Abbildung 32:	Simulierter Reifenabrieb je km/t für eine Variation des Luftwiderstandes mit generischen Kurvenradien (alle anderen Parameter wie Euro 7 Otto PKW in HBEFA 5.1)	66
Abbildung 33:	Simulierter Reifenabrieb je km und je km/t für eine Variation der Fahrzeugmasse auf gerader Strecke (alle anderen Parameter wie Euro 7 Otto PKW in HBEFA 5.1)	67
Abbildung 34:	Geschwindigkeits- und Höhenprofil des verwendeten Fahrzyklus	68
Abbildung 35:	Simulierter realer Reifenabrieb der PKW-Segmente über deren angenommener Reifentestmasse als [mg/Kfz-km] und als [mg/Kfz-km/t]	70
Abbildung 36:	Verbrenner-PKW-Neuzulassungen 2023 in Deutschland nach Segmenten und deren Gesamtfahrleistung	71
Abbildung 37:	Simulierter Reifenabrieb der PKW-Neuzulassungen mit Verbrennungsmotor 2023 in Deutschland nach Segmenten ...	72

Abbildung 38:	Funktion zur Reduktion des Reifenabriebs gegenüber dem heutigen Mittelwert nach Lage des Grenzwertes (GW) im Verhältnis zum heutigen Mittelwert des Abriebs	74
Abbildung 39:	Prozent der Reifenmodelle, die unter einem Abrieb-Grenzwert (GW) liegen, wobei der GW relativ zum Mittelwert der heutigen Reifen beschrieben ist.....	74
Abbildung 40:	Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien bezüglich der Anteile an Reifenmodellen je Segment (Traglastklasse), die bereits heute den Grenzwert einhalten würden	76
Abbildung 41:	Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien bezüglich der Reduktion des Reifenabriebs in Prozent je Segment infolge der Grenzwerte	77
Abbildung 42:	Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien bezüglich der Reduktion des Reifenabriebs je Segment in Tonnen pro Jahr infolge der Grenzwerte	78
Abbildung 43:	Euro 7 Emissionsgrenzwerte für PKW und LNF (Verordnung EU 2024/1257)	80
Abbildung 44:	EURO 6d M1 Benzin Motoremissionsniveau für CO im Vergleich zu EURO 7 Zielwert	83
Abbildung 45:	EURO 6d M1 Diesel Motoremissionsniveau für NOx im Vergleich zu EURO 7 Zielwert	84
Abbildung 46:	Euro 7 Emissionsgrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge (Verordnung EU 2024/1257)	86
Abbildung 47:	Mittlere NO _x -Emissionsfaktoren für die Wirkungsabschätzung von Euro 7 PKW	93
Abbildung 48:	Mittlere NO _x -Emissionsfaktoren für die Wirkungsabschätzung von Euro 7 SNF.....	94
Abbildung 49:	Pkw-Fahrleistung nach Emissionsstandard in TREMOD 6.53 und im WM-Szenario	96
Abbildung 50:	SNF-Fahrleistung nach Emissionsstandard in TREMOD 6.53 und im WM-Szenario	97
Abbildung 51:	Vergleich der zukünftigen NO _x -Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland mit Euro 7 im finalen Rechtsakt vs Kommissionsvorschlag	98
Abbildung 52:	Streckenverlauf der gefahrenen RDE-Route, Ries.....	105
Abbildung 53:	Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf der RDE-Route, Ries	105
Abbildung 54:	Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Beschleunigung.....	213
Abbildung 55:	Einfaches stilisiertes Profil zur Bestimmung der Teilstrecken-Eigenschaften von Halt zu Halt als Funktion der Reisegeschwindigkeit, der Beschleunigung und der	

	Gesamtstrecke. Während der Verzögerung wird keine Arbeit verrichtet.	215
Abbildung 56:	Messergebnisse – NO _x	232
Abbildung 57:	Conformity Factors – NO _x	233
Abbildung 58:	MAWs über der Zeit. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), NO _x	234
Abbildung 59:	MAWs aufsteigend geordnet. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), NO _x	235
Abbildung 60:	Sensitivität der MAW Anzahl. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), NO _x	236
Abbildung 61:	MAWs aufsteigend geordnet. Ausgewertet nach EURO 7.3 (Berücksichtigung gesamte Kaltstartphase, MAWs mit mehr als 6 % Leistung), NO _x	237
Abbildung 62:	MAWs über der Zeit. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), PN10.....	237
Abbildung 63:	MAWs aufsteigend geordnet. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), PN10.....	238
Abbildung 64:	Messwerte, PN10	239
Abbildung 65:	Konformitätsfaktoren, PN10	240
Abbildung 66:	Messergebnisse, N ₂ O.....	241
Abbildung 67:	Konformitätsfaktoren, N ₂ O.....	242
Abbildung 68:	Konformitätsfaktoren, CO	242
Abbildung 69:	Konformitätsfaktoren, NH ₃	243
Abbildung 70:	Konformitätsfaktoren, CH ₄	244

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der vorab untersuchten Aspekte im Projekt.....	31
Tabelle 2:	nicht limitierte Abgaskomponenten, die mit hoher Umweltrelevanz eingeschätzt wurden.....	37
Tabelle 3:	Für die Analyse der nicht limitierten Abgaskomponenten verwendete Messdaten.....	38

Tabelle 4:	Vorgeschlagene Verhältnisfaktoren für die neuen, nicht limitierten Abgaskomponenten in HBEFA 5.1, anzuwenden für PKW und LNF der Abgasstufen EURO 0 bis EURO 5, jeweils bezogen auf die betriebswarmen Emissionsfaktoren von EURO 6d-TEMP55
Tabelle 5:	Vorgeschlagene Verhältnisfaktoren für die neuen, nicht limitierten Abgaskomponenten in HBEFA 5.1, anzuwenden für PKW und LNF der Abgasstufen EURO 0 bis EURO 5, jeweils bezogen auf Kaltstartzusatzemissionen von EURO 6d-TEMP ..55
Tabelle 6:	Vorgeschlagene Verhältnisfaktoren für die neuen, nicht limitierten Abgaskomponenten in HBEFA 5.1, anzuwenden für SNF der Abgasstufen EURO 0 bis EURO V, jeweils bezogen auf die entsprechenden Emissionsfaktoren von EURO 6 D.....56
Tabelle 7:	Ergebnisse aus den ADAC Reifentests nach Dimension und Modelljahr60
Tabelle 8:	Verhältnisfaktoren zur Bestimmung anderer Partikelkenngößen aus den PM10 Modellergebnissen für Reifenabriebemissionen.....64
Tabelle 9:	In der Simulation verwendete Fahrzeugmassen und damit berechnete Reifenabriebwerte. Die Abriebrate je Tonne bezieht sich jeweils auf die simulierte Reifentestmasse (67% von max. zul. Masse)69
Tabelle 10:	Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien75
Tabelle 11:	Emissionsreduktion von Euro 6d auf Euro 7 Motoren für PKW und LNF84
Tabelle 12:	Emissionsniveau des Euro 7 SNF Modells gegenüber den EURO 7 Grenzwerten (1).....88
Tabelle 13:	Emissionsniveau des Euro 7 SNF Modells gegenüber den EURO 7 Grenzwerten (2).....89
Tabelle 14:	Annahmen zu Tampering für SNF und Reisebusse am Beispiel NO _x -Emissionen92
Tabelle 15:	Einführungszeiträume der Euro 7 Grenzwerte in den Szenarien95
Tabelle 16:	Vergleich der Emissionen weiterer Schadstoffe des Straßenverkehrs in Deutschland mit Euro 7 im finalen Rechtsakt vs. Kommissionsvorschlag98
Tabelle 17:	Fahrzeugdaten Fahrzeug 1106
Tabelle 18:	Gemessene Zyklen auf der PKW-Rolle Fahrzeug 1.....106
Tabelle 19:	Fahrwiderstandsbeiwerte Fahrzeug 1.....107
Tabelle 20:	CVS-Auswertung der PKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1.....107
Tabelle 21:	Randbedingungen RDE-Fahrten Fahrzeug 1.....108
Tabelle 22:	Messergebnisse Fzg. 1 gesamte RDE-Fahrt.....109
Tabelle 23:	Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Stadt Fzg. 1 ..109

Tabelle 24:	Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Überland Fzg. 1	109
Tabelle 25:	Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Autobahn Fzg. 1	109
Tabelle 26:	Fahrzeugdaten Fahrzeug 2	110
Tabelle 27:	Gemessene Zyklen auf der PKW-Rolle Fahrzeug 2.....	110
Tabelle 28:	Fahrwiderstandsbeiwerte aus Reifenlabel	111
Tabelle 29:	CVS-Auswertung der PKW-Rollenmessungen Fzg.2	111
Tabelle 30:	Randbedingungen RDE-Fahrten Fahrzeug 1.....	112
Tabelle 31:	Messergebnisse Fzg. 1 gesamte RDE-Fahrt.....	112
Tabelle 32:	Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Stadt Fzg. 1 ..	113
Tabelle 33:	Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Überland Fzg. 1	113
Tabelle 34:	Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Autobahn Fzg. 1	113
Tabelle 35:	Bei einem einfachen Fahrmuster von Haltestelle zu Haltestelle sind die Grenzwerte in kWh/km mit verschiedenen Abständen in Metern zwischen den Haltestellen verbunden. Dies wird für Höchstgeschwindigkeiten von 50, 80, 100 und 130 km/h ermittelt.....	213
Tabelle 36:	Liste von Euro 7 Randbedingungen, die in den Optionen beibehalten werden oder hier nicht analysiert wurden	221
Tabelle 37:	Liste von Euro 7 Randbedingungen, die in den untersuchten Optionen variiert wurden.....	221
Tabelle 38:	Randbedingungen in Option Eu 7.1 entsprechend dem Vorschlag der EU-Kommission von 11/2022.....	223
Tabelle 39:	Grenzwerte nach Option Eu 7.1 und nach EURO 6 im Vergleich	223
Tabelle 40:	Randbedingungen und Auswertemethodik in Option Eu 7.2. In Rot Änderungen gegenüber Eu 7.1, Blau hinterlegt sind zusätzliche Definitionen	224
Tabelle 41:	Mögliche Grenzwerte zum kombinierten Testergebnis nach Option Eu 7.2.....	226
Tabelle 42:	Randbedingungen und Auswertemethodik in Option Eu 7.3. In Rot Änderungen gegenüber Eu 7.1, blauer Text sind Änderungen gegenüber Eu 7.2, Blau hinterlegt sind zusätzliche Definitionen.....	226
Tabelle 43:	Mögliche Grenzwerte zum kombinierten Testergebnis nach Option Eu 7.3.....	227
Tabelle 44:	Randbedingungen und Auswertemethodik in Option Eu 7.4. In Rot Änderungen gegenüber Eu 7.1, grüner Text sind Änderungen gegenüber Option Eu 7.3, Blau hinterlegt sind zusätzliche Definitionen	229

Tabelle 45: Mögliche Grenzwerte zum kombinierten Testergebnis nach
Option Eu 7.4.....230

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
A	Querschnittsfläche in m ²
AES	(Auxiliary Emission Strategies)
AGG	Aggressiv
AGR	Abgasrückführung
ASC	Ammonia Slip Catalyst
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
BEV	Battery Electric Vehicle
BTX	Benzol, Toluol und Xylol
bzw.	beziehungsweise
C	Celsius
C₆H₆	Benzol
ca.	circa
CARB	California Air Resources Board
cc	Closed coupled (catalyst close to the engine)
CH₃CHO	(Acetaldehyd)
CH₄	Methan
CLOVE	Consortium for Low Vehicle Emissions
CO	Carbon monoxide (Deutsch: Kohlenmonoxid)
CO₂	Kohlendioxid
CPC	Condensation Particle Counter
CVS	Constant Volume Sampling
cw	Luftwiderstandsbeiwert
DBEFA	(einer Datenbank, in der alle Messdaten für das HBEFA (www.hbefa.net))
DF	Deterioration Factor (Verschlechterungsfaktor)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	Diesel-Oxidation-Catalyst
DPF	Diesel particle Filter
EEA	European Environment Agency (Deutsch: Europäischen Umweltagentur)

Abkürzung	Erläuterung
EFM	Exhaust Flow Meter
EGR	Exhaust-Gas-Recirculation
ERMES	European Research group on Mobile Emission Sources
ERMESv8	Test cycle from the European Research on Mobile Emission Sources - Version 8
ERMESv9	Test cycle from the European Research on Mobile Emission Sources - Version 9
EUL	End of useful life (currently 160.000 km for LDVs, 300.000 km for HDVs < 16t and 700.000 km for HDVs > 16t TPMLM)
EURO 6 D	Current emission limit regulation for HD engines
EURO 6d	Current emission limit regulation for LDVs
exkl.	exklusive
F	Kraft in N
FTIR	Fourier-Transformations-Spektrometer
FVT	Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik m.b.H.
g	Gramm
GGW	Gesamtgewicht
GHG	Green House Gas
GNSS	Global Navigation Satellite System
GTR	Global Technical Regulation
GW	Grenzwert
h	Stunde
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
HC	Hydrocarbons (Deutsch: Kohlenwasserstoffe)
HCHO	(Formaldehyd)
HDV	Heavy Duty Vehicle
HNCO	Isocyansäure
HNO₂	Salpetriger Säure
hp	Horse power ("PS") mit 1PS = 0.735 kW
hp-hr	Horse power hour mit 1hp-hr = 0.735 kWh

Abkürzung	Erläuterung
Hz	Herz
inkl.	inklusive
Intermed.	intermediate
ISC	In Service Conformity (HDV on-board emission test procedure in EU VI)
IUFC	Inrets Urbain Fluide Courte
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
Km	Kilometer
kt	Kilotonnen
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LDV	Light Duty Vehicle
LNF, LCV	Leichtes Nutzfahrzeug, Light Commercial Vehicle
MAWs	Moving Average Windows
max	maximal
mg	Milligramm
MIL	Malfunction Indication Lamp
n	Motordrehzahl
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
NEDC	New European Driving Cycle
NH ₃	Ammoniak
NMOG	Nicht-Methan Organische Gase
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
NRLP	Nationale Luftreinhalteprogramm
OBD	On-Board-Diagnose
OBM	On-Board Monitoring

Abkürzung	Erläuterung
PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PHEM	Passenger car and Heavy-duty Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN10, PN23	Particle number emissions (>10nm and > 23nm)
ppm	Parts per Million
PTI	Periodisch Technische Inspektion
R0, R1, R2	Fahrwiderstandsbeiwerte
RDE	Real Driving Emissions
RWC	Real World Cycle
s	Sekunde
SCR	Selective Catalytic Reduction (catalyst for NOx conversion)
SCRF	Selective Catalytic Reduction on Filter
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
t	Tonne
Temp.	Temperatur
TPM	Total Particle Mass (Deutsch: Reifenabrieb)
TREMOD	Transport Emission Model
TU Graz/ TUG	Technische Universität Graz
UBF	Upper bound function
v	Geschwindigkeit
V2O5	Vanadiumpentoxide
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle

Abkürzung	Erläuterung
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Zusammenfassung

Die Europäische Kommission (DG Clima, DG JRC) hat mit Beratung durch das CLOVE Konsortium (Consortium for Low Emitting Vehicles) von 2019 bis 2022 einen Vorschlag für die kommende Euro 7 Abgasgesetzgebung für PKW, LNF und SNF ausgearbeitet. Dieser Vorschlag wurde im Trilog zwischen Kommission, Parlament und Rat diskutiert und Kompromisse ausgearbeitet. Am 8.5.2024 wurde dann die Euro 7 Regulierung beschlossen (Verordnung (EU) 2024/1257 des Europäischen Parlaments und Rates). Die wesentliche Aufgabe dieses hier beschriebenen Projektes war die Ausarbeitung von Informationen, die für Positionsfindungen des UBA und BMU in diesem Prozess unterstützen sollten. Nach der Zusammenfassung der Ist-Situation wurden jeweils Verbesserungsoptionen und damit mögliche Emissionsminderungen analysiert.

Das Konsortium befasste sich insbesondere mit folgenden Themen:

- ▶ Erfassung aller relevanten Fahrzustände und Betriebsbereiche
- ▶ Weitere Absenkung der Grenzwerte gegenüber Euro 6/VI
- ▶ Erweiterung der Grenzwerte um zusätzliche Schadstoffe/Komponenten sowie abriebbedingte Partikelemissionen
- ▶ Sicherstellung niedriger Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebenszeit
- ▶ Optimierung der Messverfahren und des Typgenehmigungsprozesses

Dafür wurden zu Beginn 19 Fragestellungen („Aspekte“) definiert, die vom Projektteam abgearbeitet wurden. Da im Laufe der Euro 7 Entwicklung neue Fragestellungen erwartet wurden und auch aufgetreten sind, wurden auch „Ad-Hoc“ Fragestellungen bzw. Aspekte nach Bedarf ausgearbeitet. Je nach Fragestellung erfolgte die Bearbeitung durch Ifeu, TNO oder FVT oder gemeinsam. Die Aspekte wurden je nach Bedarf in Form von MS Power Point Folien oder als Kurzberichte in MS Word ausgearbeitet und dem Auftraggeber übermittelt und zumeist auch präsentiert und diskutiert.

Die meisten Aspekte waren speziell während des Prozesses der Euro 7 Ausarbeitung relevant, einige sind durch die Beschlüsse in der finalen Euro 7 Regulierung inzwischen nicht weiter aktuell. Der Hauptteil dieses Berichts gibt einen Überblick zu den geleisteten Arbeiten und behandelt die letzten, noch relevanten Ad-Hoc Aspekte im Detail.

Grenzwertefunktionen und Limitabsenkung

In dem Projekt wurden mögliche Grenzwertefunktionen und Limit Absenkungen im Detail behandelt (siehe Anhang B). Dabei wurden Optionen für neue Grenzwerte untersucht. Derzeit sind fixe Limits für die [g/km] bei PKW und LNF bzw. für die [g/kWh] für SNF definiert. Direkt nach Kaltstart entstehen jedoch wegen der dann noch nicht funktionalen Abgasnachbehandlung deutlich höhere Emissionen je Strecke als bei betriebswarmer Abgasnachbehandlung. Ein Grenzwert in [g/km] ist also immer ein Kompromiss, der für eine definierte Testlänge passt, für kürzere Strecken deutlich schwerer bis unmöglich einzuhalten ist, für längere Strecken dagegen geringere Anforderungen stellt. Demensprechend sind in EURO 6 / VI Mindesttestlängen für RDE Tests definiert (z.B. 16 km für Innerorts PKW RDE-Tests). Dieser Effekt betrifft alle Abgaskomponenten, die durch Katalysatoren signifikant reduziert werden (NO_x, CO, HC, CH₄). Für diese wäre ein Grenzwert in Form einer Geradengleichung (Grenzwert = k * Strecke + D), mit „D“ als Offset zur Berücksichtigung der Kaltstartemissionen sinnvoll. Damit könnten insbesondere auch längere Testfahrten sinnvoll mit niedrigeren Werten für das betriebswarme Fahren limitiert werden.

Im Anhang Abschnitt B wurden unterschiedliche Funktionen und Grenzwerte analysiert, indem Funktionen an gemessene Tests aktueller Kfz angepasst und dann gesenkt wurden. Da die beschlossene Euro 7 Regulierung diese Option, welche in ähnlicher Form auch im Vorschlag der Kommission enthalten war, nicht aufgegriffen hat, wird auf eine detaillierte Beschreibung in diesem Bericht verzichtet.

Relevanz neuer Schadstoffe und Ableitung von Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1

Im Zuge der Arbeiten zu der Euro 7 Gesetzgebung wurde auch untersucht, ob weitere Abgaskomponenten in die Regulierung aufgenommen und mit Grenzwerten versehen werden sollten. Dafür wurden alle Messungen aus der DBEFA, einer Datenbank, in der alle Messdaten für das HBEFA (www.hbefa.net) gesammelt werden, nach kalt und warm gestarteten Abgastests ausgewertet und die Relevanz der Abgaskomponenten nach Umweltschädlichkeit der Komponente und dem Niveau im Kfz-Abgas bewertet. Für die folgende Komponenten wurden Emissionsfaktoren abgeleitet:

- ▶ Acetaldehyd (CH₃CHO)
- ▶ Formaldehyd (HCHO)
- ▶ Isocyan Säure (HNCO)
- ▶ Salpetrige Säure (HNO₂)
- ▶ Ammoniak (NH₃)

Mithilfe der DBEFA-Messdaten konnten die Emissionen für PKW und LNF ab Euro 6-d-temp bzw. SNF ab Euro VI AB bestimmt werden. Die Emissionen älterer Fahrzeuge wurden teilweise mit eigenen Messungen, aber überwiegend mithilfe von Literaturdaten ergänzt.

Limit-Methoden für die Reifenabriebemissionen

In diesem Ad-Hoc Thema sollten Optionen zur zukünftigen Limitierung von Reifenabriebemissionen von PKW und LNF in Euro 7 untersucht werden. Als Testverfahren wird der derzeitige Entwurf zum Konvoi-Verfahren nach UN ECE Regulierung Nr. 117⁷ unterstellt. Ab dem Jahr 2028 sollen neue Reifenmodelle, ab 2030 alle neuen Reifen noch zu definierende Grenzwerte erfüllen. Ziel der Analyse war es alternative Limit-Methoden zu untersuchen und zu bewerten:

- ▶ Ein einheitliches Limit in [mg/km/t]
- ▶ Ein einheitliches Limit in [mg/km]
- ▶ Ein Limit entsprechend dem erwarteten Verlauf der [mg/km/t] über der Testmasse

Hierfür wurde das von FVT neu entwickelte Reifenabriebs-Simulationsmodell für das HBEFA 5.1 genutzt, welches den Reifenabrieb aus der Schlupfleistung am Kontakt Reifen und Fahrbahn berechnet. Als Testdaten wurden Messwerte des ADAC-Reifentests und aus der Literatur verwendet. Eine Abschätzung der Gesamtemissionen für die deutsche PKW- und LNF-Flotte wurde mithilfe von Zulassungsdaten des KBA und Fahrleistungen aus dem Modell TREMOD durchgeführt. Die Analysen der Abhängigkeiten des Reifenabriebs von Fahrzeugmasse und Fahrwiderständen mit dem neuen Simulationsmodell für HBEFA 5.1 aus (Hausberger, 2025) ergibt:

Die Simulation lässt erwarten, dass der Reifenabrieb in [mg/km] proportional mit der Fahrzeugmasse steigt. Die Simulation zeigt zwar eine Zunahme des Abriebs mit der Masse, aber

unterproportional. Die Modellunsicherheit ist mangels ausreichender Messdaten allerdings noch hoch.

Damit führt eine Normierung des Abriebs mittels Division durch die Fahrzeug-Testmasse auch nicht unbedingt zu masse-unabhängigen Abriebraten in [mg/km/t]. Die Simulation ergibt, dass die Abriebrate in [mg/km/t] mit zunehmender Fahrzeugtestmasse bei identischen Reifeneigenschaften sinkt.

Ursache ist die Abhängigkeit des Abriebs von der Schlupfleistung aus Längs- und Querkraften. Während die Schlupfleistung in Querrichtung, wie sie bei Kurvenfahrten auftritt, proportional zur Fahrzeugmasse ist, ist sie in Längsrichtung auch vom Luftwiderstand abhängig, der sich nicht zwingend proportional zur Masse ändert.

Ohne umfangreiche Messdaten sollten an der UN ECE Nr. 117⁷ keine umfassenden Änderungen vorgeschlagen werden. Eine Möglichkeit wäre, das Verhältnis des Luftwiderstands von Testfahrzeug und Referenzfahrzeug proportional zum Verhältnis derer Massen anzusetzen (mit Toleranzmarge), wenn nicht idente Fahrzeuge verwendet werden können. Der Luftwiderstand ist definiert durch $C_w \times A$ bzw. f_2 im Fahrwiderstandspolynom.

Grundsätzlich ist es begrüßenswert, dass erstmals Testmethoden und Grenzwerte für Reifenabrieb eingeführt werden. Eine Überprüfung der Methoden auf Verbesserungspotenzial sollten aber geplant werden, wenn dann mehr Messdaten aus den Typisierungen und zu erwartenden Forschungsprojekten vorliegen. Damit könnten Einflüsse der Testmasse und anderer Randbedingungen besser quantifiziert und die eventuell derzeit vorhandenen Unschärfen reduziert werden. Solche Unschärfen können ja genutzt werden, im Rahmen der definierten Testbedingungen optimale Ergebnisse zu erzielen. Damit würden sich Senkungen der Grenzwerte eventuell in deutlich geringerem Umfang in der Realität wiederfinden.

Die im Simulationsmodell genutzten Messdaten zeigten eine sehr breite Streuung der luftgetragenen Abriebemissionen (PM10 und PN) je Kilometer zwischen verschiedenen Reifen. Ein zusätzliches Testverfahren, in dem auch diese Abriebpartikel getestet werden können wäre als Ergänzung zur Messung des gesamten Abriebs jedenfalls auch wünschenswert.

Ableitung von Euro 7- Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1

Die Emissionsfaktoren für PKW, LNF, SNF und Busse wurde basierend auf dem finalen Rechtsakt der Euro 7 Gesetzgebung (Regulierung EU 2024/1257) abgeleitet. Dieser sieht gegenüber Euro 6/VI eine Verschärfung der Dauerhaltbarkeitsanforderungen und der Überwachung im Betrieb vor. Für SNF und Busse erfolgt zusätzliche eine deutliche Reduktion der Grenzwerte gegenüber Euro VI. Um sicherzustellen, dass alle Anforderungen erfüllt werden, wurde das Simulationsmodell PHEM verwendet.

Die technischen Fahrzeugspezifikationen für die Euro 7 Fahrzeuge wurden für **PKW** auf Grundlage von Trends in der Zulassungsstatistik abgeleitet. Bei LNF wurde keine spezifischen Änderungen gegenüber EURO 6 Modellen angenommen, da die Klassifizierung der leichten Nutzfahrzeuge N1-I bis N1-III unverändert bleibt.

Um die zur Erfüllung der Limits nötigen Reduktionen für Euro 7 abzuschätzen, wurde eine Simulation der Euro 7 Fahrzeuge in definierten Situationen durchgeführt. Dazu wurden der WLTC, drei repräsentative HBEFA-Ersatzzyklen (Stadt, Überland und Autobahn) sowie zwei typische RDE-Zyklen simuliert und die warmen Emissionen bestimmt. Die Kaltstartzusatzemissionen wurden im WLTC bei 23°C bestimmt, während für die HBEFA-Ersatzzyklen und RDE-Zyklen 0°C gewählt wurden, um ein worst-case Szenario darzustellen.

Ein wichtiger Bestandteil bei diesem Vergleich ist der angenommene Sicherheitsabstand, mit welchem die einzuhaltenden Grenzwerte unterschritten werden sollen. Dabei wurden 25 % für

den WLTC und 40 % für alle RDE-Zyklen angenommen. Beispielhaft bedeutet dies, wenn der Grenzwert CO-Emissionen eines Benzinfahrzeuges 1000 mg/km beträgt, ist der Zielwert im WLTC 750 mg/km und bei RDE-Zyklen 600 mg/km. Mit den 25% Abstand im WLTC werden Serienstreuungen abgesichert und mit dem größeren Abstand in RDE zusätzliche Unsicherheiten bezüglich Fahrstil, Temperatur und Höhenprofil. Die Grenzwerte mit dem Sicherheitsabstand müssen am Ende der in EURO 7 definierten Fahrzeuglebensdauer eingehalten werden, so dass auch die Alterungseffekte berücksichtigt werden.

Um die Euro 7 Emissionsziele zu erreichen, sind bei Dieselfahrzeugen nur Maßnahmen für NO_x nötig. Die Maßnahmen, welche dafür gesetzt werden können, sind in Kapitel 5.2 beschrieben. Im Wesentlichen sind das die Verwendung größerer SCR-Volumen und/oder besserer Beschichtungen sowie ein weiter verbessertes Temperaturmanagement.

Bei Benzinfahrzeugen sollten alle Emissionskomponenten reduziert werden. Der Einsatz verbesserter Materialien und Beschichtungsmethoden für Katalysatoren und Filter, größere Kat- und Filtervolumen, genauere Lambda-Regelung und ggf. AGR in Volllastbereichen sind mögliche Technologien um die (eher geringen) Reduktionsziele zu erreichen. Die Ziele zur Reduktion der Kaltstartzusatzemissionen können durch eine Verbesserung der Isolierung des Abgasstranges sowie innermotorische Heizstrategien erreicht werden.

Die Euro 7-Emissionsfahrzeuge für **schwere Nutzfahrzeuge (SNF)** wurden auf Grundlage eines sog. Hochlasttest und eines Niederlasttests, welche auf bereits aufgezeichneter Realfahrten basieren, untersucht. Der sogenannte Hochlasttest beginnt mit einer hochlastigen Bergauffahrt im Stadtgebiet. Durch die hohe Last und die daraus folgenden hohen Abgastemperaturen heizen sich Motor und Abgasnachbehandlung zwar sehr schnell auf, aber vor Erreichen des Betriebsfensters sind die Rohemissionen sehr hoch. Der Niederlasttest startet mit einer sehr niederlastigen Stadtfahrt, wobei die durchschnittliche Leistung gerade über den für einen gültigen Test geforderten sechs Prozent der Nennleistung liegt. In dieser Phase sind die Rohemissionen zwar verhältnismäßig gering, aber das Aufheizen des Systems dauert durch die geringeren Abgastemperaturen länger. Am Ende der Niederlastfahrt enthält der Zyklus dann eine hochlastige Bergauffahrt, die gerade in den ersten Sekunden durch die abrupte Lasterhöhung hohe Ansprüche an die Abgasnachbehandlung stellt. Zudem wurden die Umgebungstemperaturen zu Beginn des Tests variiert.

Das Entwicklungsziel wird so definiert, dass aufgrund von Serienstreuung und Absicherung hinsichtlich noch herausfordernder Fahrzyklen als die definierten worst-case Szenarien der Grenzwert bei der maximal zulässigen Laufleistung in allen RDE Tests mit einem Sicherheitsabstand von mindestens 50 % unterschritten wird. Im WHTC wurde der Sicherheitsabstand auf 30 % festgelegt, weil der Zyklus bekannt ist und nur die Serienstreuung beachtet werden muss. Wie bei PKW und LNF müssen auch die SNF die Grenzwerte mit dem Sicherheitsabstand am Ende der in EURO 7 definierten Fahrzeuglebensdauer eingehalten werden.

Um das Entwicklungsziel bei NO_x in allen worst-case Testzyklen zu erreichen, wurde das Abgasheizen erhöht, was zu höheren Temperaturen in der Abgasnachbehandlung und somit besseren Konvertierungsraten führt. Dies wirkt sich speziell im Kaltstart und bei niederlastigen Fahrbedingungen positiv auf die NO_x-Emissionen aus. Des Weiteren wurden die Wärmeverluste im Abgasstrang reduziert. Dies wird durch eine Verbesserung der Isolierung des Abgasstrangs erreicht. Eine weitere Maßnahme ist die Absenkung der Grenztemperatur für die AdBlue-Einspritzung, welche durch eine prinzipielle Systemweiterentwicklung erreicht werden kann. Zudem wurde die NH₃-Speicherfähigkeit des SCR-Katalysators aufgrund von angenommenen Weiterentwicklungen bei den Katalysatormaterialien erhöht. Die Verbesserung des SCR-Katalysators wirkt sich auch durch verbesserte NO_x-Konvertierungsraten und einen

verringerten Einfluss von Alterungseffekten aus. Durch die Erhöhung der AGR-Rate werden zusätzlich die motorischen NO_x-Emissionen gesenkt, was v.a. im Kaltstart wichtig ist. Im Vergleich zum Euro 6 DE Basismodell werden die NO_x-Emissionen durch diese Maßnahmen je nach Fahrsituation um 60 bis 90 % reduziert. Somit liegt der Emissionswert im für NO_x herausforderndsten ISC-Szenario (Verteiler-LKW, Hochlast im Kaltstart, Umgebungstemperatur -7°C) bei 53 % des Euro 7 Grenzwerts. Im WHTC bei -7°C unterschreiten die NO_x-Emissionen den Grenzwert um etwa ein Drittel. Die Maßnahmen führen somit selbst unter worst-case Szenarien zu einer Erfüllung des Entwicklungsziels für Euro 7.

Die NH₃-Emissionen wurden hauptsächlich durch eine angenommene Verbesserung der Regelung der AdBlue-Dosierung in Kombination mit dem Schlupfkatalysator und einer Reduktion der alterungsbedingten Emissionserhöhungen durch Materialweiterentwicklung im Vergleich zu Euro VI DE um bis zu 70 % verringert. Dadurch werden die Euro 7 Entwicklungsziele im WHTC und unter worst-case ISC-Testbedingungen erreicht.

N₂O wird mithilfe einer verbesserten AdBlue-Einspritzungsstrategie und dem Einsatz von Katalysatormaterialien, die weniger zur N₂O-Bildung neigen, z.B. Vanadium, reduziert. Diese Maßnahmen führen im Vergleich zu Euro VI DE zu 30 % geringeren Emissionen und somit zum Erreichen der Euro 7 Entwicklungsziele.

Durch die angeführten Maßnahmen werden keine signifikanten Auswirkungen auf das Emissionsverhalten bei PN10, NMHC/NMOG und CH₄ erwartet. Da diese Emissionswerte bei Euro VI DE bereits auf geringem Niveau im Vergleich zu ihren jeweiligen Grenzwerten liegen waren hinsichtlich dieser Komponenten somit auch keine Reduktionsschritte zur Erreichung der Euro 7 Grenzwerte nötig.

Das auf Basis von LKW-Daten erstellte PHEM-Emissionsmodell wird auch für Reise- und Stadtbusse genutzt. Vorab wurden zu Validierungszwecken deshalb entsprechende Fahrzyklen simuliert und die Funktion des Modells geprüft. Dieses führt bei Bussen zu ähnlichen Reduktionsraten von Euro VI DE zu Euro 7 wie bei LKW und kann somit auch für diese Fahrzeugklassen verwendet werden.

Neben dem Euro 7 Emissionsmodell wurde zusätzlich noch eine Reduktion des Anteils an manipulierten Fahrzeugen in der Flotte für Euro 7 im Vergleich zu Euro VI angenommen. Durch die voraussichtlich effektivere Überwachung anhand der Euro 7 OBM Regulierungen wird eine Halbierung angenommen. Bei NO_x bedeutet dies zum Beispiel eine Reduktion von zehn Prozent in Euro VI zu fünf Prozent in Euro 7.

Wirkungsabschätzung der Euro 7 Gesetzgebung für die Gesamtemissionen des Verkehrs in Deutschland bis 2040

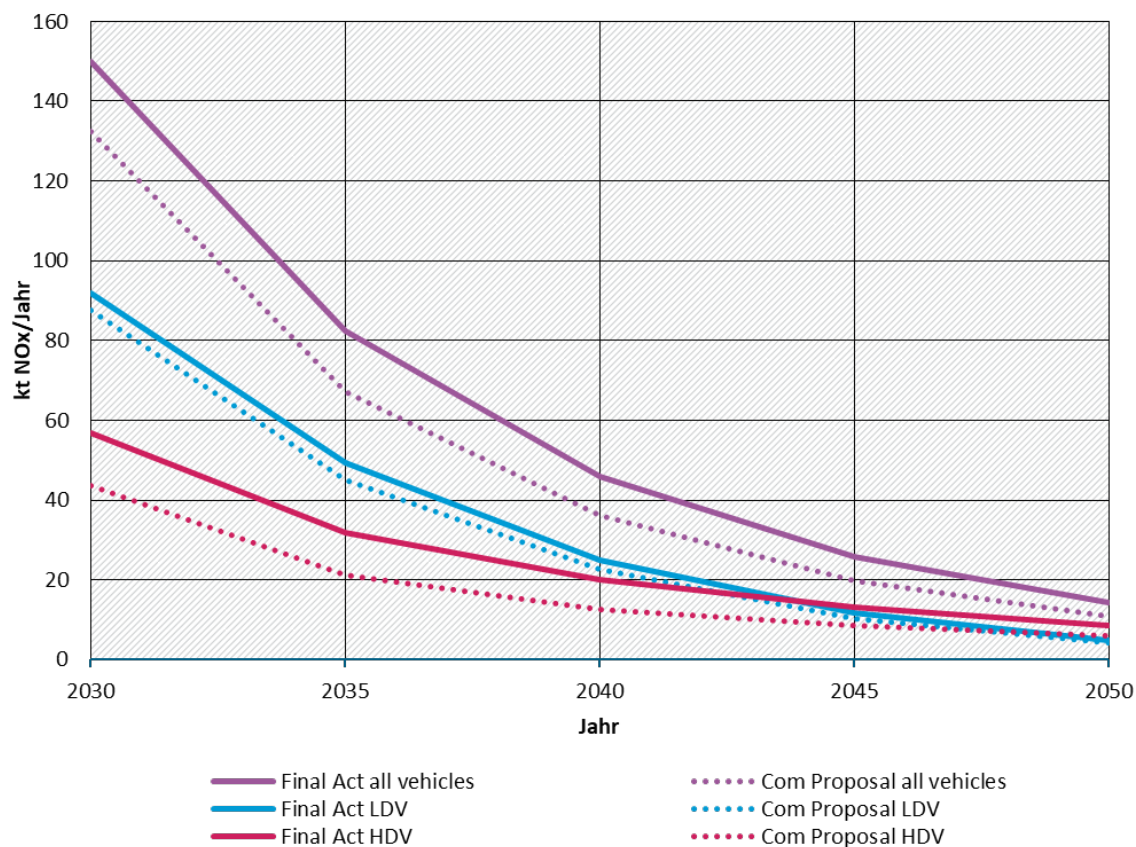
Neben der Ableitung von Emissionsfaktoren (siehe voriger Abschnitt) wurde die Wirkung der Euro 7-Gesetzgebung auf die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland untersucht. Dabei wurden die Euro 7-Gesetzgebung des finalen Rechtsakts mit dem Vorschlag der EU-Kommission vom November 2022 in Form von zwei Szenarien gegenübergestellt. Letzteres war die Grundlage der Emissionsprognosen für das nationale Luftreinhalteprogramm (NRLP) der deutschen Bundesregierung im Jahr 2024 und die dort verwendeten Emissionsfaktoren konnten für den Vergleich verwendet werden.

Im Kommissionsvorschlag wurde hierbei eine um ca. ein bis zwei Jahre frühere Einführung als im finalen Rechtsakt angenommen. Im Szenario mit dem finalen Rechtsakt ist der Anteil von Euro 7- Pkw mit 16 % der Pkw im Vergleich mit dem Szenario Kommissionsvorschlag mit 26 % im Jahr 2030 deutlich geringer. Bei den SNF ist der Anteil der Euro 7-SNF mit 26 % gegenüber 41 % ebenfalls deutlich geringer. Für beide Fahrzeugkategorien sinkt der Anteil der Euro 7-Fahrzeuge jedoch spätestens nach 2040 aufgrund der Zunahme der für die Erfüllung der CO₂-

Flottengrenzwerte erforderlichen Elektrofahrzeuge und des damit verbundenen Rückgangs der Verbrenner. Neben der früheren Einführung zeichnet sich das Szenario „Kommissionsvorschlag“ durch strengere Anforderungen an Euro 7 aus, z.B. durch die Absenkung des NO_x-Grenzwerts für Diesel-Pkw auf 60 mg/km im WLPT.

In beiden Szenarien sinken die NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland zwischen 2030 und 2050 signifikant. Im Szenario „Kommissionsvorschlag“ sind diese jedoch im Jahr 2030 um ca. 18 kt NO_x geringer als im Szenario mit dem finalen Rechtsakt mit ca. 150 kt NO_x. Den größten Einfluss auf den Unterschied haben die SNF, deren Emissionen um ca. 13 kt NO_x geringer liegen, da die spezifischen Emissionsfaktoren für Euro 7 SNF im COM-Vorschlag deutlich geringer sind und durch die frühere Einführung eine höhere Minderung erreichen.

Abbildung 1: Vergleich der zukünftigen NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland mit Euro 7 im finalen Rechtsakt vs. Kommissionsvorschlag



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Anmerkungen: LDV (Light duty vehicles) umfassen PKW und LNF, HDV (Heavy Duty Vehicles) umfassen SNF und Busse

Zusätzlich zu NO_x ergibt das Szenario mit dem Kommissionsvorschlag auch bei weiteren Schadstoffen, insbesondere Lachgas (N₂O), Ammoniak (NH₃) und Methan (CH₄) Minderungen.

Die Wirkungsabschätzung zeigt, dass die Änderungen der Euro 7-Gesetzgebung im finalen Rechtsakt gegenüber dem deutlich ambitionierteren Vorschlag der EU-Kommission zu einer langsameren Verbesserung der Luftqualität in Deutschland führen dürften. Da die verwendeten Emissionsfaktoren noch aus vorläufigen Daten im Rahmen der Entwicklung des HBEFA 5.1 stammt, sind mit den Emissionsfaktoren des finalen HBEFA 5.1. jedoch abweichende Ergebnisse möglich.

Summary

The European Commission (DG Clima, DG JRC), with advice from the CLOVE consortium (Consortium for Low Emitting Vehicles) from 2019 to 2022, has drawn up a proposal for the upcoming Euro 7 emissions legislation for passenger cars, light commercial vehicles and light commercial vehicles. This proposal was discussed in a trilogue between the Commission, Parliament and Council and compromises were worked out. The Euro 7 regulation was then adopted on May 8, 2024 (Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council). The main task of the project described here was to prepare information to support the UBA and BMU in taking a position in this process. After summarizing the current situation, improvement options and thus possible emission reductions were analyzed.

The consortium dealt with the following topics in particular:

- ▶ Coverage of all relevant driving conditions and operating ranges
- ▶ Further reduction of the limit values compared to Euro 6/VI
- ▶ Extension of the limit values to include additional pollutants/components and abrasion-related particulate emissions
- ▶ Ensuring low emissions over the entire vehicle service life
- ▶ Optimization of the measurement methods and the type approval process

To this end, 19 questions (“aspects”) were defined at the beginning, which were worked through by the project team. As new questions were expected and also arose in the course of the Euro 7 development, “ad hoc” questions or aspects were also developed as required. Depending on the issue, the work was carried out by Ifeu, TNO or FVT or jointly. The aspects were prepared as required in the form of MS Power Point slides or as short reports in MS Word and submitted to the client and usually also presented and discussed.

Most of the aspects were particularly relevant during the Euro 7 drafting process, while some are no longer relevant due to the decisions taken in the final Euro 7 regulation. The main part of this report provides an overview of the work carried out and deals in detail with the final, still relevant ad hoc aspects.

Limit value functions and limit reduction

The project dealt with possible limit value functions and limit reductions in detail (see Appendix B). Options for new limit values were examined. Fixed limits are currently defined for [g/km] for passenger cars and light commercial vehicles and for [g/kWh] for light commercial vehicles. Immediately after a cold start, however, significantly higher emissions per distance are produced than when the exhaust gas aftertreatment system is warm due to the fact that the exhaust gas aftertreatment system is not yet functional. A limit value in [g/km] is therefore always a compromise that is suitable for a defined test length, is significantly more difficult or even impossible to comply with for shorter distances, but sets lower requirements for longer distances. Accordingly, EURO 6 / VI defines minimum test lengths for RDE tests (e.g. 16 km for urban passenger car RDE tests). This effect affects all exhaust gas components that are significantly reduced by catalytic converters (NO_x, CO, HC, CH₄). For these, a limit value in the form of a linear equation (limit value = k * distance + D), with “D” as an offset to take account of

cold-start emissions, would make sense. This would make it possible to limit longer test drives in particular with lower values for warm driving.

In Appendix Section B, different functions and limit values were analyzed by adapting functions to measured tests of current vehicles and then lowering them. As the adopted Euro 7 regulation did not take up this option, which was also included in a similar form in the Commission's proposal, a detailed description is not provided in this report.

Relevance of new pollutants and derivation of emission factors for the HBEFA 5.1

In the course of the work on the Euro 7 legislation, it was also investigated whether further exhaust gas components should be included in the regulation and provided with limit values. For this purpose, all measurements from the DBEFA, a database in which all measurement data for the HBEFA (www.hbefa.net) is collected, were evaluated according to cold and warm started exhaust gas tests and the relevance of the exhaust gas components was assessed according to the environmental harmfulness of the component and the level in the vehicle exhaust gas. Emission factors were derived for the following components

- ▶ Acetaldehyde (CH₃CHO)
- ▶ Formaldehyde (HCHO)
- ▶ Isocyanic acid (HNCO)
- ▶ Nitrous acid (HNO₂)
- ▶ Ammonia (NH₃)

The DBEFA measurement data was used to determine the emissions for passenger cars and light commercial vehicles from Euro 6-d-temp and light commercial vehicles from Euro VI AB. The emissions of older vehicles were partly supplemented with our own measurements, but mainly with the help of literature data.

Limit methods for tire abrasion emissions

In this ad hoc topic, options for the future limitation of tire abrasion emissions from passenger cars and light commercial vehicles in Euro 7 were to be investigated. The current draft of the convoy method according to UN ECE Regulation No. 1178 is assumed as the test method. From 2028, new tire models and from 2030 all new tires are to meet limit values yet to be defined. The aim of the analysis was to investigate and evaluate alternative limit methods:

- ▶ A uniform limit in [mg/km/t]
- ▶ A uniform limit in [mg/km]
- ▶ A limit corresponding to the expected progression of [mg/km/t] over the test mass

For this purpose, the tire wear simulation model newly developed by FVT for the HBEFA 5.1 was used, which calculates the tire wear from the slip power at the tire-road contact. Measured values from the ADAC tire test and from the literature were used as test data. An estimate of the total emissions for the German passenger car and light commercial vehicle fleet was carried out using registration data from the KBA and mileage data from the TREMOD model. The analyses of the dependencies of tire abrasion on vehicle mass and driving resistance with the new simulation model for HBEFA 5.1 from (Hausberger, 2025) results in:

The simulation suggests that tire abrasion in [mg/km] increases proportionally with vehicle mass. Although the simulation shows an increase in abrasion with mass, it is disproportionately low. However, the model uncertainty is still high due to a lack of sufficient measurement data.

This means that standardizing the abrasion by dividing by the vehicle test mass does not necessarily lead to mass-independent abrasion rates in [mg/km/t]. The simulation shows that the abrasion rate in [mg/km/t] decreases with increasing vehicle test mass with identical tire properties.

The reason for this is the dependence of the abrasion on the slip performance from longitudinal and lateral forces. While the slip power in the transverse direction, as it occurs when cornering, is proportional to the vehicle mass, in the longitudinal direction it is also dependent on the air resistance, which does not necessarily change in proportion to the mass.

Without extensive measurement data, no comprehensive changes should be proposed to UN ECE No. 1178. One possibility would be to set the ratio of the aerodynamic drag of the test vehicle and the reference vehicle proportional to the ratio of their masses (with a tolerance margin) if identical vehicles cannot be used. The aerodynamic drag is defined by $C_w \times A$ or f_2 in the driving resistance polynomial.

In principle, it is to be welcomed that test methods and limit values for tire abrasion are being introduced for the first time. However, a review of the methods for improvement potential should be planned when more measurement data from the typing and expected research projects is available. This would make it possible to better quantify the influences of the test mass and other boundary conditions and reduce any uncertainties that may currently exist. Such uncertainties can be used to achieve optimum results within the defined test conditions. This would mean that reductions in the limit values would possibly be reflected to a much lesser extent in reality.

The measurement data used in the simulation model showed a very wide spread of airborne abrasion emissions (PM10 and PN) per kilometer between different tires. An additional test procedure in which these abrasion particles can also be tested would also be desirable as a supplement to the measurement of total abrasion.

Derivation of Euro 7 emission factors for the HBEFA 5.1

The emission factors for passenger cars, light commercial vehicles, light commercial vehicles and buses were derived based on the final legal act of the Euro 7 legislation (Regulation EU 2024/1257). Compared to Euro 6/VI, this provides for stricter durability requirements and monitoring during operation. For SNF and buses, there is an additional significant reduction in the limit values compared to Euro VI. The PHEM simulation model was used to ensure that all requirements are met.

The technical vehicle specifications for Euro 7 vehicles were derived for passenger cars on the basis of trends in registration statistics. No specific changes were assumed for light commercial vehicles compared to EURO 6 models, as the classification of light commercial vehicles N1-I to N1-III remains unchanged.

In order to estimate the reductions required to meet the limits for Euro 7, a simulation of Euro 7 vehicles was carried out in defined situations. For this purpose, the WLTC, three representative HBEFA replacement cycles (urban, interurban and highway) and two typical RDE cycles were

simulated and the warm emissions determined. The cold start additional emissions were determined in the WLTC at 23°C, while 0°C was selected for the HBEFA replacement cycles and RDE cycles to represent a worst-case scenario.

An important component of this comparison is the assumed safety margin, which is intended to keep emissions below the limit values to be complied with. Here, 25% was assumed for the WLTC and 40% for all RDE cycles. As an example, this means that if the limit value for CO emissions of a petrol vehicle is 1000 mg/km, the target value in the WLTC is 750 mg/km and 600 mg/km for RDE cycles. The 25 % distance in the WLTC is used to safeguard against standard deviations and the larger distance in RDE is used to safeguard against additional uncertainties regarding driving style, temperature and altitude profile. The limit values with the safety margin must be complied with at the end of the vehicle service life defined in EURO 7, so that the effects of ageing are also taken into account.

In order to achieve the Euro 7 emission targets, only measures for NO_x are necessary for diesel vehicles. The measures that can be taken for this are described in chapter 5.2. Essentially, these are the use of larger SCR volumes and/or better coatings as well as further improved temperature management.

In the case of petrol vehicles, all emission components should be reduced. The use of improved materials and coating methods for catalytic converters and filters, larger catalytic converter and filter volumes, more precise lambda control and, if necessary, EGR in full load ranges are possible technologies for achieving the (rather low) reduction targets. The targets for reducing additional cold start emissions can be achieved by improving the insulation of the exhaust tract and internal engine heating strategies.

The Euro 7 emission vehicles for heavy commercial vehicles (SNF) were examined on the basis of a so-called high-load test and a low-load test, which are based on previously recorded real-world driving. The so-called high-load test begins with a high-load uphill drive in an urban area. Due to the high load and the resulting high exhaust gas temperatures, the engine and exhaust gas aftertreatment system heat up very quickly, but the raw emissions are very high before the operating window is reached. The low-load test starts with very low-load city driving, whereby the average power output is just above the six percent of nominal power required for a valid test. Although the raw emissions are relatively low in this phase, the system takes longer to heat up due to the lower exhaust gas temperatures. At the end of the low-load drive, the cycle then includes a high-load uphill drive, which places high demands on the exhaust gas aftertreatment system, especially in the first few seconds due to the abrupt increase in load. In addition, the ambient temperatures were varied at the start of the test.

The development goal is defined in such a way that the maximum permissible mileage falls below the limit value in all RDE tests with a safety margin of at least 50 % due to series dispersion and protection with regard to even more challenging driving cycles than the defined worst-case scenarios. In the WHTC, the safety margin was set at 30% because the cycle is known and only the series dispersion needs to be taken into account. As with passenger cars and light commercial vehicles, the SNF must also comply with the limit values with the safety margin at the end of the vehicle service life defined in EURO 7.

In order to achieve the development target for NO_x in all worst-case test cycles, the exhaust gas heating was increased, which leads to higher temperatures in the exhaust gas aftertreatment

and therefore better conversion rates. This has a positive effect on NO_x emissions, especially during cold starts and under low-load driving conditions. Furthermore, heat losses in the exhaust tract have been reduced. This is achieved by improving the insulation of the exhaust tract. Another measure is the lowering of the limit temperature for AdBlue injection, which can be achieved by developing the system further in principle. In addition, the NH₃ storage capacity of the SCR catalytic converter was increased due to assumed further developments in the catalytic converter materials. The improvement of the SCR catalytic converter is also reflected in improved NO_x conversion rates and a reduced influence of ageing effects. By increasing the EGR rate, engine NO_x emissions are also reduced, which is particularly important during cold starts. Compared to the Euro 6 DE base model, these measures reduce NO_x emissions by 60 to 90 %, depending on the driving situation. This means that the emission value in the most challenging ISC scenario for NO_x (distribution truck, high load during cold start, ambient temperature -7°C) is 53% of the Euro 7 limit value. In the WHTC at -7°C, NO_x emissions fall below the limit value by around a third. The measures therefore lead to compliance with the Euro 7 development target even under worst-case scenarios.

NH₃ emissions were reduced by up to 70 % compared to Euro VI DE, mainly through an assumed improvement in the control of AdBlue dosing in combination with the slip catalytic converter and a reduction in age-related emission increases through material enhancements. As a result, the Euro 7 development targets in the WHTC and under worst-case ISC test conditions are achieved.

N₂O is reduced with the help of an improved AdBlue injection strategy and the use of catalyst materials that are less prone to N₂O formation, e.g. vanadium. These measures lead to 30% lower emissions compared to Euro VI DE and thus to the achievement of the Euro 7 development targets.

The measures listed are not expected to have any significant impact on the emission behavior of PN₁₀, NMHC/NMOG and CH₄. As these emission values for Euro VI DE are already at a low level compared to their respective limit values, no reduction steps were necessary with regard to these components in order to achieve the Euro 7 limit values.

The PHEM emissions model created on the basis of truck data is also used for coaches and city buses. Corresponding driving cycles were therefore simulated in advance for validation purposes and the function of the model was tested. For buses, this leads to similar reduction rates from Euro VI DE to Euro 7 as for trucks and can therefore also be used for these vehicle classes.

In addition to the Euro 7 emissions model, a reduction in the proportion of manipulated vehicles in the fleet was also assumed for Euro 7 compared to Euro VI. A halving is assumed due to the presumably more effective monitoring based on the Euro 7 OBM regulations. For NO_x, for example, this means a reduction of ten percent in Euro VI to five percent in Euro 7.

Impact assessment of the Euro 7 legislation on total emissions from road traffic in Germany up to 2040

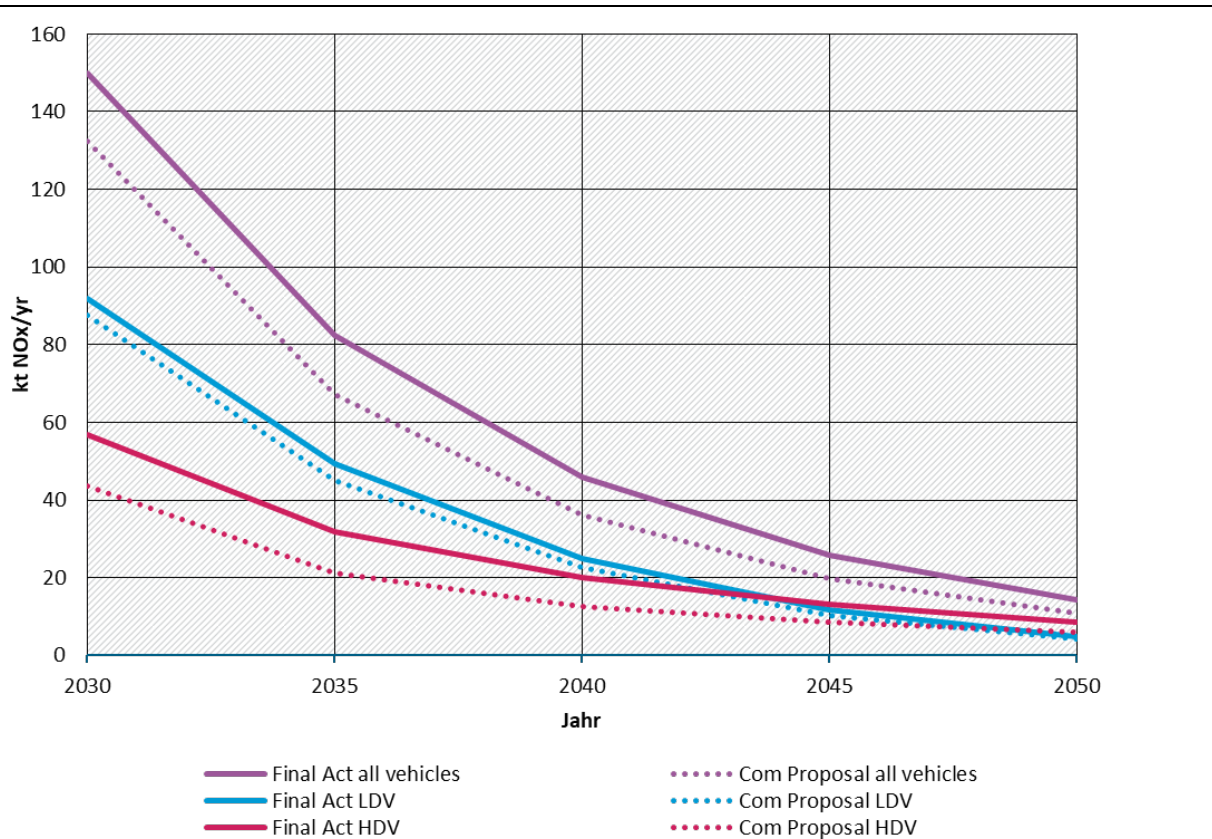
In addition to deriving emission factors (see previous section), the impact of the Euro 7 legislation on total emissions from road traffic in Germany was also examined. The Euro 7 legislation of the final legal act was compared with the EU Commission's proposal of November 2022 in the form of two scenarios. The latter was the basis for the emission forecasts for the

German government's National Air Pollution Control Program (NRLP) in 2024 and the emission factors used there could be used for the comparison.

In the Commission proposal, an earlier introduction by approx. one to two years was assumed than in the final legal act. In the scenario with the final legal act, the share of Euro 7 passenger cars is significantly lower at 16 % of passenger cars compared to 26 % in 2030 in the Commission proposal scenario. In the SNF, the share of Euro 7 SNF is also significantly lower at 26% compared to 41 %. For both vehicle categories, however, the share of Euro 7 vehicles decreases after 2040 at the latest due to the increase in electric vehicles required to meet the CO2 fleet limits and the associated decline in combustion engines. In addition to the earlier introduction, the “Commission proposal” scenario is characterized by stricter requirements for Euro 7, e.g. by lowering the NOx limit value for diesel cars to 60 mg/km in the WLPT.

In both scenarios, NOx emissions from road traffic in Germany fall significantly between 2030 and 2050. In the “Commission proposal” scenario, however, these are approx. 18 kt NOx lower in 2030 than in the scenario with the final legal act with approx. 150 kt NOx. The greatest influence on the difference is exerted by SNF, whose emissions are approx. 13 kt NOx lower, as the specific emission factors for Euro 7 SNF are significantly lower in the COM proposal and achieve a higher reduction due to the earlier introduction.

Figure 1: Comparison of future NOx emissions from road traffic in Germany with Euro 7 in the final legal act vs. the Commission proposal



Source: Own representation, ifeu. Notes: LDV (light duty vehicles) include passenger cars and LNF, HDV (heavy duty vehicles) include SNF and buses

In addition to NO_x, the scenario with the Commission proposal also results in reductions for other pollutants, in particular nitrous oxide (N₂O), ammonia (NH₃) and methane (CH₄).

The impact assessment shows that the changes to the Euro 7 legislation in the final legal act are likely to lead to a slower improvement in air quality in Germany compared to the significantly more ambitious proposal of the EU Commission. However, as the emission factors used are still based on preliminary data from the development of HBEFA 5.1, deviating results are possible with the emission factors of the final HBEFA 5.1.

1 Untersuchte Fragestellungen im Rahmen von Euro 7

Die Europäische Kommission (DG Clima, DG JRC) hat mit Beratung durch das CLOVE Konsortium (Consortium for Low Emitting Vehicles) von 2019 bis 2022 einen Vorschlag für die kommende Euro 7 Abgasgesetzgebung für PKW, LNF und SNF ausgearbeitet.

Dieser Vorschlag wurde im Trilog zwischen Kommission, Parlament und Rat diskutiert und Kompromisse ausgearbeitet. Am 8.5.2024 wurde dann die Euro 7 Regulierung beschlossen (Verordnung (EU) 2024/1257 des Europäischen Parlaments und Rates)¹.

Die wesentliche Aufgabe dieses hier beschriebenen Projektes war die Ausarbeitung von Informationen, die für Positionsfindungen des UBA und BMU in diesem Prozess unterstützen sollten. Nach der Zusammenfassung der Ist-Situation wurden jeweils Verbesserungsoptionen und damit mögliche Emissionsminderungen analysiert. Das Konsortium befasste sich insbesondere mit folgenden Themen:

- ▶ Erfassung aller relevanten Fahrzustände und Betriebsbereiche
- ▶ Weitere Absenkung der Grenzwerte gegenüber Euro 6/VI
- ▶ Erweiterung der Grenzwerte um zusätzliche Schadstoffe/Komponenten sowie abriebbedingte Partikelemissionen
- ▶ Sicherstellung niedriger Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebenszeit
- ▶ Optimierung der Messverfahren und des Typgenehmigungsprozesses

Dafür wurden zu Beginn 19 Fragestellungen („Aspekte“) definiert, die vom Projektteam abgearbeitet wurden (siehe Tabelle 1). Da im Laufe der Euro 7 Entwicklung neue Fragestellungen erwartet wurden und auch aufgetreten sind, wurden auch „Ad-Hoc“ Fragestellungen bzw. Aspekte nach Bedarf ausgearbeitet. Je nach Fragestellung erfolgte die Bearbeitung durch ifeu, TNO oder FVT oder gemeinsam. Die Aspekte wurden je nach Bedarf in Form von MS Power Point Folien oder als Kurzberichte in MS Word ausgearbeitet und dem Auftraggeber übermittelt und zumeist auch präsentiert und diskutiert. Ausgewählte Ergebnisse sind im Anhang A bis E eingefügt². Zusätzlich wurde am 12.11.2020 und 25.11.2022 jeweils ein nationales Fachgespräch durchgeführt, bei welchen die Zwischenergebnisse aus dem Projekt und Informationen verschiedener Stakeholder gegenseitig vorgestellt und diskutiert wurden.

Die meisten Aspekte waren speziell während des Prozesses der Euro 7 Ausarbeitung relevant, einige sind durch die Beschlüsse in der finalen Euro 7 Regulierung inzwischen nicht weiter aktuell. Der Hauptteil dieses Berichts gibt einen Überblick zu den geleisteten Arbeiten und behandelt die letzten, noch relevanten Ad-Hoc Aspekte im Detail.

¹ Verordnung (EU) 2024/1257 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Emissionen und der Dauerhaltbarkeit von Batterien (Euro 7), zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission, der Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission, der Verordnung (EU) 2017/2400 der Kommission und der Durchführungsverordnung (EU) 2022/1362 der Kommission.

² Die Autor*innen und das Erstellungsdatum der einzelnen Berichte sind im Anhang verzeichnet.

Tabelle 1: Übersicht der vorab untersuchten Aspekte im Projekt

Nr.	Fragestellung	Zusammenfassung
1	Sind alle relevanten Betriebszustände der SNF erfasst und niedere Emissionen dabei abgesichert? Zuordnung der NTE (Not To Exceed) Limits zu einzelnen (kürzeren) Testphasen um in allen Fahrzuständen niedere Emissionen zu sichern	Als wesentliche Schwachstellen wurden bei SNF das Ausklammern von Niederlast und die geringe Bedeutung der Kaltstartzusatzemissionen für das Testergebnis identifiziert sowie der Umstand, dass keine unabhängigen Emissionstests im Rahmen von Marktüberwachung oder In-Service-Conformity Tests vorgeschrieben sind. Als Option wurde ein neues Grenzwertkonzept entwickelt, das in Kapitel 2 kurz beschrieben ist.
2	Sind alle relevanten Betriebszustände der PKW und LNF erfasst und niedere Emissionen dabei abgesichert? Zuordnung der NTE (Not To Exceed) Limits zu einzelnen (kürzeren) Testphasen um in allen Fahrzuständen niedere Emissionen zu sichern	Bei PKW und LNF wurde die komplexen Randbedingungen für RDE-Tests und die Mindesttestlänge von 16 km als verbesserungswürdig identifiziert. Als Option wurde ein neues Grenzwertkonzept entwickelt, das ein „Budget“ für die Kaltstartemissionen und einen Grenzwert für das betriebswarme Fahren in g/km bzw. bei SNF in g/kWh umfasst.
3	Überprüfung des Familien Konzeptes in der RDE Regulierung auf sichere Abdeckung aller Modellvarianten. Überprüfung der verschiedenen Familienkonzepte für andere Bereiche wo relevant (GTR 15, WLTP).	Die Familiendefinition ist sowohl bei SNF als auch bei PKW und LNF komplex und dennoch nicht eindeutig und die Anwendung wenig transparent. Es gibt auch eine Vielzahl an unterschiedlichen Familiensystemen (WLTP-Interpolation, CoP, 14°C Tests, Ki, PEMS, Fahrwiderstände, OBD, etc.). Es wurden Optionen zur Zusammenfassung dieser Familiengruppen erarbeitet.
4	On-Board Monitoring (OBM) für Schadstoffemissionen mit Überprüfung der Funktionalitäten in ISC-Tests mittels PEMS inklusive Übertragung der Messdaten der On-Bordüberwachung über die Fahrzeuglebenszeit	OBM ist in Euro 6 bzw. VI nicht vorgeschrieben und wurde als relevante Verbesserungsoption für Euro 7 identifiziert. Unter Verwendung von üblichen NOx-Sensoren kann das NOx-Emissionsverhalten vom Kfz auch durch Messungen gestützt werden. Im Gegensatz zu OBD; in dem nur einzelne Bauteile auf Funktion zu testen sind, kann mit OBM auch das Zusammenspiel mehrerer Fehler überwacht werden, bei denen jeder für sich eventuell keine Fehlermeldung des OBD auslösen würde. Es wurde auch angeregt, in Euro 7 die Funktionalität von OBD und OBM im realen Straßenfahrten zu testen und nicht wie bisher nur am Prüfstand in den Typprüfzyklen. Fehlererkennungen sind für Kfz in standard-Zyklen einfacher als in beliebigen realen Fahrsituationen. Weiters wurden auch Optionen ausgearbeitet, in welchen Formaten und Einheiten die NOx-Emissionswerte für OBM an eine zentrale Datenbank übermittelt werden könnten.
5	Validierung der Typprüf-CO ₂ Werte mit realen Daten für PKW und LNF (On-Board Fuel Monitoring, RDE, unabhängige ISC-Tests zur CO ₂ -Kontrolle, sonstige Optionen).	Bei PKW nahm die Abweichung zwischen dem CO ₂ -Wert aus der Typprüfung mit dem NEFZ Testzyklus und dem realen Fahren bis 2019 auf etwa 40% zu. Ursachen waren unter anderem hohe Toleranzen für die Messsysteme und ein nicht repräsentativer Testzyklus. Mit Einführung des WLTP wurde die Diskrepanz deutlich geringer. Die Beurteilung von On-Board gesammelten Verbrauchsdaten wurde als komplexes Vorhaben identifiziert, da der Verbrauch im realen Verkehr von vielen Einflüssen abhängt. Methoden für Test im Rahmen der Marktüberwachung wurden skizziert.
6	Validierung der Typprüf-CO ₂ Werte mit realen Daten für schwere	Die CO ₂ -Zertifizierung von SNF erfolgt mittels Simulation von Testfahrten unter Verwendung von Komponentenmessdaten,

Nr.	Fragestellung	Zusammenfassung
	<p>Nutzfahrzeuge (Erweiterung VTP Test Verfahren, On-Board Monitoring, ISC, Verfahren zur Umrechnung auf VECTO Zyklen, sonstige Optionen).</p>	<p>wie z.B. Motorkennfeld, Luft- und Rollwiderstand. Eine Überprüfung ist mit der sogenannten „Verification Test Procedure, VTP“ vorgesehen. Da die VTP bisher nur im CoP Test (Conformity of Production) vorgeschrieben ist und somit vom Fahrzeughersteller selbst durchgeführt wird, erscheint eine Ausweitung auf Tests im Rahmen der Marktüberwachung durch unabhängige Labore sinnvoll. Wegen des deutlich höheren Messaufwands für VTP Tests gegenüber den Schadstofftests mit PEMS im Rahmen der Marktüberwachung, käme wohl nur eine Teilmenge der PEMS getesteten Kfz für VTP infrage.</p>
7	<p>Notwendigkeit und Möglichkeit einer Erweiterung der reglementierten Abgaskomponenten auf N₂O, CH₄, NH₃, HC-Komponenten [also einzelne Substanzen wie z.B. Benzol, Formaldehyde, etc.] (Nicht-Methan Organische Gase (NMOGs) sind in Aspekt Nr. 9 behandelt).</p>	<p>Aus den gemessenen Abgasemissionen und den Umwelteffekten der jeweiligen Komponenten wurde eine Liste derzeit nicht reglementierter aber relevanter Abgaskomponenten erarbeitet. Azetaldehyd, Benzol, CH₄, Formaldehyde Lachgas, und Ammoniak wurden in Summe der Aspekte 7, 9 und 11 als besonders umweltrelevante Kfz-Abgaskomponenten identifiziert. Die Überwachung kann auch im Rahmen von Überwachungstests ohne Grenzwerte erfolgen. Wenn Überwachungstests ohne Grenzwerte eine Zunahme relevanter Komponenten feststellen, wäre die Einführung von Grenzwerten als nächster Schritt festzulegen. Ursachen höherer Emissionen kritischer Abgaskomponenten können insbesondere neue Katalysatortechnologien und alternative Kraftstoffe sein.</p>
8	<p>Notwendigkeit und Möglichkeit einer Erweiterung der Abgasgesetzgebung auf „Nicht-Abgas Partikel“</p>	<p>Abrieb von Reifen, Bremsen und Straßen sowie Wiederaufwirbelung von Partikeln haben schon einen höheren Beitrag zu PM₁₀ und PM_{2.5} als das Fahrzeugabgas. Wegen der zunehmenden Flottendurchdringung mit Kfz mit Partikelfiltern wird sich dieser Trend verstärken. Als wiederholbar und ausreichend genau messbar wurden Bremsen- und Reifenabrieb festgestellt. UN ECE und GTR Regulierungen für Messmethoden sind derzeit noch in Arbeit. Zum Zeitpunkt der Analyse waren nur Arbeiten zur Regulierung für Bremsenabrieb von PKW und LNF bekannt.</p>
9	<p>Notwendigkeit und Möglichkeit einer Erweiterung der reglementierten Abgaskomponenten auf HNCO, Carbonyl-Verbindungen, BTX, PAKs/PAHs. Weitere Komponenten wurden in den Aspekten Nr.7 und 11 behandelt.</p>	<p>Siehe Aspekt Nr. 7.</p>
10	<p>Erweiterung der PN Messbereiche auf unter 23 nm mit Analyse betroffener Kfz und Technologien und Diskussion, ob diese Erweiterung gesundheitsrelevante Effekte hätte.</p>	<p>Die Analyse ergab, dass durch eine Limitierung von PN₁₀ anstelle von PN₂₃ spezielle Partikelquellen zusätzlich überwacht würden. Dies betrifft hochsiedende Nukleationspartikel, die z.B. aus Motorölbestandteilen entstehen können oder auch Nitrate, die aus NO_x und NH₃ im Abgas erzeugt werden können. Es wird auch auf die hohen Kosten für Prüflabore hingewiesen, wenn eine Zeitlang PN₂₃ für Euro 6 und PN₁₀ für Euro 7 Entwicklungen und ab Einführung von Euro 7 PN₁₀ für Typprüfungen und Feldüberwachung von Euro 7 aber auch weiterhin PN₂₃ für</p>

Nr.	Fragestellung	Zusammenfassung
		<p>Feldüberwachung älterer Kfz gemessen werden muss. Die Messgeräte müssen aufwändig auf die jeweilige untere Messschranke kalibriert werden, so dass einfaches Umschalten der Analysatoren zumindest derzeit nicht möglich ist.</p>
11	<p>Erweiterung der RDE Richtlinie zur Erfassung weiterer Abgaskomponenten mittels PEMS (HC, N₂O, NH₃, CO, ...). Weitere Komponenten wurden in den Aspekten Nr.7 und 9 behandelt.</p>	<p>Siehe Aspekt Nr. 7.</p>
12	<p>Sind Laborprüfungen noch wichtig oder können sie teilweise oder vollständig durch Prüfungen auf der Straße ersetzt werden?</p>	<p>Straßentests könnten für die Kontrolle von gasförmigen Schadstoffen die Labortests ersetzen, da die Straßentests deutlich höhere Ansprüche für PKW, LNF und SNF stellen. Für Verbrauch und CO₂ sind allerdings die Streuungen im realen Betrieb so groß, das Straßentests als Basis für die CO₂-Flottenzielwerte nicht sinnvoll scheinen. Wenn für CO₂ Labortests erforderlich sind, sollten dabei aber auch die Schadstoffemissionen gemessen werden, um spezielle Optimierungen für die CO₂-Tests zu minimieren. Auch Partikelmasse kann On-Board nur sehr aufwändig gemessen werden und könnte am Prüfstand im Rahmen der CO₂-Tests überwacht werden. Speziell für Marktüberwachungstests wäre eine reine On-Board Straßenmessung deutlich kostengünstiger.</p>
13	<p>Notwendige Absenkungen der Emissionsgrenzwerte [insbes. NO_x, PM/PN]</p>	<p>Bei SNF wurde neben unabhängig von den Grenzwerten auch das Auswerteverfahren für die On-Board Straßentests (EMROAD) als ungünstig identifiziert, da es Phasen mit niederen Lasten ausschließt und mit Bezug auf das 90-Perzentil der Emissionen aller Testphasen („Windows“) das reale, mittlere Emissionsverhalten der SNF nicht sicher wiedergibt. Bei PKW und LNF wurde eine mögliche Ausweitung der Randbedingungen für gültige RDE Tests vorgeschlagen. Eine Limitabsenkung für NO_x bei PKW auf ca. 40 mg/km im WLTC wurden als möglich identifiziert.</p>
14	<p>Bewertung der Optionen für „Hilfs-Emissionsstrategien“.</p>	<p>„Hilfs-Emissionsstrategien“, in Englisch AES (Auxiliary Emission Strategies) sind dazu gedacht, den Motor vor bestimmten Verschleißrisiken wie z.B. bei sehr hohen oder niederen Umgebungstemperaturen zu schützen. Dies bedeutet in der Regel, dass die Wirksamkeit der Abgas-Emissionskontrolle reduziert wird. Zusätzliche Emissionsstrategien müssen während des Typprüf-Prozesses offengelegt und genehmigt werden. AES sind in der Realität sehr komplex und daher auch schwer von den illegalen Abschaltvorrichtungen zu unterscheiden. Durch die Offenlegung in der Typprüfung soll dazu Rechtsicherheit geschaffen werden. Derzeit sind die AES aber für Tests im Rahmen der Marktüberwachung intransparent. Es wurde vorgeschlagen, möglichst keine AES von gültigen RDE Tests auszuschließen, dies insbesondere für Partikelfilterregenerationen.</p>

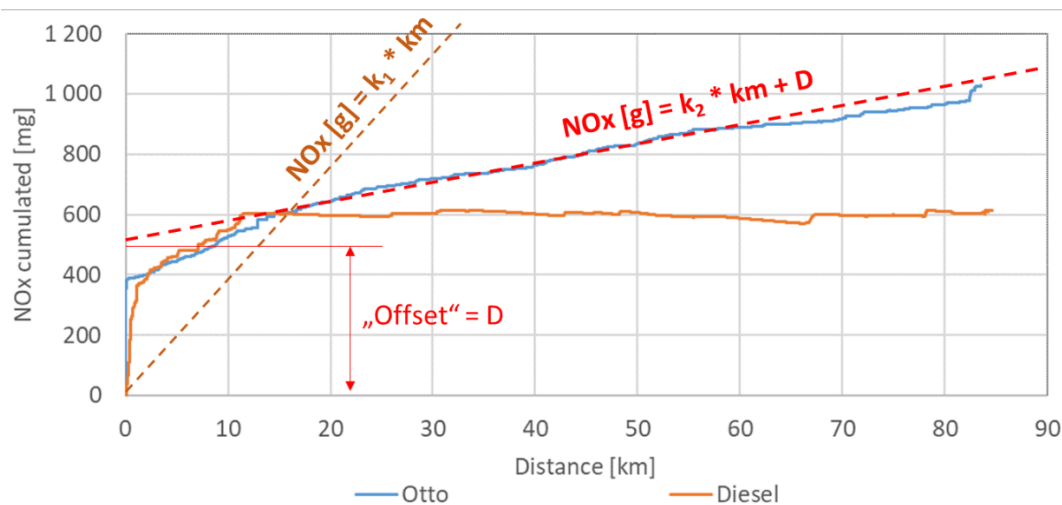
Nr.	Fragestellung	Zusammenfassung
15	Bewertung der Optionen von gleichen Abgasgrenzwerten für alle Technologien (insbesondere NO _x , PM und PN).	Eine endgültige Aussage zur Machbarkeit konnte in dem Projekt nicht getroffen werden, eine Angleichung der NO _x -Grenzwerte von Otto- und Dieselmotoren wird als sinnvoll eingeschätzt. Es sollen aber alle Kfz entsprechend ihrer realen Verwendung und damit im Allgemeinen unabhängig von ihrer Technologie getestet werden
16	Bewertung der Optionen zur Anpassung der Zuständigkeiten zwischen Fahrzeughersteller und Besitzer bezüglich der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten.	Siehe Aspekt Nr. 17.
17	Bewertung der Optionen einer Anpassung der OBD-Richtlinien, sodass das OBD Emissionsprobleme bei allen normalen Nutzungsbedingungen erkennen muss und klare Verantwortlichkeiten zwischen Erstausrüster und Fahrzeughalter geschaffen werden.	In Verbindung mit Aspekt 16, 18 und 19 soll eine effektive Überwachung und Inspektion während des Betriebs sichergestellt werden. Für die realen Emissionen über der Fahrzeuglebensdauer stellen die Emissionen in normalen RDE-Fahrbedingungen von Neufahrzeugen die Basis dar. Durch anderes Fahrverhalten, schlechte Wartung und Instandhaltung der Kfz, Alterungseffekte das Abgasminderungssysteme und letztlich Manipulation und schlechte Ersatzteile, können die realen Emissionen die Emissionen im Neuzustand in RDE Tests aber um das Vielfache übersteigen. Durch eine klare Regelung der Zuständigkeiten für Fahrzeugtests in Marktüberwachung, den periodischen technischen Inspektionen etc. und der Überprüfung von OBD und OBM in diesen Tests, könnten die Realemissionen der Flotte vermutlich deutlich gesenkt werden. Für die Grenzwerte für OBD und OBM wird auch eine Alterungsfunktion vorgeschlagen, die das normale Verhalten berücksichtigt. Inwieweit ausreichend genaue Sensoren für OBM verfügbar sind bzw. welche Grenzwerte damit überwacht werden können, wurde im Rahmen der Arbeit nicht untersucht, da schon eine parallele Arbeit des CLOVE Konsortiums im Auftrag der EU Kommission dazu lief.
18	Bewertung der Optionen einer Emissionsüberwachung über die gesamte Fahrzeug-Lebensdauer.	Es wurde ein Übergang von Typprüf-Demonstrations- und Inspektionsprüfungen zur Überwachung der Lebensdaueremissionen bei normalem Gebrauch untersucht und OBM als zentrales System für die Einhaltung von Emissionsvorschriften während der gesamten Lebensdauer des Fahrzeugs identifiziert. (Siehe auch Aspekt Nr. 17). Eine OBM Überwachung für alle Abgaskomponenten wäre wünschenswert. Aus heutiger Sicht sind aber nur für NO _x und PN ausreichend genaue Sensoren verfügbar. Für Dieslabgas erlauben die PM-Sensoren zumindest eine Überwachung, ob ca. 2,5-mal der PM Grenzwert überschritten wird. Messungen mit PEMS in Marktüberwachung sowie mit Werkstattgeräten im Rahmen der PTI müssen daher OBM unterstützen und auch Software-Manipulationen finden, die OBM nicht entdeckt.
19	Bewertung der Optionen für eine effektive Marktüberwachung.	Es wurde für einen von sechs älteren Otto-PKW ein NO _x -Emissionsanstieg um den Faktor 10 festgestellt, der aber weder in PTI noch vom OBD festgestellt wurde. Ein passendes PTI Testverfahren für Partikel und NO _x sowie OBM werden als

Nr.	Fragestellung	Zusammenfassung
		<p>zentrale Elemente zur Detektion solcher Kfz identifiziert. Eine klare Verantwortlichkeit wurde vorgeschlagen: Wenn die MIL aktiviert ist, weil OBD bzw. OBM zu hohe Emissionen feststellen, soll der Fahrzeugbesitzer für die Reparatur verantwortlich sein, in allen anderen Fällen unzulässig hoher Emissionen der Fahrzeughersteller. Im PTI Test sollen die OBM Signale zugänglich und nutzbar sein. Für die Reparatur bzw. den Austausch defekter Teile wurden mehr als € 1000.- für PKW und LNF sowie mehr als € 2000.- bei SNF abgeschätzt. Entsprechende Defekte werden insbesondere bei PKW mit mehr als 200 000 km und bei SNF über 500 000 erwartet.</p>

2 Grenzwertefunktionen und Limitabsenkung

In dem Bericht zu Arbeitspaket 2 in dem Projekt wurden mögliche Grenzwertefunktionen und Limit Absenkungen im Detail behandelt (siehe Anhang B). Dabei wurden Optionen für neue Grenzwerte untersucht. Derzeit sind fixe Limits für die [g/km] bei PKW und LNF bzw. für die [g/kWh] für SNF definiert. Abbildung 2 zeigt, dass direkt nach Kaltstart wegen der dann noch nicht funktionalen Abgasnachbehandlung deutlich höhere Emissionen je Strecke entstehen als bei betriebswarmer Abgasnachbehandlung. Ein Grenzwert in [g/km] ist also immer ein Kompromiss, der für eine definierte Testlänge passt, für kürzere Strecken deutlich schwerer bis unmöglich einzuhalten ist, für längere Strecken dagegen geringere Anforderungen stellt. Demensprechend sind in EURO 6 / VI Mindesttestlängen für RDE Tests definiert (z.B. 16 km für Innerorts PKW RDE-Tests). Dieser Effekt betrifft alle Abgaskomponenten, die durch Katalysatoren signifikant reduziert werden (NO_x , CO, HC, CH_4). Für diese wäre ein Grenzwert in Form einer Geradengleichung (Grenzwert = $k \cdot \text{Strecke} + D$), mit „D“ als Offset zur Berücksichtigung der Kaltstartemissionen sinnvoll. Damit könnten insbesondere auch längere Testfahrten sinnvoll mit niedrigeren Werten für das betriebswarme Fahren limitiert werden.

Abbildung 2: An einem EURO 6d-TEMP PKW gemessene NO_x -Emissionen nach Kaltstart



Quelle: de Ruiter, 2021, siehe Anhang Abschnitt B,

Im Anhang Abschnitt B wurden unterschiedliche Funktionen und Grenzwerte analysiert, indem Funktionen an gemessene Tests aktueller Kfz angepasst und dann gesenkt wurden.

Da die beschlossene Euro 7 Regulierung diese Option, welche in ähnlicher Form auch im Vorschlag der Kommission enthalten war, nicht aufgegriffen hat, wird auf eine detaillierte Beschreibung in diesem Bericht verzichtet.

3 Relevanz neuer Schadstoffe und Ableitung von Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1

Im Zuge der Arbeiten zu der Euro 7 Gesetzgebung wurde auch untersucht, ob weitere Abgaskomponenten in die Regulierung aufgenommen und mit Grenzwerten versehen werden sollten.

Dafür wurden alle Messungen aus der DBEFA, einer Datenbank, in der alle Messdaten für das HBEFA (www.hbefa.net) gesammelt werden, nach kalt und warm gestarteten Abgastests ausgewertet und die Relevanz der Abgaskomponenten nach Umweltschädlichkeit der Komponente und dem Niveau im Kfz-Abgas bewertet.

Bei der Analyse waren insbesondere die Messdaten aus dem UBA-Rahmenvertrag hilfreich, in dem an der TU Graz alle Kfz mit FTIR Analysatoren vermessen werden, (Weller, 2021), (Weller, 2022), (Weller, 2023), (Weller, 2024). Mit FTIR kann eine umfangreiche Anzahl an Abgaskomponenten simultan erfasst werden³. Messdaten aus anderen Literaturquellen wurden nur in sehr geringem Umfang gefunden und sind in Kap. 3.2 beschrieben.

Gesetzlich nicht limitierte Abgaskomponenten, die aufgrund der gemessenen Konzentrationen im Kfz-Abgas und ihrer Umwelteffekte als kritisch eingestuft wurden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Zur Aufnahme in die Tabelle mussten die im Mittel gemessenen Emissionsniveaus zumindest bei einer Kombination aus Kfz-Kategorie (PKW, LNF, SNF) und Antriebsart (Benzin, Diesel) über den jeweiligen Detektionslimits der Analysatoren liegen. Von den hier aufgeführten Komponenten werden CH₄, N₂O und NH₃ bereits im HBEFA 4.2 erfasst. Von den übrigen Komponenten wurde ein Teil in das HBEFA 5.1 neu aufgenommen (siehe 3.2)

Tabelle 2: nicht limitierte Abgaskomponenten, die mit hoher Umweltrelevanz eingeschätzt wurden

Abgaskomponente	Formel	Eigenschaften
Methan	CH ₄	ungiftig, in hoher Dosierung leicht betäubend, starkes Treibhausgas (GWP = 28 ⁴)
Lachgas	N ₂ O	in großer Dosierung betäubend/ Erstickungsgefahr; MAK- Wert 180 [mg/m ³]. Insbesondere aber ein starkes Treibhausgas (GWP = 273) und Nebenprodukt in der NO _x -Minderung in SCR-Systemen
PN10	-	Bis EURO 6 ist nur Partikelanzahl über 23 nm limitiert (PN23). Hinweise, dass einige Technologien sehr hohe PN-Anzahl unter 23nm emittieren führten dazu, dass ab EURO 7 ein Grenzwert für PN10 eingeführt wurde.
Ammoniak	NH ₃	Reizend bzw. ätzend; Gefahrensymbole: Umwelt, Ätzwirkung, Totenkopf; MAK- Wert: 14 [mg/m ³]

³ Acetaldehyde, Acetylene, Acrolein, Benzene, Butadiene, CH₄, COS, Ethane, Ethene, Formaldehyde, Formic acid, H₂SO₄, HCN, HNCO, HNO₂, HNO₃, MeOH, N₂O, NH₃, Propane, Propene, SO₂

⁴ Bezogen auf 100 Jahre nach (IPCC, 2013) und Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Februar 2024 über fluoridierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014.

Abgaskomponente	Formel	Eigenschaften
Acetaldehyd	CH ₃ CHO	Kanzerogen; Reizung der Atemwege; MAK- Wert: 91 [mg/m ³]
Formaldehyd	HCHO	Krebserregend; Allergien, Haut-, Atemwegs- oder Augenreizungen; MAK- Wert: 0,37 [mg/m ³]; Ätzwirkung
Benzol	C ₆ H ₆	Schädigungen der inneren Organe und des Knochenmarkes, krebserregend; in Benzin enthalten; Luftgütegrenzwert 5 µg/m ³
Isocyansäure	HNCO	Tränenreizend; bei Hautkontakt Entzündungen, Blasenbildung; sehr instabil. Mögliches Nebenprodukt der NOx-Minderung in SCR-Systemen
Salpetrige Säure	HNO ₂	Mutagen, reiz- und ätzwirkend auf Atemwege Augen und Haut, instabil, kann sich je nach Temperatur und Partialdruck zu HNO ₃ und verschiedenen Stickoxiden zersetzen.

3.1 Messergebnisse

Nachfolgend sind die Messwerte zu den wesentlichsten nicht limitierten Abgaskomponenten dargestellt⁵.

Tabelle 3: Für die Analyse der nicht limitierten Abgaskomponenten verwendete Messdaten

Fahrzeug-Kategorie	Anzahl gemessene Kfz (Rolle/PEMS)	Anzahl Tests (Rolle/PEMS)
LDV Otto Euro 6d-TEMP	8 / 1	33 / 2
LDV Otto Euro 6abc	3 / 0	6 / 0
LDV Diesel Euro 6d	14 / 2	56 / 4
LDV Diesel Euro 6d-TEMP	18	80
LDV Diesel Euro 6abc	1 / 0	3 / 0
HDV Diesel Euro 6 E	6 / 4	19 / 10
HDV Diesel Euro 6 D	9 / 1	54 / 2
HDV Diesel Euro 6 C	5 / 0	21 / 0
HDV Diesel Euro 6 AB	7 / 0	34 / 0

Alle gezeigten Messungen wurden jeweils mit handelsüblichem Tankstellen-Kraftstoff durchgeführt, enthalten also Beimischungen von Biodiesel (B7) bzw. Bio-Ethanol (B10). Wegen der höheren Messunsicherheit bei PEMS-Tests werden hier jeweils die Ergebnisse der

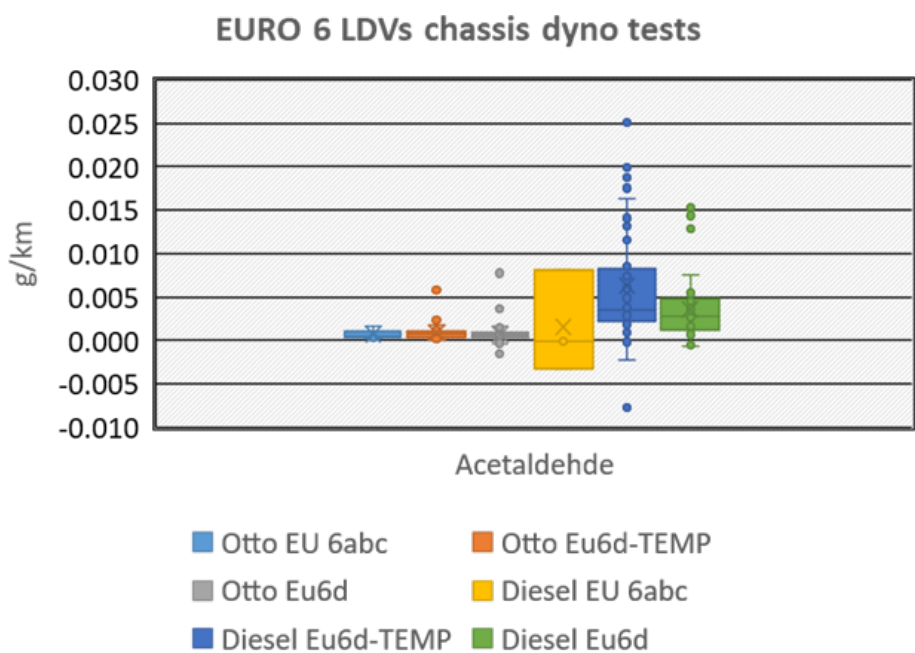
⁵ Die Datensammlung für die grundlegende Analyse der nicht limitierten Abgaskomponenten wurde zum 30.11.2023 eingefroren. Inzwischen sind weitere Messdaten verfügbar, welche im Wesentlichen EURO VI E und Euro 6d PKW und SNF und gealterte Kfz umfassen, die allesamt im Update des HBEFA mit Version 5.1 genutzt werden. Die grundlegenden Aussagen zur Relevanz der Abgaskomponenten ändern sich damit nicht, ein Update der hier beschriebenen Studie wurde daher nicht durchgeführt.

Rollenmessungen gezeigt. Die Analyse der PEMS Tests zeigt ähnliche Trends. Diese sind in den zugehörigen Foliensätzen dokumentiert.

Bei Acetaldehyd-Emissionen (CH_3CHO) von PKW und LNF (Abbildung 3) zeigen Dieselmotoren im Mittel höhere Emissionen als Ottomotoren. Insbesondere in Kaltstarts weisen einzelne Diesel-PKW hohe Emissionswerte auf, die sowohl im WLTC als auch im IUFC Zyklus auftraten.

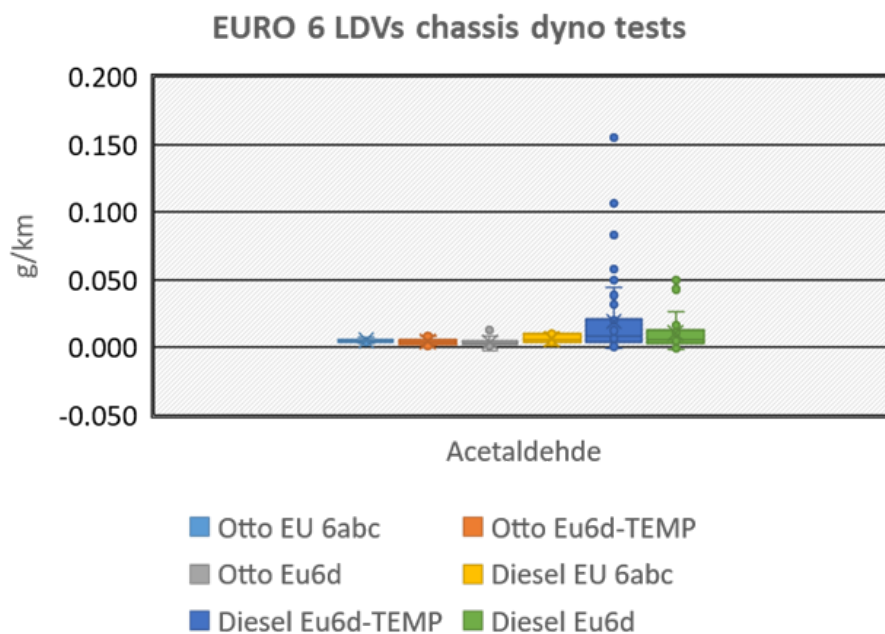
Die Ursache für die höheren Aldehydemissionen der Dieselmotoren konnte nicht eruiert werden. Grundsätzlich ist ein typischer Entstehungspfad die Oxidation von Alkoholen in der insgesamt unvollständigen Verbrennung von HC. Demnach wäre bei Benzin-Blends mit hohem Alkoholgehalt eher mit Aldehyden zu rechnen. Aldehydemissionen bei Dieselmotoren sind allerdings auch in anderen Studien nachgewiesen. (Paramvir, 2023) gibt dazu eine Übersicht, wobei höhere Aldehydniveaus bei niedrigen Motorlasten gefunden wurden. Als mögliche Quelle höherer Aldehydemissionen bei Diesel wird dort auch der Biodieselanteil genannt, der kürzere organische Moleküle enthält als fossiler Diesel.

Abbildung 3: Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH_3CHO) von PKW und LNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

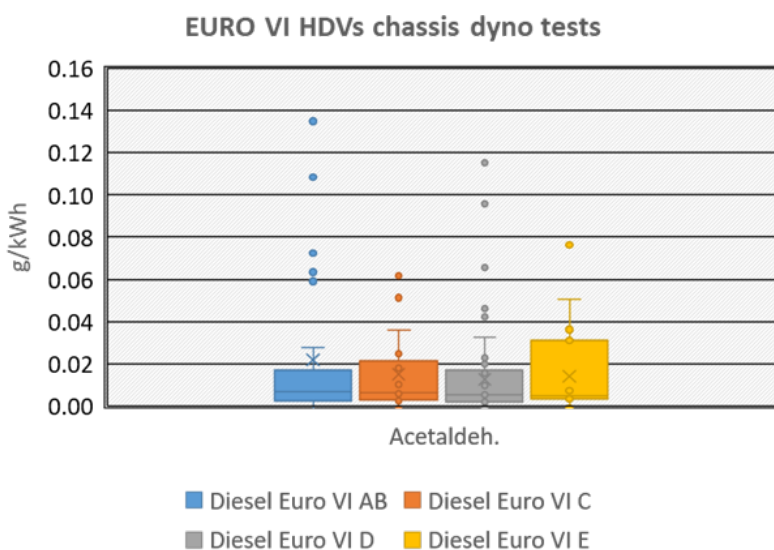
Abbildung 4: Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH₃CHO) von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

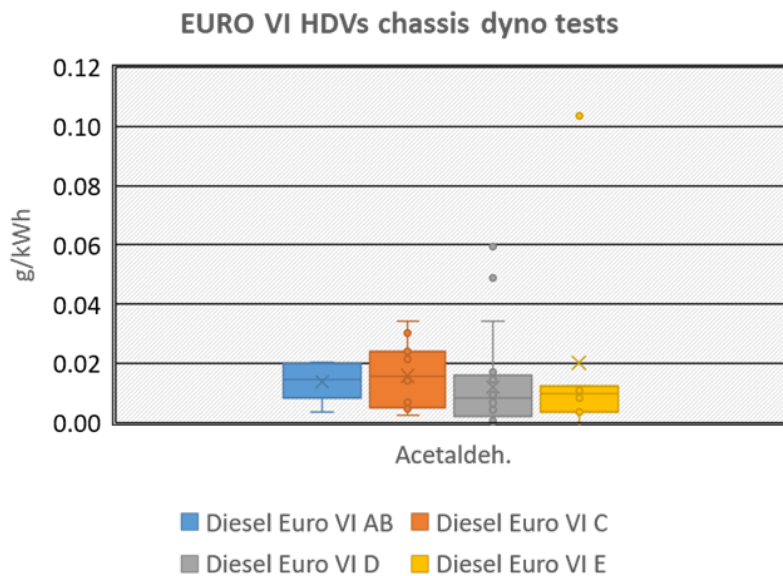
Bei SNF wurden ausschließlich Dieselmotoren gemessen (Abbildung 5). Für einen Vergleich mit PKW kann für ein durchschnittliches schweres Nutzfahrzeug im Mittel grob 1 kWh/km Motorarbeit angesetzt werden. Damit entsprechen 0,01 mg/kWh ca. 0.01 mg/km. Im Gegensatz zu den PKW wurden bei SNF weniger Kfz mit auffällig hohen Acetaldehyd-Emissionen gemessen und diese tendenziell eher bei betriebswarmem Fahren und bei speziellen Niederlast (Stop&Go) Zyklen.

Abbildung 5: Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH₃CHO) von SNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Abbildung 6: Messergebnisse zu Acetaldehyd (CH₃CHO) von SNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Bei Formaldehyd-Emissionen (HCHO) von PKW und LNF (Abbildung 7) zeigen wie auch bei Acetaldehyd die Dieselmotoren im Mittel höhere Emissionen als Ottomotoren.

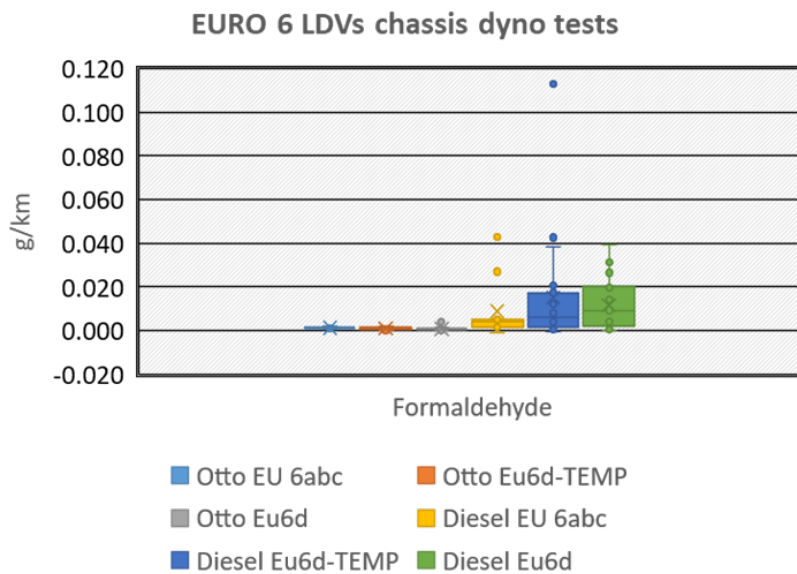
Während bei den betriebswarmen Emissionen von EURO 6a zu EURO 6d Diesel ein sinkender Trend zu sehen ist, ist das bei den Kaltstarts nicht der Fall. Inwieweit die Kaltstartemissionen bei Formaldehyd von EURO 6a auf 6d gestiegen sind ist unsicher, da für EURO 6a nur Messdaten an einem PKW verfügbar sind. Die Ursachen für einen möglichen Anstieg sind unklar. An sich heizt die Abgasnachbehandlung neuer Diesel-PKW deutlich schneller auf als bei frühen EURO 6 Modellen, um die NO_x-Limits in RDE einhalten zu können. Eventuell führen zunehmende AGR-Raten zur NO_x-Minderung während des Kaltstarts und die damit verbundene niedrigere Verbrennungstemperaturen zu höheren Aldehydkonzentrationen. Warum dieser Effekt bei Acetaldehyd nicht festzustellen ist, ist aber unklar.

Abbildung 7: Messergebnisse zu Formaldehyden (HCHO) von PKW und LNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

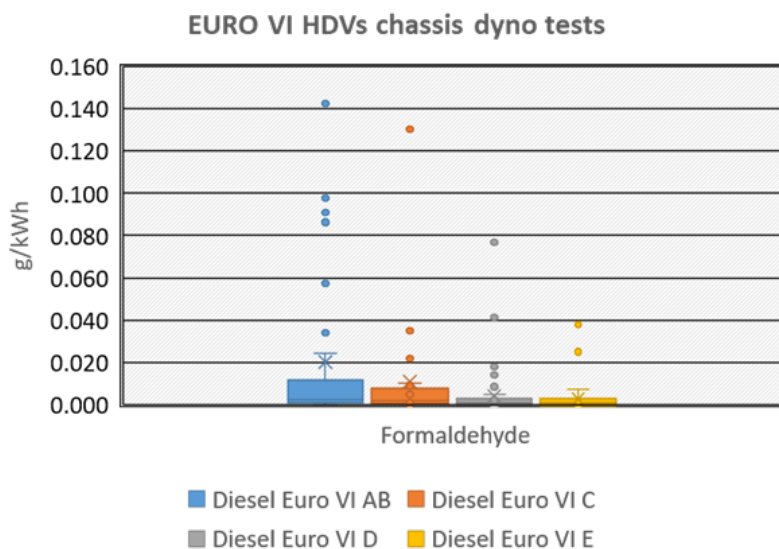
Abbildung 8: Messergebnisse zu Formaldehyden (HCHO) von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

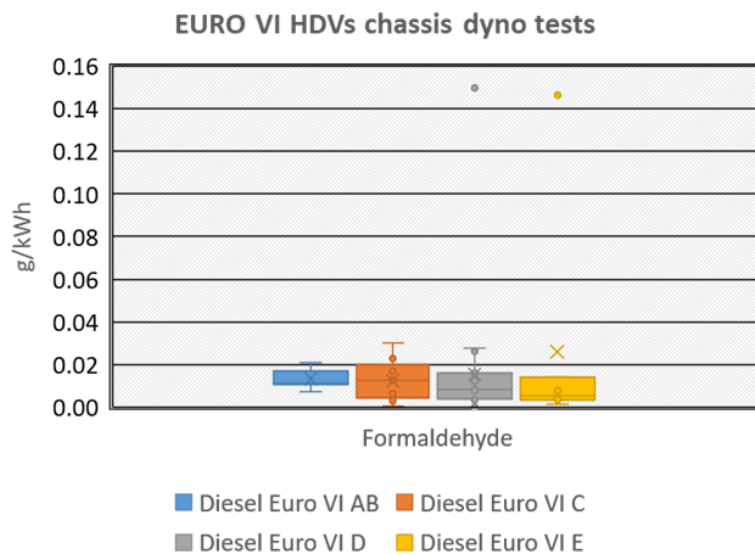
Wie für Acetaldehyd, treten bei SNF in Niederlastzyklen bei einigen Kfz relativ hohe Formaldehyd Emissionen auf, die Messwerte mit hohen Emissionswerten in Abbildung 9 sind jeweils Tests mit geringer Last.

Abbildung 9: Messergebnisse zu Formaldehyd (HCHO) von SNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Abbildung 10: Messergebnisse zu Formaldehyd (HCHO) von SNF nach Kaltstart bei 23°C

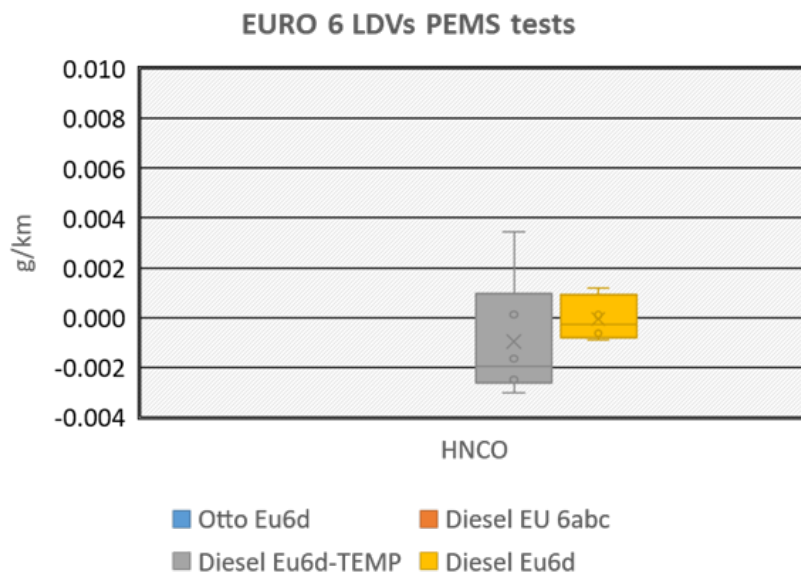


Quelle: Eigene Graphik, FVT

Isocyan Säure (HNCO) Emissionen werden vom FTIR Messsystem nur für Diesel-Abgas gemessen. Betriebswarm gestartete Zyklen mit gültigen Messwerten für Isocyan Säure und ebenso für HNO_2 sind daher nur für Dieselmotoren und ab EURO 6- bzw. EURO 6 verfügbar.

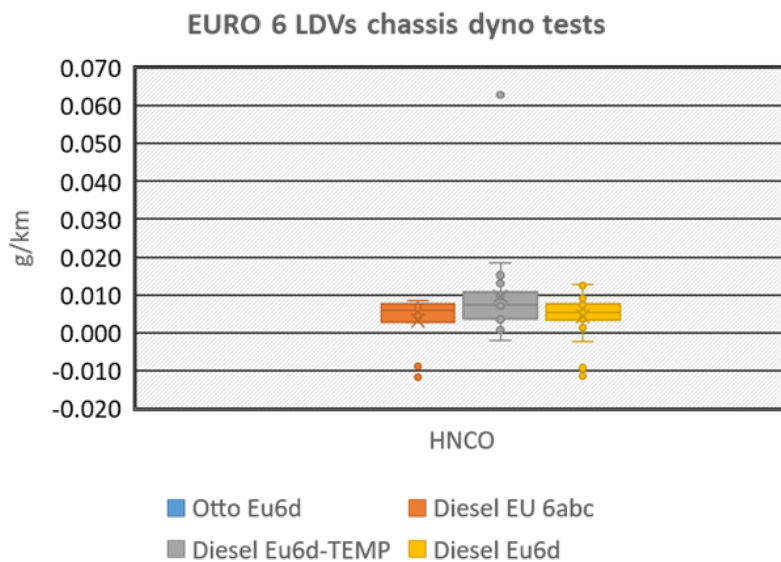
Bei betriebswarmem Zustand sind die Messwerte unter dem Detektionslimit und daher teilweise negativ (Abbildung 11). Auch nach Kaltstarts sind viele Messwerte im Bereich des Detektionslimit von ca. 1,6 ppm. Isocyan Säure ist ein Produkt aus der Thermolyse im Zuge der Umwandlung von Harnstoff in Ammoniak. In der nachfolgenden Hydrolyse wird HNCO mit Wasser zu NH_3 und CO_2 umgewandelt, z.B. (Eichseder, 2023). Ungünstige Harnstoff ("AdBlue") Dosierstrategien könnten also zum Durchbruch von Isocyan Säure führen. Da die Isocyan Säure hier eher bei Kaltstarts festgestellt wurde, könnte sie in einem Zeitfenster mit noch kühlem Abgas entstehen, in dem das Wasser noch stark zur Kondensation neigt und so lokal nicht in ausreichender Menge für die Hydrolyse verfügbar ist. Da Harnstoff aber erst ab ca. 200°C dosiert wird, müsste die Isocyan Säure in kalten Phasen eher als Rest von der Thermolyse-Reaktion am Ende der vorangegangenen Fahrt stammen. Bestätigungen für diese Theorie oder andere Ursachen konnten in der Literaturrecherche allerdings bislang nicht gefunden werden.

Abbildung 11: Messergebnisse zu Isocyanensäure (HNCO) Emissionen von PKW und LNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

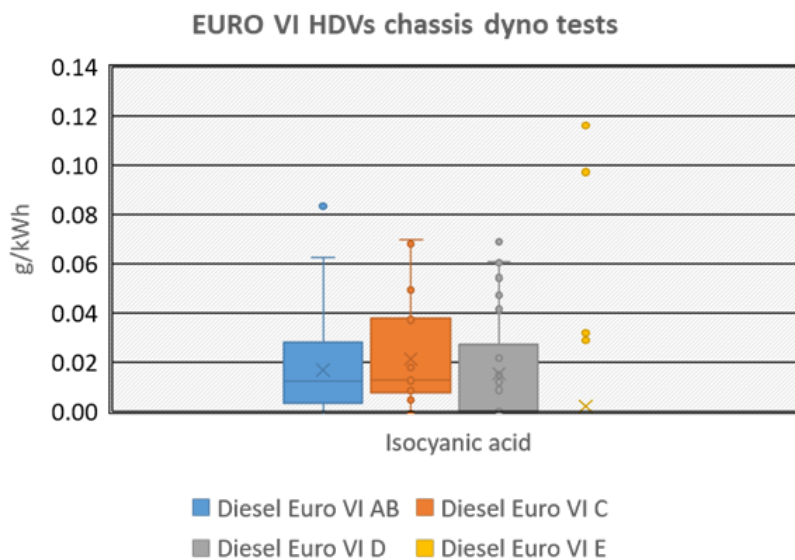
Abbildung 12: Messergebnisse zu Isocyanensäure (HNCO) Emissionen von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

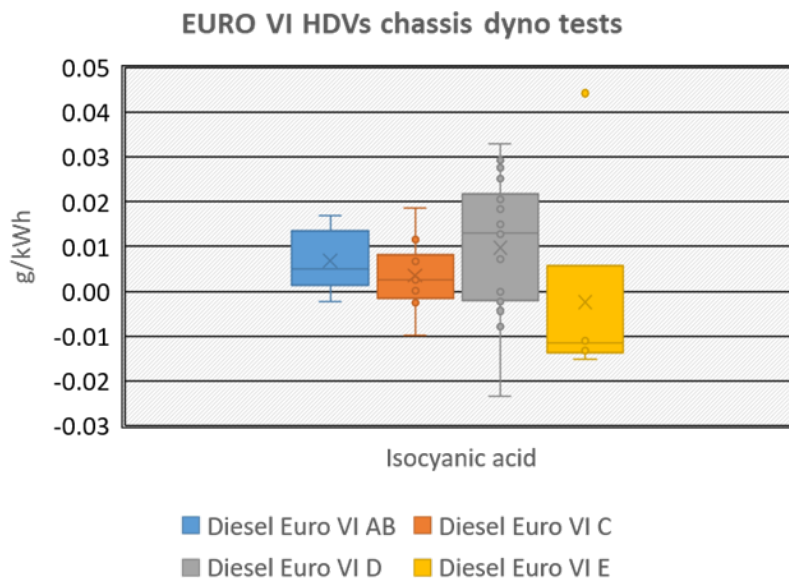
Bei SNF sieht man Isocyanensäure-Emissionen eher im betriebswarmen Zustand (Abbildung 13). Da die Abgasnachbehandlungsbox im Vergleich zu PKW deutlich weiteren Abstand zum Motor hat, hat das SCR-System von SNF eine geringere Temperatur als bei PKW und kann auch nur langsamer aufgeheizt werden. Speziell bei niedrigen Lasten könnte bei SNF damit die Hydrolyse nicht vollständig ablaufen und HNCO freisetzen.

Abbildung 13: Messergebnisse zu Isocyanensäure Emissionen (HNCO) von SNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

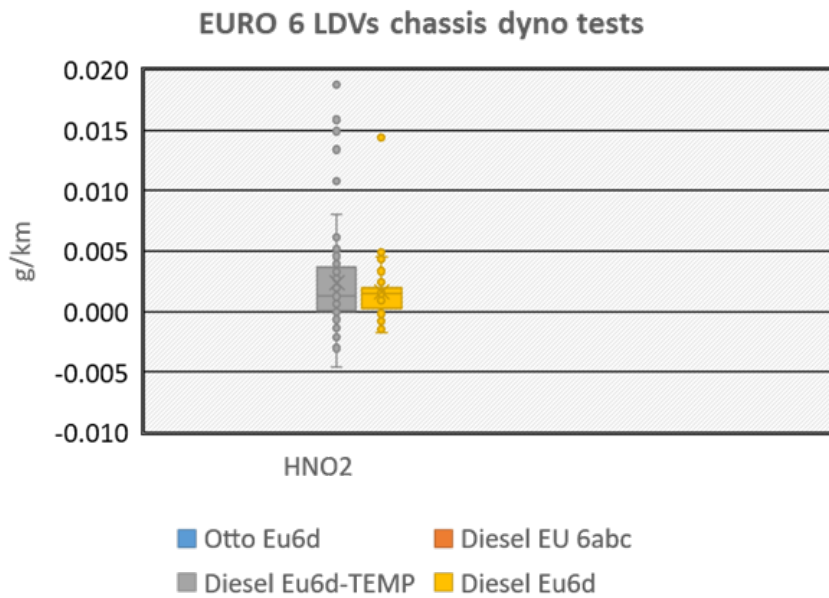
Abbildung 14: Messergebnisse zu Isocyanensäure Emissionen (HNCO) von SNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

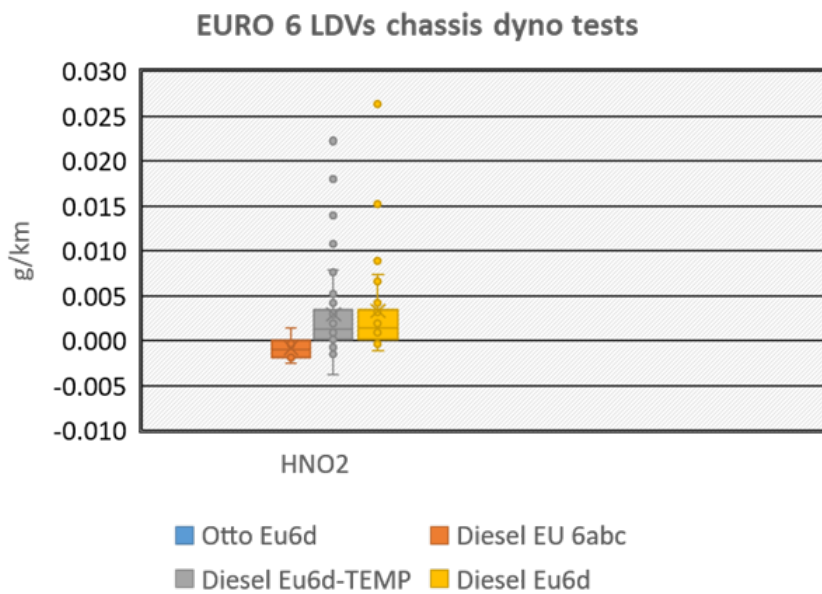
Abbildung 15 zeigt die Messdaten zu Emissionen salpetriger Säure (HNO_2) von PKW und LNF. Für Ottomotoren liefern die FTIR Analytoren dazu keine Messwerte. Die Messwerte sind zumeist im Bereich des Detektionslimits (3,1 ppm). Messwerte mit relativ hohen Emissionswerten treten vereinzelt in WLTC und IUFZ Zyklen auf. Zwischen Warmstart und Kaltstart sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar.

Abbildung 15: Messergebnisse zu salpetriger Säure (HNO₂) Emissionen von PKW und LNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

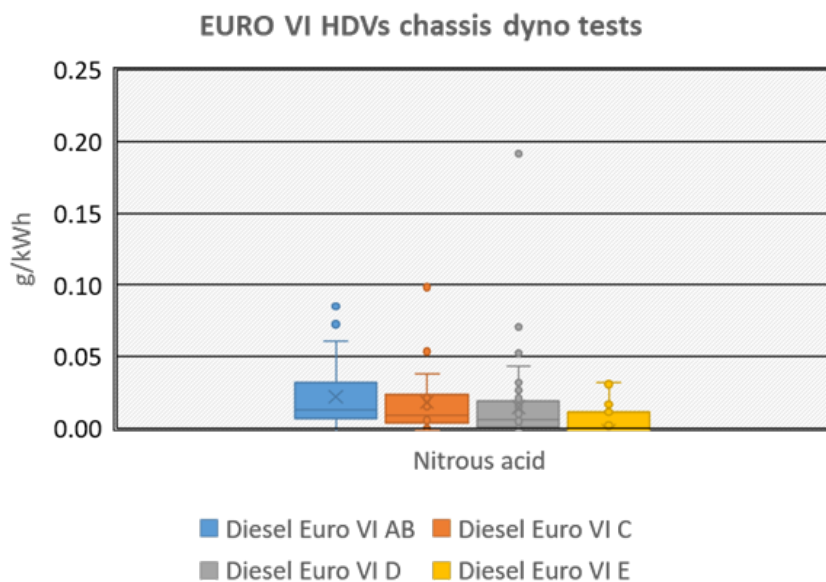
Abbildung 16: Messergebnisse zu salpetriger Säure (HNO₂) Emissionen von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

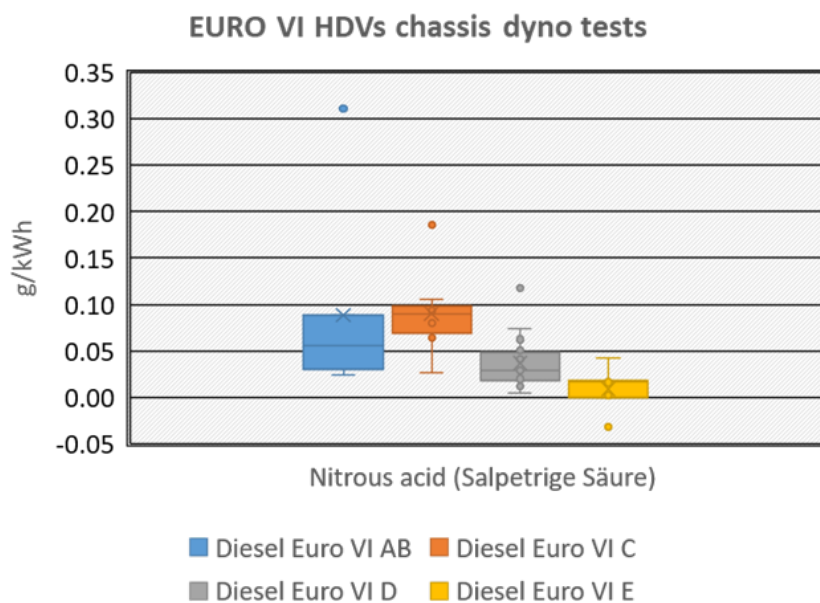
Die Messdaten zu Emissionen salpetriger Säure von SNF zeigen in Richtung neuerer EURO 6 Klassen klar abnehmende Tendenz. EURO 6 D und E Niveaus sind zumeist unter dem Detektionslimit.

Abbildung 17: Messergebnisse zu salpetriger Säure Emissionen (HNO₂) von SNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Abbildung 18: Messergebnisse zu salpetriger Säure Emissionen (HNO₂) von SNF nach Kaltstart bei 23°C

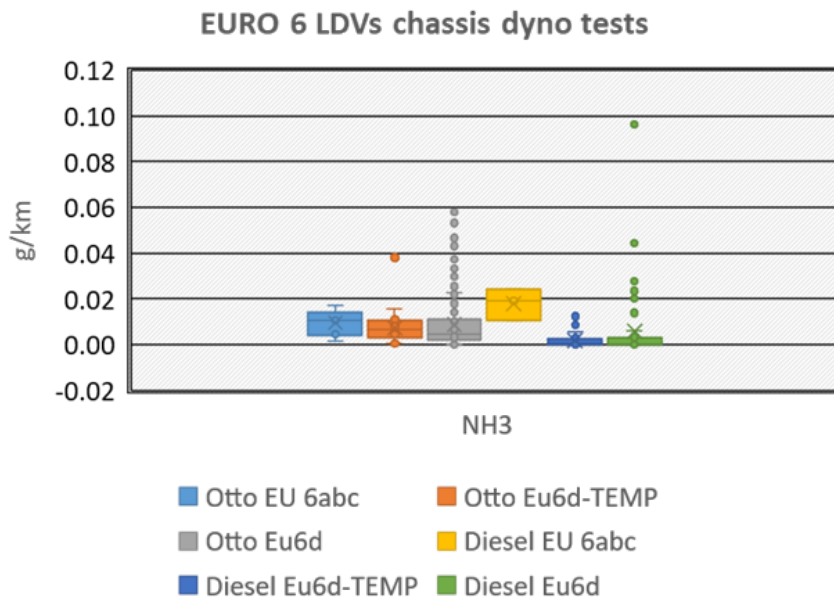


Quelle: Eigene Graphik, FVT

Ammoniakemissionen (NH₃) können bei Otto-PKW in Phasen von Luftmangel im Katalysator bei eher geringen Temperaturen auftreten. Bei Dieselabgas dürfte die wesentlichste Quelle ein Ammoniakslupf im SCR-System sein, der bei zu hoher Harnstoffdosierung und eher bei höheren Temperaturen auftritt, da die NH₃-Speicherkapazität der SCR-Katalysatoren mit zunehmender Temperatur sinkt, z.B. (Eichlseder, 2023). Im HBEFA 4.2 sind für EURO 6 Otto-PKW 16mg NH₃/km als mittlerer Emissionsfaktor für den Verkehrsmix Deutschland angegeben, für Diesel PKW 7mg/km. Die neuen Daten bestätigen diese Niveaus. In HBEFA 5.1 werden die

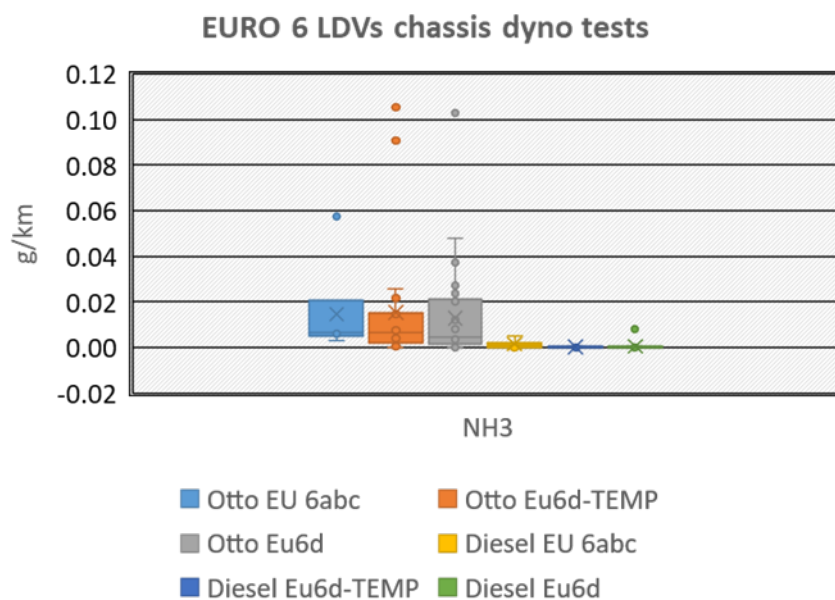
Emissionsfaktoren für NH₃ mit dem Simulationsprogramm PHEM analog wie die reglementierten Abgaskomponenten unter Verwendung der neuen Messdaten geupdatet.

Abbildung 19: Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von PKW und LNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Abbildung 20: Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von PKW und LNF nach Kaltstart bei 23°C

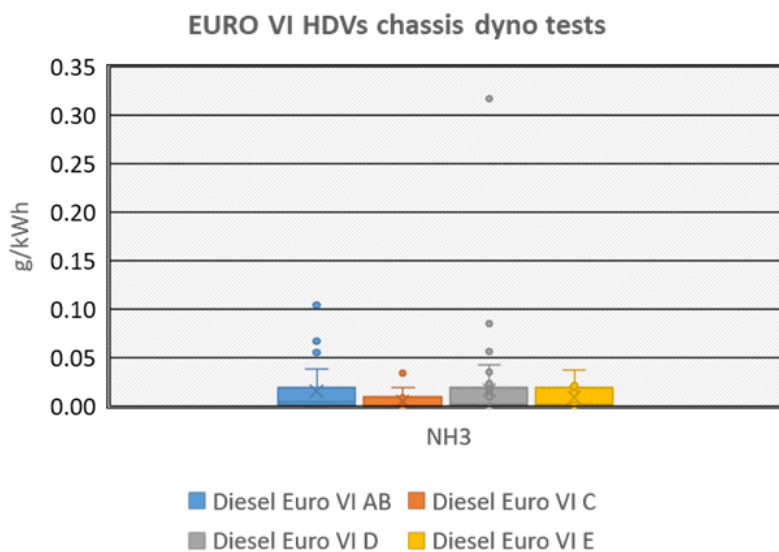


Quelle: Eigene Graphik, FVT

Bei den SNF treten höhere NH₃ Emissionen bei einzelnen Tests mit normalem Fahrzuständen auf, wie etwa im WHVC. Ursache dürfte auch bei SNF ein NH₃-Schlupf aus dem SCR-System sein. Diese einzelnen Fälle könnten bei SNF und PKW unter anderem auf Dosierstrategien zurückzuführen sein, die den berechneten NH₃-Füllstand im SCR-Katalysator in längeren

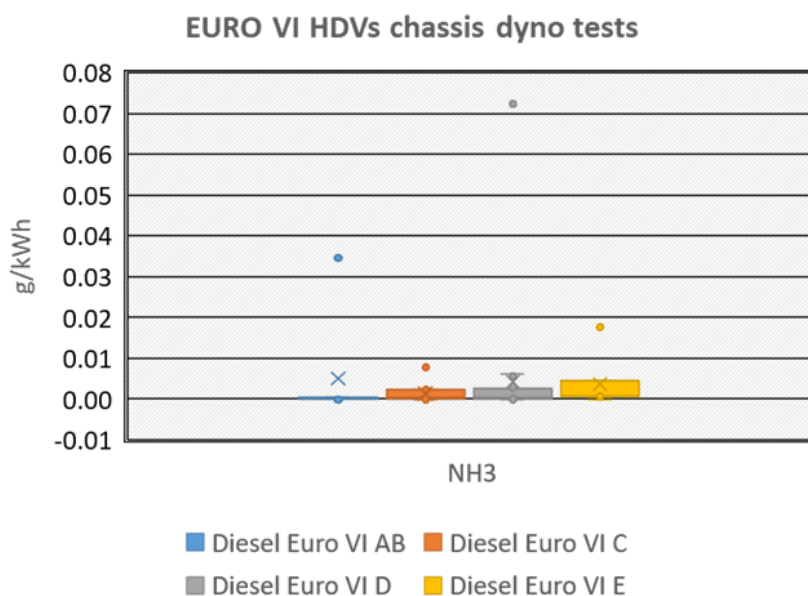
Intervallen kalibrieren, indem sie Harnstoff überdosieren, bis der NO_x-Sensor nach dem SCR wegen seiner NH₃-Querempfindlichkeit einen Durchbruch, also 100% Füllstand, anzeigt.

Abbildung 21: Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von SNF nach Warmstart



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Abbildung 22: Messergebnisse zu Ammoniak Emissionen von SNF nach Kaltstart bei 23°C



Quelle: Eigene Graphik, FVT

Weitere gemessene Abgaskomponenten sind in den Berichten zu den gemessenen Kfz in den UBA-Messkampagnen zu finden (Weller, 2021), (Weller, 2022), (Weller, 2023), (Weller, 2024).

N₂O und CH₄ sind fixe Abgaskomponenten im HBEFA. Für das Update HBEFA 5.1 werden alle aktuellen Messdaten zu diesen Schadstoffen wie zuvor für NH₃ beschrieben, verwendet. Alle Trends, auch über die verschiedenen Verkehrssituationen werden dementsprechend im Bericht

zum HBEFA 5.1 ausführlich behandelt und wurden für diesen Bericht daher hier nicht weiter analysiert.

Zu PN wurde im HBEFA-Board beschlossen, auch für HBEFA 5.1 nur PN23 anzugeben, da für Schadstoffklassen vor EURO 6 bzw. VI keine Emissionsdaten für PN10 verfügbar sind. Wenn mit EURO 7 dann vermutlich fast nur mehr PN10 gemessen wird, wäre eine Umrechnung von PN23 in PN10 oder umgekehrt sinnvoll. Dazu werden vermutlich Messdaten an älteren EURO-Klassen nötig sein, für die PN10 und PN23 erfasst sind.

3.2 Zeitreihen Euro 0 bis Euro 6

Aufgrund der Relevanz für die Luftgüte wurden vier Abgaskomponenten ausgewählt, welche nach Möglichkeit in der Version 5.1 des Handbuchs Emissionsfaktoren (HBEFA) neu integriert werden sollten:

- ▶ Formaldehyd (HCHO)
- ▶ Acetaldehyd (CH₃CHO)
- ▶ Isocyan Säure (HNCO)
- ▶ Salpetrige Säure (HNO₂; "Nitrous acid")

Dafür wurde zuerst untersucht, ob diese neu erfassten Abgaskomponenten mit der Standard-Simulationsmethode, die für die meisten Abgaskomponenten verwendet wird, ausreichend genau abgebildet werden können. Für die Standard-Simulationsmethode werden vom Kfz-Emissionsmodell PHEM der TU Graz die in 1 Hz gemessenen Abgasemissionen über drei Sekunden gemittelt um Fehler bei der zeitlichen Zuordnung von Emissionen zu Drehzahl⁶ zu reduzieren und dann in „Emissionskennfelder“ über Leistung und Drehzahl eingerastert. PHEM berechnet für alle Zyklen und Kfz-Klassen des HBEFA Motorleistung und Drehzahl in 1 Hz und interpoliert aus den zuvor erzeugten Kennfeldern je Komponente der entsprechenden Kfz- und Abgasklasse die zugehörigen Abgasmassenströme. Bei Messwerten, welche über dem Detektionslimit liegen, konnten mit der Methode eine ähnliche Genauigkeit erreicht werden, wie bei den konventionellen Abgaskomponenten. Demnach können diese neuen Abgaskomponenten ohne großen Mehraufwand im HBEFA 5.1 für alle Emissionsklassen berücksichtigt werden, für die Messdaten zur Kennfelderzeugung verfügbar sind, also je nach Komponente ab EURO 6ab oder 6d-TEMP. Die entsprechenden Simulationen wurden auch durchgeführt und alle Emissionsfaktoren an das HBEFA übergeben.

Zur Bestimmung der flottengewichteten Emissionsfaktoren im HBEFA müssen allerdings auch Emissionsfaktoren für die älteren Emissionsstandards verfügbar sein. Da nur einzelne Messdaten zu den neuen Abgaskomponenten für ältere EURO Klassen in der Literatur gefunden wurden, wurden im Rahmen dieses Projektes noch fünf PKW mit EURO 4 und EURO 5 Typisierung mit FTIR-Analysator am Rollenprüfstand der TU-Graz gemessen. Dabei wurde jeweils der Typprüfzyklus (NEDC bzw. WLTC) und der ERMES Zyklus gemessen.

In Anbetracht der großen Streubreite, die bei den EURO 6 bzw. VI Messungen zwischen den getesteten Kfz in den zuvor gezeigten Abbildungen zu sehen sind, können einzelne Messungen keinen verlässlichen Hinweis auf das durchschnittliche Emissionsniveau geben und auch nicht zur Erzeugung repräsentativer Emissionskennfelder genutzt werden. Die verfügbaren Messdaten unterstützen allerdings die Entwicklung von „Verhältnissfaktoren“, welche das

⁶ Die Leistung wird aus Drehzahl und CO₂-Massenstrom gerechnet. Da CO₂ dieselben variablen Zeitverschiebungen gegenüber der Drehzahl hat wie die anderen Abgaskomponenten, ist nur die zeitliche Zuordnung zur Drehzahl kritisch.

Emissionsniveau älterer EURO-Klassen zu den gut abgesicherten Emissionsniveaus der EURO 6d-TEMP bei PKW und LNF bzw. der EURO 6 D Emissionsfaktoren von SNF angeben.

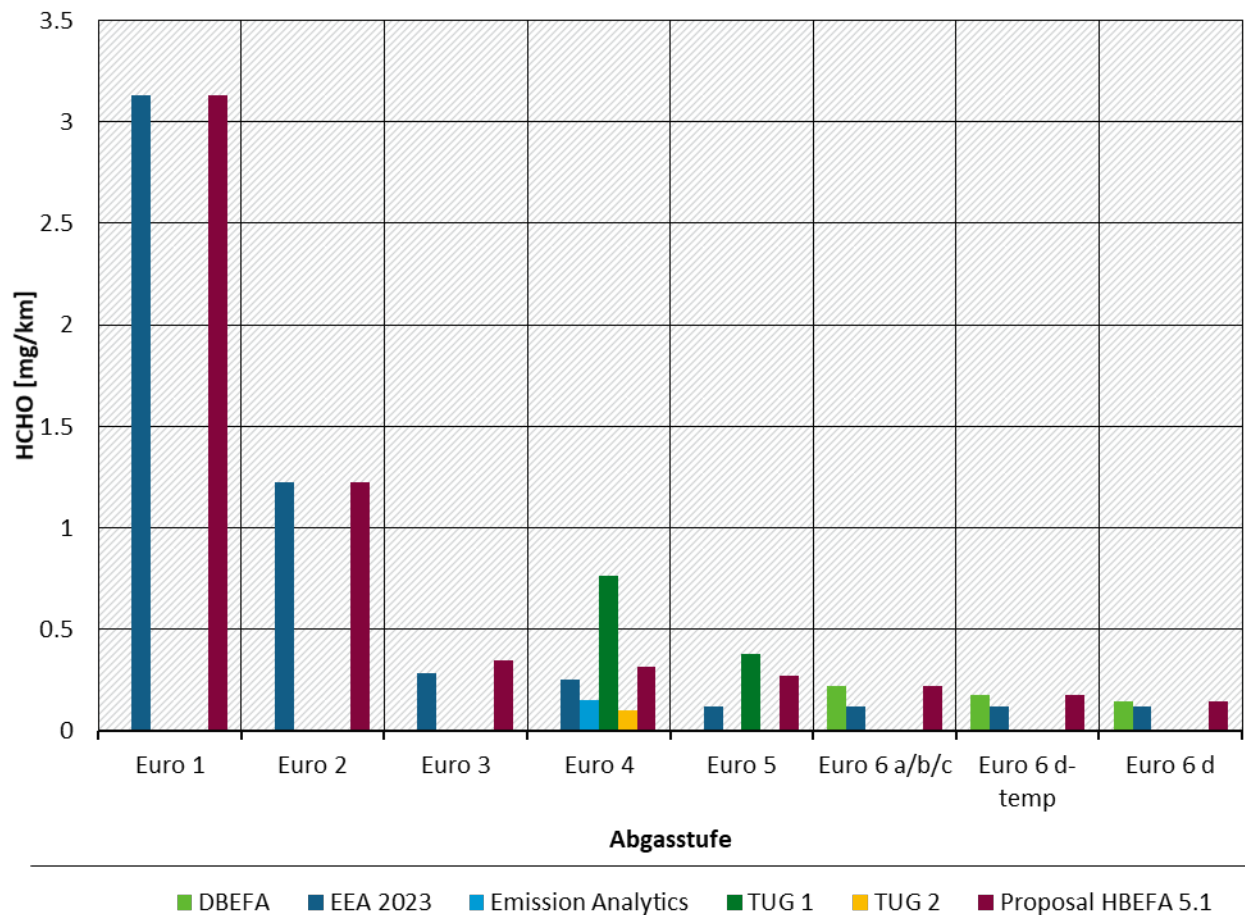
Um konsistente Ergebnisse über alle HBEFA Fahrzyklen und Steigungen sicher zu stellen, empfehlen wir, diese Verhältnisfaktoren, die nachfolgend nach Kfz-Kategorien, Antrieb und EURO-Klassen ausgearbeitet sind, für die Emissionsfaktoren der neuen Abgaskomponenten anzuwenden. Es müssen dafür die mit PHEM für EURO 6d-TEMP bzw. EURO 6 DE simulierten Emissionsfaktoren mit den Verhältnisfaktoren multipliziert werden, um die Emissionsfaktoren für EURO 0 bis EURO 5 bzw. EURO V zu erzeugen.

Nachfolgend sind Messdaten zu einigen Abgaskomponenten dargestellt und die Methoden zur Entwicklung der Zeitreihen dazu beschrieben. Die vorgeschlagenen Zeitreihen sind danach zusammengefasst.

Abbildung 23 zeigt die Mess- und Literaturdaten zu Formaldehyd-Emissionen von PKW mit Ottomotoren in betriebswarmem Zustand. Mit „DBEFA“ sind jeweils die Mittelwerte aller Messdaten von realen Fahrzyklen gemessen auf Rollenprüfständen beschrieben, die für die Erzeugung der Emissionsfaktoren in HBEFA 5.1 verwendet wurden, also alle in der Datenbank DBEFA gesammelten Messdaten. „Emission Analytics“ stellte Messdaten als Durchschnittswerte je Real World Test von vier PKW der Abgasklassen EURO 4 und 5 zur Verfügung. Mit „TUG“ sind PKW bezeichnet, die für dieses Projekt ergänzend am Rollenprüfstand gemessen wurden, da andernfalls zu wenig Daten vor EURO 6 verfügbar gewesen wäre. Die Werte aus (EEA, 2023) zu diesen nicht limitierten Abgaskomponenten basieren vorwiegend auf älteren Messungen.

Für die Entwicklung der Zeitreihe („Proposal HBEFA 5.1) verwenden wir ab EURO 6a die Werte aus der DBEFA, für EURO 4 den Mittelwert aus den TUG Tests und (EEA, 2023) davor passen wir die Reihe an die Daten von (EEA, 2023) an. Zwar ergeben sich zwischen der verschiedenen Quellen Unterscheide, welche jedoch im Rahmen der Streubreite der Messungen liegen. Die vorgeschlagenen Werte für das HBEFA 5.1 liegen innerhalb dieser Streubreite. Insgesamt ergibt sich so ein einigermaßen stimmiges Bild zur zeitlichen Entwicklung nach EURO-Klassen.

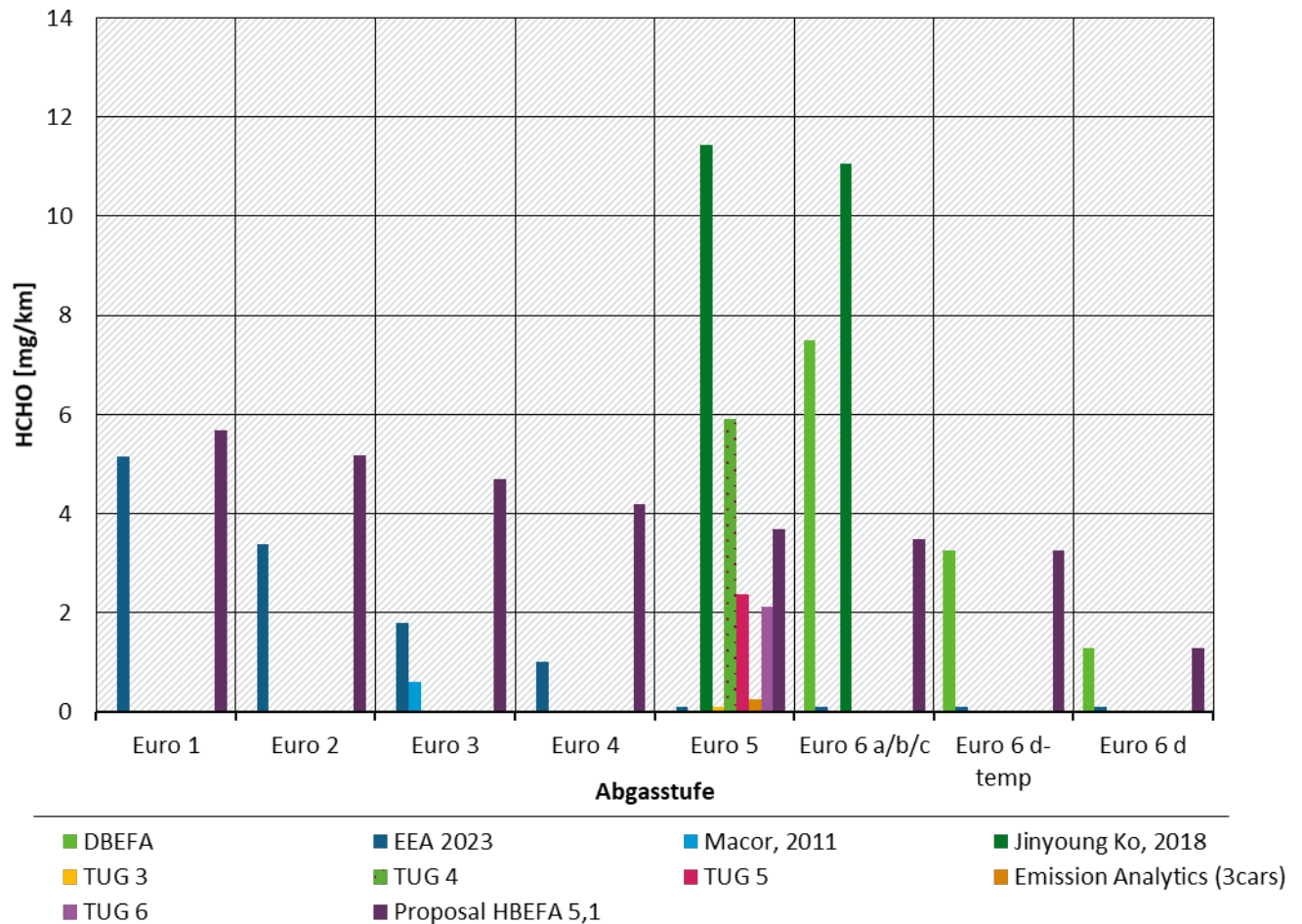
Abbildung 23: Verfügbare Messdaten zu Formaldehyd-Emissionen (HCHO) von PKW mit Ottomotoren in betriebswarmem Zustand



Quelle: Graphik FVT

Für PKW mit Dieselmotoren sind die Daten weniger stimmig, die einzelnen Messwerte älterer PKW liegen aber innerhalb der erwartbaren Streubreite, die sich aus den EURO 6 Messdaten ableiten lässt, die ja z.B. für EURO 6d-TEMP zwischen 0 und 30 mg/km liegen (Abbildung 7). Für die Zeitreihe wurden ab EURO 6d-TEMP die DBEFA Daten verwendet, für EURO 4 und 5 die jeweiligen Mittelwerte aus den Messwerten und den (EEA, 2023) Emissionsdaten. Grundsätzlich dürften die (EEA, 2023) die Formaldehyd-Emissionen moderner Dieselmotoren deutlich unterschätzen, was auf die ältere Datenbasis zurückzuführen sein dürfte. Da die Formaldehyde in (EEA, 2023) als Anteile von HC aus Veröffentlichungen von BUWAL, TNO, Volkswagen und UBA, jeweils aus den Jahren 1989 bis 1996 stammen, gehen wir davon aus, dass die Daten für EURO 0 und EURO 1 einigermaßen belastbar sind.

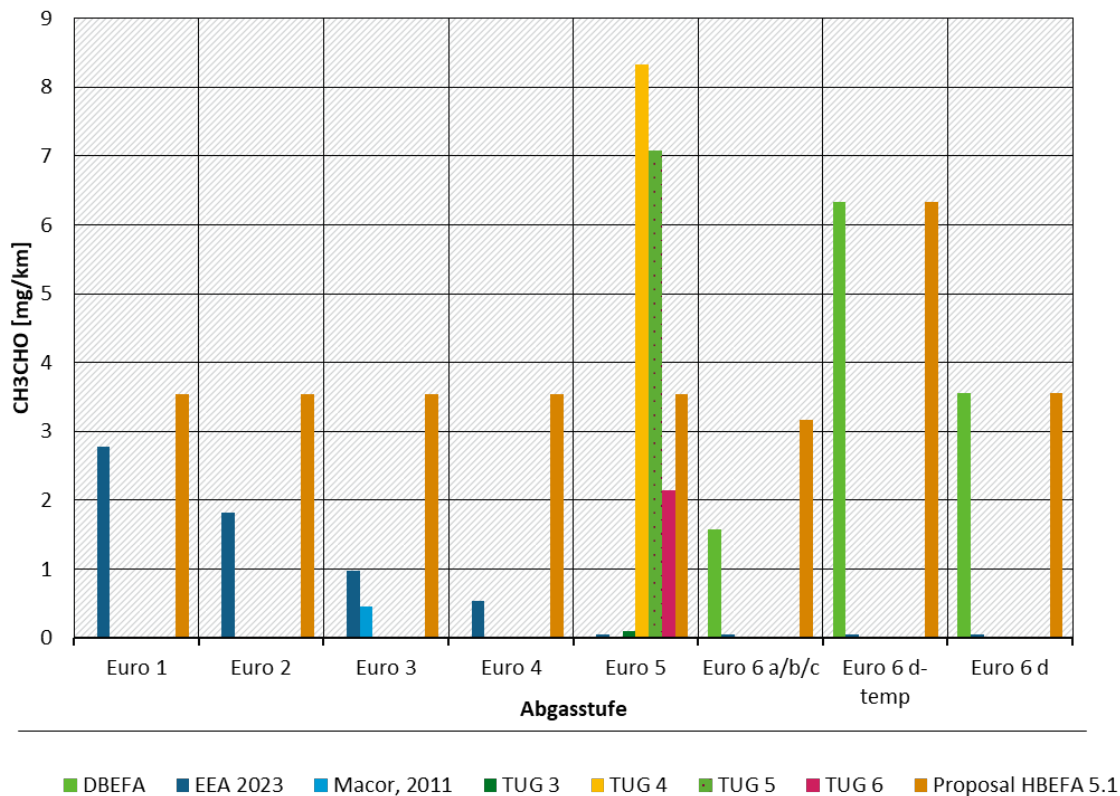
Abbildung 24: Verfügbare Messdaten zu Formaldehyd-Emissionen (HCHO) von PKW mit Dieselmotoren in betriebswarmem Zustand



Quelle: Graphik FVT

Bei Acetaldehyd ergab sich ein ähnliches Bild wie für Formaldehyd, hier liegen die Emissionsfaktoren für EURO 6 aus (EEA, 2023) allerdings bei Otto- und Diesel-PKW um mehr als eine Größenordnung unter den DBEFA Werten. Die Anteile von Acetaldehyd an den VOCs basiert in (EEA, 2023) wie auch bei den Formaldehyden jeweils aus Literaturquellen zwischen 1989 und 1996. Daher wurden für die Zeitreihe die Werte für EURO 0 und EURO 1 aus (EEA, 2023) übernommen, für EURO 4 (nur bei Otto-PKW vorhanden) und EURO 5 die Mittelwerte aus den Messdaten. Bei den Diesel-PKW wurde der EURO 5-Wert konstant bis EURO 0 beibehalten und trifft dort den Emissionsfaktor aus (EEA, 2023).

Abbildung 25: Verfügbare Messdaten zu Acetaldehyd-Emissionen (CH₃CHO) von PKW mit Dieselmotoren in betriebswarmem Zustand



Quelle: Graphik FVT

Für Isocyanensäure und Salpetrige Säure wurden keine Literaturdaten gefunden. Für diese Abgaskomponenten wurde die Zeitreihe aus DBEFA und den zusätzlichen Tests an der TUG an vier Diesel-PKW der Abgasstufe EURO 5 gebildet. Für EURO-Klassen vor EURO 5 wird der Wert von EURO 5 für die Zeitreihe vorgeschlagen, da jeweils keine NO_x-Abgasnachbehandlung installiert war, die NO_x- und HC-Rohemissionen ähnlich hoch sind und ab EURO 3 zumeist ein Oxidationskatalysator installiert war. Ein signifikanter Einfluss der Partikelfilter, die vor EURO 3 nicht in Serie sind, sollte auf diese Schadstoffe nicht bestehen. Für Ottomotoren wurden zu diesen Schadstoffen keine verwertbaren Mess- und Literaturwerte gefunden.

Die Messdaten zu den kalt gestarteten Tests wurden analog wie die betriebswarmen Emissionen ausgewertet. Die Kaltstartzusatzemissionen in [g/Start] ergeben sich jeweils aus der Differenz der Emissionsniveaus in den kalt gestarteten Tests minus der Emissionsniveaus in den warm gestarteten Tests. Bei Diesel-PKW ergeben sich von EURO 0 bis EURO 5 negative Kaltstartzusatzemissionen für Salpetrige Säure, was bedeutet, dass die Emissionen nach Kaltstarts niedriger als die nach Warmstarts sind. Die bei diesen Abgasklassen generell niedrigeren NO_x-Emissionen nach Kaltstart als nach Warmstart könnten diesen Trend erklären.

Für SNF wurden keine verwertbaren Literaturdaten und Messwerte vor EURO 6 gefunden. Für die Zeitreihe der Aldehyde wurde daher für alle EURO-Klassen vor EURO 6 A ein konstantes Verhältnis der jeweiligen Aldehyde zu den HC Emissionen angenommen. Für Isocyanensäure und Salpetrige Säure wurde jeweils dasselbe Verhältnis zu EURO 6 angenommen, wie es für Diesel-PKW mit vergleichbarer Abgasnachbehandlungstechnologie gefunden wurde. Tabelle 4 bis Tabelle 6 zeigen die vorgeschlagenen Verhältnisfaktoren zur Ableitung von Emissionsfaktoren im HBEFA für die EURO Klassen 0 bis inklusive 5. Für die Sub-Gruppen von EURO 0 (Pre-ECE,

ECE 15/01 bis ECE 15/04) wird jeweils der für EURO 0 angegebene Wert vorgeschlagen, da es keine Daten zu eventuellen Unterschieden gibt. Die Faktoren von EURO 6ab bis EURO 6d bzw. EURO 6 sind nur für die Übersicht dargestellt. Die Emissionsfaktoren für diese Schichten werden für HBEFA 5.1 im Detail für jede Verkehrssituation aus den verfügbaren Messdaten simuliert.

Tabelle 4: Vorgeschlagene Verhältnisfaktoren für die neuen, nicht limitierten Abgaskomponenten in HBEFA 5.1, anzuwenden für PKW und LNF der Abgasstufen EURO 0 bis EURO 5, jeweils bezogen auf die betriebswarmen Emissionsfaktoren von EURO 6d-TEMP

	PKW & LNF Otto warm				PKW & LNF Diesel warm			
	HCHO	CH ₃ CHO	HNCO	HNO ₂	HCHO	CH ₃ CHO	HNCO	HNO ₂
ECE 15/04	110,9	7,89	n,a	n,a	1,90	0,56	0,28	3,74
Euro 1	17,34	0,95	n,a	n,a	1,75	0,56	0,28	3,74
Euro 2	6,80	0,90	n,a	n,a	1,60	0,56	0,28	3,74
Euro 3	1,95	0,85	n,a	n,a	1,44	0,56	0,28	3,74
Euro 4	1,76	0,78	n,a	n,a	1,29	0,56	0,28	3,74
Euro 5	1,50	0,71	n,a	n,a	1,14	0,56	0,35	3,74
Euro 6abc	1,24	0,73	n,a	n,a	1,07	0,50	0,50	2,37
Euro 6 d-TEMP	1,00	1,00	n,a	n,a	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 6 d	0,80	0,71	n,a	n,a	0,40	0,56	0,43	0,71

Tabelle 5: Vorgeschlagene Verhältnisfaktoren für die neuen, nicht limitierten Abgaskomponenten in HBEFA 5.1, anzuwenden für PKW und LNF der Abgasstufen EURO 0 bis EURO 5, jeweils bezogen auf Kaltstartzusatzemissionen von EURO 6d-TEMP

	PKW & LNF Otto Kaltstartzusatz				PKW & LNF Diesel Kaltstartzusatz			
	HCHO	CH ₃ CHO	HNCO	HNO ₂	HCHO	CH ₃ CHO	HNCO	HNO ₂
ECE 15/04	9,86	0,08	n,a	n,a	0,28	0,21	0,08	-0,12
Euro 1	6,69	0,64	n,a	n,a	0,28	0,21	0,10	-0,15
Euro 2	2,63	0,67	n,a	n,a	0,26	0,21	0,12	-0,19
Euro 3	1,05	0,71	n,a	n,a	0,26	0,21	0,16	-0,24
Euro 4	0,66	0,78	n,a	n,a	0,22	0,21	0,20	-0,30
Euro 5	0,28	0,86	n,a	n,a	0,17	0,21	0,24	-0,50
Euro 6abc	1,23	1,31	n,a	n,a	0,69	0,24	0,73	0,60
Euro 6 d-temp	1,00	1,00	n,a	n,a	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 6 d	0,82	0,90	n,a	n,a	0,87	0,54	0,49	1,00

Tabelle 6: Vorgeschlagene Verhältnisfaktoren für die neuen, nicht limitierten Abgaskomponenten in HBEFA 5.1, anzuwenden für SNF der Abgasstufen EURO 0 bis EURO V, jeweils bezogen auf die entsprechenden Emissionsfaktoren von EURO 6 D

	SNF Diesel betriebswarm				SNF Diesel Kaltstartzusatz			
	HCHO	CH ₃ CHO	HNCO	HNO ₂	HCHO	CH ₃ CHO	HNCO	HNO ₂
ECE 15/04	9,31	1,67	0,28	3,74	0,28	0,21	0,08	-0,12
Euro I	8,69	1,56	0,28	3,74	0,28	0,21	0,10	-0,15
Euro II	5,70	1,02	0,28	3,74	0,26	0,21	0,12	-0,19
Euro II	5,39	0,97	0,28	3,74	0,26	0,21	0,16	-0,24
Euro IV	4,92	1,15	0,28	3,74	0,22	0,21	0,20	-0,30
Euro V	4,46	1,34	0,35	3,74	0,17	0,21	0,24	-0,50
Euro 6 ABC	4,00	1,52	0,82	0,99	1,36	1,25	0,50	2,42
Euro 6 D	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 6 E	0,60	1,11	0,09	0,10	0,64	0,52	0,10	0,24

4 Limit-Methoden für die Reifenabriebemissionen

In diesem Ad-Hoc Thema sollten Optionen zur zukünftigen Limitierung von Reifenabriebemissionen von PKW und LNF in Euro 7 untersucht werden. Als Testverfahren wird der derzeitige Entwurf zum Konvoi-Verfahren nach UN ECE Regulierung Nr. 117⁷ unterstellt. Ab dem Jahr 2028 sollen neue Reifenmodelle, ab 2030 alle neue Reifen noch zu definierende Grenzwerte erfüllen.

4.1 Die Testmethode nach UN ECE 117

UN ECE Regulierung Nr. 117⁷, Annex 10 sieht grundsätzlich zwei Testverfahren für C1 Reifen vor:

- ▶ Straßentests im Konvoi-Verfahren über 8000 km
- ▶ Prüfstandtests am Trommelprüfstand über 5000 km

Für Euro 7 ist nach derzeitigem Stand das Straßentestverfahren in Überlegung. Dabei können maximal vier PKW auf öffentlichen Straßen im Konvoi auf einer festzulegenden Runde von mindestens 300km Länge über insgesamt 8 000km mit vier verschiedenen Fahrern betrieben werden, welche zwischen den Testfahrzeugen wechseln müssen. Ebenso müssen die Testfahrzeuge die Position im Konvoi regelmäßig wechseln.

Die Testfahrzeuge im Konvoi müssen bezüglich Masse, Antriebsart und Motortyp gleich sein, bevorzugt wird Vorderradantrieb⁸.

Für die Testrunde sind Randbedingungen für Wetter, Straßenbeschaffenheit, Geschwindigkeiten und die Standardabweichungen der Längs- und Querschleunigungen festgelegt. Dafür muss während der Messung kontinuierlich die Geschwindigkeit, Längs- und Querschleunigung in mindestens 10 Hz mittels GNSS sowie Reifendruck und Wetterbedingungen und die Fahrzeugtestmasse aufgezeichnet werden. Die Testmassen der Testfahrzeuge müssen jeweils 67% der nominalen maximalen Reifen-Traglast mit einer Toleranz von +/- 7% betragen⁹, zudem ist auch die Achslastverteilung vorgegeben.

Die Spur und Sturz des Fahrzeugs im Testzustand müssen zu Beginn und am Ende des Tests gemessen werden und dürfen nicht mehr als +/- 0,15° (Spur) bzw. +/- 0,3° (Sturz) abweichen; auch für die Absolutwerte von Spur und Sturz sind Grenzen für zulässige Testfahrzeuge vorgegeben.

Für die Standardabweichungen der aufgezeichneten Längs- und Querschleunigung sind untere und obere Grenzwerte für gültige Messfahrten festgelegt, als Absolutwerte sind für Längs- und Querschleunigung jeweils maximal +/- 5m/s² vorgeschrieben. Innerorts und Ausserorts und Autobahn haben jeweils unterschiedliche Vorgaben für die erlaubten Standardabweichungen der Längs- und Querschleunigungen. Geschwindigkeitslimits müssen mit 10% Toleranz eingehalten werden und die Maximalgeschwindigkeit darf 140 km/h nicht überschreiten.

⁷ UN ECE Regulierung nr. 117: Proposal for Supplement 02 to the 04 series of amendments to UN Regulation No. 117; Submitted by the task force on tyre Abrasion; adopted at 24th September 2023 by UN; UN; 23.11.2023. Online unter: <https://unece.org/sites/default/files/2024-11/ECE-TRANS-WP29-GRBP-2024-10e.pdf>; zuletzt besucht am 04.07.2025

⁸ Wie später diskutiert wird, könnte das Kfz mit dem Referenzreifen eine andere Testmasse erfordern, wenn der Referenzreifen eine andere Traglast hat als die zu testenden Reifen.

⁹ Berechnungsbeispiel: Bei einer Tragfähigkeitskennzahl von 94 (= maximale Last von 670 kg) ist die Gesamtlast der 4 Reifen 670*4 = 2680 kg. Die Testmasse beträgt dann 2680*67 % = 1796 kg mit einer Toleranz von ± 188 kg.

Ebenso sind untere und obere Grenzen für die Testtemperatur für Sommer- und Winterreifen definiert. Maximal 20% der Strecke dürfen auf nasser Fahrbahn zurückgelegt werden.

Zur Bestimmung des Abriebs werden alle vier Reifen jedes PKW jeweils vor und nach dem Test gewogen. Vor jeder Wiegung müssen sie gereinigt werden. Die mittlere Massedifferenz vor und nach der 8 000 km Fahrt bezogen auf die Strecke in [mg/km] ist das erste Testergebnis.

Da der Reifenabrieb stark von dem Fahrverhalten, dem Kfz (Masse, Spur, Sturz, Luftwiderstand, etc.) und der Route (Straßenoberfläche, Kurvigkeit) abhängen, muss im Konvoi neben den zu testenden Reifen („candidate tires on candidate vehicles“ bzw. „Testreifen“ am „Testfahrzeug“) auch ein Kfz mit Referenzreifen („reference tires on reference vehicle“) fahren. Der an den Testreifen gemessene Abrieb je km wird daher auf den Abrieb des Referenzreifens bezogen. Das Verhältnis von Abrieb des Testreifens zu Abrieb des Referenzreifens wird als „Abriebrindex“ bezeichnet. Die am Referenzreifen gemessenen Abriebraten, normiert auf 20°C Testtemperatur, müssen für gültige Tests in definierten Grenzen sein.

Da der Referenzreifen mit seinen Dimensionen und Traglast nicht auf alle Fahrzeugklassen montiert werden kann, können die Masse und Fahrwiderstände der Testfahrzeuge von den Daten des Referenzfahrzeuges abweichen. Welche Einflüsse solche Unterschiede haben können, wird nachfolgend analysiert. Eine diskutierte Möglichkeit, den Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugmassen zu minimieren ist die Division des Abriebs aller Reifen je Kilometer durch die Fahrzeugmasse.

Folgende Testergebnisse mit einem Grenzwertbezug können damit erzeugt werden:

- ▶ Abrieb in [mg/Kfz-km] als Messergebnis am Testreifen bzw. am Referenzreifen.
- ▶ Abriebrindex aus dem Verhältnis [mg/km/t] Abrieb Testreifen zu [mg/km/t] Abrieb Referenzreifen jeweils bei den gleichen Testbedingungen [-]
- ▶ Abriebrate in [mg/km/t], berechnet aus dem Abriebrindex * Abriebrate des Referenzreifens bei Standardtemperatur¹⁰
- ▶ Abriebrate in [mg/km], berechnet aus der Abriebrate in [mg/km/t] * Masse des zu typisierenden Fahrzeuges in [t]
- ▶ Korrigierter-Abrieb [mg/km/t], berechnet aus Abriebrate in [mg/km/t] * Abrieb-Massefunktion¹¹ für die Masse des zu typisierenden Fahrzeuges. Diese Option könnte eventuelle nicht Masse-proportionale Abhängigkeiten des Abriebs korrigieren.

Wegen unterschiedlicher Abriebniveaus und Temperaturabhängigkeiten werden separate Referenzreifen und damit eventuell auch verschiedene Limits für Sommer-, Winter- und Ganzjahresreifen erwartet.

Für die nachfolgenden Grenzwertüberlegungen ist es generell unerheblich, ob mit der Konvoi-Methode oder dem Trommelprüfstand gemessen wird. Derzeit ist für beide Methoden noch nicht nachgewiesen, dass sie vergleichbare und wiederholbare Ergebnisse auf verschiedenen Strecken bzw. Prüfständen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen ergeben, wir setzen das für nachfolgende Überlegungen allerdings voraus.

¹⁰ Die Abriebrate des Referenzreifens in [mg/km/t] muss dafür für Standard-Bedingungen definiert werden (Strecke, Temperatur, Fahrer, ...), die Multiplikation des Testergebnisses des Testreifens mit dem Verhältnis des Referenzreifens aus seinem Normabrieb zu seinem Abrieb bei den Testbedingungen soll dann die Einflüsse der Testbedingungen eliminieren.

¹¹ Ein Beispiel wird in Kap. 4.4.2 gezeigt. Der Abrieb in [mg/km] steigt zwar mit der Fahrzeugmasse, erhöht sich aber vermutlich nicht im gleichen Verhältnis (proportional) wie die Testmasse, da z.B. auch Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes aufgebracht werden muss.

4.2 Datengrundlagen zum Abriebverhalten

Als Basis für die Beurteilung der Effekte von Grenzwerten für den Reifenabrieb verwenden wir die Ergebnisse der Reifentests des ADAC¹², welche neben Sicherheit auch den Verschleiß angeben. Der Test umfasst Konvoifahrten über 15 000 km pro Reifen mit identischen Fahrzeugen sowie Prüfstandtests zur Simulation der Konvoifahrten. Die maximale Laufleistung wurde aus der mittels Laser gemessenen Verminderung der Profiltiefe hochgerechnet. Der Masseabrieb erfolgt über Wiegung der Reifen und ist der Mittelwert über die gemessenen Reifen einer Type. Neben gewogenem Abrieb und Laufleistung wurde im ADAC Test ebenso eine Note für die Fahrsicherheit je Reifen vergeben.

Insgesamt wurden für diese Studie 99 derart gemessene Reifen ausgewertet. Die Anzahl getesteter Reifen je Dimension und Modelljahr und die Mittelwerte für Abrieb in [mg/km/t] sowie die Fahrsicherheitsnote sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Zukünftige Grenzwerte könnten anhand der Verteilung der Abriebraten der Reifen am Markt definiert werden. Z.B. liegt der Mittelwert der Abriebrate der 50% besten Reifen zwischen 8% und 15% niedriger als der Mittelwert aller Reifen einer Dimension. Im Mittel über alle Dimensionen der Daten zu Winter- und Sommerreifen ergibt sich für die besten 50% der Reifen eine 12% geringere Abriebrate als für den derzeitigen Mittelwert aller Reifen (Abbildung 26). Die Note für Fahrsicherheit ist für die bzgl. Abrieb 50% besten Reifen um 2% besser als die mittlere Note für alle Reifen (Tabelle 7). Natürlich muss der Grenzwert nicht auf das 50-Perzentil heutiger Reifen bezogen werden. Je nach Annahme möglicher Verbesserungen können Grenzwerte auch geringer angesetzt werden.

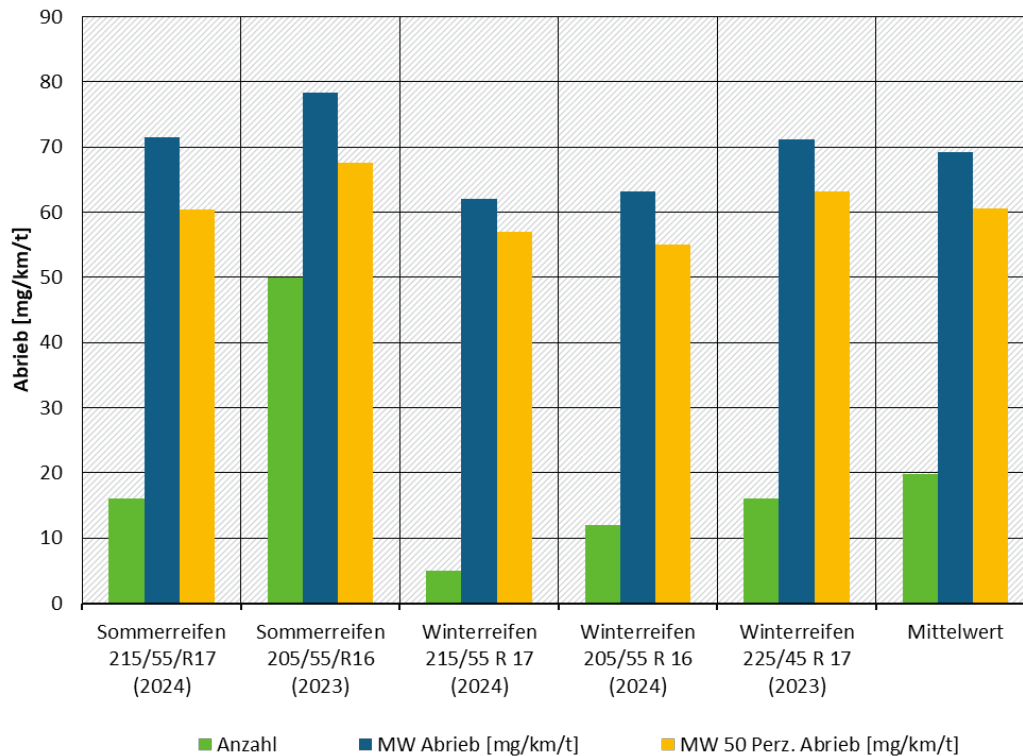
Zwei Reifendimensionen waren typisch für Traglastindex 98 (= max. 760 kg pro Reifen), die übrigen entsprachen Traglastindex 91 (= max. 630 kg pro Reifen). Die Reifen mit höherer Traglast zeigten etwas geringere Abriebraten in [mg/km/t] als die mit niedrigerer Traglast. Ob die Tests beim ADAC jeweils mit 67% der maximalen Traglast als Kfz-Testmasse durchgeführt wurden, konnten wir nicht in Erfahrung bringen. Wegen der Reifendimensionen ist zumindest anzunehmen, dass die Tests an den Reifen mit Traglastindex 98 mit einem schwereren PKW als die mit Traglastindex 91 durchgeführt wurden. Der Trend zu geringeren Abriebraten je Tonne Fahrzeugmasse mit steigender Masse ergibt sich auch aus dem Simulationsmodell (Kap. 4.3).

¹² <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/reifen/reifentest/>; zuletzt besucht am 13.11.2024

Abbildung 26: Mittlere Reifenabriebrate aus den ADAC Reifentests nach Dimension und Modelljahr jeweils für alle getesteten Reifen und für die 50% Reifen mit niedrigstem Abrieb (50 Perzentil)

Auswertung ADAC Reifenabrieb Tests

Modelljahr 2023 und 2024



Quelle: Daten ADAC, eigene Auswertung und Grafik

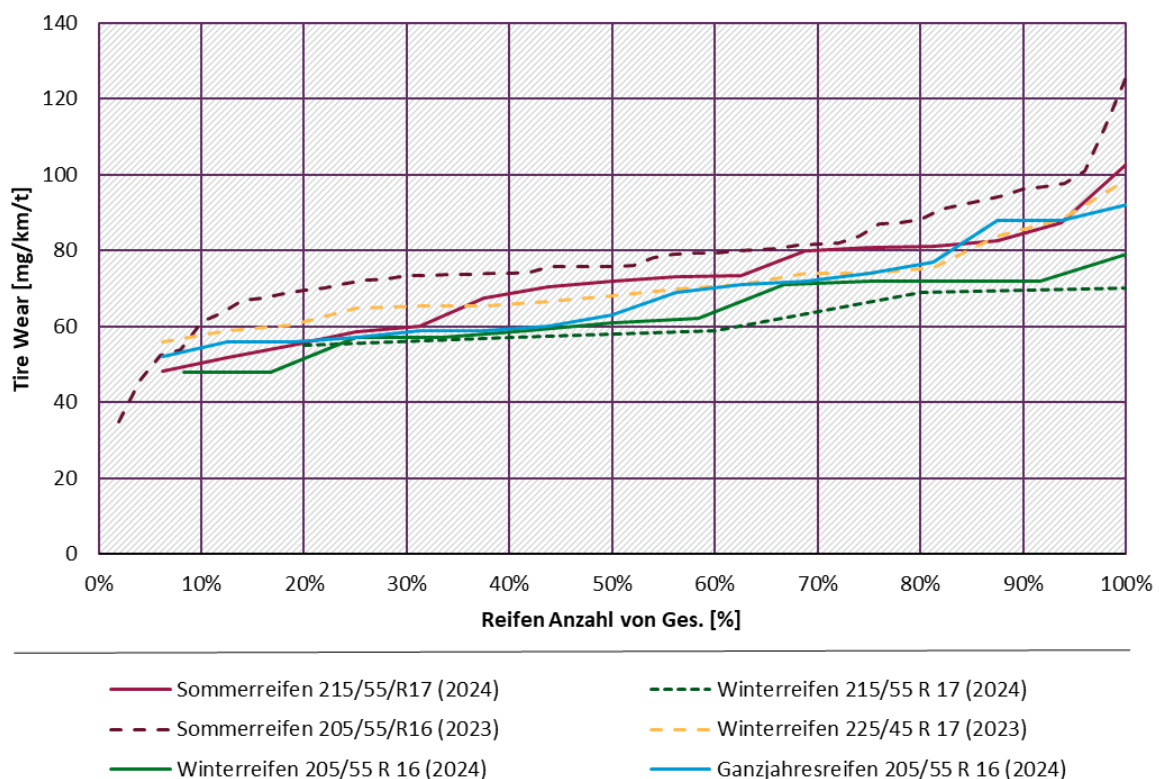
Tabelle 7: Ergebnisse aus den ADAC Reifentests nach Dimension und Modelljahr

Modell	Alle Reifen				Mittelwerte der 50% besten Reifen			Änderung 50% Perz. / Alle Reifen		
	Anzahl	MW Abrieb [mg/km/t]	Stabw [%]	Fahrsicherheit Note	MW Abrieb [mg/km/t]	Stabw <50 P. [%]	Fahrsicherheit Note	Änderung Abrieb [%]	Änderung Sicherheit [%]	Max Reifenlast [kg]
Sommerreifen 215/55/R17 (2024)	16	71,5	20%	2,74	60,5	15%	2,73	-15%	0,7%	760
Sommerreifen 205/55/R16 (2023)	50	78,3	20%	3,32	67,6	15%	3,37	-14%	-1,4%	630
Winterreifen 215/55 R 17 (2024)	5	62,0	11%	2,34	57,0	4%	2,40	-8%	-2,5%	760
Winterreifen 205/55 R 16 (2024)	12	63,2	16%	3,18	55,0	10%	2,92	-13%	9,1%	630
Winterreifen 225/45 R 17 (2023)	16	71,3	16%	2,94	63,2	7%	2,90	-11%	1,5%	630

	Alle Reifen				Mittelwerte der 50% besten Reifen			Änderung 50% Perz. / Alle Reifen		
	Anzahl	Abrieb [mg/km/t]	Abrieb [%]	Abrieb [mg/km/t]	Abrieb [%]	Abrieb [mg/km/t]	Abrieb [%]	Abrieb [%]	Abrieb [%]	Abrieb [mg/km/t]
Ganzjahresreifen 205/55 R 16 (2024)	16	68,3	19%	3,58	57,8	6%	3,70	-15%	-3,2%	670
Mittelwert	19,2	69,1	17%	3,02	60,2	9%	3,00	-13%	0,7%	680

Abbildung 27 zeigt die relative Verteilung für die getesteten Reifendimensionen, sortiert nach steigenden Abriebraten. Die Verteilung sieht jeweils ähnlich aus, wegen der mit 50 Reifen größten Stichprobe dürfte die für die Sommerreifen in Dimension 205/55/R16 die repräsentativste Form haben. Diese Verteilung wird später noch für die Grenzwertszenarien verwendet.

Abbildung 27: Reifenabriebrate aus den ADAC Reifentests nach Dimension und Modelljahr jeweils für alle getesteten Reifen aufgetragen nach steigender Abriebrate



Quelle: Eigene Graphik, FVT

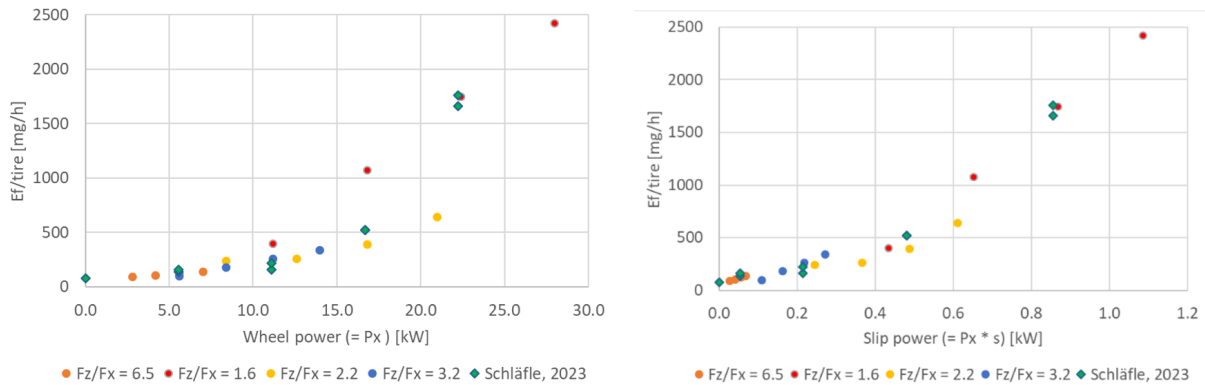
4.3 Die Simulationemethode PHEM/HBEFA 5.1

In den Berechnungen wird das Simulationsmodell PHEM für HBEFA 5.1 verwendet, in dem das im Auftrag des BAFU entwickelte Reifenabriebmodell, (Hausberger, 2024) implementiert ist.

Der Reifenabrieb wird dabei aus der Schlupfleistung am Kontakt Reifen und Fahrbahn berechnet. Messdaten von KIT in in (Schläfle, 2023), (Schläfle, 2023-2) und (Schläfle, 2024) sowie Messungen am Rollenprüfstand der TU Graz wurden für die Validierung genutzt und sind ebenso in (Hausberger, 2024) beschrieben. Unter Berücksichtigung der Schlupfleistung können alle Messdaten, unabhängig von dem eingestellten Verhältnis von Längs- bzw. Querkraft zur Vertikalkraft, welche im normalen Fahrbereich proportional zum Schlupf ist, harmonisch für

einen Reifen als Polygonzug dargestellt werden. Wird der gemessene Abrieb dagegen über der Vertikalkraft, der vertikalen Schlupfleistung (Vertikalkraft x Schlupfgeschwindigkeit) oder der Radleistung aufgetragen, ergeben sich bei unterschiedlichem Verhältnis von Längs- bzw. Querkraft zur Vertikalkraft (also unterschiedlichem Schlupf) unterschiedliche Linien (Abbildung 28). Analog zeigt sich für die Messdaten bei Kräften in Querrichtung und in Längs- und Querrichtung jeweils die beste Korrelation des Abriebs zur Schlupfleistung, (Hausberger, 2024).

Abbildung 28: in (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) gemessener Abrieb bei Längskräften, einmal aufgetragen über Radleistung (links) und einmal über Rad-Schlupfleistung (rechts)



Quelle: eigene Graphik, FVT

Die Schlupfleistung wird sowohl in Längs (x)- als auch in Querrichtung (y) aus der Fahrzeugdynamik für gegebene Fahrzyklen berechnet. Im Modell sind dafür mittlere Reifensteifigkeiten und Schlupfabhängigkeiten definiert.

Dabei gilt für die Längsrichtung:

$$\text{Schlupf } s_{x(t)} = (\text{Radumfangsgeschwindigkeit} / \text{Fahrzeuggeschwindigkeit} - 1)$$

$$\text{Schlupf-generisch} = F_x / F_z * 0,0625$$

$$PS_{(t)} = F_{x(t)} \cdot s_{x(t)} \cdot v_{x(t)} = P_{x(t)} \cdot s_{x(t)}$$

$$\text{Generisch: } PS_{(t)} = P_{x(t)} \cdot 0.0625 \cdot \frac{F_{x(t)}}{F_{z(t)}}$$

Schlupfleistung Längs allgemein

Mit generischem Schlupf

Dabei gilt für die Querrichtung entsprechend folgender Formel:

$$\text{Schräglaufwinkel } \alpha_{(t)} = \frac{F_{y(t)}}{F_{z(t)}} \cdot 3.65$$

$$\text{Querschlupf } s_{y(t)} = \sin(\alpha_{(t)})$$

$$\text{Zentrifugalkraft } F_y = \frac{m_{veh.} \cdot v_{(t)}^2}{r_{(t)}}$$

$$\text{Quer - Schlupfleistung } P_y = F_y \cdot s_y \cdot v$$

Mit generischer Steifigkeit

Schlupfleistung Quer

Mit $\alpha_{(t)}$ Schräglaufwinkel in Zeitschritt t

$F_{y(t)}$ Zentrifugalkraft in Zeitschritt t in [N]

$F_{z(t)}$ Radaufstandskraft in Zeitschritt t in [N]

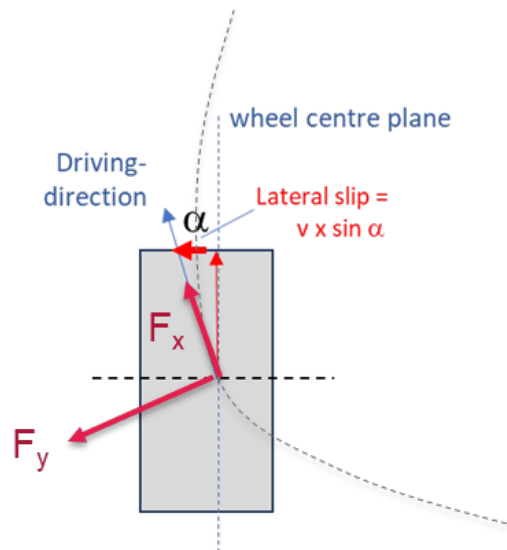
$s_{y(t)}$ Querschlupf in Zeitschritt t in [-]

$v_{(t)}$ Geschwindigkeit in Zeitschritt t in [m/s]

$r_{(t)}$ Kurvenradius in Zeitschritt t in [m]

$P_{y(t)}$ Schlupfleistung in Querrichtung in Zeitschritt t in [W]

Abbildung 29: Schematische Darstellung von Fahrtrichtung, Reifenmittelebene und Schräglaufwinkel α bei einer Kurvenfahrt¹³

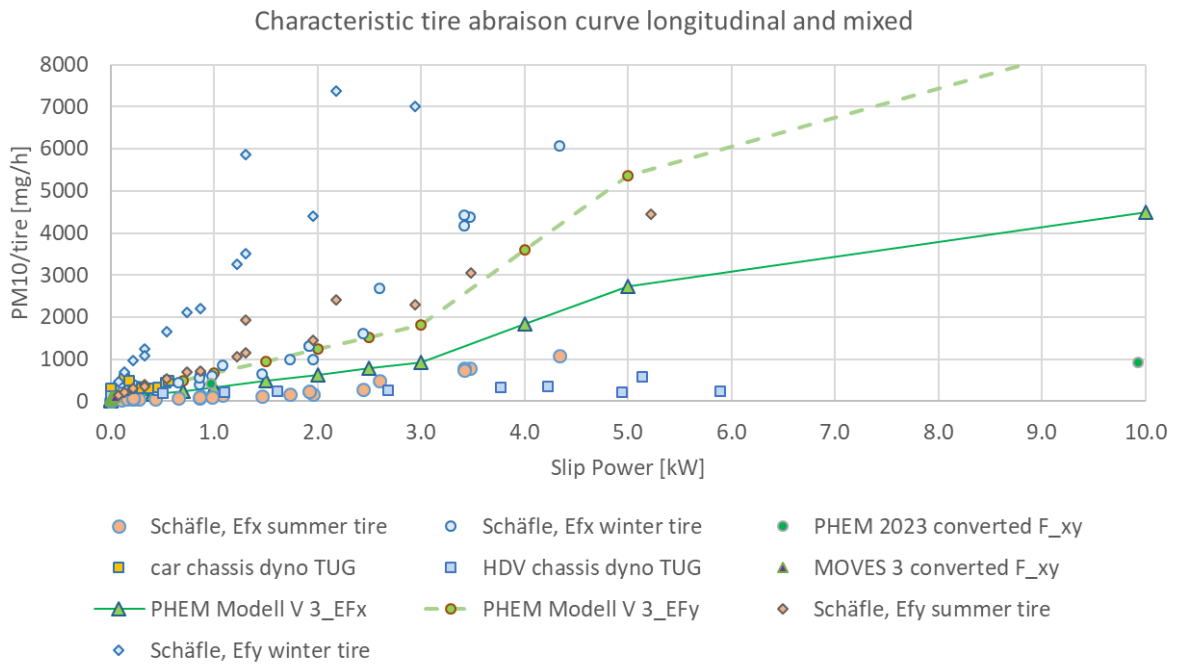


Quelle: Eigene Graphik, FVT

Aus allen verfügbaren Messdaten aus Literatur und aus eigenen Messungen wurden für die Simulation der Emissionsfaktoren in HBEFA 5.1 charakteristische Polygone für den Abrieb an PN [# /h] und PM10 [g/h] erzeugt und anhand der gesammelten Testdaten zum gesamten, realen Abrieb kalibriert. Die hier relevanten Messdaten zu PM10 streuen stark. Dies ist sicher auch auf die noch nicht einheitlichen Messverfahren zurückzuführen, allerdings werden bei unterschiedlichen Reifenmodellen auch bei gleichen Testbedingungen um eine Größenordnung unterschiedliche PN und PM Emissionen gemessen. Der gesamte Abrieb streut deutlich weniger (Kap. 4.2). Aus den Messdaten ergeben sich auch bei Null Radleistung bzw. Null-Schlupfleistung Abriebemissionen (Abbildung 28 und Abbildung 30). Im Modell wird der Abrieb bei Stillstand des Fahrzeugs auf Null gesetzt. Bei Fahrt ergibt das Modell bei geringen Radleistungen überproportionalen Abrieb gegenüber höheren Schlupfleistungen (die Geraden der Polygone zwischen 0 und 3 kW schneiden die y-Achse oberhalb des Nullpunkts). Da die nicht angetriebenen Räder vorwiegend sehr niedrigen Radkräften ausgesetzt sind, trägt dieser Effekt dazu bei, dass – wie später diskutiert – die Abriebemissionen weniger als proportional mit der Fahrzeugmasse zunehmen. Inwieweit dieser Effekt real ist (z.B. infolge von Adhäsionskräften zwischen Reifen und Fahrbahn) und inwieweit er von der Fahrzeugmasse abhängt und/oder ob er durch Messartefakte hervorgerufen ist, wie z.B. unzureichend korrigierter PN-Hintergrundkonzentration), ist derzeit noch offen und soll durch weitere Messungen untersucht werden.

¹³ In der Fahrzeugdynamik wird häufig die x-Koordinate senkrecht zur Radachse definiert und y-Koordinate in Richtung Radachse. Hier ist die Fahrzeuglängsachse als x-Koordinate festgelegt, da die GPS-Signale, die Basis für die meisten Geschwindigkeitszyklen sind, die Trajektorie in diese Richtung angeben. Ohne Kenntnis des Lenkwinkels, erscheint eine Umrechnung in die „üblichen“ Koordinaten nicht sinnvoll.

Abbildung 30: Charakteristische Reifenabrieb-Polygone für die PM10 Emissionen bei Längs- und Querschlepp für die Simulation in PHEM sowie verfügbare Mess- und Literaturdaten



Quelle: Hausberger, 2024

Da der gesamte Reifenabrieb (Total Particle Mass, TPM) nicht zeitaufgelöst gemessen werden kann, wird die gesamte Abriebmasse für HBEFA 5.1 aus fixen Verhältnisfaktoren gemäß Tabelle 8 ermittelt.

Tabelle 8: Verhältnisfaktoren zur Bestimmung anderer Partikelkenngößen aus den PM10 Modellergebnissen für Reifenabriebemissionen

Verhältnis Schadstoffe	PKW & LNF
PM _{2.5} / PM ₁₀	0,50
TPM / PM ₁₀	18

Quelle: (Hausberger, 2025)

Mit den Verhältnissen zum gesamten Abrieb können ermittelte PM10 und PM2.5 Emissionsfaktoren auf Plausibilität überprüft werden, da die Größenordnung des Gesamtverschleißes aus den Mindestprofiliefen, der Profiltiefe von neuen Reifen, der Reifenbreite und der Dichte vom Abrieb (ca. 940 kg/m²) einigermaßen sicher schätzbar ist, (Hausberger, 2024).

Für einen PKW Reifen 215/60 R16 ergibt sich aus Umfang x Breite x Änderung Profiltiefe x Profilmfaktor x Dichte (2 x 0.2 x 0.005 x 0.8 x 940) etwa 1.5 kg Abrieb. Mit einer Haltbarkeit von ca. 50 000 km sind das 30mg/km je Reifen bzw. 120 mg/Kfz-km. Der Wert passt auch gut mit den in den ADAC Tests gemessenen Abriebraten zusammen.

Der Abrieb hängt natürlich vom Reifen und entsprechend des zuvor gezeigten Modells von der Route und Fahrweise ab (Straßenoberfläche, Kurvigkeit, Höhenprofil, Beladung, etc.).

Grundsätzlich gibt es noch wenig Arbeiten zur Korrelation von Straßen- und Rollentests nach UNR 117⁷ sowie zwischen PM10 und dem Gesamtabrieb. Inwieweit die in der Simulation

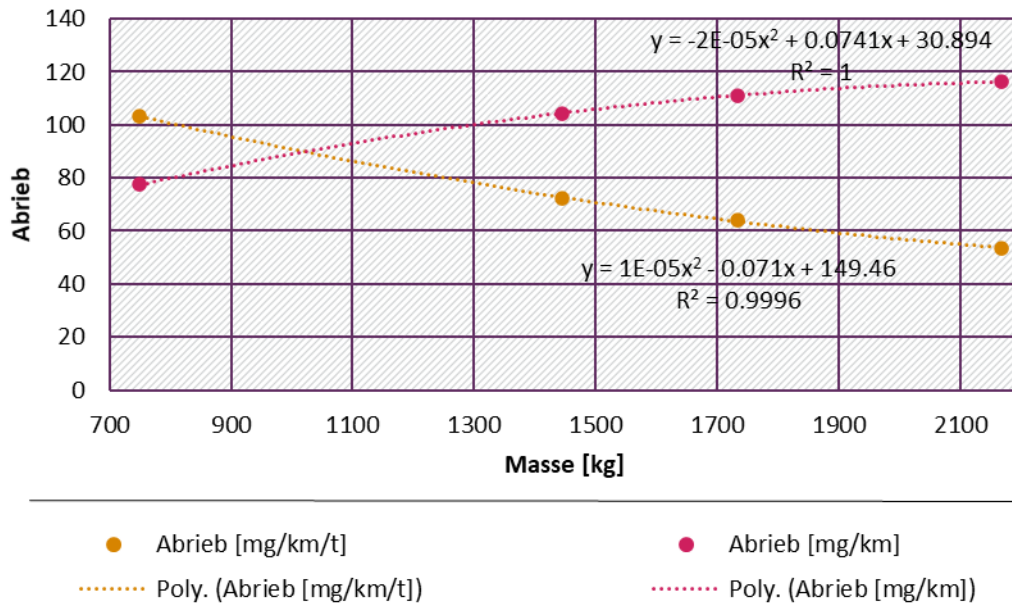
verwendeten Grundlagen repräsentative Gesamtabriebs- und PM10 Ergebnisse liefert, ist entsprechend der geringen Datenmenge also relativ unsicher, bessere Simulationsmodelle für durchschnittliche PKW im realen Betrieb als den für HBEFA 5.1 neu entwickelten konnten wir allerdings nicht identifizieren.

Die Abhängigkeiten, die sich aus dem Modell ergeben, sind folgende:

- ▶ Die Längsschlupfleistung steigt proportional zur Geschwindigkeit und mit F_x^2/F_z . Die Kraft in Längsrichtung (F_x) ergibt sich aus Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand (Masse-proportional) und Luftwiderstand (nicht zwingend zur Masse proportional). Die Vertikalkraft (F_z) ist proportional zur Masse. Insgesamt muss der Abrieb in [mg/km] aus Längskräften also ca. linear mit der Masse des Kfz zunehmen, wenn die Reifeneigenschaften gleich bleiben. Wegen des sinkenden Anteils des Luftwiderstandes an F_x bei zunehmender Masse nimmt F_x aber weniger zu als die Masse und der Schlupf nimmt ab. Da der Schlupf mit steigender Masse also eher abnimmt und die Längskraft etwas unter-proportional zur Masse zunimmt, steigt der Abrieb in [mg/km] auch unter-proportional zur Masse.
- ▶ Die Querschlupfleistung steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit aber indirekt proportional zum Kurvenradius, welcher bei steigender Geschwindigkeit im Durchschnitt sinkt. Weiters steigt die Querkraft proportional zur Masse, der Querschlupf proportional zu F_y/F_z , aus letzterem Term kürzt sich die Masse. Insgesamt nehmen die Querkräfte also auch linear mit der Masse des Kfz zu.
- ▶ Der zuvor beschriebene unter-proportionale Anstieg des Abriebs über der Radleistung bei kleinen Kräften, führt im Modell zu einem unter-proportionalen Anstieg des Abriebs über der Fahrzeugmasse. Bei niederen Geschwindigkeiten hat der Luftwiderstand ja nur geringen Anteil an dem Antriebsleistungsbedarf, daher ist die Radleistung in Längsrichtung dort weitgehend proportional zur Fahrzeugmasse, die in Quer-Richtung ist proportional (bei sonst identen Kfz-Eigenschaften). Dieser Effekt wäre in Zukunft noch genauer zu untersuchen, wenn entsprechende Messdaten bei niederen Radkräften verfügbar sind.
- ▶ Der berechnete Abrieb dürfte mit der Schlupfleistung überproportional steigen (Abbildung 30). Eine geringere Auflagefläche bei gleicher Schlupfleistung könnte ebenso höheren Abrieb bedeuten. Der höhere gemessene Abrieb bei Querkraft versus Längskraft würde diese Annahme unterstützen, da in diesem Fall eine ungleichmäßige Kraftverteilung über den Latsch entsteht. Dieser Effekt ist allerdings nicht quantifiziert und im Modell auch nicht berücksichtigt. Der Effekt kann auch über das Bürsten-Reifenmodell erklärt werden, z.B. (Ngeno, 2022). Dort wird die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn diskretisiert. Für die Horizontalkraft (Längs- und/oder Querkraft) werden die Schubspannungen im Latsch summiert, welche vom Schlupf abhängen (also der lokalen Relativgeschwindigkeit). Damit bei kleinerer Kontaktfläche die gleiche Kraft erreicht werden kann, muss sich der Reifen im Kontakt mehr verformen bzw. gibt es lokal höhere Relativbewegungen und damit höhere Lokale Schlupfleistung. Der Mechanismus sollte damit den Abrieb erhöhen.

Diese Abhängigkeiten zeigen sich bei einer Sensitivitätsanalyse, bei dem lediglich die Fahrzeugmasse in den Eingabedaten variiert wurde. Alle anderen Parameter sind unverändert entsprechend dem Datensatz des durchschnittlichen PKW-Otto im HBEFA 5.1. Ein Grenzwert auf die Abriebrate in [mg/km/t] müsste also mit zunehmender Testmasse sinken, ein Grenzwert auf den Abrieb in [mg/km] dagegen steigen (Abbildung 31).

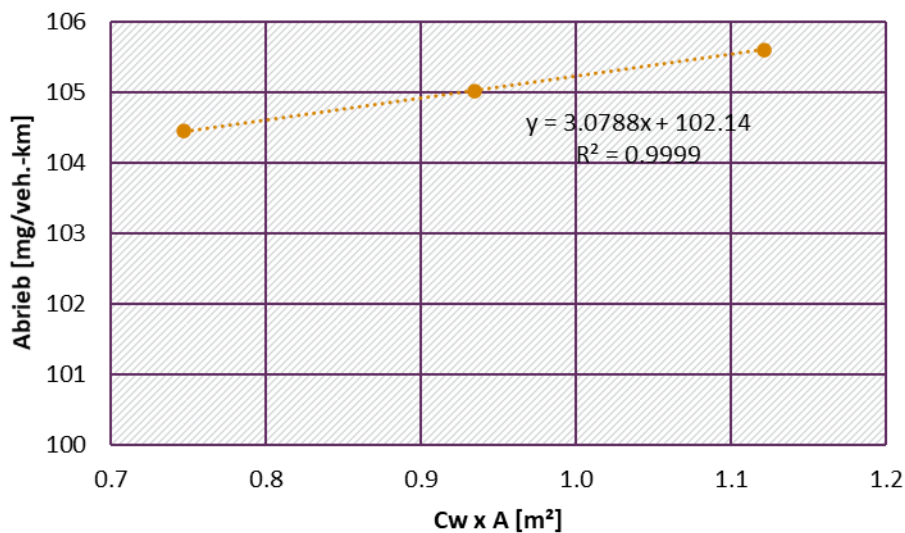
Abbildung 31: Simulierter Reifenabrieb je km und je km/t für eine Variation der Fahrzeugmasse mit generischen Kurvenradien (alle anderen Parameter wie Euro 7 Otto PKW in HBEFA 5.1)



Eigene Graphik, FVT

In der UN ECE Nr. 1177 ist die maximal zulässige Toleranz für den Luftwiderstand ($C_w \times A$) zwischen Testfahrzeug und Referenzfahrzeug mit +20% limitiert, zumindest wenn entsprechende PKW verfügbar sind. Die Ergebnisse einer Simulation mit dem Datensatz des durchschnittlichen PKW-Otto Euro 7 im HBEFA 5.1, in der nur $C_w \times A$ variiert wurde, ist in Abbildung 32 dargestellt. Demnach ergibt sich bei +20% $C_w \times A$ weniger als 1% höherer Abrieb.

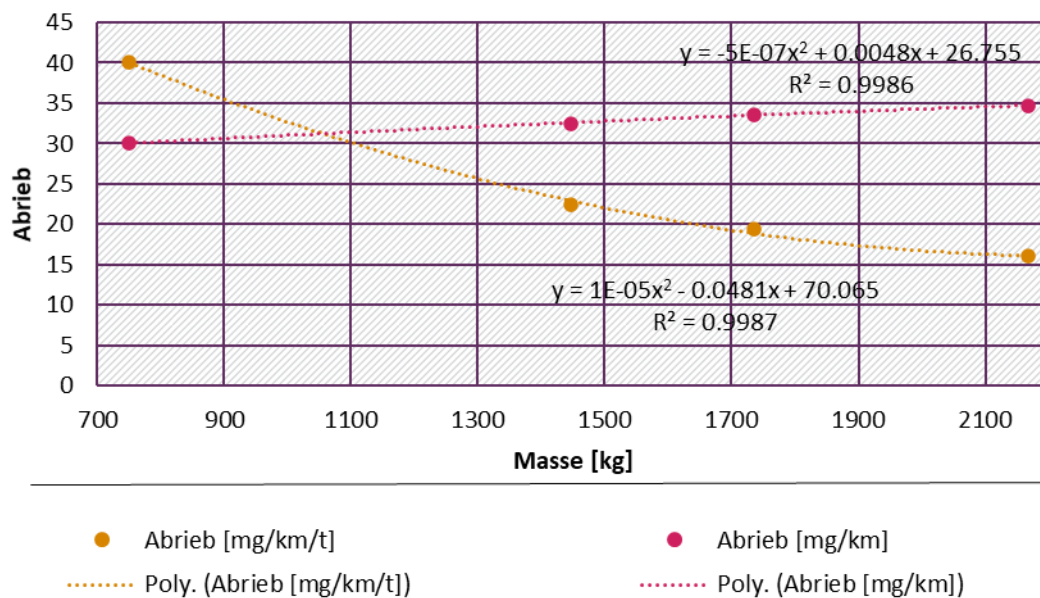
Abbildung 32: Simulierter Reifenabrieb je km/t für eine Variation des Luftwiderstandes mit generischen Kurvenradien (alle anderen Parameter wie Euro 7 Otto PKW in HBEFA 5.1)



Eigene Graphik, FVT

Interessant ist auch der hohe Einfluss der Kurvenfahrten auf den Abrieb, den das Modell vorhersagt. Simuliert man denselben RDE Test ohne Radien, also auf einer virtuellen Geraden, ergeben sich nur etwa 1/3 der Abriebwerte (Abbildung 33). Der Einfluss der Masse auf die [mg/km] ist erwartungsgemäß geringer als bei der Strecke mit Kurven, da ja die laterale Schlupfleistung eins zu eins proportional zur Masse ist, die Längsschlupfleistung wegen des Luftwiderstandes aber in geringerem Umfang mit der Masse steigt. Für die [mg/km/t] ist der Kurveneffekt entsprechend umgekehrt und die Änderung über der Masse ist mit Kurven größer als ohne.

Abbildung 33: Simulierter Reifenabrieb je km und je km/t für eine Variation der Fahrzeugmasse auf gerader Strecke (alle anderen Parameter wie Euro 7 Otto PKW in HBEFA 5.1)



Eigene Graphik, FVT

4.4 Ergebnisse Simulation Abrieb nach Segmenten

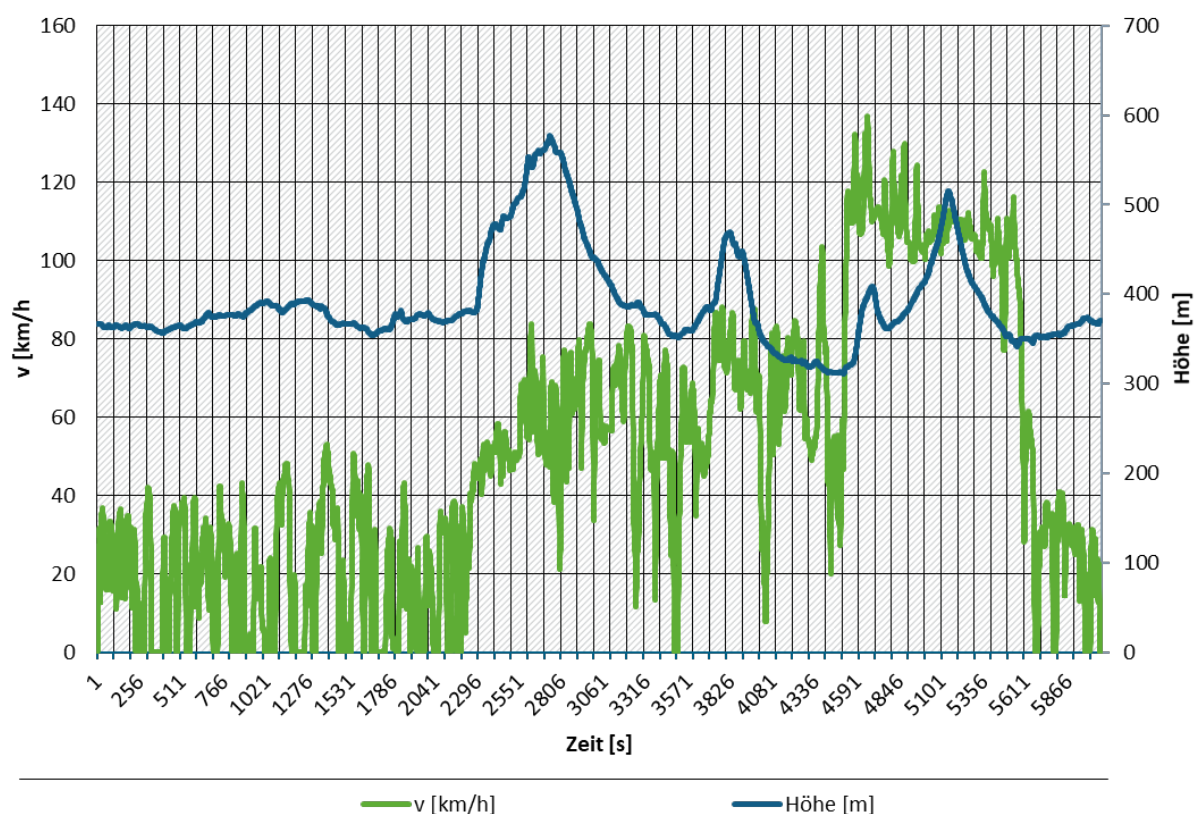
In diesem Kapitel sind die Abriebemissionen nach PKW-Segmenten für den Istzustand und für drei Grenzwertszenarien dargestellt. Die Simulation erfolgte jeweils mit dem Modell PHEM, welches die in Kap. 61 beschriebenen Funktionen für den Reifenabrieb nutzt. Die relevanten Fahrzeugdaten je Segment (Massen der leeren Kfz, Bestands- und Fahrleistungsanteile) wurden aus folgenden Quellen bezogen:

- ▶ Jährliche Neuzulassungen von Pkw und LNF in Deutschland nach Antrieb und Segment sowie durchschnittliche Leermasse der Pkw-Neuzulassungen 2023 nach Antrieb und Segment aus einer Sonderauswertung des KBA für TREMOD
- ▶ Durchschnittliche Leermasse der LNF-Neuzulassungen 2023 nach Antrieb und Segment aus dem CO₂-Monitoring der EEA
- ▶ Durchschnittliche Jahresfahrleistung der Pkw und LNF als Rückrechnung der Gesamtfahrleistung durch den Bestand aus TREMOD, Version 6.53
- ▶ Relative Gewichtung der durchschnittlichen Jahresfahrleistung nach Pkw-Segment nach Fahrleistungserhebung 2014.

Die übrigen Modelleingabedaten (Luft- und Rollwiderstandsbeiwerte, rotatorische Trägheiten von Antrieb und Rädern, Maximalgewichte etc.) wurden aus den Messdaten der DBEFA entsprechend der Mittelwerte der PKW der jeweiligen Segmente entnommen. Die für die realen Abriebemissionen simulierte Masse wurde mit dem Leergewicht plus 30kg für Kraftstoff plus Beladung berechnet. Als reale Beladung wurden gemäß HBEFA zwischen 130 kg für das kleinste Segment und 280 kg für die Oberklassen gewählt (höhere Anteile Urlaubsfahrten, Anhänger etc.). Für Wohnmobile wurden im Mittel 490 kg Beladung angenommen.

Der Reifenabrieb wurde für eine typische RDE Testfahrt mit Kurvenradien entsprechend der generischen Radiusfunktion aus Kap. 61 bzw. (Hausberger, 2024) berechnet. Mit den aus GPS Koordinaten gerechneten Radien ergeben sich etwa dieselben Abriebwerte. Aus unserer Sicht sollte der gewählte Fahrzyklus für reale Fahrten gut repräsentativ sein. Eine exakte Verteilung der Kurvigkeiten in Deutschland ist derzeit nicht verfügbar. Wie beschrieben haben die Kurvenradien einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis und auch auf die relativen Abhängigkeiten des Abriebs zur Fahrzeugtestmasse.

Abbildung 34: Geschwindigkeits- und Höhenprofil des verwendeten Fahrzyklus



Eigene Graphik, FVT

4.4.1 Istzustand

Tabelle 9 fasst die je Segment verwendeten Fahrzeugmassen und die berechneten Abriebwerte zusammen. Der Reifenabrieb bezieht sich dabei jeweils auf die Reifentestmasse, welche mit 67% der Summentraglast der vier Reifen je Kfz gesetzt wurde. Die typische Summentraglast der Reifen wurde mit 125% der maximal zulässigen Gesamtmasse des Kfz angenommen.

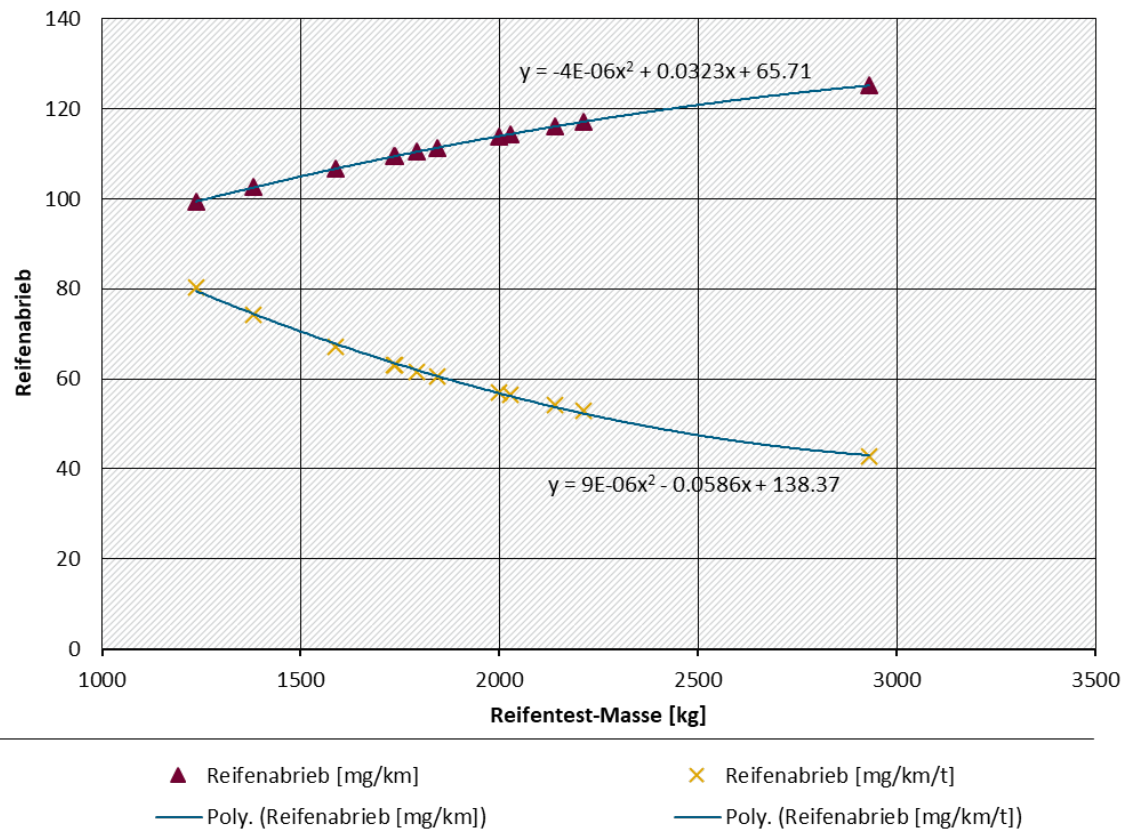
Tabelle 9: In der Simulation verwendete Fahrzeugmassen und damit berechnete Reifenabriebwerte. Die Abriebrate je Tonne bezieht sich jeweils auf die simulierte Reifentestmasse (67% von max. zul. Masse)

Name	Realmasse [kg]	Max. zul. Masse [kg]	Reifentestmasse [kg]	Reifenabrieb [kg]	Reifenabrieb [mg/km/t]
ICE 1 Mini	1238	1478	1238	99	80
ICE 2 Kleinwagen	1426	1650	1382	103	74
ICE 3 Kompaktklasse	1696	1895	1587	107	67
ICE 4 Mittelklasse	1948	2200	1843	111	60
ICE 5 Obere Mittelklasse	2208	2420	2027	114	56
ICE 6 Oberklasse	2418	2640	2211	117	53
ICE 7 Geländewagen	2247	2556	2141	116	54
ICE 8 Wohnmobile	3574	3500	2931	125	43
ICE 9 Sportwagen	1906	2076	1738	109	63
ICE 10 Mini-Vans	1807	2139	1791	110	62
ICE 11 Großraum-Vans	2088	2386	1998	114	57
ICE 12 SUVs	1739	2071	1734	109	63

Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse für alle PKW-Segmente mit Verbrennungsmotor. Der Trend der Abriebrate in [mg/km/t] und des Abriebs in [mg/km] sind analog zu den zuvor gezeigten Grundsatzuntersuchungen. Der Abrieb normiert auf die Testmasse [mg/km/t] sinkt mit steigender Testmasse entsprechend der Abhängigkeit von der Schlupfleistung, da der masseunabhängige Anteil an der Längskraft (Luftwiderstand) dann relativ abnimmt und bei steigender Masse dann auch noch der Schlupf etwas sinkt. Bei dem Abrieb in [mg/km] ergibt sich erwartungsgemäß eine Zunahme mit der Testmasse, welche aus oben genannten Gründen aber etwas unter-linear ist.

Wir weisen hier nochmals darauf hin, dass das Simulationsmodell zwar schlüssig ist und mit Messdaten des KIT am Innentrommelprüfstand in (Schäfle, 2024) und (Schäfle, 2023) sowie an Rollentests an der TU Graz verifiziert wurde, die Messmethoden zum Reifenabrieb allerdings generell noch unsicher sind und die daraus abgeleiteten Aussagen daher eventuell nicht mit den zukünftig im Konvoitest nach UNR 117⁷ gemessenen Trends zum Abrieb korrelieren müssen. Dass auch die Abriebtests des ADAC in Kap. 4.2 im Mittel sinkenden Abrieb je Tonne ergeben, unterstützt den Ansatz, ist aber zu wenig signifikant für eine Validierung.

Abbildung 35: Simulierter realer Reifenabrieb der PKW-Segmente über deren angenommener Reifentestmasse als [mg/Kfz-km] und als [mg/Kfz-km/t]

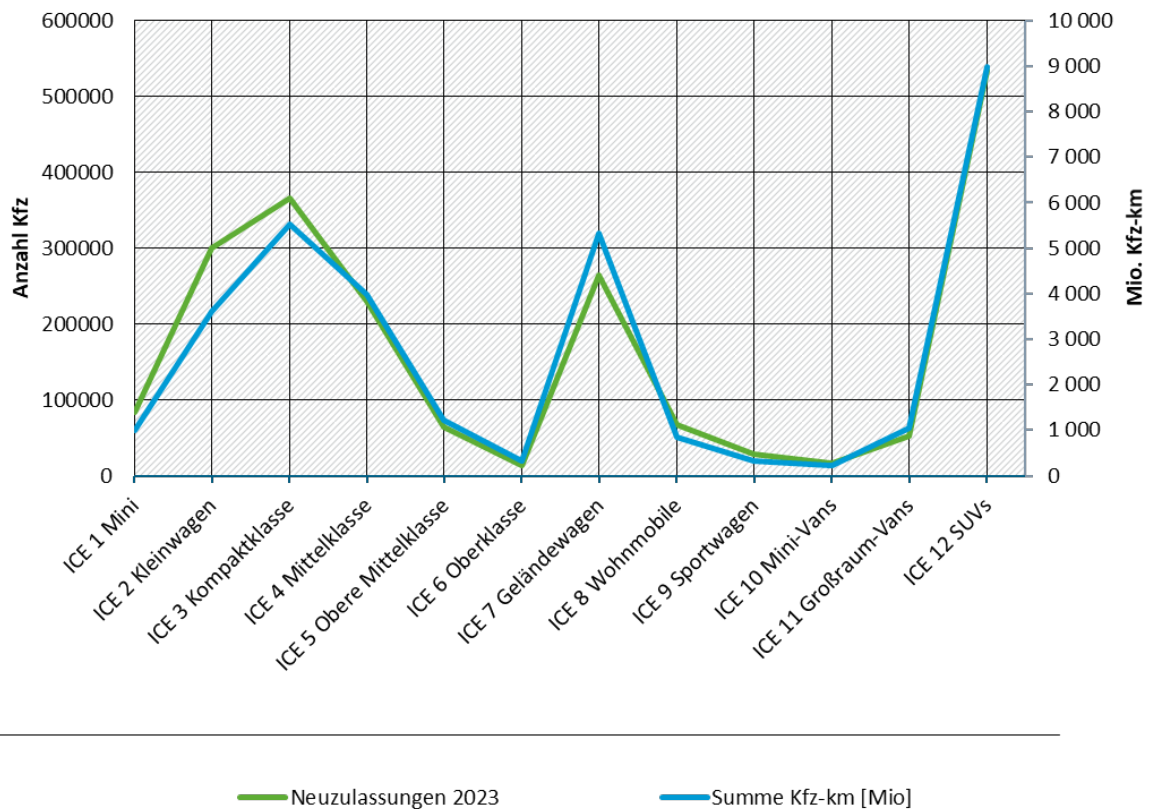


Eigene Graphik, FVT

Mit diesen Ergebnissen darf jedenfalls gezweifelt werden, dass ein einheitlicher Grenzwert in [mg/km/t] über alle Traglastklassen die beste Option darstellt. Dies ist nachfolgend analysiert.

Um die Effekte der verschiedenen Grenzwertszenarien auf die gesamten Abriebemissionen darzustellen, wurde der Reifenabrieb der Neuzulassungen nach Segmenten in Deutschland für „Ist-Zustand“ und die Limit-Szenarien berechnet. Die Neuzulassungszahlen wurden aus Daten des KBA und die spezifischen Fahrleistungen aus TREMOD 6.53 bestimmt. Insgesamt ergeben sich für die neu zugelassenen PKW mit VKM etwa 32 Mio. Kfz-km. Die höchsten Anteile haben SUVs, Geländewagen und die Kompaktklasse. batterieelektrische PKW und LNF werden hier nicht betrachtet, da sie vermutlich andere Fahrwiderstände als die Segmente mit Verbrennungsmotoren haben. Für die Fahrwiderstände von BEVs nach Segmenten und auch zum Abriebverhalten spezieller BEV-Reifen sind derzeit keine Datengrundlagen verfügbar. Die Trends dürften aber ähnlich sein.

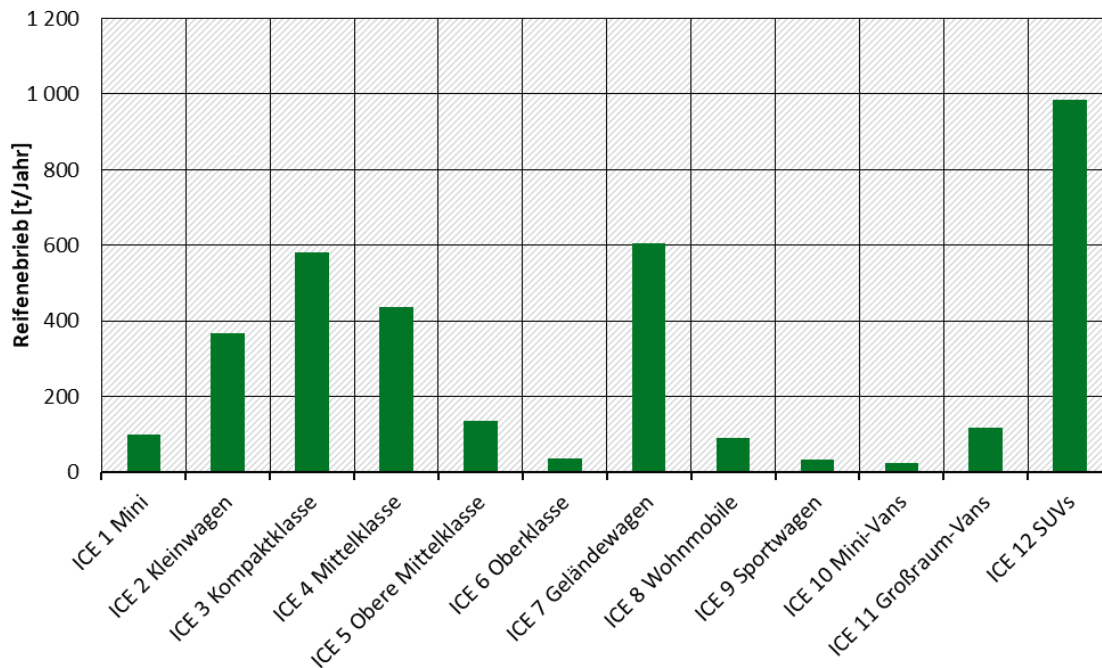
Abbildung 36: Verbrenner-PKW-Neuzulassungen 2023 in Deutschland nach Segmenten und deren Gesamtfahrleistung



Eigene Graphik, FVT

Abbildung 37 zeigt den damit simulierten Reifenabrieb nach Segmenten. Für die Neuzulassungen aus dem Jahr 2023 in Deutschland ergeben sich insgesamt ca. 3 100 Tonnen Reifenabrieb für 2,02 Mio. PKW. Für die gesamte Flotte von derzeit über 49 Mio. PKW wäre der Wert natürlich deutlich höher. Um die Effekte verschiedener Grenzwertoptionen abzubilden, ist die Betrachtung der Neuzulassungen ausreichend, da sich für die gesamte Flotte mit Zeitverzögerung ähnliche Effekte ergeben werden.

Abbildung 37: Simulierter Reifenabrieb der PKW-Neuzulassungen mit Verbrennungsmotor 2023 in Deutschland nach Segmenten



Eigene Graphik, FVT

4.4.2 Mit Grenzwerten

In diesem Kapitel werden drei mögliche Grenzwertoptionen auf ihre Wirkung bzgl. gesamtem Reifenabrieb der PKW in Deutschland und der mit den Grenzwerten verbundenen Anforderungen an zukünftige Reifenoptimierungen nach Segmenten bzw. Traglastklassen analysiert. Wegen der derzeit ungenügenden Datenlage zu Testergebnissen nach UNR 117⁷ dürfen die dabei angenommenen Grenzwerte natürlich nicht als Vorschläge für Absolutwerte interpretiert werden. Die Szenarien sollten die Effekte und möglichen Probleme der Optionen allerdings qualitativ gut beschreiben können.

Die Simulationen zum Reifenabrieb im Istzustand nach Segmenten führen zu folgenden Schlüssen:

- ▶ Ein einheitliches Limit in [mg/km/t] ist für Reifen, welche mit geringerer Testmasse gemessen werden (niederer Traglastindex) schwerer zu erreichen als für Reifen mit hohem Traglastindex. Wird das Limit niedriger angesetzt, könnten Reifen für Segmente mit geringerer Masse dieses in Zukunft eventuell nicht oder nur mit höherem Aufwand einhalten. Ein Ausweichen der Kunden zu Reifen mit höherem Traglastindex (aber gleichen Dimensionen) wäre möglich.
- ▶ Ein einheitliches Limit in [mg/km] ist für Reifen, welche mit hoher Testmasse gemessen werden (hoher Traglastindex) schwerer zu erreichen als für Reifen mit kleinem Traglastindex. Wird das Limit niedriger angesetzt, könnte es sein, dass für schwerere Kfz keine oder sehr wenige Reifenmodelle das Limit einhalten können. Ein Ausweichen der Fahrzeugbesitzer zu Reifen mit geringerem Traglastindex ist nur in sehr geringem Umfang möglich. Auch wenn schwere Kfz aus Sicht des Energieverbrauchs und des Reifenabriebs höhere Umweltschäden je km anrichten, müsste doch sichergestellt werden, dass Reifen für LNF, Wohnmobile, Sonderfahrzeuge etc. verfügbar bleiben. Damit ist das Niveau des Limits nach unten begrenzt.

- ▶ Ein Limit entsprechend dem erwarteten Verlauf der [mg/km/t] über der Testmasse wäre im Anspruch für zukünftige Optimierungen ausgewogen für Reifen in allen Traglastklassen, würde aber für schwerere PKW höheren Abrieb je km erlauben. Der Verlauf müsste zudem erst durch ausreichend Messdaten abgesichert werden¹⁴.

Um einigermaßen vergleichbare Anforderungen bei den Szenarien zu den Limits zu definieren, haben wir folgende Randbedingungen festgelegt:

- ▶ Je Traglastklasse bzw. je simuliertem PKW-Segment müssen zumindest 1/3 der heutigen Reifenmodelle das Limit einhalten um sicher zu stellen, dass der Markt auch mit Limits ausreichend Modelle anbieten kann.

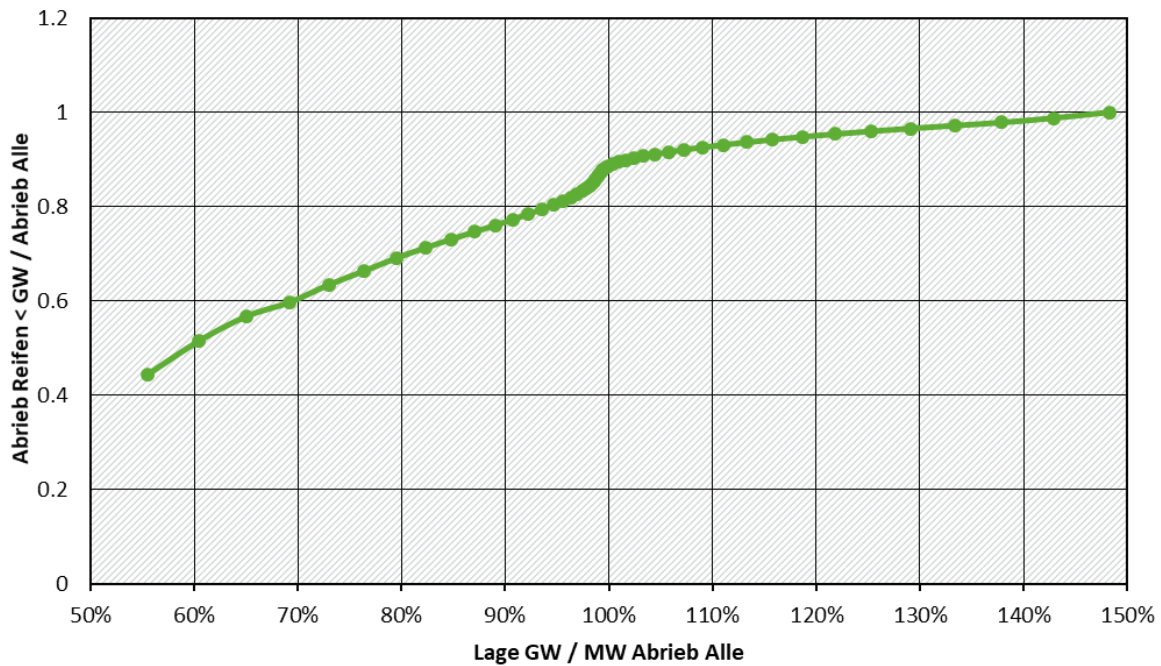
Ob ein solcher Grenzwert durch Verbesserungen an den Reifen von allen Modellen in Zukunft eingehalten werden könnte oder ob Modelle mit hohen Abriebwerten dann aus dem Angebot genommen werden müssen, ist derzeit offen.

Um diese Bedingung und die damit verbundenen Reduktionen im Reifenabrieb je Segment berechnen zu können, wurden aus den von ADAC gemessenen Reifenabrieben die dafür benötigten Funktionen erzeugt. Dies ist eine Funktion zur Berechnung des erwarteten Effekts eines Grenzwertes je nach Lage des Grenzwertes im Verhältnis zum heutigen mittleren Abrieb je Traglastklasse (Abbildung 38). Diese kann aus Umformung von Abbildung 27 gewonnen werden. Weiters kann aus Abbildung 27 auch der Anteil an Reifenmodellen, die unter einem Abrieb-Grenzwert (GW) liegen abgeleitet werden, wobei der GW relativ zum Mittelwert der heutigen Reifen beschrieben ist, um die Funktionen flexibel gestalten zu können (Abbildung 39). Da diese Funktionen jeweils auf den Mittelwert des heutigen Reifenabriebs innerhalb einer Traglastklasse normiert sind, werden die identen Funktionen für alle PKW-Segmente bzw. deren zugeordnete Traglasten angewendet. Die Funktionen sind in der nachfolgenden Berechnung jeweils Abschnittsweise durch Polynome angenähert.

Aus Kombination der beiden Funktionen sieht man z.B., dass 30% der Reifenmodelle einen Grenzwert in Höhe von 95% des heutigen Mittelwertes des Abriebs einhalten würden, aber schon fast 75% der Reifen einen Grenzwert, der bei 105% des heutigen Mittelwertes des Abriebs liegt. Es sind also entsprechend einer annähernden Normalverteilungen die Abriebwerte der meisten Reifentypen knapp um den Mittelwert der Klasse angesiedelt.

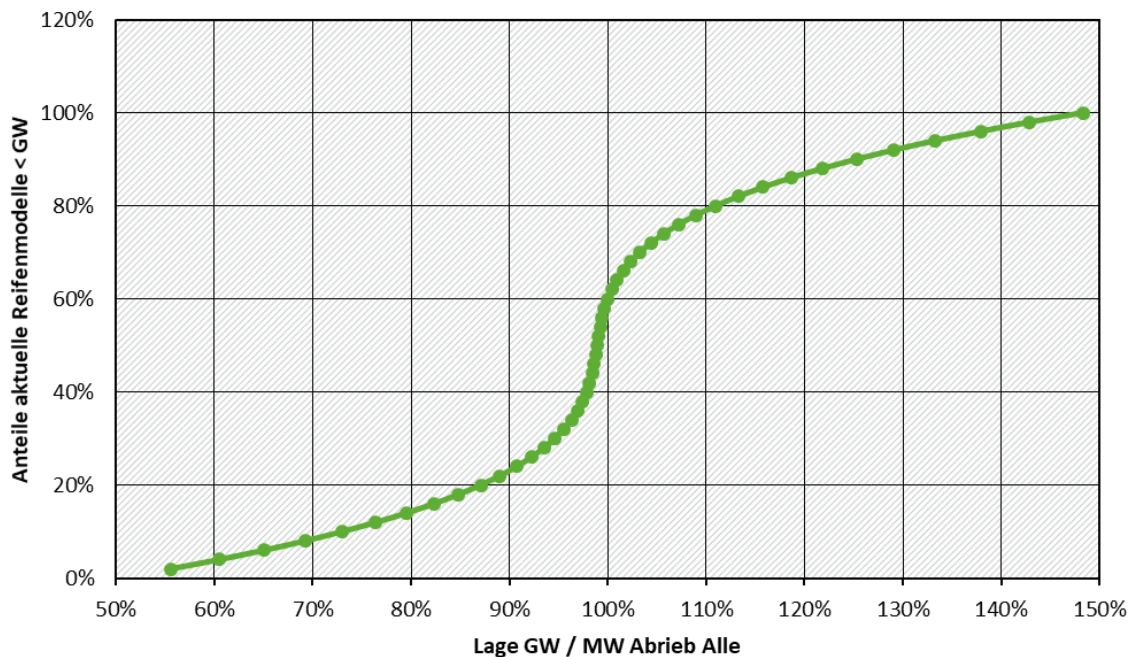
¹⁴ Dafür müssten je Traglastklasse ausreichend Reifen vermessen werden, um eine Aussage zum Mittelwert des Abriebs treffen zu können. Sollte der Verlauf wider Erwarten sehr flach sein, könnte die Funktion für diese Variante auch entfallen.

Abbildung 38: Funktion zur Reduktion des Reifenabriebs gegenüber dem heutigen Mittelwert nach Lage des Grenzwertes (GW) im Verhältnis zum heutigen Mittelwert des Abriebs



Eigene Graphik, FVT

Abbildung 39: Prozent der Reifenmodelle, die unter einem Abrieb-Grenzwert (GW) liegen, wobei der GW relativ zum Mittelwert der heutigen Reifen beschrieben ist



Eigene Graphik, FVT

Bei Vorliegen von umfangreichen Messdaten entsprechend der dann anzuwendenden Version von UN R 117⁷ müssten natürlich die Absolutwerte und – falls relevant - auch die Verläufe der Funktionen, die die Abhängigkeiten von der Reifentestmasse beschreiben, angepasst werden.

Eine wesentliche Grundlage für eine Einführung von Grenzwerten ist eine korrekte, quantitative Beurteilung des Abriebs über alle Traglastklassen hinweg. Dafür ist die Definition der Referenzreifen wesentlich. Laut UNR 117⁷ soll die Abriebrate in [mg/km/t] aus dem Abriebindex mal der Abriebrate des Referenzreifens bei Standardtemperatur berechnet werden. Der Referenzreifen stammt aus einer zentralen Traglastklasse. Wegen der Temperaturabhängigkeiten sind unterschiedliche Referenzreifen für Sommer- und Winterbereifung erforderlich. Der Effekt, der mit sinkender Traglast im Test zunehmenden Abriebrate in [mg/km/t], wird in der berechneten Abriebrate der Testreifen nicht kompensiert.

Tabelle 7 fasst alle wesentlichen Ergebnisse der drei Szenarien zusammen. Unter der Randbedingung, dass mindestens 1/3 der heutigen Reifen je Segment den Grenzwert erfüllen müssen, führt die Grenzwertfunktion mit 12% bzw. 421,5 Tonnen Reduktion des Reifenabriebs zur höchsten Abnahme, gefolgt vom Limit in [mg/km] mit 10% Reduktion. Das einheitliche Limit in [mg/km/t] liegt mit 5% Minderung des gesamten Abriebs am schlechtesten. Ursache ist, dass im letzteren Fall die Absenkung des Limits von den niederen Traglastklassen stark beschränkt wird, welche aber einen eher geringen Beitrag an den gesamten Abriebemissionen haben. Das so definierte Limit ist für die Reifen mit höherer Traglast dann weniger herausfordernd und wird von den heutigen Modellen über 2000 kg Testmasse schon zu über 90% erfüllt (Abbildung 40). Das Niveau des Limits in [mg/km] wird von den Reifen der schweren Traglastklassen begrenzt, führt aber zu einer ausgewogeneren Belastung als das Limit in [mg/km/t] und wird auch von den niederen Traglastklassen nicht heute schon eingehalten. Am ausgewogensten wirkt die Grenzwertfunktion, die über alle Traglastklassen gleiche Minderungen erfordert. Wie bereits erwähnt, könnte die Grenzwertfunktion auch durch eine Funktion zur Normierung des Testergebnisses auf eine einheitliche Testmasse ersetzt werden, wenn nur ein einfacher Grenzwert gewünscht ist.

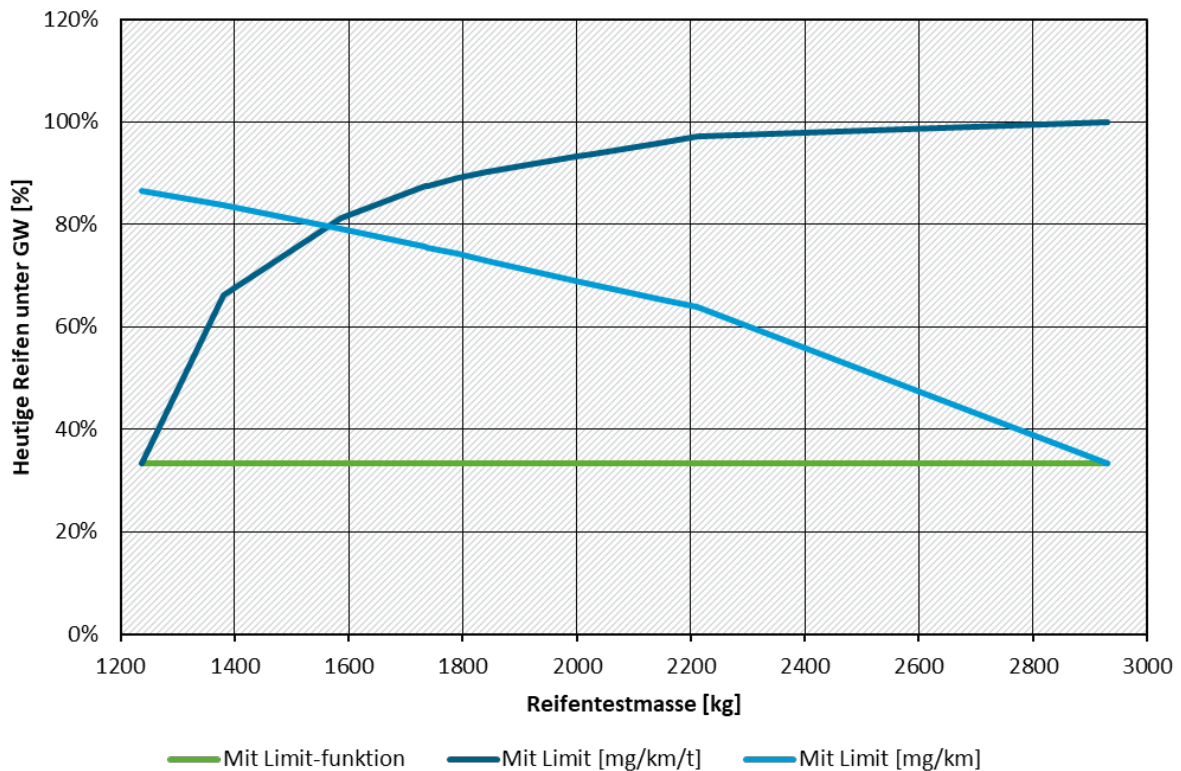
Tabelle 10: Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien

Segment	Reifentestmasse	% der Ist Reifen erfüllen GW			Änderung Abrieb je Segment (%)			Änderung Abrieb je Segment (t/Jahr)		
		LF	L1	L2	LF	L1	L2	LF	L1	L2
Mini	1237,6	33%	33%	86%	-12%	-18%	-5%	-11,9	-17,7	-4,8
Kleinwagen	1381,6	33%	66%	84%	-12%	-13%	-6%	-44,2	-46,9	-22,8
Kompaktklasse	1586,7	33%	81%	79%	-12%	-7%	-8%	-69,8	-42	-47,2
SUVs	17343	33%	87%	76%	-12%	-4%	-9%	-118	-43,2	-93,3
Sportwagen	1738,3	33%	87%	75%	-12%	-4%	-10%	-4	-1,4	-3,2
Mini-Vans	1791,0	33%	89%	74%	-12%	-4%	-10%	-2,9	-0,8	-2,4
Mittelklasse	1842,6	33%	90%	73%	-12%	-3%	-10%	-52,4	-12,5	-45,7
Großraum-Vans	1998,4	33%	93%	69%	-12%	-1%	-12%	-14	-1,7	-13,7
Obere Mittelklasse	2026,9	33%	94%	68%	-12%	-1%	-12%	-16,3	-1,7	-16,3
Geländewagen	2141,0	33%	96%	65%	-12%	-1%	-13%	-72,8	-5,3	-78,6

Segment	Reifentest- masse	% der Ist Reifen erfüllen GW			Änderung Abrieb je Segment (%)			Änderung Abrieb je Segment (t/Jahr)		
		L1	L2	F	L1	L2	F	L1	L2	F
Oberklasse	2211,1	33%	97%	64%	-12%	-1%	-13%	-4,3	-0,3	-4,9
Wohn- mobile	2931,3	33%	100%	33%	-12%	0%	-18%	-10,9	0,0	-16,2
Gesamt	1885,1	33%	85%	71%	-12%	-5%	-10%	-421,5	-173,6	-349,1

F: mit Limitfunktion; L1: mit Limit m/km/t; L2: mit Limit m/km

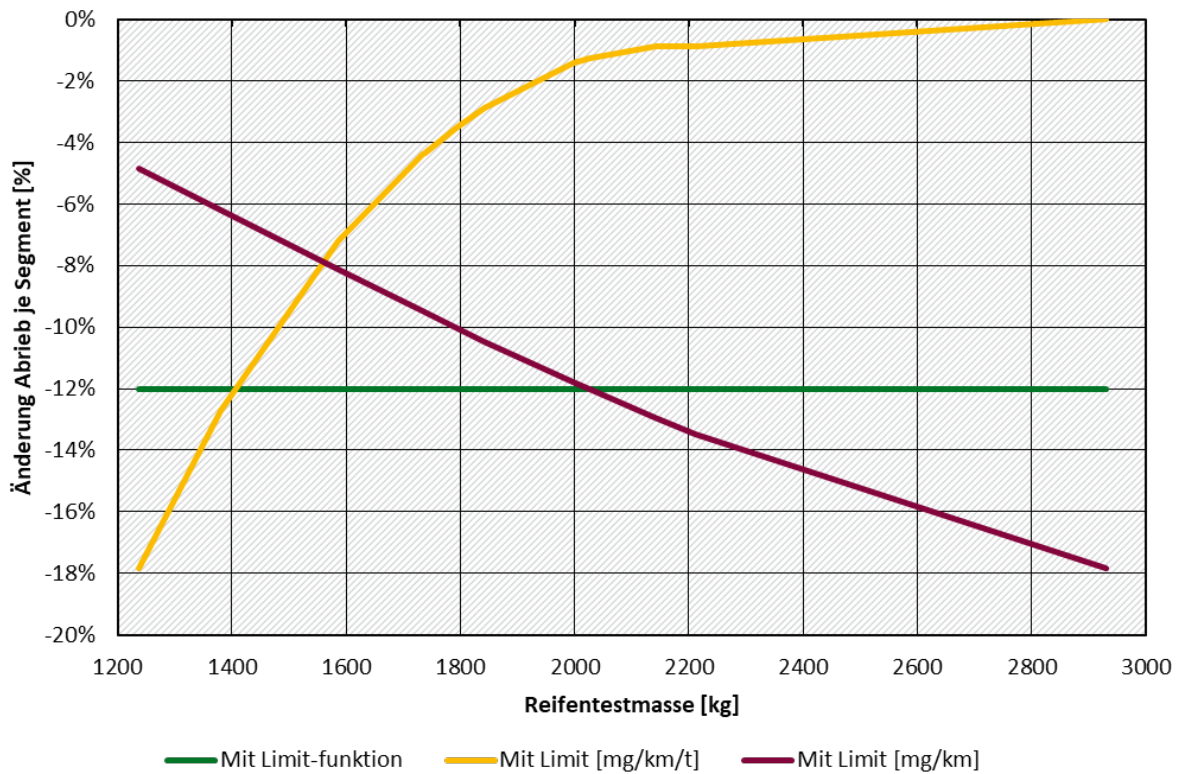
Abbildung 40: Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien bezüglich der Anteile an Reifenmodellen je Segment (Traglastklasse), die bereits heute den Grenzwert einhalten würden



Eigene Graphik, FVT

Abbildung 41 zeigt die berechneten Effekte der drei Grenzwertszenarien auf die Abriebemissionen als Prozent Änderung je Segment. Ein Limit in [mg/km/t] würde insbesondere in den niederen Testmassenklassen wirken, das in [mg/Kfz-km] eher in den schweren Massenklassen. Wenn die grundlegenden Zusammenhänge von der Simulation korrekt wiedergegeben werden, wäre ein einfacher Grenzwert in [mg/km/t] nicht ausgewogen. Eine Korrektur der Testergebnisse bezüglich Testmasseneinfluss bzw. eine Grenzwertfunktion scheint demnach eine sinnvolle Überlegung zu sein.

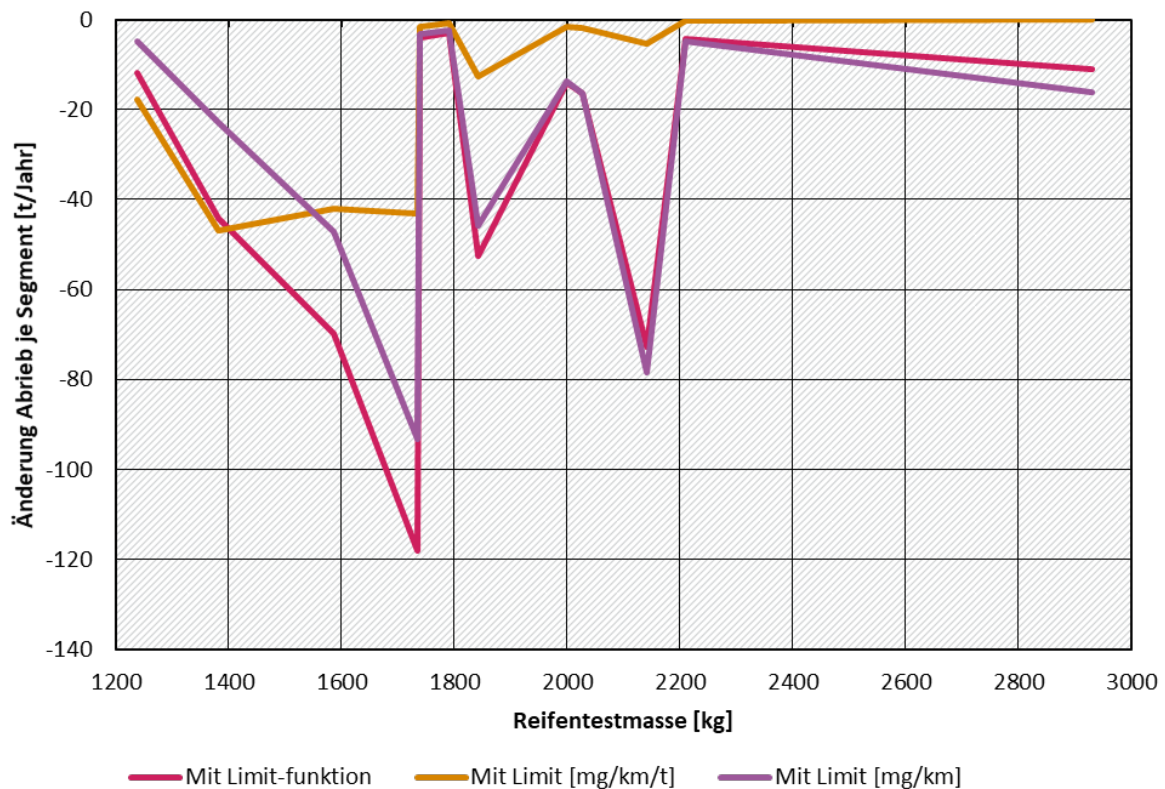
Abbildung 41: Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertszenarien bezüglich der Reduktion des Reifenabriebs in Prozent je Segment infolge der Grenzwerte



Eigene Graphik, FVT

Abbildung 42 zeigt noch die absolut berechneten Änderungen der Reifenabriebemissionen infolge der Grenzwerte. Diese ergeben sich jeweils aus den Gesamtfahrleistungen je Segment-Neuzulassungen und der Änderung der realen Reifenabriebe je km in dem Segment. In den Reifentestmasseklassen zwischen 1500 km und 2200 kg liegen demnach die Segmente mit den höchsten Fahrleistungs- und Emissionsanteilen. Diese weisen daher absolut in allen Szenarien die größten Minderungen auf.

Abbildung 42: Simulationsergebnisse für die drei Grenzwertzenarien bezüglich der Reduktion des Reifenabriebs je Segment in Tonnen pro Jahr infolge der Grenzwerte



Eigene Graphik, FVT

4.5 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Analysen der Abhängigkeiten des Reifenabriebs von Fahrzeugmasse und Fahrwiderständen mit dem neuen Simulationsmodell für HBEFA 5.1 ergibt:

Es erscheint unwahrscheinlich, dass der Reifenabrieb in [mg/km] proportional mit der Fahrzeugmasse steigt. Die Simulation zeigt zwar eine Zunahme des Abriebs mit der Masse, aber unterproportional.

Damit führt eine Normierung des Abriebs mittels Division durch die Fahrzeug-Testmasse auch nicht unbedingt zu masse-unabhängigen Abriebraten in [mg/km/t], es ist eher anzunehmen, dass die Abriebrate in [mg/km/t] mit zunehmender Fahrzeugtestmasse bei identischen Reifeneigenschaften sinkt.

Ursache ist die Abhängigkeit des Abriebs von der Schlupfleistung aus Längs- und Querkraften. Während die Schlupfleistung in Querrichtung, wie sie bei Kurvenfahrten auftritt, proportional zur Fahrzeugmasse ist, ist sie in Längsrichtung auch vom Luftwiderstand abhängig, der sich nicht zwingend proportional zur Masse ändert.

Ohne umfangreiche Messdaten sollten an der UN ECE Nr. 117⁷ keine umfassenden Änderungen vorgeschlagen werden. Eine Möglichkeit wäre, das Verhältnis des Luftwiderstands von Testfahrzeug und Referenzfahrzeug proportional zum Verhältnis derer Massen anzusetzen (mit Toleranzmarge), wenn nicht idente Fahrzeuge verwendet werden können. Der Luftwiderstand ist definiert durch $C_w \times A$ bzw. f_2 im Fahrwiderstandspolynom.

Grundsätzlich ist es begrüßenswert, dass erstmals Testmethoden und Grenzwerte für Reifenabrieb eingeführt werden. Eine Überprüfung der Methoden auf Verbesserungspotenzial sollten aber geplant werden, wenn dann mehr Messdaten aus den Typisierungen und zu erwartenden Forschungsprojekten vorliegen. Damit könnten Einflüsse der Testmasse und anderer Randbedingungen besser quantifiziert und die eventuell derzeit vorhandenen Unschärfen reduziert werden. Solche Unschärfen können ja genutzt werden, im Rahmen der definierten Testbedingungen optimale Ergebnisse zu erzielen. Damit würden sich Senkungen der Grenzwerte eventuell in deutlich geringerem Umfang in der Realität wiederfinden.

Die im Simulationsmodell genutzten Messdaten zeigten eine sehr breite Streuung der luftgetragenen Abriebemissionen (PM10 und PN) je Kilometer zwischen verschiedenen Reifen. Ein zusätzliches Testverfahren, in dem auch diese Abriebpartikel getestet werden können wäre als Ergänzung zur Messung des gesamten Abriebs jedenfalls auch wünschenswert.

5 Ableitung von Euro 7- Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1

5.1

Im Folgenden wird die Ableitung der Euro 7 Emissionsfaktoren für das HBEFA 5.1 für Pkw, LNF und schwere Nutzfahrzeuge erläutert.

5.1 Pkw und LNF

Die Euro 7 Regulierung für Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 gilt ab dem 29. November 2026 für Typprüfungen neuer Fahrzeugmodelle sowie ab dem 29. November 2027 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge.

Die Testzyklen bleiben gleich wie bei Euro 6. Bei Messungen der Abgasemissionen im Labor wird weiterhin der WLTP-Prüfzyklus getestet und es gilt die UN-Regelung Nr. 154. Die Euro 7 Grenzwerte sind identisch mit den Euro 6 Grenzwerten. Das bedeutet, dass für Fahrzeuge mit Selbstzündungs- und Ottomotoren sowie für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge weiterhin unterschiedliche Grenzwerte gelten, wie in Abbildung 43 dargestellt. Nach Euro 7 müssen jedoch alle Fahrzeuge mit Fremdzündungsmotor die Grenzwerte für Partikelzahl und Partikelmasse einhalten, während nach Euro 6 Motoren mit indirekter Einspritzung davon ausgenommen waren. Darüber hinaus werden bei Euro 7 Partikel mit einem Durchmesser ab 10 nm auf den Grenzwert für die Partikelzahl angerechnet, während der Euro 6 Grenzwert nur Partikel mit einem Durchmesser ab 23 nm umfasste. (Verordnung EU 2024/1257)¹

Abbildung 43: Euro 7 Emissionsgrenzwerte für PKW und LNF (Verordnung EU 2024/1257)

Fahrzeug- klasse	Gruppe	Masse in fahrbereitem Zustand (MRO) (kg)	Masse des Kohlenmonoxids (CO)		Masse der gesamten Kohlenwasserstoffe (THC)		Masse der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC)		Masse der Stickoxide (NO _x)		Summe der Massen der gesamten Kohlenwasserstoffe und Stickoxide (THC + NO _x)		Partikelmasse (PM)		Partikelzahl (PN ₁₀)	
			L ₁ (mg/km)	CI	L ₁ (mg/km)	CI	L ₁ (mg/km)	CI	L ₁ (mg/km)	CI	L ₂ + L ₄ (mg/km)	CI	L ₃ (mg/km)	CI	L ₃ (#/km)	CI
M ₁	—		1000	500	100	—	68	—	60	80	—	170	4,5	4,5	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹
N ₁	I	MRO ≤ 1280	1000	500	100	—	68	—	60	80	—	170	4,5	4,5	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹
	II	1280 < MRO ≤ 1735	1810	630	130	—	90	—	75	105	—	195	4,5	4,5	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹
	III	1735 < MRO	2270	740	160	—	108	—	82	125	—	215	4,5	4,5	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹

Anmerkung: PI = Fremdzündung
CI = Selbstzündung.

Quelle: Verordnung EU 2024/1257

Für auf der Straße durchgeführte RDE-Prüfungen hinsichtlich der Emissionen im praktischen Fahrbetrieb gilt die UN-Regelung Nr. 168. Die Randbedingungen für gültige RDE-Tests entsprechen den gleichen Vorgaben wie bei Euro 6e. Die Umgebungstemperaturen müssen zwischen 0°C und 35°C liegen, mit dem erweiterten Temperaturbereich zwischen -7°C und 38°C. Der Grenzwert für Prüfungen im praktischen Fahrbetrieb wird ermittelt, indem der WLTP-Grenzwert mit den Konformitätsfaktoren multipliziert wird. Diese wurden für Euro 7 von Euro 6e übernommen (1.1 für NO_x und 1.34 für Partikelanzahl).

Fahrzeuge müssen die Emissionsgrenzwerte während einer bestimmten Lebensdauer einhalten. Während dieses Zeitraums kann die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte durch Konformitäts- und Marktüberwachungstests in Betrieb befindlicher Fahrzeuge überprüft werden. Euro 7

erweitert die Anforderungen an die Lebensdauer im Vergleich zu Euro 6 und führt über die „Hauptlebensdauer“ (160.000 km oder 8 Jahre, je nachdem, was zuerst eintritt) das Konzept einer „zusätzlichen Lebensdauer“ (200.000 km oder 10 Jahre, je nachdem, was zuerst eintritt) ein. Während der zusätzlichen Lebensdauer werden die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe anhand eines Dauerhaltbarkeitsmultiplikators angepasst. Für Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 beträgt der Multiplikator 1,2. Das bedeutet, dass die gasförmigen Emissionen um 20 % höher sein dürfen als in Abbildung 43 angegeben.

Bei EURO 6 wird der Zustand der Abgasminderungstechnologien durch OBD (On-Board-Diagnostik) überprüft. Dabei werden die einzelnen Komponenten auf Ihre Funktionalität von fahrzeug-internen Algorithmen getestet. Wenn ein Zustand einer Komponente erwarten lässt, dass ein OBD-Schwellwert überschritten wird, muss die MIL (Malfunction Indication Lamp) aktiviert werden welche den Fahrer anweist, eine Werkstatt aufzusuchen. Inwieweit sich eventuell aus dem Zusammenspiel mehrerer kleinerer Defekte insgesamt ein signifikante Emissionserhöhung ergibt, wird von OBD nicht überprüft. Mit EURO 7 wird OBM (On-Board Monitoring) verpflichtend. In OBM muss das Fahrzeug das Emissionsniveau von NO_x und Partikelmasse am Auspuff überwachen und den Fahrer zu einem Werkstattbesuch anweisen, wenn die Software annimmt, dass der Grenzwert in einem RDE-Test um mehr als das 2,5-Fache überschritten werden könnte. Durch diese Funktion erwarten wir einen geringeren Anstieg der Emissionen über der Lebenszeit. Dies gilt auch für SNF, da diese ebenfalls ein OBM-System einführen müssen. Weitere Ausführungen zum Thema OBM wurden im Anhang E untersucht.

Ableitung Euro 7 für HBEFA

Die technischen Fahrzeugspezifikationen für die Euro 7 Fahrzeuge wurden für PKW auf Grundlage von Trends in der Zulassungsstatistik abgeleitet. Bei LNF wurde keine spezifischen Änderungen gegenüber EURO 6 Modellen angenommen, da die Klassifizierung der leichten Nutzfahrzeuge N1-I bis N1-III unverändert bleibt. Für die Simulation der warmen Emissionen wird das jeweilige HBEFA Euro 6d-Emissionsmodell als Grundlage verwendet. Für die Abbildung der Kaltstartzusatzemissionen, welche einen wesentlichen Effekt haben, wurde als Basis das jeweilige Euro 6d-Verhalten angenommen.

Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl von gemessenen Euro 6d LNF und PKW wurde folgender Modellierungsgrad für die betriebswarmen Emissionen angewendet. Dieselbe Aufteilung gilt für die Kaltstartzusatzemissionen.

- ▶ Diesel: PKW-Motor-Emissionsmodell zur Simulation der Klassen M1 und N1-I
- ▶ Diesel: LNF-Motor-Emissionsmodell zur Simulation der Klassen N1-II und N1-III
- ▶ Benzin: PKW-Motor-Emissionsmodell zur Simulation aller Klassen

Da nur ein Benzin-LNF gemessen wurde, wurde das PKW-Motor-Emissionsmodell zur Simulation der Benzin-LNF herangezogen.

Um den Effekt der Alterung zu berücksichtigen, werden die Euro 6d Alterungsfunktionen, welche für HBEFA aus Remote Sensing Daten sowie aus Messungen für HBEFA bestimmt wurden, als Basis verwendet. Im Vergleich zu Euro 6d wurden für Euro 7 Verbesserungen in der Alterungsfunktion vorgenommen: Bei Dieselfahrzeugen wurde die alterungsbedingte Erhöhung der NO_x-Emission um 20 % reduziert, was eine Verbesserung der SCR-Technologie voraussetzt. Bei Benzinfahrzeugen wurden die alterungsbedingte Erhöhung von NO_x- als auch CO-Emissionen um 20 % verringert, was auf eine Optimierung des 3-Wege-Katalysators bzw. ein größeres Kat-Volumen erfordert.

Um die zur Erfüllung der Limits nötigen Reduktionen für Euro 7 abzuschätzen, wurde eine Simulation des Euro 7 Fahrzeuges in definierten Situationen durchgeführt. Dazu wurden der WLTC, drei repräsentative HBEFA-Ersatzzyklen (Stadt, Überland und Autobahn) sowie zwei typische RDE-Zyklen simuliert und die warmen Emissionen bestimmt. Die Kaltstartzusatzemissionen wurden im WLTC bei 23°C bestimmt, während für die HBEFA-Ersatzzyklen und RDE-Zyklen 0°C gewählt wurden, um ein worst-case Szenario darzustellen.

Das Vorgehen bei der Simulation umfasst die Betrachtung des Emissionsverhaltens in drei wichtigen Punkten:

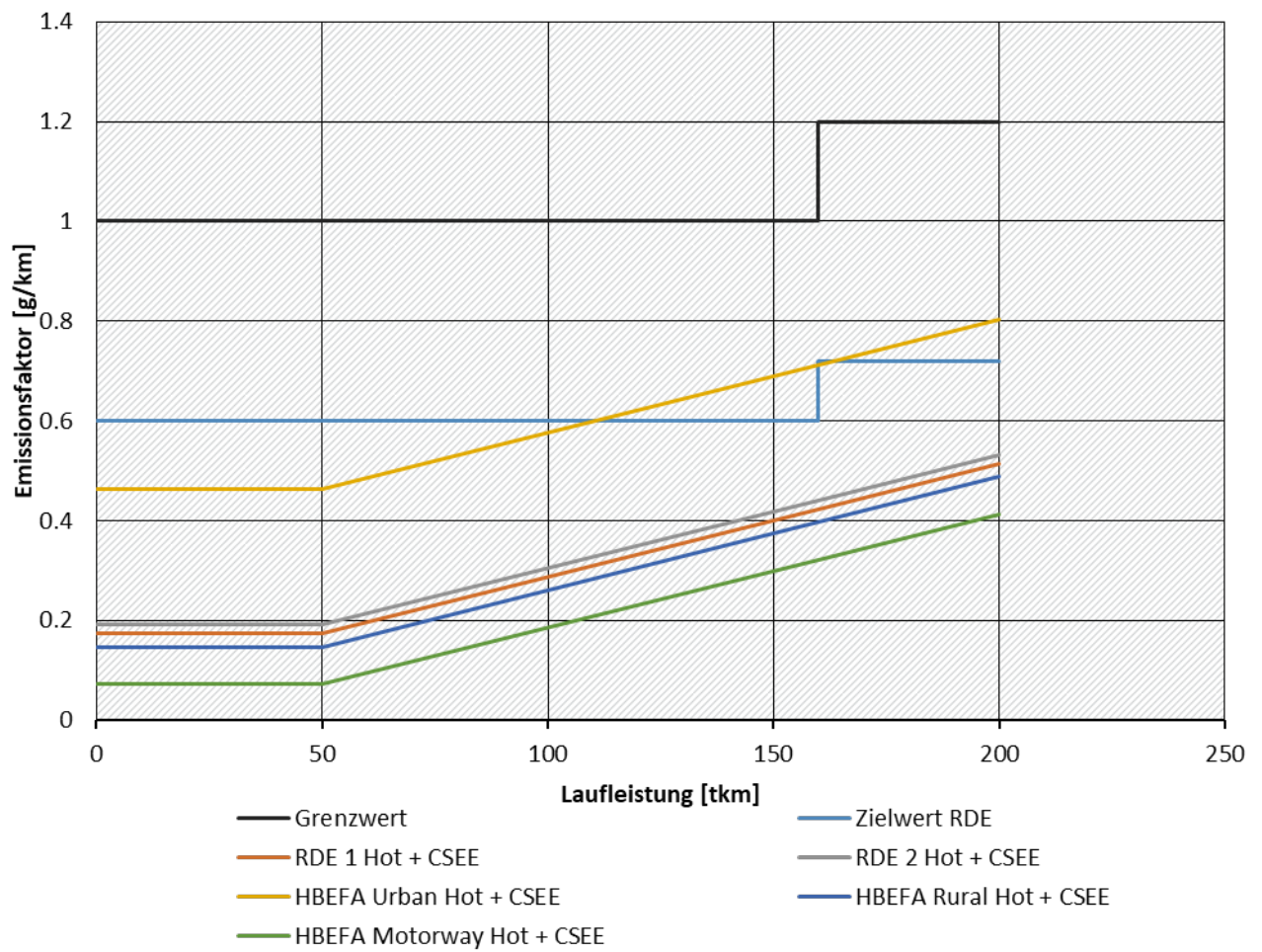
- ▶ Fahrzeug im Neuzustand und Vergleich mit Grenzwerten
- ▶ 160.000 km Lebensdauer und Vergleich mit Grenzwerten in Hauptlebensdauer
- ▶ 160.000 km Lebensdauer und Vergleich mit Grenzwerten in zusätzlicher Lebensdauer (20% Erhöhung des Grenzwertes)

Ein wichtiger Bestandteil bei diesem Vergleich ist der angenommene Sicherheitsabstand, mit welchem die einzuhaltenden Grenzwerte unterschritten werden sollen. Dabei wurden 25 % für den WLTC und 40 % für alle RDE-Zyklen angenommen. Beispielhaft bedeutet dies, wenn der Grenzwert CO-Emissionen eines Benzinfahrzeuges 1000 mg/km beträgt, ist der Zielwert im WLTC 750 mg/km und bei RDE-Zyklen 600 mg/km. Mit den 25% Abstand im WLTC werden Serienstreuungen abgesichert und mit dem größeren Abstand in RDE zusätzliche Unsicherheiten bezüglich Fahrstil, Temperatur und Höhenprofil.

Wenn die Simulation diese verringerten Grenzwerte einhält, wird davon ausgegangen, dass die Hersteller keine wesentlichen Maßnahmen zur weiteren Reduktion der einzelnen Emissionskomponenten betreiben werden. Überschreitet allerdings die Simulation in einem der betrachteten Punkte die Grenzwerte, erfolgt eine Anpassung der Emissionen im Motorkennfeld für den warmen Betrieb als auch im Kaltstartverhalten. Je nach Komponente und Technologie ist die Verteilung zwischen warmen Verhalten und Kaltstartverhalten unterschiedlich.

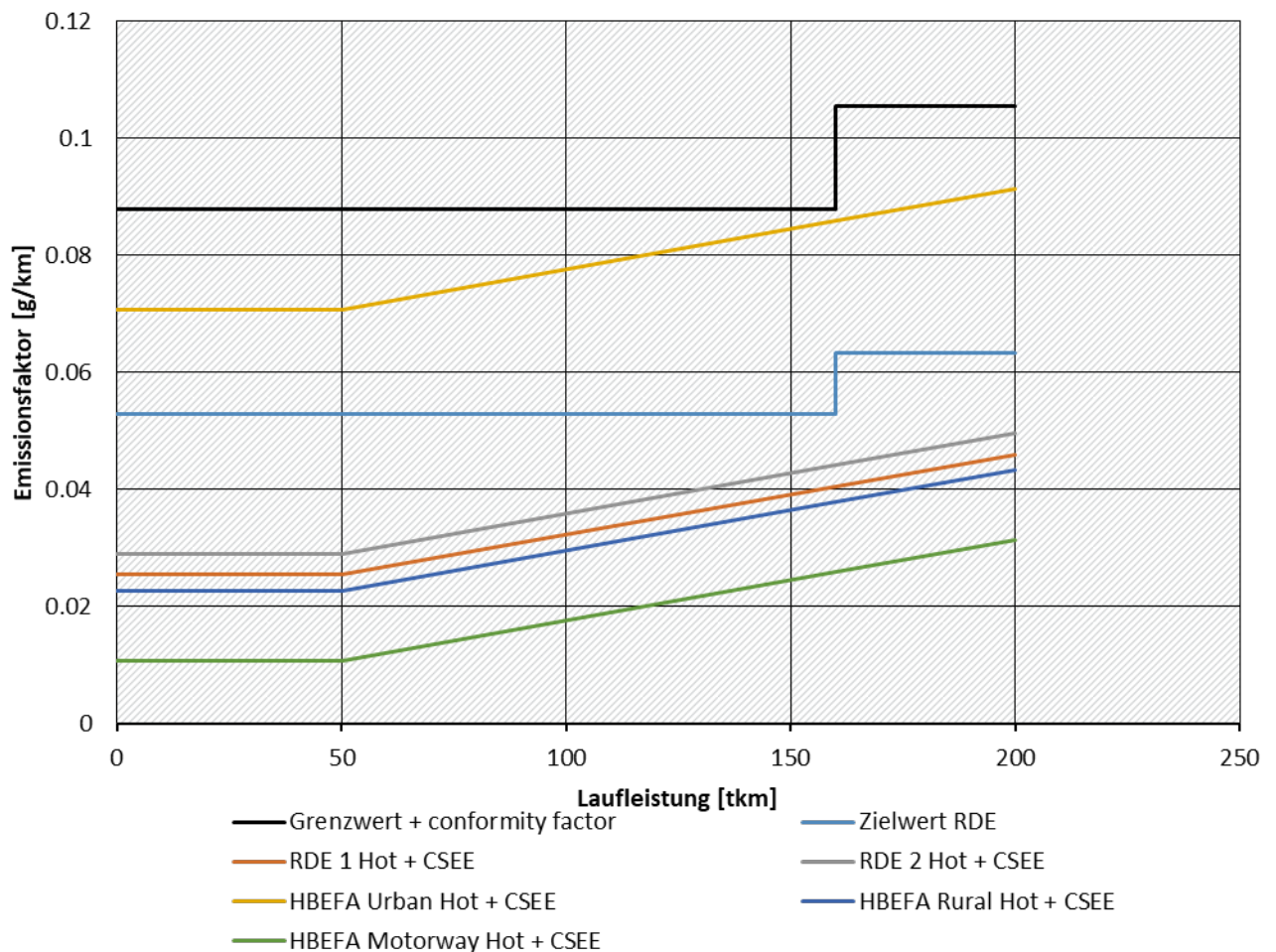
Die Einhaltung der Zielwerte wurde sowohl für den WLTC als auch für RDE-Fahrten geprüft. Die RDE-Zielwerte wurden in zwei unterschiedlichen RDE-Fahrten sowie in drei repräsentativen HBEFA-Ersatzzyklen getestet. In Abbildung 44 ist beispielhaft der RDE-Vergleich von CO für das Euro 7 Benzinfahrzeug dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, hält das Fahrzeug lediglich im Urban-Zyklus den Zielwert nicht ein. Dies hat zwei möglich Gründe. Einerseits sind die betriebswarmen Emissionen während des Urban-Zyklus hoch, andererseits kommt der Kaltstarteffekt hier mehr zur Geltung, da die Kaltstartzusatzemissionen (CSEE) auf eine kürzere Distanz aufgerechnet werden. Die höchste aller Überschreitungen wurde als Referenz für die Ableitung von Euro 7 verwendet. Hier übersteigt der Urban-Zyklus den Grenzwert bei 160.000 km um 24 %. Diese Reduktion wurde anteilmäßig auf das betriebswarme Motorkennfeld und die Kaltstartzusatzemissionen verteilt. Dieses Vorgehen wurde für PKW und LNF für alle Emissionskomponenten gleichermaßen durchgeführt.

Abbildung 44: EURO 6d M1 Benzin Motoremissionsniveau für CO im Vergleich zu EURO 7 Zielwert



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Abbildung 45: EURO 6d M1 Diesel Motoremissionsniveau für NOx im Vergleich zu EURO 7 Zielwert



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Aus diesen Vergleichen wurden die Reduktionen, welche im Durchschnitt für Euro 7 eingehalten werden sollten, abgeleitet. In der folgenden Tabelle sind die berechneten Reduktionen für alle Fahrzeugklassen dargestellt. Mit diesen Reduktionsschritten wurden die Euro 7 Kennfelder für betriebswarme Emissionen und Kaltstartzusatzemissionen abgeleitet.

Tabelle 11: Emissionsreduktion von Euro 6d auf Euro 7 Motoren für PKW und LNF

Fahrzeugklasse	Technologie	Reduktionsmaßnahme	NOx ¹⁵	CO	HC ¹⁶	PN10
M1	Diesel	KF & CSEE	46,8%	0%	0%	0%
N1-I	Diesel	KF & CSEE	46,8%	0%	0%	0%
N1-II	Diesel	KF & CSEE	33,5%	0%	0%	0%
N1-III	Diesel	KF & CSEE	33,5%	0%	0%	0%
M1	Benzin	KF / CSEE	13,5 / 10,4%	26,7 / 18,6%	9,9 / 4,0%	6,9 / 6,9%

¹⁵ Gleiche Reduktion für NO und NO₂ angenommen

¹⁶ Gleiche Reduktion für alle relevanten HC-Komponenten angenommen

Fahrzeugklasse	Technologie	Reduktionsmaßnahme	NO _x ¹⁵	CO	HC ¹⁶	PN10
N1-I	Benzin	KF / CSEE	13,5 / 10,4%	26,7 / 18,6%	9,9 / 4,0%	6,9 / 6,9%
N1-II	Benzin	KF / CSEE	13,5 / 10,4%	26,7 / 18,6%	9,9 / 4,0%	6,9 / 6,9%
N1-III	Benzin	KF / CSEE	13,5 / 10,4%	26,7 / 18,6%	9,9 / 4,0%	6,9 / 6,9%

Um die Euro 7 Emissionsziele zu erreichen, sind bei Dieselfahrzeugen nur Maßnahmen für NO_x nötig. Die Maßnahmen, welche dafür gesetzt werden können, sind in Kapitel 5.2 beschrieben. Im Wesentlichen sind das die Verwendung größerer SCR-Volumen und/oder besserer Beschichtungen sowie ein weiter verbessertes Temperaturmanagement.

Bei Benzinfahrzeugen sollten alle Emissionskomponenten reduziert werden. Der Einsatz verbesserter Materialien und Beschichtungsmethoden für Katalysatoren und Filter, größere Kat- und Filtervolumen, genauere Lambda-Regelung und ggf. AGR in Volllastbereichen sind mögliche Technologien um die (eher geringen) Reduktionsziele zu erreichen. Die Ziele zur Reduktion der Kaltstartzusatzemissionen können durch eine Verbesserung der Isolierung des Abgasstranges sowie innermotorische Heizstrategien erreicht werden.

5.2 Schwere Nutzfahrzeuge

Die Euro 7 Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge tritt 2028 für alle neuen Modelle und 2029 für alle Fahrzeuge in Kraft. Die Testzyklen bleiben gleich wie bei Euro VI. Am Motorprüfstand werden weiterhin der WHSC und der WHTC getestet und das Emissionsverhalten im Realverkehr bzw. die Betriebskonformität wird mittels ISC-Tests geprüft. Die Randbedingungen für gültige ISC-Tests entsprechen bis auf die untere Leistungsgrenze für gültige Moving Average Windows (MAWs) den Vorgaben von Euro VI E, ebenso wie die Auswertemethode anhand von MAWs, welche im Tool EMROAD inkludiert ist. Die untere Leistungsgrenze für gültige Moving Average Windows wurde von zehn auf sechs Prozent reduziert. Dadurch wird ab Euro 7 eine weitgehende Abdeckung des hinsichtlich NO_x-Emissionen kritischen Niederlastbereichs, der z.B. bei Stadtfahrten mit hohem Verkehrsaufkommen oder im Stau auftritt und somit gerade in urbanen Gebieten relevant ist, in ISC-Tests ermöglicht. Die Umgebungstemperaturen müssen weiterhin zwischen -7°C und 30°C liegen, wobei die Auswertung ab dem Erreichen einer Kühlmitteltemperatur von 30°C oder spätestens nach 10 Minuten beginnt. Die Betriebskonformität muss in ISC-Tests nach wie vor bis zu einer Laufleistung von 300 000 km bei Fahrzeugen mit einer höchstzulässigen Gesamtmasse von weniger als 16 Tonnen und bis 700 000 km bei Fahrzeugen mit einer höchstzulässigen Gesamtmasse von mehr als 16 Tonnen nachgewiesen werden¹⁷. (Verordnung EU 2024/1257)¹

Des Weiteren wurden die Grenzwerte angepasst. Die Euro 7 Grenzwerte für NO_x sind im WHTC um 57 % und bei den ISC Tests um 62 % geringer als bei Euro VI. Bei CO liegt die Reduktion bei knapp 70 %. Zusätzlich sind für weitere Komponenten, z.B. N₂O und PN10, Grenzwerte eingeführt worden. Die Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge in Euro 7 sind in Abbildung 46 dargestellt.

¹⁷ Die maximalen Laufleistungen für ISC-Tests werden in den „extended conditions“ noch um 25 % erhöht, aber dafür werden auch die Grenzwerte mit einem Faktor angepasst. Diese Faktoren sind zum jetzigen Stand aber noch nicht bekannt.

Abbildung 46: Euro 7 Emissionsgrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge (Verordnung EU 2024/1257)

Pollutant emissions	WHSC (CI) and WHTC (CI and PI)	Real Driving Emissions (RDE)
	per kWh	per kWh
NO ₂ in mg	200	260
PM in mg	8	—
PN ₁₀ in #	6x10 ¹¹	9 x 10 ¹¹
CO in mg	1 500	1 950
NMOG in mg	80	105
NH ₃ in mg	60	85
CH ₄ in mg	500	650
N ₂ O in mg	200	260

Note: PI = positive ignition.
CI = compression ignition.

Quelle: Verordnung EU 2024/1257

Nach derzeitigem Stand der Technik kommen zwei verschiedene Systeme betreffend Motor- und Abgasnachbehandlungstechnologie zum Erreichen der Euro 7 Grenzwerte in Frage:

- ▶ Es gibt einerseits die Möglichkeit eine vom Aufbau sehr ähnliche Abgasnachbehandlung wie bei Euro VI¹⁸ zu verwenden und die strengeren Grenzwerte mit verbesserten Komponenten (z.B. effektivere Katalysatormaterialien) und Verringerung der motorseitigen Rohemissionen, im Fall von NO_x mit erhöhter Abgasrückführung, zu erreichen.
- ▶ Die andere Möglichkeit ist die Installation eines zusätzlichen motornahen SCR-Katalysators, der kleiner als der SCR-Katalysator in der aus Euro VI bekannten Abgasnachbehandlungsbox ist. Dieser motornaher SCR-Katalysator erreicht bei einem Kaltstart früher sein Betriebsfenster und sorgt auch bei niederlastigen Fahrbedingungen für höhere NO_x-Konvertierungsraten. Dieses System ist zwar komplexer, erlaubt aber höhere Rohemissionen bzw. geringere AGR-Raten. Dies kann sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die Partikelemissionen auswirken.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch nicht klar, welches der Systeme sich durchsetzen wird oder ob beide parallel verwendet werden. Für das PHEM Modell in HBEFA wird angenommen, dass die Hersteller das Euro VI Modell mit nur einer Abgasbox verwenden werden. Somit wurde das EURO VI DE Modell als Basis verwendet und an die Euro 7 Grenzwerte angepasst.

Die Diskussionen mit den Herstellern bei der Entwicklung der Euro 7 Gesetzgebung zeigten, dass für die Entwicklung neben dem WHTC, dem transienten Prüfstandstest, auch worst-case ISC-Tests definiert werden. Worst-case betrifft dabei zum einen den Fahrzyklus selbst, zum anderen aber auch die Umgebungsbedingungen.

Dazu wurden zwei verschiedene Zyklen auf Basis bereits aufgezeichneter Realfahrten entwickelt. Der Fokus liegt auf dem Testbeginn, weil in dieser Phase der Motor und die Abgasnachbehandlung kalt sind und dieser Teil dadurch den größten Einfluss auf die Gesamtemissionen hat. Der Kaltstartteil wird mit 14 % gewichtet und muss im Anteil der Stadtfahrt sein.

¹⁸ Abgasnachbehandlung bei Euro VI schweren Nutzfahrzeugen bestehen aus einem Dieseloxydationskatalysator, einem Dieselpartikelfilter, einem SCR-Katalysator und einem Ammoniak-Schlupf-Katalysator. (Weller, 2020)

- ▶ Der sogenannte Hochlasttest beginnt mit einer hochlastigen Bergauffahrt im Stadtgebiet. Durch die hohe Last und die daraus folgenden hohen Abgastemperaturen heizen sich Motor und Abgasnachbehandlung zwar sehr schnell auf, aber vor Erreichen des Betriebsfensters sind die Rohemissionen sehr hoch.
- ▶ Der Niederlasttest startet mit einer sehr niederlastigen Stadtfahrt, wobei die durchschnittliche Leistung gerade über den für einen gültigen Test geforderten sechs Prozent der Nennleistung liegt. In dieser Phase sind die Rohemissionen zwar verhältnismäßig gering, aber das Aufheizen des Systems dauert durch die geringeren Abgastemperaturen länger. Am Ende der Niederlastfahrt enthält der Zyklus dann eine hochlastige Bergauffahrt, die gerade in den ersten Sekunden durch die abrupte Lasterhöhung hohe Ansprüche an die Abgasnachbehandlung stellt.

Nach der Kaltstartphase folgt ein den ISC-Rahmenbedingungen entsprechender Mix aus Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt. Dieser ist bei beiden Tests gleich und dieser Warmteil wird mit 86 % gewichtet.

Zudem wurden die Umgebungstemperaturen zu Beginn des Tests variiert. Es wird angenommen, dass sich die Temperaturen der Fahrzeuge, Motor und Abgasnachbehandlung, aufgrund ausreichend langer Standzeit vor Teststart vollständig an die Umgebungstemperatur angeglichen haben. Dies wird in der Regulierung für gültige Tests auch bis zu einer Abweichung von fünf Grad Celsius gefordert.

- ▶ Bei einer Starttemperatur von -7°C braucht die Abgasnachbehandlung am längsten aller möglichen ISC-konformen Testbedingungen bis sie das Betriebsfenster erreicht. Bei diesen Testbedingungen entstehen somit auch die höchsten Emissionen. Da die Auswertung aber erst ab einer Kühlmitteltemperatur von 30°C oder nach spätestens zehn Minuten beginnt, wird ein großer Teil dieser erhöhten Emissionen in der Auswertung nicht mitberücksichtigt.
- ▶ Die Starttemperatur von 30°C ist das andere Extremum, die höchstmögliche Starttemperatur. Bei dieser erreicht das Abgasnachbehandlungssystem zwar schneller sein Betriebsfenster, aber die Auswertung beginnt mit Teststart. D.h. alle Emissionen werden von Beginn an erfasst.

Das Entwicklungsziel wird so definiert, dass aufgrund von Serienstreuung und Absicherung hinsichtlich noch herausfordernder Fahrzyklen als die definierten worst-case Szenarien der Grenzwert bei der maximal zulässigen Laufleistung in allen RDE Tests mit einem Sicherheitsabstand von mindestens 50 % unterschritten wird. Der etwas höhere Sicherheitsabstand im ISC gegenüber dem RDE-Test bei PKW wurde wegen zusätzlicher statistischer Unsicherheiten in der Moving-Average-Windows-Auswertemethode bei SNF angenommen. Im WHTC wurde der Sicherheitsabstand auf 30 % festgelegt, weil der Zyklus bekannt ist und nur die Serienstreuung beachtet werden muss.

In Tabelle 12 und in Tabelle 13 wird der Vergleich zu den Grenzwerten für die verschiedenen Simulationen dargestellt. Die erste Spalte zeigt den Test, während die zweite Spalte darstellt, ob es sich bei den ISC-Tests um den Niederlast- oder den Hochlaststadtteil handelt. In der dritten Spalte ist die Fahrzeugklasse angegeben, wobei N2 für Verteiler-LKW und N3 für Fernverkehrsfahrzeuge steht. Zusätzlich ist die Umgebungstemperatur gezeigt. Die Ergebnisse werden dann in Prozent illustriert, wobei diese den Anteil am Grenzwert zeigen. D.h. bei 100 % entspricht der Emissionswert genau dem Grenzwert und bei zehn Prozent liegt der Wert 90 % unter dem Grenzwert.

Um das Entwicklungsziel bei NO_x in allen worst-case Testzyklen zu erreichen, wurde das Abgasheizen erhöht, was zu höheren Temperaturen in der Abgasnachbehandlung und somit besseren Konvertierungsraten führt. Dies wirkt sich speziell im Kaltstart und bei niederlastigen Fahrbedingungen positiv auf die NO_x-Emissionen aus. Des Weiteren wurden die Wärmeverluste im Abgasstrang reduziert. Dies wird durch eine Verbesserung der Isolierung des Abgasstrangs erreicht. Eine weitere Maßnahme ist die Absenkung der Grenztemperatur für die AdBlue-Einspritzung, welche durch eine prinzipielle Systemweiterentwicklung erreicht werden kann. Zudem wurde die NH₃-Speicherfähigkeit des SCR-Katalysators aufgrund von angenommenen Weiterentwicklungen bei den Katalysatormaterialien erhöht. Die Verbesserung des SCR-Katalysators wirkt sich auch durch verbesserte NO_x-Konvertierungsraten und einen verringerten Einfluss von Alterungseffekten¹⁹ aus. Durch die Erhöhung der AGR-Rate werden zusätzlich die motorischen NO_x-Emissionen gesenkt, was v.a. im Kaltstart wichtig ist. Im Vergleich zum Euro VI DE Basismodell werden die NO_x-Emissionen durch diese Maßnahmen je nach Fahr-situation um 60 bis 90 % reduziert. Somit liegt der Emissionswert im für NO_x herausforderndsten ISC-Szenario (Verteiler-LKW, Hochlast im Kaltstart, Umgebungstemperatur -7°C) bei 53 % des Euro 7 Grenzwerts. Im WHTC bei -7°C unterschreiten die NO_x-Emissionen den Grenzwert um etwa ein Drittel. Die Maßnahmen führen somit selbst unter worst-case Szenarien zu einer Erfüllung des Entwicklungsziels für Euro 7.

Die NH₃-Emissionen wurden hauptsächlich durch eine angenommene Verbesserung der Regelung der AdBlue-Dosierung in Kombination mit dem Schlupfkatalysator und einer Reduktion der alterungsbedingten Emissionserhöhungen durch Materialweiterentwicklung im Vergleich zu Euro VI DE um bis zu 70 % verringert. Dadurch werden die Euro 7 Entwicklungsziele im WHTC und unter worst-case ISC-Testbedingungen erreicht.

N₂O wird mithilfe einer verbesserten AdBlue-Einspritzungsstrategie und dem Einsatz von Katalysatormaterialien, die weniger zur N₂O-Bildung neigen, z.B. Vanadium, reduziert. Diese Maßnahmen führen im Vergleich zu Euro VI DE zu 30 % geringeren Emissionen und somit zum Erreichen der Euro 7 Entwicklungsziele.

Die CO-Emissionen erhöhen sich durch die verstärkten Heizmaßnahmen und die erhöhten AGR-Raten im Vergleich zu Euro VI DE um bis zu ca. 120 %. Im Vergleich zum Euro 7 Grenzwert liegen die Emissionen trotzdem noch bei unter zehn Prozent.

Durch die angeführten Maßnahmen werden keine signifikanten Auswirkungen auf das Emissionsverhalten bei PN10, NMHC/NMOG und CH₄ erwartet. Da diese Emissionswerte bei Euro VI DE bereits auf geringem Niveau im Vergleich zu ihren jeweiligen Grenzwerten liegen waren hinsichtlich dieser Komponenten somit auch keine Reduktionsschritte zur Erreichung der Euro 7 Grenzwerte nötig.

Tabelle 12: Emissionsniveau des Euro 7 SNF Modells gegenüber den EURO 7 Grenzwerten (1)

Test	ISC-Test Basis	Fahrzeug-klasse	Temperatur	NO _x	PN10	NMHC/NMOG	NH ₃
ISC	Hochlast	N3	-7°C	51%	35%	33%	4%
ISC	Niederlast	N3	-7°C	37%	36%	34%	4%
ISC	Hochlast	N3	30°C	41%	32%	33%	3%

¹⁹ Die Alterung wurde zum einen um den gleichen Faktor wie von Euro VI ABC zu Euro VI DE verringert, da die gleiche Systemverbesserung erwartet werden kann. Zum anderen kann aber auch von einer verbesserten Überwachung und somit dem Austausch von defekten Systemen ausgegangen werden, was zu einer weiteren Senkung der Alterung führt.

Test	ISC-Test Basis	Fahrzeug-klasse	Temperatur	NO _x	PN10	NMHC/N MOG	NH ₃
ISC	Niederlast	N3	30°C	41%	36%	34%	4%
ISC	Hochlast	N2	-7°C	53%	29%	43%	48%
ISC	Niederlast	N2	-7°C	33%	29%	43%	48%
ISC	Hochlast	N2	30°C	40%	25%	43%	48%
ISC	Niederlast	N2	30°C	40%	29%	43%	48%
WHTC	-	-	-7°C	66%	47%	55%	68%
WHTC	-	-	30°C	53%	47%	55%	68%

Tabelle 13: Emissionsniveau des Euro 7 SNF Modells gegenüber den EURO 7 Grenzwerten (2)

Test	ISC-Test Basis	Fahrzeug-klasse	Temperatur	N ₂ O	CH ₄	CO
ISC	Hochlast	N3	-7°C	28%	1%	7%
ISC	Niederlast	N3	-7°C	30%	1%	7%
ISC	Hochlast	N3	30°C	26%	1%	6%
ISC	Niederlast	N3	30°C	30%	1%	7%
ISC	Hochlast	N2	-7°C	47%	1%	7%
ISC	Niederlast	N2	-7°C	49%	1%	7%
ISC	Hochlast	N2	30°C	45%	1%	6%
ISC	Niederlast	N2	30°C	49%	1%	7%
WHTC	-	-	-7°C	56%	2%	9%
WHTC	-	-	30°C	56%	2%	9%

Neben der Anpassung des Systems aus Motor und Abgasnachbehandlung wurden noch die Fahrzeugdaten der Euro 7 Fahrzeuge auf Basis der Euro VI DE Daten aktualisiert. Die wichtigsten Maßnahmen sind die Reduktion des Leergewichts, des Luft- und des Rollwiderstands, sowie eine Steigerung der Effizienz des Motors selbst und der Nebenaggregate. Diese Maßnahmen haben eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs zur Folge und sind zur Erreichung der CO₂-Flottenziele 2025 und 2030 aus heutiger Sicht erforderlich. Bei einem Standardsattelzugfahrzeug bei einer Autobahnfahrt liegt die Verbrauchsminderungen von EURO 7 gegenüber EURO VI DE bei etwa zehn Prozent.

Das auf Basis von LKW-Daten erstellte PHEM-Emissionsmodell wird auch für Reise- und Stadtbusse genutzt. Vorab wurden zu Validierungszwecken deshalb entsprechende Fahrzyklen simuliert und die Funktion des Modells geprüft. Dieses führt bei Bussen zu ähnlichen Reduktionsraten von Euro VI DE zu Euro 7 wie bei LKW und kann somit auch für diese Fahrzeugklassen verwendet werden.

Neben dem Euro 7 Emissionsmodell wurde zusätzlich noch eine Reduktion des Anteils an manipulierten Fahrzeugen in der Flotte für Euro 7 im Vergleich zu Euro VI angenommen. Durch

die voraussichtlich effektivere Überwachung anhand der Euro 7 OBM Regulierungen wird eine Halbierung angenommen. Bei NO_x bedeutet dies zum Beispiel eine Reduktion von zehn Prozent in Euro VI zu fünf Prozent in Euro 7.

6 Wirkungsabschätzung der Euro 7 Gesetzgebung für die Gesamtemissionen des Verkehrs in Deutschland bis 2040

Im folgenden Abschnitt wird die Wirkung der Euro 7-Gesetzgebung im finalen Rechtsakt (Regulierung EU 2024/1257)¹ auf die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland untersucht. Weiterhin steht der Vergleich der Euro 7-Gesetzgebung im finalen Rechtsakt mit dem Vorschlag der EU-Kommission vom November 2022 im Fokus. Im Folgenden werden daher zwei Szenarien untersucht:

- ▶ EU 7 final act
- ▶ EU 7 com proposal

Grundlage ist das TREMOD-Trendszenario der Version 6.53 und weiterführende Arbeiten im Rahmen eines parallellaufenden UBA-Projekts²⁰. Im Trendszenario wird die Entwicklung der Bestände und Fahrleistungen aller Verkehrsträger nach Antrieb und Baujahr modelliert und der Energieverbrauch und die Schadstoffemissionen von 2025 bis 2050 berechnet. Die verwendeten Emissionsfaktoren für Euro 7 Fahrzeuge im Szenario „final act“ wurden aus den Analysen der TU Graz für das HBEFA 5.1 (siehe Kap. 5) und in Szenario „com proposal“ aus Ad-Hoc Arbeiten zur Entwicklung des nationalen Luftreinhalteprogramms (NRLP) im Jahr 2023 und 2024 abgeleitet.

6.1 Emissionsfaktoren

Da das HBEFA 5.1 zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht verfügbar war, wurden die Emissionsfaktoren des HBEFA 4.2 verwendet. Aus den laufenden Entwicklungen für das HBEFA 5.1 wurden jedoch Annahmen zu Euro 7 und für SNF/Busse auch für Euro 5-6 übernommen. Diese stellen jedoch nicht die finalen Werte des HBEFA 5.1 dar, sondern Zwischenergebnisse, welche ifeu von FVT übermittelt wurden. Die prinzipielle Vorgehensweise gleicht jedoch der Beschreibung in Kap. 5. Zusätzlich wurde aufgrund der Auswertungen für das HBEFA 5.1 der Einfluss von Tampering berücksichtigt, welcher auch Euro V und Euro 6 SNF und Fernlinien-/Reisebusse betrifft. Die Emissionsfaktoren berücksichtigen neben Fahrzeugtyp, Antrieb und Emissionsstandard somit folgende Einflüsse:

- ▶ Warmbetrieb nach Verkehrssituation (Urban, Rural, Highway und für SNF zusätzlich Stop+go)
- ▶ Kaltstarts
- ▶ Verschlechterung (Deterioration)
- ▶ Defekte/Manipulationen (Tampering).

Als Schadstoffe werden HC, NMHC, CH₄, CO, NO_x, PM₁₀/PM_{2,5}, NH₃, N₂O analysiert.

Da die von Tampering betroffenen Fahrzeuge quasi ohne Abgasnachbehandlung betrieben werden, sind die Emissionen je nach Emissionsstandard um das 3- bis 120-fache höher (Tampering Rate) als bei Neufahrzeugen bzw. nicht manipulierten Fahrzeugen. Die Anteile von Tampering betroffenen Fahrzeuge wurden basierend von Plume-Chasing Messungen für Euro V mit 31 % und Euro 6 mit ca. 10 % angenommen, wobei es sich um europäische Durchschnittswerte handelt (Hausberger und Notter 2024). Für „EU 7 – final act“ wird

²⁰ „Aktualisierte Bewertung von Emissionsminderungspotenzialen zusätzlicher Verkehrsmaßnahmen“, Projektnummer 193065

angenommen, dass der Tampering-Anteil aufgrund der Verpflichtung zur Onboard-Überwachung auf 5 % sinken. Bei den Werten für „EU 7 COM-Proposal“ lagen noch nicht alle Erkenntnisse wie zum Zeitpunkt der Erstellung des HBEFA 5.1 vor, weswegen die Annahmen für den Einfluss des Tamperings deutlich optimistischer sind (Rate 20, Anteil an der Flotte 3 %). Tabelle 14 zeigt die Annahmen zu Tampering für SNF und Reisebusse am Beispiel der NO_x-Emissionen.

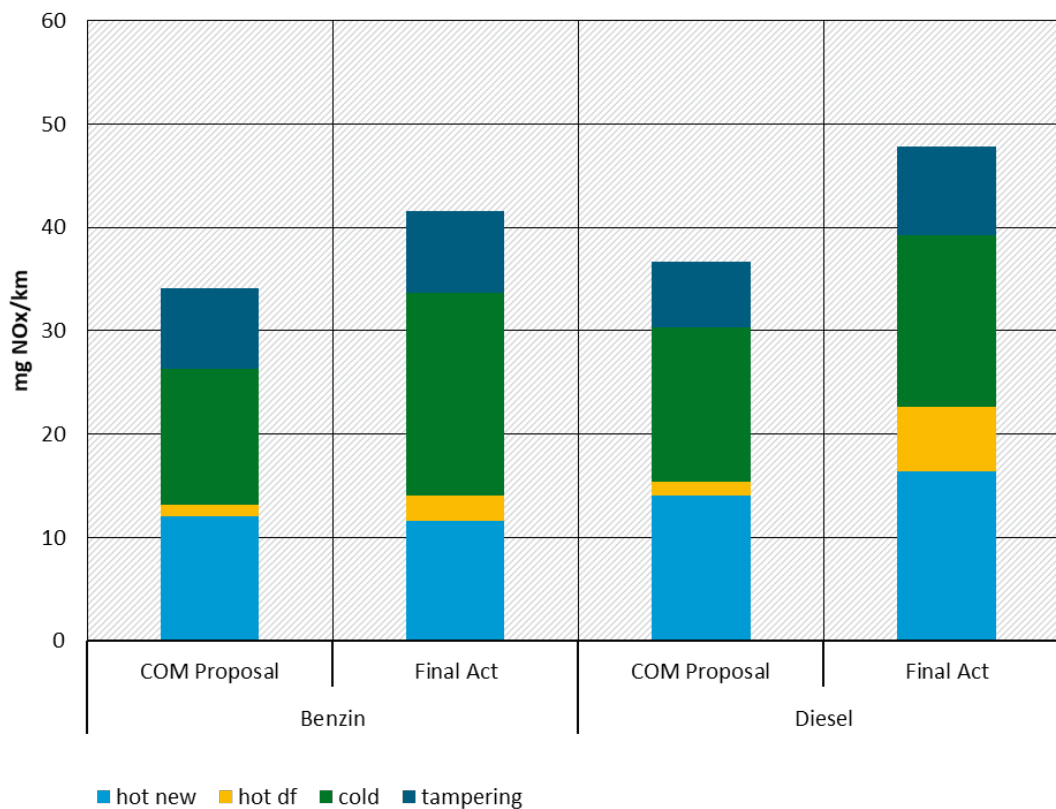
Tabelle 14: Annahmen zu Tampering für SNF und Reisebusse am Beispiel NO_x-Emissionen

Emissionsstandard	Tampering Rate NO _x	Anteil Tampering an der Flotte	g NO _x /kWh ohne Tampering, 100% DF	g NO _x /kWh Flotte mit Tamperinganteil, 100% DF
Euro V	3,1	31 %	4,17	5,49
Euro 6 abc	10	10 %	1,83	2,19
Euro 6 de	35	10 %	0,70	1,25
Euro 7 – COM proposal*	20	3%	0,02	0,02
Euro 7 – final act	120	5 %	0,12	0,30

Anmerkung: DF – Deterioration Factor (Verschlechterungsfaktor). *Basierend auf älteren Daten (nicht Stand HBEFA 5.2)

Die von FVT bereitgestellten Emissionsfaktoren für Euro 7-PKW sind in Abbildung 47 dargestellt. Die Emissionsfaktoren für Euro 7 im finalen Rechtsakt („Final Act“) sind um ca. 20-30 % höher als die Emissionsfaktoren im Kommissionsvorschlag („COM-Proposal“). In beiden Fällen haben insbesondere die Kaltstart-Emissionen einen signifikanten Anteil an den NO_x-Emissionen. Im Gegensatz zum HBEFA wurde hierbei auch bei PKW und LNF ein Aufschlag für Tampering angenommen, welcher jedoch deutlich geringer ausfällt als bei SNF. Die durchschnittlichen Emissionen liegen deutlich unter den Grenzwerten im WLTP von 60 mg für Benzin und 80 mg für Diesel, welche im finalen Rechtsakt analog zu Euro 6 sind. Bei Euro 6d PKW sind die Emissionen im durchschnittlichen realen Betrieb ebenfalls unterhalb der WLTP-Grenzwerte.

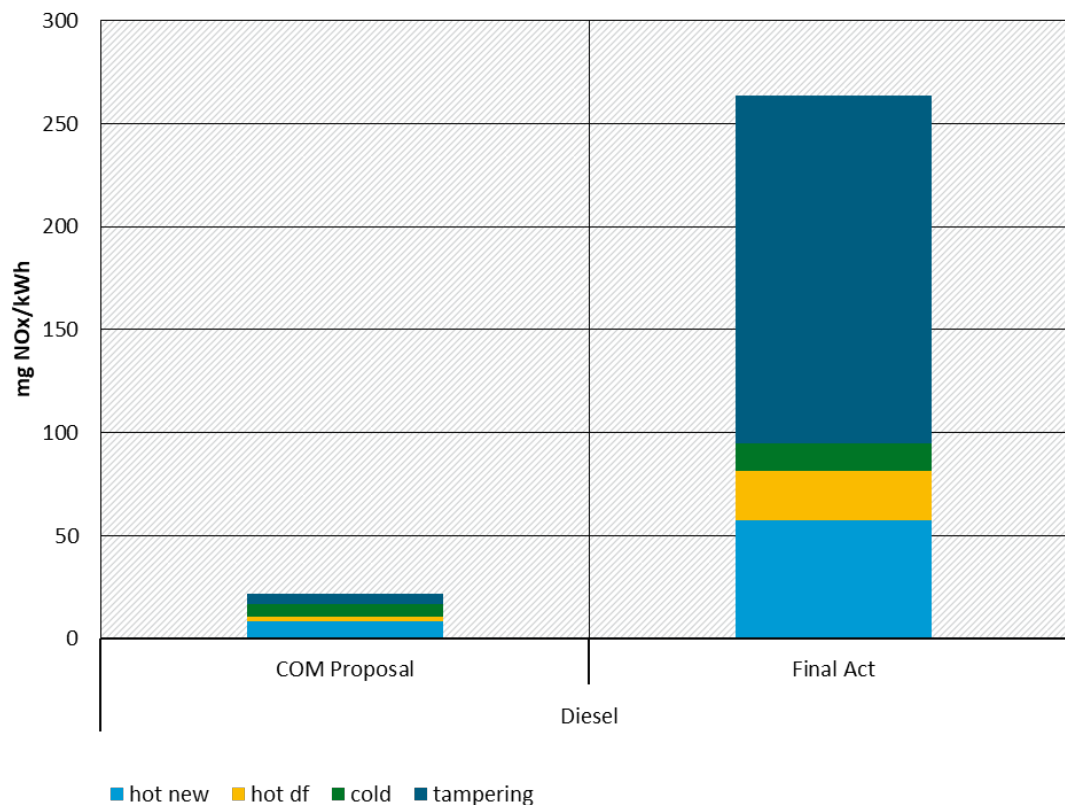
Abbildung 47: Mittlere NO_x-Emissionsfaktoren für die Wirkungsabschätzung von Euro 7 PKW



Quelle: eigene Graphik ifeu auf Basis FVT-Daten. Anmerkung: Durchschnittliche Verkehrssituation Deutschland, DF – Deterioration factor (Verschlechterungsfaktor) für 50% der maximalen Lebensfahrleistung

Bei den SNF sind die durchschnittlichen Emissionsfaktoren im finalen Rechtsakt gegenüber dem Kommissionsvorschlag um ein Vielfaches höher, insbesondere beim Tampering, und etwas höher als der Euro 7-Grenzwert auf dem Prüfstand von 200 mg/kWh. Selbst im finalen Rechtsakt sind die mittleren NO_x-Emissionsfaktoren jedoch um min 70% niedriger als bei Euro VI de, so dass Euro 7 in beiden Szenarien eine starke Reduktion bringt.

Abbildung 48: Mittlere NO_x-Emissionsfaktoren für die Wirkungsabschätzung von Euro 7 SNF



Quelle: eigene Graphik ifeu auf Basis FVT-Daten. Anmerkung: Durchschnittliche Verkehrssituation Deutschland, DF für 50% der maximalen Lebensfahrleistung

Sowohl bei Pkw und LNF als auch SNF und Bussen ist zu berücksichtigen, dass die Euro 7-Emissionsfaktoren auf Annahmen und nicht auf Messungen beruhen und dass Details zu OBM in den folgenden Durchführungsrechtakten zu anderen Anforderungen führen können. Auch sind die hier verwendeten Emissionsfaktoren noch nicht die final für das HBEFA 5.1 verwendeten endgültigen Werte, da diese zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht vorlagen.

6.2 Fahrleistungen

Um den Anteil der Euro 7-Fahrzeuge an der Fahrleistung zu bestimmen werden zunächst die Anteile von Euro 7 an den jährlichen Neuzulassungen definiert. Entsprechend der Gesetzgebung des finalen Rechtsaktes tritt die Euro 7-Norm zu folgenden Zeitpunkten in Kraft:

- ▶ PKW und LNF
 - neue Fahrzeugmodelle: 29. November 2026
 - alle Neuzulassungen: 29. November 2027
- ▶ Schwere Nutzfahrzeuge
 - neue Fahrzeugmodelle: 29. Mai 2028
 - alle Neuzulassungen: 29. Mai 2029

Im Vorschlag der EU Kommission vom November 2022 wurden als Einführungszeiträume der 1.1.2025 für Pkw und der 1.6.2027 für SNF vorgeschlagen. Tabelle 15 zeigt die in TREMOD

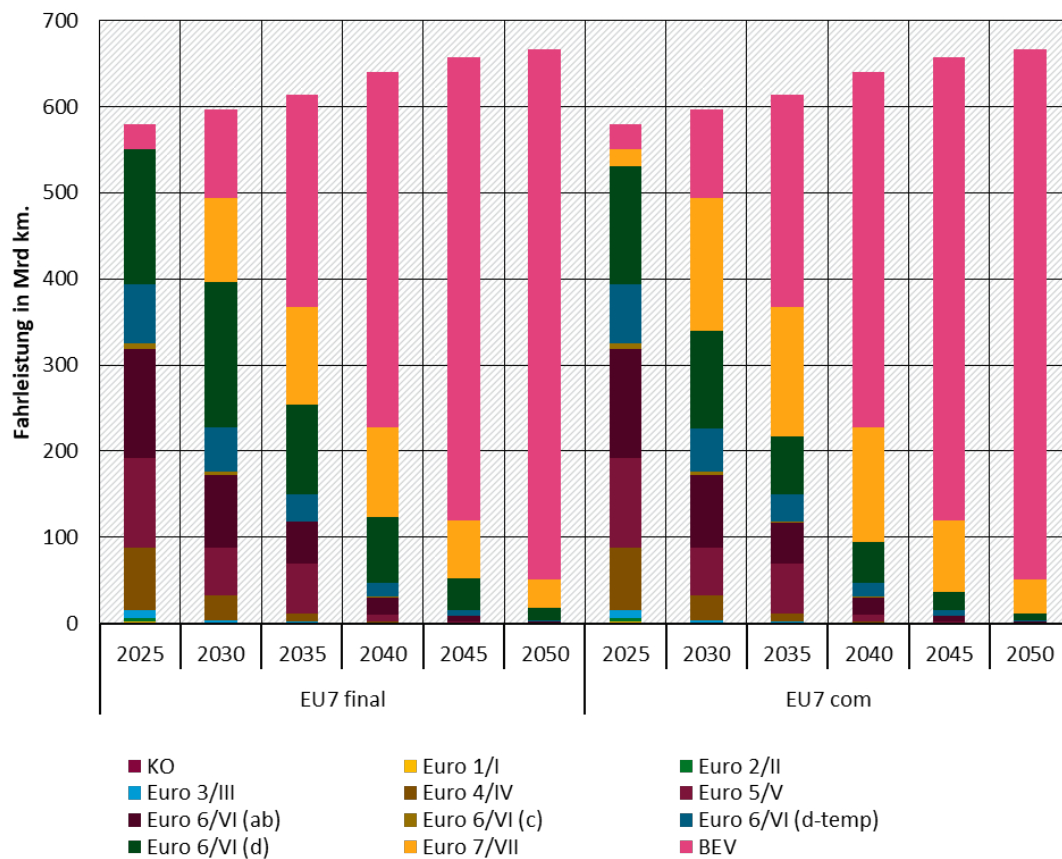
angenommenen Anteile der Euro 7 Fahrzeuge pro Zulassungsjahr. In der Analyse des Kommissionsvorschlags wird analog zu den Ad-Hoc-Arbeiten für das NRLP 2023/2024 vereinfacht angenommen, dass alle Neufahrzeuge im Jahr des Inkrafttretens Euro 7 erfüllen und damit auch vorgezogen Euro 7 Fahrzeuge auf den Markt kommen. Für den finalen Rechtsakt wird ebenfalls eine vorgezogene Erfüllung angenommen, welche jedoch basierend auf den Zulassungsdaten vergangener Jahre und Euro-Normen über einen längeren Zeitraum schrittweise erfolgt.

Tabelle 15: Einführungszeiträume der Euro 7 Grenzwerte in den Szenarien

Zulassungsjahr	COM-Proposal – PKW und LNF	Final Act – PKW und LNF	COM-Proposal – SNF und Busse	Final Act – SNF und Busse
2025	100%	0%	0%	0%
2026	100%	35%	0%	0%
2027	100%	91%	100%	5%
2028	100%	100%	100%	38%
2029	100%	100%	100%	79%
Ab 2030	100%	100%	100%	100%

Die Fahrleistungen pro Fahrzeugkategorie, Antrieb und Zulassungsjahr wurden aus TREMOD bezogen. Die Pkw-Fahrleistung insgesamt steigt bis 2050 entsprechend der gleitenden Langfristprognose 2022 des BMDV an. Aufgrund der beschlossenen Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität, insbesondere den europäischen CO₂-Flottengrenzwerten nimmt der Anteil von BEV deutlich zu, so dass deren Fahrleistung zwischen 2035 und 2040 BEV bereits die Hälfte der Pkw-Fahrleistung ausmacht. Die Flottenzusammensetzung nach Emissionsstandard ergibt sich aus den zuvor beschrieben Einführungszeiträumen von Euro 7. Mit der Euro 7-Gesetzgebung im finalen Rechtsakt (siehe Abbildung 49, links) ist der Anteil von Euro 7- Pkw mit 16 % der Pkw im Vergleich mit dem Szenario Kommissionsvorschlag mit 26 % im Jahr 2030 (siehe Abbildung 49, rechts) deutlich geringer. Aufgrund des Rückgangs von Verbrennungsfahrzeugen sinkt der Anteil der Euro 7-Pkw an der Gesamtfahrleistung der Pkw nach 2035 in beiden Szenarien.

Abbildung 49: Pkw-Fahrleistung nach Emissionsstandard in TREMOD 6.53 und im WM-Szenario

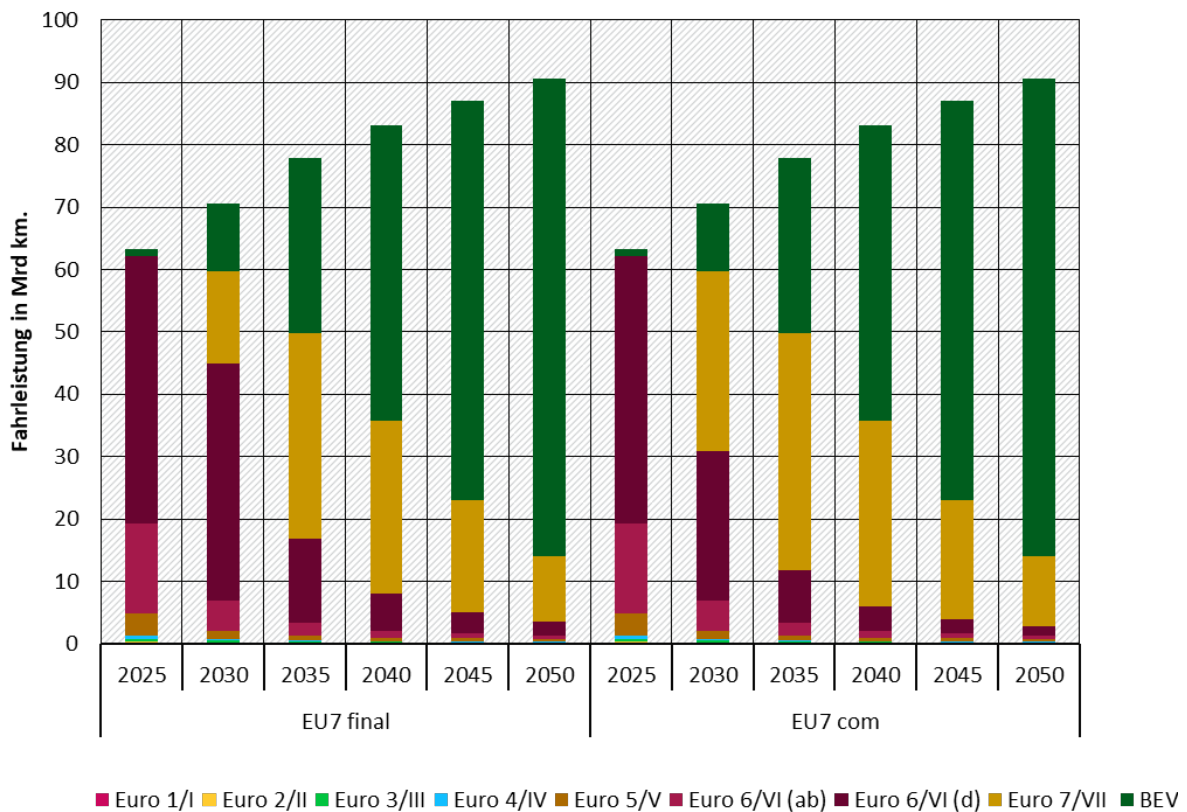


Quelle: ifeu-Graphik. Anmerkung: KO = Konventionell bzw. Euro 0

Bei den SNF steigt die Fahrleistung im Trendszenario bis 2050 in Anlehnung an die gleitende Langfristprognose 2022 des BMDV deutlich stärker an als bei den Pkw. Auch hier nimmt der Anteil von BEV an der Fahrleistung stark zu. Trotz der späteren Einführung von Euro 7 bei den SNF - verglichen mit den PKW - nimmt deren Anteil an der Fahrleistung bis zum Jahr 2030 und danach wegen der kürzeren Lebenszeit sowie der hohen Fahrleistungen stark zu. Im Szenario „final act“ beträgt der Anteil der Euro 7-SNF an der SNF-Fahrleistung im Jahr 2030 26 %, im Szenario „com proposal“ hingegen 41 %²¹. Ab 2040 sinkt der Anteil der Euro 7 SNF gegenüber BEV SNF aufgrund des Rückgangs der Fahrleistung von Verbrenner-SNF insgesamt (Abbildung 50).

²¹ In den Berechnungen wurde vereinfacht angenommen, dass die in Deutschland zugelassene SNF-Flotte repräsentativ für die in Deutschland erbrachte Fahrleistung, d.h. auch für ausländische SNF, ist.

Abbildung 50: SNF-Fahrleistung nach Emissionsstandard in TREMOD 6.53 und im WM-Szenario

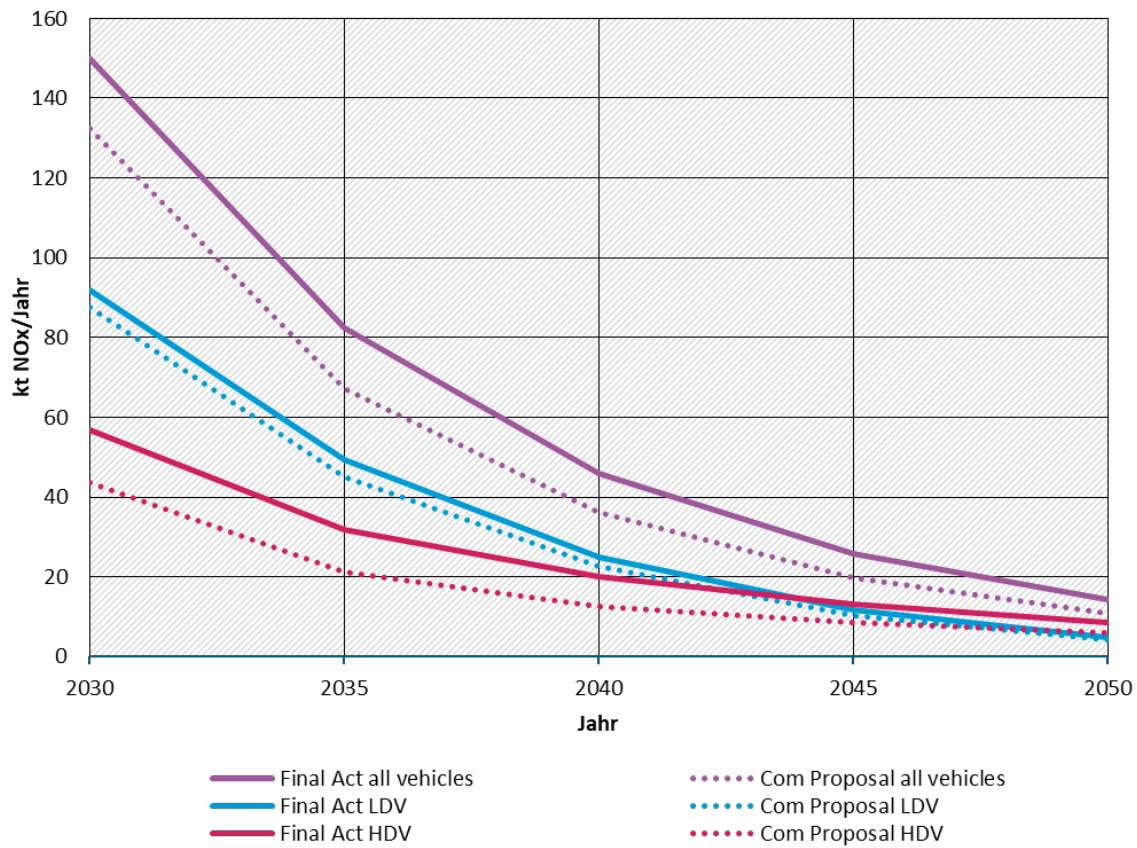


Quelle: ifeu-Graphik. Anmerkung: KO = Konventionell bzw. Euro 0

6.3 Ergebnisse und Fazit

Abbildung 51 stellt die Entwicklung der NO_x-Emissionen im Straßenverkehr für die beiden Euro 7 – Szenarien finaler Rechtsakt und Kommissionsvorschlag einander gegenüber. In beiden Szenarien sinken die NO_x-Emissionen zwischen 2030 und 2050 signifikant und über alle Fahrzeugkategorien hinweg. Im Szenario COM-Proposal sind die NO_x-Emissionen im Jahr 2030 mit ca. 18 kt NO_x jedoch deutlich geringer als im Szenario mit dem finalen Rechtsakt. Den größten Einfluss auf den Unterschied haben die SNF, deren Emissionen um ca. 13 kt NO_x geringer liegen, da die spezifischen Emissionsfaktoren für Euro 7 SNF im COM-Vorschlag deutlich geringer sind und durch die frühere Einführung eine höhere Minderung erreichen.

Abbildung 51: Vergleich der zukünftigen NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland mit Euro 7 im finalen Rechtsakt vs Kommissionsvorschlag



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Anmerkungen: LDV (Light duty vehicles) umfassen PKW und LNF, HDV (Heavy Duty Vehicles) umfassen SNF und Busse

Zusätzlich zu NO_x ergibt das Szenario mit dem Kommissionsvorschlag auch bei weiteren Schadstoffen, insbesondere Lachgas (N₂O), Ammoniak (NH₃) und Methan (CH₄) Minderungen. Bei der Partikelmasse (PM_{2.5}) sind die Emissionen im Szenario mit dem Kommissionsvorschlag nur leicht geringer als im Szenario mit dem finalen Rechtsakt.

Tabelle 16: Vergleich der Emissionen weiterer Schadstoffe des Straßenverkehrs in Deutschland mit Euro 7 im finalen Rechtsakt vs. Kommissionsvorschlag

Schadstoff	2030 Final Act	2030 Com Pposal	2030 Differenz	2040 Final Act	2040 Com Pposal	2040 Differenz
NH ₃	7,9	6,8	-13%	4,0	2,9	-28%
PM _{2.5}	3,1	3,0	-2%	1,8	1,8	-4%
N ₂ O	8,4	6,7	-20%	4,5	2,9	-37%
CH ₄	7,4	6,5	-12%	4,9	3,8	-22%
NO _x	150,0	132,3	-12%	45,8	36,2	-21%

Die Wirkungsabschätzung zeigt, dass die Änderungen der Euro 7-Gesetzgebung im finalen Rechtsakt gegenüber dem deutlich ambitionierteren Vorschlag der EU-Kommission zu einer langsameren Verbesserung der Luftqualität in Deutschland führen dürften. Inwiefern dadurch das Risiko für die Verfehlung der Luftqualitätsgrenzwerte und der zulässigen Jahreshöchstmengen der NEC-Richtlinie besteht, wurde in diesem Projekt nicht untersucht, da beide Zielvorgaben von den sektorübergreifenden Emissionen abhängig sind. Insbesondere bei NO_x spielt der Verkehr jedoch eine zentrale Rolle.

Die gezeigten Ergebnisse gelten jedoch nur für die beschriebenen Annahmen und Szenarien und stellen keine Prognosen dar. Zu Euro 7 liegen bisher noch keine Messdaten vor und in Anbetracht noch fehlender Durchführungsrechtsakte kann die Wirkung über alle Fahrzustände und die Fahrzeuglebenszeit nur näherungsweise simuliert werden. Die verwendeten Emissionsfaktoren stammen noch aus vorläufigen Daten im Rahmen der Entwicklung des HBEFA 5.1 und bilden nicht den finalen Stand ab.

7 Quellenverzeichnis

- EEA (2023): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023; Technical guidance to prepare national emission inventories. *EEA Report 06/2023*.
- Eichlseder, H., Hausberger, S. (2023): Antriebssysteme mit VKM (Propulsion Systems with ICEs). *Skriptum der TU Graz; LV Nr. 313 303*.
- Hammer, J. (2020): Innovative SCR Systems for upcoming commercial vehicle emission requirements. *11. Int. AVL Forum Exhaust Gas – and Particle Emission. Ludwigsburg*.
- Hausberger, S.; Landl, L.; Ketan, E. (2024): Messung und Simulation von Non-Exhaust Partikelemissionen. *Endbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, BAFU Schweiz, TU Graz*.
- Hausberger, S. (2021): Antriebssysteme mit Verbrennungskraftmaschinen. *Teil: Schadstoffbildung und Abgasnachbehandlung. Skriptum am IVt der TU Graz*
- IPCC (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535*.
- McCarthy, J. (2019): Meeting Future Low-Load Emissions Using Cylinder Deactivation to Achieve Simultaneous NO_x & CO₂ Reduction. *16th Forum SAE Brasil*.
- MECA (2019): Technology Feasibility for Model Year 2024 Heavy-Duty Diesel Vehicles in Meeting Lower NO_x Standards.
- Monschein, W., Grabner, P., Eichlseder, H. (2015): Untersuchungen zur Zylinderabschaltung an einem Dieselmotor für den Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen. *Stuttgart Motorsymposium 2015*.
- Neel, G.; Sharp, C. (2019): Simultaneous NO_x and CO₂ Reduction for Meeting Future CARB Standards Using a Heavy Duty Diesel CDA NVH Strategy. *JENG-2019-0075*.
- Ngeno, R., Mahdi, M. (2022): Analysis of tyre wear using the expanded brush tyre model. *KTH 2022*
- Nilsson, M., Birgersson, H., Müller, W., Gabrielsson, P., & Senar Serra, E. (2021): Next Generation Global Emission Solution Platform with Dual Urea Dosing – Meeting Future Emission and Efficiency Requirements. *42nd International Vienna Motor Symposium*
- Schläfle, S.; Unrau, H.; Gauterin, F (2023): Influence of Longitudinal and Lateral Forces on the Emission of Tire–Road Particulate Matter and Its Size Distribution. *Atmosphere 2023, 14, 1780. <https://doi.org/10.3390/atmos14121780>*.
- Schläfle, S.; Unrau, H.; Gauterin, F. (2023-2): Influence of Load Condition, Tire Type, and Ambient Temperature on the Emission of Tire–Road Particulate Matter. *Atmosphere 2023, 14, 1095. <https://doi.org/10.3390/atmos14071095>*.
- Schläfle, S.; Zhang, M.; Unrau, H.; Gauterin, F (2024): Influence of Vertical Load, Inflation Pressure, and Driving Speed on the Emission of Tire–Road Particulate Matter and Its Size Distribution. *Atmosphere 2024, 15, 502. <https://doi.org/10.3390/atmos15040502>*.
- Sharp, C.; Neely, G.; Zavala, B.; Rao, S. (2021): Further Development and Validation of technologies to Lower Oxides of Nitrogen Emissions from heavy Duty vehicles; Low NO_x Demonstrator program – Stage 3. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 3(2021-01-0589)*.
- Weller, K.; Hausberger, S.; Plakolmer, B. (2024): Zweiter Rahmenvertrag zur Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen 2022-2026. *Los 1 07/2023, Zwischenbericht*.
- Weller, K.; Hausberger, S. (2023): Zweiter Rahmenvertrag zur Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen 2022-2026. *Los 1 11/2022, Zwischenbericht*.

Weller, K.; Landl, L.; Hausberger, S. (2022): Zweiter Rahmenvertrag zur Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen 2022-2026., *Los 1 07/2022, Zwischenbericht*.

Weller, K.; Lipp, S.; Hausberger, S.; Landl, L.; Kulpe, M.; ; Atzler, F.; Roß, T. (2021): Rahmenvertrag für die Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen. *Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. FVT- Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Graz*.

Weller, K. (2020): Emission Models for Heavy Duty Vehicles based on On-road Measurements. *Dissertation. Graz*.

A Durchführung von Messungen an Pkw und SNF

Autor*innen: Silke Lipp, Stefan Hausberger, FVT, Graz; Ruud Verbeek, M. Paalvast, Aarjan Eijk, TNO, Den Haag. Datum: 30.07.2021

A.1 Aufgabenstellung

Im Arbeitspaket 2 des Projektes „Nationale und internationale Abgasgesetzgebung bei Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen; FKZ 3719 51 102 0“ sind Emissionsmessungen an PKW und LKW vorgesehen. Diese sollen möglichst nieder emittierende Kfz in kritischen Fahrsituationen vermessen, um eine Basis für mögliche EURO 7 Grenzwerte und RDE Testbereiche zu schaffen.

Die Messungen an PKW und LNF erfolgen durch die FVT. Insgesamt sind 24 Messtage für PKW und LNF vorgesehen. Bisher wurden für PKW 1 drei Messtage und für LNF zwei Messtage verbraucht. An sich erfordert das Messprogramm 7 Messtage je PKW, allerdings wurden bei den beiden ersten Fahrzeugen bereits Basismessungen in anderen Projekten durchgeführt, so dass nur mehr Erweiterungen (Tieftemperatur und Hochlasttests) nötig waren, um den später beschriebenen Messumfang darzustellen.

Die Messungen am schweren Nutzfahrzeug erfolgten bei TNO und sind ebenfalls in diesem Zwischenbericht beschrieben. Dabei wurde insbesondere der Einfluss der Umgebungs- und Starttemperatur sowie der Seehöhe (geringerer Luftdruck) auf die Emissionsniveaus getestet, da bislang keine Daten zu diesen Abhängigkeiten verfügbar waren. Am Klimaprüfstand von TNO waren diese Tests möglich und wurden an einer EURO 6 D Sattelzugmaschine durchgeführt, die in den Messreihen der TU Graz für das Umweltbundesamt als „Best Performer“ in Bezug auf NO_x und PN Emissionen identifiziert wurde.

A.2 Methodik

A.2.1 Messungen PKW und LNF

Die Tests an PKW fanden im realen Straßenbetrieb in Graz und Umgebung sowie am PKW-Rollenprüfstand der TU Graz statt.

Alle Messungen wurden entsprechend den geltenden Vorschriften für die Durchführung von Emissionsmessungen, bei Fahrzeughomologationen von PKW und LNF, mittels Rollenprüfstandmessungen und Real World Messungen ECE-Trans-WP29-2017-14, Direktive 2007/46/EC und der Commission Regulation (EC) No 692/2008 in den jeweilig aktuellen Fassungen unter Berücksichtigung der aktuellen Anhänge durchgeführt. Folgende Methoden wurden dabei verfolgt:

- ▶ Die Fahrwiderstände wurden über das Reifenlabel nach der Verordnung Nr. 1222/2009²² über die Kraftstoffeffizienzklasse für jedes Fahrzeug ermittelt.
- ▶ Am Rollenprüfstand wurde für den WLTC die Masse entsprechend der Typprüfdaten eingestellt. ERMES und IUFC wurden mit der WLTC-Testmasse und den WTLC-Fahrwiderständen gemessen.

²² Verordnung Nr. 1222/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter

- ▶ Die RDE Tests mit PEMS fanden im realen Verkehr auf der Straße statt. Die Route entspricht den Vorgaben der RDE Regulierung. Durch Baustellen, Staus etc. können aber bei einzelnen Parametern Abweichungen von den in der RDE Regulierung definierten Grenzen für gültige Trips entstehen. IN den Eco und Aggressiv gefahrenen RDE Tests wurden die derzeit gültigen Randbedingungen gezielt verlassen, um Messdaten für vermutlich erweiterte Randbedingungen für EURO 7 zu schaffen.

Eine Beschreibung der Messtechnik und Auswertesoftware ist im Anhang zu finden.

Auswertung und Darstellung der Ergebnisse werden für alle gemessenen Kfz jeweils in einheitlicher Form durchgeführt. Bei Auffälligkeiten werden zusätzliche Analysen gezeigt.

A.2.2 Messungen SNF

Die Messungen am SNF fanden am Klimaprüfstand von TNO statt. Auf diesem können sowohl Temperatur als auch der Luftdruck geregelt werden. Da Emissionsgrenzwerte je auch in „Worst-Case“ Fahrbedingungen einzuhalten sind und diese vermutlich bei Kaltstarts in großer Höhe zu finden sind, sind Messdaten zu den Änderungen der Emissionsniveaus bei solchen extremeren Fahrbedingungen zu den Emissionen bei normaler Temperatur und Seehöhe wesentlich.

Da bisher keine Messdaten an modernen Nutzfahrzeugen in gleichen Testzyklen bei stark unterschiedlichen Temperaturen sowie bei niederem Luftdruck zur Simulation einer Fahrt auf großer Seehöhe verfügbar sind, wurden das gesamte bei TNO verfügbare Messbudget in solche Klima-prüfstandversuche investiert. Dafür wurde das in den bisherigen Messungen der FVT im UBA-Rahmenprogramm als sauberstes EURO 6 Nutzfahrzeug identifizierte Fahrzeug ausgewählt.

- ▶ Am Antriebsprüfstand wurden für den WHVC die Masse, Fahrwiderstände und Steigungen entsprechend der Methodik der Global Technical Regulation (GTR) Nr. 5 eingestellt, so dass der WHVC den Leistungsverlauf des WHTC gut abbildet.
- ▶ Masse und Fahrwiderstände im In-Service Conformity (ISC) Test wurde entsprechend der realen Fahrzeugdaten aus on-board Messdaten von TNO eingestellt.

Der Berichtsteil zum Nutzfahrzeugprogramm ist in Englisch gehalten. Bei Bedarf kann für die Endversion eine Übersetzung geliefert werden.

A.3 Messprogramm PKW

Das Messprogramm am Rollenprüfstand setzt sich aus Messungen am-Rollenprüfstand und aus On-Board PEMS Tests zusammen.

Zu messen waren laut Auftrag für PKW und LNF:

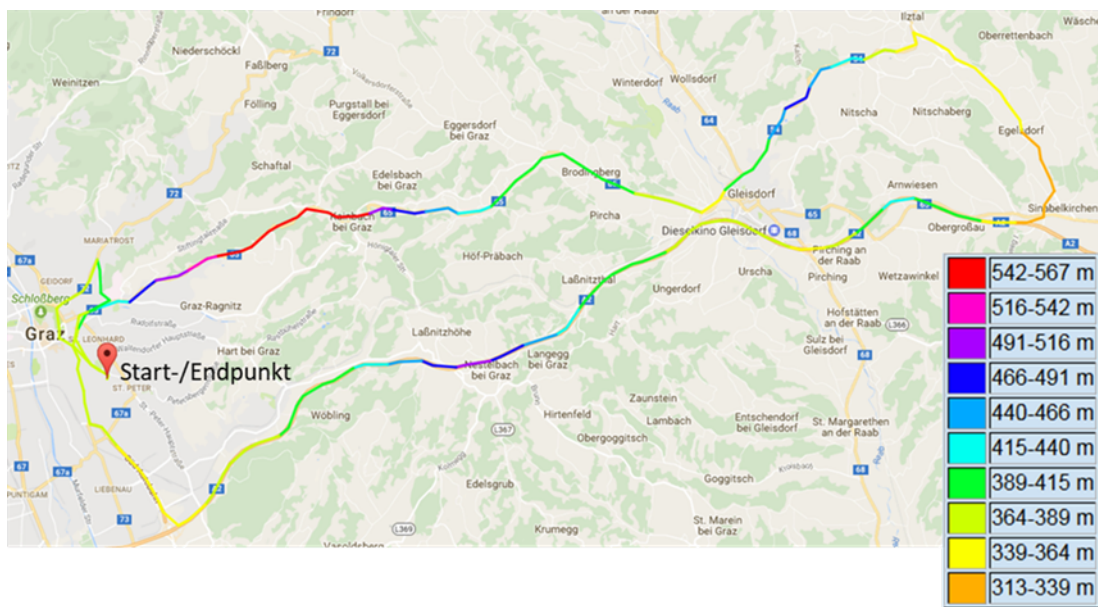
N₂O, CH₄, NH₃, PN23, PN10, Formaldehyde and Benzol bei den Prüfstandtests. PEMS Tests sollen CO₂, CO, NO_x, NO, NO₂, PN23 umfassen.

1. Vehicle set up dyno calibration etc.
2. WLTC hot start (mainly for preconditioning)
3. WLTC cold start @ 20°C
4. RDE cycle ("RWC") hot start @ 20°C (typical RDE test including road gradients)
5. ERMES V8 hot start @ 20°C
6. IUFC cold start @ 20°C extended by the HBEFA Stop&Go cycle (the latter checks, if SCR systems get/keep hot)
7. ERMES V9 cycle hot start @ 20°C (i.e. version with extra sub-phase up to 160 km/h, DPF regeneration to be expected)
8. Constant speed 150 km/h (check if emissions remain stable after ERMES V9 in longer high speed)
9. WLTC hot start (mainly for preconditioning and to test effects of regenerated filter status)
10. IUFC cold start @ 0°C extended by the HBEFA Stop&Go cycle (the latter checks, if SCR systems get/keep hot)
11. ERMES V8 hot start @ 0°C
12. ERMES V8 hot start @ 0°C with increased load to mimic caravan attached (ca + 500kg and +100% air drag and rolling resistance)
13. IUFC cold start @ -15°C extended by the HBEFA Stop&Go cycle (the latter checks, if SCR systems get/keep hot)
14. Set up of PEMS system (at normal ambient conditions)
15. PEMS Tests
16. RDE tests (normal, low load/Eco, aggressive)
17. Reserve for issues with equipment to be expected

Die Messungen im realen Straßenverkehr wurden auf der sogenannte „Ries-Route“ durchgeführt, die die Standard-RDE Teststrecke der FVT ist. Die Route führt nach einer Stadtrunde in Graz über die Ries-Bundesstraße B65 nach Gleisdorf und dann weiter nach Sinabelkirchen (B54). In Sinabelkirchen wird auf die Autobahn A2 aufgefahren, die dann zurück nach Graz führt.

Abbildung 52 zeigt die eingezeichnete Strecke auf der Karte. Orange und gelbe Streckenabschnitte kennzeichnen Bereiche mit niedriger Seehöhe, rote und violette Streckenabschnitte hingegen Bereiche höherer Lagen.

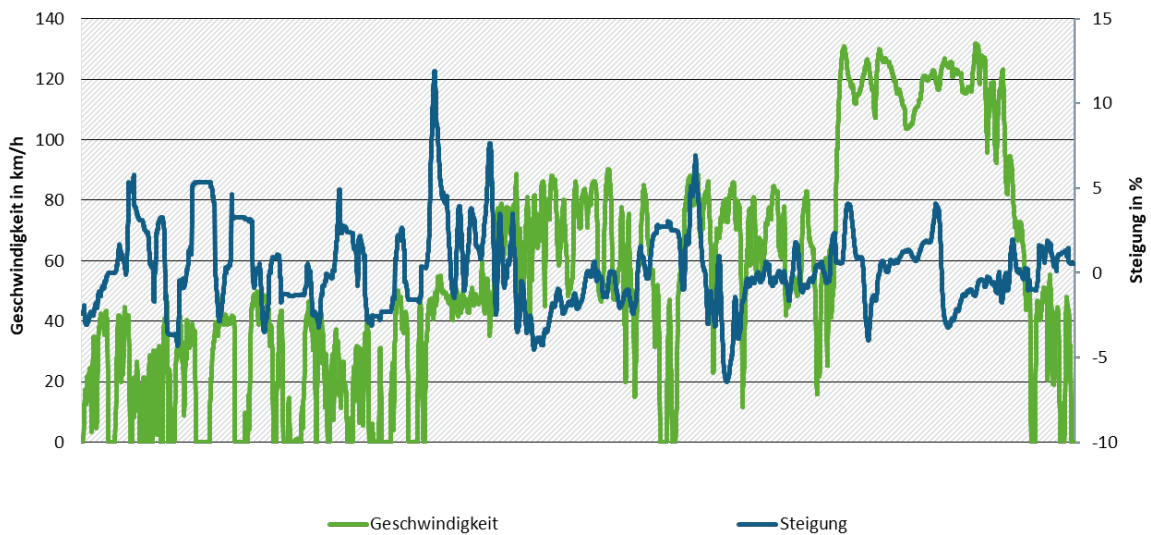
Abbildung 52: Streckenverlauf der gefahrenen RDE-Route, Ries



Quelle: Eigene Abbildung, TNO

Die Länge der Strecke beträgt etwa 84 km, die Zeit die für die Strecke benötigt wird, ist u.a. vom Verkehrsaufkommen abhängig. Die kumulierten Höhenmeter belaufen sich auf ca. 770 m/ 100 km. Abbildung 53 zeigt beispielhaft den Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf einer RDE-Fahrt auf der Ries-Strecke.

Abbildung 53: Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf der RDE-Route, Ries



Quelle: Eigene Abbildung, TNO

A.3.1 Fahrzeug 1

Fahrzeugdaten

Als erstes Fahrzeug wurde ein BMW 218 d mit EURO 6d Temp Dieselmotor vermessen. Tabelle 17 fasst die Fahrzeugdaten dieses Fahrzeuges zusammen.

Tabelle 17: Fahrzeugdaten Fahrzeug 1

Fahrzeugdaten BMW 218d	
Zulassungsjahr	2018
Klasse/Fahrzeugart	M1/Personenkraftwagen
DIN Leermasse	1591 kg
Techn. Zul. GGW	2170 kg
km-Stand	21000 km
Getriebe	6-Gang Schaltgetriebe, manuell
Antriebsart	Diesel, Frontantrieb
Nennleistung	110 kW
Nenndrehzahl	4000 U/min
Emissionsklasse	EURO 6d Temp
Reifen-Dimension	205/55 R17

Rollenmessungen Fahrzeug 1

Tabelle 18 zeigt die Zusammenfassung der PKW-Rollenzyklen für das Fahrzeug 1.

Tabelle 18: Gemessene Zyklen auf der PKW-Rolle Fahrzeug 1

Zyklusname	Startb.	Bemerkung	Zeit [s]	Temp. [°C]
WLTC	Kalt	Mit Start Stop	1800	23
ERMES V8	Kalt	Ohne Start Stop	1110	23
ERMES V9	Warm	Ohne Start Stop	1193	23
WLTC	Warm	Mit Start Stop	1800	23
ERMES V8	Kalt	Ohne Start Stop	1110	23
RWC	Warm	Ohne Start Stop	1863	23
RWC Hochlast	Warm	Ohne Start Stop,+ 1000 kg, doppelte FWS	1863	23
WLTC	Warm	Mit Start Stop	1800	23
IUFC + Stop & Go	Kalt	Ohne Start Stop	4288	+23
IUFC + Stop & Go	Kalt	Ohne Start Stop	4288	-20
IUFC + Stop & Go	Kalt	Ohne Start Stop	4288	-10

Ermittlung der Fahrwiderstände für die PKW-Rollenmessungen

Die Fahrwiderstände von Fahrzeug 1 sind in Tabelle 19 gezeigt. Die Ermittlung der Fahrwiderstände dieses Fahrzeugs wurde mittels Ausrollversuch durchgeführt.

Tabelle 19: Fahrwiderstandsbeiwerte Fahrzeug 1

Größe	Ausroller	WLTC
Bezugsmasse [kg]	1666	1739
R ₀ [N]	169,65	177,08
R ₁ [Ns/m]	0,06	0,06
R ₂ [Ns ² /m ²]	0,436	0,436

Ergebnisse Rollenmessungen Fahrzeug 1

Die Auswertung der Rollenmessungen wurde mit der CVS-Anlage am Prüfstand gemacht. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Tabelle 20: CVS-Auswertung der PKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1

Zyklusname	Start- bedg.	T [°C]	Dauer [s]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [mg/km]	Verbr. [l/100]	PN [# /km]
WLTC	Kalt	23	1800	131,00	0,06	0,05	22,00	4,99	3,64E+07
ERMES V8	Kalt	23	1110	129,43	0,08	0,05	64,58	4,93	6,14E+07
ERMES V9	Warm	23	1193	160,90	0,06	0,03	26,90	6,12	4,66E+08
WLTC	Warm	23	1800	127,03	0,06	0,03	35,09	4,84	5,73E+08
ERMES V8	Kalt	23	1110	141,84	0,10	0,04	47,84	5,40	1,28E+10
RWC	Warm	23	1863	128,71	0,10	0,04	41,57	4,90	1,10E+10
RWC Hochlast	Warm	23	1863	238,21	0,21	0,06	236,07	9,08	4,30E+11
WLTC	Warm	23	1800	128,32	0,11	0,03	74,76	4,89	1,54E+09
IUFC + Stop & Go	Kalt	23	4288	213,520	0,148	0,025	324,54	8,129	1,57E+11
IUFC + Stop & Go	Kalt	-20	4288	356,03	0,47	0,05	654,25	13,57	1,41E+11
IUFC + Stop & Go	Kalt	-10	4288	302,98	0,26	0,04	483,57	11,54	4,89E+10

Das gemessenen CO₂ im WLTC Kalt liegt bei ca. 131 g/km und somit etwa 9% höher, als das im Zulassungsschein angegeben CO₂ für den WLTC. Die gemessenen NO_x-Emissionen am PKW-Rollenprüfstand liegen im Typprüfzyklus (WLTC Kalt) bei etwa 22 mg/km und somit unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 80 mg/km für ein Dieselfahrzeug der Emissionsklasse EURO 6d Temp. Auffällig ist der stark höhere Verbrauch im IUFC+Stop&Go bei den niederen Temperaturen. Der Unterschied resultiert aus Heizstrategien zur SCR-Temperaturerhöhung aber auch aus dem Umstand, dass die Start/Stop Funktion bei den Niedertemperaturtests nicht aktiv war. Offensichtlich benötigt das Fahrzeug bei diesen Temperaturen ständigen Motorlauf für das Temperaturmanagement.

In den am Rollenprüfstand gemessenen Real World Cycles liegen die Stickoxid-Emissionen im erst vermessenen RWC, der mit den WLTC-Einstellungen für Fahrzeugmasse und Fahrwiderstände vermessen wurde, bei ca. 42 mg/km. Das CO₂ für den RWC mit WLTC-Settings beträgt 129 g/km und ist somit fast ident mit dem CO₂ gemessen im WLTC Kalt.

Beim zweiten vermessenen RWC, bei dem die Fahrzeugmasse um 1000 kg erhöht wurde und die Fahrwiderstandsbeiwerte R₀ und R₂ (Basis WLTC) verdoppelt wurden, beträgt das gemessene NO_x etwa 236 mg/km und das gemessenen CO₂ liegt bei ca. 238 g/km. Die veränderten Fahrzeug-Settings bewirken somit fast eine Verdoppelung der CO₂-Emissionen und etwa 5,7-mal so hohe NO_x für denselben Fahrzyklus am PKW-Rollenprüfstand. CO und PN liegen in beiden RWCs unterhalb des für den WTLC geltenden Grenzwertes und auch hier zeigt sich die deutliche Erhöhung der Messwerte für den mit simulierter hoher Beladung und Anhänger vermessenen

RWC im Vergleich zum RWC Test mit normaler Beladung. Die hohen Abgasvolumenströme und Temperaturen führen speziell bei NO_x und Partikeln zu merklich reduzierter Effizienz der Abgasnachbehandlung. Bei SCR Systemen oxidiert NH₃ bei hohen Temperaturen auch direkt mit Sauerstoff und steht so nicht mehr zur NO_x Reduktion zur Verfügung, im NO_x-Speicherkat ist unzureichend NO₂ verfügbar (NO/NO₂ Gleichgewicht geht mit steigender Temperatur zu NO) und das Bariumnitrat wird instabil so dass weniger NO_x gespeichert werden kann. Zudem erfordert die Regeneration des NO_x-Speicherkat ein kurzes Anfetten des Abgases, was bei den hohen Leistungen problematisch ist. Im DPF führen die hohen Temperaturen und NO_x-Emissionen zu passivem Rußabbrand. Durch eine geringere Rußschicht sinkt die Abscheidrate im Filter.

Der Maximalwert der NO_x-Emissionen wurde beim IUFK Kalt, der bei einer Umgebungstemperatur von -20°C vermessen wurde, mit ca. 654 mg/km gemessen und liegt somit im Vergleich zum WLTC Kalt fast 9-mal so hoch. Bei diesen Temperaturen dürfte das AGR zur Vermeidung von Kondensation kaum aktiviert sein und die Abgasnachbehandlung braucht trotz aktiver Heizmaßnahmen des Motors deutlich länger um auf Betriebstemperatur zu kommen als bei einem Start bei 20°C.

Die gemessenen Partikel am Rollenprüfstand von Fahrzeug 1 liegen für alle vermessenen Fahrzyklen unterhalb des für den WLTC geltenden Grenzwertes von 6E+11 #/km. Die meisten Partikel wurden beim Hochlast-RWC mit 4.30E+11 #/km gemessen.

Der WLTC-Grenzwert für die CO-Emissionen eines EURO 6d Temp Fahrzeugs liegt bei 500 mg/km und wird somit für alle Fahrzyklen eingehalten. Das Maximum von ca. 470 mg/km CO wurde im Hochlast-RWC erreicht.

RDE Messungen Fahrzeug 1

Die RDE-Messungen mit dem Fahrzeug 1 wurden unter den in Tabelle 21 gezeigten Randbedingungen durchgeführt.

Tabelle 21: Randbedingungen RDE-Fahrten Fahrzeug 1

Zyklus-name	Start-bedingung	Bemerkung	Fahrzeug-masse [kg]	Fahrstil	Dauer [min]	Strecke [km]	T [°C]
Ries 01	Kalt	Radio + Licht + Klima 22°C ein	1905	Eco	97	84	13
Ries 02	Kalt	Radio + Licht + Klima 22°C ein	1905	Agg	94	85	10
Ries 03	Intermed.	Radio + Licht + Klima 22°C ein	1905	Normal	105	84	8

In Tabelle 22 sind die gemessenen Emissionen je RDE-Messfahrt gezeigt. Im Mittel liegt das gemessenen CO₂ bei ca. 111 g/km und somit niedriger als im kalt vermessenen WLTC auf der PKW-Rolle.

Die gemessenen NO_x-Emissionen bei den RDE-Messungen liegen im Mittel bei ca. 48 mg/km und somit unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 120 mg/km (WLTC Grenzwert Diesel EURO 6d Temp mal 1,5).

Auch die gemessenen CO- und PN-Emissionen liegen unauffällig hoch für die RDE-Messungen mit Fahrzeug 1.

Tabelle 22: Messergebnisse Fzg. 1 gesamte RDE-Fahrt

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	103,4	129,7	99,2
CO	[g/km]	0,06	0,03	0,03
NO _x	[mg/km]	33,55	78,73	32,03
Verbrauch	[l/100km]	3,94	4,93	3,77
PN	[#/km]	1,92E+09	4,77E+09	2,22E+09

In den nachfolgenden Tabellen sind die gemessenen Emissionen der RDE-Fahrten je Straßenkategorie zusammengefasst.

Tabelle 23: Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Stadt Fzg. 1

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	120,33	148,92	115,69
CO	[g/km]	0,08	0,05	0,03
NO _x	[mg/km]	69,05	143,02	68,85
Verbrauch	[l/100km]	4,58	5,66	4,40
PN	[#/km]	3,37E+09	5,88E+09	3,56E+09
Streckenanteil	[%]	34	34	42

Tabelle 24: Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Überland Fzg. 1

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	75,62	107,37	76,53,
CO	[g/km]	0,01	0,02	0,00
NO _x	[mg/km]	25,41	62,13	10,62
Verbrauch	[l/100km]	2,88	4,08	2,91
PN	[#/km]	1,20E+09	2,83E+09	1,22E+09
Streckenanteil	[%]	30	32	22

Tabelle 25: Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Autobahn Fzg. 1

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	110,65	131,26	93,96
CO	[g/km]	0,08	0,,01	0,03
NO _x	[mg/km]	7,68	29,29	2,32
Verbrauch	[l/100km]	4,21	4,99	3,57
PN	[#/km]	1,20E+09	4,49E+09	1,26E+09

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
Streckenanteil	[%]	37	34	36

A.3.2 Fahrzeug 2

Fahrzeugdaten

Als zweites Fahrzeug wurde ein Mild-Hybrid-Fahrzeug mit Benzinmotor der Emissionsklasse EURO 6d Temp vermessen.

Tabelle 26 zeigt die Zusammenfassung der Fahrzeugdaten des VW Golfs.

Tabelle 26: Fahrzeugdaten Fahrzeug 2

Fahrzeugdaten VW Golf	
Zulassungsjahr	2020
Klasse/Fahrzeugart	M1/Personenkraftwagen
DIN Leermasse	1305 kg
Techn. Zul. GGW	1880 kg
km-Stand	7300 km
Getriebe	6-Gang Automatik
Start - Stop	ja
Antriebsart	Benzin Frontantrieb
Nennleistung	110 kW
Nenndrehzahl	5000 U/min
Emissionsklasse	EURO 6d Temp
Reifen-Dimension	245/45 R17

Rollenmessungen Fahrzeug 2

Die Rollenmessungen für das Fahrzeug 2 sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Gemessene Zyklen auf der PKW-Rolle Fahrzeug 2

Zyklusname	Startb.	Bemerkung	Zeit [s]	Temp. [°C]
WLTC	Warm	Ohne Start-Stop	1800	23
WLTC	Kalt	Ohne Start-Stop	1800	23
ERMES V8	Warm	Ohne Start-Stop	1110	23
ERMES V9	Warm	Ohne Start-Stop	1193	23
ERMES V8	Kalt	Ohne Start-Stop	1110	5
RWC	Warm	Ohne Start-Stop	1863	5
RWC-Hochlast	Warm	Ohne Start-Stop, + 1000 kg, doppelte FWS	1863	5

Zyklusname	Startb.	Bemerkung	Zeit [s]	Temp. [°C]
WLTC	Warm	Ohne Start-Stop	1800	5
IUFC + Stop & Go	Kalt	Ohne Start-Stop	4288	23
IUFC + Stop & Go	Kalt	Ohne Start-Stop	4288	-15
ERMES V8	Kalt	Ohne Start-Stop	1110	23
ERMES V9	Warm	Ohne Start-Stop	1193	23

Ermittlung der Fahrwiderstände für die PKW-Rollenmessungen

Tabelle 28 zeigt die Fahrwiderstände, die für das Fahrzeug 2, die für die Rollenmessungen verwendet wurden. Ermittelt wurden diese über das Reifenlabel des Fahrzeugs.

Tabelle 28: Fahrwiderstandsbeiwerte aus Reifenlabel

Standardmethode Reifenlabel	
Größe	WLTC
Bezugsmasse [kg]	1457
R ₀ [N]	115,75
R ₁ [Ns/m]	0,86
R ₂ [Ns ² /m ²]	0,3713

Ergebnisse Rollenmessungen Fahrzeug 2

Nachfolgend wird die Auswertung der Rollenmessungen mit der CVS Anlage (Tabelle 29) gezeigt.

Tabelle 29: CVS-Auswertung der PKW-Rollenmessungen Fzg.2

Zyklusname	Startbedg.	Isttemp. [°C]	Dauer [s]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [mg/km]	Verbr. [l/100]	PN [# /km]
WLTC	Warm	23	1800	121,62	0,04	0,03	13,96	5,22	2,96E+10
WLTC	Kalt	23	1800	129,46	0,07	0,02	12,41	5,56	8,11E+10
ERMES V8	Warm	23	1101	118,06	0,10	0,00	3,35	5,07	8,26E+10
ERMES V9	Warm	23	1193	128,12	0,15	0,00	5,03	5,51	8,64E+10
ERMES V8	Kalt	5	1110	129,44	0,04	0,00	1,97	5,56	4,20E+10
RWC	Warm	5	1863	119,19	0,01	0,00	7,11	5,11	7,40E+10
RWC-Hochlast	Warm	5	1863	198,40	0,29	0,01	6,28	8,53	6,72E+12
WLTC	Warm	5	1800	122,42	0,05	0,02	15,14	5,26	5,73E+10
IUFC+Stop & Go	Kalt	23	4288	257,739	0,068	0,027	31,98	11,07	1,38E+11
IUFC+Stop & Go	Kalt	-15	4288	325,12	1,08	0,26	59,88	14,05	1,01E+11
ERMES V8	Kalt	23	1110	120,66	0,11	0,00	0,21	5,18	1,46E+09
ERMES V9	Warm	23	1193	130,15	0,16	0,00	0,08	5,59	9,66E+10

Das gemessene CO₂ im WLTC kalt liegt bei ca. 122 g/km für das Fahrzeug 2. Laut Hersteller beträgt das gemessene CO₂ 135 g/km. Die NO_x-Emissionen im WLTC kalt liegen bei etwa 14 mg/km und somit unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 60 mg/km für ein Benzinfahrzeug der Emissionsklasse EURO 6d Temp. Auch die Partikelanzahl im WLTC Kalt mit 2.96E+10 #/km liegt unauffällig. Der PN-Grenzwert für das Fahrzeug 2 ist 6E+11 #/km im WLTC kalt.

Für alle vermessenen Fahrzyklen wird der für den WLTC geltende NO_x-Grenzwert eingehalten. Die maximalen Stickoxide ergeben sich für den IUFC Kalt, der bei einer Umgebungstemperatur von -15°C auf der PKW-Rolle gemessen wurde, mit fast 60 mg/km. Bei 23°C Umgebungstemperatur sind die Emissionen deutlich geringer. Wie auch bei Fahrzeug 1 wurde die Start/Stop Funktion bei dem -15°C Test über den gesamten Zyklus nie aktiviert, was auch den deutlich höheren Kraftstoffverbrauch – neben der zusätzlichen Heizenergie für die Abgasnachbehandlung nach Kaltstart - mit verursacht.

Die höchste Partikelanzahl wurde im zweit vermessenem RWC (plus 1000 kg Fahrzeugmasse und doppelte Fahrwiderstände ausgehend von den WLTC-Settings) mit 6.72E+12 #/km. Bei dem Hochlasttest dürfte wegen der hohen Abgastemperaturen über die ganze Testdauer kaum nennenswerte Rußbelastung des Filters vorhanden gewesen sein. Zusammen mit höheren Rohemissionen ergibt sich die signifikant höhere PN Emission.

Die CO-Emissionen auf der Rolle liegen im Mittel bei ca. 190 mg/km und auch hier liegt das Maximum im Hochlast RWC mit etwa 1100 mg/km. Der CO-Grenzwert für den WLTC liegt bei 1000 mg/km für ein EURO 6d Temp Benzinfahrzeug.

RDE Messungen Fahrzeug 2

Es wurden 3 RDE-Fahrten mit Fahrzeug 2 durchgeführt. Die Randbedingungen der Messfahrten sind in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Randbedingungen RDE-Fahrten Fahrzeug 1

Zyklus-name	Startbedg.	Bemerkung	Fahrzeug-masse [kg]	Fahrstil	Dauer [min]	Strecke [km]	T [°C]
Ries 01	Kalt	Radio + Licht + Klima 22°C ein	1499	Eco	94,9	98,1	16
Ries 02	Intermed.	Radio + Licht + Klima 22°C ein, plus 100 kg Beladung	1599	Normal	100,4	99,4	21
Ries 03	Kalt	Radio + Licht + Klima 22°C ein, plus 170 kg	1669	Agg	105	104,1	9

Tabelle 31 zeigt die gemessenen Emissionen auf der Straße für die jeweils gesamte RDE-Route.

Tabelle 31: Messergebnisse Fzg. 1 gesamte RDE-Fahrt

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	138,65	130,65	157,00
CO	[g/km]	0,04	0,03	0,10
NO _x	[mg/km]	10,47	7,92	12,31
Verbrauch	[l/100km]	5,95	5,61	6,74

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
PN	[#/km]	5,88E+10	6,27E+10	1,21E+11

Das gemessenen CO₂ auf der Straße liegt im Mittel bei etwa 142 g/km. Das real gemessenen NO_x weist einen Mittelwert von ca. 10 mg/km auf. Der NO_x RDE-Grenzwert für Fahrzeug 2 liegt bei 90 mg/km und wird somit für alle 3 RDE-Fahrten eingehalten.

Die RDE-Messung „Ries 03“, bei der aggressives Fahren die Vorgabe an den Fahrer war, hat die höchst gemessenen Emissionen (CO₂, NO_x und PN).

Der RDE-Grenzwert für die Partikelanzahl, der bei 9E+11 #/km für das Fahrzeug 2 liegt, kann ebenfalls bei allen drei gemessenen Realfahrten eingehalten werden.

Nachfolgende Tabellen zeigen noch die Auswertungen der Emissionen je Straßenkategorie für das Fahrzeug 2.

Tabelle 32: Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Stadt Fzg. 1

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	185,51	181,19	207,66
CO	[g/km]	0,04	0,02	0,03
NO _x	[mg/km]	19,97	15,41	28,37
Verbrauch	[l/100km]	7,96	7,77	8,91
PN	[#/km]	4,99E+10	6,81E+10	1,66E+11
Streckenanteil	[%]	33	32	33

Tabelle 33: Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Überland Fzg. 1

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	94,85	85,13	110,93,
CO	[g/km]	0,01	0,01	0,04
NO _x	[mg/km]	5,65	4,25	5,20
Verbrauch	[l/100km]	4,07	3,65	4,76
PN	[#/km]	4,33E+10	4,47E+10	5,70E+10
Streckenanteil	[%]	34	33	34

Tabelle 34: Auswertung RDE-Messdaten für die Kategorie Autobahn Fzg. 1

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO ₂	[g/km]	137,19	125,99	155,61
CO	[g/km]	0,06	0,07	0,19
NO _x	[mg/km]	6,12	4,18	4,38
Verbrauch	[l/100km]	5,89	5,41	6,69
PN	[#/km]	8,30E+10	7,51E+10	1,41E+11

Messgröße	Einheit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
Streckenanteil	[%]	34	34	34

A.4 Messprogramm schwere Nutzfahrzeuge

Wie zu Beginn beschrieben, wurde in diesem Projekt ein Nutzfahrzeug gemessen. Messfahrzeug, der Prüfstand, die Tests und die Ergebnisse sind nachfolgend in Englisch beschrieben.

A.4.1 Vehicle and installation

The Mercedes-Benz truck as shown in Figure 2 is used during this test series. It is equipped with EGR, SCR and DPF technology.

Table 1: Vehicle information Mercedes-Benz Actros

Vehicle information Mercedes-Benz Actros		
Make	:	Mercedes-Benz
Type	:	Actros 1845
Registration	:	45-BNS-7
Engine type	:	OM 471 LA - 6 cylinder in-line
Emission level	:	EURO 6 – step D
Engine capacity	:	12809 cm ³
Power	:	330 kW @ 1600 rpm
Torque	:	2200 Nm @ 1100 rpm

Figure 2: Mercedes-Benz in the Climatic Altitude Chamber.



Source: Picture by TNO

The transmission of the vehicle is fixed in manual mode 9th gear during the tests in order stay below the maximum dyno torque of 14000 Nm.

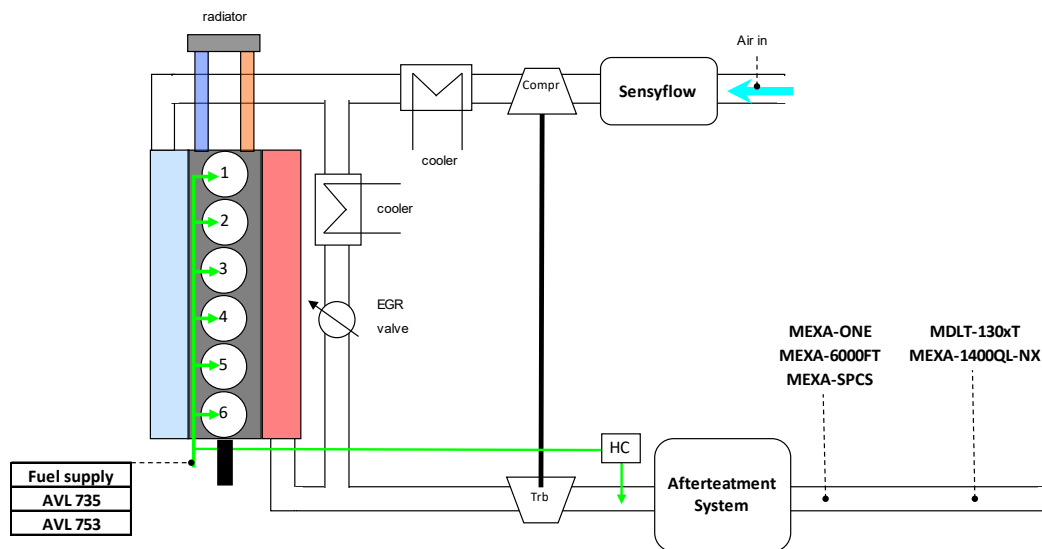
The complete vehicle was mounted in the laboratory on the test bed, instrumented with flow and emission measurement equipment. Several cycles have been run in different temperature conditions with cold and hot WHTC (**W**orld **H**armonized **T**ransient **C**ycle) starts. A recorded ISC (**I**n **S**ervice **C**onformity) test was performed with varying temperature and altitude conditions. The vehicle was instrumented with the measurement equipment listed in Table 2.

Table 2: Measurement equipment

Type	TUI number	Component
AVL 735	33090103	Fuel mass flow
AVL 753	33090103	Fuel temperature conditioning
Sensyflow P NW-200	41121480	Air mass flow
MEXA-ONE	41132131	CO, CO ₂ , THC, CH ₄ , NO, NO _x , O ₂
MDLT-130xT	94006037	PM
MEXA-6000FT	41132134	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , N ₂ O, H ₂ O, NH ₃ , HCHO, HCOOH, CH ₄ , C ₂ H ₆
MEXA-1400QL-NX	41130535	NH ₃ and N ₂ O
MEXA-2300SPCS	41131145	PN (minimum particle size 23 nm)
MEXA-2300SPCS	N/A (Horiba)	PN (minimum particle size 10 nm)

The air mass flow is measured upstream of the air filter. Only the fresh air flow going into the engine is of interest. Therefore the inlet of the vehicle air compressor is disconnected from the engine air filter to prevent it being added to the engine air flow measurement. The connection on the air filter is blocked and a separate filter is mounted onto the air compressor. The original fuel lines are disconnected from the fuel tank and connected to the test cell fuel supply system to measure the fuel mass flow. All emissions are measured raw in the tailpipe, located downstream of the aftertreatment system as shown in the diagram in Figure 3.

Figure 3: Measurement location diagram



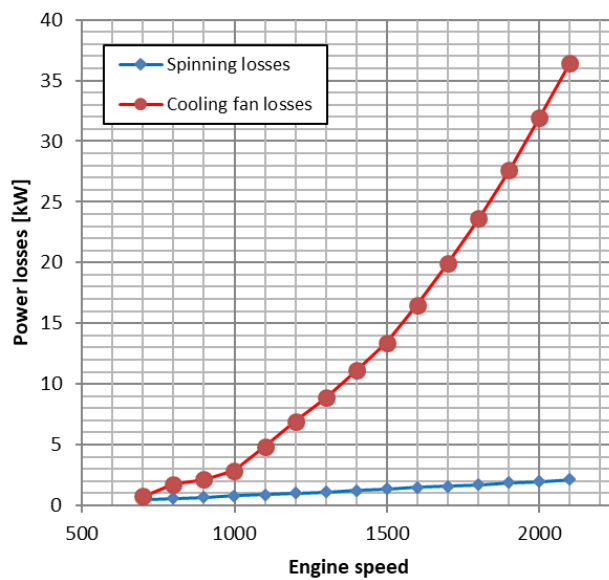
Source: Figure by TNO

All performed cycles consist of a trace with engine speed and torque setpoints. Since the tests have been carried out on a full-scale vehicle level (i.e., the test dyno is coupled to the drive axle of the vehicle and not to the engine crank shaft), the torque measured on the dyno needs to be corrected with the drivetrain losses to calculate the flywheel torque. To do this, the losses in drivetrain and the losses adsorbed by the cooling fan are taken into account, and added to the torque as measured by the dynamometers.

The drivetrain losses are divided into: spinning losses and drivetrain efficiency losses.

- ▶ Drivetrain efficiency losses: The drivetrain efficiency losses are divided into gear-box and differential gear losses. Based on literature, an efficiency of 0.985 [-] for the differential and 0.975 [-] for the gearbox were assumed.
- ▶ Drivetrain spinning losses: The drivetrain spinning losses are determined by motoring the vehicle with the gearbox in the same gear as used in the tests and the clutch disengaged, at different dyno speeds. The resulting power loss curve is shown in Figure 4.
- ▶ Fan losses: To measure the power adsorbed by the cooling fan the engine was motored by the dynos, and turning the fan on and off alternatively at different engine speeds. The difference between the motoring powers is the power consumed by the cooling fan. After this procedure, the fan coupling was closed and the fan was operating at engine speed. The measured fan power as function of engine speed is shown in Figure 4.

Figure 4: Cooling fan and spinning losses.



Source: Figure by TNO

Both the power adsorbed by the cooling fan and the drivetrain (spinning and efficiency) are added to the measured value by a calculation.

Wheel speed, corresponding with dyno speed, is used to calculate the engine speed by use of the provided gear and differential ratio.

A wind speed generator is placed in front of the vehicle with a maximum flow of 100.000 m³/h. With the used nozzle this results in a maximum flow corresponding with a vehicle speed of 70 km/h.

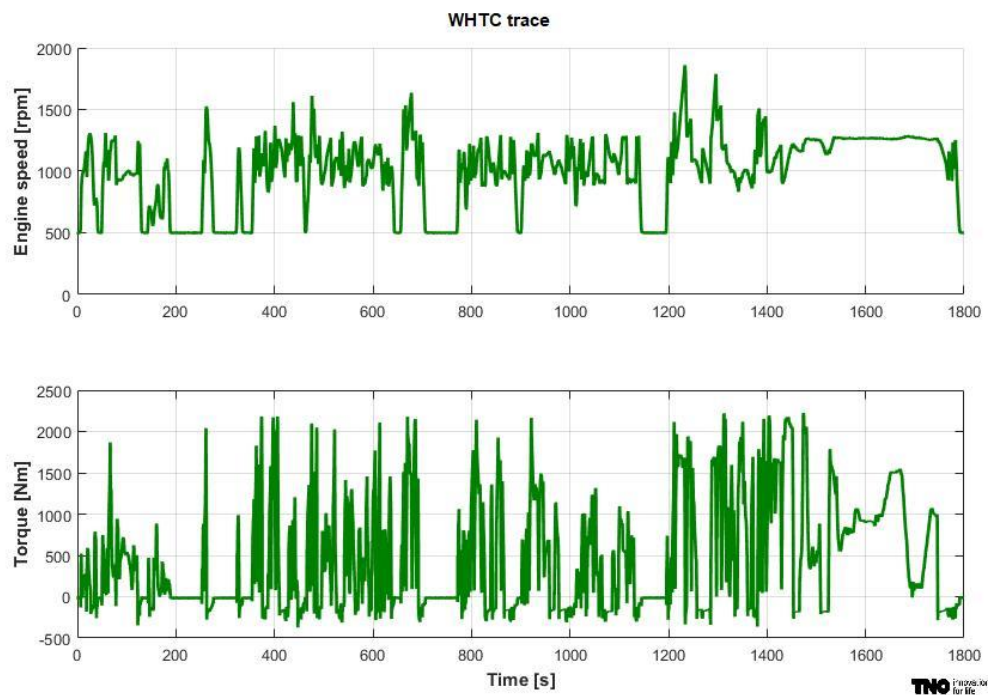
A.4.2 Test program

Test cycles

WHTC

Results from a steady state full load run are used to normalize the WHTC cycle, shown in Figure 5. The WHTC cycles have been performed after an overnight soak with the test cell conditioned at the desired test temperature. The cold WHTC was started in the morning. The cold WHTC is followed by a soak of 10 ± 1 minutes after which the hot WHTC is started. During the cycle the wind speed simulator was set on a fixed speed of 50 km/h. On request of TNO-STL the hot WHTC was followed by 15 minutes of idle, which are not included in the average cycle result. All 1Hz data was made available.

Figure 5: WHTC trace

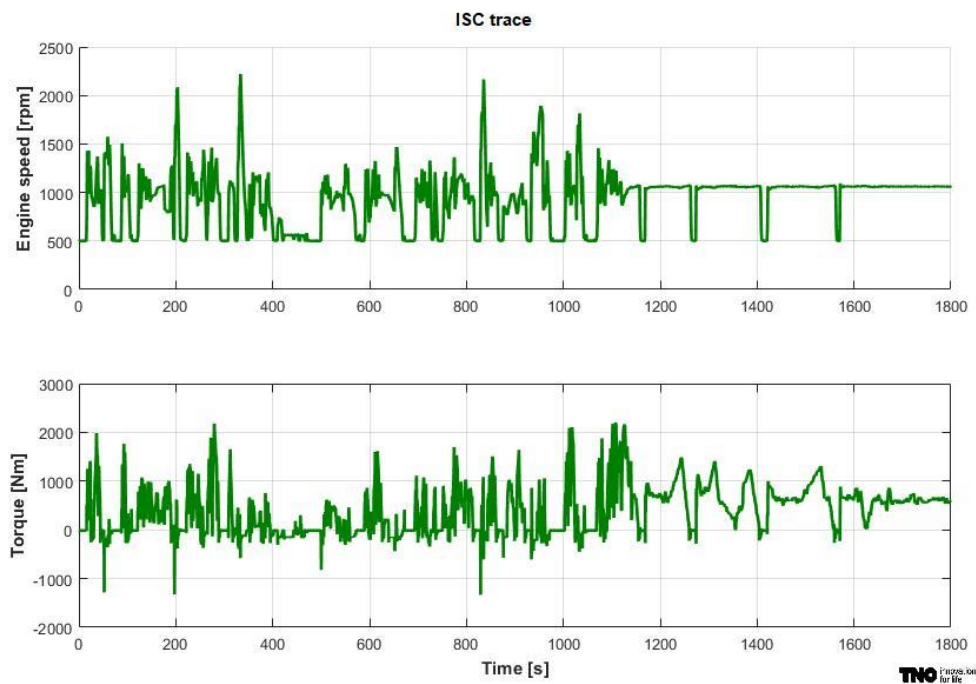


In Service Conformity test

An OBD recorded trace from a truck trip on the road was provided to represent the ISC test. See Annex 0. This trace has been converted to run on the test bed. The trace is shown in Figure 6. Vehicle speed was taken from the trace and used as input for the wind speed simulator. The ISC tests are performed with a warm engine after 15 minutes of idle as pre-conditioning. The ISC is 1800 s long and is followed by 15 minutes of idle to observe possible differences in emissions at idle related to NH_3 storage phenomena in the SCR catalyst, and also to obtain a stable catalyst status for the start of the following test. The idle results after the ICS are included in the emission traces (Annex 0) but not in the average cycle results (tables in Section A.4.3 and Annex 0).

The ISC test is done at 4 different ambient temperatures and 3 varying altitude levels. It was observed that tailpipe temperatures at the start, after the 15 minutes of idle preconditioning, are somewhat different for the individual tests. See Table 3. The tailpipe temperature is about 30°C higher, which is probably mostly caused by the higher load of the preceding WHTC. Also, the differences in altitude may have an effect on this temperature. Table 3 and Annex 0 show the tailpipe temperatures at the start of ISC cycles at sea-level, 1200 meter and 2000 meter altitude.

Figure 6: ISC trace



An example of the tail pipe temperature at 25°C and different altitudes is presented in the table below. Full details of engine and ambient temperatures is available via the csv files. Ambient temperatures and pressures are also shown in Annex 0.

Table 3: Tailpipe temperatures at ISC 25°C test start.

Test number		L781_015	L781_018	L781_019
Temperature	[°C]	25	25	25
Altitude	[m]	Sea-level	1200	2000
Tailpipe temperature at test start	[°C]	258	226	228

Test matrix

The test program is shown in Table 4. The WHTC test was always the first test of the day, because of the requirement to have a cold start for the first WHTC. During the remainder of the day, 15 minutes of idle was used as preconditioning for each ISC test. Each ISC test was also always extended by 15 minutes of idle, during which the emissions were also measured and recorded. The preconditioning of the cold WHTC was consequently also an ISC test followed by 15 min idle from the previous day.

Table 4: Overview test program.

Condition		Test cycle	Test number	Test date
25°C	Sea-level	Cold WHTC + soak + hot WHTC + 15 min idle	L781_017	28-09-2020
		Precon 15 min idle + ISC + 15 min idle	L781_015	25-09-2020
	1200m		L781_018	28-09-2020
	2000m		L781_019	28-09-2020
-14°C	Sea-level	Cold WHTC + soak + hot WHTC + 15 min idle	L781_022	29-09-2020
		Precon WHTC + soak + hot WHTC + 15 min idle	L781_025	29-09-2020
		Precon 15 min idle + ISC + 15 min idle	L781_020	28-09-2020
	1200m		L781_023	29-09-2020
	2000m		L781_024	29-09-2020
-7°C	Sea-level	Cold WHTC + soak + hot WHTC + 15 min idle	L781_026	30-09-2020
		Precon 15 min idle + ISC + 15 min idle	L781_029	30-09-2020
	1200m		L781_027	30-09-2020
	2000m		L781_028	30-09-2020
40°C	Sea-level	Cold WHTC + soak + hot WHTC + 15 min idle	L781_031	01-10-2020
		Precon 15 min idle + ISC + 15 min idle	L781_032	01-10-2020
	1200m	Arbeitspaket 2, Emissionsmessungen, Aspekt 1 & 13	L781_033	01-10-2020
	2000m		L781_034	01-10-2020

Measurement issues

During the tests there were some technical problems with the measuring equipment. This was mostly due to the extreme ambient conditions due to which the technical possibilities of the equipment are sometimes exceeded. Particularly the SPCS for the PN23 measurement, needed to be installed in the test cell due to lack of space in the temperature-controlled equipment room. This led to error messages and calibration problems during the tests at 40°C and also during -7° and -14°C at 2000m altitude. Consequently, these results are not reported in Section A.4.2.

A second problem occurred with the HNCO measurement with the FTIR. Due to an error in the data transfer, the HNCO signal was not stored in the data-file. This was not discovered until after the measurement program.

For a full overview of irregularities and special events, refer to Annex 0.

Special events

HC burn-off regeneration event was initiated by the engine control system during the tests at sea level and 40°C temperature. This concerned the cold and hot WHTC and the ISC test.

A.4.3 Test results

The detailed test results with the Mercedes Actros Euro 6 step D truck in the climate-altitude test cell are presented in Annex A.6 and D. In Annex A.6, the cycle results are presented in a table. Annex A.7 contains graphs with the emission traces during all tests (including the extension with 15 minutes idle, which is not included in the average cycle results in Annex A.6 and below). Annex A.8 contains finally the ambient temperature and pressure traces during the tests.

The most important emissions are summarised in the tables below, particularly NO_x, PM, PN, NH₃ and N₂O. The test cycles include:

- WHTC with cold and hot start
- ISC, In-Service Conformity trip run in the test cell.

The WHTC with hot start at -14°C was run twice, therefore two results are given in most of the tables.

The first table below shows that the NO_x emissions under nominal condition (sea level and 25°C) are far (75% or more) below the limit value for both the WHTC as well as for the ISC test. The limit value for cold+hot WHTC and ISC are respectively 0,46 and 0,69 g/kWh (CF x limit value=1.5x0,46). The ISC stays below the limit value under most of the altitude and temperature conditions. Only at -7°C, the limit value is exceeded by up to 17%. NO₂ emissions were measured separately. NO₂ emissions were very low for all tests, namely in a range from 4 to 31 mg/kWh (see table in Annex A.6). As share of NO_x, NO₂ ranges from 2% to 10%. It was always below 5% for the ISC tests.

Table 5: NO_x emissions in g/kWh during varying ambient temperatures and altitudes.

NO _x	g/kWh	Ambient temperature			
		-14	-7	25	40
Altitude	Test				
sea level	WHTC cold	0.529	0.554	0.301	0.557
	WHTC hot	0.202/0.180	0.152	0.032	0.297
	ISC	0.510	0.646	0.177	0.653
1200 m	ISC	0.565	0.720	0.157	0.578
2000 m	ISC	0.486	0.807	0.102	0.557

The particulate mass and number emissions are presented in the tables below.

The particulate mass, PM, emissions are well below the limit value of 10 mg/kWh for all tests except for the tests at sea level and 40°C. During these tests a ‘HC burn-off regeneration’ was initiated by the engine control system. This lead to temporarily high PM emissions during the three tests at sea level. During these regenerations, the mass emissions are 15-19 times higher than the limit value.

The Particle Number, PN, emissions are below the limit value of 6×10^{11} #/kWh (for the laboratory tests) for all test. For an ISC test on the road, a CF of 1.63 should be applied to the limit value of the laboratory test.

Unfortunately, there are no PN results available for the tests at 40°C, including the tests with the HC burn-off regeneration. The PN equipment, did not function properly under these conditions.

Table 6: PM (left) and PN (right) emissions during varying ambient temperatures and altitudes.

PM		Ambient temperature mg/kWh				Ambient temperature #/kWh			
		-14°	-7°	25°	40°	-14°	-7°	25°	40°
sea level	WHTC cold	3.4	1.9	3.0	149	x	2.61e11	1.23e10	x
	WHTC hot	2.4/2.8	2.2	2.8	146	1.40e10	1.45e10	1.68e10	x
	ISC	7.0	3.0	4.3	189	5.20e10	2.11e10	1.26e10	x
1200 m	ISC	3.4	2.3	x	2.6	1.59e10	1.46e10	2.54e10	x
2000 m	ISC	3.2	2.2	x	2.7	x	x	2.18e10	x

The NH₃ emissions are presented in the table below. The emissions are shown in both in ppm (left) and in mg/kWh (right). The ppm value is a simple average value during the test cycle (without taking into account the exhaust flow rate). The mg/kWh result is a formally weighted result where the exhaust flow rate during each second is taken into account. The limit value, 10 ppm, is expressed in ppm and should be compared with the ppm values. The table shows that the NH₃ emissions are very low and below the limit value during all tests. Some emissions are seen at low temperatures (-7° and -14°C) and during the WHTC cold at 40°C. In mg/kWh, the highest value measured was 19 mg/kWh during the hot WHTC test.

Table 7: NH₃ emissions in ppm (left) and in mg/kWh (right) emissions during varying ambient temperatures and altitudes.

NH ₃		Ambient temperature ppm				Ambient temperature mg/kWh			
		-14	-7	25	40	-14	-7	25	40
sea level	WHTC cold	0	2	0	2	1	13	0	6
	WHTC hot	1/3	2	0	0	8/19	11	1	0
	ISC	3	1	0	0	0	4	0	0
1200 m	ISC	1	1	0	0	6	6	0	0
2000 m	ISC	1	1	0	0	8	5	0	0

The N₂O emissions are shown in the table below. In comparison to the NO_x emissions, they are quite significant (10%-20% of the NO_x emission values). Apart from its polluting effect, N₂O is also a strong greenhouse gas with a global warming factor of about 300 in comparison to CO₂. If an additional GHG contribution of 1% due to N₂O would be allowed, the maximum N₂O

emissions would be about 20 mg/kWh. The values in the table are two to six times higher, which means a GHG increase of 2% to 6% due to the N₂O emissions. There is some influence of the ambient conditions on N₂O emissions, but not a lot. On average the values are somewhat higher at higher altitudes, but the highest value is seen with the ISC test at sea level and 25°C.

Table 8: N₂O emissions during varying ambient temperatures and altitudes.

N ₂ O Altitude	mg/kWh Test	Ambient temperature			
		-14	-7	25	40
sea level	WHTC cold	42	68	18	82
	WHTC hot	52/65	62	38	15
	ISC	48	68	121	56
1200 m	ISC	86	100	64	78
2000 m	ISC	98	102	101	104

Methane, CH₄ is also a greenhouse gas, with a global warming factor of about 25 compared to CO₂. The methane emissions are measured and also shown in Annex A.6. The average methane emissions during the tests varied from 2 to 22 mg/kWh. This leads to a GHG emission increase of less than 0.1%, which is almost negligible.

A.4.4 Conclusions

A MB Actros Euro 6 step D truck was tested at a wide range of climate test conditions in the TNO altitude powertrain test cell. The tests consisted of the WHTC and an In-Service Conformity test (ISC). The Actros truck was selected as one of the best in class vehicles based on earlier ISC tests on the road.

The tests lead to the following conclusions:

- ▶ In general, the emissions were low under the broad range of test conditions ranging from -14° to 40°C and from sea level to 2000 m altitude. Only the N₂O can be labelled as relatively high.
- ▶ Under all test conditions, the NO_x emissions of the WHTC tests were below the limit value of 0,46 g/kWh. The NO_x emissions during the ISC tests stayed below the limit value of 0.69 g/kWh under almost all altitude and temperature conditions. Only at -7°C, the limit value was exceeded by 17%.
- ▶ The NO₂ share of the NO_x emissions ranges from 2% to 10%. It was always below 5% for the ISC tests.
- ▶ The particulate mass, PM, emissions are well below the limit value of 10 mg/kWh for all tests except for the tests at sea level and 40°C, during which an ‘HC burn-off regeneration’ was initiated by the engine control system. This lead to temporarily high PM emissions, 15-19 times higher than the limit value.
- ▶ The PN emissions stayed below the limit value of 6x10¹¹ #/kWh for all tests, although no reliable numbers are available for the tests with the regenerations.

- ▶ The average NH₃ emissions were below the limit value of 10 ppm for all tests. Some significant NH₃ emissions were observed at -7° and one at -14°C. In mg/kWh, the highest value measured was 19 mg/kWh during the hot WHTC test at -14°C.
- ▶ The N₂O emissions were quite significant in general, ranging between 10%-20% of the NO_x emission values. These N₂O emissions lead to a GHG increase of 2% to 6%.

Methane, CH₄, emission were generally quite low, with a max average value of 22 mg/kWh. The contribution to the GHG emissions of the vehicle is less than 0.1%

A.4.5 Anhang

Verwendete Messtechnik

PKW Rollenprüfstand

Für die Messungen wurde der PKW und LNF-Rollenprüfstand der FVT an der TU Graz verwendet.

Dieser ist als Einachsiger-Prüfstand ausgeführt. Die Fahrwiderstände werden geschwindigkeitsabhängig von einer Asynchronmaschine aufgebracht. Die Regelung der Massenträgheit wird ebenfalls über die Asynchronmaschine.

Die Wartung der PKW-Rollen-Anlage erfolgt jährlich bzw. halbjährlich für bestimmte Komponente. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die durchgeführten Tätigkeiten aufgezählt.

- ▶ Alle 6 Monate werden Rollenkörper, Unterbau, Massensatz und Fahrzeugbefestigung gewartet.
- ▶ Jährlich werden Unterflurwagen, Gleichstrommaschine und Prüfstands Raum gewartet.
- ▶ Kraftmessdosen-Kalibrierung erfolgt jährlich.
- ▶ CVS-Anlagen-Wartung alle 6 Monate.
- ▶ Abgasmesseinrichtung (AMA i60 und Partikelanzahlmessung) werden jährlich gewartet.
- ▶ Wartung und Kontrolle der Haustechnik, Gaswarnanlagen etc. erfolgt ebenfalls jährlich.

Technische Daten des PKW und LNF Rollenprüfstands:

- ▶ Bremse: 200 kW Asynchronmotor
- ▶ Max. Geschw.: 200 km/h
- ▶ Temperaturbereich: -30°C bis +40°C
- ▶ Fahrzeugmasse: bis 3500 kg
- ▶ CVS Durchfluss: 6, 10 oder 20 m³/min
- ▶ Regelbare Luftfeuchte
- ▶ Geschwindigkeitsgeregelter Fahrtwind

Betriebsarten des Prüfstandes: Der Prüfstand kann im stationären und transienten Betrieb gefahren werden, wobei sowohl Brems- als auch Schleppbetrieb möglich ist.

Stationärbetrieb (Leistungsprüfstand): Die Regelung bei dieser Betriebsart erfolgt entweder bei konstanter Bremskraft oder bei konstanter Fahrgeschwindigkeit.

Transienter Betrieb: In dieser Betriebsart wird die Rollenbremskraft aus der aktuellen Geschwindigkeit und Beschleunigung des Kfz entsprechend der vorgegebenen Daten zu Fahrzeugmasse und Widerstandsbeiwerten geregelt. Typische Anwendung ist die Typprüfung und Messungen in Real World Zyklen für PKW. Es können beliebige Fahrzyklen und Steigungsprofile vorgegeben werden, die dem Fahrer vom Fahrleit-gerät über einen Bildschirm angezeigt werden.

Abgasanalyse: Die Messung der Emissionen erfolgt über eine Vollstrom-CVS-Anlage und Abgasanalysatoren der Firma AVL (AMA i60). Die Emissionen werden sowohl als Beutelwert als auch im zeitlichen Verlauf (max. 3 Hz) erfasst und ausgegeben. Das Partikelmesssystem erfüllt die PMP-Vorgaben (Verdünnungssystem mit Beheizung und Sekundärverdünnung mit CPC 3010 oder CPC 3040, bei Bedarf auch DMA 3081 zur Erfassung der PN Größenverteilung).

Zusätzlich werden mittels FTIR (IAG, VERSA06) nicht limitierte Abgaskomponenten vermessen und die Partikelanzahl bzw. die Partikelgrößenverteilung erfasst.

Die nicht limitierten Abgaskomponenten aus der FTIR Messung sind NO_x , NO, NO_2 , N_2O , NH_3 , CH_4 , Benzol, H₂CO, H_2O , Formaldehyde, CO_2 , CO, Propylen, Ethylen, Ethan, Acetylen, HNO_2 , MeOH, Ameisensäure, SO_2 , 1,3 Butadien, Acetaldehyde, COS, H_2SO_4 und SO_2 .

PEMS Portabel Emission Measurement System

Beim PKW System handelt es sich um eine AVL MOVE. Dieses System entspricht den Anforderungen der aktuell gültigen RDE Gesetzgebung und ermöglicht es CO_2 , CO, NO_2 , NO sowie die Partikelanzahl im realen Betrieb zu erfassen. Die Ermittlung des Abgasmassenstroms erfolgt mit einem Exhaust Gas Mass Flow Meter (EFM). Die Datenerfassung findet mit einem Systemeigenen Datenlogger statt. Neben den Emissionsdaten werden alle zyklusrelevanten Daten wie Geschwindigkeit, Temperatur, Luftdruck, Feuchte, GPS Position und ECU Daten mit aufgezeichnet.

Die Kalibrierung der Analysatoren erfolgt vor der Messung mittels einer sogenannten Zweipunkt-Kalibrierung. Dabei wird eine Routine bestehend aus Spülen der Messleitungen, Aufschalten des Nullgases (Stickstoff oder Umgebungsluft) und Beaufschlagung mit dem jeweiligen Messgas-Endwert je Analysator durchgeführt. Zwischen Null- und Endwert setzt man eine lineare Funktion des Analysators voraus, welche vom Hersteller nach Erreichen bestimmter Betriebsstunden oder bei manuellen Eingriffen ins System, überprüft wird. Ein Vergleich zwischen PEMS mit der CVS-Anlage der Rolle wird von uns intern anhand der Messung eines WLTC's mit installiertem PEMS am Rollenprüfstand in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Danach werden die Abweichungen der Messwerte beider Messsysteme verglichen und mit den laut Gesetzgebungen zulässigen Toleranzen verglichen.

Verwendete Auswertesoftware

Die Auswertung der RDE-Messdaten erfolgt mit dem sogenannten ERMES-Tool. Dieses rechnet aus den gemessenen Konzentrationen in Volumenprozent und dem gemessenen Massenstrom die Massenemissionen unter Berücksichtigung der Gas-laufzeit vom Motor bis hin zur Emissionsmessstelle. Die Ausgabe der Emissionen erfolgt modal sowie auch als Zyklusmittelwert in g/h bzw. g/km.

Methoden zur Ermittlung der Fahrwiderstände für PKW-Rollenmessung

Generische Fahrwiderstandswerte nach ERMES

Die ERMES Default-Methode wird herangezogen, wenn keine Daten eines Ausrollversuchs verfügbar sind sowie zur Umrechnung von Fahrwiderständen aus dem Ausrollversuch in Fahrwiderstände bei WLTC und NEDC Tests und bei Messungen mit unterschiedlicher Fahrzeugmasse. Der Rollwiderstand wird dabei aus dem Rollwiderstandsbeiwert (f_0) und der Radlast (Testmasse * g) berechnet, die geschwindigkeitsabhängige Komponente stellt im wesentlichen Lagerverluste dar und die zum Quadrat der Geschwindigkeit proportionale Komponente repräsentiert den Luftwiderstand.

$$F = R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 = f_0 * TM * g + f_1 * TM * g * v + \frac{1}{2} * \text{Luftdichte} * c_w * A$$

Damit kann der Einfluss der Testmasse auf R_0 und R_1 direkt berücksichtigt werden. Die Beiwerte (f_0, f_1, c_w) werden entweder aus der Messung oder aus einer Default-Wertedatenbank der FVT entnommen. Dabei wird berücksichtigt, dass Typprüfwerte im NEDC im Mittel deutlich niedriger sind als die realen Werte. Beim WLTC ist weniger Differenz zum realen Fahrwiderstand angenommen²³.

Für den Default-Rollwiderstandsbeiwert wird in der Methode der ERMES Gruppe für den NEDC der Reifenlabel „C“ und für den WLTC der Reifenlabel „B“ als Basis herangezogen (Tabelle 19). Die real-World-Zyklen CADC und ERMES werden ebenfalls mit den WLTC-Fahrwiderständen gemessen.

Nachfolgend ist beispielhaft die Berechnung der generischen Fahrwiderstände des LNF1 für den NEDC dargestellt:

Testmasse NEDC (TM): 1415 kg

$$R_0 = f_0 * TM * 9.81\text{m/s}^2 = 0.0081 * 1415 \text{ kg} * 9.81\text{m/s}^2 * 0.86 = 96.7 \text{ N}$$

$$R_1 = f_1 * TM * 9.81\text{m/s}^2 = 0.0000603\text{s/m} * 1415\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2 * 0.86 = 0.72 \text{ Ns/m}$$

$$R_2 = \frac{1}{2} * \text{Luftdichte} * c_d * A = \frac{1}{2} * 1.189\text{kg/m}^3 * 0.35 * 2.83\text{m}^2 = 0.5943 \text{ Ns}^2/\text{m}^2$$

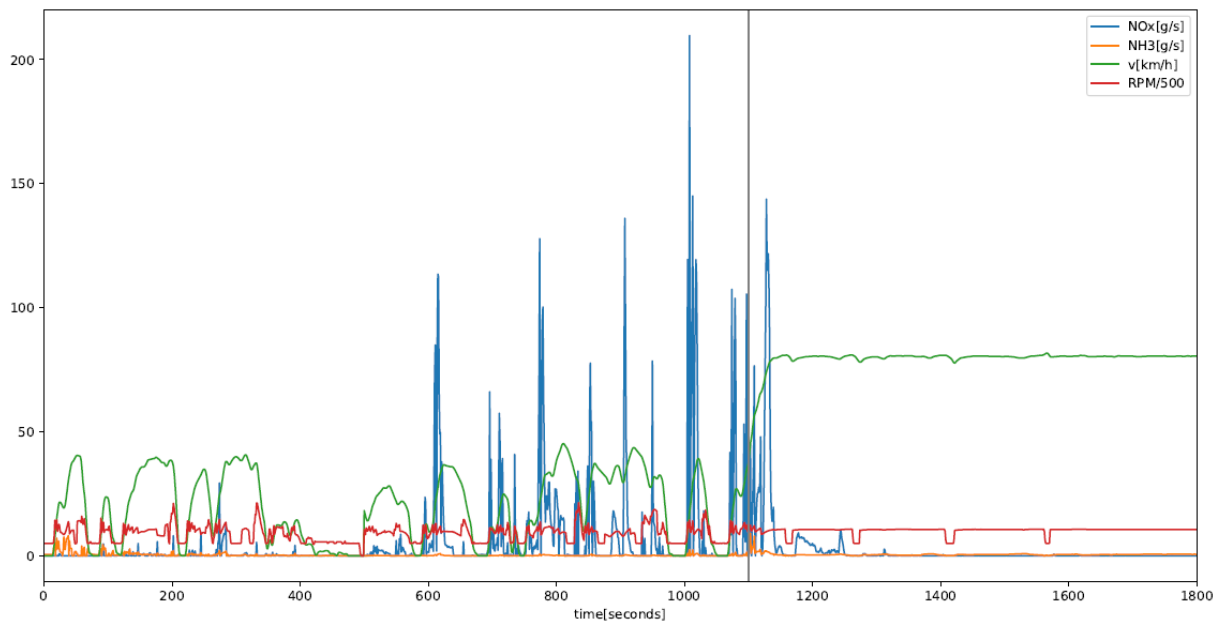
Für den WLTC, der bei diesem Kfz ja in der Typprüfung noch nicht vorgeschrieben war, wurde neben Label B auch die WLTC-Testmasse²⁴ eingesetzt. Um – bei eventuellem Bedarf - eine bessere Vergleichbarkeit von NEDC und WLTC zu erzeugen, schlagen wir für weitere Messungen vor, beide Zyklen mit demselben Reifenlabel-Rollwiderstandsbeiwert zu bedaten.

²³ Im realen Betrieb haben Kfz teilweise zu niedrigeren Luftdruck, Dachaufbauten etc. und es herrscht auch Seitenwind, der den Luftwiderstand erhöht. Die entsprechenden Faktoren werden im Bericht zum HBEFA 4.1 publiziert werden.

²⁴ WLTC-Testmasse=DIN Masse + 100 kg + 0.28 * (Höchstz. GGW – DIN Masse * 1.1 -100 kg)

In Service Conformity cycle

Figure 7: Recording of ISC cycle on the road



Issues and special events

During the tests several special events occurred.

- ▶ ISC 25°C 1200 & 2000 meter altitude (L781_018 & L781_019)
- ▶ PM filter face velocity became too high because of the changing test conditions at altitude. Although not according to legal limits, technically the measurement results are still plausible. This even has been discussed with STL, it was decided that no retesting was necessary.
- ▶ cold WHTC + soak + hot WHTC -14°C Sea-level (L781_022)
- ▶ MEXA-2300SPCS in error as a result of the cold conditions. SPCS data cannot be used.
- ▶ ISC -14°C 2000 meter altitude (L781_024)
- ▶ MEXA-2300SPCS in error as a result of the pressure in the test cell. SPCS data cannot be used.
- ▶ Precon WHTC + soak + hot WHTC -14°C Sea-level (L781_025)
- ▶ Temperature problems with the MEXA-2300SPCS were solved. It was not possible to retest the cold start WHTC, therefore a preconditioning of a WHTC + soak has been performed followed by a hot WHTC.
- ▶ ISC -7°C 2000 meter altitude (L781_028)
- ▶ MEXA-2300SPCS in error as a result of the pressure in the test cell. SPCS data cannot be used.
- ▶ cold WHTC + soak + hot WHTC 40°C Sea-level (L781_031)
- ▶ HC-burn off was automatically activated at engine start and remained active over the test.

- ▶ MEXA-2300SPCS in error due to the temperature in the test cell, disabling the daily system checks and calibration procedures. SPCS data cannot be used.
- ▶ ISC 40°C Sea-level (L781_032)
- ▶ HC-burn off was active over the test.
- ▶ MEXA-2300SPCS in error due to the temperature in the test cell, disabling the daily system checks and calibration procedures. SPCS data cannot be used.
- ▶ ISC 40°C 1200 & 2000 meter altitude (L781_033 & L781_034)
- ▶ HC-burn off was finished before the start of the tests.
- ▶ MEXA-2300SPCS in error due to the temperature in the test cell, disabling the daily system checks and calibration procedures. SPCS data cannot be used.
- ▶ cold WHTC + soak + hot WHTC 40°C Sea-level + ISC (L781_041& L781_042)
- ▶ MEXA-2300SPCS (23nm) device was replaced with a MEXA-2300SPCS (10nm), being able to measure particles with a minimal size of 10nm compared to the 23nm. No PM measurement has been performed, because different filters were fitted for different purposes.

Table 9: Average cycle results (part 1)

	Test number		L781_015	L781_017		L781_018	L781_019	L781_020	L781_022		L781_023	L781_024	L781_025	L781_026	
	Temperature	[°C]	25	25	25	25	25	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-7	-7
	Altitude	[m]	Sea-level	Sea-level	Sea-level	1200	2000	Sea-level	Sea-level	Sea-level	1200	2000	Sea-level	Sea-level	Sea-level
	Cycle type		ISC	WHTC cold	WHTC hot	ISC	ISC	ISC	WHTC cold	WHTC hot	ISC	ISC	WHTC hot	WHTC cold	WHTC hot
	Cycle duration	[s]	1799	1799.1	1799	1799.1	1799.1	1799.1	1799	1799	1799.1	1799	1799	1799	1799
	Cycle work	[kWh]	23.7	30.6	30.8	23.7	23.6	23.7	30.6	30.8	23.7	23.6	30.8	30.6	30.8
	Ambient pressure	[kPa]	99.3	100.6	100.6	88.0	80.3	100.7	101.2	101.3	86.2	77.4	101.4	101.3	101.3
	Relative humidity air	[%]	22.7	29.2	23.3	20.1	19.1	62.3	76.8	72.6	71.6	66.4	64.2	75.3	71.2
	Humidity air	[g/kg]	4.6	5.8	4.6	4.6	4.8	0.7	0.9	0.8	1.0	1.0	0.7	1.6	1.5
	Air temperature	[°C]	25.0	25.0	25.0	25.2	25.3	-13.9	-13.6	-13.7	-13.4	-13.5	-13.8	-6.9	-6.8
	kH NO _x factor	[-]	0.90	0.92	0.90	0.90	0.91	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.86	0.86
MDLT-130xT	PM	[mg/kWh]	4.3	3.0	2.8	3.3	3.2	7.0	3.4	2.4	3.4	3.2	2.8	1.9	2.2
MEXA-6000FT	NH₃ max	[ppm]	1.5	1.4	1.4	2.5	1.6	0.8	1.3	1.3	2.5	5.7	1.5	1.7	2.4
	NH₃ mean	[ppm]	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.1	-0.3	0.0	0.1	0.7	1.3	-0.2	0.1	0.4
MEXA-ONE	CO	[g/kWh]	0.026	0.034	0.002	0.028	0.055	0.051	0.234	0.001	0.096	0.145	0.002	0.203	0.001
	CO₂	[g/kWh]	671.8	666.5	645.9	674.4	678.0	688.9	726.9	676.8	698.0	695.6	666.1	715.0	666.7
	THC	[g/kWh]	0.009	0.008	0.007	0.009	0.013	0.015	0.024	0.010	0.020	0.034	0.016	0.029	0.012
	NO	[g/kWh]	0.113	0.176	0.019	0.100	0.063	0.323	0.331	0.126	0.360	0.309	0.114	0.350	0.097
	NO - NO₂ equivalent	[g/kWh]	0.173	0.269	0.030	0.153	0.097	0.495	0.508	0.193	0.552	0.474	0.175	0.536	0.148
	NO_x	[g/kWh]	0.177	0.301	0.032	0.157	0.102	0.510	0.529	0.202	0.565	0.486	0.180	0.554	0.152
	NO_x Corrected	[g/kWh]	0.161	0.280	0.029	0.142	0.093	0.430	0.448	0.171	0.479	0.412	0.152	0.475	0.130
	NO₂	[g/kWh]	0,031	0,003	0,004	0,004	0,006	0,022	0,009	0,005	0,015	0,013	0,012	0,018	0,004
	NO₂ share of NO_x	%	10%	9%	2%	3%	5%	4%	4%	3%	3%	2%	2%	3%	3%
	CH₄	[g/kWh]	0.005	0.003	0.002	0.003	0.008	0.002	0.008	0.007	0.010	0.022	0.011	0.008	0.008
	NMHC	[ppm]	0.004	0.006	0.005	0.006	0.007	0.013	0.018	0.005	0.012	0.015	0.006	0.023	0.006
	Emissions BSFC	[g/kWh]	214.8	213.1	206.5	215.6	216.8	220.3	232.5	216.4	223.2	222.5	213.0	228.7	213.1
MEXA-1400QL-NX	NH₃ max	[ppm]	0.1	0.7	1.4	0.4	0.2	0.2	3.5	11.0	9.8	6.8	26.9	19.0	14.2
	NH₃ mean	[ppm]	-0.2	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.4	1.2	1.0	1.3	2.8	1.8	1.9

	Test number		L781_015	L781_017		L781_018	L781_019	L781_020	L781_022		L781_023	L781_024	L781_025	L781_026	
	Temperature	[°C]	25	25	25	25	25	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-7	-7
	Altitude	[m]	Sea-level	Sea-level	Sea-level	1200	2000	Sea-level	Sea-level	Sea-level	1200	2000	Sea-level	Sea-level	Sea-level
	Cycle type		ISC	WHTC cold	WHTC hot	ISC	ISC	ISC	WHTC cold	WHTC hot	ISC	ISC	WHTC hot	WHTC cold	WHTC hot
	Cycle duration	[s]	1799	1799.1	1799	1799.1	1799.1	1799.1	1799	1799	1799.1	1799	1799	1799	1799
	Cycle work	[kWh]	23.7	30.6	30.8	23.7	23.6	23.7	30.6	30.8	23.7	23.6	30.8	30.6	30.8
	Ambient pressure	[kPa]	99.3	100.6	100.6	88.0	80.3	100.7	101.2	101.3	86.2	77.4	101.4	101.3	101.3
	Relative humidity air	[%]	22.7	29.2	23.3	20.1	19.1	62.3	76.8	72.6	71.6	66.4	64.2	75.3	71.2
	Humidity air	[g/kg]	4.6	5.8	4.6	4.6	4.8	0.7	0.9	0.8	1.0	1.0	0.7	1.6	1.5
	Air temperature	[°C]	25.0	25.0	25.0	25.2	25.3	-13.9	-13.6	-13.7	-13.4	-13.5	-13.8	-6.9	-6.8
	kH NO _x factor	[-]	0.90	0.92	0.90	0.90	0.91	0.84	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.86	0.86
MEXA-SPCS	PN	[/kWh]	1.26E+10	1.23E+10	1.68E+10	2.54E+10	2.18E+10	5.20E+10	-	-	1.59E+10	-	1.40E+10	2.61E+11	1.45E+10
AVL 735	Fuel BSFC	[g/kWh]	217.0	212.3	208.0	215.7	215.7	222.5	226.2	214.4	221.8	219.8	211.4	225.2	213.5
	Carbon balance	[%]	-1.04%	0.37%	-0.73%	-0.03%	0.49%	-0.98%	2.80%	0.91%	0.63%	1.23%	0.74%	1.54%	-0.19%
	Tailpipe temperature at test start	[°C]	202.0	28.5	258.0	226.0	228.0	147.5	-8.0	194.0	130.0	178.0	208.0	-2.0	222.0
	Remarks					PM too high filter face velocity			SPCS - in error			SPCS - in error			

Table 10: Average cycle results (part 2)

	Test number		L781_027	L781_028	L781_029	L781_031		L781_032	L781_033	L781_034
	Temperature	[°C]	-7	-7	-7	40	40	40	40	40
	Altitude	[s]	1200	2000	Sea-level	Sea-level	Sea-level	Sea-level	1200	2000
	Cycle type		ISC	ISC	ISC	WHTC cold	WHTC hot	ISC	ISC	ISC
	Cycle duration	[s]	1799.1	1799	1799	1799	1799	1799	1799	1799
	Cycle work	[kWh]	23.6	23.6	23.7	30.5	30.6	23.7	23.6	23.5
	Ambient pressure	[kPa]	86.8	78.3	101.0	100.0	99.9	99.8	88.9	81.4
	Relative humidity air	[%]	66.4	61.1	66.0	10.3	10.3	10.1	9.4	9.1
	Humidity air	[g/kg]	1.6	1.7	1.4	4.9	4.9	4.9	5.1	5.3
	Air temperature	[°C]	-6.8	-6.7	-6.8	40.6	40.3	40.7	40.8	40.5
	kH NO _x factor	[-]	0.86	0.86	0.85	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92
MDLT-130xT	PM	[mg/kWh]	2.3	2.2	3.0	148.9	146.1	189.1	2.6	2.7
MEXA-6000FT	NH ₃ max	[ppm]	2.7	2.9	1.4	4.3	1.8	1.2	1.5	1.8
	NH ₃ mean	[ppm]	0.7	0.8	0.0	1.0	0.1	-0.2	0.0	0.0
MEXA-ONE	CO	[g/kWh]	0.117	0.160	0.073	0.057	0.001	0.086	0.084	0.089
	CO ₂	[g/kWh]	694.6	689.3	693.2	787.4	796.0	792.5	678.3	680.8
	THC	[g/kWh]	0.041	0.049	0.030	0.033	0.013	0.042	0.021	0.013
	NO	[g/kWh]	0.460	0.516	0.415	0.353	0.181	0.417	0.370	0.356
	NO - NO ₂ equivalent	[g/kWh]	0.706	0.791	0.636	0.542	0.277	0.639	0.567	0.545
	NO _x	[g/kWh]	0.720	0.807	0.646	0.557	0.297	0.653	0.578	0.557
	NO _x Corrected	[g/kWh]	0.617	0.693	0.552	0.506	0.270	0.593	0.527	0.510
	NO ₂	[g/kWh]	0,011	0,014	0,015	0,016	0,020	0,014	0,011	0,011
	NO ₂ share of NO _x	%	2%	2%	2%	3%	7%	2%	2%	2%
	CH ₄	[g/kWh]	0.008	0.014	0.007	0.007	0.007	0.008	0.004	0.005
	NMHC	[ppm]	0.034	0.038	0.024	0.027	0.007	0.036	0.018	0.008
	Emissions BSFC	[g/kWh]	222.1	220.5	221.7	251.8	254.5	253.4	216.9	217.7
MEXA-1400QL-NX	NH ₃ max	[ppm]	9.0	4.6	3.0	12.6	0.1	0.2	0.0	0.0
	NH ₃ mean	[ppm]	1.1	1.0	0.7	1.9	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
MEXA-SPCS	PN	[/kWh]	1.46E+10	-	2.11E+10	-	-	-	-	-

	Test number		L781_027	L781_028	L781_029	L781_031		L781_032	L781_033	L781_034
	Temperature	[°C]	-7	-7	-7	40	40	40	40	40
	Altitude	[s]	1200	2000	Sea-level	Sea-level	Sea-level	Sea-level	1200	2000
	Cycle type		ISC	ISC	ISC	WHTC cold	WHTC hot	ISC	ISC	ISC
	Cycle duration	[s]	1799.1	1799	1799	1799	1799	1799	1799	1799
	Cycle work	[kWh]	23.6	23.6	23.7	30.5	30.6	23.7	23.6	23.5
	Ambient pressure	[kPa]	86.8	78.3	101.0	100.0	99.9	99.8	88.9	81.4
	Relative humidity air	[%]	66.4	61.1	66.0	10.3	10.3	10.1	9.4	9.1
	Humidity air	[g/kg]	1.6	1.7	1.4	4.9	4.9	4.9	5.1	5.3
	Air temperature	[°C]	-6.8	-6.7	-6.8	40.6	40.3	40.7	40.8	40.5
	kH NO _x factor	[-]	0.86	0.86	0.85	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92
AVL 735	Fuel BSFC	[g/kWh]	222.6	219.7	224.0	250.3	257.1	253.2	217.7	217.9
	Carbon balance	[%]	-0.19%	0.37%	-1.05%	0.58%	-1.03%	0.09%	-0.36%	-0.08%
	Tailpipe temperature at test start	[°C]	71.5	70.5	83.0	45.5	429.0	94.0	102.5	135.0
	Remarks			SPCS - in error		SPCS - in error HC-burn off active			SPCS - in error	

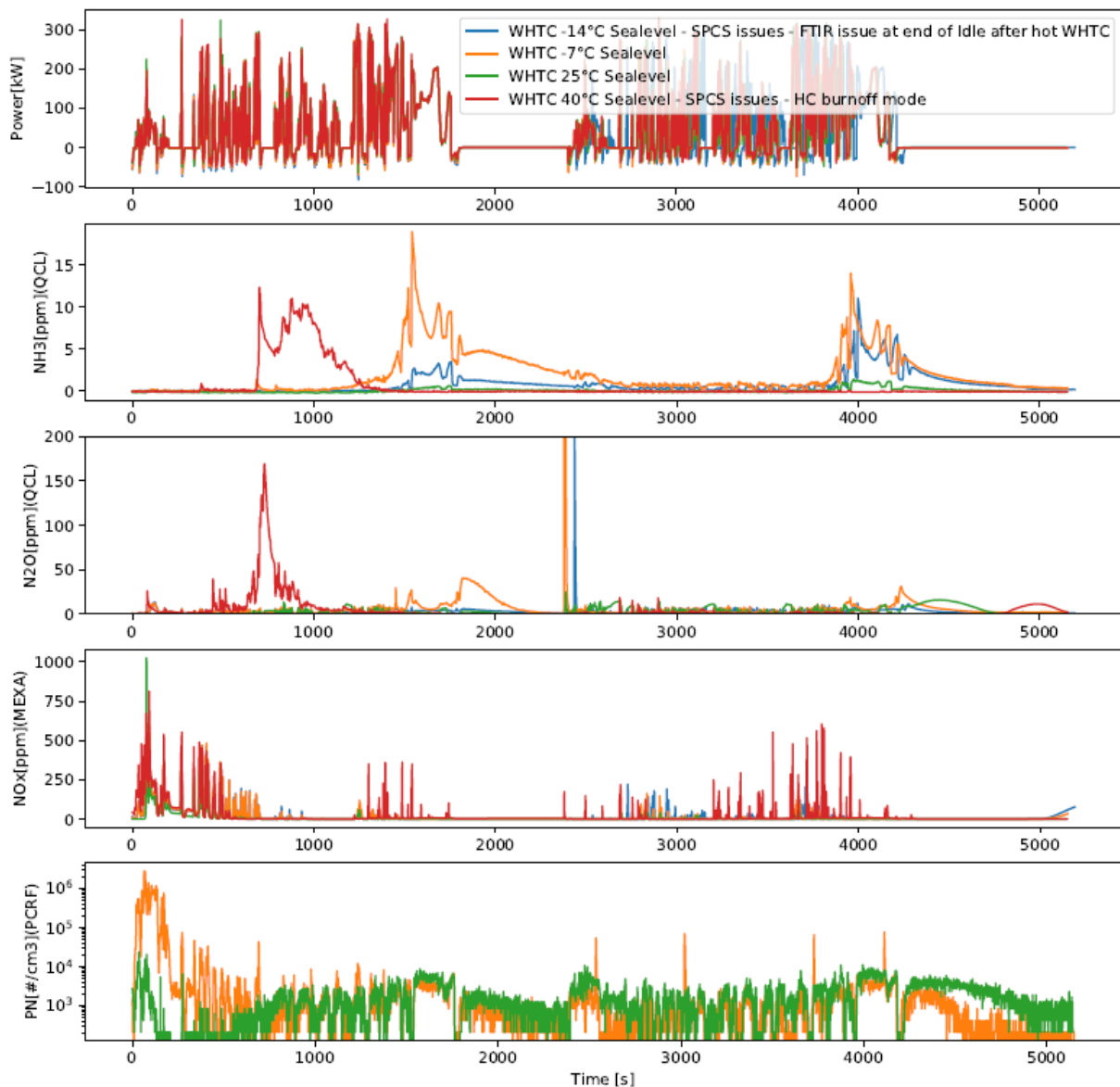
Emission traces during tests

MB Actros Euro 6 Step D test results. Graphs of emissions at four temperatures; -14°, -7°, 25° and 40°C:

- ▶ WHTC at sea level
- ▶ ISC at sea level
- ▶ ISC at 1200 m altitude
- ▶ ISC at 2000 m altitude

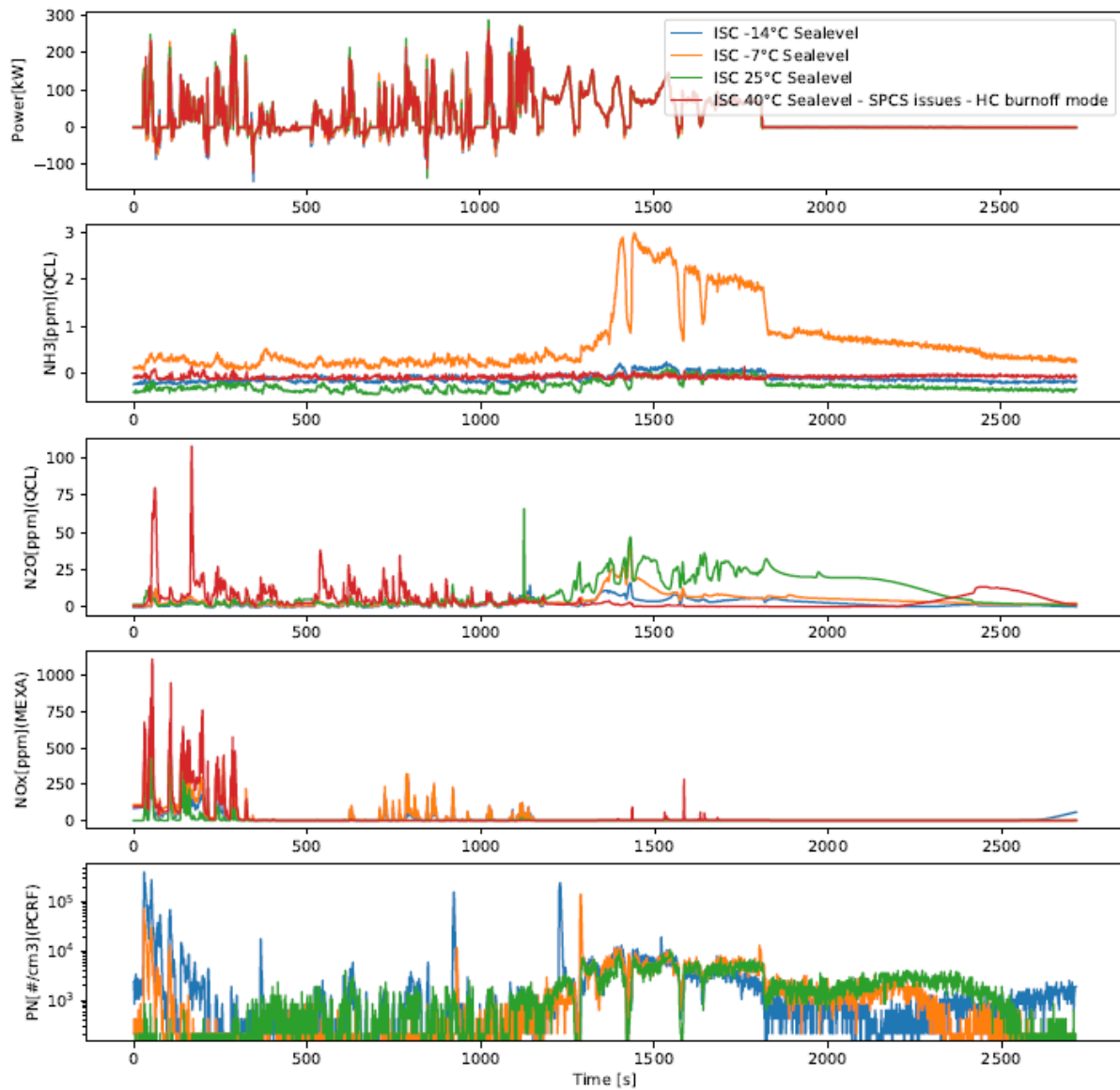
All figures include traces during 15 minutes of idle after the test

Figure 8: MB Actros Euro 6 WHTC tests *at sea level* with different ambient temperatures



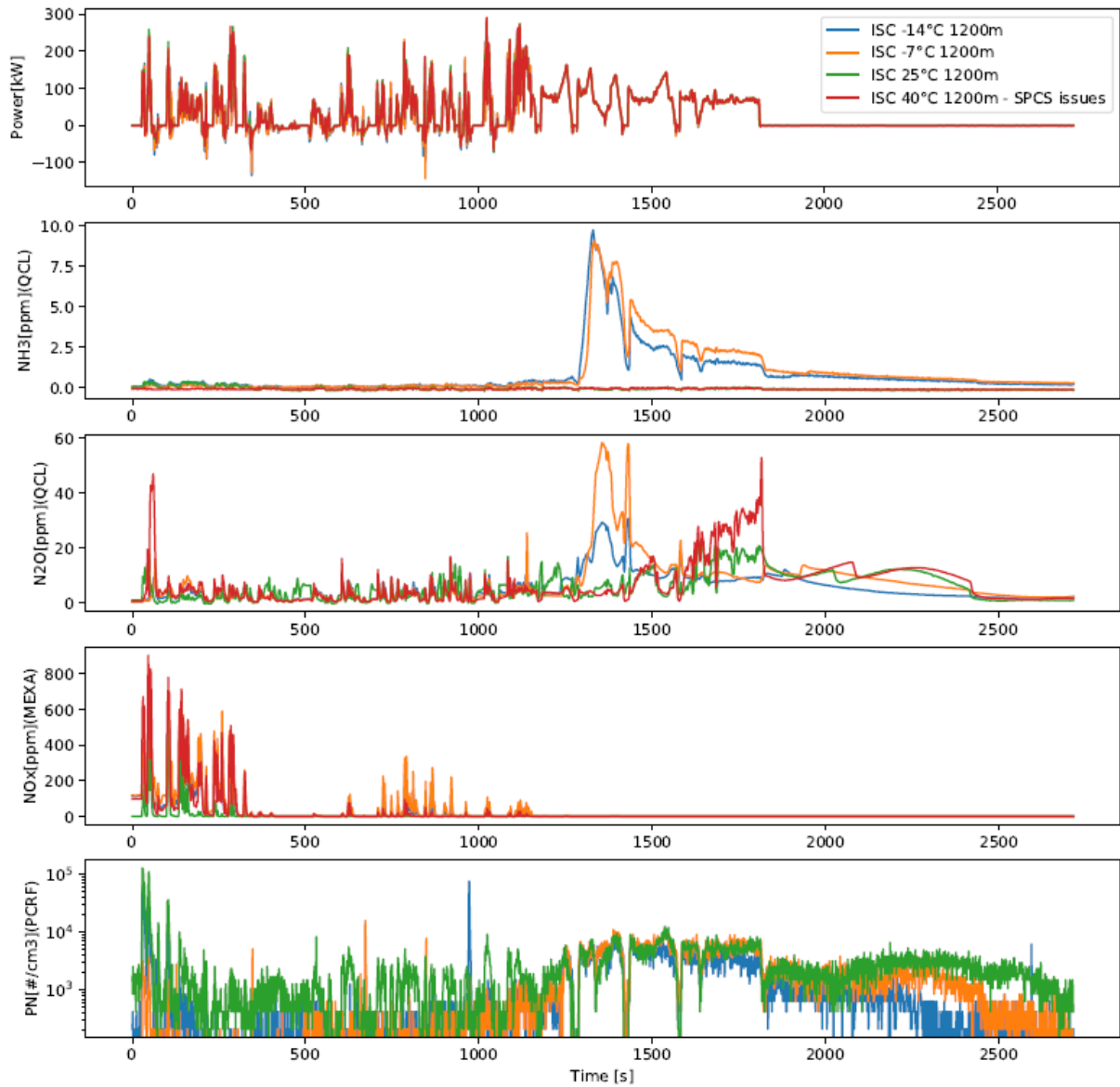
Source: Figure by TNO

Figure 9: MB Actros Euro 6 ISC tests at sea level with different ambient temperatures



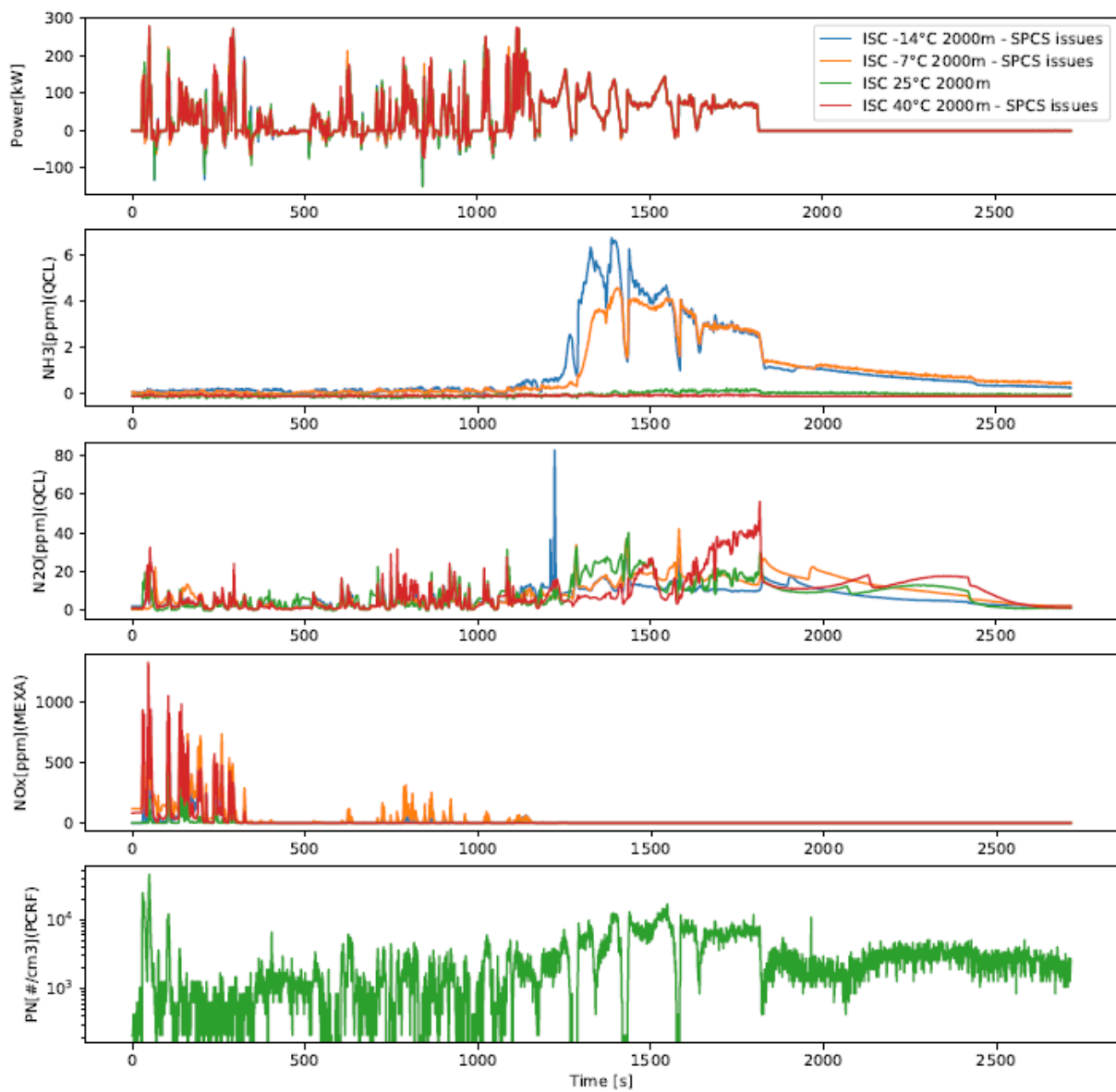
Source: Figure by TNO

Figure 10: MB Actros Euro 6 ISC tests at 1200m altitude with different ambient temperatures



Source: Figure by TNO

Figure 11: MB Actros Euro 6 ISC tests at 2000m altitude with different ambient temperatures



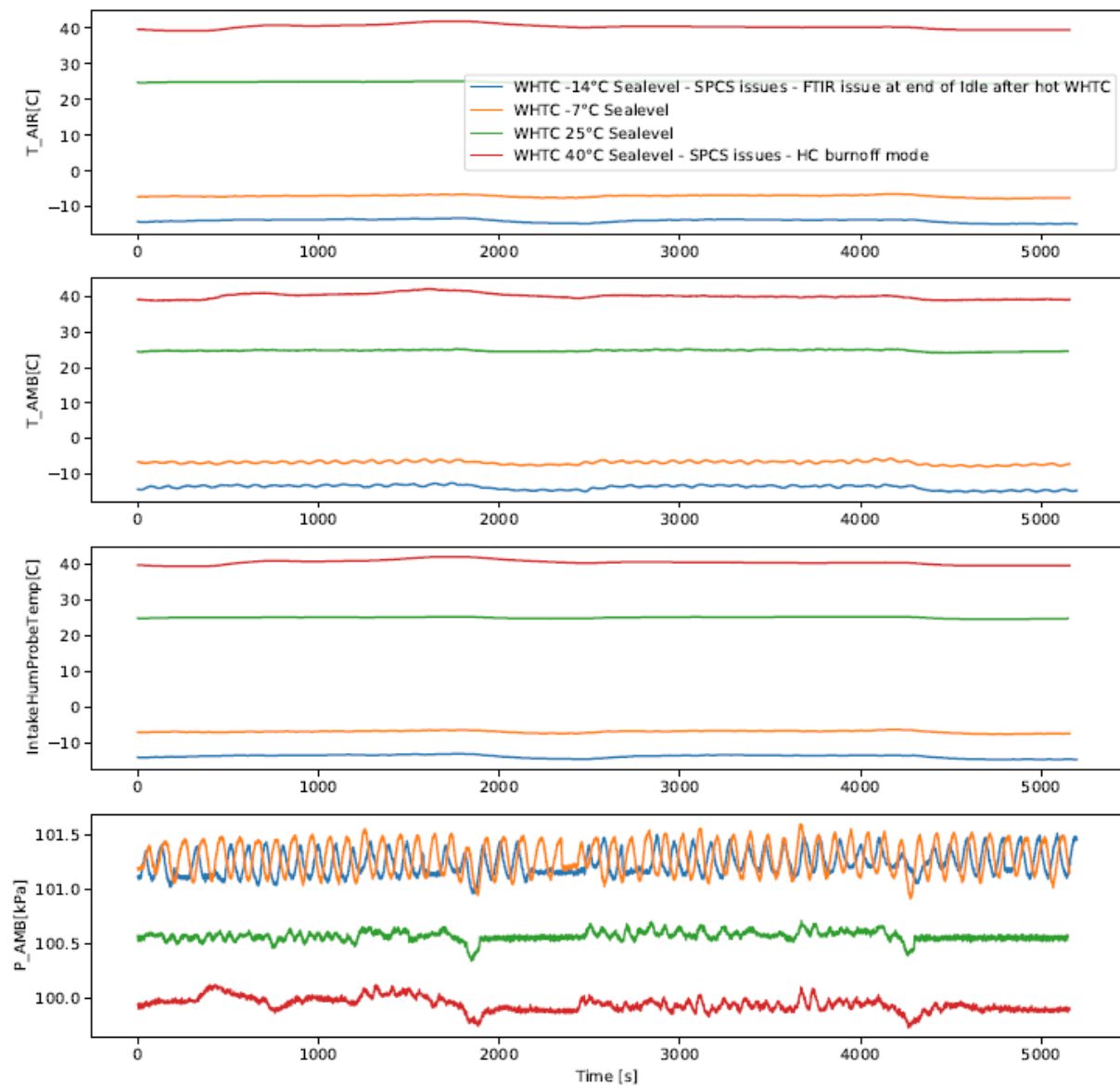
Source: Figure by TNO

Traces test conditions

MB Actros Euro 6 Step D test conditions. Graphs of test cell pressure and temperature (-14°, -7°, 25° and 40°C) during the tests:

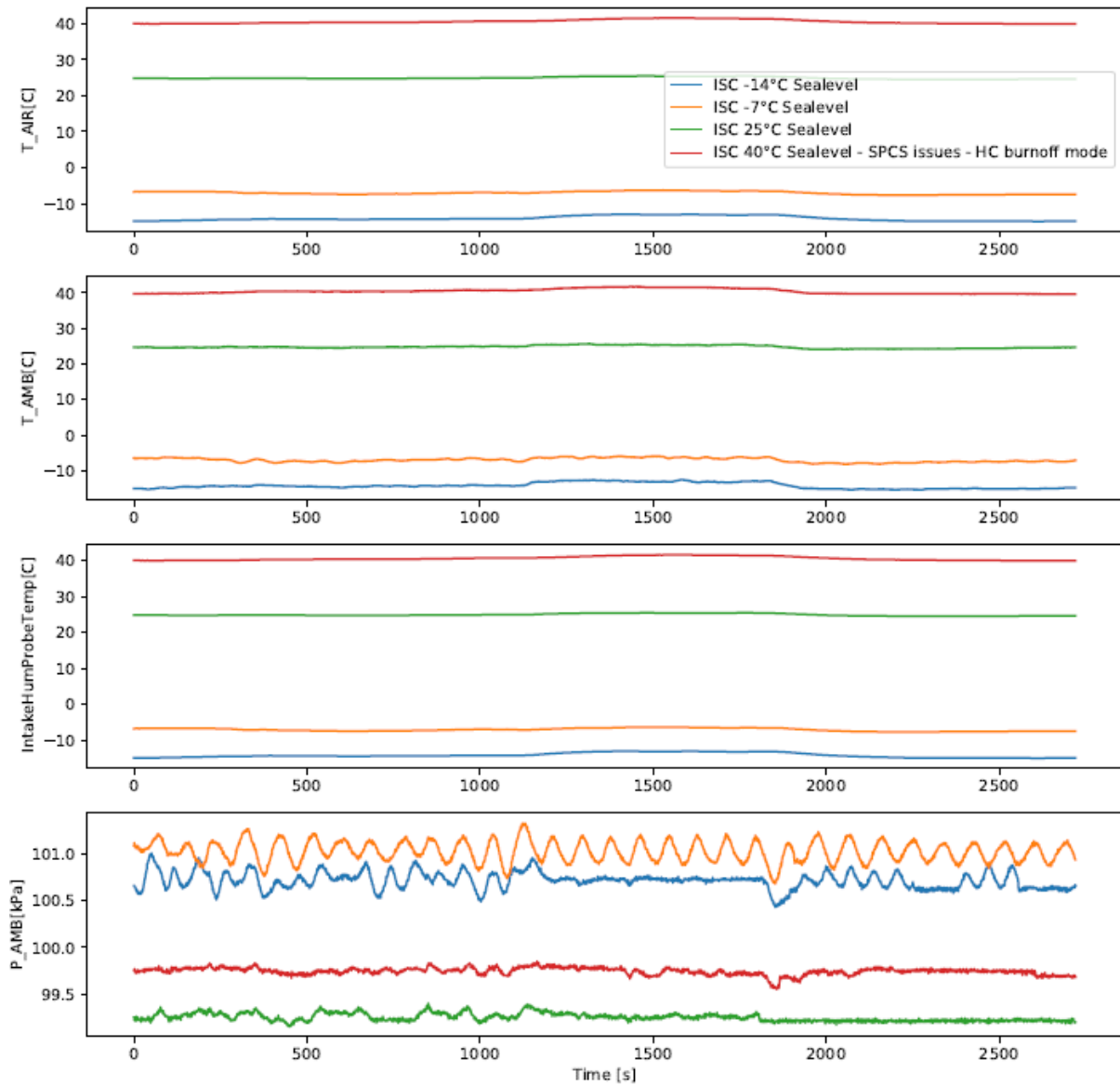
- ▶ WHTC at sea level
- ▶ ISC at sea level
- ▶ ISC at 1200 m altitude
- ▶ ISC at 2000 m altitude

Figure 12: MB Actros Euro 6 test conditions for WHTC at sea level



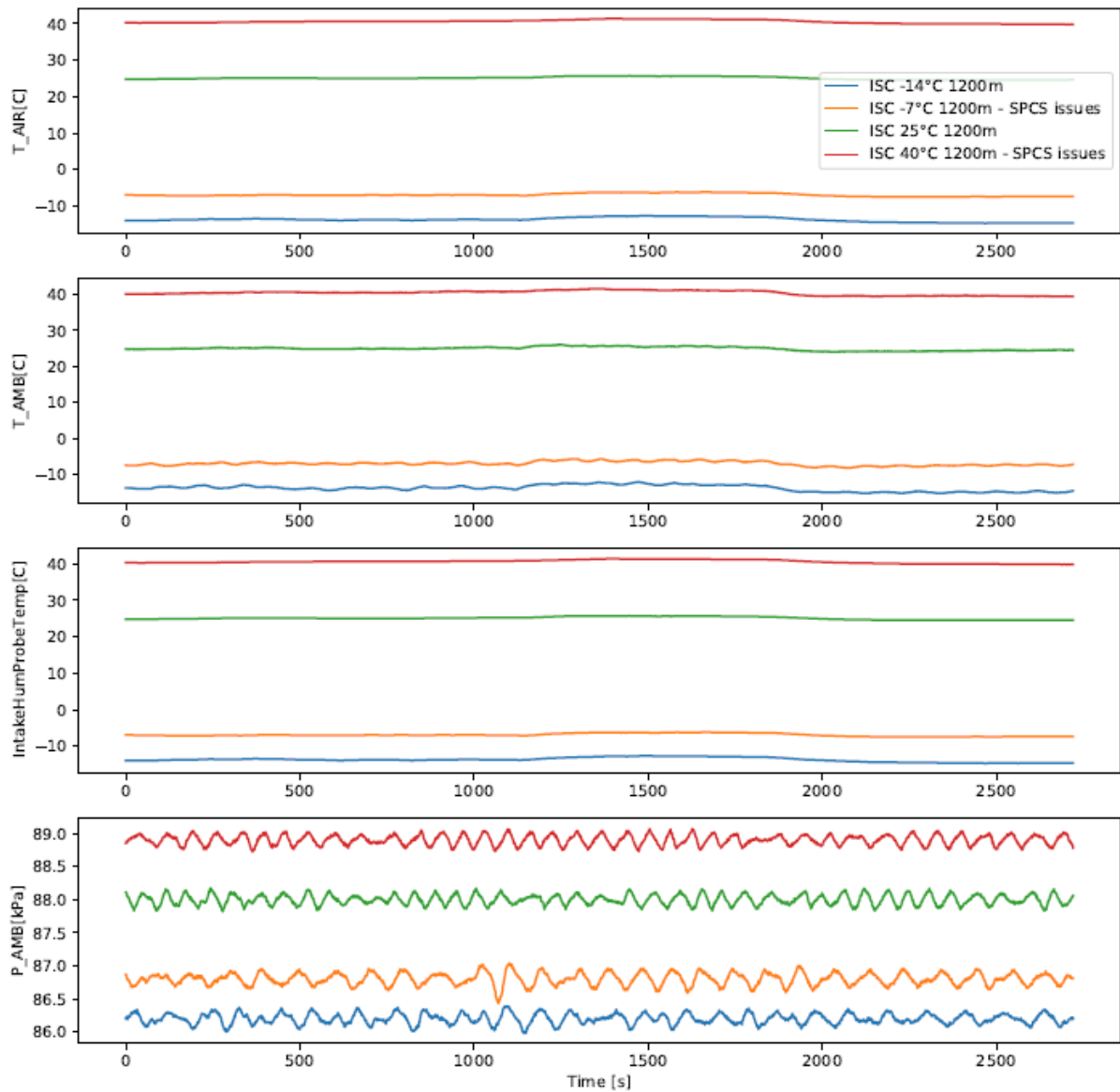
Source: Figure by TNO

Figure 13: MB Actros Euro 6 test conditions for ISC at sea level



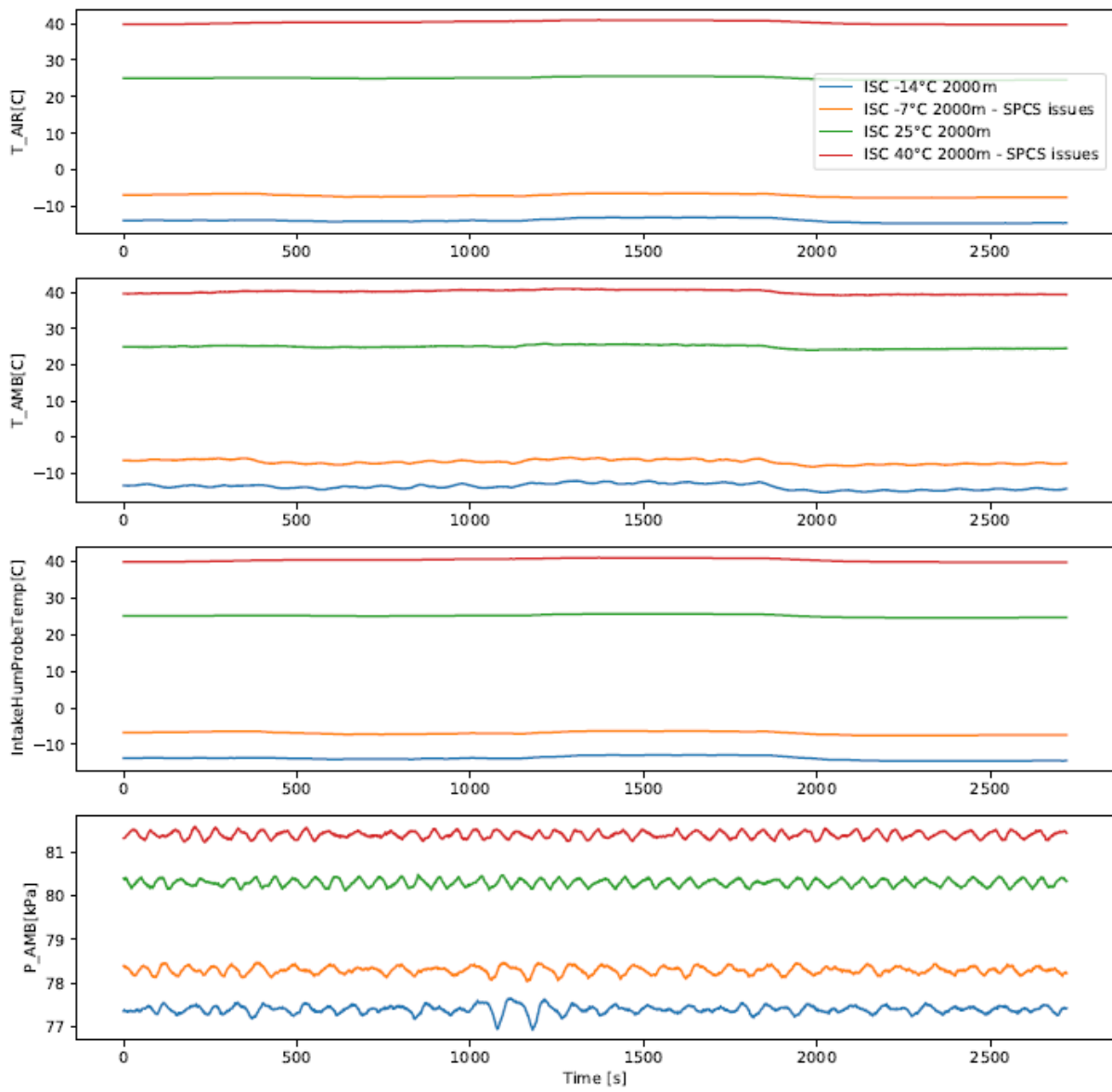
Source: Figure by TNO

Figure 14: MB Actros Euro 6 test conditions for ISC at 1200 m altitude



Source: Figure by TNO

Figure 15: MB Actros Euro 6 test conditions for ISC at 2000 m altitude



Source: Figure by TNO

B Grenzwertfunktionen und Limitabsenkung

Autor*innen: Konstantin Weller, Maurice Tödling, Stefan Hausberger, FVT-
Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz; Jessica de
Ruiter, Armando Indrajana, Norbert Ligterink, TNO, Den Haag

Datum: 30. Juli 2021

B.1 Tasks

This report describes the work package (WP) 2 of the project "National and international exhaust emission legislation for passenger cars, light and heavy commercial vehicles; FKZ 3719 51 102 0". In WP 2 the following aspects – already discussed in WP 1 on a less detailed level - are analysed in detail:

- ▶ Aspect 01-1 (flexible test regimes and NTE limits)
- ▶ Aspect 01-13 (reduce emission limits)

A 3rd aspect will be selected in a later stage of the project.

The analysis refers also to the proposal for EURO 7 presented by CLOVE in the AGVES meeting on 27th April 2021.

B.2 Flexible Emission Limits

Emissions from vehicle are determined increasingly by cold start related emissions due to the improved catalyst efficiencies under hot driving conditions. Figure 16 shows typical EURO 6d-temp test results for NO_x. The emission behaviour of the exhaust gas components, which are reduced by catalytic converters, have comparable high emissions before reaching the light-off temperature of the catalyst and very low emissions afterwards. The same trends exist for CO and HC for LDVs and for HDVs.

The current limits define the allowed emissions in [g/km] for LDVs (cars and LCVs) and in [g/kWh] for HDVs. These limits correspond to a linear function through the origin ($y=k_1 * x$), with y being the NO_x cumulated over the entire test in [g], k the limit value [g/km] and x the driven distance. For HDV the km are replaced by positive engine work [kWh] in this equation.

The "Flexible Limit" replaces the linear function through the origin by a linear function with an offset ($y = k_2 * x + D$), as shown in Figure 16. The Offset defines the extra emissions occurring after an engine start with cold catalysts compared to the emissions with hot catalysts. Since emissions occur also in vehicle stand still²⁵, also time shall add an emission allowance in the flexible limit function.

Current limit function: Emission [g] = [g/km] * Distance [km]

Flexible Limit Function: Emission [g] = [g/km] * Distance [km] + [g/s] * Time [s] + D

This form of the equation fits much better to the NO_x, CO and HC emissions of modern cars and thus allows a better control over all distances driven, and appropriate for any type of trip.

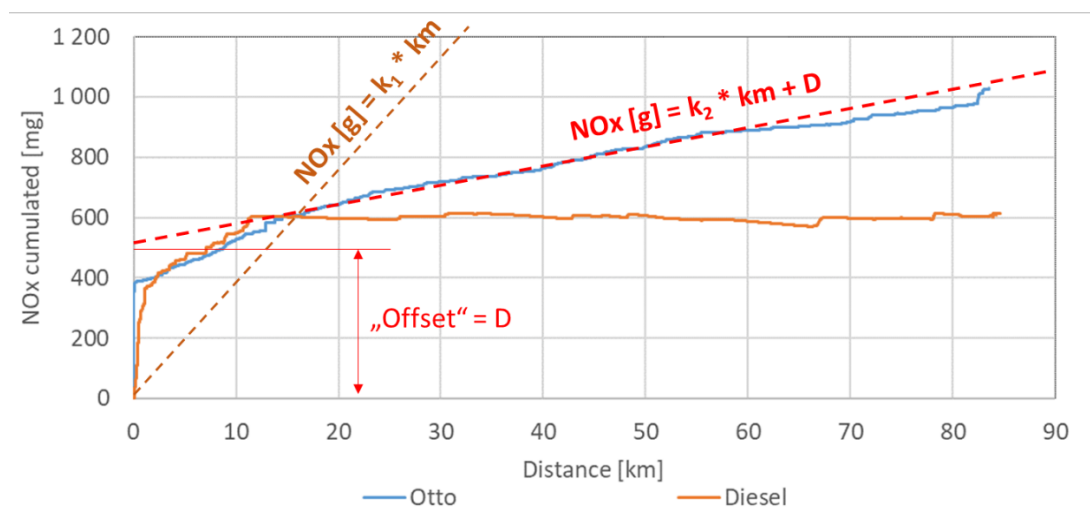
²⁵ At least when the battery capacity is exploited by auxiliary power demands after longer engine stops the engine has to restart also for hybrid cars

With the current limit function the test result of a trip depends to a large extent on the test distance. In short tests, the cold start related emissions (i.e., the offset) are divided by a small distance value and thus shorter minimum test distances lead to higher emissions per km for a given vehicle technology. Allowing short tests in type approval - with consequently higher limits - would control cold start emissions very well but would not limit well the possible low emission levels in long-haul driving with hot catalysis.

As shown in Figure 16, the difference between the line representing the current limit function and the typical real emission levels of the vehicles increases over distance. Modern engine control systems could adjust exhaust heating strategies, EGR, AdBlue dosing, etc. in longer trips, if the real emissions are far below the limits.

In contrary, the Flexible Limit Function allows independent limitation of cold start related emissions (offset D) and emissions under hot driving conditions by limiting $[g/km]$ and $[g/s]$. Thus, the cold start and the much lower emission levels possible under hot conditions can be limited according to the capabilities of the vehicle technologies. The proper limitation of the hot emissions is especially relevant for HDVs, where the majority of kilometres are driven in long haul.

Figure 16: Measured NOx emissions in RDE tests of EURO 6d-temp cars after cold start



Beside the differentiation into hot and cold test conditions, the hot driving can also be split into a distance-based impact and a time-based impact. The latter is relevant in case of tests with high idling shares and low average speeds.

As basis for flexible limit functions we developed 'Upper Bound Functions' (UBF). These functions can be used to calculate, per trip, the pollutant emission that could be expected in a worst-case test scenario. These emissions should be considered an upper bound on the average emissions of that trip. To convert the UBF into limit functions uncertainty margins for analyser accuracies, serial spreads in vehicle production, aging of components and uncertainties in the elaboration of the Upper Bound Functions need to be added, as discussed later.

The Upper Bound Functions (UBF)

If *time* is the total time a trip took in seconds and *distance* is the length of the trip in km, the 'Upper Bound' emissions (E_{UB}) are calculated by

$$E_{UB} \left[\frac{g}{km} \right] = \frac{E_{start} \times f(T) \times g(CO_2) + E_{time} \times time + E_{km} \times distance}{distance}$$

in mg/km for light-duty vehicles, and

$$E_{UB} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{E_{start} \times f(T) + E_{time} \times time + E_{kW} \times work}{work}$$

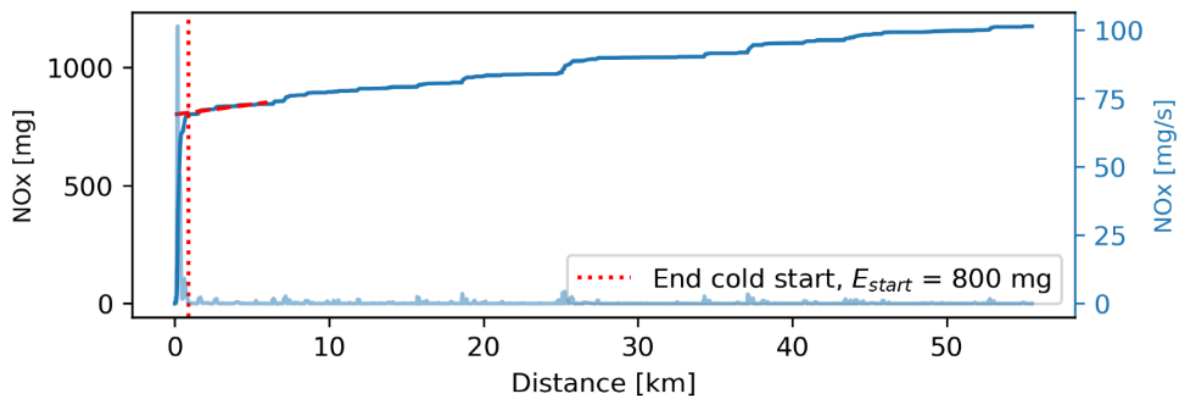
in g/kWh for heavy-duty vehicles (*work* in kWh), where T is ambient temperature.

This contains the following factors which address key areas where high emissions can occur.

Table 11: Factors for high emissions

Factor	Description
E_{start}	An initial offset in emissions that can be attributed to the cold start. [mg] or [g] for gaseous pollutants, [#] for PN Determined by considering the total amount of emissions emitted during a measured cold start, where the end of the cold start is considered to be where the initial, higher, emissions start to stabilise (dotted red line in Figure 17). The offset is determined by extrapolating the initial stabilised cumulative emissions back to distance = 0 (shown by the dashed red line in Figure 17).
f(T)	A function that considers the impact of the soak temperature on the cold start emissions. Such a function could be used in a regulation e.g. only below a temperature of -7°C. This function is determined using measurements at different temperatures. This function, of the form $A \times T + b$, could start at -7 °C and increase linearly as temperatures decrease. -7 °C is a reasonable value for a lower boundary, as it is in line with current legislation (RDE extended, WLTP) and physical principles, e.g., above the freezing of AdBlue fluid.
g(CO ₂)	A function that allows for increases in cold start emissions at unusually high loads. Logically, high load driving while the exhaust gas after treatment system is still cold should lead to high tailpipe emissions. However, measurement data which corroborates the need for an extra function is currently insufficiently available.
E_{time}	Emission contribution dependent on the time aspect of a trip. This allows for flexibility in the time spent idling and low speed driving during a trip. [mg/s] or [g/s] For LDVs E_{time} is determined using average emissions between 10 – 40 km/h. This average gives an indication of the engine behaviour at low speeds and loads where time-related emissions are more important
E_{km}	Emission contribution dependent on the distance aspect of a trip. This contribution becomes increasingly important for long trips with high velocity. [mg/km] or [g/km] Determined using E_{start} and E_{time} along with the average measured trip emissions to calculate the remaining factor to be attributed to the distance aspect. Traditionally, this is the emission limit metric for light-duty vehicles.
E_{kW}	Emission contribution dependent on the work performed during a trip. This contribution was employed in the case of heavy-duty vehicles. [g/kWh] Determined similar to E_{km} for LDVs by calculating the remaining factor in the equation of the UBF to best fit the UBF to the measured emissions of the tests.

Figure 17: The determination of E_{start} : the end of the cold start is defined by the stabilisation of the initially high emissions (red dotted line), while the offset E_{start} is calculated by extrapolating the initial stabilised cumulative emissions back to zero (dashed red line); the E_{start} is the y-intercept.



Source: Figure by TNO

The Flexible Limit Functions are elaborated based on the UBFs by considering:

- ▶ Vehicles must meet the limits under worst-case test conditions (temperature, vehicle status and driving style): the UBFs include the worst-case tests we had available. An additional margin for most likely not having identified the real worst-case may need to be added. However, low temperature cold start testing, with high engine load and an aged catalyst is likely to be the worst-case test for most exhaust gas components.
- ▶ Vehicles should meet emission limits after the end of useful life (EUL). Emissions increase over lifetime, mainly due to thermal and chemical aging of the catalysts. With respect to this emission increase, one can consider two options. Since the UBFs were produced for rather new vehicles, one option is to add another margin to the UBF to allow for higher emissions until end of life time. Another option is to keep emission limits lower, and instead require replacement of aged components leading to high emissions.
- ▶ Manufacturers will consider a safety margin by which the vehicles have to be below the limits in worst-case tests at EUL to allow for spreads in the serial vehicle production and also the risk not to know the real worst-case test conditions in 3rd party RDE tests. Thus, a margin needs to be added to the emission levels the “average” vehicles or “prototype vehicles” used as basis for the UBFs can meet.

A robust assessment of the overall margin to be added to the UBFs would need more information on EU 7 test conditions (a) and behaviour of future technologies and serial production issues (b and c). Depending on the base data used for the UBFs (aged demonstrators or data collected from serial production cars) different approaches to consider the aforementioned margins were applied and are described in the related chapters.

To consider these boundaries, we used the following workflow:

- ▶ Adjust the parameters of the UBFs to meet the emissions measured for best performing EURO 6d /EURO 6-Step D vehicles and of EURO 7 demonstrator vehicles in worst-case test conditions²⁶.
- ▶ Analyse possible significant impacts of driving conditions on the parameters (e.g. temperature dependency $f(T)$ of the offset E_{start} , or load dependencies, i.e. the $g(\text{CO}_2)$ function)
- ▶ Set up the UBFs including all parameters to describe the expected emission levels achievable for the vehicle in different test conditions.
- ▶ Discuss the dependencies of the parameters and suggest which of these dependencies shall be eliminated in a limit function to obtain simpler equations (e.g. the $f(T)$ function for E_{start} can be set to 1.0 above -7°C and increase only at lower temperatures as discussed before)
- ▶ Compare results from the UBFs of the best performing EURO 6d/VID and of the demonstrator vehicles as basis for chapter B.3, where further reductions of emission limits are discussed.
- ▶ Add safety margins where needed to the UBFs to produce the Flexible Limit Functions (FLF).
- ▶ Apply the FLFs to calculate limits for various relevant test conditions for illustration of the limit levels achievable by current best performing and EURO 7 demonstrator vehicles.

The Flexible Limit Functions (FLF) are not specifically designed as proposal for EURO 7 emission limits, but can also serve to assess limit proposals from the Commission or other entities, as long as the parameters of the FLF cover the suggested test conditions. Such an application of the FLF is shown in chapter B.3.

B.2.1 Application for LDVs

For the application for LDVs, measurement data collected by TUG from tests performed on behalf of UBA²⁷ is utilized extensively. The measurement dataset consists of measurement data from 141 PEMS tests and 226 chassis dynamometer tests, from a total of 48 vehicles, with emission class ranging from Euro 5 until Euro 6d-Temp.

For the current evaluation, the emission coefficients for the UBF are established from emission measurement data from 4 selected light-duty vehicles. The 4 vehicles consist of 2 diesel vehicles, 1 petrol vehicle, and 1 petrol hybrid vehicle, with emission class Euro 6d and Euro 6d-Temp.

On these 4 vehicles, 35 test programmes were carried out: 12 PEMS tests for on-road emission measurements and 23 chassis dynamometer tests for test-bench measurements. The PEMS tests were mainly carried out by driving the vehicle on a typical Real-Drive Emission (RDE) route.

²⁶ A dedicated test program was performed in WP2 where vehicles were measured also under low temperature and low and high load driving conditions. The test conditions are highly demanding but most likely are still not the worst-case condition in future RDE. The tests on the demonstrator vehicles and engines were performed at the labs of the industry partners and do rather not represent the worst-case tests. Details are described in the corresponding chapters.

²⁷ Reference Z6-69 836/1; „Rahmenvertrag für die Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen“.

The emission coefficients E_{start} , E_{time} and E_{km} are calculated for every measurement test²⁸. From all the calculated emission coefficients, the maximum emission coefficients are collated into one list regardless of the fuel type, which is defined in this report as “LD UBF”.

Table 12: Emission coefficients of E_{UB} for LD UBF per pollutant from a sample of serial EU6d and t-temp vehicles

LD UBF			
Pollutant	E_{start} [mg]	E_{time} [mg/s]	E_{km} [mg/km]
CH ₄	29.08	0.11	2.16
CO	2139.97	1.75	131.17
HC	282.85	0.25	4.42
N ₂ O	49.13	0.28	0.79
NH ₃	34.47	0.06	9.26
NO _x	670.54	0.44	19.11
PM	1.67	0.01	0.57
PN	2.83E+12	1.80E+09	6.92E+10

Analysis of Euro 6d-Temp and Euro 6d vehicles on-road data

For 7 different Euro 6d-Temp and Euro 6d vehicles, monitoring data has been collected during real-world driving in a variety of conditions. These trips have varying lengths, average speeds, temperatures, and a range of different traffic situations. The behaviour of these vehicles in these situations give an indication of what is technologically feasible in terms of low emissions now and in the future.

Considering different tests (including the specifically specialized ones), some appear to show correlations, for example, for high engine load and cold temperatures. However, in WLTP tests typically lowest emissions can be observed, thus the WLTC was not used as reference since otherwise artificial, significant increases can be observed compared to other test. If these ‘elevated’ test results are compared with RDE tests, in particular the urban part, it is observed that the increases bring the emissions in line with many other tests. In other words, the results fall within the normal driving bandwidth.

Emission dependency during cold starts

It has been hypothesised that the amount of pollutant emitted during the cold start of a vehicle would be dependent both on the load during the cold start, as well as the temperature at which the cold start occurred. For the pollutant NO_x, the cold start offset shows large variations for most vehicles (Figure 19). For most of the monitored vehicles no clear trend is observed between the amount of NO_x emitted during the cold start period and the average CO₂ emissions. The average CO₂ emissions give an indication of the load at which the cold start occurred.

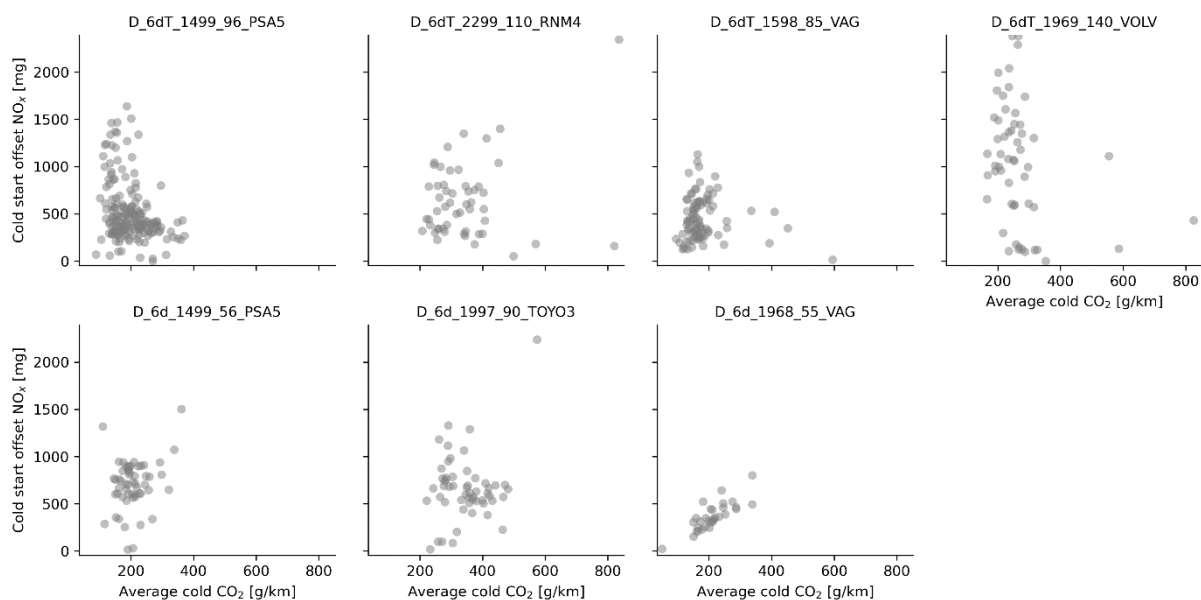
A ‘worst-case cold start’ was performed for each of the monitored Euro 6d vehicles, where the fully loaded vehicle accelerated with a cold engine from 0 – 100 km/h as quickly as possible on

²⁸ E_{time} is determined for the LDVs using average emissions between 10 – 40 km/h. This average gives an indication of the engine behaviour at low speeds and loads where time-related emissions are more important

the open road. In the case of the vehicle D_6d_1968_55_VAG (which was used as the example in Figure 17), the start was performed at around 14 °C. An average CO₂ emission of 340 g/km was measured during the cold start period, which lasted 0.9 km and produced a cold start offset of 800 mg of NO_x.

The vehicle D_6d_1968_55_VAG is also the only vehicle that seems to demonstrate a correlation between load and cold start offset (though this varies mostly between 200 – 600 mg). Although there are a few high outliers for the other two Euro 6d vehicles, they do not appear as part of a clear trend. For this reason, we did not include a load dependency $g(CO_2)$ for E_{start} in the UBFs.

Figure 18: Correlation of the cold start offset on average CO₂ emissions during the cold start. Each point is a trip with a cold start.

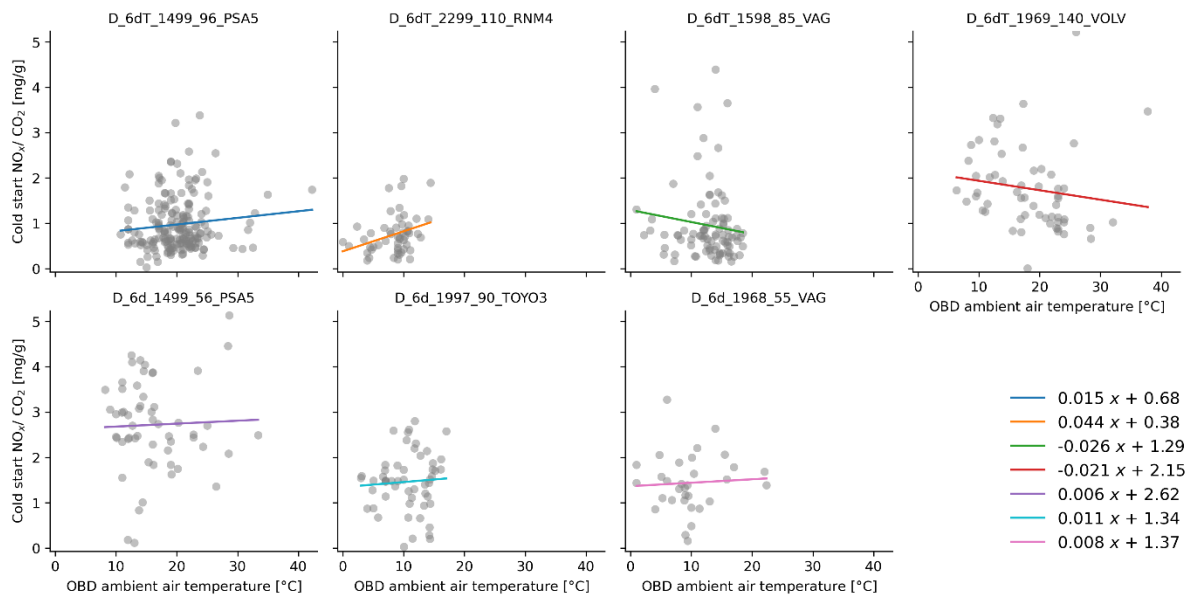


Source: own figure, TNO

Besides load, we also analysed the significance of the impact of the starting temperature of the vehicle on the amount of cold start emissions. For the analysis of the temperature effects, the differences in how the vehicles were driven during the cold start period is accounted for by dividing the emitted NO_x by the emitted CO₂ during the cold start period. Examining the correlation between this and the outside temperature as logged by the vehicle, none of the Euro 6d vehicles demonstrate increasing relative NO_x emissions at temperatures down to 0 °C. This correlation is also shown when examining the total cold start offset (see Figure 72 in the Annex).

NO_x emissions of diesel cars can also depend on the loading of the NO_x-storage catalyst (if present) and of the NH₃ level in the SCR at engine start. Initial investigations were made of the influence of the driving conditions before the vehicle stopped at the end of the trip prior to the cold start, but results have so far been inconclusive. The spread is not easily explained by the test execution or parameters monitored.

Figure 19: Correlation between the ratio of the NO_x and CO₂ emitted during cold start on the ambient air temperature (where the ambient air temperature is indicated by the OBD signal of the vehicle). Each point is a trip with a cold start. The linear regression for each set of data is indicated by the coloured lines.



Source: own figure, TNO

Special vehicle tests were performed for WP 2 to analyse effects of temperature and load on the emission levels of vehicles. The tests and results are reported in Annex A and are summarised in Table 13 and Table 14. To investigate the main impacts, the same test cycles were repeated and only one parameter was changed in the dyno settings (temperature or load). The emission increases observed here should not be replicated in a proposal for EURO 7 as such, as they are the result of the limitations of current RDE legislation. The current RDE legislation has allowance in pollutant emissions if the CO₂ emissions in the test is more than 30% above the WLTP value. Furthermore, extreme high power and temperatures below -7°C are no valid RDE tests in EURO 6.

As a consequence, EURO 7 limit functions are designed to fit for test conditions down to -7°C and for “normal” trips with full loaded vehicles. Impacts of more severe engine load conditions are discussed later.

From -7, to -10, -15, and -20 °C emissions during cold start increase to high levels. Excluding this from the test boundaries would exclude normal early morning winter conditions in Nordic European countries. However, insisting on a single limit would result in a high limit. Diesel vehicles will have increased emissions from the freezing of AdBlue below -10 °C, petrol vehicles should bring the catalyst to light-off temperatures from lower starting temperatures, leading to an extended cold start period and associated emissions. Given the current extended limit of -7 °C, the extension could be an increasing limit below this temperature. For example, from -7 to -20 °C, to cover European ambient morning temperatures.

Table 13: Comparative chassis dynamometer testing on one diesel vehicle, with outliers in bold

test	conditioning	time [s]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [mg/km]	PN [# /km]
WLTC	Cold 20°C	1800	131.00	0.06	0.05	22.00	3.64E+07
ERMES V8	Cold 20°C	1110	129.43	0.08	0.05	64.58	6.14E+07
ERMES V9	Hot	1193	160.90	0.06	0.03	26.90	4.66E+08
WLTC	Hot	1800	127.03	0.06	0.03	35.09	5.73E+08
ERMES V8	Cold20°C	1110	141.84	0.10	0.04	47.84	1.28E+10
RWC	Hot	1863	128.71	0.10	0.04	41.57	1.10E+10
RWC trailer/uphill	Hot	1863	238.21	0.21	0.06	<u>236.07</u>	4.30E+11
WLTC	Hot	1800	128.32	0.11	0.03	74.76	1.54E+09
IUFC + Stop & Go	Cold -20	4288	356.03	<u>0.47</u>	0.05	<u>654.25</u>	1.41E+11
IUFC + Stop & Go	Cold -10	4288	302.98	0.26	0.04	<u>483.57</u>	4.89E+10

Table 14: Comparative chassis dynamometer testing on one petrol vehicle, with outliers in bold

test	conditioning	tine	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [mg/km]	PN [# /km]
WLTC	Hot	1800	121.62	0.04	0.03	13.96	2.96E+10
WLTC	Cold 20°C	1800	129.46	0.07	0.02	12.41	8.11E+10
ERMES V8	Hot	1101	118.06	0.10	0.00	3.35	8.26E+10
ERMES V9	Hot	1193	128.12	0.15	0.00	5.03	8.64E+10
ERMES V8	Cold 20°C	1110	129.44	0.04	0.00	1.97	4.20E+10
RWC	Hot	1863	119.19	0.01	0.00	7.11	7.40E+10
RWC trailer/uphill	Hot	1863	198.40	0.29	0.01	6.28	<u>6.72E+12</u>
WLTC	Hot	1800	122.42	0.05	0.02	15.14	5.73E+10
IUFC+Stop & Go	Cold -15	4288	325.12	<u>1.08</u>	<u>0.26</u>	<u>59.88</u>	1.01E+11
ERMES V8	Cold 20°C	1110	120.66	0.11	0.00	0.21	1.46E+09
ERMES V9	Hot	1193	130.15	0.16	0.00	0.08	9.66E+10

The large data set shown in Figure 19 includes temperatures down to ca. 0°C. Down to this temperature range no significant impact on emissions was observed from these data. Only lower

ambient temperatures show an increase beyond the normal bandwidth observed in the wide range of real-world testing.

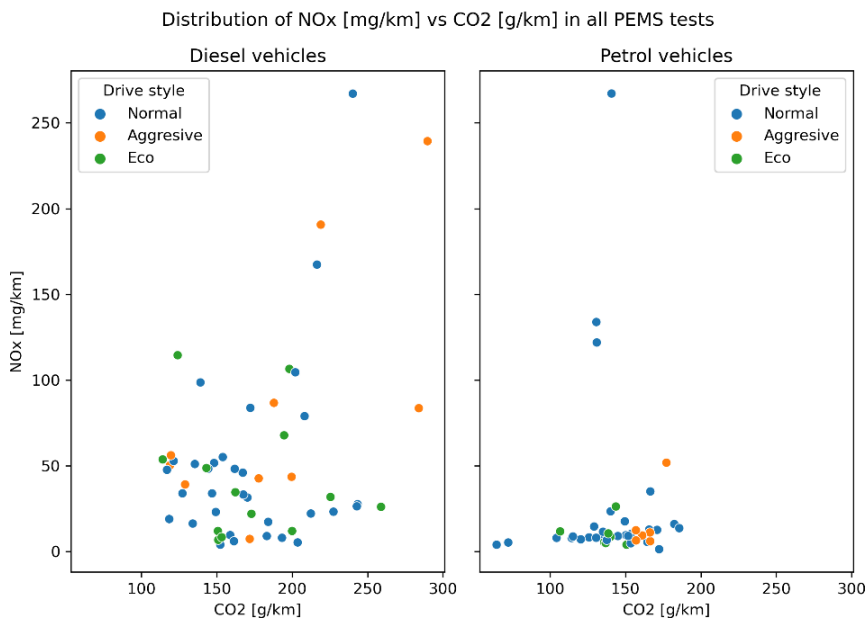
Emission dependency when the engine is warm

The higher emissions during the cold start period are accounted for within the cold start offset described above. The remaining two parameters are therefore determined using only emissions resulting from a warm engine.

When considering the average emissions in Table 13 and Table 14, high power demand does lead to increased NO_x and PN emissions. This begs the question whether special provisions should be taken, or whether high power capabilities should come with sufficiently sized engine and after treatment. The emission increases observed here should not be replicated in a proposal for EURO 7 as such, as they are clearly the result of the limitations of current RDE legislation.

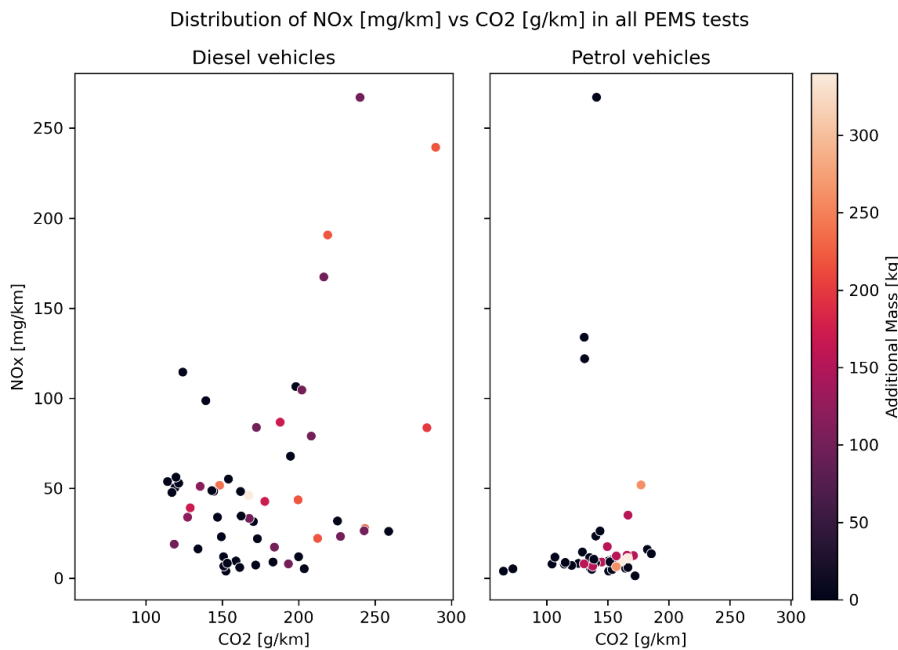
The possible load-dependency of warm emissions was investigated. A number of PEMS tests were performed with three different driving styles (Figure 20) and including additional mass (Figure 21). These PEMS tests were all over 80 km in length. Furthermore, monitoring data of 7 diesel vehicles was examined, as shown in Figure 22. Considering current measurements, no clear trend for a load dependent factor for warm emissions is visible. Although significant spread is observed, the absence of a clear trend suggests no need for an increased upper bound.

Figure 20: Distribution of NO_x emission against CO₂ emission during PEMS measurements with varying drive style for Euro 6d and Euro 6d-Temp vehicles.



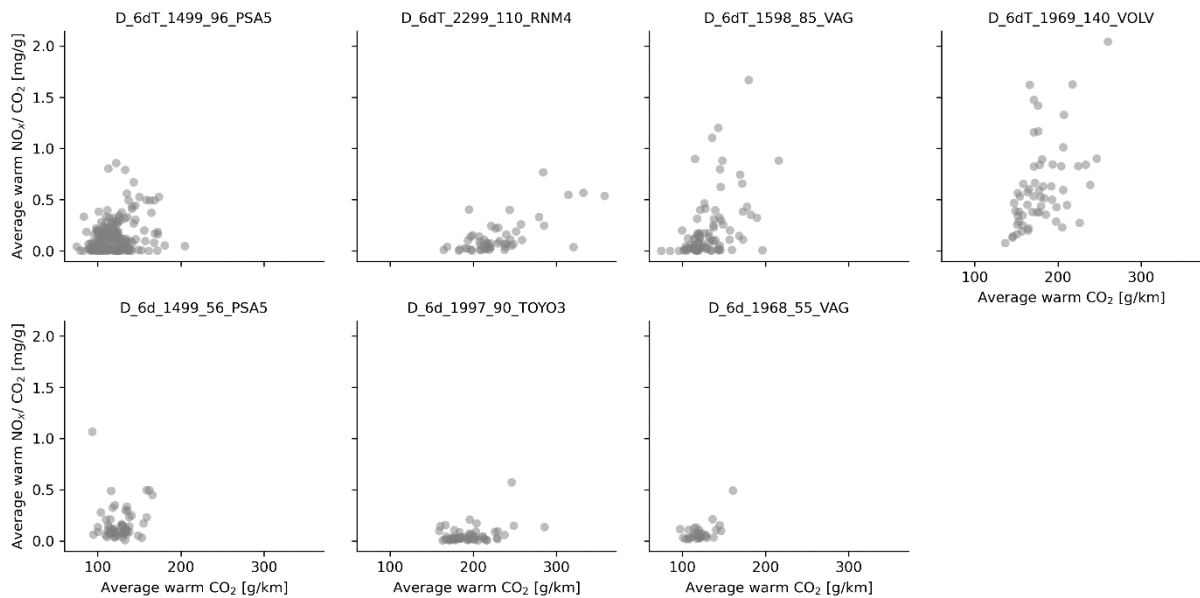
Source: own figure, TNO

Figure 21: Distribution of NO_x emission against CO₂ emission during PEMS measurement with variation of added mass for Euro 6d and Euro 6d-Temp vehicles.



Source: own figure, TNO

Figure 22: Correlation between the ratio of NO_x and CO₂, and the CO₂ emissions during a trip. Each point is one trip.

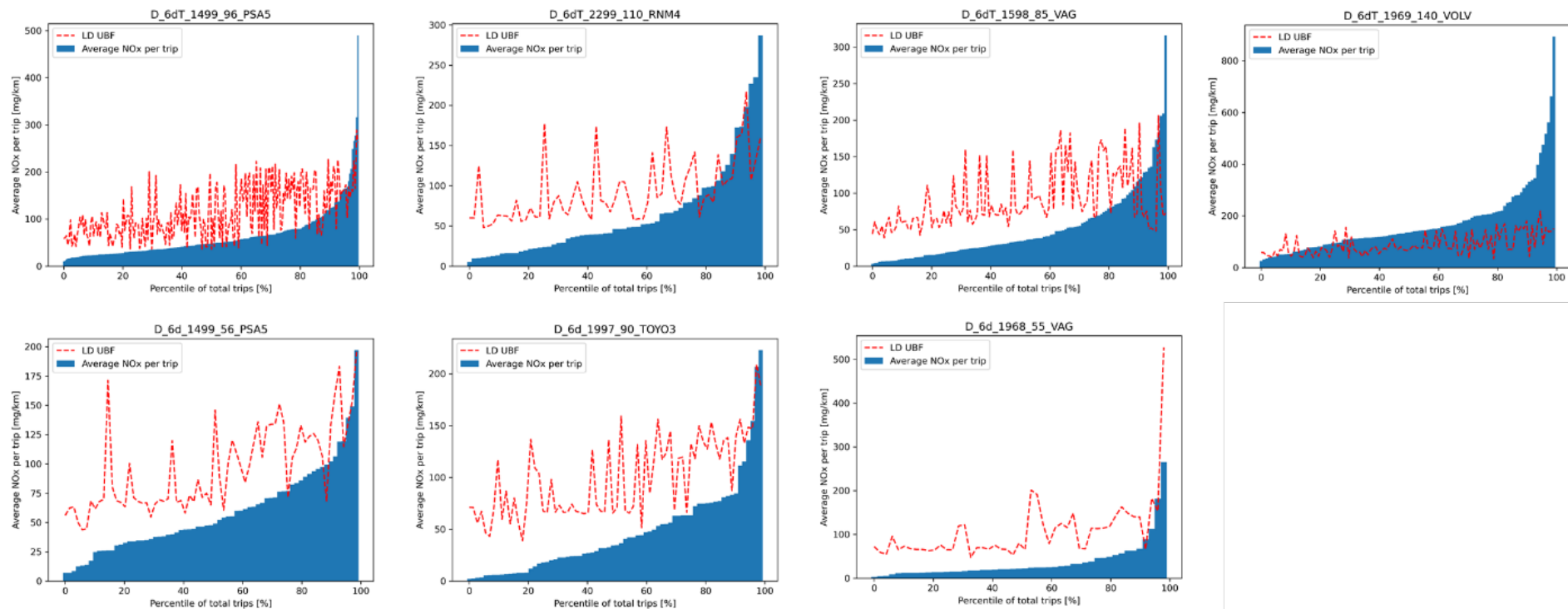


Source: own figure, TNO

LD UBF implementation for on-road measurements E_{UB} for NO_x emissions from LD UBF are calculated for the on-road measurement data of 7 different Euro 6d-Temp and Euro 6d vehicles, and visualised in Figure 23. The blue bars show the average measured NO_x sorted in increasing order while the red lines show the UBF result for each corresponding test. Apart from

D_6dT_1969_140_VOLV, the vehicles show high compliance rate to LD UBF. The fluctuations in the E_{UB} are mainly caused by the variation of trip distance. It was observed that trips with both a cold start and DPF regeneration, and lengths down to 29 km, could still comply with the NO_x LD UBF. Trips over 40 km with a DPF regeneration all complied with LD UBF.

Figure 23: LD UBF implementation for NOx emissions for on-road measurements of Euro 6d and Euro 6d-Temp vehicles



Source: own figure, TNO

Results for EURO 7 Demonstrator Vehicles

This chapter presents the results of a Euro 7 diesel demonstrator vehicle. The measurement data was kindly provided by Bosch. Analysis and conclusion are produced by TUG and do not necessarily reflect the views of Bosch.

First the measurement results are presented and then the “Upper Bound Function (UBF)” is presented including an analysis of the influence of temperature and load conditions on the emissions. The available measurement data includes HC, CO and NO_x emissions. The vehicle is a typical C-segment passenger car equipped with high and low pressure EGR. The exhaust gas after treatment includes a twin-dosing SCR system, a DOC, a DPF and an ASC. The catalytic system has a thermal ageing condition of approx. 200 000 km. Since no information on possible additional deterioration effects are available yet, we have not considered chemical aging in the limit functions separately²⁹.

Table 15 shows the driving cycles with their measurement results that were used to develop the emission functions. The WLTC is the test cycle for type approval on the chassis dynamometer. The ERMESv8 and EMRESv9 represent more dynamic driving situations with the ERMES v9 having a maximum speed up to 150 km/h. The IUFC cycle consists of a micro cycle which is repeated 9 times to analyse the distance and time with cold start impacts on emissions. In addition, the IUFC is followed by an HBEFA Stop&Go cycle, which is used to investigate the cooling effects of the exhaust aftertreatment system.

Table 15: Test cycles and measured emissions for the elaboration of the emission functions

Test cycle	Test mass	Temperature	NO _x [mg/km]	CO [mg/km]	HC [mg/km]
WLTC cold start	normal	23°C	10	44	20
ERMESv8 hot start	normal	23°C	3	16	9
ERMESv9 hot start	ultra-high *	23°C	18	11	6
IUFC & StopGo cold start	low **	23°C	15	90	92
IUFC & StopGo cold start	low **	-10°C	19	146	112

* Represent a larger vehicle or driving with loaded trailer

** Lowest load setting on the base vehicle

We determined the offset factors (E_{start}) for the emission functions from the WLTC and IUFC at 23°C. The parameters E_{time} ³⁰ and E_{km} were also determined with WLTC, IUFC and ERMES, taking the highest value per parameter to reflect the worst-case conditions.

For the demonstrator vehicle, we observed a temperature dependency of several parameters of the UBF by comparing the IUFC & StopGo cycles from Table 15³¹. Table 16 shows this

²⁹ The data used later as basis for the limit functions are tests on serial production cars and include chemical aging randomly (but tested vehicles had rather low mileage).

³⁰ The determination of the E_{time} parameter for NO_x and CO was conducted in a different way for the Euro 7 demonstrator vehicle compared to all other functions for LDVs. The E_{time} parameters represent in this case idling emissions, as the determination was made during vehicle stop phases. For the HC emissions we could not observe a significant distance dependency, so we determined only a time dependency out of the IUFC (which represent the worst case for HC).

³¹ It should be noted that more low-temperature measurements with different starting conditions (warm and cold start) would make the results more robust.

dependency expressed as factors between -10°C and 23°C. The very low level of the measurement results in Table 15 has to be taken into account when interpreting the values. Consequently, the offset factors (E_{start}) may be set to the value at -7°C and only below this level the increase of emissions is considered in a function. Such a low temperature function should also consider the freezing of AdBlue at -12°C which need some reasonable test conditions for tests with frozen reagent.

Table 16: Temperature dependency of the coefficients between -10°C and 23°C

Factor -10°C/23°C	NO _x [-]	CO [-]	HC [-]
Factor for E_{start}	1.135*	1.84	--
Factor for E_{time}	5	2.18	1.286
Factor for E_{km}	2.97	-	-

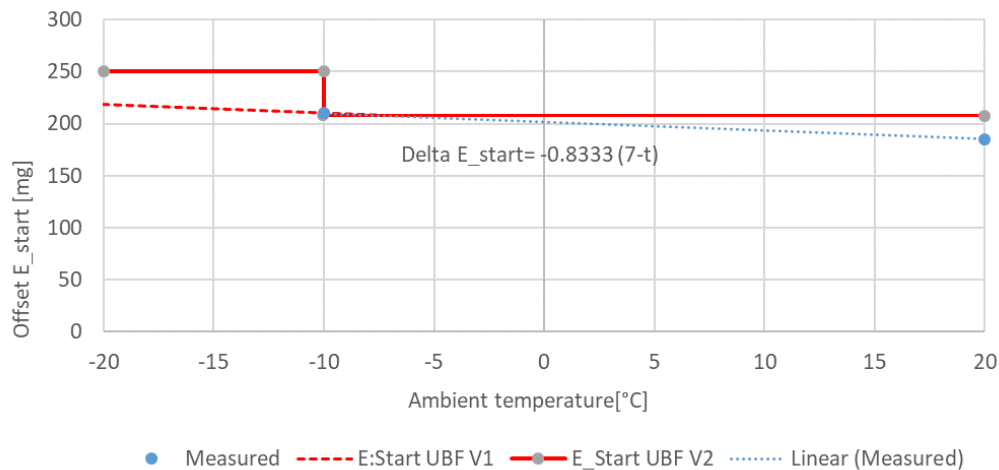
* e.g. the NO_x offset parameter (E_{start}) at -10°C is 1.135 times greater than at 23°C

Figure 2 shows the cold start extra NO_x emissions measured in the IUFC as a function of temperature and two possible simplification for the UBF. Version V1 is a linear increase below -7°C following the measured trend. Version V2 is a step function, which considers any test below -10°C down to e.g. -20°C and thus fully frozen AdBlue with extra emission allowance for defrosting of a small amount of the reagent for fast dosing during the driving. Overall, it seems to be more reasonable to define the offset (E_{start}) according to V2 for -10°C and add a constant factor for all tests started at lower temperatures. In both cases, also lower temperatures would lead to valid tests. If starts at temperatures below e.g. -10°C are defined as invalid, as in the current EU 7 proposal from AGVES meeting 04/2021, additional provisions seem to be necessary to avoid possibly high emissions during morning cold starts in winter in cold European areas.

It has to be noted, that a worst-case cold start for NO_x from diesel engines, is a start with almost empty SCR, i.e. no NH₃ stored in the closed coupled SCR due to high load driving directly before the engine was stopped in the trip before³². The tests performed on the Euro 7 demonstrator did not explore this further.

³² At high temperatures the NH₃ storage capacity of SCR catalysts is very low. Also, long would empty current SCR systems since AdBlue dosing needs above ca. 210°C for hydrolysis and thermolysis. Dosing during idling could be managed with excessive heating by engine settings and/or by a small E-catalyst onto which the Adblue is sprayed.

Figure 24: Temperature dependency of the initial offset (E_{start}) for NO_x in the IUFC and possible application in the UBF



Source: own figure, TNO

The variation of load conditions showed influences on the emissions for the demonstrator, especially on NO_x. For CO and HC we could not find any significant load dependence. One option to analyse the load dependency is to use the positive work at the wheel as load dependent parameter. We worked out the NO_x load factors by comparing the ERMESv8 with normal mass and the ERMESv9 with ultra-high mass. Table 17 gives an overview on the dependencies identified. We calculated these factors by dividing the offset emissions (E_{start}) of the ERMESv9 by the offset emissions (E_{start}) of the ERMESv8 and by dividing the E_{km} of the ERMESv9 by the E_{km} of the ERMESv8. It is not clear whether these factors reflect the exact load-dependent emission behaviour even during a cold start.

Table 17: Load dependency of the coefficients between the ERMESv8 and the ERMESv9 ultra high

Factor ERMESv9 ultra high/ERMESv8 normal	NO _x [-]
Initial offset E_{start}	1.333*
Factor for E_{km}	21.9

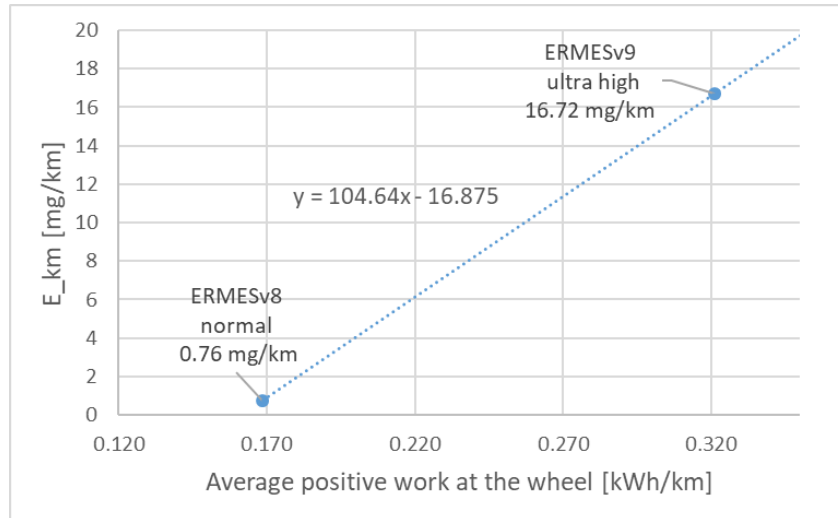
* e.g. the NO_x offset (E_{start}) for the ERMESv9 ultra high is 1.333 times greater than for the ERMESv8 normal

As an example, Figure 25 shows the load dependency of the NO_x emissions per kilometre (E_{km}) between the two mentioned ERMES cycles.

The load dependency results most likely mainly from the dependency of the conversion of emissions in the catalyst on the space velocity (SV). The SV [1/s] is defined as exhaust volume flow [m³/s]/ catalyst volume [m³]. Since the transport of gases to the catalytic surfaces and the chemical reactions need some time, a longer residence time in the catalytic converter lead to higher conversion rates. This dependency on the exhaust volume flow can be reduced by applying larger catalysts but will still remain on lower level. The dependency on the space velocity can be overlapped by the temperature dependency of reactions (higher temperature leads to faster reactions). Thus, conversion rates in catalysts are higher at high loads than in low loads. The temperature dependency is less relevant for the EURO 7 demonstrator than for serial EURO 6 vehicles, since the demonstrator vehicle has better heating strategies in low load driving

which prevents heavy drops in the conversion efficiencies at low loads. This may explain the different findings for the demonstrator and for the serial cars tested within WP2.

Figure 25: E_{km} calculated from tests with different load and driving resistances on the chassis dynamometer plotted over the positive work at the wheel



Source: own figure, TNO

By combining all the parameters described before, the following UBFs (Upper Bound Functions) for NO_x , CO and HC were developed to represent the emission behaviour of the demonstrator vehicle. The functions consider significant influences on cold start and on the distance parameter (E_{km}). The detailed explanation of the terms in the temperature and load functions can be found in Annex B.5.1.

$$E_{NOx} = 185 * F(t)_{E_start_NOx} * F(w300)_{E_start_NOx} + 0.0001 * F(t)_{E_time_NOx} * Time + (2.951 * F(t)_{E_km_NOx} + 0.76306 * F(w)_{E_km_NOx}) * Distance \quad \text{Formula 7-1}$$

$$E_{CO} = 910 * F(t)_{E_start_CO} + 0.02765 * F(t)_{E_time_CO} * Time + 13.603 * Distance \quad \text{Formula 7-2}$$

$$E_{HC} = 250 + 0.35 * F(t)_{E_time_HC} * Time \quad \text{Formula 7-3}$$

E_{NOx}	UBF for Nitrogen oxides [mg]
E_{CO}	UBF for Carbon monoxide [mg]
E_{HC}	UBF for Hydrocarbons [mg]
$F(t)_{E_start_NOx}$	Function to cover the temperature dependency of the cold start offset D for NO_x [-]
$F(t)_{E_start_CO}$	Function to cover the temperature dependency of the offset D for CO [-]
$F(t)_{E_time_NOx}$	Function to cover the temperature dependency of the emissions per second (E_{time}) for NO_x [-]

$F(t)_{E_time_CO}$	Function to cover the temperature dependency of the emissions per second (E_{time}) for CO [-]
$F(t)_{E_time_HC}$	Function to cover the temperature dependency of the emissions per second (E_{time}) for HC [-]
$F(t)_{E_km_NOx}$	Function to cover the temperature dependency of the emissions per kilometre (E_{km}) for NO _x [-]
$F(w300)_{E_start_NOx}$	Function to cover the load dependency over the first 300 seconds [-]
$F(w)_{E_km_NOx}$	Function to cover the load dependency of E_{km} for NO _x over the entire test [-]
<i>Time</i>	Test duration [s]
<i>Distance</i>	Test distance [km]

The calculation of the positive engine work in RDE tests is related to high uncertainties due to influences of (side)wind, inaccuracies in gradient measurements, etc... Since the work at the wheel [kWh/km] is influencing the specific fuel consumption and thus CO₂ emissions [gCO₂/km] proportionally, the load dependency of some parameters may be considered by a function using the measured CO₂ emissions. The function may use the CO₂ per km ratio between the RDE measurement and the WLTC as already done in the EURO 6d regulation.

The CO₂-based approach is simpler than the one using the positive work per km and allows to consider (very) high load conditions with additional permitted emissions in order to prevent the need for (extreme) large catalysts. If the extra allowance is applied only for extreme loads, the overall impact on the average real-world emissions should be low. Furthermore, the emission limits could be set lower for normal driving by still allowing tests e.g. with trailers, if extreme loads lead to higher emission allowances.

In the following an option for such a CO₂-based correction could be designed. In this approach a load correction is only applied if the RDE run has 25% more CO₂ per km than the WLTC. For simplicity, the slope of the CO₂-dependent correction function was calculated using the results of the UBF_{NO_x} function for different tests³³. The resulting UBF for NO_x with CO₂ correction (UBF_{NO_x,CO₂corr}) is shown in the equation below. The detailed explanation of the terms for the CO₂ correction function (F(CO₂)) is given in Annex B.5.1.

$$E_{NOx_CO2corr} = 185 * F(t)_{D_NOx} * F(CO_2) + 0.0001 * F(t)_{E_Idle_NOx} * Time + (2.951 * F(t)_{E_km_NOx} + 0.76306) * Distance * F(CO_2) \quad \text{Formula 7-4}$$

$E_{NOx_CO2corr}$	UBF for Nitrogen oxides with CO ₂ correction [mg]
$F(CO_2)$	Function to for extra emission allowance at high load conditions [-]

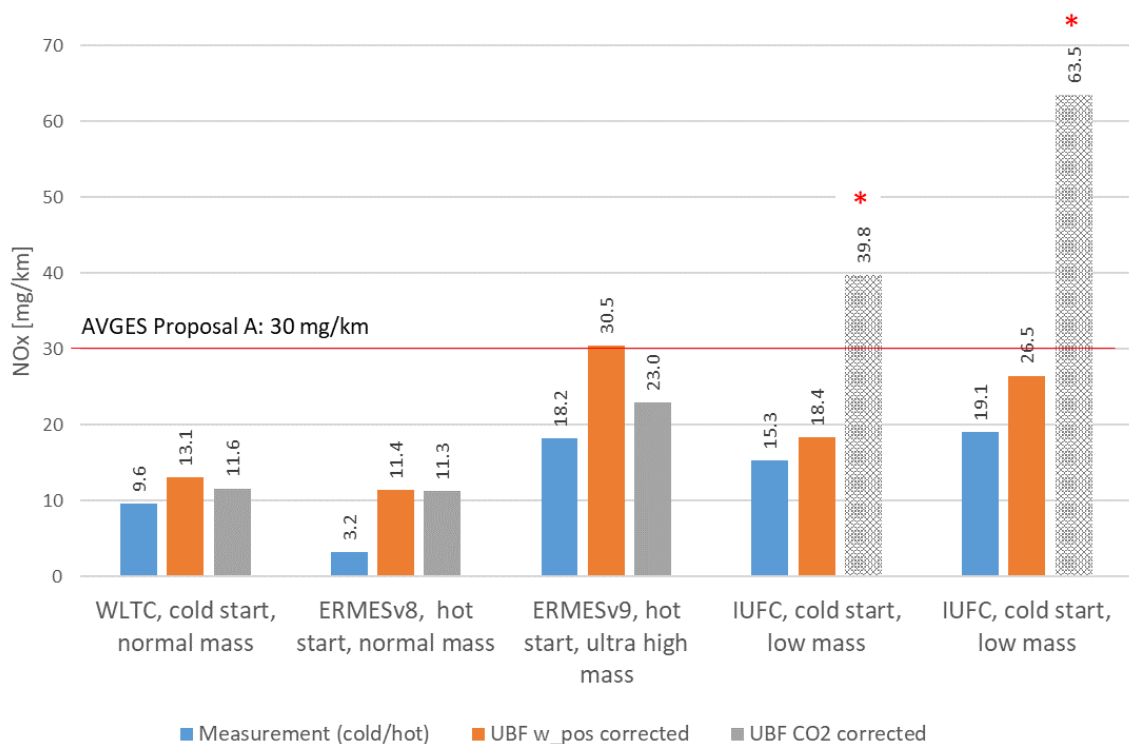
³³ For a mathematically exact calculation of the CO₂ based allowance parameter, the function needs to be elaborated for the different parts of the function separately (E_{start} , E_{km} , E_{time})

Figure 26 shows the application of the elaborated UBFs and the measured emissions for NO_x. The measurements include both warm and cold starts. The functions always represent worst-case, cold start test conditions, as already mentioned. Thus, measured emissions in hot tests and in moderate driving conditions are lower than the UBF results.

A critical effect of the CO₂-based correction can be seen in Figure 26: low load cycles with high CO₂ emissions per km (e.g. IUFC) lead also to extra emission allowances. If the CO₂ correction approach is applied in EURO 7, details for this problem need to be clarified. For example, one possible approach would be to apply the CO₂-based correction only for tests with average speeds above 50km/h, i.e. not for urban driving. This limitation would lead to a “UBF CO₂-corrected” emission level for the IUFC tests on the level of the “UBF w_{pos} corrected”.

The analysis also shows that the volume of the underfloor catalyst should be increased compared to the demonstrator vehicle in order to stay in very high load conditions below the AGVES proposal A (30mg NO_x/km).

Figure 26: Application of the UBF_{NOx} and the UBF_{NOx_CO2corr} function compared to measured values



Source: own figure, TNO * Issues with low load cycles with high CO₂ emissions

Summary and Comparison with AGVES Proposals

We have examined PEMS data for 4, and monitoring data for 7, different 6d-Temp and 6d light-duty vehicles. A Euro 7 demonstrator has also been analysed. Using this data, we have constructed an initial set of factors that can be used for the UBF

$$E_{UB} = \frac{E_{start} \times f(T) \times g(CO_2) + E_{time} \times time + E_{km} \times distance}{distance}$$

where

$$f(T) = \begin{cases} -0.1 \times T + 0.3, & T \leq -7 \\ 1, & T > -7 \end{cases}$$

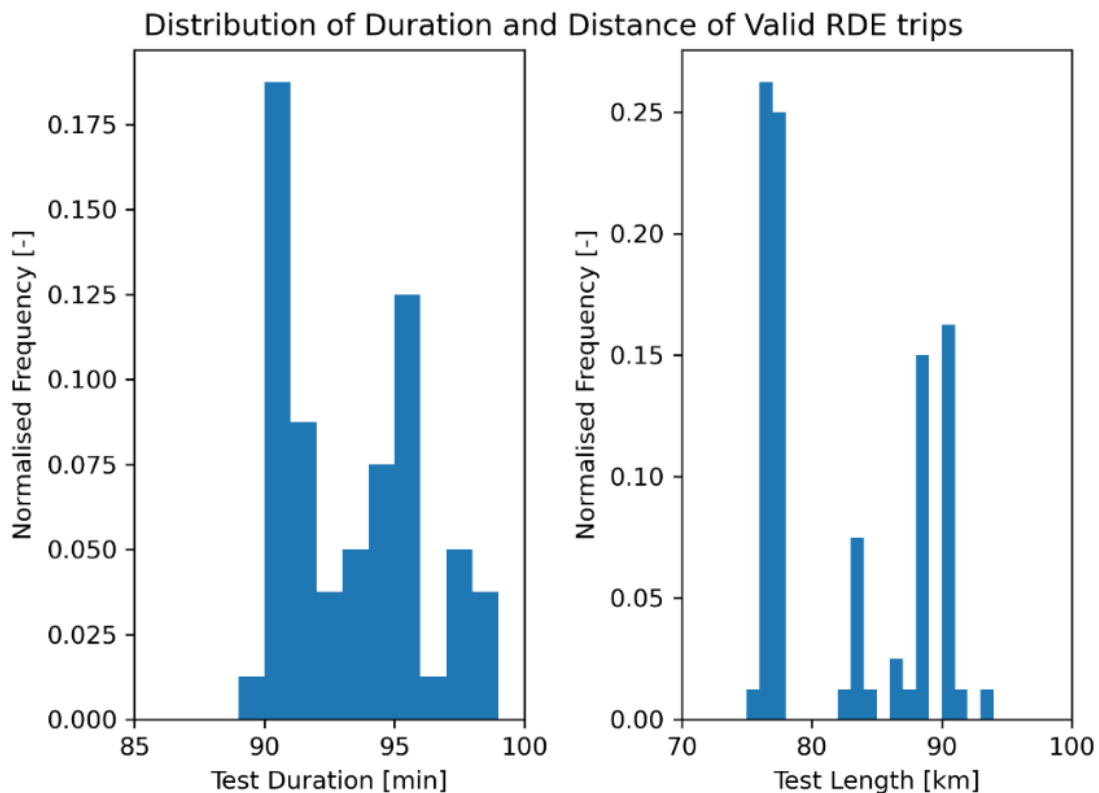
and $g(CO_2) = 1$. The pollutant-dependent factors calculated for Euro 6d-Temp and Euro 6d are given in Table 12. For simplification, no dependency on engine power or CO₂ ("g(CO₂)") was considered in the UBFs.

As shown in the previous section and discussed in this section, there is a clear reduction potential when comparing the calculated E_{UB} with better performing vehicles. This would suggest a reduction in the UBF emission coefficients can be made. The reduction potential, and reduced factors are discussed in the next chapter.

Variation of E_{UB} for RDE trips

For several different RDE trips, E_{UB} is calculated using the emission coefficients in Table 12, as well as the results of the Euro 7 demonstrator. Figure 27 shows a distribution of trip durations and distances of various valid RDE trips. The trip duration spans mainly from 85-100 minutes, with distance ranging from 75 to 95 km.

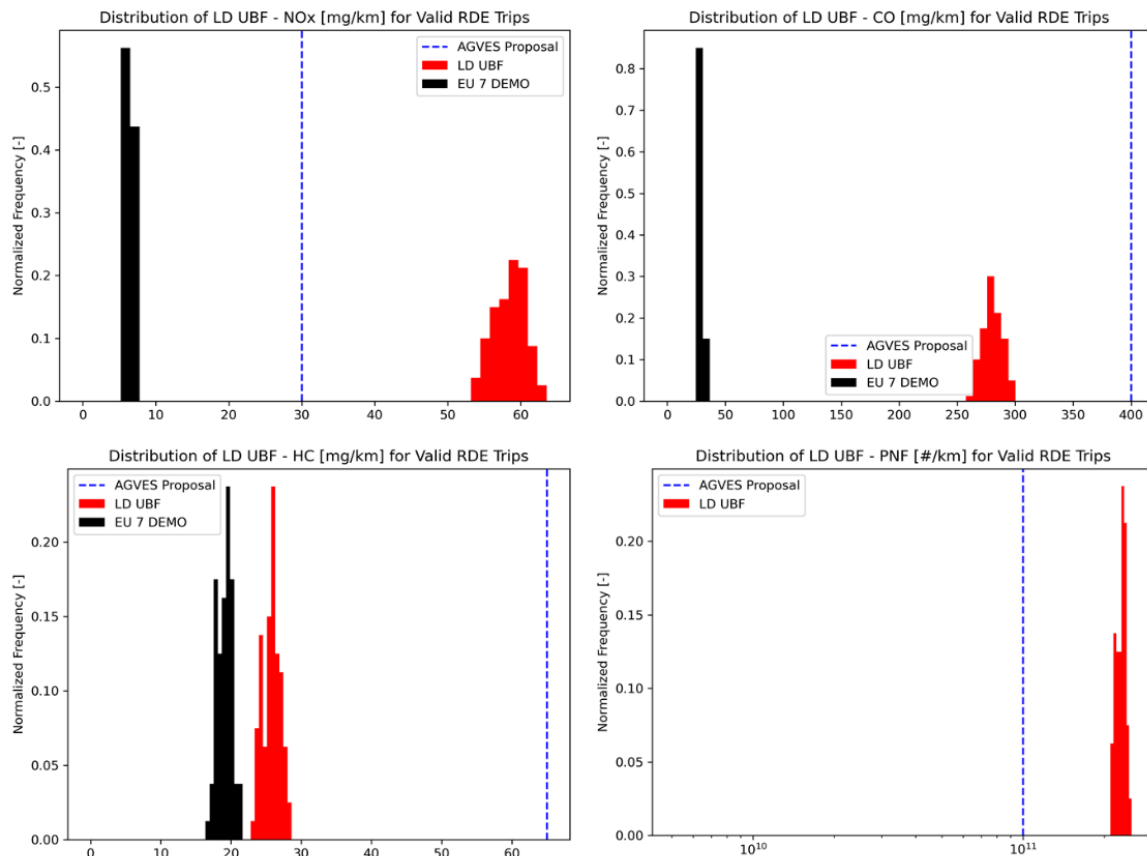
Figure 27: Variation of test duration and test distance of several valid RDE trips.



Source: own figure, TNO

Using the collected test duration and test distance, the distribution of the LD UBF for NO_x, CO, and HC emissions are visualized in Figure 28. Note, however, that as these trips are all long trips, they do not fully demonstrate the flexibility of the UBF, especially in the cases of trips of various lengths. This is demonstrated in the following sections.

Figure 28: Distribution of E_{UB} from LD UBF and Euro 7 Demo UBF based on valid RDE trips. Temperature-dependence corrections are applied, however, load-dependence and/or CO_2 -dependence corrections are not applied.



Source: own figure, TNO

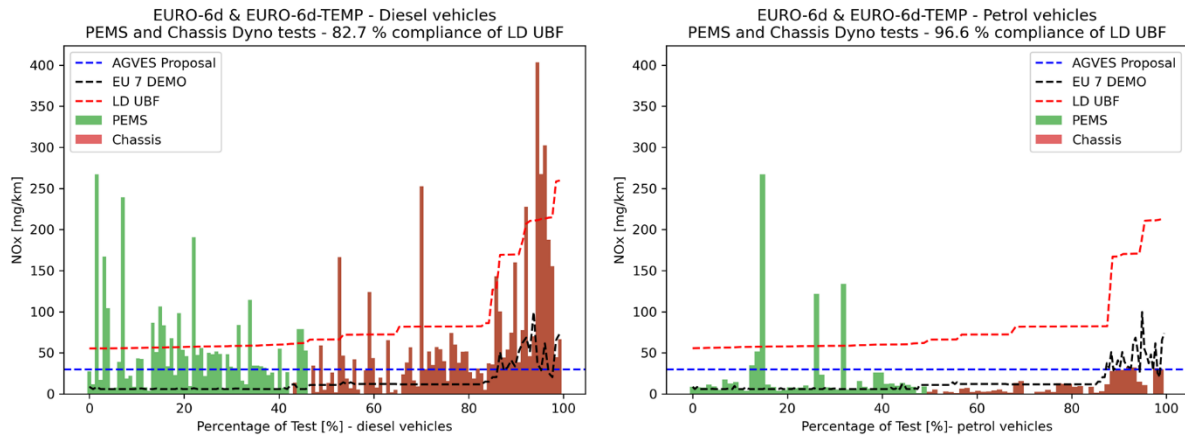
Implementation of E_{UB} on measurement data

E_{UB} is calculated for Euro-6d and Euro-6d Temp vehicles data filtered from UBA measurement dataset. This filtered dataset, which will be referred as the **UBA Dataset**, contains 101 PEMS test and 114 chassis dynamometer tests, measured from 31 Euro-6d and Euro-6d Temp vehicles. The chassis dynamometer tests are generally the results of sub-cycles of real-world driving tests, like the CADC test.

Using a Euro 7 demonstrator, a formulation of the UBF (Upper Bound Function) has also been made. This also includes correction based on temperature-dependence, load-dependence, and/or CO_2 -dependence. The corrections are implemented into the calculation of E_{UB} where the ambient temperature was recorded and a WLTC test was performed.

Figure 29 visualizes the overview of average NO_x emission per trip. Three different values are visualized: E_{UB} as calculated by LD UBF and Euro 7 demo UBF (based on the test data from the Bosch demo diesel car,) and the AGVES proposal. It can be shown that the LD UBF calculates the highest values, compared to the EU7 demo UBF and AGVES proposal. The high values are primarily caused by the high E_{time} constant, which introduces a high offset for long-duration trips. The highest E_{UB} from LD UBF for NO_x at 259.55 mg/km is derived for a chassis dynamometer test using a "CADC Urban" cycle, of roughly 5 kilometres. Average NO_x emissions from serial Euro 6 diesel vehicles are higher compared to petrol vehicles. This resulted in lower compliance ratio for diesel vehicles compared to petrol vehicles.

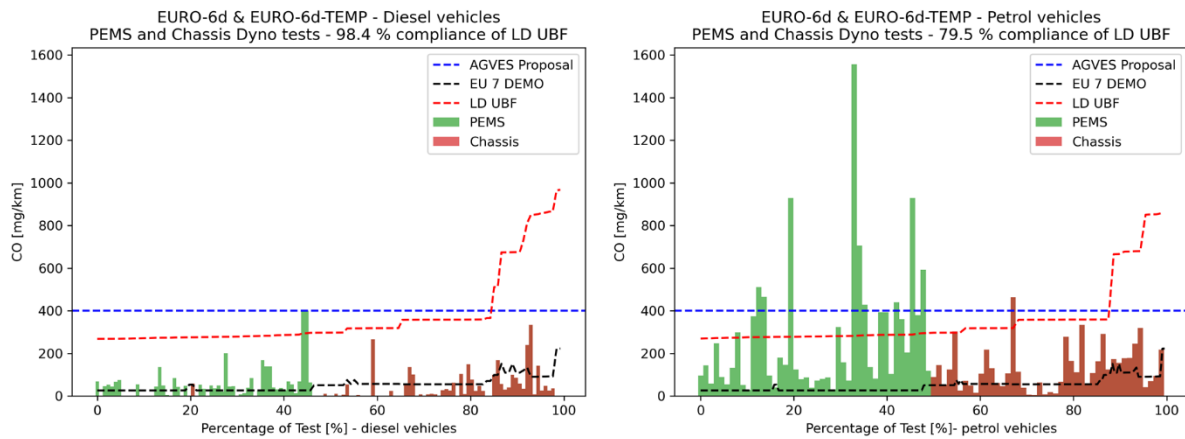
Figure 29: Distribution of NO_x emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF, EU7 demo UBF, and AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

Figure 30 shows the average CO emission per trip with the calculated E_{UB}. Diesel vehicles have lower average CO emission compared to petrol vehicles, which resulted in higher compliance ratio in diesel vehicles. Note that in this case, most trips have lower E_{UB} values than the AGVES proposal.

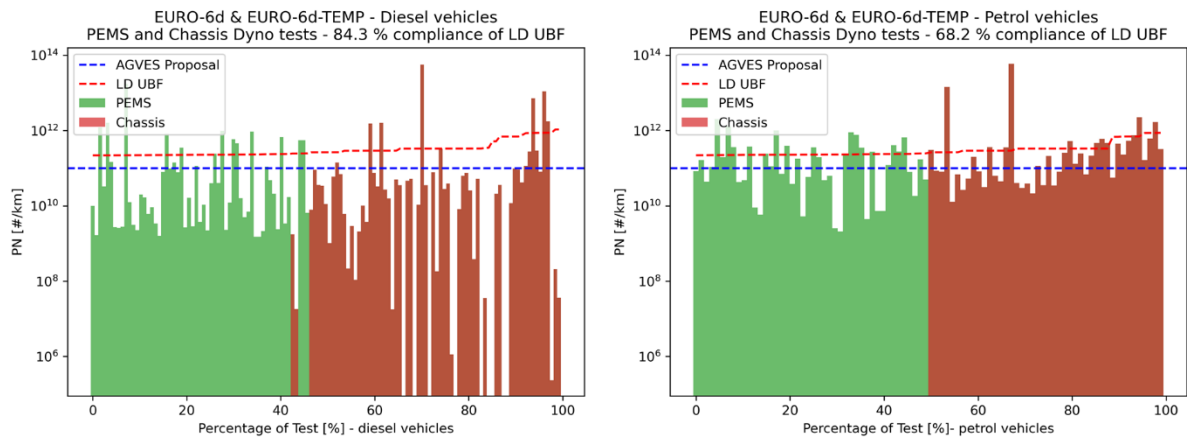
Figure 30: Distribution of CO emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF, Euro 7 Demo UBF, and AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

The trends of Figure 30 are also seen in Figure 31 where lower PN emissions from diesel vehicles resulted in higher compliance ratio compared to petrol vehicles.

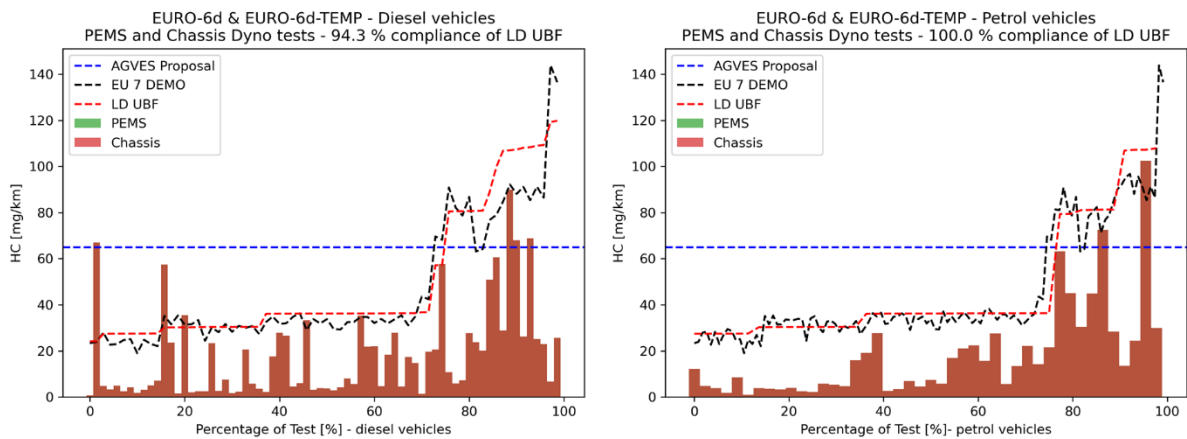
Figure 31: Distribution of PN emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF and AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

Figure 32 shows the HC emission from all the chassis dyno test programmes. The LD UBF line and the EU 7 demo UBF line show very similar behaviour.

Figure 32: Distribution of HC emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF, EU 7 demo UBF, and AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

Implementation of E_{UB} based on the dataset of a diesel Euro 6d-Temp vehicle

The calculation of E_{UB} for NO_x , CO, and HC are implemented using measurement results of a diesel Euro 6d-Temp vehicle: Mercedes E200d. This vehicle was one of the best performing vehicles that was used for the formulation of E_{UB} .

Table 18 shows the trip parameters of the WLTC cycle, an aggressive RDE trip, and IUFC (Inrets – Urbain Fluide Court) cycle. The ambient temperature is noted as 23 °C, though this does not have implications at this temperature. E_{UB} for the WLTC test at -10°C is also calculated for comparison, however, measurement data is not available for visualisation.

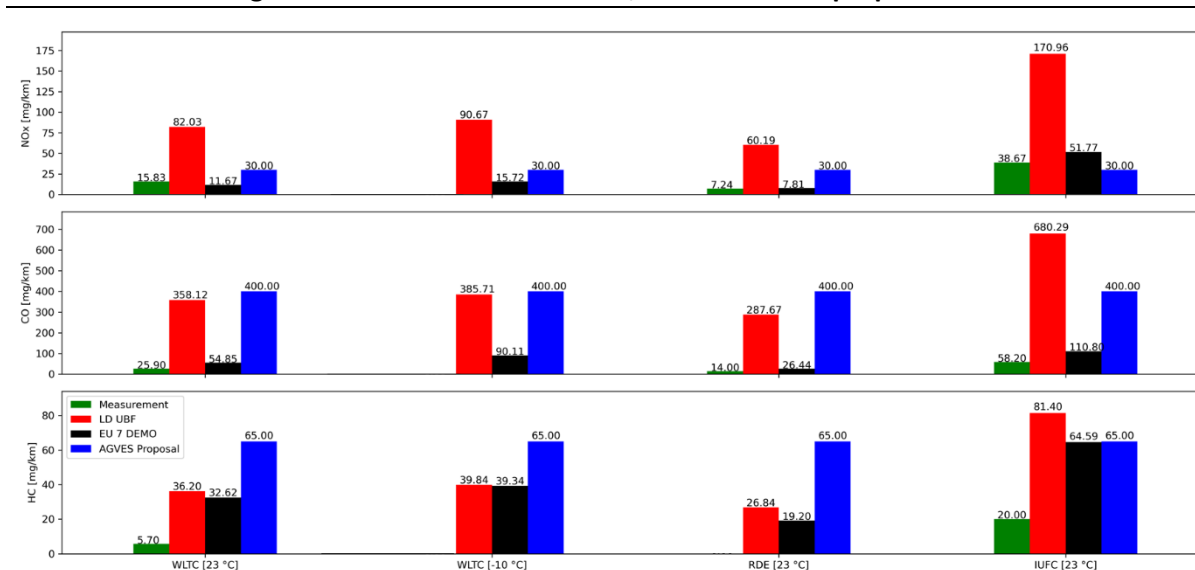
Table 18: Parameters defining the standardised tests during the measurement program of Mercedes E200d

Test name	Duration [s]	Distance [km]	Ambient Temp [°C] ¹⁾	CO ₂ / CO ₂ WLTC [-]	Average Positive Work [kWh/km]
WLTC [23 °C]	1800	23.27	23	1	0.201
WLTC [-10 °C]	1800	23.27	-10	1	0.201 ²⁾
RDE [23 °C]	6361	84.6	23	1.39	N/A
IUFC [23 °C]	1889	9.98	23	1.81	0.286

Remarks: 1) As ambient temperature was not measured, it is assumed at 23°C. 2) As there is no measurement data, average work on WLTC at -10°C is assumed to be equal to WLTC at 23°C.

The measurement data, calculated E_{UB} and AGVES proposed emission limit are visualised in Figure 14.

Figure 33: Comparison of average emissions of a Euro 6d diesel car with those calculated using LD UBF and Euro 7 Demo UBF, and the AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

For all emissions, IUFC cycle results in the highest E_{UB} for LD UBF and Euro 7 Demo UBF. The combination of low average speed throughout the cycle and the corresponding long duration of the test, results in high calculated E_{UB} . For NO_x emissions, the Mercedes E200d does not comply to the EU7 demo UBF during WLTC at 23°C nor with the AGVES proposed limit in the IUFC cycle at 23 °C. The LD UBF for NO_x emission is the highest among the investigated values. For CO emissions, the Mercedes E200d complies to all the E_{UB} as the vehicle emits very low CO emission. LD UBF for WLTC and RDE are close to the AGVES proposed value, however, they are the highest when applied for IUFC at 23 °C. For HC emission, the E_{UB} from LD UBF and Euro 7 Demo UBF are closely matching, except for the IUFC cycle at 23 °C.

The differences between the values calculated using parameters determined for the Euro 7 demonstrator, and those determined with Euro 6d-Temp and Euro 6d vehicles, show a reduction potential. This is discussed further in the next chapter.

B.2.2 Application for HDVs

This section describes the upper bound function for HDVs. We elaborated different functions for the best performer Euro 6 D truck, for an average Euro 6 truck represented by the database of the HBEFA 4.1 and for a Euro 7 demonstrator.

We elaborated the upper bound functions in a similar way as already shown for the Euro 7 demonstrator diesel car. The main difference is the change of the distance-based part E_{km} to the engine work based part E_{kWh} according to the specifications of HDVs.

Results for best performing EURO 6 D

This section deals with the best performer Euro 6 D truck, a Mercedes Benz Actros, and describes the measurement data and the approach to determine the upper bound functions. The engine of the vehicle has a displacement of 12.8 litres and a rated engine power of 330 kW. We used WHTC (cold start) and ISC (hot start) tests measured at different ambient temperatures for the elaboration of the upper bound functions. In our analysis we considered NO_x , CO, N_2O and PN emissions. The test data is described in Annex A. Table 19 gives an overview on the driving cycles and the corresponding measurement results used to develop the upper bound functions.

Table 19: Test cycles and measured emissions for the elaboration of the upper bound functions for the EURO 6 D best performer

Test cycle	Altitude	Ambient temperature	NO_x [mg/kWh]	CO [g/kWh]	N_2O [mg/kWh]	PN [# /kWh]
ISC - hot start	sealevel	-14°C	428	51	51	4.89E+10
	1200m	-14°C	473	95	93	1.53E+10
	sealevel	-7°C	545	75	75	2.08E+10
	1200m	-7°C	606	117	111	1.47E+10
	sealevel	25°C	159	26	143	1.32E+10
	1200m	25°C	141	27	76	2.57E+10
WHTC - cold start	sealevel	-14°C	340	33	65	1.43E+10
	sealevel	-7°C	298	101	74	1.29E+11
	sealevel	25°C	150	16	32	1.44E+10

The measurement data for the cold started WHTC at different ambient temperatures shows a temperature dependency for the cold start emissions and is included in the cold start emission part (E_{start}). This temperature dependency can be seen for all emission components.

The hot emission parts, emissions per second (E_{time}) and per kWh (E_{kWh}), show also a temperature dependency. In order to illustrate the emissions in the worst-case test conditions within tested driving situations, the temperature dependent functions are based on the highest parameter value per temperature independent within all altitudes shown in Table 19. It should be mentioned that the emissions per second (E_{time}) were analysed during a maximum idle time of 1000s. It is therefore not possible to predict the emissions during very long idle periods. In such long idling, the catalyst temperature will drop and, as a consequence, the emissions will

increase. Longer idling tests would deliver data for this case but have not been performed for this truck.

In the HDV test series for UBA Germany we recently measured a EURO 6 D truck over 2 hours continuous idling. The vehicle showed ca. 80g NO_x/hour during idling. This emission level was more than 2 times higher than during an ISC test with the same vehicle³⁴.

Since EURO 7 HDVs should apply heating measures to keep the catalysts in operation temperature also in long idling, such high long idling emission levels of EURO 6 are not relevant as basis for EURO 7 limits.

Table 20 shows the evaluated temperature dependency as factor between -7 °C and 20°C for the coefficients (E_{start} , E_{time} and E_{kWh}) of the upper bound functions.

Table 20: Temperature dependency of the coefficients between -7°C and 20°C

Factor -7°C/20°C	NO _x [-]	CO [-]	N ₂ O [-]	PN [-]
Factor for E_{start}	1.58*	3.50	3.03	6.16
Factor for E_{idle}	1.00	0.46	0.57	0.60
Factor for E_{kWh}	3.57	2.33	0.94	1.56

* e.g. the NO_x offset (E_{start}) at -7°C is 1.58 times greater than at 20°C

By combining all temperature depending terms, the following UBFs for NO_x, CO, N₂O and PN were developed in order to represent the emission behaviour of the Euro 6 D best performer. The functions are based on average driving situations (WHTC and ISC). Test data of worst-case tests are not available for the Euro 6 D best performer.

$$UBF_{NOx} = (40.1 - 0.6 * t) * P_{rated} + (0.0067598) * Time + (145.68 - 4.7769 * t) * Work \quad \text{Formula 7-5}$$

$$UBF_{CO} = (15.4 - 0.5 * t) * P_{rated} + (0.009 - 0.0003 * t) * Time + (6.4891 - 0.1612 * t) * Work \quad \text{Formula 7-6}$$

$$UBF_{N2O} = (0.2 - 0.006 * t) * P_{rated} + (0.3507 + 0.0082 * t) * Time + (92.393 + 0.2193 * t) * Work \quad \text{Formula 7-7}$$

$$UBF_{PN} = (1.66E10 - 6.58E8 * t) * P_{rated} + (3.2E7 + 6.69E5 * t) * Time + (2.15E10 - 3.14E8 * t) * Work \quad \text{Formula 7-8}$$

UBF_{NOx} Upper bound function for Nitrogen oxides [mg]

UBF_{CO} Upper bound function for Carbon monoxide [mg]

UBF_{N2O} Upper bound function for Nitrous oxide [mg]

UBF_{PN} Upper bound function for Particle number [#]

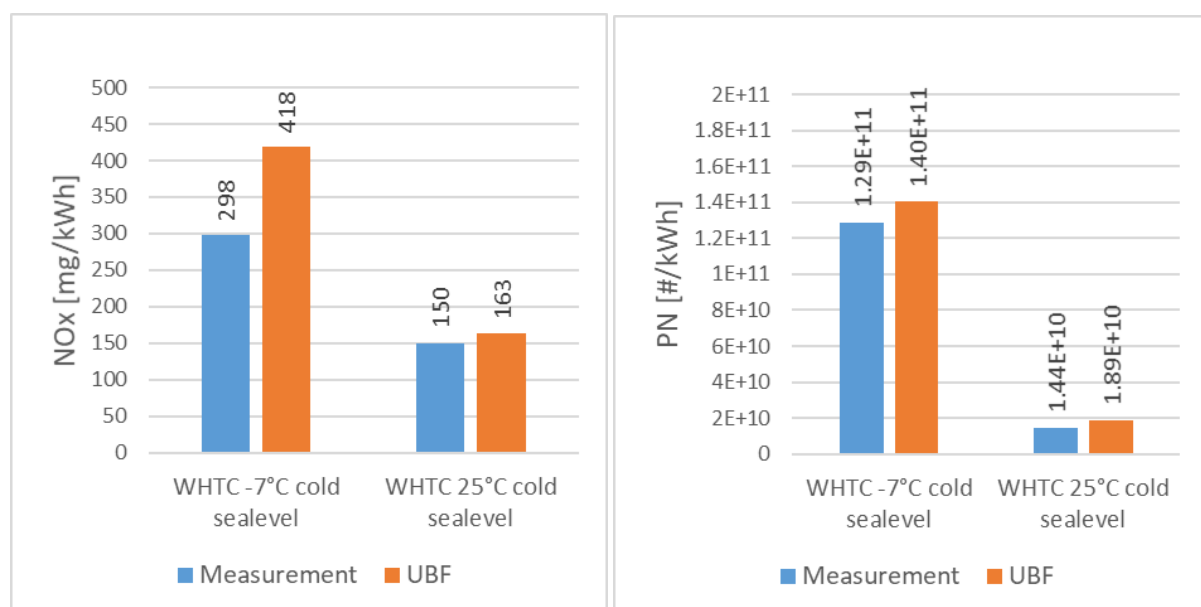
³⁴ Results will be reported in the next interim report for LOS 1 of reference Z6-69 836/1; „Rahmenvertrag für die Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen“.

<i>t</i>	Ambient temperature [°C]
<i>Time</i>	Test duration [s]
<i>Work</i>	Positive engine work in the test [kWh]

Certainly the temperature dependency may be eliminated in a final limit function for simplicity reasons by setting the temperature to the lowest allowed test temperature (e.g. -10°C).

Figure 34 shows the application of the elaborated NO_x and PN upper bound functions on the WHTC at -7°C and 25°C. The upper bound function represents the highest possible emissions of the best performer Euro 6 D truck within the test condition boundaries. This leads to an overestimation of average test results for all emission components.

Figure 34: Application of the UBF_{NOx} and the UBF_{PN} on measurement data



Source: own figure, FVT

Results for average EURO 6 Vehicles represented by the HBEFA 4.1 database

The function for the average EURO 6 truck represented by the HBEFA 4.1 database has been set up in the same way as already described for the best performer EURO 6 D truck.

The vehicle is based on the HBEFA 4.1 data and represents consequently an average truck of the emission standard EURO 6 A, B and C. The HBEFA 4.1 database does not include Euro 6 D trucks. We elaborated the upper bound functions with average urban, rural and motorway driving situations. That means the upper bound function for EURO 6 A/B/C represents average driving and not worst-case situations.

Table 21 shows the parameters of the upper-bound function for the average Euro 6 vehicle represented by the HBEFA 4.1 database at -7°C.

Table 21: upper-bound function parameters for Euro 6 vehicles represented by the HBEFA 4.1 database at -7°C

Emission component	E_{start} [mg] or [#]	E_{kWh} [mg/kWh] or [#]	E_{idle} [mg/s] or [#]
NO _x	55 805	988	0.133
PN	9.42 E+11	7.56 E+10	2.25 E+08
THC	1 855	64	1.102
NH ₃	0	10	0.024
N ₂ O	75	203	1.082
CH ₄	94	1	0.017
CO	3 381	323	0.297

Results for EURO 7 Demonstrator Vehicles

The upper bound function for the EURO 7 vehicle is based on the Bosch EURO 7 demonstrator data presented by Bosch to the project team. This demonstrator uses a technology mix which is quite similar to the HD2 technology described in the AGVES proposal. The demonstrator contains a closed coupled SCR in addition to the underfloor catalyst, has an advanced heating strategy and reduces the NO_x engine out emissions during cold start phases by high EGR rates. The vehicle does not contain a preheating system before engine start. The tests have been performed by Bosch after thermal aging of the after-treatment system to represent ca 700 000 km driving. Chemical aging effects were not applied.

In the case of NO_x we used this data to set up a simulation model with the simulation tool PHEM³⁵ and simulated different cycles as the WHTC or a special case test. We elaborated the upper bound function for the EURO 7 demonstrator truck in the same way as already explained for the best performer EURO 6 D truck based on these simulation results. Finally, the upper bound function produced from the PHEM simulations was calibrated to meet exactly the WHTC test results presented for the Bosch demonstrator.

No test results for PN emissions from the data by Bosch were shown due to issues with the measurement system. The PN UBF for Euro 7 thus is based on a 40 % reduction compared to the UBF of the Euro 6 best performer. Such a reduction from Euro 6 to Euro 7 seems to be feasible with a combination of further improved DPF substrates and raw exhaust PN reductions. To convert the UBF into the flexible limit function for PN10, we considered a factor of 1.4 for the difference of PN10 to PN23, a margin for the serial spread of 50 % and an increase factor of 3 for worst-case situations (high load motorway drive) compared to standard driving as represented by the UBF. The resulting limit function gives PN10 levels somewhat above the limits proposed by CLOVE. The CLOVE 100 percentile limit is 5.0 E+11 #/kWh and the result of the flexible limit function is 8.0 E+11 #/kWh. Regarding the budget the CLOVE limit is 2.0 E+11 #/kWh and the limit function gives 3.3 E+11 #/kWh. These results suggest that the CLOVE PN limits are possible in standard driving, but meeting the CLOVE PN limits also in worst-case test conditions would need ca. 65% reduction compared to the best performing EURO 6 D truck assumed here.

³⁵ The simulation tool PHEM (Passenger car and Heavy-duty Emission model) is used also to calculate the HDV emission factors for the HBEFA. The model simulates engine out emissions from engine power and speed and the exhaust gas after treatment conversion efficiency based on the temperatures and space velocities in the catalysts.

It has to be highlighted that the UBF EURO 7 demonstrator results are based on test data in the WHTC. That means the results represent ideal conditions and do not include any special operating conditions like extreme low or high engine load driving or regenerations processes. To adjust the UBF to a limit function, we added later on margins to convert the WHTC data into worst-case test conditions and margins for effects of spreads in later serial vehicle production.

Table 22 shows the different parameters of the upper-bound function for a Euro 7 vehicle based on the Bosch demonstrator data at 20°C and converted by application of correction factors to -7°C. We calculated the correction factors from the test data on the EURO 6 best performer with some adjustments to better reflect the additional closed coupled SCR and improved heating strategies.

Table 22: Upper-bound function parameters for a Euro 7 vehicle based on the Bosch demonstrator at -7°C

Emission component	E _{start} [mg] or [#]	E _{kWh} [mg/kWh] or [#]	E _{time} [mg/s] or [#]
NO _x	4 360	1	0.001
PN	4.1 E+12	1.4 E+10	1.9 E+7
THC	7 627	4	0.046
NH ₃	0	4	0.009
N ₂ O	1 026	62	0.282
CH ₄	2 033	9	0.011
CO	108 662	20	0.019

Summary and Comparison with AGVES Proposals

This section first sums up the results of the three different upper bound functions in various test cycles and then compares the upper-bound functions to the AGVES proposals.

Summary of the upper bound functions

The results in Figure 35 show the NO_x emissions calculated with the upper bound functions for the different vehicle technologies. The HBEFA based EURO 6 vehicle leads to the highest emissions in all driving situations. The EURO 6 D Best Performer (BP) comes along with a clear reduction compared to the HBEFA based results and the UBF of the EURO 7 vehicle is again on a lower level. The yellow bar, the Bosch demonstrator result, in the WHTC at 23°C confirms the adjustment to the demonstrator results and also the very low emission level of the EURO 7 upper bound function.

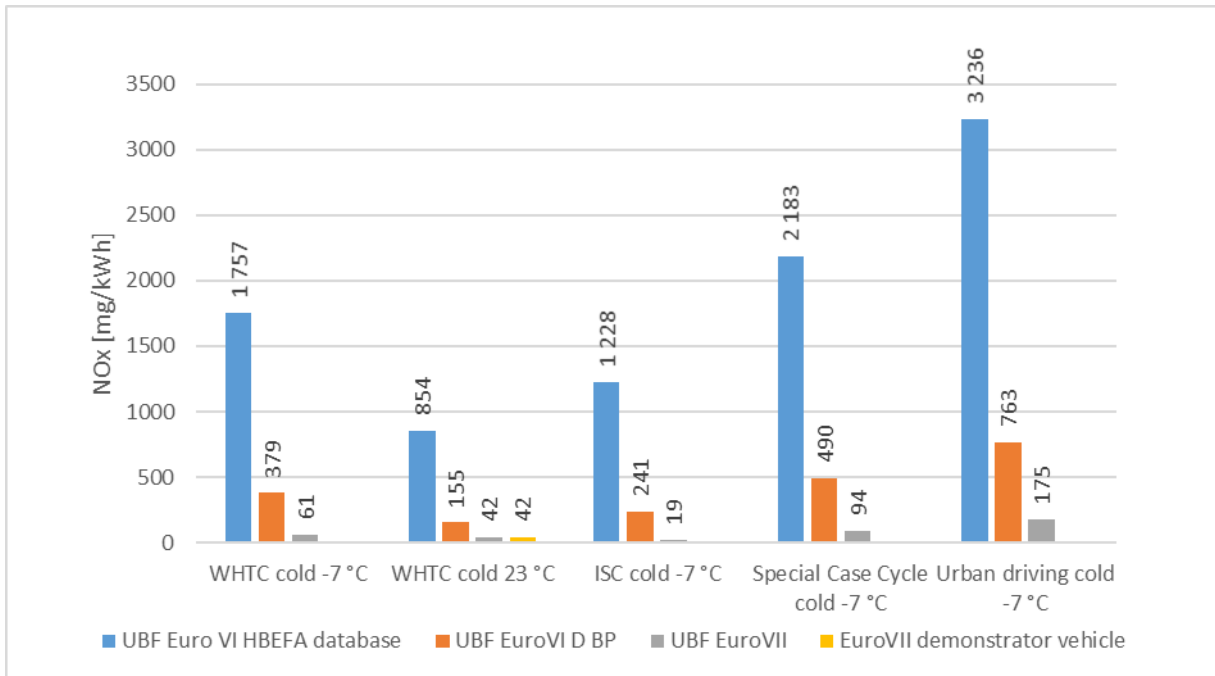
The comparison of the WHTC results at -7°C and 23°C illustrates the ambient temperature dependency. All UBFs come up with higher emissions at lower ambient temperatures. This is also proved by the already shown measurement results for the Euro 6 D best performer truck.

This graph shows also the weakness of this simple upper bound function. The NO_x emissions in the Euro 7 UBF are higher in urban driving although EURO 7 simulation results come along with highest emissions in the special case test. In the simple UBF function the term E_{start} is not dependent on the driving situation in the cold start phase, although high load driving in this test part leads to very increasing cold start NO_x emissions (see Figure 53 and Figure 54). Due to the “E_{time}” parameter the resulting emissions are higher in urban driving due to the lower engine

power and thus longer time needed per kWh work delivered in this test compared to the special case test, which starts with full load uphill driving.

The “WHTC-cold” results represent a two-phase test with a WHTC started cold followed by another hot WHTC without weighting of the single phases. The original weighting of the WHTC would use 14% weight for the cold started one, in this chapter a comparison of a test with higher cold start weighting was chosen.

Figure 35: EURO 6, EURO 6 D BP and EURO 7 UBF results in different tests cycles, NOx

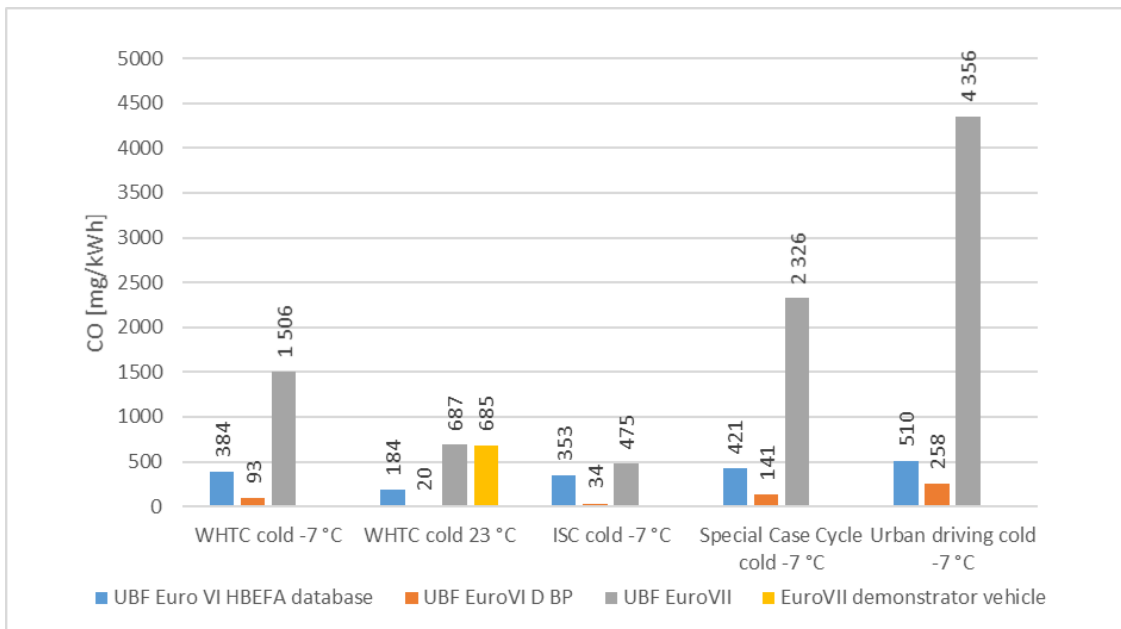


Source: own figure, FVT

Figure 36 illustrates the UBF results for CO. The UBF for Euro 7 in the WHTC at 23°C meets the Euro 7 UBF to the Bosch demonstrator test data.

The best performing EURO 6 D shows an improvement in CO emissions compared to the HBEFA EURO 6 emissions, while the more aggressive heating strategy of the EURO 7 demonstrator leads to higher CO emissions. Since CO was not in the main focus so far, emission reduction due to improved cold start and heat up strategies and catalyst technologies should be possible and are discussed in chapter B.3.2.

Figure 36: EURO 6, EURO 6 D BP and EURO 7 UBF results in different tests cycles, CO

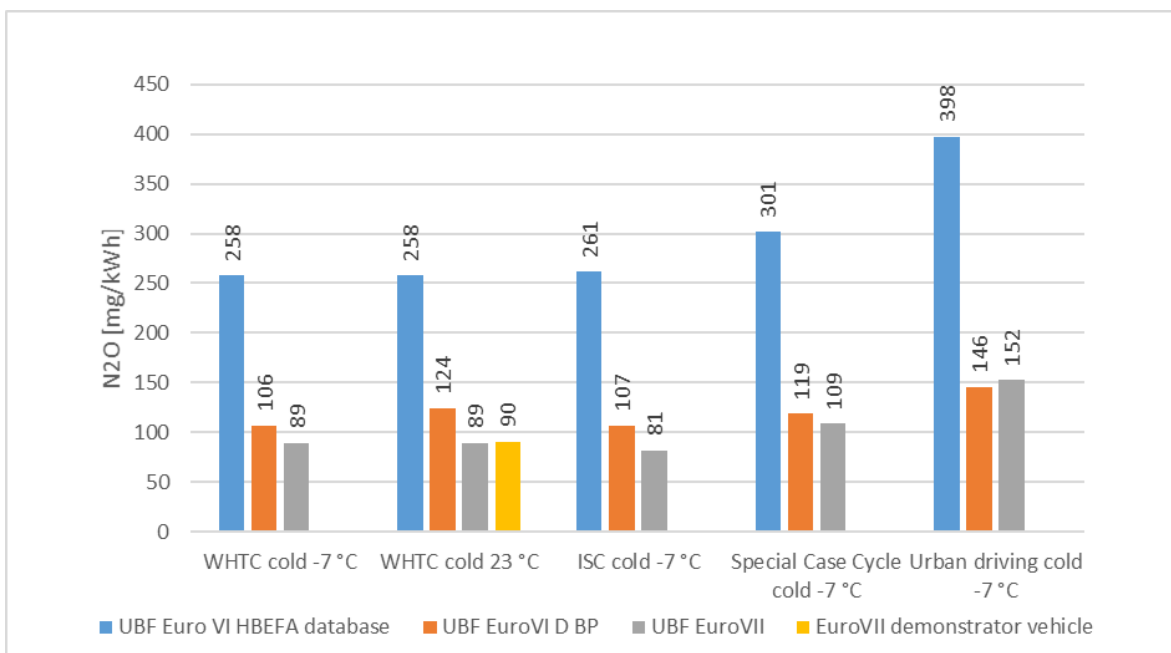


Source: own figure, FVT

Figure 37 shows the results for N₂O emission. There is a decrease from Euro 6 A, B and C trucks represented by the HBEFA data based UBF to the Euro 6 D best performer. Euro 7 is in a similar range as the Euro 6 D best performer.

It has to be mentioned that the official HBEFA 4.1 result for N₂O is on a lower level compared to the value represented by the HBEFA database in this study. The value in the HBEFA 4.1 is based on the EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook and not on HBEFA measurement data, because the database was quite small at this point. Additional data measured for HBEFA 4.2 confirmed the results of the HBEFA database. Consequently, we took emission factors based on the measured data.

Figure 37: EURO 6, EURO 6 D BP and EURO 7 UBF results in different tests cycles, N₂O



Source: own figure, FVT

Comparison to AGVES proposals (HD 2)

This section illustrates the way from the EURO 7 upper bound functions to corresponding emission limits and compares these limits with the AGVES proposals HD 2.

To adjust the UBF result (light blue bar) to a limit function we introduced following margins:

- Conversion of WHTC based UBF to the EURO 7 “worse case test cycle” by adding 16% for NO_x, (orange bar)
- Margin for possibly more demanding test and preconditioning conditions (+40% for all exhaust components), (grey bars)
- Margin for serial spread in vehicle production (50% for all exhaust gas components) and analyser capabilities, (yellow bar).

If the total margins calculated are below the analysers’ limits of quantification, we set the margin to this limit. The limits of quantification were set to 1/3 of the analyser capability limits presented in Table 23 following the corresponding definition of the Clove presentation.

Table 23: Analyser capability limits according to the HDV presentation from AGVES meeting 26.04.2021³⁶

	NO _x	SPN ₁₀	CO	NMOG	NH ₃	N ₂ O	CH ₄	HCHO
mg/kWh (#/kWh)	89	1.6 E+10	136	47	17	32	47	29

Deterioration effects due to thermal ageing of the catalyst are already included in the Bosch demonstrator results. Possible effects of chemical aging depend on fuel and lube oil properties and can hardly be assessed in a general valid way. Thus, we did not consider an additional correction for deterioration effects for the EURO 7 demonstrator function.

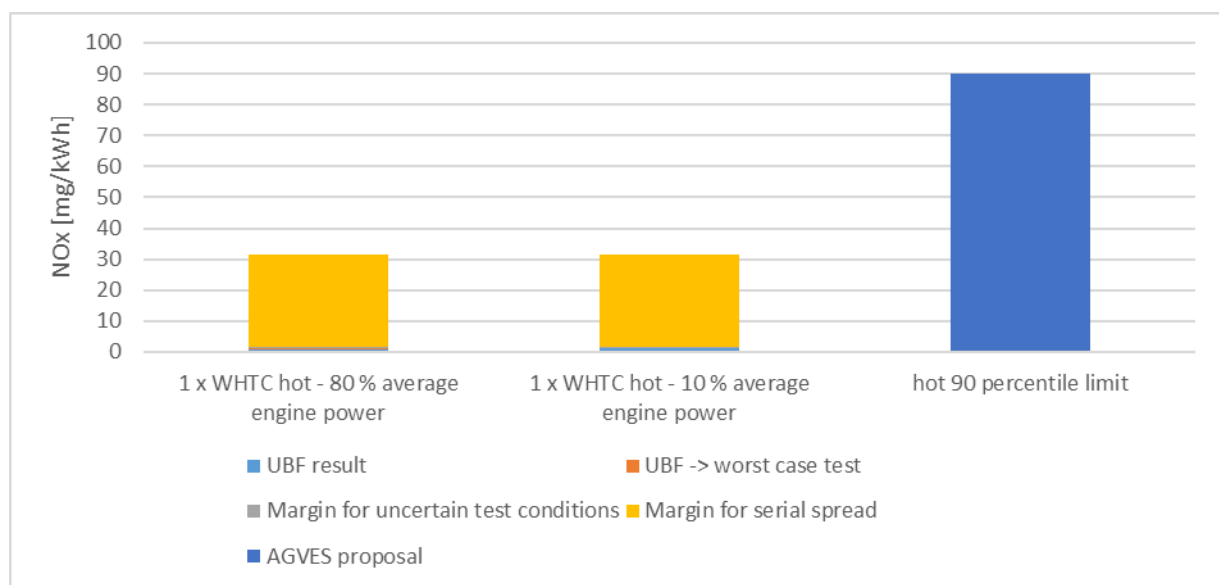
The dark blue bars represent the limits proposed by AGVES for the different test situations.

Figure 38 shows the limit function results for the Euro 7 for hot test cases with an average engine power of 80 % and 10 % during the test and the AGVES proposal for the hot test part. The hot test part starts after the work of one WHTC has been conducted in the test. The AGVES proposal limits the 90 percentile of the moving average windows in this test phase. The UBF based limits contain the parts E_{kWh} and E_{idle} . The cold start offset E_{start} is not relevant for the comparison with the AGVES hot limits. The UBF based limits are on a lower level compared to the AGVES proposals in these hot conditions. The average engine power (80 and 10 %) influences the test duration and affects consequently the weighting of the time-based emissions E_{idle} compared to E_{start} and E_{kWh} . Since E_{idle} of NO_x is on a low level, the different engine powers have only a small influence on the calculated limits.

We calculated all limits for a vehicle with a rated engine power of 330 kW.

³⁶ Supplements to the Scenarios for HDVs Emission Limits and Test Conditions

Figure 38: Euro 7 UBF limit and AGVES proposal, hot part (after 1 x WHTC work), NO_x

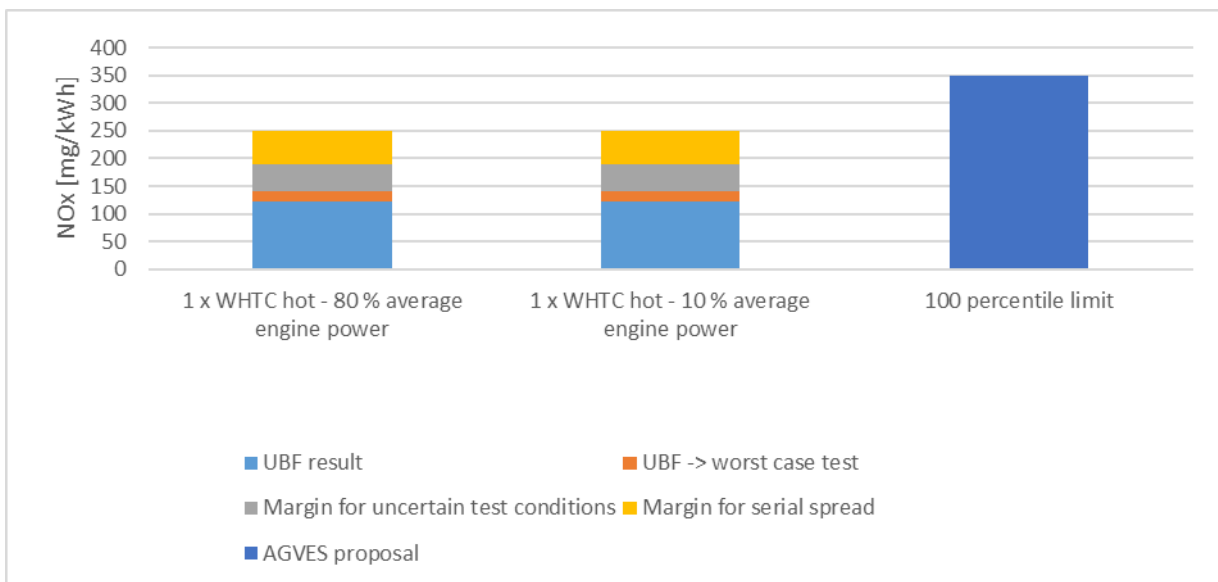


Source: own figure, FVT. Note: the Margin for serial spread is increased here to be not below the analyser limits of quantification

The AGVES proposal limits in addition the highest moving average window of the total test. In the case of NO_x, this is in most cases one of the first windows which include the complete cold start emissions. Figure 39 shows this AGVES limit and in addition the limits based on the UBFs again for an average engine power of 80 and 10 % in the test. In this case, the UBFs include the cold start offset and the hot emissions (E_{kWh} and E_{time}) representing one WHTC. The results of the limit function are in the range of 250 mg/kWh NO_x for both test cases³⁷ while the AGVES proposal is at 350 mg/kWh. This means the variable limit approach results in more severe limits compared to the AGVES proposal in the highest moving average window. As mentioned before, impacts of chemical aging are not included in the limit function, so we can conclude that the AGVES proposal for NO_x is on an ambitious but feasible level, unless a truck has used low quality fuels, e.g. with high phosphor content, which may be an issue when driving outside of the EU.

³⁷ The E_{time} parameter in the function has a quite low impact for NO_x

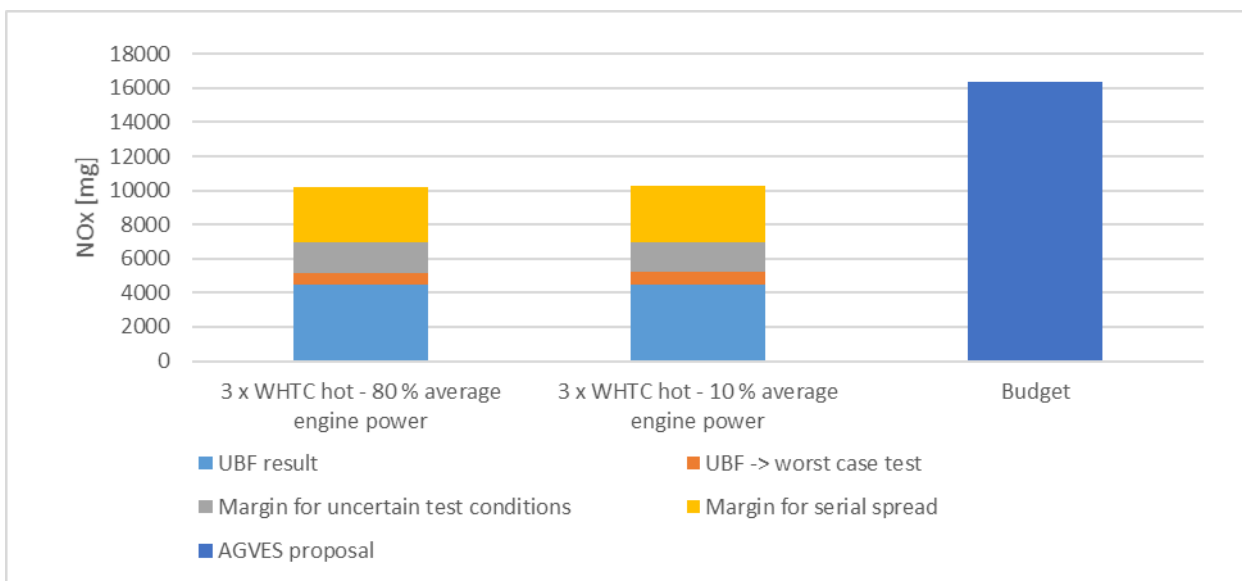
Figure 39: Euro 7 UBF limit and AGVES proposal, cold start phase (after 1x WHTC work), NO_x



Source: own figure, FVT

The AGVES proposal includes another limit including the cold start, but also a hot phase. It covers all emissions until the test work has reached the total work of three times WHTC. Consequently, the limit function includes the cold start part and the hot emissions for the overall duration of three WHTCs. The so-called CLOVE “budget” limit is also higher compared to the limit function for EURO 7 (independent if 80 or 10 % average engine power). The UBF based limits are 44 % lower compared to the budget. Having the omission of chemical aging and possible other – yet not known – effects on EURO 7 emission levels in mind, we can conclude also for the CLOVE budget limit, that it is ambitious but seems to be feasible with EURO 7 technologies.

Figure 40: Euro 7 UBF limit and AGVES proposal, cold start phase (< 3 x WHTC work), NO_x



Source: own figure, FVT

The NO_x results from the limit function leads for all test cases analysed to lower levels than proposed in AGVES. Consequently, the limits proposed by AGVES should be possible to reach by the use of currently known technologies.

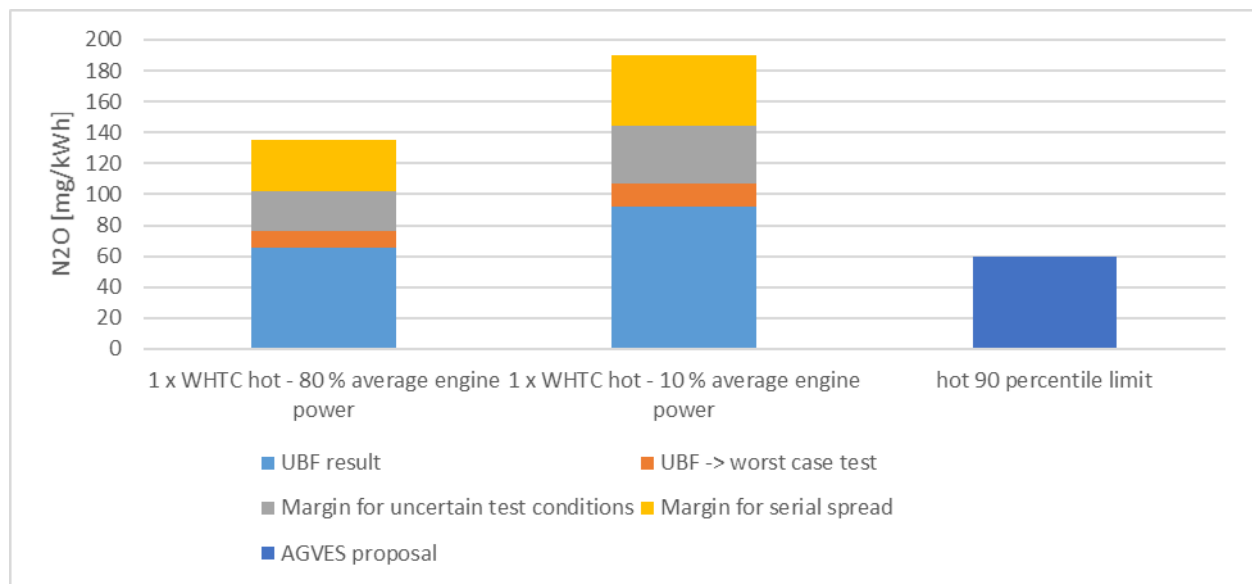
The picture is different if we compare the UBF based limits of N_2O with the AGVES proposals (see Figure 41 and Figure 42). In this case the AGVES limits are lower in cold and hot start conditions. The higher influence of the average engine power compared to the UBF based limit functions for NO_x is also interesting to see. In the case of N_2O , the time-based emission part E_{idle} and consequently the test duration affected by the average engine power have a significant influence on the UBF results.

These results show that the N_2O limits proposed by AGVES are quite severe. Of course, N_2O has a high global warming potential and also impacts on the stratospheric Ozone depletion and should be limited in EURO 7, but with currently used catalyst technology the combination of low limits for N_2O and NO_x as proposed by AGVES does not seem to be feasible. Consequently, further research work on catalyst technologies is necessary.

This was also discussed in AGVES and TUG proposed to combine CH_4 and N_2O emission limits into a "GHG" limit, which is combined by a CH_4 limit relevant for gas engines and a N_2O limit relevant for diesel engines. Thus, diesel engines would have a higher allowance for N_2O than shown in the single limit, since they emit almost zero CH_4 , while CNG engines would be allowed to emit higher CH_4 than diesel engines, since they produce much lower N_2O emissions.

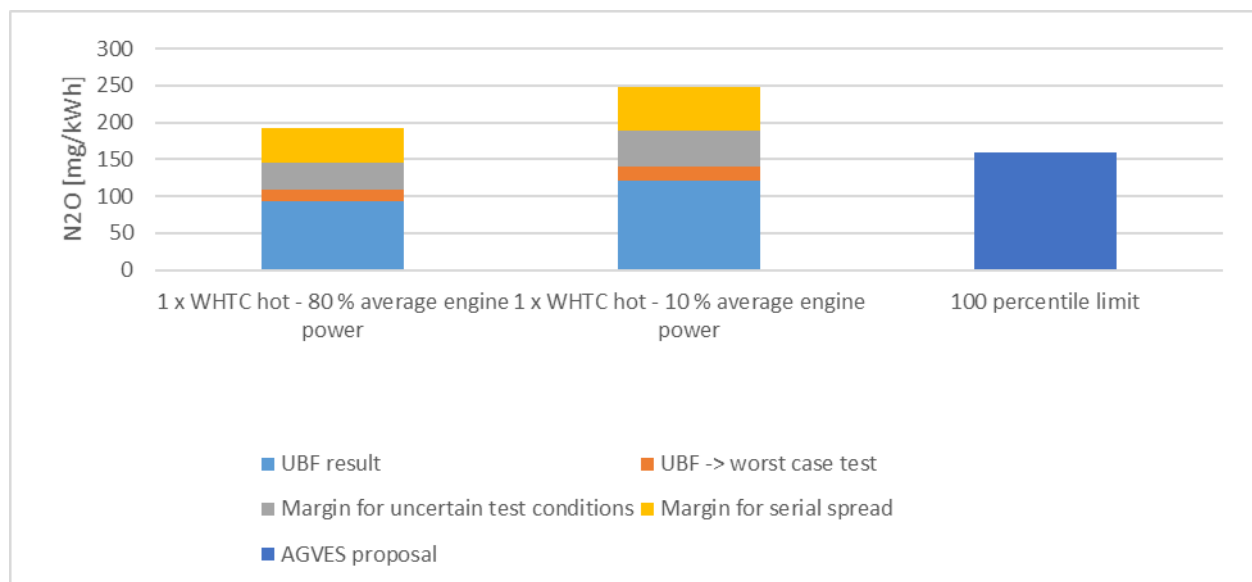
For such a combined GHG limit, the demanded limitation of CH_4 and N_2O as CO_2 -equivalent emissions could be considered. The current AGVES N_2O limit converted to average HDV driving (14% weighting of the cold limit versus hot limit) results in 74mg $\text{N}_2\text{O}/\text{kWh}$. Considering the margins discussed before, average real world N_2O emission levels should thus be less than 40 mg/kWh. With a 100-year GWP for N_2O of 265, we get 10.6 g CO_2 equivalent emissions/kWh from N_2O . Direct CO_2 emissions for EURO 7 trucks may be in the range of 650 g/kWh, thus N_2O would contribute less than 2% to the GHG exhaust emissions. For EURO 6 we measured for some truck more than 10% contribution. An additional allowance for N_2O , introduced by a combination with CH_4 would allow ca. 14mg/kWh higher N_2O emissions (57mg/kWh weighted AGVES limit for CH_4 resulting in ca 3.7g CO_2 -equiv. GHG emissions from CH_4). Balancing NO_x and N_2O emission limits obviously is a relevant topic for the EURO 7 limit decision. If this is sufficient to be feasible is yet open, possible SCR configurations are discussed later in chapter B.3.2.

Figure 41: Euro 7 UBF limit and AGVES proposal, hot emission limit (after 1 x WHTC work), N₂O



Source: own figure, FVT

Figure 42: Euro 7 UBF limit and AGVES proposal, cold start phase (first WHTC work), N₂O



Source: own figure, FVT

Regarding CO, the UBF based limit function is on a lower level than the AGVES proposal. It is the same for THC in hot conditions, while the cold start limit of HC would be much higher with the UBF based limit function. The EURO 7 limit functions are further elaborated in chapter B.3.2.

B.3 Reduction of Emission Limits

The main targets in this work package are:

- a) Review the technologies listed for EURO 7 in the CLOVE proposals presented in the AGVES meetings

- b) Compare technologies applied in the best performing EURO 6d / EURO 6 D vehicles, in the EURO 7 demonstrator vehicles with the list of possible EURO 7 technologies to identify relevant further reduction potentials
- c) Adjust the Flexible Limit Functions (FLF) representing the demonstrator vehicles to additional emission reduction technologies identified in b) to produce a “EURO 7 FLF” by means of simulation
- d) Compare limit functions and resulting limits for defined test situations for “FLF best EURO 6d/VI D performer”, “EU 7 Demonstrators”, “EURO 7 FLF”
- e) Compare the limit functions with the CLOVE proposal from April 2021

The test situations analysed are:

- ▶ Test bed cycles: WLTP for LDVs (cars and LCVs), WHTC for HDVs
- ▶ Average emissions: typical RDE test (ISC for HDVs) at 20°C
- ▶ Worst-case future EURO 7 RDE Test with cold starts at -7°C

B.3.1 Passenger Cars and LDVs

There are a number of very low emission results for different technologies, and one could take these as the basis, and add factors for high engine load, cold start, cold ambient conditions, aging, or any combination of these aspects. This requires a lot of different dependencies which are not fully known or understood. Instead, robustness is taken as the basis. The wide range of test results (where many of the tests are outside the current legal test requirements) shows a typical bandwidth or envelope, with a limited number of ‘failures’ which don’t meet the typical low levels. The emission limits are then set to remove the excesses and take the normal observed levels as basis. The key element is not to have any restriction on the tests (i.e. short trips, as they occur in normal use, should be valid tests), and for the emission limits to be specific for each combination of distance, cold start, and velocity. Long distance trips at high velocity will therefore have a much lower emission limit, based on the typically low emissions levels already observed.

The principles to come to a new proposal are rather simple. Test results provide an indication of proper emission behaviour, excluding the worst performances observed. Both steps, of extending the emission robustness and reducing the associated emission limits, do not necessarily require new technologies or hardware, but an improvement of the robustness of the emission control system and the operational envelope. Given the introduction date of Euro 6 in 2014 and 2015, from the new legislation one may expect a 50% emission reduction, with the observed technical capabilities and subsequent decade-long impact of traffic on air-quality and environment. Note that possible issues with deterioration and aging may require replacement parts rather than an extension of the durability of a part. Technologies to identify catalysts and other components which need to be replaced would have to be analysed if replacement is selected as preferred option.

Best available technologies for Euro 7

Given the emission performance of some of the Euro 6d light-duty vehicles on the road, it is clear that, with no excessive increase in stringency for Euro 7, the vehicle technology for Euro 7 already exists in Euro 6d. However, it does require some improved robustness. No fundamental new technology is needed, but for example, the dimensions of the aftertreatment systems of

high-powered vehicle should increase to include these engine capabilities. For stringent cold start emission limits in cold ambient temperatures, i.e. of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and below, heating systems need to be developed. For petrol vehicles a combined TWC-GPF is the basic after-treatment system, maybe combined with a closed coupled (cc) TWC, close to the engine for quick light-off, and an ASC to reduce NH_3 emissions. Thermal management in petrol vehicles will likely make cooled EGR more common. For diesel vehicles a closed-coupled SCR, possibly combined with a NO_x storage catalyst should ensure limited cold start emissions. A second SCR, possibly as a coated DPF (or SCRF) after a DOC should cover the high load operations, with an ASC at the end of the exhaust line to limit NH_3 emissions. A catalyst heater may also be needed in diesel vehicles to ensure low emissions after a cold start in low ambient temperatures. This is not very different from the best available technologies now seen on the road, apart from the catalyst heater. Such a heater is in itself not very advanced technology and is already used in retrofit SCR systems. The high emissions in Euro 6d are often associated with high power demand combined with the small catalyst size and the limited thermal management outside the RDE boundaries. Over proportional increase of emissions with increasing engine power demand is a matter of robust control and proper dimensioning.

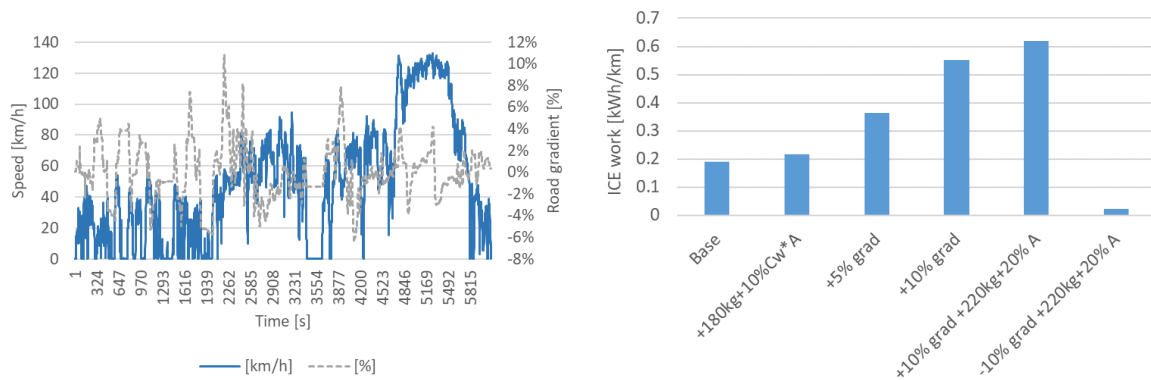
Engine load dependency

High specific power demand at low speed lead to high engine work per km [kWh/km]. This is a typical effect of uphill driving, especially with high loaded vehicles. Such test conditions would not be valid in EURO 6 RDE tests (fail of normal EMROAD Moving Average Windows in the low speed area). If the vehicles use right dimensioned catalysts, the work specific tailpipe emission levels [mg/kWh] can approx. be maintained constant on a low level with increased engine load. Approx. constant mg/kWh with increasing kWh/km consequently increase the mg/km emission levels. To include high power driving in the EURO 7 regulations, the load impact on emission levels can either be considered in reasonable definitions for valid test conditions and/or by adjusted emission limits.

To analyse most important boundary test conditions, we simulated the impact of different loading and road gradients on the engine work for a gasoline passenger car using the model PHEM in the settings also applied for HBEFA 4.1. We simulated a typical RDE test cycle in the area of Graz which starts and ends at the same sea level. In the simulation we replaced the measured road gradient by constant 5% and 10% gradient up- and downhill to mimic RDE tests which go up- or downhill only as suggested in the April AGVES proposal as valid tests.

Finally, we added 220kg load to the base vehicle load of 180 kg and added 20% air drag to mimic a loaded roof box and 4 passengers. Figure 43 shows the base RDE cycle and the resulting average positive engine work over the entire test. Obviously, the additional loading and the roof box do not add much average engine work as long as the overall difference in the altitude between start and end of a test is small. In contrary full loaded 10% gradient uphill driving leads to 3-fold energy demand from the engine. Such an increase has relevant impacts on pollutant emission levels. The HBEFA PHEM model shows e.g. an increase of NO_x by a factor of 3.5 for this uphill driving. If the full loaded vehicle goes downhill again to the sea level of the starting point, the average energy consumption drops to “normal” levels again.

Figure 43: RDE test cycle simulated with different settings of road gradient, loading and air drag



Source: own figure, TNO

Thus, we think an important and simple boundary condition for future RDE tests is to start and end at approx. same altitude levels, e.g. with a difference below e.g. 100m per 10 km test distance. This would limit the potential energy change over the test, since this has high impact on the engine work demand. The vehicle has to control emissions at high load still very well, otherwise the low emissions downhill would not compensate uphill emissions to stay below EURO 7 limits. As alternative one may apply higher emission limits which could be met also in pure uphill tests with high loading (also correction factors could be developed but would add complexity to the limit scheme). In the following comparisons we assumed overall neutral altitude gains over the tests and thus did not apply any corrections for test conditions leading to extremely high kWh/km.

To prevent misuse driving beside the positive altitude gain over a test also overall acceleration work per km may be limited. By continuous acceleration and hard braking the kWh/km also can massively increase since the energy annihilated in the brakes has to be provided by extra engine work. Such a limitation to prevent unrealistic driver behaviour is not elaborated here.

Proposed reduction in emission levels for EURO 7

As shown in Sections 0 and 0, the E_{start} , E_{time} and E_{km} emission coefficients calculate a E_{UB} significantly higher than most of the trip averages. Indeed, this holds true for some of the Euro 6d vehicles even in trips with 'worst-case' cold starts, or trips both with cold starts and DPF regenerations. For this reason, we suggest that E_{UB} as calculated for Euro 6d and 6d-Temp could be decreased by at least 50% for Euro 7. To determine the reduced emission coefficients, a simple approach is taken by lowering the LD UBF in Table 12 by 50%. This approach is similar to the approach taken by AGVES for the proposed NO_x limit, which is 50% lower than the current emission legislation limit (EURO 6). As CNG vehicles were not tested in the dataset, the HC and CH_4 emission coefficients are modified to using the coefficients determined for EURO 6.

Table 24: Reduced LD UBF emission coefficients which could be used for Euro 7

LD UBF – 50% reduction			
Emission	E_{start} [mg]	E_{time} [mg/s]	E_{km} [mg/km]
CH_4	14.54	0.06	1.08

LD UBF – 50% reduction			
CO	1069.99	0.87	65.59
HC	141.43	0.13	2.21
N ₂ O	24.56	0.14	0.39
NH ₃	17.24	0.03	4.63
NO _x	335.27	0.22	9.56
PM	0.84	0.004	0.28
PNF	1.41E+12	9.01E+08	3.46E+10

As a comparison, the emission limits for Euro 6 passenger cars is converted into an UBF based on following assumptions:

- ▶ It is assumed that the cold start emissions will always occur during the first 5 km of the trip. E_{start} for EURO 6d can therefore be estimated by multiplying the Euro 6 emission limit with factor 5.
- ▶ E_{time} can be estimated by looking at the average emission flow [mg/s or #/s] of the vehicle if the vehicle completes the whole trip at low constant speed at 10 km/h. The low constant speed is taken from the lower speed boundary for the calculation of E_{time} in chapter B.2.1. E_{time} for EURO 6d can therefore be estimated by dividing the Euro 6 emission limit with factor of 360.
- ▶ E_{km} can be estimated by assuming for a typical NEDC trip, 50% of the total emission is contributed by the cold start emission, and 25% of the total emission is contributed by the emission at low vehicle speed < 50 km/h. The remaining 25% would therefore be contributed by the normal driving to complete the remaining distance. E_{km} for EURO 6d can therefore be estimated by dividing the Euro 6 emission limit with factor 4.
- ▶ As there is a distinction of emission limits between positive ignition engines and compression ignition engines, the resulting constants of E_{start} , E_{time} , and E_{km} can be displayed as range rather than a fixed limit.

With these assumptions, the resulting E_{UB} emission coefficients based on Euro 6 legislation are listed in Table 25.

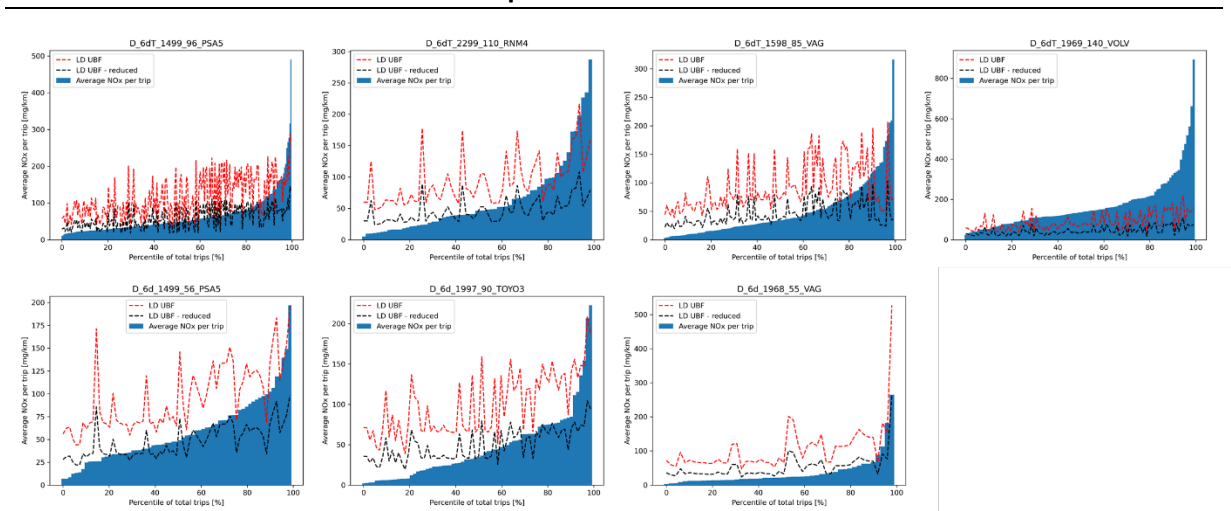
Table 25: E_{UB} emission coefficients based on current Euro 6 LDV emission limits (range from diesel and petrol limit)

Emission	E_{start} [mg]	E_{time} [mg/s]	E_{km} [km]
CO	2500-5000	1.39-2.78	125-250
HC	500	0.28	25
NO _x	300-400	0.17-0.22	15-20
PM	25	0.014	1.25

Emission	E _{start} [mg]	E _{time} [mg/s]	E _{km} [km]
PNF	3.00E+12	1.67E+09	1.50E+11

Apart from for NO_x emissions, the proposed reduced emission coefficients for LD EURO 7 UBF in Table 24 are lower compared to the emission coefficients for EURO 6 in Table 25. The reduced NO_x emission coefficients in Table 24 are within the ranges of the NO_x emission coefficients in Table 25. This echoes the previous suggestion that for EURO 7 in cars and LCVs no new technologies but improved robustness of current technologies is called for. On-road monitoring of Euro 6d and 6d-Temp shows that in the case of NO_x emissions, a large percentage of the trips (70 – 90%) of the better performing vehicles have an average emission below the reduced E_{UB}.

Figure 44: Reduced LD UBF implementation for NO_x emissions for on-road measurements of Euro 6d and Euro 6d-Temp vehicles



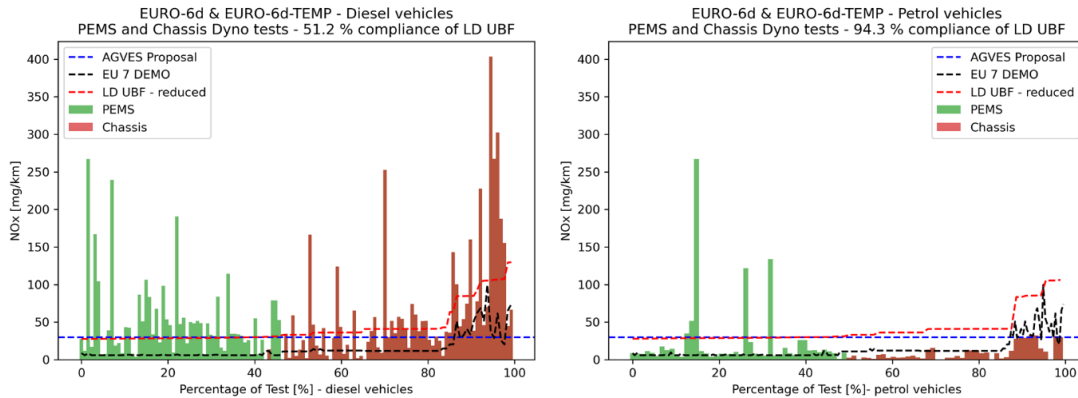
Source: own figure, TNO

Evaluation and comparison of the reduced E_{UB}

The figures below visualise E_{UB} as calculated using the reduced LD UBF for NO_x, CO, PN, and HC emissions in comparison with the proposed limit from AGVES and a Euro 7 DEMO UBF, for the dataset mentioned earlier, which contains 101 PEMS test and 114 chassis dynamometer tests, measured from 31 Euro-6d and Euro-6d Temp vehicles. The trip distances range from 4.4 (CADC urban sub-cycle) to 87 (RDE) km, with hot and cold starts. Some trips contained DPF regenerations, and temperatures were measured down to 5 °C.

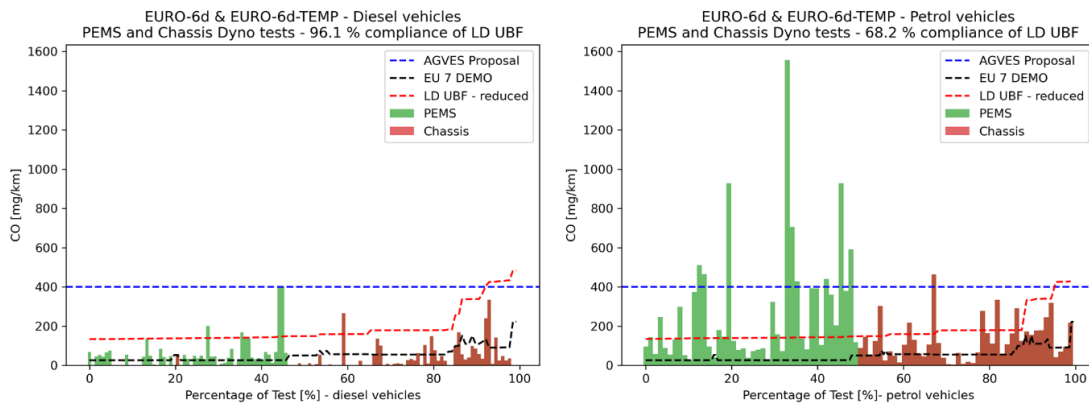
For NO_x and PN emissions, the reduced LD UBF calculates a E_{UB} similar to the proposed AGVES limit for most trips. For CO and HC emissions, however, the reduced LD UBF E_{UB} is lower than the proposed AGVES limit (and thereby also closer to the Euro 7 DEMO). Note that for many trips, E_{UB} is still higher than the average trip emissions. Since also emission capabilities of CNG engines should be considered in EURO 7 limits, the higher AGVES limits seem to be reasonable.

Figure 45: Distribution of NO_x emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from reduced LD UBF, EU 7 DEMO UBF, and AGVES proposed limit. Compliance to the reduced LD UBF is noted in the frame titles.



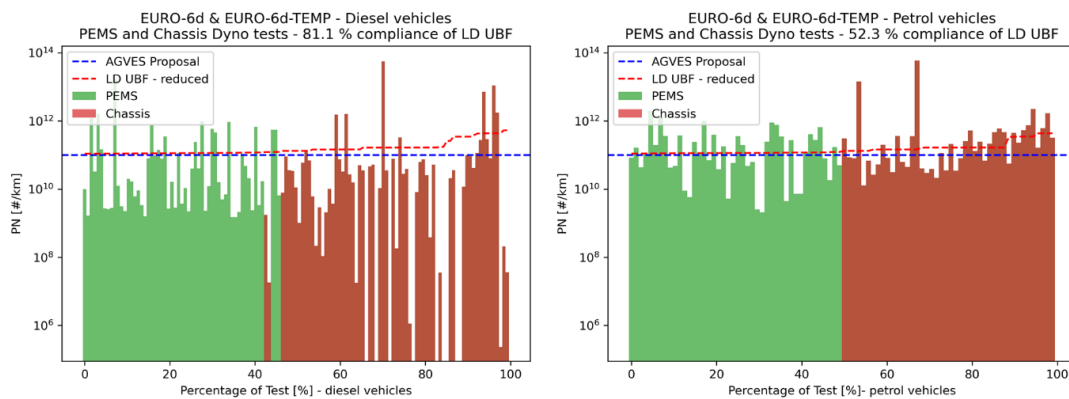
Source: own figure, TNO

Figure 46: Distribution of CO emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from reduced LD UBF, EU 7 DEMO UBF, and AGVES proposed limit. Compliance to the reduced LD UBF is noted in the frame titles.



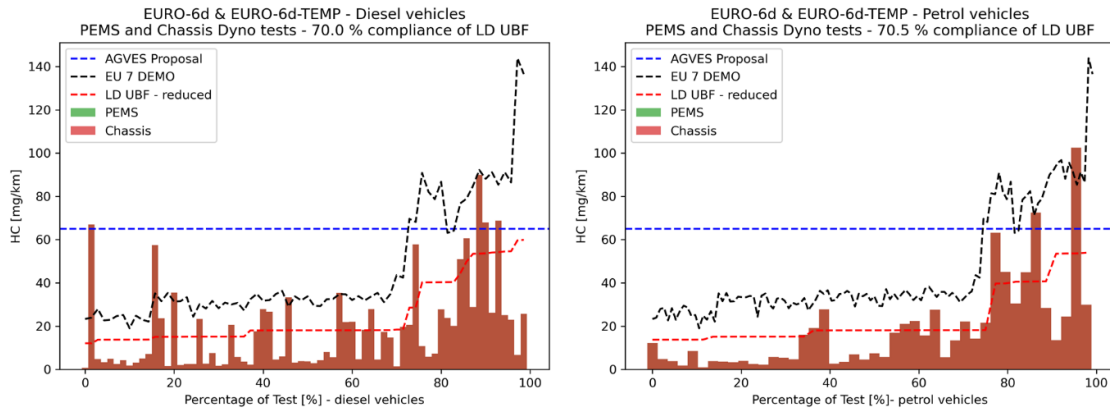
Source: own figure, TNO

Figure 47: Distribution of PN emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from reduced LD UBF and AGVES proposed limit. Compliance to the reduced LD UBF is noted in the frame titles.



Source: own figure, TNO

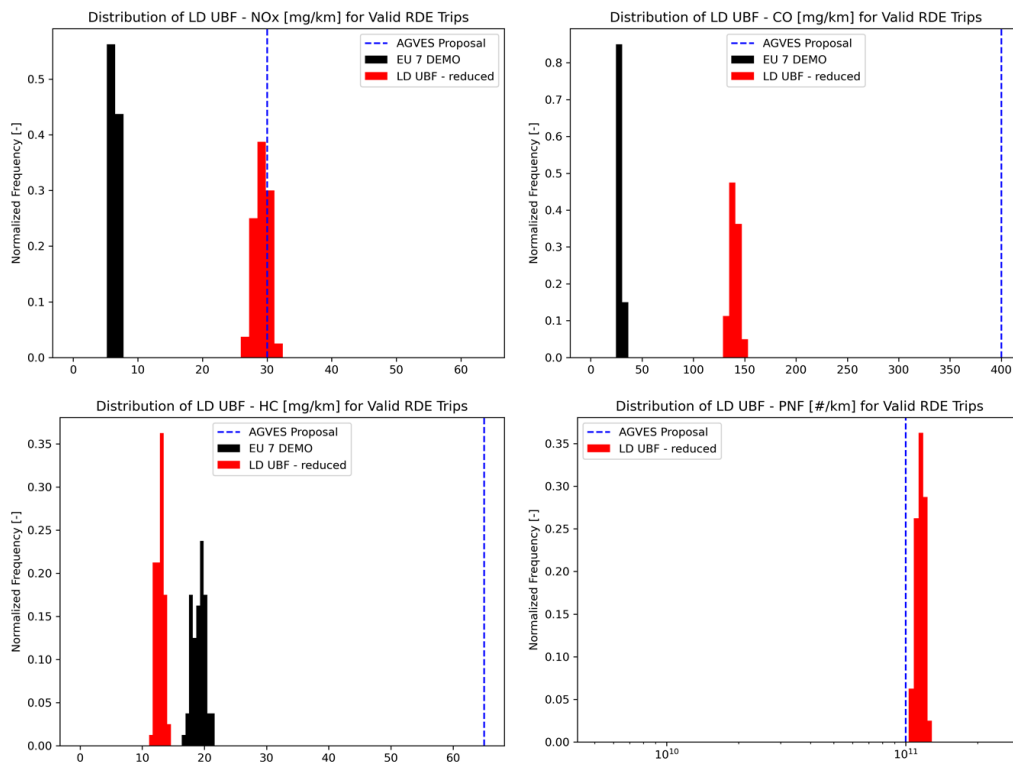
Figure 48: Distribution of HC emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from reduced LD UBF, EU 7 DEMO UBF, and AGVES proposed limit. Compliance to the reduced LD UBF is noted in the frame titles.



Source: own figure, TNO

Implementation of the reduced LD UBF on valid Euro 6 RDE trips and standardised trips is shown in Figure 20 and Figure 21.

Figure 49: Distribution of E_{UB} from reduced LD UBF and EURO 7 demo based on valid EURO 6-RDE trips. Temperature-dependence corrections are applied, however, load-dependence and/or CO_2 dependence are not applied.

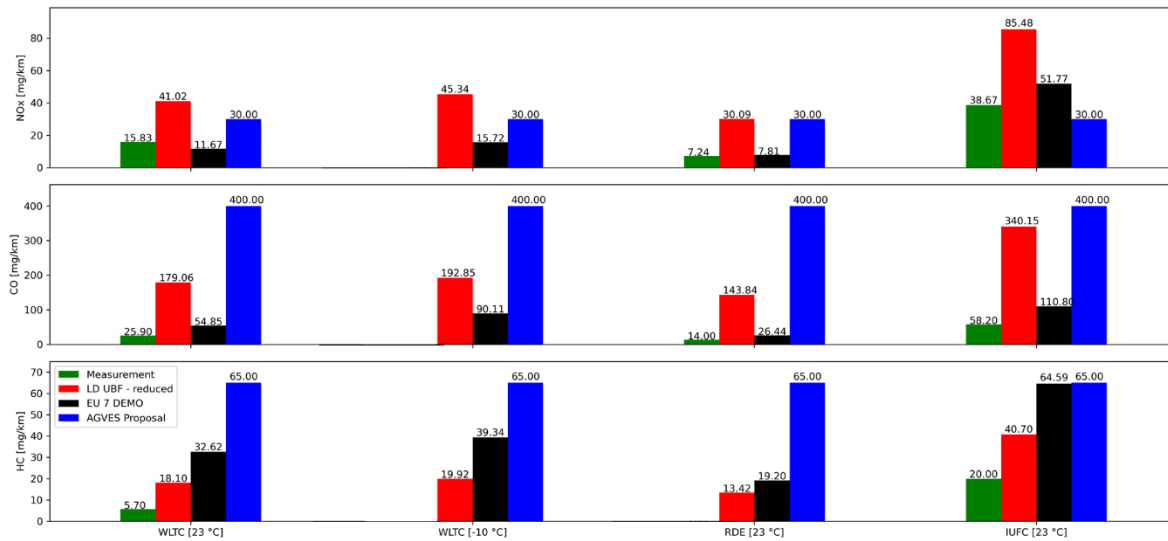


Source: own figure, TNO

In Figure 49 reduced LD UBF E_{UB} for NO_x and PN emissions are again similar to the AGVES proposed limit, while for the CO and HC emission, the reduced LD UBF E_{UB} is much lower than the AGVES proposed limit. When compared to standardised tests such as WLTC and IUFC

(visualised in Figure 50), the reduced LD UBF resulted in higher E_{UB} compared to proposed AGVES emission limit and EURO 7 DEMO UBF. This again shows the (desired) effect of the UBF for shorter tests, and tests with low average speed.

Figure 50 Visualisation of E_{UB} for standardised test programme based on measurements of a Euro 6d diesel vehicle



Source: own figure, TNO

B.3.2 HDVs

Note: The assessment of the possible limit functions for HDVs made use of test data provided kindly by Bosch. An update of this data was provided kindly on 14th July 2021. This new data is not considered in this report. Also the test data on a EURO 7 demonstrator truck set up by AECC was currently presented (12.07.2021) which also was not yet considered here. We suggest to make an updated version of the report e.g. in September or October with updates of the main findings according to new data (also for LDVs).

The assessment of possible emission reductions is based on following workflow:

- ▶ Analysis of technologies available for emission reduction in serial HDV production until ca 2026
- ▶ Analysis of worst-case test conditions for such EURO 7 technologies
- ▶ Assessment of the reductions possible for the single parameters of the UBF (Upper Bound Function) using the EURO 7 demonstrator function as basis since this engine concept is close to the technology mix assumed for EURO 7
- ▶ Adding margins for spreads in serial production and uncertainties in worst-case test conditions and - where applicable - for deterioration of components to produce the limit functions
- ▶ Comparison with the AGVES limit proposals from April 2021 and with EURO 6

Technologies applicable for EURO 7

Papers and reports on technologies for further reduction of HDV pollutant emissions are mainly related to research in course of the low NO_x standards proposed by CARB for 2027.

The CARB suggests for type approvals from 2027 on 20 mg/hp-hr (~27 mg/kWh) for the weighted cold/hot FTP and 50mh hp-hr (~67 mg/kWh) for the Low Load Cycle (LLC). The weighted FTP can roughly be compared with the weighted WHTC test since in both cold start has 14% share and the average loads are also within normal levels in both engine test cycles. The EURO 6 limit in the WHTC is 460mg/kWh. Thus, the CARB 2027 proposal means a limit reduction for NO_x of more than 90% compared to current EURO 6 standards in the well-defined engine test cycles³⁸. The EURO 7 regulation foresees on-board tests for real world emissions (RDE) with almost no limitations for valid test conditions, allows high shares of low load and idling and goes down to cold starts with -7°C. Thus, limit values from FTP and LLC cannot directly be compared with EURO 7 limits for RDE. However, the technologies discussed for the CARB low NO_x limits are representing the bundle of existing efficient emission control technologies and can be expected also in the portfolio of EURO 7 technologies. The EURO 7 regulation is not focussing only on NO_x but also very much on reducing PN, NH₃ and N₂O, which makes the targets more demanding, since conflicts of interests exist when optimising emissions of these species (e.g. increasing N₂O with higher NO_x conversion rates).

Literature reviewed is: (Hammer, 2020), (McCarthy, 2019), (MECA, 2019), (Monschein, 2015), (Sharp, 2021). Furthermore, we used presentations made at the UBA Stakeholder workshop on 12th November 2020 and finally also the experiences from the engineers at TUG to analyse the main HD technologies available for EURO 7. We assumed EURO 7 to be mandatory for new vehicle types from 2027 on, i.e. a similar introduction date as the CARB proposal.

Technologies to meet these future limits can be split into:

- ▶ Improved exhaust gas after treatment
- ▶ Improved combustion control for optimised engine out emissions
- ▶ Efficient engine technologies and control to maintain the exhaust gas after treatment system in the best operation temperature range.

The most important hardware update for lower emissions in low load and cold start conditions is an additional “closed coupled (cc)” after treatment system, consisting at least of an additional SCR and AdBlue dosing system upstream of the currently used exhaust box for NO_x reduction and an Ammonia Slip Catalyst (ASC) to prevent NH₃ slip. NH₃ slip would produce N₂O in the following underfloor DOC and/or coated DPF. We expect the current after treatment box (“underfloor system”) to remain in EURO 7 as shown in Figure 51. In addition, we assume further development on all catalysts to improve low temperature conversion and durability. For the DPF mainly an improvement of the filtration efficiency after regeneration is important for further PN emission reductions. A DOC may be applied upstream of the SCR for CO and HC conversion but also to increase the NO₂/NO_x ratio to support low temperature NO_x conversion³⁹ and also for AETs heating when HC and CO produced by the engine during late fuel injection are oxidised on the DOC. As disadvantage, the thermal mass of the DOC leads to a slower heat up of the cc SCR. Which technology is best for EURO 7 seems to be open yet but does not change the achievable emission levels much.

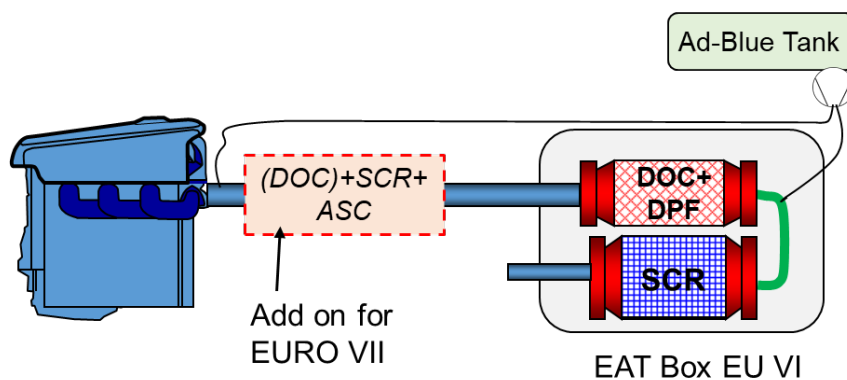
³⁸ In the comparison with on-road test results, the EPA allows typically for a margin on 50% to 100% when comparing with laboratory results.

³⁹ Best low temperature conversion is reached at a ratio of ca 50% NO₂/NO_x

The additional catalysts will be mounted directly downstream the turbocharger and thus heat up much faster than the current EAT boxes. The fast heat up is supported by active heating by the engine. Main engine technologies for exhaust heating are late and multiple fuel injection, exhaust throttling and bypassed EGR cooler. Also, electric heated catalysts can be applied, if needed. For the function of the catalysts the source of the additional heat has minor relevance, the selection of heating strategies will be a question of impacts on fuel efficiency, system costs and durability during the EURO 7 development.

In low load driving cylinder deactivation is a very attractive technology since the lower number of active cylinders reduces the exhaust volume flow and thus increases the exhaust temperature significantly. The energy flow in the exhaust ("Enthalpy" = mass flow * c_d * temperature) is approx. the same as without cylinder deactivation, thus the heat up time after cold start is not much improved by cylinder deactivation but cool down is prevented during low load phases and it supports also reaching the high temperatures needed for de-sulphurisation (de-SO_x) of catalysts, (Sharp, 2021). Vanadium based SCR systems should not be combined with catalysts needing de-SO_x at high temperatures to prevent Vanadiumpentoxide emissions and high N₂O formation (discussed later). The cylinder deactivation at low loads improves the fuel efficiency while other technologies tend to reduce the fuel efficiency.

Figure 51: Schema of the exhaust gas after treatment system for EURO 6 with the additional closed coupled catalysts for EURO 7



Source: Hausberger, 2021

The total volume of the exhaust gas after treatment would almost double compared to typical EURO 6 applications. The low NO_x HD engine demonstrator by Bosch has installed more than 450% of the cylinder capacity of the engine (ca. 60% for DOCs, 250% for the SCRs and 150% for the DPF). The installation of the additional EATs volumes close to the engine is a challenging engineering target due to limited free volumes and the additional catalysts add exhaust back pressure with negative impact on the engines fuel efficiency (Sharp, 2021). Nevertheless, closed coupled catalysts are widely applied in EURO 6d diesel cars and reduce cold start and low load emissions with high efficiency. Since especially these driving conditions are leading to rather high emissions from EURO 6 HDVs, we assumed that EURO 7 HDVs will have catalysts installed with optimised distances to the engine out.

Best performing EURO 6 trucks show already DPF filtration efficiencies for PN emissions above 99% if the soot and ash cake on the filter substrate is built up. After active and passive DPF regeneration the soot cake is oxidised and the filtration efficiency drops by several percent points. The worst-case test situation for PN emissions thus is a long uphill driving where the DPF is regenerating due to the high exhaust gas temperature and a dynamic urban driving directly

after such a passive or an active regeneration with a new DPF which has no ash load⁴⁰. Consequently, lower PN limits need improved filtration efficiencies for empty DPFs. Technologies reported are coated DPF substrates and ash pre-loading already in the fresh filter. Both technologies seem still have not reached a status to guarantee high DPF efficiencies in all conditions. An important “engine technology“ for improving the DPF efficiency after regeneration we expect a “high soot combustion“ for a limited time period, i.e. reducing the oxygen concentration in the combustion to produce high soot emissions which then quickly build up a soot cake on the DPF substrate. Still the time until the soot cake is sufficiently contributing to the filtration but with the high raw PN emissions is critical for the overall emission result.

For low N₂O emissions⁴¹, Vanadiumoxide based SCR systems may be applied since these have lower N₂O production rates during NO_x conversion compared to the Cu-Zeolites at temperatures below ca 400°C. As disadvantage they have worse low temperature conversion and can release Vanadiumpentoxide (V₂O₅) at temperatures above ca. 550°C with V₂O₅ being a highly toxic component. Maintaining temperatures well below the 550°C should be possible at least for the underfloor SCR, (Nilsson, 2021). When introducing tight N₂O limits also a monitoring or limitation of V₂O₅ should be considered. Since V₂O₅ needs special analyser devices and is only expected at long high load driving a special test seems to be needed for (V₂O₅) emissions. E.g. full loaded uphill driving with sampling of the exhaust gas for later analysis in the lab or – a simpler option – with temperature measurement upstream of any Vanadiumoxide based SCR installed and a limitation to be below ca. 525°C. Due to the issues with high temperatures, vanadium-based SCR systems are rather not applicable for smaller HDVs (also not for LDVs since e.g. active DPF regenerations are not possible with these temperature restrictions). Beside the catalyst technology, also an accurate NH₃ dosing to the SCR is important for low N₂O, since NH₃ can react on DOCs and coated DPFs partly to N₂O. Since N₂O is a strong GHG with a GWP of 265, it may be added to the CO₂ emissions for the fleet emission targets. However, this is not a mandate for EURO 7 und is thus not analysed here in more detail.

Engine out CO and HC emissions are low from diesel engines and are reduced by the DOC efficiently in hot conditions. Main issue is thus the cold start phase, where emissions could increase against current EURO 6 due to heating strategies applied by the engine. Nevertheless, no significant high CO or HC levels are expected for EURO 7 diesel HDVs. Gas engines will show higher CH₄ emissions and consequently also higher THC emissions than diesel engines. Due to the aging of 2-way catalysts used for emission control of SI gas engines, the limit values for CO, CH₄ and THC need to consider the emission levels achievable by optimised gas engines. Also, for the CNG engines closed coupled 3way catalysts can be assumed for EURO 7, thus also these HDVs will reach much lower emissions in urban driving than the current EURO 6 CNG HDVs.

Overall, we think that the technology applied in the EURO 7 demonstrator engine presented in in the data by Bosch is exploiting the emission reduction potentials discussed above very well. Consequently, we used the test data to calibrate the models for the EURO 7 HDV technology⁴². The engine out emissions are controlled to ca. 1g/kWh during cold EAT and to 3-6 g/kWh at hot EAT systems. Several sensors for temperature, NO_x and NH₃ and differential pressure are mounted for the advanced control strategies. The engine fulfils the CARB low NO_x limits also

⁴⁰ Cumulated ash in the filter can also support the filtration efficiency. Since ash is not oxidized, the ash effect is maintained over the DPF regeneration.

⁴¹ In the HDV test series for the German Umweltbundesamt at TUG, CO₂-equivalent emissions of N₂O were found up to 10% of the CO₂ emission levels. Thus, a limitation of N₂O is recommended, especially with further reduced NO_x limits.

⁴² Since the test data was provided for a system with yet no ASC mounted after the underfloor SCR, the NH₃ emissions were not considered from the demonstrator. An update was provided by Bosch kindly on 14th July 2021, where the figure of the layout is taken from. The new data is including also an ASC and PN measurements but is not considered in this report.

after thermal aging to represent the end of useful life (EUL) with 17mg NO_x/kWh in the weighted FTP. Additional chemical aging effects are not depicted in the demonstrator due to the aging methods applied.

To get all new technologies ready for serial production in the HDV sector will need time for research and development and for testing and improving the durability of novel technologies. Thus, the more yet not market ready technologies are selected for EURO 7, the longer the lead time for implementation may have to be.

In the AGVES limit proposals from April 2021 a technology HD3 was presented, which uses pre-heating of the after-treatment system by ca. 5 minutes at 60 kW for a large HD engine. Such a pre-heating can hardly be performed by electric heaters for large HDVs unless the vehicles are at least mild hybrids with quite large batteries due to the power and energy demand needed for significant cold start emission reductions. A hybridisation of the entire fleet until EURO 7 introduction is unlikely. Thus, fuel-based heating systems with injector and air pumps would be the available technology for many EURO 7 vehicles. A durable fuel burner system however, has yet not been proofed to be on a sufficient technology readiness level for durable operation in HDV fleets. At least we did not identify any supplier announcing such a technology. Both, electricity and fuel-based heating this increases the energy demand and consequently the CO₂ emissions.

Impact of (worst-case) test conditions on possible limits

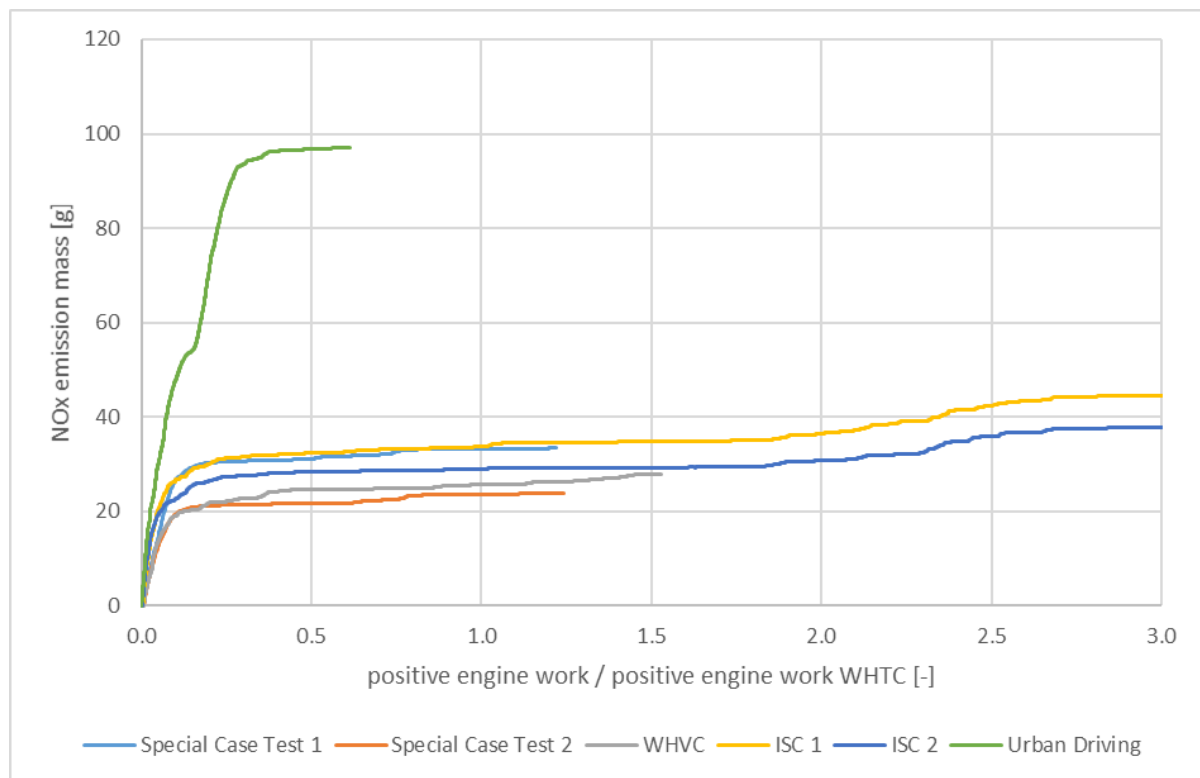
As mentioned before, the stringency of emission limits is also affected by the range of valid test conditions. Of course, Euro 6 extended the test conditions with a new test cycle (WHTC) and on-road tests, but the so called ISC tests have to follow special boundary conditions. That means Euro 6 covers only “standard” driving conditions which are similar to the WHTC test (low load excluded, low weighting of cold start). However, Euro 7 shall allow all kinds of on-road driving with only very few restrictions. This leads to a new definition of worst-case test conditions inside of these wide test boundaries.

We defined in cooperation with other experts in our work for the CLOVE consortium a special case test for Euro 7. This special case test shall mimic a kind of worst-case test for NO_x emissions. This cold start test begins directly after cold start with a motorway uphill part similar to the Brenner motorway from Austria to Italy followed by a Stop&Go phase and ends again with the same motorway uphill part as at the start of the test.

In order to prove if this cycle represents worst-case test conditions we compared the emission behaviour of a Euro 6 D truck in this special case test, a standard ISC test, the WHTC and an urban only test. The tested Euro 6 D truck has a SCR catalyst, but no external EGR to reduce NO_x emissions. The tests were added to the standard test program for HDV within the framework contract with UBA, described e.g (Weller, 2020).

Figure 52 shows cumulated NO_x emissions and the positive engine work related to the WHTC work. All tests have been done at an ambient temperature of 20 – 25°C. It is interesting to see that the highest emissions occur in urban driving, a test with an average engine power of 6 % related to the rated engine power. Obviously, the vehicle needs a longer time to heat up the exhaust aftertreatment system in such low load conditions compared to high load (special case test) or standard driving (ISC test) and this affects the NO_x tailpipe emissions to a large extent. Hot emissions are on a low level in all tests. Consequently, low load driving is the worst-case scenario regarding NO_x emissions for this Euro 6 D truck.

Figure 52: Cumulated NO_x emissions, measurement Euro 6 D truck

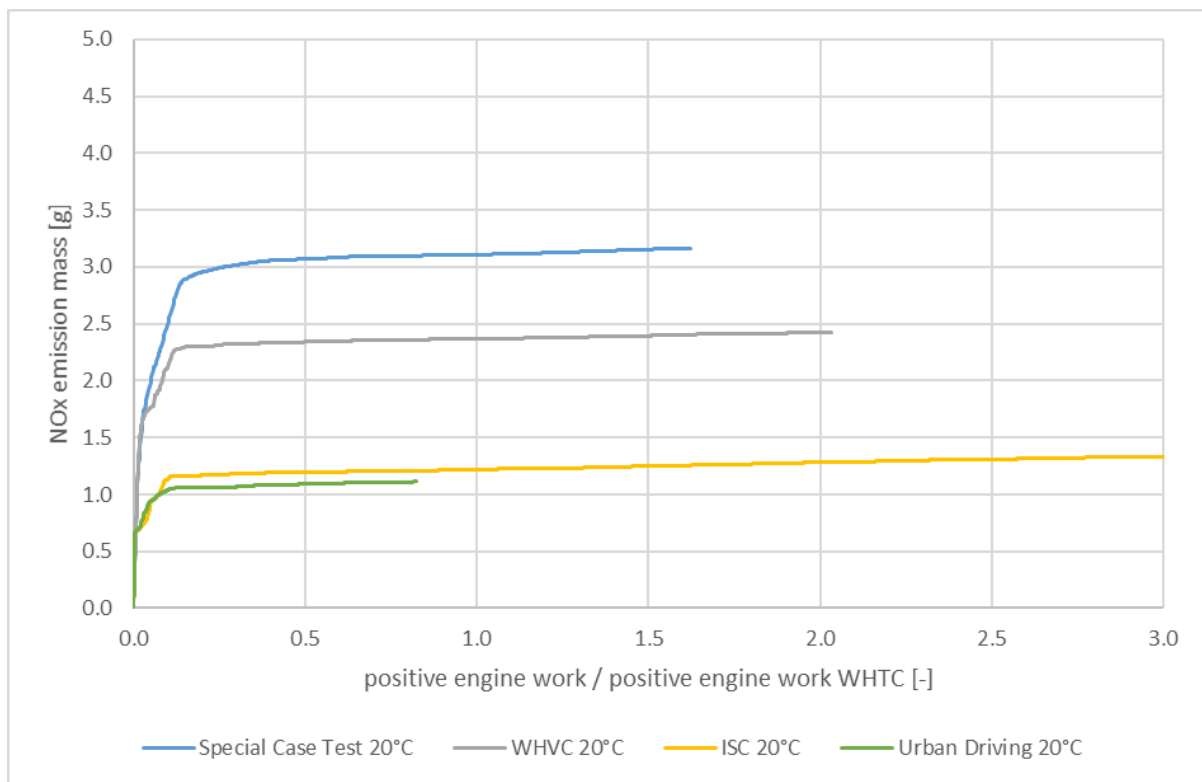


Source: own figure, FVT

Since we are investigating Euro 7, we did simulations to check what the worst-case scenario for Euro 7 technology is. This PHEM simulation model was calibrated based on data of the Bosch Euro 7 demonstrator vehicle and reflects a truck with a closed-coupled exhaust after treatment system in addition to the standard underfloor box and an advanced heating strategy.

Figure 53 illustrates the Euro 7 simulation results. The ambient temperature was set to 20°C in all simulations for comparison reasons. The Euro 7 technology leads to lower NO_x emissions compared to the tested Euro 6 D truck in all tests, but the main finding is the ranking regarding highest NO_x emissions between the single tests. The combination of advanced heating strategy and closed-coupled SCR leads to a fast heat up of the system even at low engine power (urban driving). The main challenge is the high level of engine out emissions at high engine load in the beginning of the test before the catalyst system reaches its perfect operating conditions. Of course, the Euro 7 technology includes reduced engine out emissions due to higher EGR rates, but with Euro 7 conversion rates in hot conditions the cold start emissions dominate the total picture. Consequently, the special case test with its motorway uphill part at the start of the test leads to highest NO_x emissions for Euro 7 vehicles.

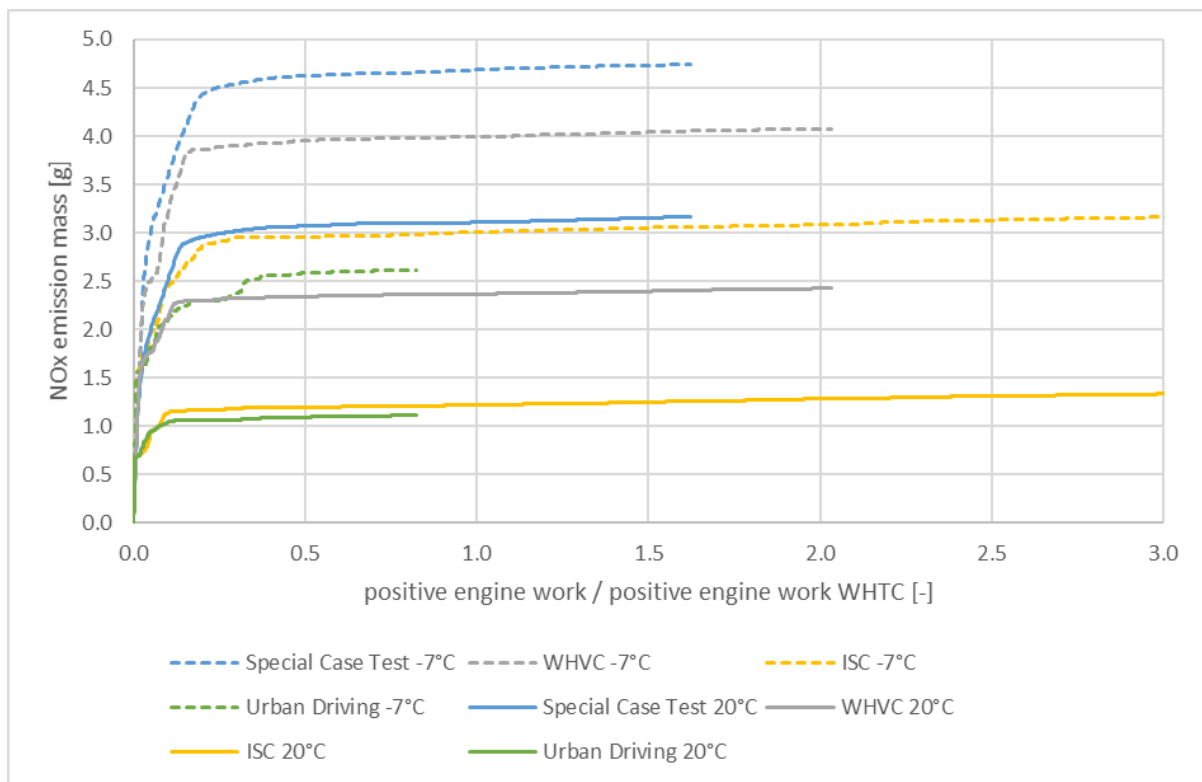
Figure 53: Cumulated NO_x emissions, simulation Euro 7 truck at 20°C



Source: own figure, FVT

Worst-case test conditions are not only defined by the test cycle itself but also by other boundary conditions, e.g. the ambient temperature or the ambient pressure. Figure 54 shows the increase of the Euro 7 NO_x emissions in all tests at lower ambient temperature, in this case -7°C compared to 20°C. Consequently, -7°C represents the worst-case test conditions as this is the lower temperature limit proposed by AGVES. The dashed lines show these results in the corresponding colours for each test. The heating strategy was the same in all simulation runs, thus the differences in emissions results from the different time for heating the after-treatment system and from different raw exhaust emissions at different engine loads.

Figure 54: cumulated NO_x emissions, simulation Euro 7 truck at -7°C and 20°C



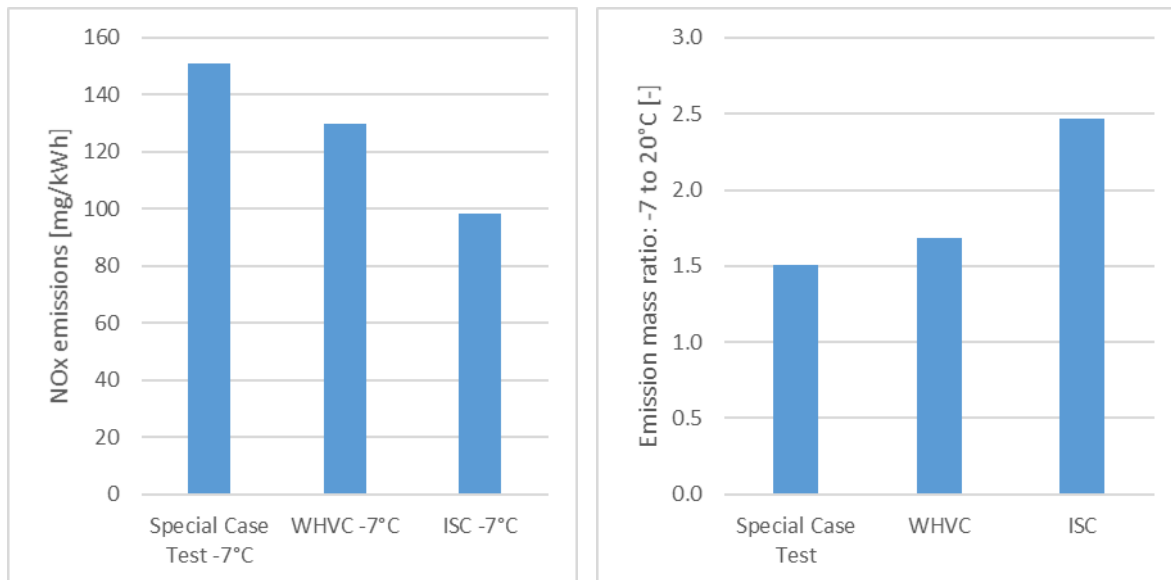
Source: own figure, FVT

Figure 55 quantifies the influence of test cycle and ambient temperature for Euro 7 NO_x simulation results. All tests are shortened to the work of one WHTC for comparison reasons.

The special case test (151 mg/kWh) comes along with 16 % higher NO_x emissions compared to the WHVC (130 mg/kWh) at -7°C. The ISC test, which covers only urban driving at a low load (average engine power of 9 %) in the first WHTC work period, is on a 24 % lower level (98 mg/kWh) than the WHVC. The ratio for NO_x emissions between the special case test and the ISC test is 1.54.

The right part shows the effect of different ambient temperatures again only for the first WHTC work period in each test. The ratio between -7°C and 20°C is 1.51 for the worst-case test, 1.69 in the WHVC and even 2.46 for the ISC test. The average engine power in the first half WHTC work period is 56 % in the special case test, 12 % in the WHVC and 9 % in the ISC test.

Figure 55: NO_x in different test cycles and ambient temperatures, simulation Euro 7 truck

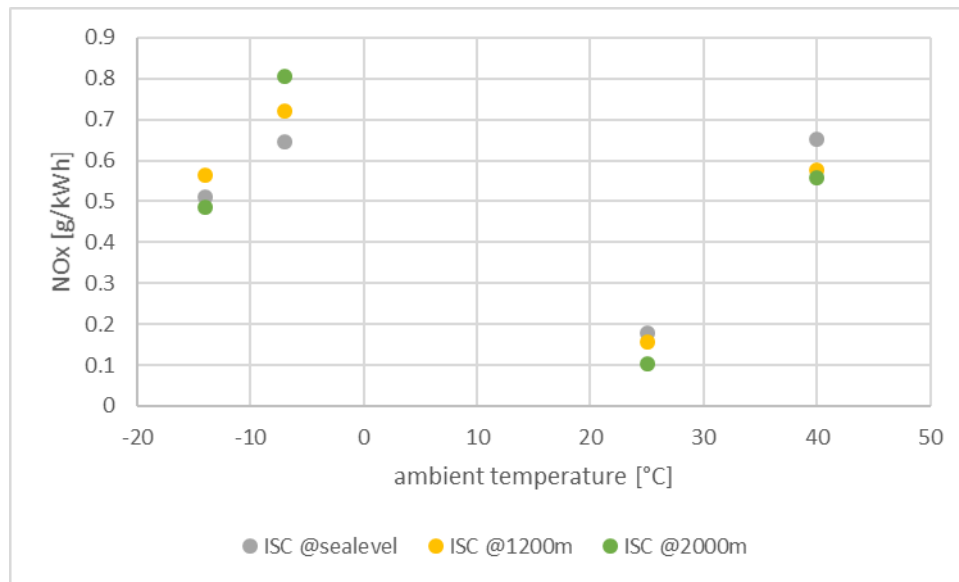


Source: own figure, FVT

To investigate the influence of the altitude on the emission behaviour the HDV measurement campaign in this project contained tests at different ambient pressures. Figure 56 shows the NO_x emissions of an ISC cycle tested on the test bench at different ambient temperatures and pressures. At three of four different ambient temperatures the NO_x emissions are on the lowest level for 2000 m, but at -7°C 2000 m altitude leads to the highest emissions compared to sea-level and 1200 m. The difference between sea-level and 1200 m does also not show a clear trend regarding all results at the four different ambient temperatures. Consequently, we could not find a clear dependency between NO_x emissions and altitude respectively ambient pressure. In addition to NO_x, we investigated possible dependencies between ambient pressure and all other measured emission components, but could not find significant influences.

In the case of PN the definition of worst-case test conditions is different. PN emissions are mainly dependent on the filtration efficiency of the DPF, which increases with higher soot loading. At temperatures at the DPF above approximately 250°C passive regeneration using the NO₂ in the exhaust starts which decreases the soot loading on the DPF and consequently the filtration efficiency. This regeneration process is supported by the DOC upstream of the DPF to produce NO₂ from NO raw exhaust and prevents too high backpressures at the DPF without doing very frequent active regenerations with their fuel penalty. At temperatures above ca 550°C soot is oxidised with the Oxygen in the exhaust, which leads to a much faster regeneration of the filter than the NO₂ base oxidation since O₂ concentrations are much higher than NO₂ concentrations in the exhaust. That means, the PN emissions are on a higher level during and after long high load driving (e.g. motorway uphill driving) due to the decreasing filtration efficiency. In addition to that, the regeneration process itself can lead to an increase of PN emissions, possibly because of the higher temperatures in the DPF substrate and thus higher gas velocities and consequently less time less time to separate the particles by diffusion. Also, particles without carbon core may be produced and released in the oxidation process.

Figure 56: Influence of different ambient pressures and temperatures on NO_x, measurement results Euro 6 D truck



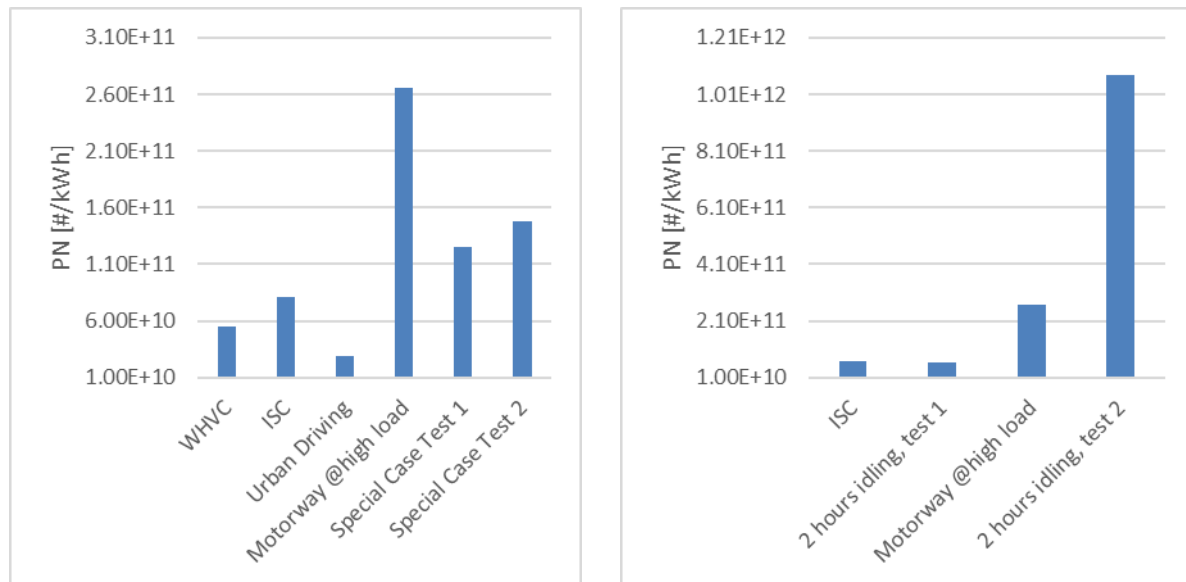
Source: own figure, FVT

Figure 57 shows on the left side the PN emissions for different tests conducted with a Euro 6 D truck. Independent of the low PN emission level, we can see that urban driving leads to lowest PN emissions and high load driving on the motorway to highest PN emissions. The special case test comes also along with higher PN emissions compared to a standard ISC test. This can be explained by the high load motorway part at the start and at the end of this test.

The right graph of Figure 57 shows the influence of the soot loading at the start of the test. We performed an idling test after the standard ISC test and repeated this idling test after high load motorway driving. The idling test 1 was run without air conditioning and test 2 with air conditioning. However, the soot load at the start of the test has much more influence on the PN emissions compared to the different auxiliary settings during the test. The high idling PN emissions (2 hours idling test, test 2) after the high load motorway drive, which leads due to the passive regeneration to a low soot load at the DPF, is clearly visible. Standard motorway driving at the end of the ISC test does obviously not empty the DPF in the same way. That can be seen in the PN emissions of 2 hours idling, test 1, which are on a lower level compared to idling test 2.

Thus, the worst-case test regarding PN emissions is long high load driving. A realistic test could be a full loaded truck on a motorway uphill drive, e.g. on the Brenner motorway with a cold start after an overnight stay at a motorway service station in winter.

Figure 57: PN in different test cycles, measurement Euro 6 D truck



Source: own figure, FVT

Possible reduction of cold start (offset)

Cold start emissions have a high impact on the total emission mass emitted by HDVs. Consequently, this is an important topic in the future Euro 7 regulation. Before setting any limits, it has to be checked where we are now (Euro 6 D trucks) and what are possible technical measures to reduce the cold start emissions.

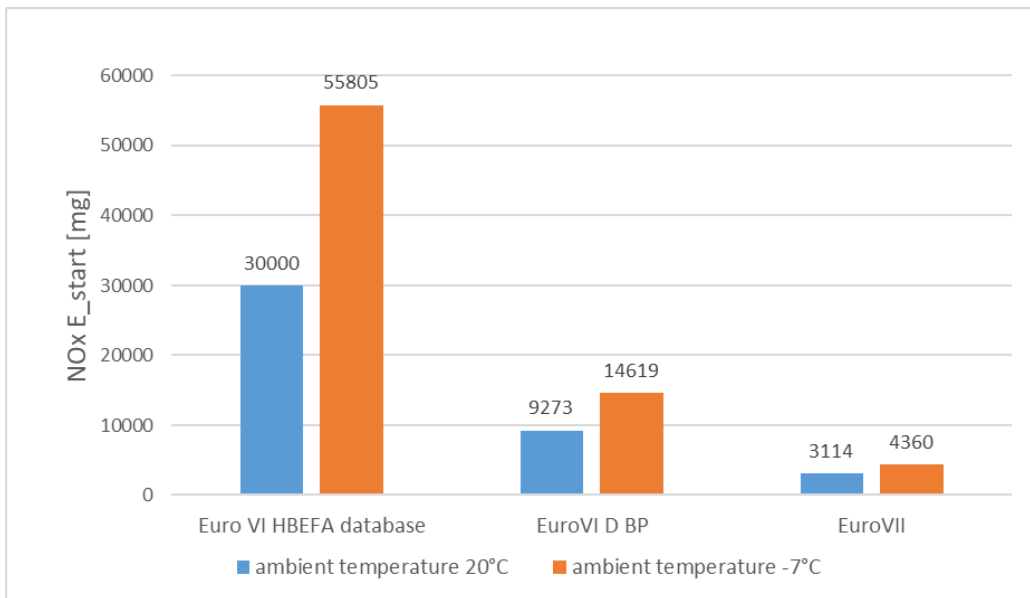
Figure 58 illustrates a comparison of the NO_x cold start emissions of the average Euro 6 truck represented by the HBEFA database representing Euro 6 A to C vehicles, the Euro 6 D best performer truck and a Euro 7 simulation model based on the Bosch demonstrator data at -7°C and 20°C. The data is based on the E_{start} values of the upper bound functions already illustrated.

The first thing to see is the increase of the cold start emissions with lower ambient temperature. Of course, lower ambient temperatures lead to lower material temperatures, consequently the heat up of the system takes longer and that leads to higher cumulative emissions during the cold start phase. This base impact is technology independent.

In addition to that, it is obvious that Euro 6 D best performer technology leads to an emission decrease compared to the average Euro 6 truck represented by the HBEFA database. The main improvement can be related to advanced heating strategies. The Euro 7 technology brings the cold start emissions on an even lower level. The main measures are an advanced heating strategy, a closed coupled SCR in addition to the underfloor catalyst and NO_x engine out reduction based on high EGR rates in the cold start phase. The technology mix of the Bosch demonstrator meets the technology portfolio available for 2027 serial production quite well and meets the technologies described in the AGVES proposal HD2.

An additional reduction would be possible by preheating the system before engine start. Due to the low technology readiness level of such systems we did not consider pre-heating here.

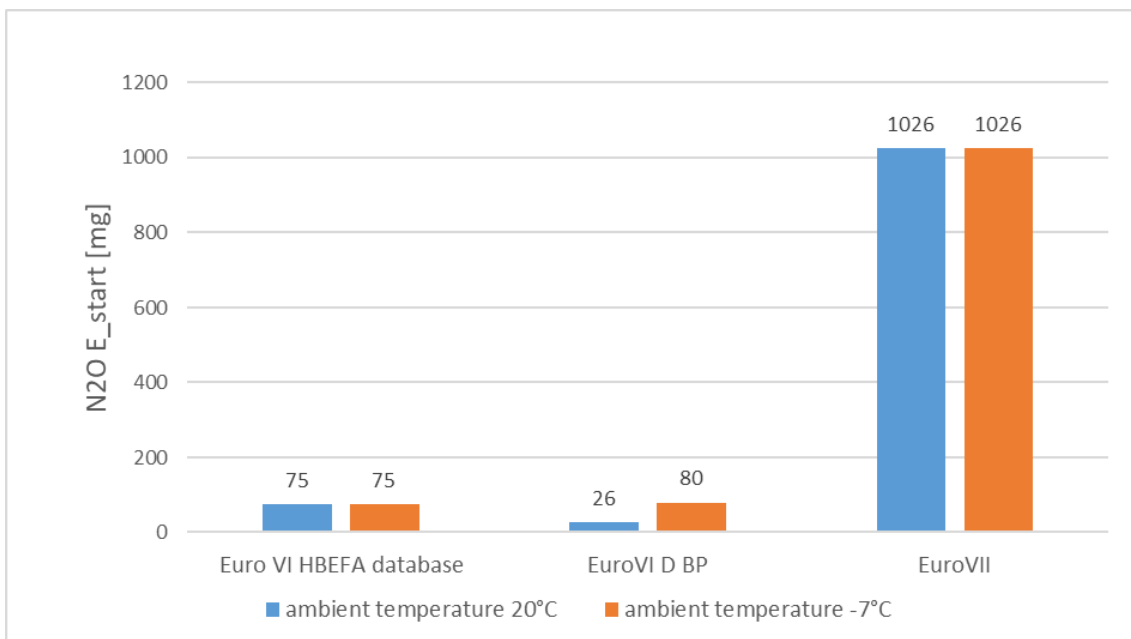
Figure 58: Comparison of Euro 6, Euro 6 D BP and Euro 7, NO_x E_{start} emissions



Source: own figure, FVT

Figure 59 illustrates the cold start N₂O emissions. It is interesting to see that the N₂O cold start emissions of the Euro 7 demonstrator vehicle are on significant higher level compared to Euro 6 emissions. Current low temperature catalyst technologies (mainly CU-zeolite based) produce N₂O as by-product of the NO conversion. Furthermore, N₂O emissions are generated in the anti-slip catalyst as by-product of NH₃ conversion. As already described, the proposed AGVES N₂O limits seem to be quite ambitious and require further research work on catalyst technologies regarding N₂O emissions.

Figure 59: Comparison of Euro 6, Euro 6 D BP and Euro 7, N₂O E_{start} emissions

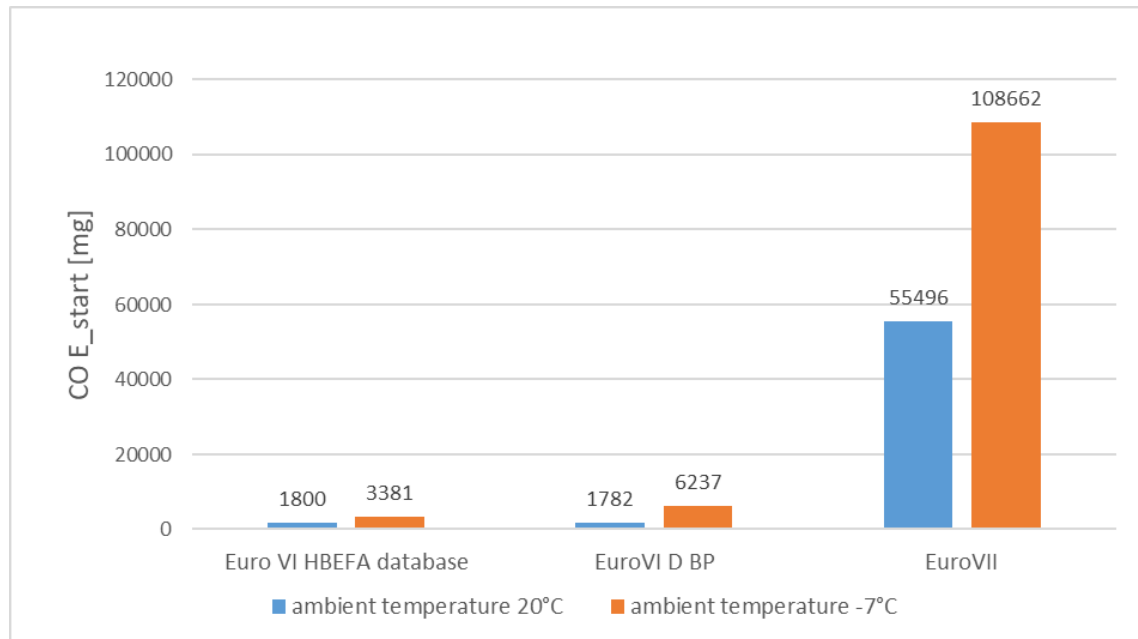


Source: own figure, FVT

Figure 60 shows the cold start CO emissions. As already described, heating strategies for the catalysts lead to higher CO emissions, because the additional injected fuel cannot be oxidised

completely in all operating conditions. Because of that, Euro 6 D Best Performer (BP) is on a higher level compared to Euro 6 HBEFA database. Euro 7 cold start NO_x limits require additional heating and this leads again to significant higher emissions for the EURO 7 demonstrator. However, the proposed AGVES limits seem to be feasible for Euro 7 and a further reduction of CO emissions can be expected since the heating strategies in cold start conditions applied for EURO 7 are quite new for HDVs. There should be some improvement potential regarding the combustion process itself and the oxidation catalyst. The proposed parameters of the limit function are summarised in chapter B.4.

Figure 60: Comparison of Euro 6, Euro 6 D BP and Euro 7, CO E_{start} emissions



Source: own figure, FVT

Possible reduction of hot emissions

Most trucks, especially in long haul operation, do one cold start at the beginning of their working day and proceed after that with continuous driving in hot engine and exhaust aftertreatment conditions. After compulsory driver breaks every 4 to 4.5 hours, semi-hot starts occur. In delivery missions' breaks occur also for loading and unloading. Such short breaks (approximately maximum 30 to 45 minutes) do not lead to a complete cool down of engine and exhaust aftertreatment system. Consequently, the starts after these breaks cannot be interpreted as cold starts, but as parts of hot operation. This behaviour illustrates the importance of hot emissions regarding total driving times and consequently total emissions masses. Considering also engine-off time e.g. up to 45 minutes as test time, would lead to extra semi-hot start emission allowances after such breaks due to the " E_{time} " parameter in the UBFs. This could be an option to allow also typical urban delivery cycles with several stop times for loading and unloading to be valid tests and it would incentives engine start/stop systems for EURO 7. However, if the E_{time} parameter are suitable for this purpose is open yet, since no measurements on semi-hot starts of well insulated exhaust systems are available yet⁴³.

Figure 61 shows the influence of the ambient temperature on hot NO_x emissions and the difference between Euro 6 and Euro 7 technology. For that reason, the graph compares the E_{kWh}

⁴³ In the AGVES limit proposal, the "reference power" method has a similar function as the E_{time} parameter here, i.e. to adjust the limits to low average power test conditions, including also longer idling and/or stop phases.

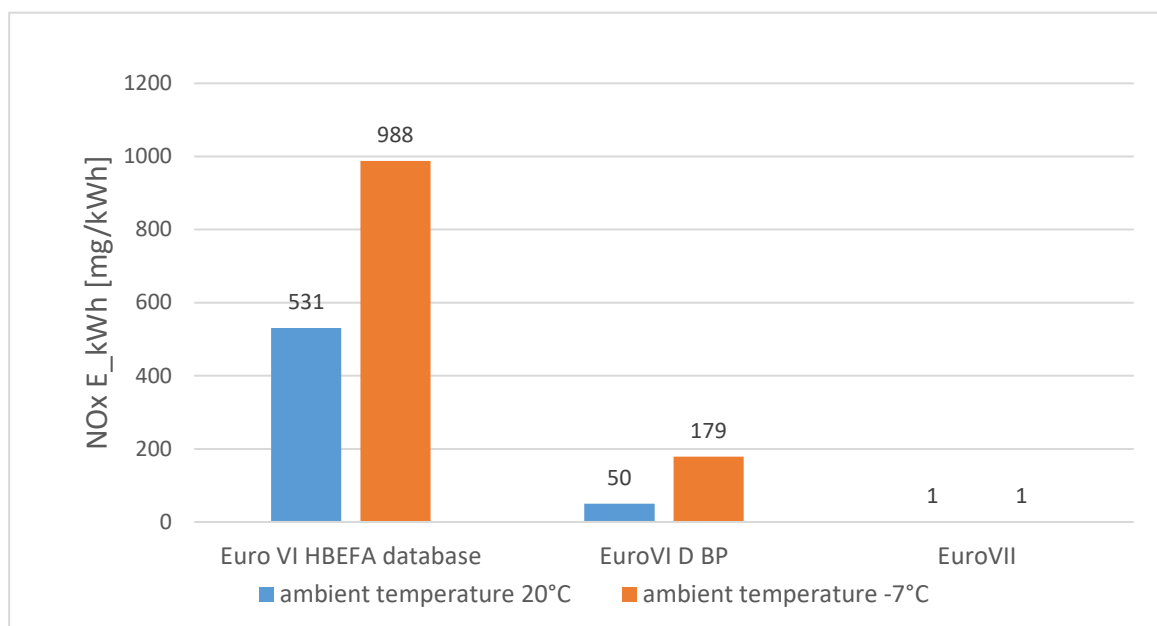
terms of the upper bound functions of the average Euro 6 truck represented by the HBEFA database, the Euro 6 D best performer and the Euro 7 technology.

The NO_x emissions of the average Euro 6 HBEFA database truck are nearly doubled at -7°C compared to 20°C while the emissions of the Euro 6 D BP are even more than triple at -7°C. The comparison of the two different technologies at 20 °C shows that the emissions of the average Euro 6 HBEFA truck are more than ten times the level of the Euro 6 D best performer truck. Obviously, the best performer Euro 6 D truck is able to reduce NO_x emissions in hot operating conditions more effective than the average Euro 6 HBEFA truck in demanding driving situations. This can be mainly explained by additional heating measures, especially in low load driving. The NO_x emissions of the UBF for the Euro 7 demonstrator are compared to Euro 6 on a very low level during hot driving independently of the ambient temperature. The additional heating measures in combination with the closed coupled SCR and improved catalyst technologies and volumes lead to high conversion rates for NO_x in all hot operation conditions in Euro 7.

The results show that Euro 7 technology leads to very low NO_x emissions in hot conditions. These emission levels are below analyser accuracy limits and thus no further measures to reduce NO_x in hot emissions seem to be necessary. For EURO 7 durability will be an interesting topic, since an extended definition of the useful life is announced, which better reflects the real-life time of HDVs on the road. The Bosch demonstrator is already thermal, but not chemical aged. The thermal aging reflects the current useful life of 700 000 km for N3 vehicles above 16t TPMLM. That means, it gives a good indication regarding the durability topic, but does not show the complete picture. As a consequence, all limit functions produced, refer to a useful life of 700 000km (300 000 for smaller HDVs).

The difference of the AGVES technologies HD2 (illustrated here by the Bosch demonstrator based UBF) and HD3 (additional preheating measures) do not influence the NO_x emissions in hot operation significantly, only in cold start conditions. Thus, the parameters “E_{kWh}” and “E_{time}” elaborated here can be compared to AGVES HD2 and HD3 limits.

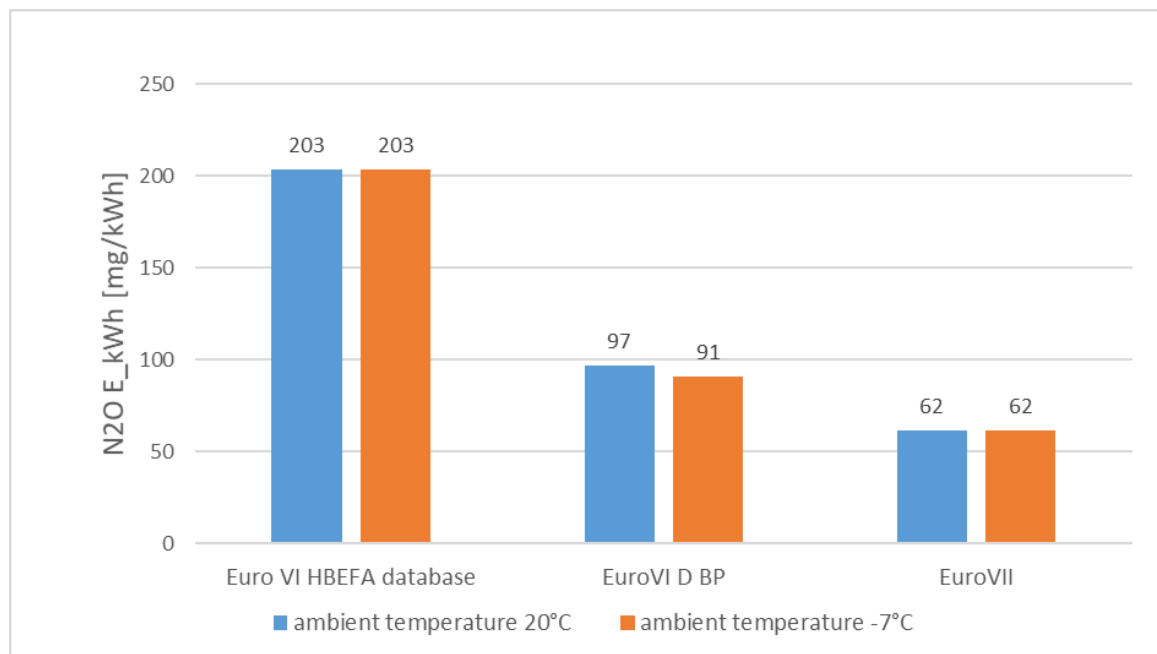
Figure 61: Comparison of Euro 6, Euro 6 D BP and Euro 7, NO_x E_{kWh} emissions



Source: own figure, FVT

Figure 62 illustrates the N₂O emissions in hot driving conditions. The results show a continuous decrease of the emissions from Euro 6 A to C vehicles till Euro 7. We assume the main driver of this reduction to be an improved AdBlue dosing strategy, preventing NH₃ slip and the resulting N₂O formation on the ASCs. Thus, N₂O emissions can be reduced compared to EURO 6 together with NO_x emissions effectively in hot conditions. A comparison with the AGVES limits was already shown showing that the AGVES limits are much more demanding than the limit function elaborated based on the EURO 7 demonstrator. We have not applied a further reduction of the limit function, since the related technologies are not yet entirely clear. For heavy trucks vanadium-based SCR could reduce N₂O emissions, for smaller engines the exhaust temperatures would be too high for such a technology.

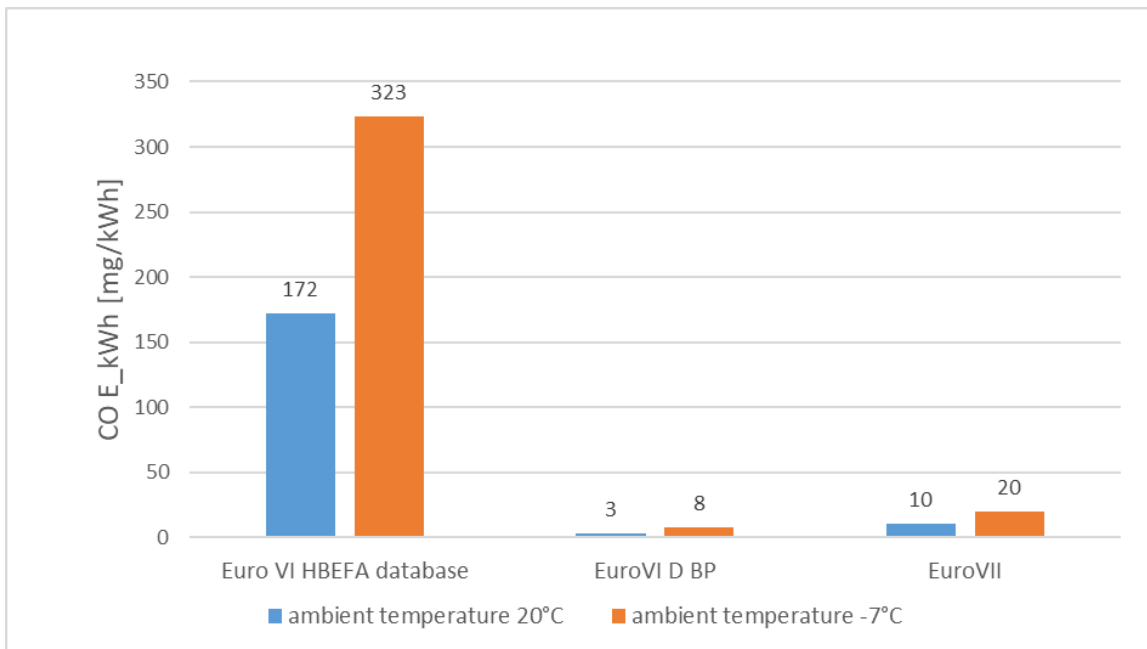
Figure 62: Comparison of Euro 6, Euro 6 D BP and Euro 7, N₂O E_{kWh} emissions



Source: own figure, FVT

CO emissions during cold start occurred to be significantly higher due to the advanced catalyst heating strategies. This is obviously not the case regarding hot emissions as Figure 63 shows. The improved catalysts of Euro 6 D and Euro 7 vehicles cause lower CO emissions in hot driving compared to Euro 6 A to C vehicles. Also, in hot operation the EURO 7 technology use heating measures to guarantee good conversions at low engine loads. This can be seen regarding the higher CO emissions in Euro 7 compared to the Euro 6 D best performer. But it has to be mentioned that both the Euro 6 D best performer and Euro 7 trucks are on a very low CO level. The results are on such a low level that further improvements for hot CO emissions compared to the EURO 7 demonstrator do not seem to be necessary.

Figure 63: Comparison of Euro 6, Euro 6 D BP and Euro 7, CO E_{kWh} emissions



Source: own figure, FVT

B.4 Summary and Recommendations

B.4.1 Light-duty vehicles

To allow for testing in all situations, the use of an ‘Upper Bound Function’ (UBF), adds flexibility compared to fixed limit values. The UBFs developed consider cold start, test time and test distance and thus also different average vehicle speeds in RDE tests. The parameters are designed to fit for low temperature cold starts, for “normal driving”, i.e. no excessive altitude gains between start and end of a test and no misuse of the driver by artificial acceleration and brake manoeuvres.

Upper Bound Function (UBF) for LDVs:

$$E_{UB} \left[\frac{mg}{km} \right] = \frac{E_{start} \times f(T) \times g(CO_2) + E_{time} \times time + E_{km} \times distance}{distance},$$

The emission coefficients for the EURO 7 UBF are reduced by a factor of 50% compared to those determined for current Euro 6d and Euro 6d-Temp vehicles. This function can be used to calculate pollutant emissions per trip. These emissions should then be considered an upper bound on the average emissions of that trip. As discussed in Section 3.1 this could be directly considered a limit function, though allowances could be made for ageing. However, another option is to keep emission limits lower, and instead require replacement of aged components leading to high emissions.

LD UBF emission coefficients recommended for Euro 7 (50% reduction cf. Euro 6d and 6d-Temp)

Emission	E _{start} [mg]	E _{time} [mg/s]	E _{km} [mg/km]
CH ₄	80	0.06	1.08

Emission	E _{start} [mg]	E _{time} [mg/s]	E _{km} [mg/km]
CO	1069.99	0.87	65.59
HC	250	0.13	2.21
N ₂ O	24.56	0.14	0.39
NH ₃	17.24	0.03	4.63
NO _x	335.27	0.22	9.56
PM	0.84	0.004	0.28
PNF	1.41E+12	9.01E+08	3.46E+10

B.4.2 Heavy-duty vehicles

For HDVs the UBFs use a work-based parameter instead of the distance-based parameters applied for LDVs. The work-based parameter considers increasing emission levels with increasing engine work and thus covers effects of different vehicle loading, road gradients and driving style. Due to the low power to mass ration of HDVs, the influence of the driver on the emission result is low anyway. Thus “normal driving” does not need many definitions for EURO RDE testing. The functions consider cold starts down to ca. -10°C. Lower temperatures with long soak time would lead to frozen AdBlue tanks. Such situations should be covered by an extra allowance for the E_{start} parameter in the function. The necessary allowance was not elaborated here.

The Limit functions are based on test data for a EURO 7 demonstrator engine and the best performing EURO 6 truck measured so far. The additional closed coupled catalysts in the EURO 7 technology package together with advanced heating strategies can achieve massive emission reductions for NO_x especially in cold start and low load driving compared to EURO 6.

The following equation repeats the principle structure of the Upper Bound Function (UBF) for HDVs:

$$E_{UB} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{E_{start} \times f(T) + E_{time} \times f(T) \times time + E_{kW} \times f(T) \times work}{work}$$

We added margins for serial spread and worst-case test conditions on the UBF results to create the final limit function which is structured in the same way as the UBF. Table 26 illustrates the coefficients E_{start}, E_{time} and E_{kWh} for the limit function for Euro 7 at -7°C.

Table 26: HD Limit Function coefficients elaborated for Euro 7, valid for tests down to -7°C

Emission	E _{start} [mg]	E _{time} [mg/s]	E _{kWh} [mg/kWh]
CH ₄	4188	0.0236	18.38
CO	223843	0.0382	41.60
HC	15712	0.0957	7.41
N ₂ O	2113	0.5818	126.89

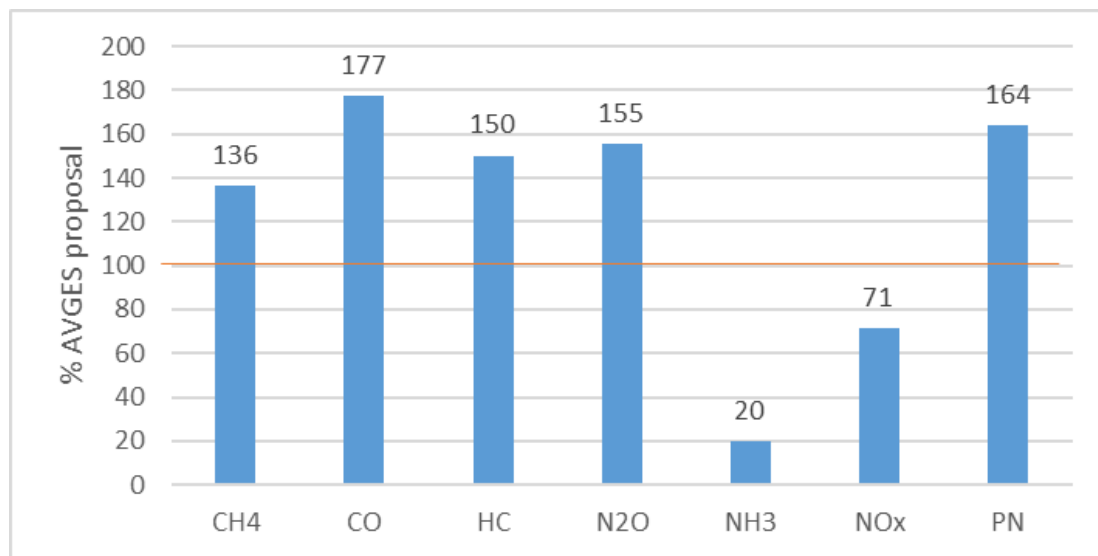
Emission	E _{start} [mg]	E _{time} [mg/s]	E _{kwh} [mg/kWh]
NH ₃	0	0.0175	7.68
NO _x	8981	0.0024	1.99
PN10	2.6 E+13	1.2 E+8	9.0 E+10

Figure 64: Comparison of the AVGES proposal and the UBF limits calculated for 1x WHTC cold
 Figure 64 and Figure 65 illustrate the ratio between the emission limit functions based on the UBFs and the limits proposed by AGVES.

The cold start emissions (1 x WHTC cold) show the focus on NO_x regarding emission control of the demonstrator. This seems to be a result from the initial target to meet CARB 2027 limit proposal with the engine. The CARB proposal is also focussing on NO_x reductions. The resulting limits based on the UBFs are for NO_x and NH₃ below the AGVES limits, but for CH₄, CO, HC, N₂O and PN the flexible limits are above.

This illustrates the conflicts of goals in engine development and also in limit setting: If the limits are very low for one component (e.g. NO_x), this tend to increase other exhaust components because of heating strategies or other measures. Consequently, the limits should be set well balanced regarding technical feasibilities and need from environment protection perspective. However, the PN limit has to be regarded critically because of uncertainties concerning the low number of measurement data so far and the measurement accuracy of PN10.

Figure 64: Comparison of the AVGES proposal and the UBF limits calculated for 1x WHTC cold



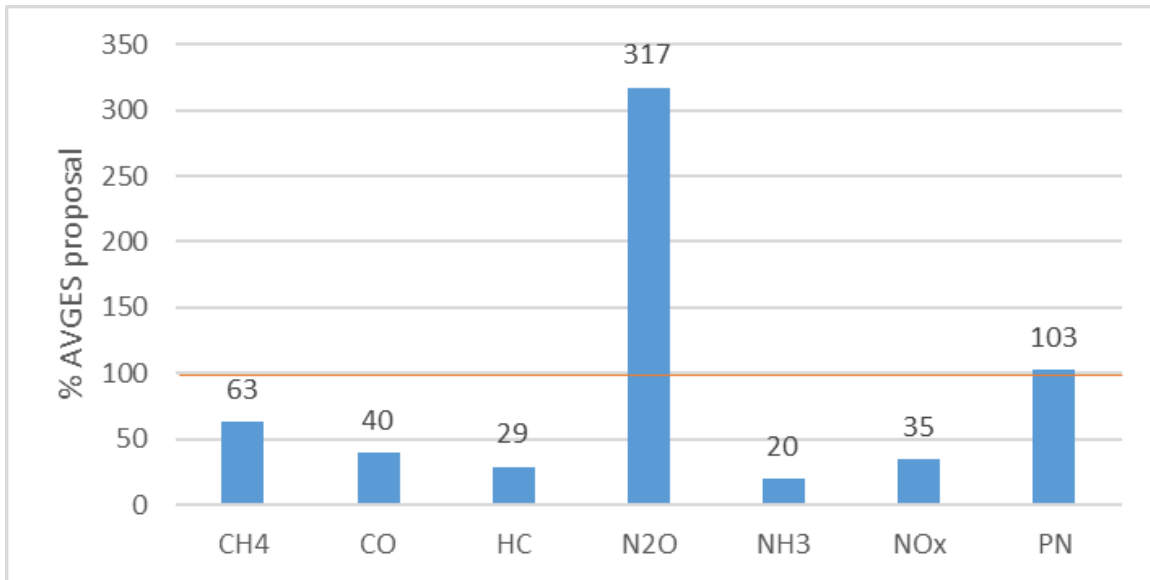
Source: own figure, FVT

Regarding hot emissions only N₂O results are much higher from the limit function than in the AVGES proposal. All other AVGES limits seem to be feasible. Very low NO_x levels lead to an increase of N₂O emissions by use of current catalyst technologies. Consequently, the N₂O emission limit should be investigated regarding feasibility due to possible technology improvements for Euro 7. As described before, a combined limit for CH₄ and N₂O using their GWPs as weighting factors, may be considered. The combined limit can be set to a level which

does not weaken the ambitious CO₂ reduction strategies⁴⁴. With such an approach, diesel engines could have higher N₂O emissions due to almost zero CH₄ levels and CNG engines could have higher CH₄ levels due to low N₂O emissions.

Regarding PN10 limits, we suggest to start a broader validation campaign, ideally on EU level to define the details for PN10 measurement devices and also to check the feasibility of the AGVES limit proposals.

Figure 65: Comparison of the AVGES proposal and the UBF-limits calculated for 1x WHTC hot



Source: own figure, FVT

B.5 Annex

B.5.1 Equations and Parameters Flexible Functions

Table 27: Temperature dependency of the initial offset (E_{start})

Temp. range	F(t) _{E_start_NOx}	F(t) _{E_start_CO}
t > 20°C	F(t) _{E_start_NOx} = 1	F(t) _{E_start_CO} = 1
t < 20°C	F(t) _{E_start_NOx} = 1 + (20-t)*0.0045045	F(t) _{E_start_CO} = 1 + (20-t)*0.027907

Table 28: Temperature dependency of the emissions per second (E_{time})

Temp. range	F(t) _{E_time_NOx}	F(t) _{E_time_CO}	F(t) _{E_time_HC}
t > 20°C	F(t) _{E_time_NOx} = 1	F(t) _{E_time_CO} = 1	F(t) _{E_time_HC} = 1
t < 20°C	F(t) _{E_time_NOx} = 1 + (20-t) * 0.13333	F(t) _{E_time_CO} = 1 + (20-t) * 0.039241	F(t) _{E_time_HC} = 1 + (20-t) * 0.0095238

⁴⁴ E.g. set limit to a CO₂-equivalent of 40g/kWh, which is ca. 6% of future engines direct CO₂ emission level to achieve in average driving around 3% additional GHG emissions by N₂O and CH₄.

Table 29: Temperature dependency of E_{km}

Temp. range	$F(t)_{E_{km_NOx}}$
$t > 20^{\circ}\text{C}$	$F(t)_{E_{km_NOx}} = 1$
$t < 20^{\circ}\text{C}$	$F(t)_{E_{km_NOx}} = 1 + (20-t) * 0.06567$

Table 30: Work dependency of the NO_x emissions

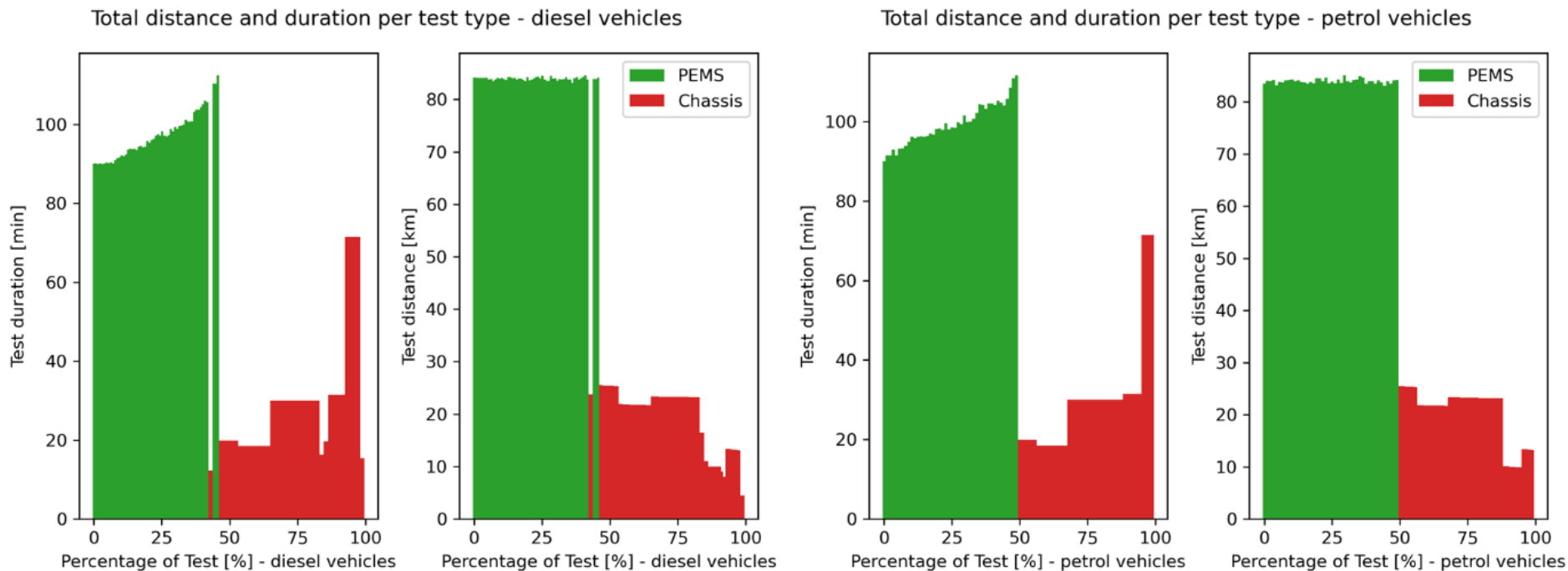
Positive work at the wheel after 300s	$F(w300)_{E_{start_NOx}}$	Positive work at the wheel after the complete test	$F(w)_{E_{km_NOx}}$
$w300 < 0.132$ kWh/km	$F(w300)_{E_{start_NOx}} = 1$	$w < 0.169$ kWh/km	$F(w)_{E_{km_NOx}} = 1$
$w300 > 0.132$ kWh/km	$F(w300)_{E_{start_NOx}} = 1 + (w300-0.132)*9.5238$	$w > 0.169$ kWh/km	$F(w)_{E_{km_NOx}} = 1 + (w-0.169)*137.55$

Table 31: CO_2 correction function to cover high load conditions

CO_2 ratio between the measured RDE cycle and the WLTC	$F(CO_2)$
$CO_2/CO_{2WLTC} < 1.25$	$F(CO_2) = 1$
$CO_2/CO_{2WLTC} > 1.25$	$F(CO_2) = 2.3526*(CO_2/CO_{2WLTC}) - 1.9481$

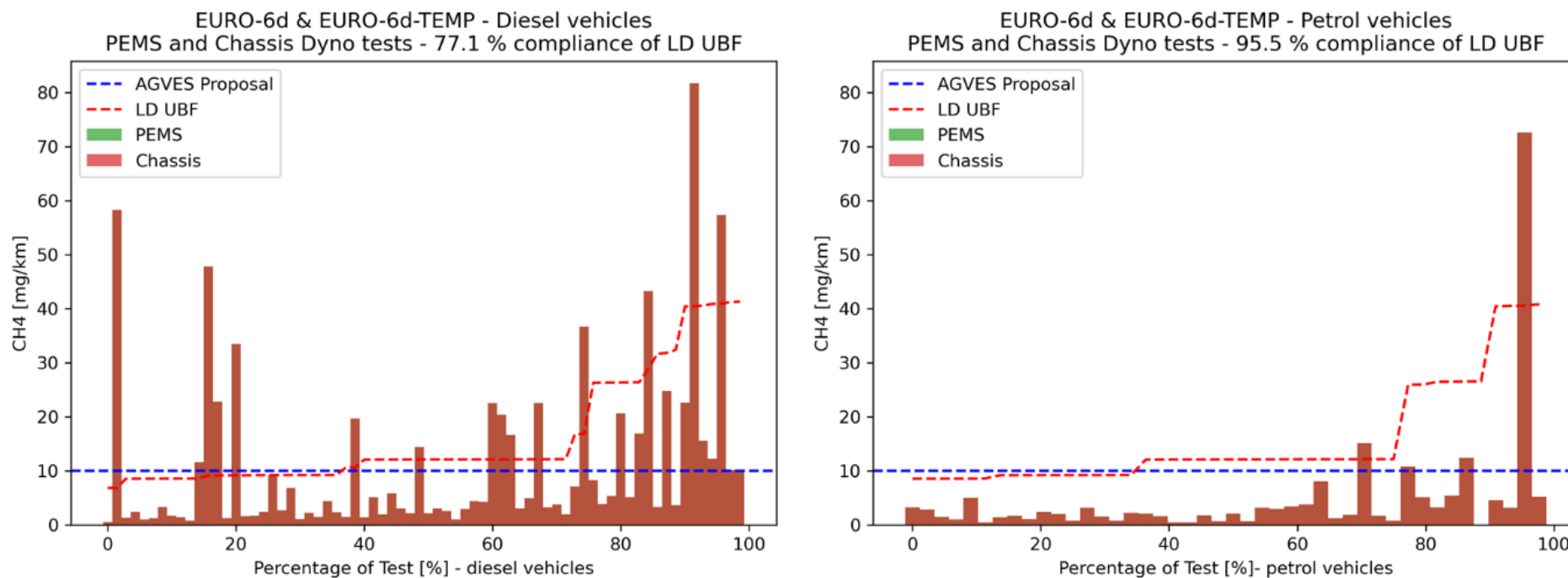
B.5.2 Additional Figures for UBA data

Figure 66 Variation of test duration and test distance measured from UBA dataset



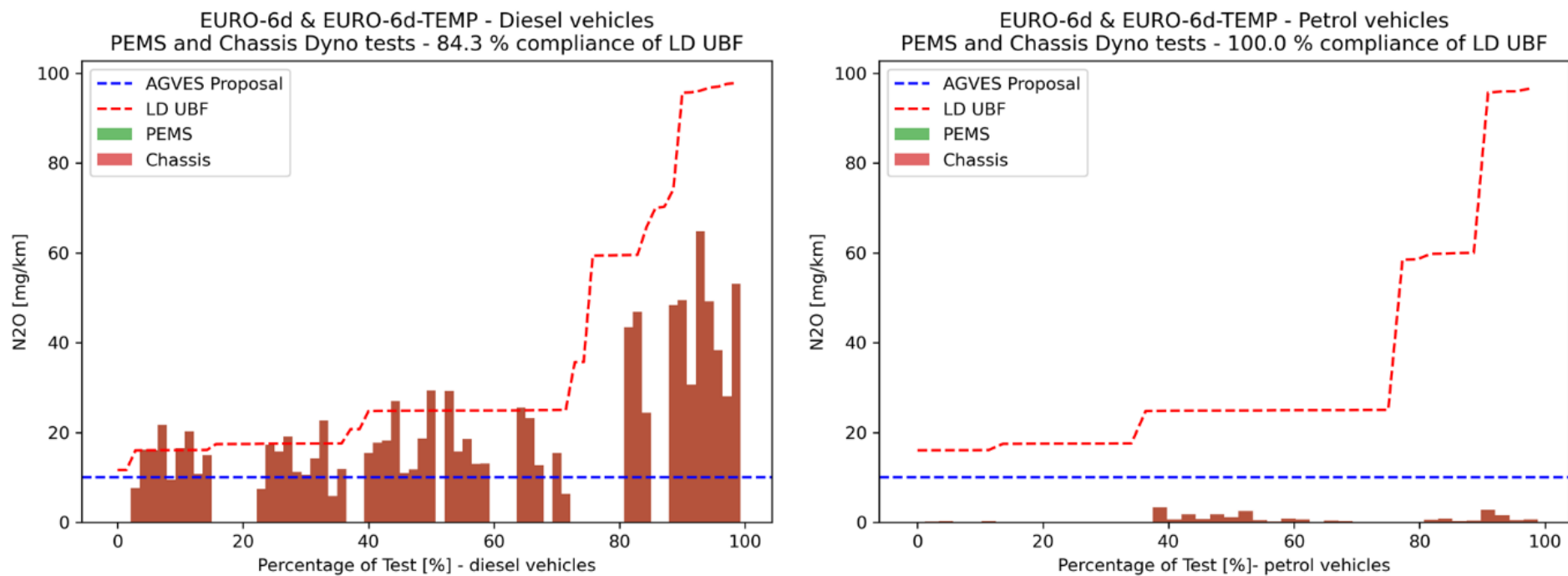
Source: own figure, TNO

Figure 67 Distribution of CH₄ emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF and AGVES proposed limit



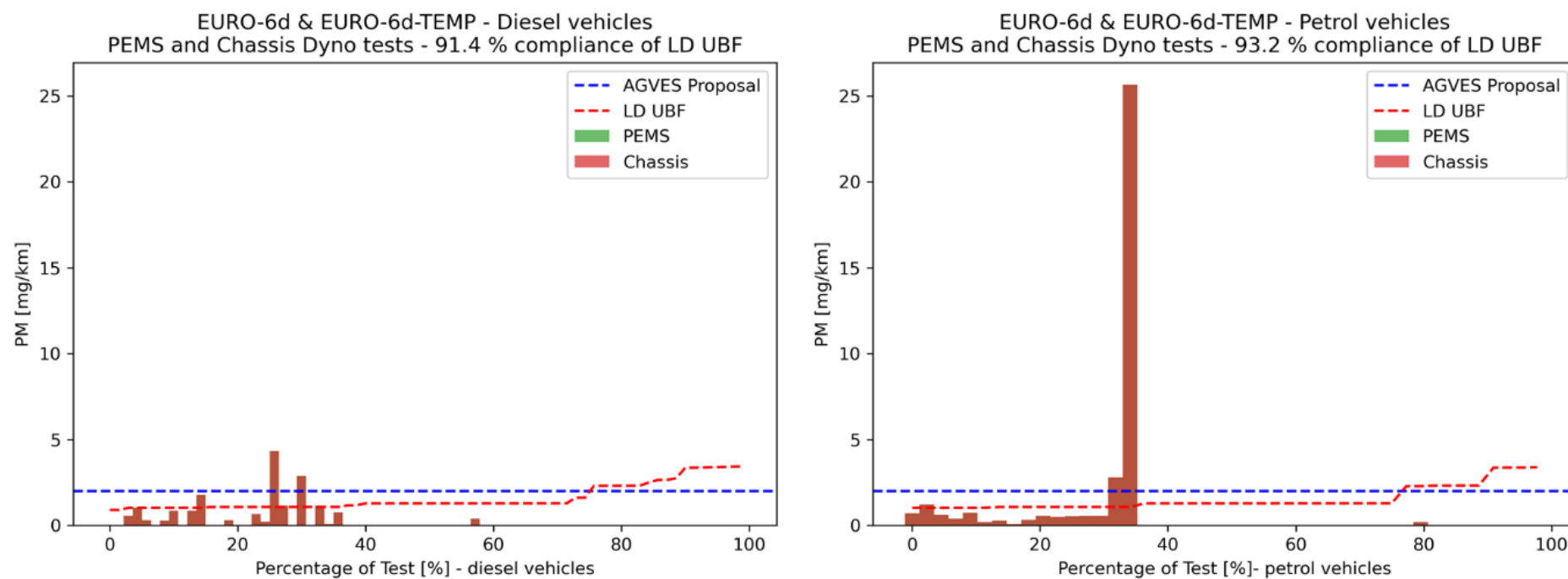
Source: own figure, TNO

Figure 68 Distribution of N₂O emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF and AGVES proposed limit



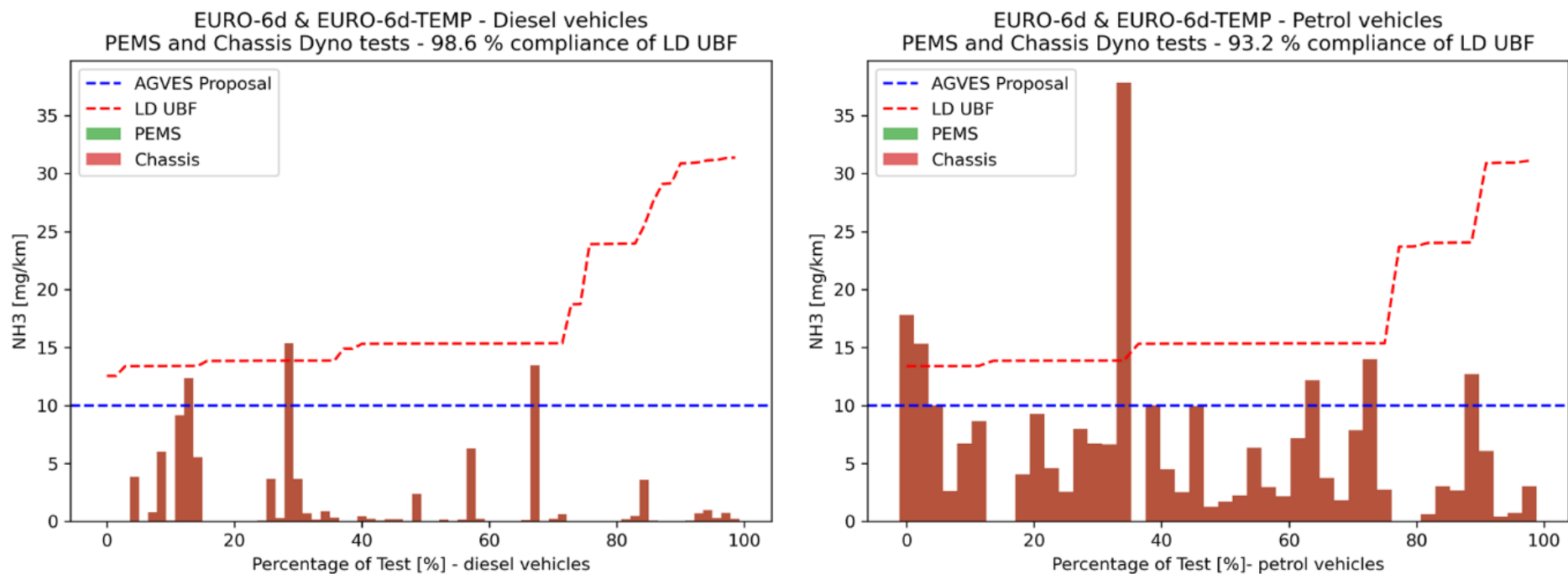
Source: own figure, TNO

Figure 69 Distribution of PM emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF and AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

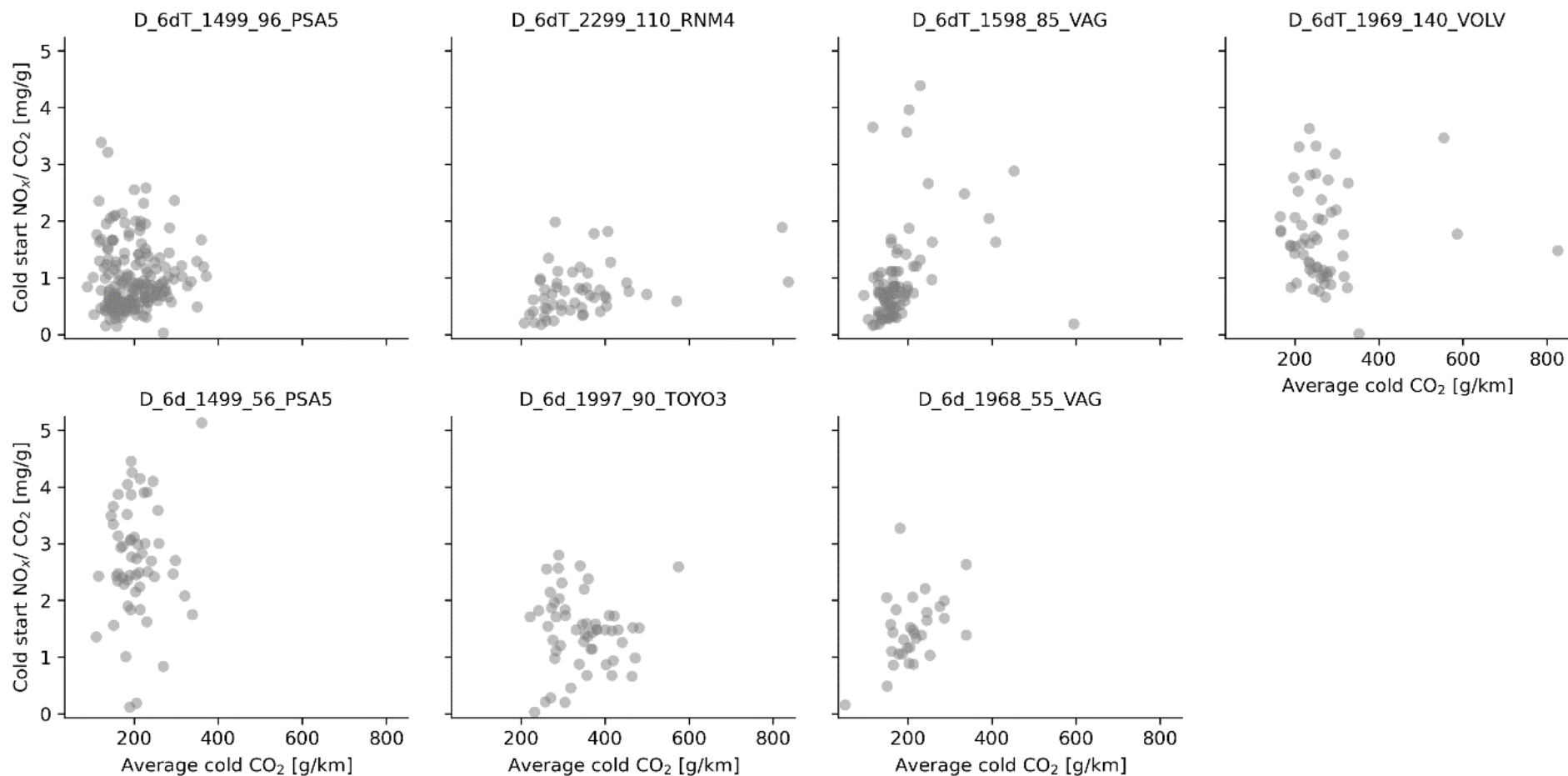
Figure 70 Distribution of NH₃ emission from UBA dataset, compared to the calculated E_{UB} from LD UBF and AGVES proposed limit



Source: own figure, TNO

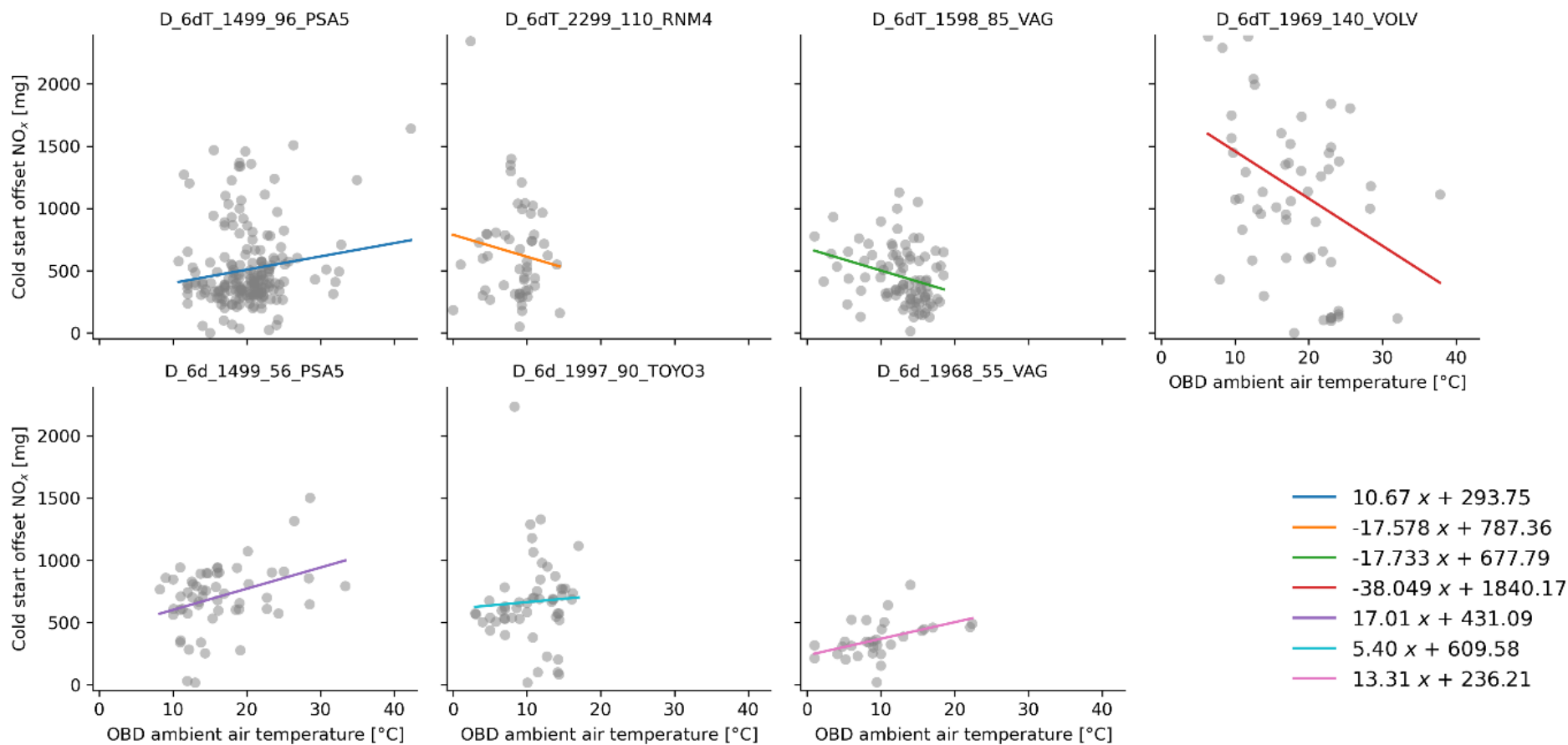
B.5.3 Additional Figures On-road Monitoring

Figure 71 Correlation between the NO_x/CO₂ ratio and the average CO₂ emissions during cold start. Each point is one trip. Although high NO_x/CO₂ values often have high corresponding average CO₂ values, not all cold starts with high average CO₂ have high NO_x/CO₂.



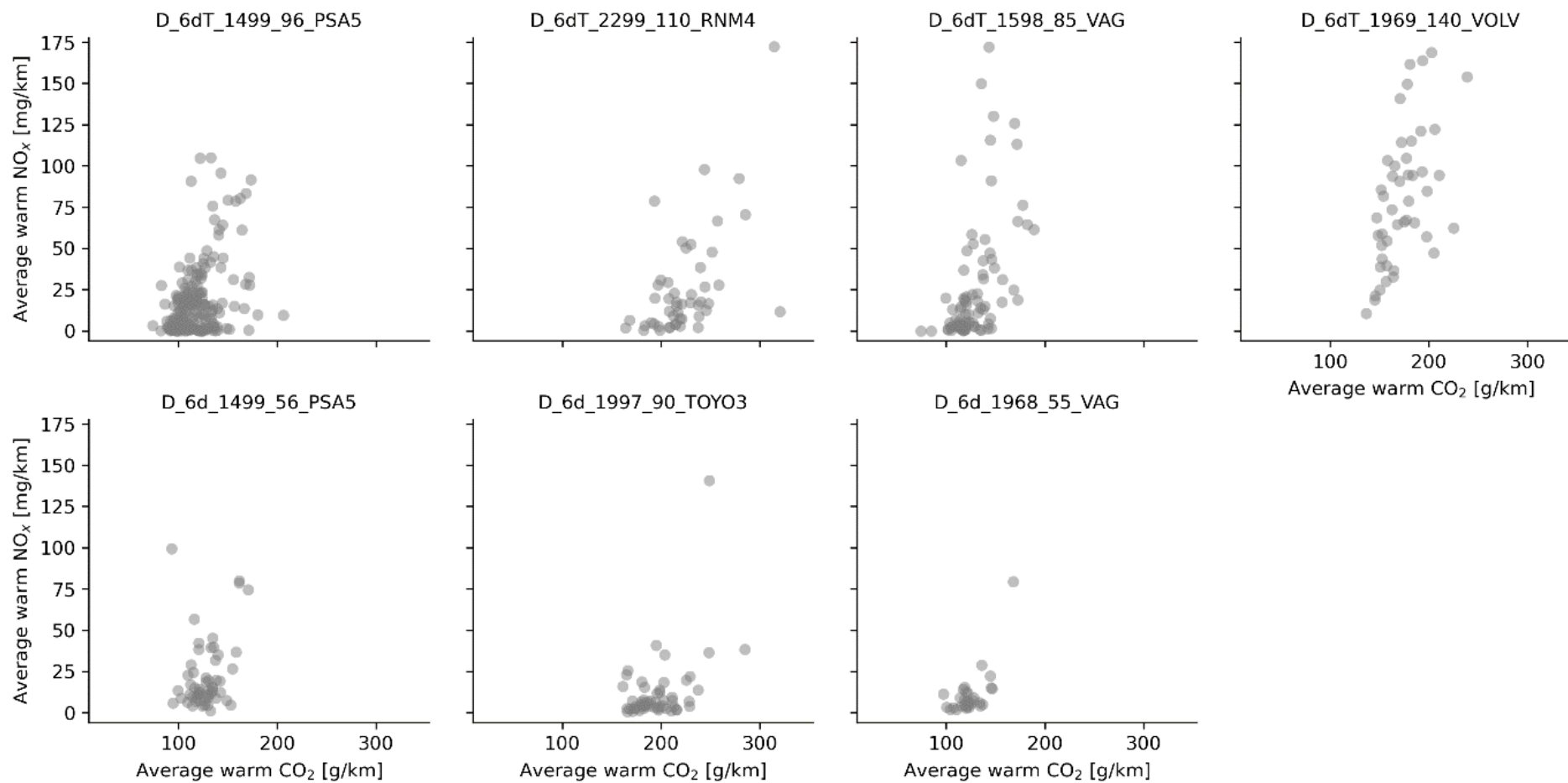
Source: own figure, TNO

Figure 72 Correlation between the NO_x cold start offset and the ambient air temperature as indicated by the OBD signal of the vehicle. Each point is a trip with a cold start. The linear regression for each set of data is indicated by the coloured lines.



Source: own figure, TNO

Figure 73 Correlation between the average warm NO_x and CO₂ emissions during a trip. Each point is one trip.



Source: own figure, TNO

C Biased driving (WBA)

Autor*innen: Norbert Ligterink, Rob Cuelenaere, TNO, Den Haag

Datum: 6. Mai 2023

C.1 Einleitung

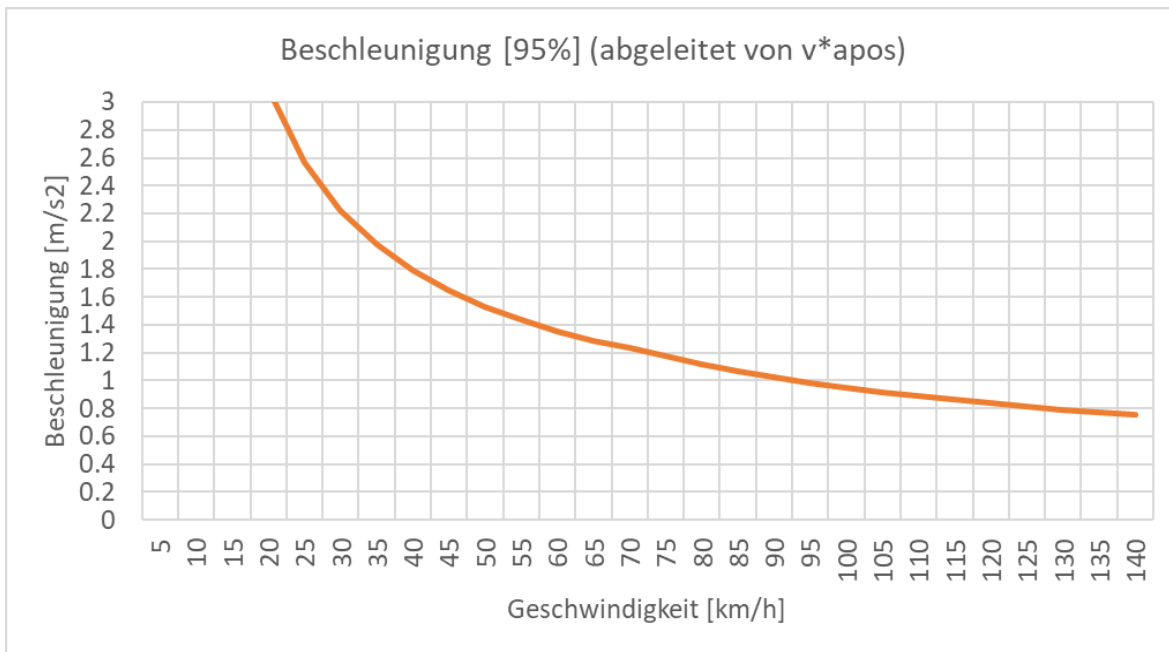
Der VDA schlug für ein Referenzfahrzeug eine maximale durchschnittliche Arbeit von $WBA=0,25$ kWh/km über eine ganze Fahrt als untere Grenze für extremes oder einseitiges Fahren vor. Eine solche Grenze für ISC-Tests birgt die Gefahr, dass bestimmte normale oder eilige Fahrweisen in bestimmten Verkehrssituationen ausgeschlossen werden. Infolgedessen könnten an einigen Orten die Emissionen höher und die Luftqualität schlechter sein. Eine angemessene Prüfung und Festlegung des korrekten Grenzwerts würde auf der Untersuchung der Verkehrssituationen und Fahrweisen bei normaler Nutzung beruhen, in denen die höchsten Referenzwerte auftreten. Eine Begrenzung sollte diese Situationen nicht ausschließen. Bei durchschnittlicher Fahrweise mögen sie eine untergeordnete Rolle spielen, aber bei absichtlichen Beschleunigungen und Abbremsungen im Verkehr mit begrenztem Stau, aber mehreren Stopps, aufgrund von Ampeln, Kurven, Kreisverkehren oder vorfahrtsberechtigten Kreuzungen, tritt hohe Arbeit auf. Das Ausmaß der Beschleunigung und vor allem der Abbremsung spielt im Vergleich zum Abstand zwischen den Haltestellen eine gewisse Rolle. Die v^* -Grenze von Euro-6 RDE wird als Schätzung für Beschleunigungen und Verzögerungen verwendet, um vorläufige Schätzungen für die Arbeit zu liefern.

C.2 Fahren von Haltestelle zu Haltestelle; jede Fahrt besteht aus Teilzyklen

Eine Berechnung der durchschnittlichen Entfernung zwischen den Haltestellen mit durchschnittlichen Beschleunigungen und Abbremsungen der gleichen Größenordnung von $\pm 2,0$ m/s² für eine Reisegeschwindigkeit von 50 km/h, $\pm 1,5$ m/s² für 80 km/h, $\pm 1,2$ m/s² für 100 km/h und $\pm 1,0$ m/s² für 130 km/h ergibt für verschiedene WBA-Grenzwerte unterschiedliche Entfernungen .

Um die Größenordnung einer durchschnittlichen Beschleunigung und Verzögerung von 1 m/s² auf 130 km/h zu verdeutlichen: Es dauert 36 Sekunden und 650 Meter, um aus dem Stillstand 130 km/h zu erreichen, und ebenso lange dauert es, um aus 130 km/h zum Stillstand zu kommen. Bei 1,2 m/s² dauert es 23 Sekunden und 320 Meter, um aus dem Stillstand 100 km/h zu erreichen und umgekehrt.

Abbildung 54: Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Beschleunigung



Source: own figure, TNO

Auf Straßen mit vielen Stopps oder erheblicher Geschwindigkeitsreduzierung gibt es Anzeichen dafür, dass die durchschnittliche Arbeit wesentlich höher ist als die 0,25 kWh/km. Die besonderen Umstände - Straßen mit vielen Stopps und trotz geringer Verkehrsdichte von eiligen Fahrern mit ausreichendem Leistungsgewicht befahren - müssen weiter untersucht werden, um festzustellen, ob die obigen Schätzungen der Situation auf der Straße entsprechen. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Fahrweise spezifisch für eilige Fahrer ist, die die Höchstgeschwindigkeit so lange wie möglich beibehalten wollen, nur begrenzt durch die Beschleunigungen, die in den aktuellen RDE-Vorschriften als üblich gelten.

Tabelle 35: Bei einem einfachen Fahrmuster von Haltestelle zu Haltestelle sind die Grenzwerte in kWh/km mit verschiedenen Abständen in Metern zwischen den Haltestellen verbunden. Dies wird für Höchstgeschwindigkeiten von 50, 80, 100 und 130 km/h ermittelt.

Meter zwischen den Haltestellen [m]	WBA Grenze [kWh/km]		
	0.25	0.3	0.35
Fahrgeschwindigkeit [km/h]			
50	300	230	185
80	880	640	500
100	1550	1040	760
130	4900	2100	1300

C.3 Verkehr in Verbindung mit hoher Arbeit

Hohe Leistungsanforderungen treten normalerweise bei aggressiver Fahrweise auf, die sogar als einseitige Fahrweise angesehen werden kann. Unter durchschnittlichen Fahrbedingungen kommt dies aus mehreren Gründen nicht häufig vor:

- ▶ ein Teil der Fahrzeuge ist nicht zu hohen Beschleunigungen fähig,
- ▶ Verkehrsbedingungen, wie z. B. vorausfahrende Fahrzeuge mit geringer Leistung, verbieten hohe Beschleunigungen, und
- ▶ Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten und Drehzahlen, bei denen keine hohe Motorleistung zur Verfügung steht.

Hohe Beschleunigungen treten hauptsächlich in vier Verkehrssituationen auf:

- ▶ beim Auffahren auf die Autobahn,
- ▶ Überholvorgänge auf Landstraßen und Autobahnen,
- ▶ Straßenabschnitte mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von 80 km/h oder mehr mit vielen Ampeln, Kurven oder Kreisverkehren,
- ▶ auf deutschen Autobahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Die gesonderte Bewertung der Emissionen in Städten im Rahmen der derzeitigen Euro-6-RDE soll eine bessere Luftqualität in Städten gewährleisten. Bei den Gesamtemissionen der Fahrt macht der städtische Teil jedoch nur etwa ein Drittel der Strecke aus, und alle spezifischen Probleme bei der Einhaltung der Vorschriften im Stadtverkehr bei geringer Last werden durch Fahrten auf dem Land und auf der Autobahn im Gesamtergebnis der Prüfung "verwässert". Neben dem Stadtverkehr mit Kaltstart und Leerlauf sollten bei einem solchen Test idealerweise auch andere anspruchsvolle Situationen, wie hohe Beschleunigungen bei höheren Geschwindigkeiten, gesondert und spezifisch berücksichtigt werden. Die maximale Anzahl hoher Beschleunigungen oder allgemeiner ausgedehnter hoher Leistungsanforderungen pro Kilometer ist der Schlüsselfaktor, der über die Grenze zwischen normalem und extremem Fahren entscheidet. Wenn mehr als ein hartes und langanhaltendes Beschleunigungsereignis pro vier Kilometer in den speziellen RDE-Test für hohe Geschwindigkeiten einbezogen wird, wird der vorgeschlagene VDA-Grenzwert für WBA nicht eingehalten, wie unten dargestellt.

In Europa gibt es Straßen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von 50, 80, 100 und 130 km/h und mit vielen Kreuzungen, Ampeln und Auf- und Abfahrten. Besonders auf Hauptverkehrsstraßen in oder in der Nähe von Städten kann es vorkommen, dass an Kreuzungen und Kreisverkehren angehalten und beschleunigt werden muss. Auf diesen Straßen versuchen die Fahrer zwischen den Stopps, eine Reisegeschwindigkeit nahe der Höchstgeschwindigkeit zu erreichen. Dies gilt als eine der anspruchsvollsten Verkehrs- und Infrastrukturen für das WBA-Limit. Auch wenn diese Fahrweise im Durchschnitt begrenzt ist, so ist sie doch spezifisch für bestimmte Orte und kann die lokale Luftqualität beeinträchtigen, wenn sie in den Anforderungen an die Fahrzeugemissionen und die Prüfungen nicht angemessen berücksichtigt wird.

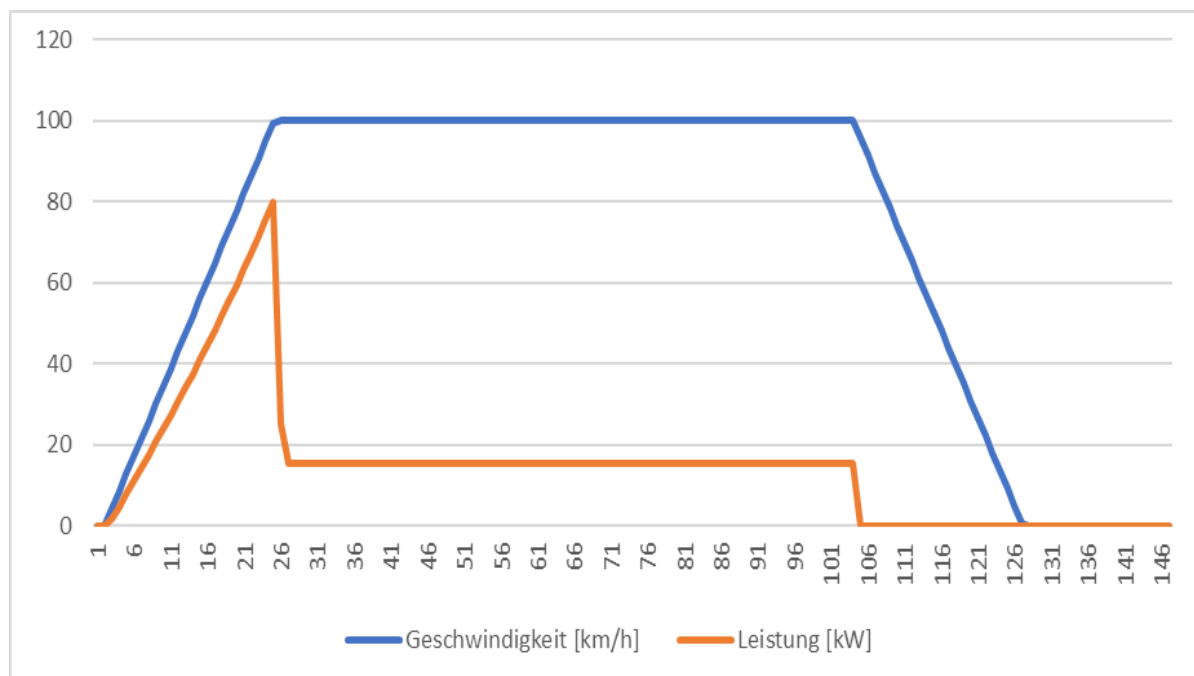
Letztendlich sollte ein WBA-Limit darauf basieren, welche Art von Verkehrsbedingungen durch welches Tempolimit ausgeschlossen werden müssen. Ist ein Stopp alle 4 Kilometer auf der Autobahn im Durchschnitt extrem? Ist ein Stopp pro 500 Meter auf einer Straße mit 80 km/h

extrem? Ist ein Stopp pro 100 Meter innerstädtischer Straße extrem? Aus diesen Entscheidungen sollte die WBA-Grenze folgen.

Nehmen wir die kürzeste, einfachste Einheit des Fahrverhaltens: einen Teilzyklus. Dieser kann als Maßstab für die Bestimmung der Grenze des normalen Fahrverhaltens dienen. Zum Beispiel führt eine Landstraße von Ampel zu Ampel oder eine Autobahn von der Einfahrt zur Ausfahrt zu spezifischer Arbeit, einer Mischung aus Beschleunigungsleistung und Fahrwiderstand. Eine höhere Beschleunigungsleistung, d. h. ein geringerer Abstand zwischen den Stopps, ist die Grundlage für eine höhere Arbeit pro Kilometer.

Mit einfachen Annahmen für die Beschleunigung (a) und die gleiche Verzögerung ($-a$) sowie die Reisegeschwindigkeit (v) und die Gesamtfahrstrecke kann die Arbeit für das Referenzfahrzeug im einfachen Stop-to-Stop-Fahrbetrieb bestimmt werden. Es wird ein einfaches Geschwindigkeitsprofil verwendet, bei dem die Höchst- oder Reisegeschwindigkeit bei 130, 100 und 80 km/h liegt und die Entfernungen von Halt zu Halt dieser Geschwindigkeit entsprechen. Die Anzahl der Haltestellen wird häufig durch die Infrastruktur vorgegeben. In der Nähe von städtischen Gebieten gibt es sowohl auf Landstraßen als auch auf Autobahnen mehr Haltestellen pro Kilometer.

Abbildung 55: Einfaches stilisiertes Profil zur Bestimmung der Teilstrecken-Eigenschaften von Halt zu Halt als Funktion der Reisegeschwindigkeit, der Beschleunigung und der Gesamtstrecke. Während der Verzögerung wird keine Arbeit verrichtet.



Source: own figure, TNO

C.4 Sekundäre Themen

- Die VDA-Methode erfordert eine genauere Bestimmung der Steigung als die derzeitige RDE-Methode. Bei der Euro-6-RDE werden Höhengewinn und Fahrdynamik unabhängig voneinander bewertet. Bei der VDA-Methode führt das Beschleunigen bergauf und das Bremsen bergab oder umgekehrt zu unterschiedlichen Ergebnissen. Genaue, auf GPS

basierende Steigungsmessungen haben sich als schwierig erwiesen. Ad-hoc-Lösungen, wie barometrische Drucksensoren, müssen geregelt werden.

- ▶ Je größer das Leistungs-Masse-Verhältnis ist, desto eher wird beim Fahren ein hoher WBA-Wert erreicht. Insbesondere bei einem niedrigen WBA-Grenzwert, der auf das durchschnittliche Leistungsgewicht zugeschnitten ist, können hochmotorisierte Fahrzeuge nicht in ihrer normalen Nutzung geprüft werden und bedürfen einer besonderen Berücksichtigung.
- ▶ Oberhalb von 140 km/h ist es nicht möglich, einen gültigen Test mit dem Grenzwert von 0,25 kWh/km bei konstanter Geschwindigkeit durchzuführen, da die Überwindung des Luftwiderstands bereits mehr Arbeit erfordert als dieser Grenzwert.
- ▶ Fahrzeuge mit schlechten Emissionswerten aufgrund unterdimensionierter Katalysatoren sind seit langem ein Problem. Gezielte, klare und einfache Messungen mit einem einfachen Grenzwert, die keine langwierigen Tests oder Mittelwertbildung erfordern, werden die Kontrolltätigkeit der Behörden vereinfachen.

D Analyse alternativer Methoden zur RDE-Testauswertung von schweren Nutzfahrzeugen in Euro 7 (TU Graz, Mai 2023)

Autor*innen: Konstantin Weller, Stefan Hausberger, FVT

Datum: 5. Mai 2023

D.1 Zusammenfassung

Der Euro 7 Vorschlag der EU Kommission von 11/2023 sieht für schwere Nutzfahrzeuge vier Grenzwerte in Kombination mit einer relativ komplexen Auswertemethode – verschiedene Perzentile von Moving Average Windows (MAWs) - vor. Dazu werden Bedenken gemeldet, dass die Regulierung in dieser Kombination zu komplex und anspruchsvoll und damit schwer erfüllbar sein könnte.

Als Beitrag zur eventuellen Kompromissfindung wurden drei mögliche Vereinfachungen ausgearbeitet, beurteilt und anhand von Messdaten an einem Euro 6 E LKW verglichen.

Ein zentrales Element der Vereinfachungen war es, drei der vier Grenzwerte durch ein oder zwei Limits zu ersetzen. Den vierten Grenzwert, nämlich den für Leerlauf haben wir hier nicht betrachtet.

Der analysierte Grenzwert soll für die gewichteten Emissionen aus Kaltstart (Ecold) und betriebswarmem Zustand (Ehot) im Verhältnis 14% zu 86% gelten:

$$E_{\text{final}} = 0.14 \times E_{\text{cold}} + 0.86 \times E_{\text{hot}}$$

Diese Gewichtung wird auch in der derzeitigen EURO 6 Regulierung verwendet und ist für den Kaltstartanteil schwerer Nutzfahrzeuge durchaus repräsentativ.

Optional, haben wir einen Grenzwert für die Kaltstartphase untersucht, der zusätzlich zu dem gewichteten Limit eingeführt werden könnte.

Die Grenzwerte haben wir analog zu den Gewichtungen der gemessenen Emissionen aus den aktuellen Euro 7 Grenzwertevorschlägen der EU Kommission berechnet. Dabei war aber zu beachten:

Das im Kommissionsvorschlag in Tabelle 2 mit „Cold emissions“ bezeichnete Limit, stellt das 100. Perzentil der MAWs dar. Die höchsten Emissionen treten bei N₂O, PN und NH₃ aber meist in betriebswarmem Zustand auf, der ja höhere Anteile am gewichteten Emissionswert hat. Daher haben wir für diese Abgaskomponenten das 100. Perzentil-Limit höher als mit 14% gewichtet.

Der Grenzwert für die Kaltstartphase kann gleich wie im EU-Vorschlag für die „Cold emissions“ angesetzt werden. Eine Transformation der Limits ist also relativ einfach möglich.

Die wesentlichen Änderungen gegenüber der von der EU Kommission vorgeschlagenen Auswertemethodik, die wir in der Analyse mit „Option Eu 7.1“ bezeichnen, sind wie folgt.

Bei allen drei Optionen (Eu 7.2, 7.3 und 7.4):

- ▶ Die Mindest-Testdauer sollte auf 3 x WHTC Arbeit reduziert werden (passend zur Definition des „Budgets“ im Euro 7 Vorschlag). In Euro 6 sind es 4 x WHTC.
- ▶ Tests bzw. MAWs mit mittlerer Leistung über 6% der Motornennleistung sollten gültig sein, die 10% Schwelle von Euro 6 schließt langsame Stadtfahrten häufig aus. Die 6% entsprechen

dem erwarteten Euro 7 Vorschlag. Alternativ könnte die „Reference Power“ Methode des Clove Vorschlags verwendet werden.

- ▶ Zur Berechnung der Emissionen im Kaltstart (Ecold) sollen einfach die mittleren Emissionen von Test Start bis einmal WHTC Arbeit beendet ist, berechnet werden. Das entspricht dem ersten MAW nach Test Start in der Euro 7 Nomenklatur. Für eine vermutlich etwas weniger strenge Anforderung, könnte man den Kaltstartgrenzwert für „1 x WHTC-Arbeit oder 30 Minuten, falls das der längere Zeitraum ist“ definieren. Damit würden Hochlast-Starts, bei denen die Arbeit von 1 x WHTC schon nach ca. 6 Minuten erreicht wird und wo das ausreichend schnelle Aufheizen der Katalysatoren dementsprechend schwierig ist, entschärft.

Die drei untersuchten Auswertemethoden unterscheiden sich in der Art, die betriebswarmen Emissionen (Ehot) in einem RDE Test zu bestimmen:

- ▶ Eu 7.2: Ehot ist hier das 90. Perzentil aller MAWs, die aber erst nach Ende der Kaltstartdauer gebildet werden. Damit ist das 90. Perzentil eindeutig dem betriebswarmen Zustand zugeordnet.
- ▶ Eu 7.3: Ehot ist das 90. Perzentil aller MAWs, die aber schon ab der ersten Sekunde nach Teststart gebildet werden (analog zum EU-Kommissionsvorschlag). Damit können auch MAWs im kalten Zustand im 90 Perzentil sein, speziell bei PN10, NH₃ und N₂O ist dies auch im ausgewerteten Beispiel der Fall.
- ▶ Eu 7.4: Ehot ist hier einfach der Mittelwert der Emissionen ab Ende Kaltstartphase bis Testende.

Option Eu 7.4 erscheint in Verbindung mit einem gewichteten Limit und bezüglich der Integration von Tests mit DPF Regeneration deutlich logischer, da Mittelwerte von Testphasen sinnvoll gewichtet werden können. Mittelwerte von 90. und 100. Perzentilen der MAWs bei stark unterschiedlichen Emissionsniveaus kalt, warm und bei Regeneration, ergeben zwar einen Wert, dessen Bedeutung dann aber kaum nachvollziehbar ist.

Auch für die Implementierung in den On-Board-Monitoring (OBM)-Regeln ist das 90. Perzentil, speziell wenn ab erster Testsekunde beginnend, schlecht geeignet. Da die NO_x-Sensoren ca. 60 Sekunden Aufwärmphase brauchen, bevor sie Messwerte senden, müssten kritische Zeiten der MAWs von der Fahrzeugsteuerung simuliert werden, um die „warm emissions“ zu bestimmen. Zur Berechnung des 90. Perzentils müssen zudem tausende MAW Ergebnisse im Fahrzeug gespeichert werden, damit am Ende jeder Fahrt eine Reihung erfolgen kann. Ob dieser Mehraufwand lohnt, ist speziell wegen der limitierten Rechenkapazitäten in Fahrzeug-ECUs und wegen der langen Rechendauer fraglich (technisch aber möglich).

Zudem ist die Auswertung von Mittelwerten viel einfacher als mit MAWs und Perzentilen. In unserer Analyse hat die MAW Bestimmung und Interpretation ca. 8 Stunden erfordert, die der Mittelwerte ein paar Minuten. Für Schadstoffinventuren, wie sie z.B. für die NEC-Ziele nötig sind, wird auch mit mittleren Emissionen je Fahrzyklus gerechnet und nicht mit 90. oder 100. Perzentilen. Eine Auswertung von Mittelwerten in RDE Tests würde direkt mit den in Inventuren genutzten Emissionsfaktoren vergleichbar sein. Die Perzentile können dagegen deutlich abweichen, wie auch in dem ausgewerteten Testbeispiel gezeigt.

Wir haben die Optionen anhand eines In-Service-Conformity (ISC) Tests an einem Euro 6 E LKW verglichen. Der Test repräsentiert normales Fahren, aber keine Worst-Case Testbedingungen (dazu haben wir keine Messwerte). Der verwendete LKW hatte von allen von uns

durchgeführten On-Road Tests die geringsten Emissionen der bisher auf der Straße von uns getesteten Nutzfahrzeuge und ist zumindest bei den betriebswarmen Emissionen nahe an den vorgeschlagenen Euro 7 Grenzwerten. Kaltstartemissionen müssten bei NO_x durch einen zweiten, motornahen SCR, für Euro 7 nach derzeitigem Vorschlag noch deutlich reduziert werden. Die Analysen der Messauswertung zeigen:

- ▶ Die Option Eu 7.4, die einfach den Mittelwert der Emissionen nach Ende Kaltstart anstelle der 90. Perzentile nutzt, ergibt fast die gleichen Ergebnisse wie Option Eu 7.2, mit dem 90. Perzentil der warmen MAWs. Die aufwändige Perzentilberechnung bewirkt in diesem Fall keine signifikant schärfere Regulierung.
- ▶ Option Eu 7.3, wo die warmen Emissionen aus dem 90. Perzentil inklusive der kalten MAWs berechnet werden, hat bei NO_x etwas höhere Werte für Ehot (+ 15% gegenüber Eu 7.2). Es sind in diesem Fall also einige „kalte“ MAWs in dem 90. Perzentil für die „warmen Emissionen“. Bei guter Euro 7 Technologie sollte das Aufwärmen schneller erfolgen, so dass die Unterschiede noch kleiner ausfallen dürften.
- ▶ Wenn die Auswertung der 90. Perzentile oder der mittleren Warm-Emissionen erst nach Ende der Kaltstartphase begonnen wird, so ist das Ergebnis stabiler und von der Testdauer unabhängig.
- ▶ Der Euro 6 E LKW würde die vorgeschlagenen Euro 7 Limits für NO_x mit den gewichteten Emissionen aus Kalt- und Warmphase in dem betrachteten Test bereits erfüllen (130 mg/kWh für die gewichteten Emissionen Efinal). Das 100. Perzentil (350 mg/kWh) würde er aber wegen der zu hohen Kaltstartemissionen nicht erfüllen. Das gewichtete Emissionslimit würde den Optimierungsbedarf der Abgastechnologie im Kaltstart gegenüber dem derzeitigen Vorschlag also deutlich mindern.
- ▶ Die optionalen Kaltstartlimits in den Optionen Eu 7.2 bis 7.4 werden von dem LKW bei NO_x ebenfalls überschritten. Wenn neben dem gewichteten Limit also zusätzlich ein Kaltstartlimit eingeführt wird, so könnten die von Euro 7 erwarteten Emissionsminderungen für NO_x auch abgesichert werden.
- ▶ Bei CO, HC und CH₄ liegt der Dieselmotor weit unter allen Grenzwertvarianten. Für diese Komponenten ist die gewählte Methode daher nicht relevant.
- ▶ Bei PN10, N₂O und NH₃ treten die höchsten Emissionen tendenziell nicht in der Kaltstartphase auf. Bei diesen Komponenten hätte auch die Verwendung von nur einem Grenzwert für den gewichteten Mittelwert keine gravierenden Nachteile.

Damit ergibt sich:

Das Ersetzen der drei Limits des EU-Kommissionsvorschlags (cold, hot, Budget) durch ein einziges Limit für gewichtete Messwerte aus 14% Kalt- und 86% Warm-Emissionen kann niedrigere NO_x-Emissionen nach Kaltstart nicht so gut absichern wie der aktuelle Vorschlag. Für die anderen Abgaskomponenten erwarten wir mit einem einzelnen Limit anstelle der drei Limits geringe Auswirkungen auf die damit erreichten realen Emissionsniveaus.

Wenn das Limit für die gewichteten Emissionen durch ein Kaltstartlimit ergänzt wird, erwarten wir ähnliche Euro 7 Emissionsniveaus wie mit dem aktuellen Vorschlag.

Für das gewichtete Limit und für das Kaltstartlimit können die kalten Emissionen (Ecold) ab Teststart bis zum längeren Zeitraum aus den Kriterien „30 Minuten“ oder „Erreichen 1 x WHTC Arbeit“ bestimmt werden.

Die betriebswarmen Emissionen (Ewarm) können aus dem Mittelwert der Emissionen ab Ende Kaltstartphase bis Testende berechnet werden. Dies ist einfacher, mit Bedarf für OBM und DPF Regeneration kompatibler und auch für Hersteller weniger riskant. Das 90. Perzentil kann in einzelnen Test-Situationen, die aber kaum planbar sind, deutlich höhere Ergebnisse als der Durchschnitt liefern. Insgesamt erwarten wir nur geringe Auswirkungen auf das reale Euro 7 Emissionsniveau, wenn das 90. Perzentil durch den Mittelwert ersetzt wird.

Ein Argument für das 90. Perzentil der MAWs ist, dass es damit weniger einfach möglich ist, in langen Fahrten gegen Ende Emissionsminderungstechnologien reduziert einzusetzen, wenn sie zuvor immer weit unter dem Grenzwert gefahren sind. Aus unserer Sicht ist die AES (Auxiliary Emission Strategies nach Regulierung (EU) 2019/1939) in Kombination von RDE-Tests mit limitierten Durchschnittsemissionen dazu aber ausreichend. Eventuell unlogische Emissionsanstiege wären sichtbar und müssten in AES vom Hersteller belegt sein.

D.2 Aufgabenstellung

Der HDV Euro 7 Vorschlag der EU Kommission sieht vier Grenzwerte vor:

- ▶ 100 Perzentil-Limit der MAWs, auch „Cold Limit“ bezeichnet
- ▶ 90 Perzentil-Limit der MAWs, auch „Hot Limit“ bezeichnet
- ▶ Budget-Limit, das Emissionen bei Tests mit weniger als 3x WHTC-Arbeit limitiert
- ▶ Leerlauf-Limit, mit dem NO_x Emissionen für Tests in Leerlauf, eventuell auch alle MAWs mit weniger als 6% der Motornennleistung limitiert werden.

Dazu werden Bedenken gemeldet, dass die Regulierung in dieser Kombination zu komplex und anspruchsvoll und damit schwer erfüllbar sein könnte.

Als Beitrag zur eventuellen Kompromissfindung sollen

- ▶ Mögliche Vereinfachungen aufgezeigt werden,
- ▶ Mögliche abgewandelte Optionen definiert und beurteilt werden,
- ▶ Die Optionen anhand von RDE Messdaten an Euro 6 E LKW getestet werden.

Alle untersuchten Optionen sollen auch ambitionierte Emissionsminderungen bewirken und daher die Euro 7 Limits, wie von der EU-Kommission vorgeschlagen - in der Gewichtung jeweils angepasst - nutzen.

Die entsprechenden Grenzwerte sollten ebenfalls dargestellt werden.

D.3 Mögliche Adaptionen am Vorschlag der EU-Kommission

Die beiden folgenden Tabellen zeigen Komponenten des Euro 7 Vorschlags die aus unserer Sicht nicht geändert werden sollten und solche die für Kompromisslösungen geändert werden könnten ohne die Ambition signifikant zu senken

Es sind jeweils kurze Begründungen ergänzt.

Tabelle 36: Liste von Euro 7 Randbedingungen, die in den Optionen beibehalten werden oder hier nicht analysiert wurden

Was	Begründung
Messung beginnt ab „Fahrzeug ⁴⁵ “ ein, Auswertung ab erster Zündung VKM bis zur letzten Sekunde der Messung	Es soll der gesamte Kaltstart in Grenzwerten erfasst sein um insbesondere Emissionen Innerorts zu senken. Zündung VKM als Start Emissionsauswertung geeignet, um Kaltstart (P)HEVs gleich zu behandeln wie die konventioneller Kfz
6% Leistungs-Untergrenze für gültigen Test bzw. gültige MAWs	Mindestens 10% der Nennleistung als mittlere, positive MAW Motorleistungs-Schwelle aus Euro 6 erfasst langsame Stadtfahrten nicht ^(*)
„Idling Limit“ für Tests und MAWs unter 6% der Nennleistung	Limit für Niederlast ist notwendig, wenn auch solche speziellen Fahrzeugnutzungen testbar sein sollen ^(*)
Die für Euro 7 für SNF mit Limits vorgeschlagenen Abgaskomponenten	Erweiterung um N ₂ O wegen Treibhauspotenzial sinnvoll. NMOG könnten mit LDV auf NMHC in Gleichklang gebracht werden um Zusatzkosten für HDV PEMS zu minimieren. Ein Limit für Formaldehyde erscheint für Ottomotoren, die mit Alkoholhaltigen Kraftstoffen betrieben werden sinnvoll, ist bei LNF und PKW aber nicht limitiert. Für SNF könnte diese Komponente demnach ebenso entfallen. Diese möglichen Vereinfachungen sind hier aber nicht ausgearbeitet.
Verkürzung der Mindesttestlänge auf 3xWHTC Arbeit („Budget-Länge“)	Die 7 x WHTC Arbeit als Mindestumfang in Euro 6 erfordern ca. 3 bis 4 h Testdauer und erlauben so nur einen Test/Tag. Das verursacht unnötig hohe Kosten für 3rd Party Tests.
DPF Regeneration berücksichtigen	DPF Regeneration kann bei vorwiegendem Niederlastbetrieb, wie z.B. Stadtbussen, Müllfahrzeugen, etc. ein relevanter Fahrzustand sein. Dieser wurde in Euro 6 in RDE nicht berücksichtigt. In Euro 7 sollen die Ergebnis von RDE Tests mit Regeneration in einem gewichteten Mittel mit Ergebnissen ohne Regeneration berücksichtigt werden.

(*) Eine Alternative wäre die „Reference Power“ Methode nach den Analysen des CLOVE-Konsortiums⁴⁶, diese würde keinen separaten Leerlauf Grenzwert erfordern, wird hier aber nicht untersucht.

Tabelle 37: Liste von Euro 7 Randbedingungen, die in den untersuchten Optionen variiert wurden

Was	Alternative und Begründung
Erlauben jeglicher Streckenanordnung in RDE	Beibehalten der Euro 6 Aufteilung, da diese repräsentativ für die jeweilige Anwendung ist. Rahmenbedingungen für Teststrecken-Zusammensetzung für spezielle Fahrzeuggruppen (z.B. Müllfahrzeuge) müssten noch erarbeitet werden, da diese in Euro 6 nicht definiert sind. Damit können eventuell einseitige und nicht repräsentative „worst-case“ Testbedingungen vermieden werden. Ein Teststart im Stadtgebiet vermeidet lange, extreme Fahrzustände nach Kaltstart. Auch reale Fahrten mit Hochlastbetrieb nach dem Start, die z.B. auf Autobahnraststätten beginnen, starten im Allgemeinen aus

⁴⁵ „Zündung ein“ ist bei HEV und PHEV unpassender Ausdruck, gemeint ist die Aktivierung des Kfz, so dass es fahrbereit ist.

⁴⁶ Online unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6a995fe6-5f1d-11ed-92ed-01aa75ed71a1/language-en>

Was	Alternative und Begründung
	Parkplätzen und Bereichen mit Tempolimits. Eventuell könnte diese „innerorts“ Startphase aber auf ca. 2 km limitiert werden.
4 verschiedene Limits	An sich kann jeweils ein Limit aus anderen berechnet werden. Nur das „Idling Limit“ stammt aus der US Gesetzgebung und ordnet sich quantitativ nicht in die Systematik der anderen Limits ein. Die Vielzahl an Limits und Auswertungsverfahren macht das System intransparent und kann die Einhaltung erschweren, da Einzelereignisse mehr Gewicht bekommen. Untersuchte alternative Optionen umfassen ein oder zwei Limits, neben dem Idling Limit (dieses wurde hier nicht betrachtet), mit und ohne MAWs und 90 Perzentil. Die Details sind je Variante nachfolgend beschrieben und auch im File „Limit_Optionen_HDVs.xlsx“ zusammen gefasst
Mileage, Age, Seehöhe	Dauerhaltbarkeit ist hier nicht betrachtet, der Anspruch könnte aber höher ausfallen als im derzeitigen Vorschlag, um die reale Lebensdauer voll abzudecken. Wesentlich erscheint uns aber, dass OBD und OBM Funktionen bis an das echte Lebensende funktionsfähig bleiben müssen und auch im realen Fahrzeugbetrieb testbar sind. Zusätzlich zum Kilometer-Limit könnte auch ein Alterslimit, oder besser, ein Betriebsstundenlimit eingeführt werden. Damit können auch spezielle Anwendungen gut erfasst werden, wie etwa Baustellenfahrzeuge, die kaum km pro Jahr leisten, aber hohe Betriebsstunden pro Jahr haben können. Die Kombination höherer km-Limits aber begleitet von maximalen Betriebsstunden wäre eventuell ein für alle akzeptabler Kompromiss.

D.4 5 Untersuchte Alternativen zur SNF Testauswertung

Aus den Überlegungen in Kap. D.3 ergaben sich folgende Optionen für die Untersuchung:

Eu 7.1: Auswertung nach Euro 7 Vorschlag der EU-Kommission

Eu 7.2: Auswertung in Anlehnung an Euro 6, mit einem gewichteten Limit

Eu 7.3: Auswertung kombiniert Euro 7 und Euro 6, ebenso mit gewichtetem Limit aber gegenüber Option Eu 7.2. starten die MAWs für das 90 Perzentil ab Test-Start

Eu 7.4: Auswertung wie in Eu 7.2 aber ohne 90 Perzentil von MAWs

Die einzelnen Optionen sind in nachfolgend erklärt. Beispiele für die Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertemethoden sind in Kap. D.5 beschrieben.

D.4.1 Option Eu 7.1

Die Auswertung folgt dem aktuellen Vorschlag der EU Kommission⁴⁷ ergänzt um die erwartete Definition, dass nur MAWs mit einer mittleren positiven Motorleistung größer oder gleich 6% der Motornennleistung für die 100 und 90 Perzentilwerte relevant sind. Darunter wäre das Idling-Limit anzuwenden.

⁴⁷ Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009; Brussels, 10.11.2022

Die wesentlichen Randbedingungen sind in Tabelle 38 zusammengefasst.

Tabelle 38: Randbedingungen in Option Eu 7.1 entsprechend dem Vorschlag der EU-Kommission von 11/2022.

Parameter	EU VI	EURO 7 Normal conditions	EURO 7 Extended conditions
Extended driving divider	-	1	2 (= Clove)
Ambient temperature	-7°C to 35°C	-7°C to 35°C (=Clove)	-10C to +45 C (z Clove)
Cold start	Evaluation from $t_{coolant} > 30^{\circ}C$ on; cold start weighted with 14%	from start on	
Auxiliaries use	Allowed	Possible as per normal use	
Min Trip duration	> 4 x WHTC work	Any (with "Budget")	
Evaluation	1 WHTC window	1 WHTC window	
Engine load [kW/kW _{rated}]	Only work windows > 10% valid	> 6% of rated power	
Payload	10-100 %	> 10%	< 10%
Max. altitude [m]	1600 m	1600 m	2200m
Trip composition	Depending on class of vehicle	Normal trip as intended usage	
Minimum km before testing	15000 km (>60 hours)	5.000 km for <16t TPMLM 10.000 km for >16t TPMLM	All > 3000 km
Age/Mileage [km]	N2, N3<16t, M3: 300kkm N3 > 16t: 700kkm	N2, N3<16t, M3<7.5t: 300 kkm N3 > 16t, 7.5t:700 kkm	< 375 kkm < 875 kkm

Die Limits zu Option Eu 7.1 sind wie im Vorschlag der EU-Kommission von 11/2022. Tabelle 39 fasst die Limits (ohne Idling) für Eu 7.1 zusammen und zeigt auch die derzeitigen Euro 6 Grenzwerte zum Vergleich.

Tabelle 39: Grenzwerte nach Option Eu 7.1 und nach EURO 6 im Vergleich

	EU 7.1 = COM Vorschlag von 11/2022			EURO 6	
	100 Percentil	90 Percentil	Budget (3x WHTC Work)	Diesel	Otto
	[mg/kWh]			[mg/kWh]	
NO _x	350	90	150	460	460
PM	12	8	10	10	10

	EU 7.1 = COM Vorschlag von 11/2022			EURO 6	
PN10 [#]	5E+11	2E+11	3E+11	6.00E+11 (*)	
CO	3500	200	2700	4000	4000
NMOG	200	50	75	160 (*)	160
NH ₃	65	65	70	10 ppm	10 ppm
CH ₄	500	350	500		500
N ₂ O	160	100	140		
HCHO	30	30			

(*) PN Limits beziehen sich auf PN23 in Euro 6 jedoch auf PN10 in Euro 7. Euro 6 begrenzt THC statt NMOG.

D.4.2 Option Eu 7.2

Option Eu 7.2 führt anstelle der drei Grenzwerte (100-, 90-Perzentile und Budget) einen gewichteten Grenzwert aus Warm- und Kaltstart ein. Der Kaltstart wird wie in Euro 6 mit 14% gewichtet, betriebswarme Emissionen mit 86%. Dazu wird der im Test gemessene „Kaltstartemissionswert“ als Emissionswert über 1x WHTC Dauer direkt nach Start definiert, was eine Änderung gegenüber dem 100 Perzentil in Option EU 7.1 darstellt. Die MAWs für das 90 Perzentil werden erst ab Ende der Kaltstartphase gezählt und nicht wie in EU 7.1 schon ab Teststart⁴⁸.

Tabelle 40: Randbedingungen und Auswertemethodik in Option Eu 7.2. In Rot Änderungen gegenüber Eu 7.1, Blau hinterlegt sind zusätzliche Definitionen

Parameter	EU VI	EURO 7 Normal conditions	EURO 7 Extended conditions
Extended driving divider	-	1	2 (= Clove)
Ambient temperature	-7°C to 35°C	-7°C to 35°C (=Clove)	-10C to +45 C (z Clove)
Cold start	Evaluation from $t_{coolant} > 30^{\circ}\text{C}$ on; cold start weighted with 14%	from start on until 1x WHTC work is delivered (1 x MAW), (note: coolant temperature can be controlled by OEM, measurement position would have to be defined (which circuit?))	
Auxiliaries use	Allowed	Possible as per normal use Possible as per normal use (needs definition? E.g. no Power take-off active in 1st 15 minutes after start?)	
Min Trip duration	> 4 x WHTC work	3 x WHTC work (or CO ₂) but minimum 1200 hot MAWs	
Evaluation	1 WHTC window	1 WHTC window	
Engine load [kW/kW _{rated}]	Only work windows > 10% valid	> 6% of rated power	

⁴⁸ in EU 7.1. sind ja auch alle Kaltstart MAWs in der Auswertung des 90 Perzentiles enthalten. Je nach Abgaskomponente fallen die Kaltstartphasen mit der 90 Perzentil-Regel dann aber nicht in das Ergebnis.

Parameter	EU VI	EURO 7 Normal conditions	EURO 7 Extended conditions
Payload	10-100 %	> 10%	< 10%
Max. altitude [m]	1600 m	1600 m	1900 m (any public road above 1900 m?)
Trip composition	Depending on class of vehicle	Depending on class of vehicle in Euro VI	
Minimum km before testing	15000 km (>60 hours)	5.000 km for <16t TPMLM 10.000 km for >16t TPMLM	All > 3000 km
Age/Mileage [km]	N2, N3<16t, M3: 300kkm N3 > 16t: 700kkm	N2, N3<16t, M3<7.5t: 300 kkm / 10 years N3 > 16t, 7.5t:700 kkm / 10 years	< 375 kkm / 14 years < 875 kkm / 14 years
Add-on definitions:			
E_cold		Average emissions in cold start phase (start to 1x WHTC) per kWh	
E_hot		90th cumulative percentile of all MAWs started after end of cold start phase	
E_final		E final=0.14xE cold +0.86xE hot	

Die Grenzwerte in Tabelle 41 werden jeweils aus den Limit-Vorschlägen der EU Kommission in Tabelle 39 zusammengesetzt. Dabei soll entsprechend der Euro 6 Methode gelten:

Limit für gesamten Tests = 0,14 x Kaltstart-Limit + 0,86 x Limit für betriebswarmes Fahren

Da im Vorschlag der EU Kommission das 100 Perzentil und das 90 Perzentil der gültigen MAWs limitiert sind, nehmen wir das 100-Perzentil-Limit in den meisten Fällen als Kaltstart-Limit und das 90-Perzentil-Limit als Grenzwert für betriebswarmes Fahren. Diese Zuordnung ist für alle Abgaskomponenten, die von betriebswarmen Katalysatoren maßgeblich reduziert werden korrekt. Ausnahmen sind:

- ▶ Für PN erfolgte eine Gewichtung der Kalt/Warm Grenzwerte von 50:50, da bei SNF die höchsten Emissionen außer nach Kaltstart auch bei heißen Abgasbedingungen auftreten, wenn der Rußkuchen im Partikelfilter abgebaut ist.
- ▶ CO haben wir auf runde 1000 mg/kWh angehoben, gewichtet würden sich 662 mg/kWh ergeben. Da CO von SNF mit Dieselmotoren keinen relevanten Beitrag zu den Gesamtemissionen hat, allerdings bei DPF Regeneration erhöht auftreten kann, erscheint dieses großzügige Runden vertretbar, wenn damit eine gewichtete Integration von RDE Tests mit DPF Regeneration weniger Widerstand erlebt.
- ▶ Für N₂O wurde das 100 Perzentil-Limit mit 86%, das 90-Perzentil-Limit mit 14% gewichtet, da N₂O auch von der umgesetzten NO_x-Menge abhängt und daher in warmen Hochlastbedingungen tendenziell höher als nach Kaltstart ist.

Die Grenzwerte in Tabelle 41 sind jeweils auf ganze Zahlen im Einer oder Zehnerwert gerundete Ergebnisse der o.a. Berechnung.

Tabelle 41: Mögliche Grenzwerte zum kombinierten Testergebnis nach Option Eu 7.2

	Limit zu E _{final}
	[mg/kWh]
NO _x	130
PM	9
PN10	4.0.E+11 [# /kWh]
CO	1000
NMHC	70
NH ₃	65
CH ₄	375
N ₂ O	150
HCHO	30 (*)

(*) nicht unbedingt erforderlich

D.4.3 Option Eu 7.3

Die Option Eu 7.3 führt gegenüber Eu 7.2 folgende Änderungen ein:

- ▶ Die Auswertung der MAWs für das 90 Perzentil erfolgt direkt ab Teststart, analog zu Option EU 7.1
- ▶ Um dabei die kalten MAWs nicht innerhalb des 90-Perzentils zu haben, muss eine Mindestanzahl an gültigen MAWs vorliegen, was bei niederlast-Kaltstart gefolgt von Hochlast auch bei einer Testdauer von > 3xWHTC-Arbeit nicht unbedingt der Fall sein muss. Die vorgeschlagenen „> 2000 MAWs“ sind nur ein Anhaltswert und würden ggf. noch Absicherung erfordern.

Tabelle 42: Randbedingungen und Auswertemethodik in Option Eu 7.3. In Rot Änderungen gegenüber Eu 7.1, blauer Text sind Änderungen gegenüber Eu 7.2, Blau hinterlegt sind zusätzliche Definitionen

Parameter	EU VI	EURO 7 Normal conditions	EURO 7 Extended conditions
Extended driving divider	-	1	2 (= Clove)
Ambient temperature	-7°C to 35°C	-7°C to 35°C (=Clove)	-10C to +45 C (z Clove)
Cold start	Evaluation from t _{coolant} >30°C on; cold start weighted with 14%	from start on until 1x WHTC work is delivered (1 x MAW), (note: coolant temperature can be controlled by OEM, measurement position would have to be defined (which circuit?))	
Auxiliaries use	Allowed	Possible as per normal use	

Parameter	EU VI	EURO 7 Normal conditions	EURO 7 Extended conditions
		Possible as per normal use (needs definition? E.g. no Power take-off active in 1st 15 minutes after start?)	
Min Trip duration	> 4 x WHTC work	3 x WHTC work (or CO2) but minimum 2000 MAWs (1x WHTC more time for MAW production than in Eu 7.2)	
Evaluation	1 WHTC window	1 WHTC window	
Engine load [kW/kW _{rated}]	Only work windows > 10% valid	> 6% of rated power	
Payload	10-100 %	> 10%	< 10%
Max. altitude [m]	1600 m	1600 m	1900 m (any public road above 1900 m?)
Trip composition	Depending on class of vehicle	Depending on class of vehicle in Euro VI	
Minimum km before testing	15000 km (>60 hours)	5.000 km for <16t TPMLM 10.000 km for >16t TPMLM	All > 3000 km
Age/Mileage [km]	N2, N3<16t, M3: 300kkm N3 > 16t: 700kkm	N2, N3<16t, M3<7.5t: 300 kkm / 10 years N3 > 16t, 7.5t:700 kkm / 10 years	< 375 kkm / 14 years < 875 kkm / 14 years
Add-on definitions:			
E _{cold}		Average emissions in cold start phase (start to 1x WHTC) per kWh	
E ₉₀		90th cumulative percentile of all MAWs started at 1 st second of test (=Eu 7.1)	
E _{final}		E final=0.14xE cold +0.86xE hot	

Die Grenzwerte für das kombinierte Limit (14% Kalt und 86% Warm) sind gleich wie in Option Eu 7.2. Um näher am Kommissionsvorschlag zu sein (Option Eu 7.1), könnten optional die 100-Perzentil-Limits aus Eu 7.1 übernommen werden. Das ist allerdings keine notwendige Randbedingung und könnte auch in Option 7.2 angewandt werden. Damit würde verhindert, dass kurze Hochemissionsphasen durch längere Phasen mit niederen Emissionen ausgeglichen werden. Das würde naturgemäß eine Verschärfung der Anforderungen an die Kfz darstellen.

Tabelle 43: Mögliche Grenzwerte zum kombinierten Testergebnis nach Option Eu 7.3

	Limit zu E _{final} [mg/kWh]	Optional: 100Perc. Limit [mg/kWh]
NO _x	130	350

	Limit zu E _{final} [mg/kWh]	Optional: 100Perc. Limit [mg/kWh]
PM	9	12
PN10 [#]	4.0.E+11	5E+11
CO	1000	3500
NMHC	70	200
NH ₃	65	65
CH ₄	375	500
N ₂ O	150	160
HCHO (*)	30	30

(*) nicht unbedingt erforderlich

D.4.4 Option Eu 7.4

Option Eu 7.4. ersetzt die 90-Perzentil-MAW Auswertungen der anderen Optionen durch eine einfache Mittelwertbildung der warmen Testphase. Die warme Testphase reicht vom Ende des Kaltstarts (1xWHTC-Arbeit) bis Testende ($\geq 3x$ WHTC Arbeit). Damit sind Auswertungen einfacher und transparenter und das gesamte Testergebnis wird für das Ergebnis relevant. Es werden nicht wie im 90-Perzentil, die 10% höchsten MAW Ergebnisse von der Auswertung ausgeschlossen. Die transparentere Auswertung macht die Planbarkeit der Limit-Erfüllung für die Hersteller vermutlich einfacher. Einzelne Emissionspeaks würden z.B. nicht zu Grenzwertüberschreitungen führen, wenn, wie in Optionen Eu 7.1 und 7.3, die 10% „freien MAWs“ bei ungünstigen Testbedingungen schon durch Kaltstarts bei niedriger Last weitgehend aufgebraucht sein könnten.

Anmerkung: je geringer die Leistung, desto längere Zeit ist notwendig, um 1 x WHTC Arbeit zu erreichen und damit 1 MAW zu erzeugen. Da jede Sekunde ein MAW begonnen wird, erzeugen niederlastige Phasen im Verhältnis zur Arbeit über den gesamten Test viel mehr MAWs als hochlastige Phasen. Der WHTC benötigt im Mittel ca. 20% der Nennleistung und dauert 30 Minuten, was 1 800 MAWs beginnen lassen würde. Fährt man bei 6% der Nennleistung sind es ca. $0,2/0,06 * 30 = 100$ Minuten bzw. 6 000 begonnene MAWs für 1-mal WHTC Arbeit. Bergauf, nahe der Nennleistung, ergeben sich nur ca. 6 Minuten bzw. 360 begonnene MAWs je WHTC-Arbeit.

Weiters fallen Zeiten am Ende eines Tests aus den MAWs, da dort die 1x WHTC Arbeit nicht mehr abgeschlossen werden kann. Zeiten zu Testbeginn sind in weniger MAWs enthalten als die in Testmitte. Die erste Sekunde ist z.B. nur im ersten MAW, die zweite in 2 MAWs enthalten usw.. Insgesamt hängt das Testergebnis für das 90-Perzentil der MAWs also von vielen Randbedingungen eher zufällig ab und kann von den durchschnittlichen Emissionen des Tests deutlich nach oben und unten abweichen. Daher ist ein Ersetzen des 90-Perzentils der MAWs eine attraktive Vereinfachung.

Tabelle 44 fasst die Randbedingungen zusammen. Wie oben beschrieben, ist die wesentliche Änderung:

Das 90-Perzentil der MAWs wird durch den mittleren Emissionswert je Abgaskomponente im warmen Testzeitraum ersetzt.

Tabelle 44: Randbedingungen und Auswertemethodik in Option Eu 7.4. In Rot Änderungen gegenüber Eu 7.1, grüner Text sind Änderungen gegenüber Option Eu 7.3, Blau hinterlegt sind zusätzliche Definitionen

Parameter	EU VI	EURO 7 Normal conditions	EURO 7 Extended conditions
Extended driving divider	-	1	2 (= Clove)
Ambient temperature	-7°C to 35°C	-7°C to 35°C (=Clove)	-10C to +45 C (z Clove)
Cold start	Evaluation from $t_{coolant} > 30^{\circ}\text{C}$ on; cold start weighted with 14%	from start on until 1x WHTC work is delivered (1 x MAW), (note: coolant temperature can be controlled by OEM, measurement position would have to be defined (which circuit?))	
Auxiliaries use	Allowed	Possible as per normal use Possible as per normal use (needs definition? E.g. no Power take-off active in 1st 15 minutes after start?)	
Min Trip duration	> 4 x WHTC work	3 x WHTC work (or CO2) no limit for min. #MAWs (not needed)	
Evaluation	1 WHTC window	1 WHTC window	
Engine load [kW/kW _{rated}]	Only work windows > 10% valid	> 6% of rated power	
Payload	10-100 %	> 10%	< 10%
Max. altitude [m]	1600 m	1600 m	1900 m (any public road above 1900 m?)
Trip composition	Depending on class of vehicle	Depending on class of vehicle in Euro VI	
Minimum km before testing	15000 km (>60 hours)	5.000 km for <16t TPMLM 10.000 km for >16t TPMLM	All > 3000 km
Age/Mileage [km]	N2, N3<16t, M3: 300kkm N3 > 16t: 700kkm	N2, N3<16t, M3<7.5t: 300 kkm / 10 years N3 > 16t, 7.5t:700 kkm / 10 years	< 375 kkm / 14 years < 875 kkm / 14 years
Add-on definitions:			
E_cold		Average emissions in cold start phase (start to 1x WHTC) per kWh	
E_hot		Average of the hot part of the tests starting after 1x WHTC work until end of test	
E_final		E final=0.14xE cold +0.86xE hot	

Auch in dieser Option können die Limits für 100- und 90-Perzentil sowie das Budget durch einen gewichteten Grenzwert ersetzt werden.

Optional könnte hier ein zusätzliches Limit für die Emissionen im Kaltstart gesetzt werden, wenn sichergestellt werden soll, dass hohe Kaltstartemissionen nicht durch sehr niedere betriebswarme Emissionen kompensiert werden können. Die 14% Gewichtung des Kaltstarts im Testergebnis deckt den realen Betrieb der meisten Anwendungen aber nach schneller Analyse gut ab. Acht Stunden Betrieb bei durchschnittlich 10% der Nennleistung ergibt etwa 8xWHTC Arbeit. Die erste WHTC-Arbeit wird als Kaltstart gezählt, was bezogen auf die gesamte Testarbeit 1/8, also 12,5% Kaltstart ergibt. Bei 16h Betrieb, wie z.B. bei Bussen oft üblich, sinkt der Kaltstartanteil weiter. Im Fernverkehr, wo ca. 30% Nennleistung über 9h gefahren werden, ergeben sich ca. 27xWHTC Arbeit je Tag und damit ca. 4% Kaltstartanteil mit einem zusätzlichen Semi-Kaltstart nach der obligatorischen Fahrerpause von 45 Minuten nach längstens 4,5h Fahrzeit.

Die Grenzwerte für die Option Eu 7.4 können gleich wie für Option Eu 7.2 gesetzt werden (Tabelle 45)

Tabelle 45: Mögliche Grenzwerte zum kombinierten Testergebnis nach Option Eu 7.4

	Limit zu E_{final}
	[mg/kWh]
NO _x	130
PM	9
PN10	4.0.E+11 [# /kWh]
CO	1000
NMHC	70
NH ₃	65
CH ₄	375
N ₂ O	150
HCHO	30 (*)

(*) nicht unbedingt erforderlich

D.5 Anwendung der Optionen an EURO 6 Messwerten

Dieses Kapitel zeigt die Auswertung anhand der verschiedenen Euro 7 Auswertemethoden (Euro 7.1 bis Euro 7.4) für einen Euro 6 E Verteiler Lkw in einem den Euro 6 E Regularien entsprechenden In-Service Conformity (ISC) Test. Zusätzlich wurden auch noch die Auswertungen mit EMROAD entsprechend der Regulierung für Euro 6 D und Euro 6 E durchgeführt.

Der ISC Test beginnt wie vorgeschrieben kaltgestartet mit einem Stadtteil. Darauf folgt ein Überlandteil und am Ende schließt der Test mit einer Autobahnfahrt ab. Insgesamt dauert der Test 3,7 Stunden und erfüllt die WHTC Arbeit mehr als sechsmal. Da das Fahrzeug gering beladen war, ist die durchschnittliche Leistung im Stadtteil im Bereich von 10 %, also an der unteren Grenze für einen gültigen Euro 6 D/E Test. Entsprechend der bei Euro 6 verwendeten Abgasnachbehandlung mit einer Abgasbox hinter der Fahrerkabine kann dieser Test für Euro 6 Fahrzeuge vor allem hinsichtlich der Kaltstartemissionen aufgrund der geringen Last und der damit folgenden geringen Abgastemperaturen somit als anspruchsvoll angesehen werden.

Die Umgebungstemperatur lag während des Tests im Durchschnitt bei 27°C, also an der oberen Grenze für einen gültigen Test. Folglich beginnt die gültige Phase ab 30°C Kühlwassertemperatur bei Euro 6 E bereits nach wenigen Minuten, obwohl die Abgasnachbehandlung in dieser kurzen Zeit kaum erwärmt werden konnte.

Bezogen auf die Euro 6 E Randbedingungen ist dieser Test also als herausfordernd zu bewerten.

Das Testfahrzeug ist ein Verteiler-Lkw der Emissionsstufe Euro 6 E. Das Fahrzeug hatte zum Testzeitpunkt eine Laufleistung von 6 000 km, ist also als Neufahrzeug einzustufen. Dieses Fahrzeug hat sich innerhalb der von der TU Graz gemessenen Euro 6 E Fahrzeuge als „Best Performer“ ausgezeichnet und wurde deshalb für diese Auswertung herangezogen.

Zukünftige Euro 7 LKW, mit einem zweiten SCR vor dem DPF, könnten im Vergleich deutlich niedrigere Kaltstartemissionen erreichen als das hier ausgewertete Euro 6 Fahrzeug.

Als erstes werden in Abbildung 56 die Messergebnisse für NO_x gezeigt. Die blauen Balken stellen für die verschiedenen Auswertungen entsprechend der Emissionsstufen immer den Kaltstartteil bzw. das 100. Perzentil dar. Wenn eine Regulierungsoption keine extra Regulierung des Kaltstarts inkludiert, dann gibt es dafür auch kein Ergebnis, also keinen Balken (siehe Euro 6 D und E). Durch die orangen Balken werden die Ergebnisse für den Warmteil bzw. das 90. Perzentil gezeigt. Dieses wird nur bei Euro 6 E nicht extra ausgewertet. Der graue Balken zeigt das Budget und ist somit nur beim Kommissionsvorschlag Euro 7.1 zu finden. Die gelben Balken stellen ein aus Kalt- und Warmteil gewichtetes Ergebnis dar, welches für Euro 6 E, Euro 7.2, Euro 7.3 und Euro 7.4 vorhanden ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Kaltstart bei NO_x klar dominant ist. Da die Abgasnachbehandlung erst auf Betriebstemperatur gebracht werden muss, sind die NO_x-Emissionen gerade am Anfang deutlich erhöht. Durch die gleiche Höhe der blauen Balken, welche bei Eu 7.1 das 100. Perzentil aller MAWs darstellt, bei den Optionen Eu 7.2, Eu 7.3 und Eu 7.4 dagegen das Ergebnis für den ersten WHTC, ist zu erkennen, dass das höchste Fenster bei NO_x in diesem Fall gleich mit dem ersten Fenster im Kaltstart zu setzen ist. Dies ist für NO_x bei anderen Fahrzeugen, auch bei Euro 7 Technologien ähnlich zu erwarten. D.h. bei NO_x ist der Unterschied zwischen der Auswertung des 100. Perzentils oder des ersten WHTC MAWs im Kaltstart nur gering und wird keinen signifikanten Unterschied für das finale Ergebnis darstellen.

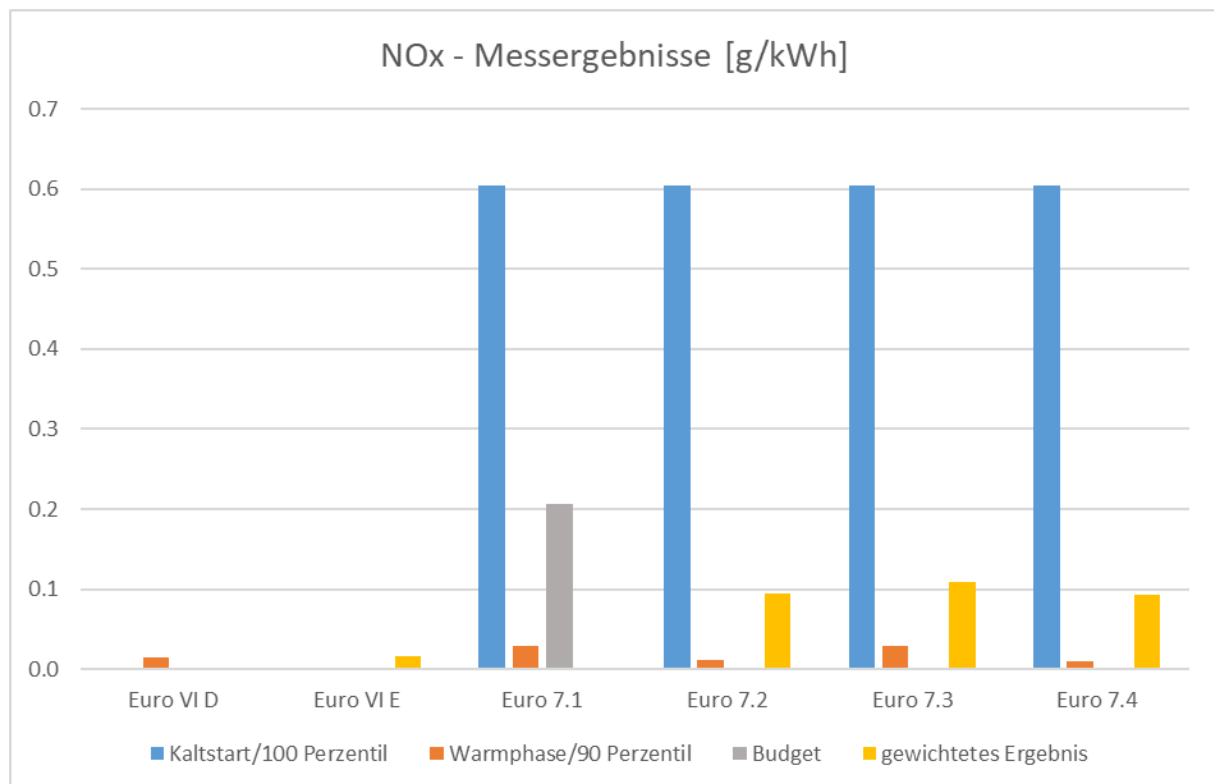
Die orangen Balken für den Warmteil sind im Vergleich zum Kaltstart in allen Fällen sehr gering. Es ist zu erkennen, dass die Balken bei den beiden Methoden, für die das 90. Perzentil ab dem 1. MAW gebildet wird (Eu 7.1 und Eu 7.3), höher liegen als bei den Optionen, wo die warmen Emissionsfenster erst ab Ende der Kaltstartphase gebildet werden (Eu 7.2 und Eu 7.4). Zudem zeigt die ähnliche Höhe dieser beiden Auswertemethoden, dass der Unterschied zwischen dem einfachen Mittelwert zu der recht komplexen Bildung von MAWs und der Auswertung des 90. Perzentils im Warmteil bei NO_x in diesem Test sehr gering ist.

Das „Budget“, also das Ergebnis für 3xWHTC Arbeit nach Test Start in Eu 7.1, liegt wie erwartet bei ca. einem Drittel des Kaltstarts, da hier alle Emissionen bis zum Abschluss von dreimal der WHTC Arbeit berücksichtigt werden, von denen 1xWHTC kalt ist. Wie die orangen Balken zeigen, kommen nach dem ersten WHTC, also dem blauen Balken, kaum mehr Emissionsmasse dazu.

Bei den gewichteten Ergebnissen (14% kalt und 86% warm), den gelben Balken in Euro 6 E, Eu 7.2 bis 7.4, sieht man, dass Euro E geringer liegt, da bei dieser Methode die Emissionen erst ab Erreichen von 30°C Kühlwassertemperatur berücksichtigt werden. Zwar lag die Starttemperatur bei diesen Tests nur knapp unter 30°C, aber trotzdem werden dadurch die ersten 150 Sekunden

nicht betrachtet und in diesen entstehen signifikante Emissionsanteile. Der Unterschied zwischen 7.2, 7.3 und 7.4 ist gering. Da bei 7.3 alle MAWs schon ab Teststart für die warmen Emissionen berücksichtigt werden, liegt dort der warme Emissionswert und damit auch der gewichtete Wert etwas höher. Der geringe Unterschied zwischen 7.2 und 7.4 bestätigt, dass bei NO_x der Unterschied zwischen dem 90. Perzentil oder dem einfachen Mittelwert für den Warmteil zumindest in diesem Test nicht signifikant ist.

Abbildung 56: Messergebnisse – NO_x



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Abbildung 65 zeigt die Konformitätsfaktoren für NO_x . Diese wurden für jede Methode aus dem Verhältnis des passend ausgewerteten Messergebnisses zum jeweils gültigen oder vorgeschlagenen Grenzwert berechnet. Die Farben der einzelnen Balken sind gleich wie in Abbildung 56.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Fahrzeug sowohl bei Euro 6 D als auch bei Euro 6 E deutlich (mehr als 95%) unter dem Euro 6 Grenzwert liegt.

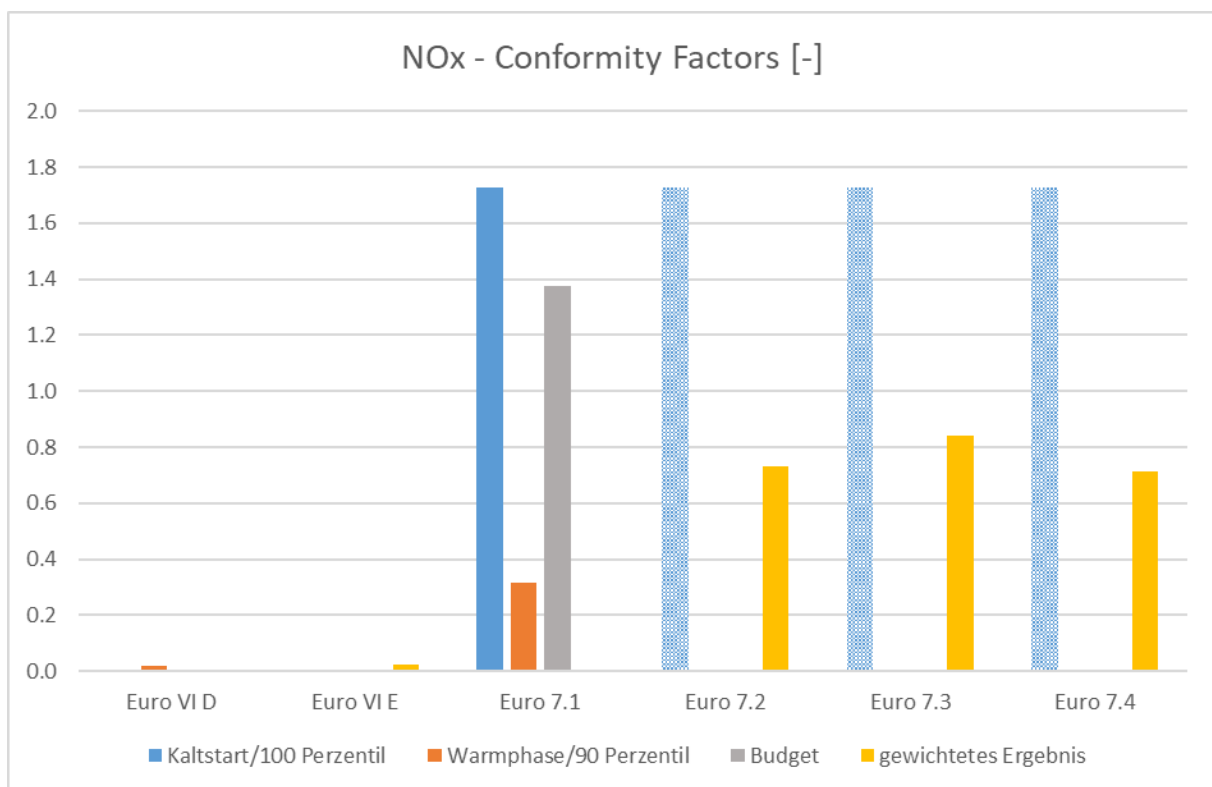
Bei Betrachtung der Euro 7.1 Resultate ist zu erkennen, dass das Fahrzeug im Kaltstart sowohl beim 100. Perzentil als auch beim Budget deutlich über den Grenzwerten liegt. Bei Euro 7 Fahrzeugen müsste daher eine 2. Abgasnachbehandlungsanlage motornah zur effektiven Reduktion der Kaltstartemissionen oder intensive Heizmaßnahmen ergänzt werden.

Beim 90. Perzentil („Hot“) Ergebnis liegt dieses Fahrzeug bereits unter dem Euro 7 Grenzwert. Dies zeigt, dass Euro 6 Abgasnachbehandlungstechnologien NO_x -Emissionen in betriebswarmem Zustand bereits effektiv reduzieren können. Bei der Einordnung dieses Ergebnisses muss aber nochmal auf den Zustand „Neufahrzeug“ und die Fahrbedingungen im Warmteil verwiesen werden. „Any driving conditions“ würden anstatt der Fahrt auf einer Bundesstraße und einer Autobahn auch eine anspruchsvollere Route inkl. Bergauf- und Bergabfahrt und Stop&Go Sequenzen erlauben, welche zu emissionskritischeren Bedingungen führen kann.

Bei Euro 7.2, 7.3 und 7.4 ist der blauen Balken für das Kaltstartlimit jeweils nur schraffiert dargestellt, da dieses Limit in den vorigen Abschnitten nur als optional zum gewichteten Ergebnis diskutiert wurde.

Da die Ergebnisse zeigen, dass gerade der Kaltstartteil im derzeitigen Euro 7 –Vorschlag herausfordernd ist und Verbesserungen gegenüber der Euro 6 e Technologie erfordert, würde die Einführung dieses extra Kaltstartgrenzwerts eine ambitionierte Emissionsreduktion bereits in der Kaltstartphase absichern und den Ausgleich von hohen Kaltstartemissionen durch sehr geringe betriebswarme Emissionen bei ausschließlicher Verwendung eines gewichteten Ergebnisses verhindern. Zudem ist hier zu erwähnen, dass die Kaltstartemissionen häufig in bereits belasteten urbanen Gebieten entstehen.

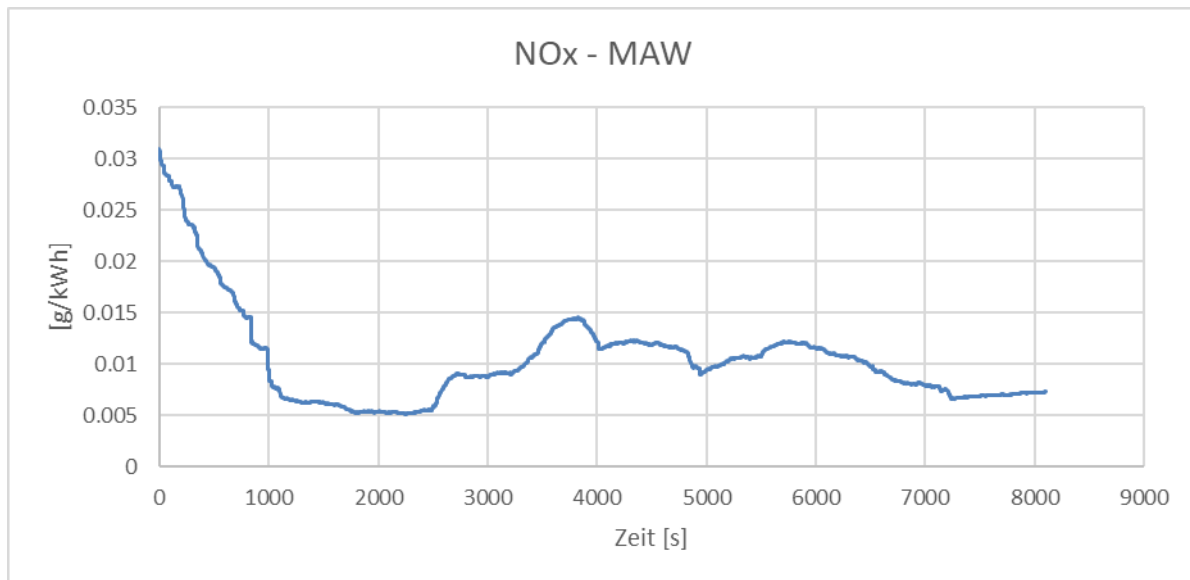
Abbildung 57: Conformity Factors – NO_x



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Folgend wird am Beispiel von NO_x auf die MAW Methodik genauer eingegangen. Abbildung 58 zeigt dazu alle MAWs aus der Euro 6 Auswertung über der Zeit. Man sieht, dass die Werte aufgrund des Kaltstarteffekts am Anfang höher liegen und sich dann auf geringerem Niveau einpendeln. Der Anstieg ab MAW Nr. 2500 ist auf einen Leistungsanstieg nach einer Niederlastphase zurückzuführen.

Abbildung 58: MAWs über der Zeit. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), NO_x

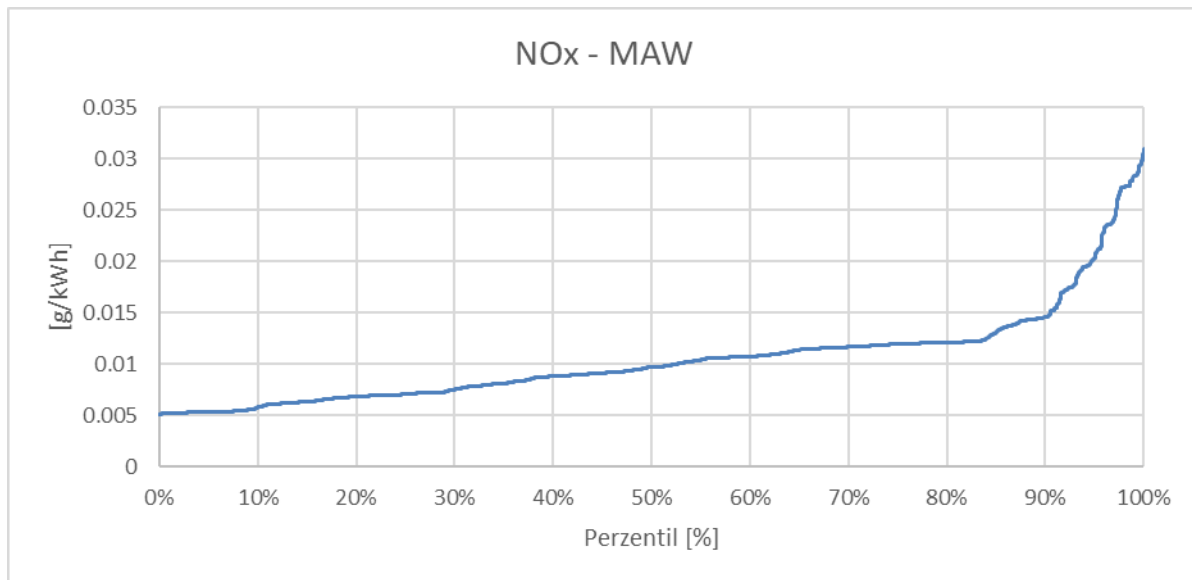


Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Abbildung 59 zeigt die gleichen MAWs der Größe nach aufsteigend sortiert. Es ist gut zu erkennen, dass bei Betrachtung des 90. Perzentils ein entscheidender Teil nicht berücksichtigt wird, da in diesem Fall die Fenster mit höheren Emissionen genau etwa 10 % aller MAWs ausmachen. Wenn man in diesem Fall den Mittelwert über die Emissionswerte ohne Bildung von MAWs (oranger Balken) mit dem 90. Perzentil vergleicht, sind die Ergebnisse ähnlich. Wie bereits zuvor erklärt ist der Unterschied der verschiedenen Auswertemethoden für NO_x in diesem Fall nicht signifikant.

Wenn ein RDE Test etwas höhere Anteile extremerer Situationen beinhaltet, würde das 90. Perzentil gegenüber dem Mittelwert deutlich zunehmen, in Situationen, wo mehr als 90% emissionsfreundliche Situationen herrschen, wäre der Mittelwert höher als das 90. Perzentil. Nimmt man die durchschnittlichen Emissionen als relevante Größe für die Umwelt an, so ist das 90. Perzentil kein verlässlicher Messwert dafür.

Abbildung 59: MAWs aufsteigend geordnet. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), NO_x



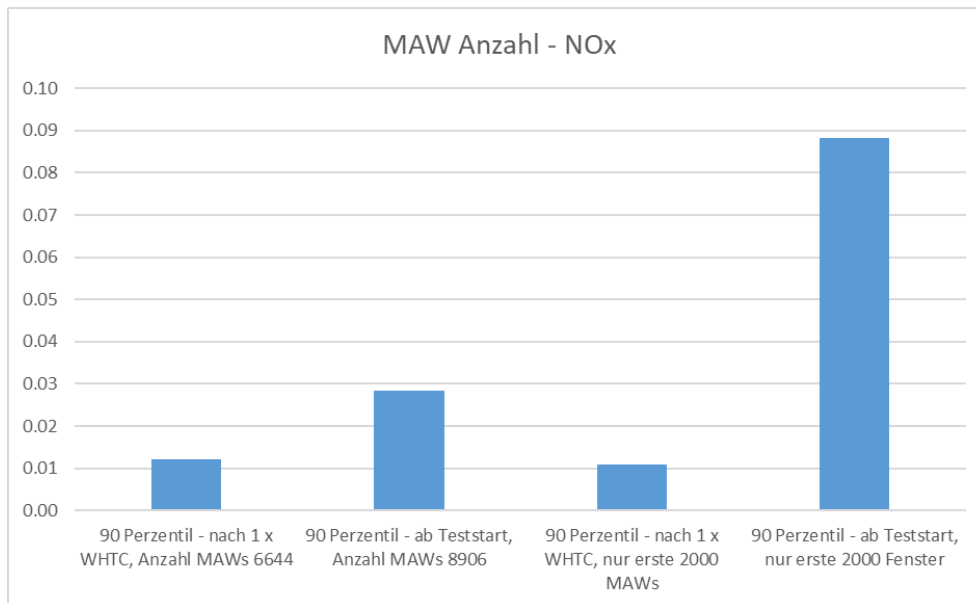
Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Ob der Kaltstarteffekt bei NO_x nur in den höchsten 10 Prozent ist oder ob er auch schon das 90. Perzentil beeinflusst, wird – neben der nötigen Aufwärmzeit - durch die Anzahl der MAWs und somit der Dauer der Warmphase nach dem Kaltstart beeinflusst. Dazu zeigt Abbildung 5 den Unterschied zwischen der gesamten Testlänge, also Betrachtung aller MAWs, und der Betrachtung von nur 2000 MAWs.

Balken 1 und 3 zeigen die Ergebnisse für das 90. Perzentil ohne Berücksichtigung der Kaltstartphase. Da die Emissionen in der Warmphase konstant auf geringem Niveau sind, hat die Anzahl der Fenster kaum Einfluss auf das Ergebnis.

Wenn der Kaltstart im 90. Perzentil mit betrachtet wird (Balken 2 mit allen MAWs und Balken 4 mit nur 2000 MAWs), wird der Effekt der Testdauer deutlich. Bei nur 2000 Fenstern hat der Kaltstart mehr Anteil als nur 10 % und somit ist das 90. Perzentil knapp viermal so hoch wie bei Betrachtung des gesamten Tests (8906 MAWs). Dies zeigt, dass die Testlänge beim Auswertung nach 90. Perzentil einen signifikanten Einfluss auf die finalen Emissionen hat. Wird die Auswertung der 90. Perzentils oder der mittleren Warm-Emissionen erst nach Ende der Kaltstartphase begonnen, so ist das Ergebnis stabil und von der Testdauer unabhängig.

Abbildung 60: Sensitivität der MAW Anzahl. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), NO_x

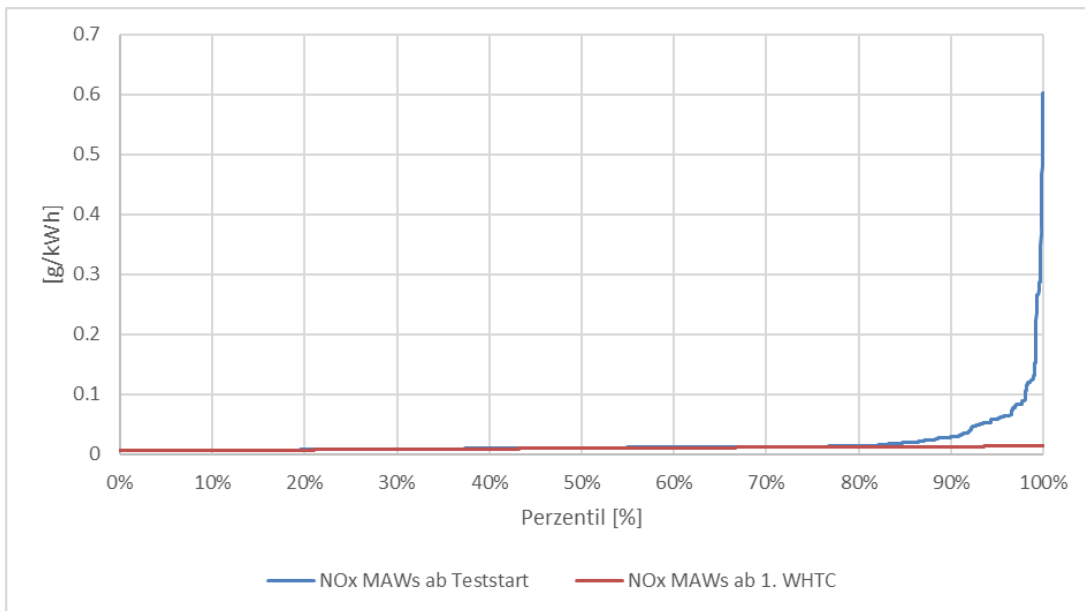


Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Abbildung 60 zeigt die MAWs für die Auswertung Euro 7.3, bei der alle MAWs von Sekunde 1 weg berücksichtigt werden (blaue Linie). Da alle MAWs eine höhere Leistung als 6 % haben, wird auch kein Fenster aufgrund der Leistungsgrenze ausgeschlossen. Es ist zu erkennen, dass bei Berücksichtigung aller Fenster die Emissionen im Kaltstart entscheidend sind. Durch den starken Anstieg aufgrund der – im Vergleich zu den betriebswarmen Emissionen - hohen Kaltstartemissionen hat die Testdauer entsprechend der Ergebnisse aus Abbildung 5 sehr großen Effekt auf das Ergebnis für das 90. Perzentil.

Die MAWs im Warmteil sind im Vergleich zum Kaltstart sehr gering. Bei Betrachtung der MAWs ab dem 1. WHTC (rote Linie) bewegt sich der gesamte Test auf dem geringen „warm“ Niveau.

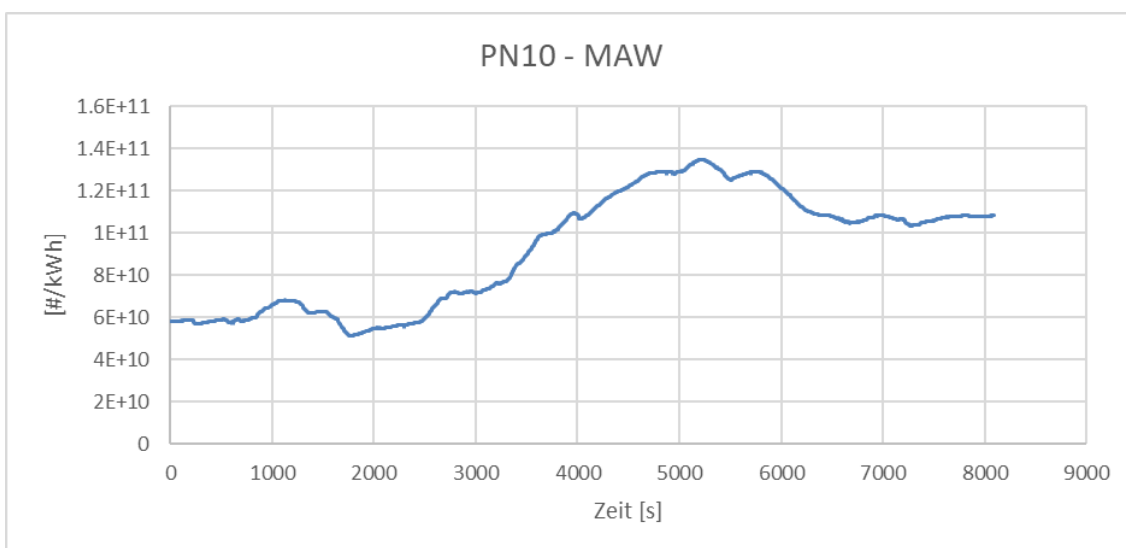
Abbildung 61: MAWs aufsteigend geordnet. Ausgewertet nach EURO 7.3 (Berücksichtigung gesamte Kaltstartphase, MAWs mit mehr als 6 % Leistung), NO_x



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

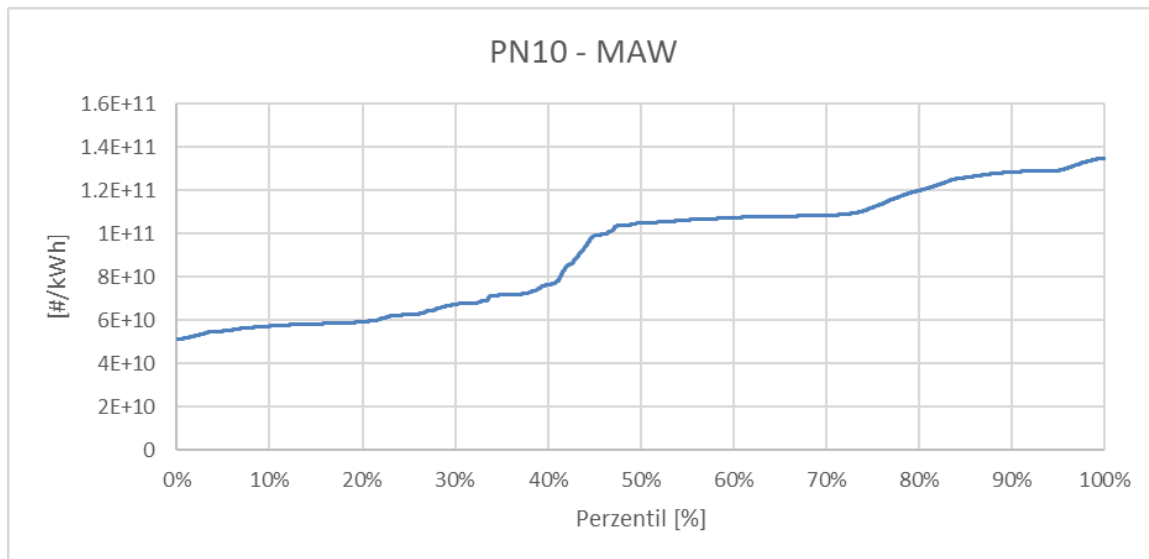
Die Ähnlichkeit der Ergebnisse des Mittelwerts und des 90. Perzentils ist wie zuvor schon beschrieben, nicht automatisch gegeben. Bei PN10 in diesem Test (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63) verhalten sich die Emissionen über den gesamten Test eher konstant anstatt hoher Emissionen in einer speziellen Phase wie im Kaltstart bei NO_x. Durch diesen konstanten Anstieg sieht man, dass der Mittelwert ohne MAWs (oranger Balken) doch erkennbar niedriger als das 90. Perzentil liegt.

Abbildung 62: MAWs über der Zeit. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), PN10



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Abbildung 63: MAWs aufsteigend geordnet. Ausgewertet nach EURO 6 E (Berücksichtigung Kaltstartphase ab 30°C Kühlwassertemperatur, nur MAWs mit mehr als 10 % Leistung), PN10



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Diese Analyse zeigt, dass das MAW Prinzip schwieriger als ein einfacher Mittelwert nachzuvollziehen ist und die mittleren Emissionen nicht verlässlich abbildet. Bei der MAW Methode werden gewisse Ereignisse durch den Einfluss auf mehr MAWs als andere stärker gewichtet und durch die Auswertung mit dem 90. Perzentil werden nicht alle Emissionsmassen berücksichtigt. Zumindest in Emissionsinventuren ist die gesamte bzw. die durchschnittliche Emission in einer Fahrt relevant, welche durch den Mittelwert abgebildet wird.

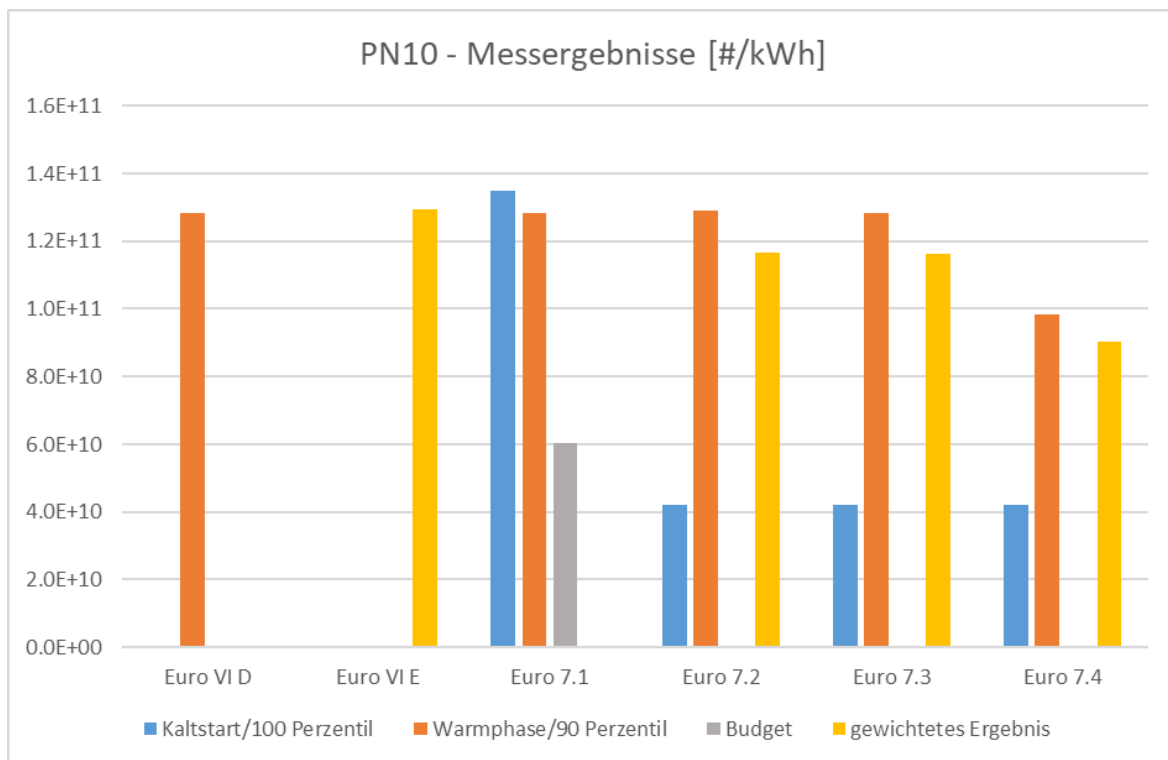
In Abbildung 64 sind die Ergebnisse der Auswerteooptionen für PN10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Emissionen in der Warmphase höher als im Kaltstartteil liegen. Dies kann durch Effekte wie der passiven Filterregeneration bei höheren Temperaturen erklärt werden. Im Kaltstart ist die Filtrationseffizienz hingegen sehr hoch und zudem wird dort noch kein AdBlue eindosiert, wodurch in der Kaltphase keine auf Ammoniak-Reaktionen-basierten Partikel entstehen.

Dadurch wird das 100. Perzentil (Euro 7.1) auch nicht im Kaltstartteil, sondern in der Warmphase gebildet und liegt somit deutlich höher als die Werte für das erste WHTC Fenster (Euro 7.2, Euro 7.3 und Euro 7.4) oder das Budget.

Wie bereits zuvor gezeigt liegt das 90. Perzentil des Warmteils (Euro 7.2) aufgrund der konstanten Steigung zwischen den MAWs erkennbar über dem Mittelwert (Euro 7.4). Dies ist natürlich auch in den finalen gewichteten Ergebnissen zu erkennen.

Durch den konstanten Anstieg zwischen den MAWs ist der Unterschied zwischen dem 90. und dem 100. Perzentil bei Euro 7.1 aber auch gering.

Abbildung 64: Messwerte, PN10



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

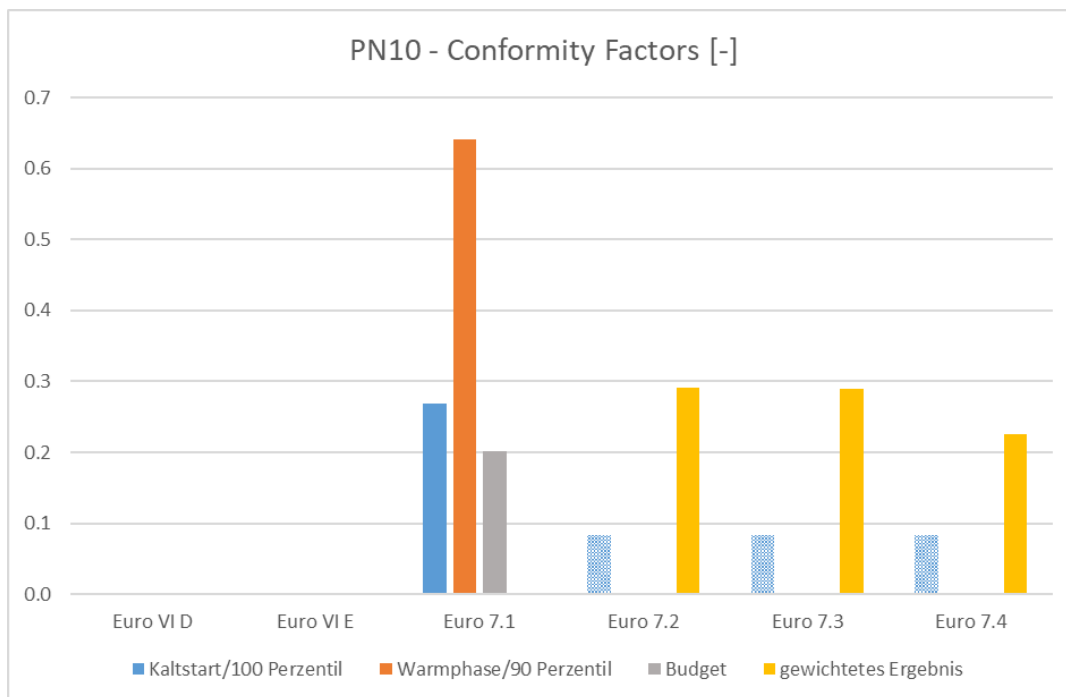
Abbildung 65 zeigt die Konformitätsfaktoren für PN10. Bei Euro 7.2, 7.3 und 7.4 ist das optionale Kaltstartlimit nicht kritisch. Ebenso liegen die gewichteten Ergebnisse, wobei 7.4 aufgrund der Verwendung des Mittelwertes anstelle des 90. Perzentils etwas niedriger liegt, deutlich unter dem Grenzwert. Hier muss aber auch wieder auf die verhältnismäßig nicht herausfordernden Bedingungen im Warmteil des hier ausgewerteten ISC Tests verwiesen werden.

Bei Euro 7.1 ist das 90. Perzentil Limit aufgrund des vergleichsmäßig geringen Grenzwerts am herausforderndsten. Durch das gewichtete Ergebnis bei Euro 7.2, 7.3 und 7.4 wird dieser kritische Bereich also abgeschwächt.

Bei Euro 6 D und E ist PN10 nicht reglementiert, deshalb gibt es hier keine Konformitätsfaktoren.

Da in Euro 7 auch Tests mit DPF-Regeneration, gewichtet nach ihrem Anteil im realen Betrieb, in das Ergebnis einfließen sollen und während der Regeneration erhöhte PN, NO_x- und CO-Emissionen auftreten können, ist die gewählte Methode auch für DPF-Regenerationen Relevant. Das 90. Perzentil ist für einen Test mit DPF Regeneration ungeeignet, da es schnelle Regeneration, ggf. dadurch mit besonders hohen Emissionen anregt, da dann die Regenerationsphase in die nicht mit dem 90-Perzentil-Limit erfassten 10%-Anteil an den MAWs fallen kann. Dazu wäre Option Eu 7.4. besser passend bzw. würde einfachere und logischere Routinen erlauben, da man Mittelwerte einfach über mehrere Tests und Testabschnitte gewichten kann.

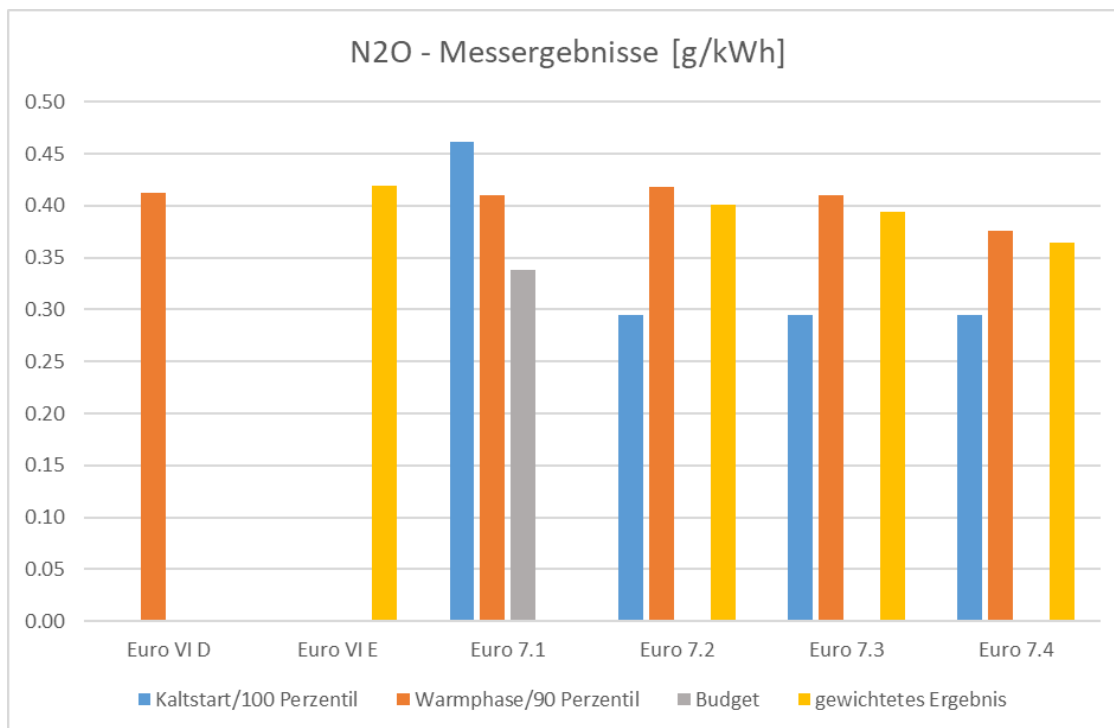
Abbildung 65: Konformitätsfaktoren, PN10



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Abbildung 66 zeigt die Messergebnisse für N_2O . Bei N_2O sind die Emissionen wiederum in der Warmphase höher als beim Kaltstart, da diese in Verbindung mit den Reaktionen im SCR und im ASC und somit nur bei betriebswarmem Abgasnachbehandlungssystem entstehen. Der Unterschied ist hier aber geringer. Das 100. Perzentil (Euro 7.1) zeigt somit wieder das höchste Ergebnis im warmen Zustand und nicht die Kaltstartemissionen. Der Mittelwert für die Warmphase (Euro 7.4) liegt auch bei N_2O etwas unter dem Ergebnis für das 90. Perzentil (Euro 7.2), aber in einem vergleichbaren Bereich.

Abbildung 66: Messergebnisse, N₂O

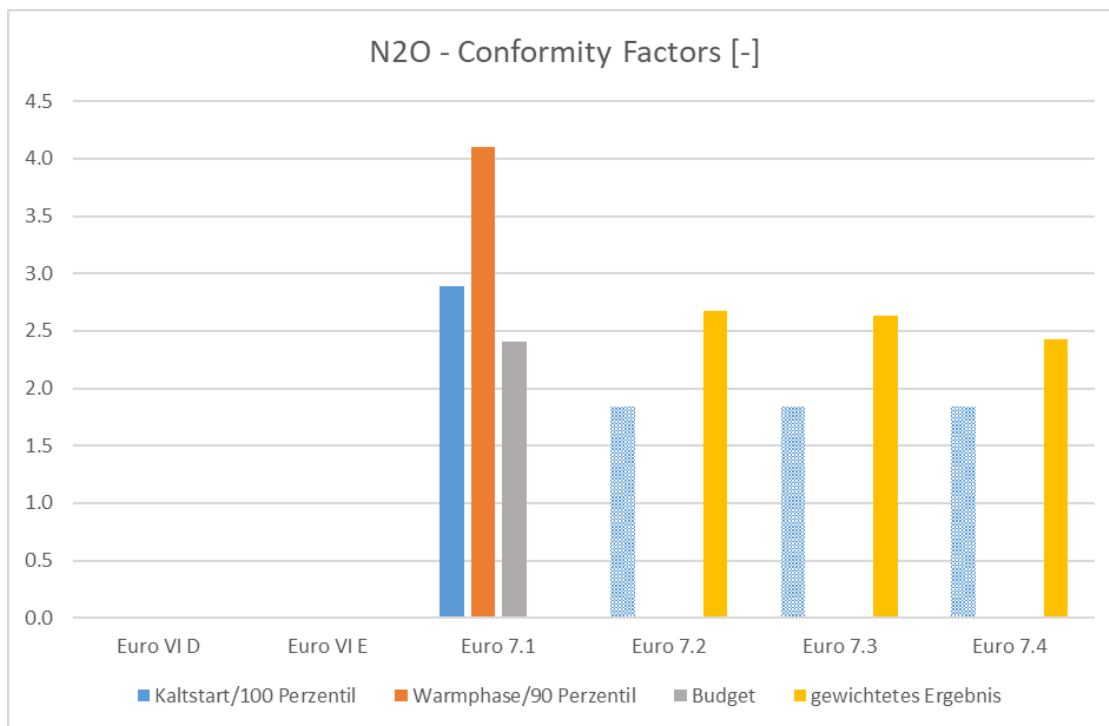


Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Beim Vergleich mit den jeweiligen Grenzwerten fällt als erstes auf, dass alle Auswertemethoden Ergebnisse über den Limits liefern. N₂O ist in Euro 6 nicht reglementiert, weshalb bei Euro 6 D und E auch keine Konformitätsfaktoren angegeben sind und weshalb bisher auch kein Anreiz zur Reduktion von N₂O gegeben war. Durch die Umstellung auf Vanadium als Material für die SCR-Katalysatoren bzw. auch verbesserte Selektivität bei derzeit üblichen Zeolithen sollte das Einhalten der Euro 7 Grenzwerte aber – zumindest bei Betrachtung der Mittelwerte statt der 90. Perzentile - möglich sein.

Was bereits an den Messwerten zu erkennen war, wird durch die Betrachtung der Konformitätsfaktoren bestätigt. Bei N₂O ist weniger der Kaltstart, sondern mehr die Warmphase die Herausforderung. Da diese durch die Gewichtung bei Euro 7.2, 7.3 und 7.4 nicht direkt limitiert ist, können diese Varianten für N₂O als etwas weniger streng betrachtet werden. Da der Ort der N₂O Emission für die Klimaeffekte nicht relevant ist, erscheint hier die Mittelwertbetrachtung gemäß Option Eu 7.4 statt einer 90. Perzentil Betrachtung deutlich plausibler.

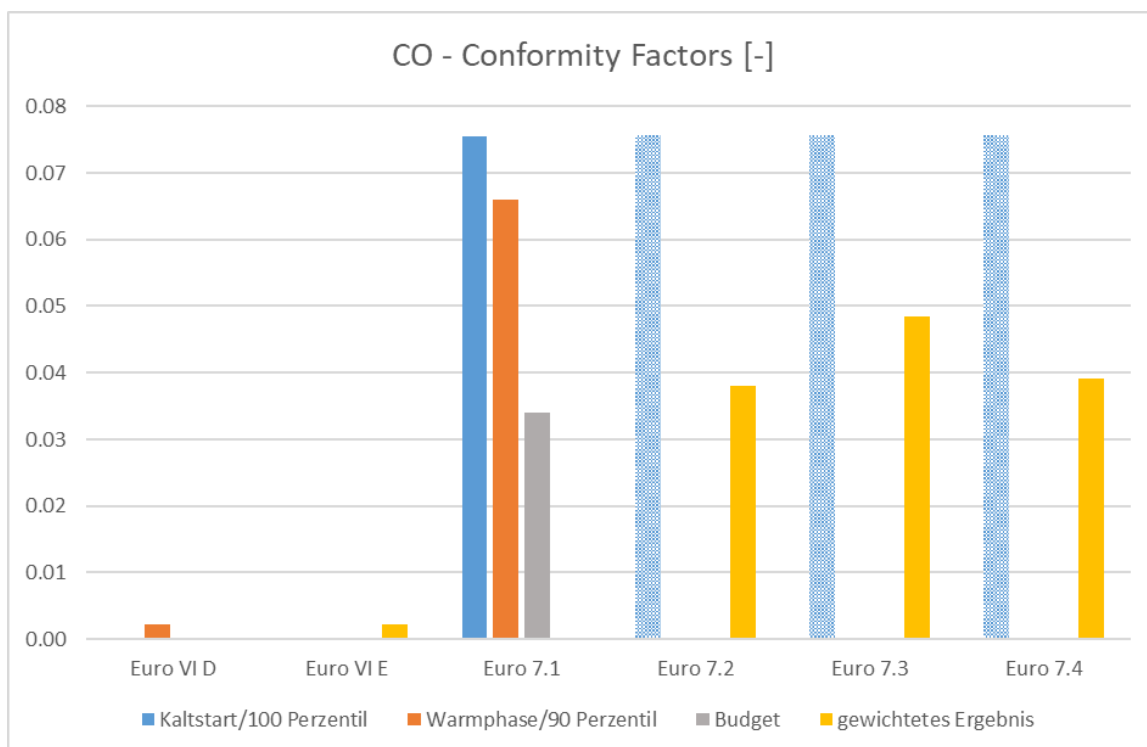
Abbildung 67: Konformitätsfaktoren, N₂O



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Bei CO liegen die Emissionen im Vergleich zu den jeweiligen Grenzwerten in allen Betriebsphasen auf sehr geringem Niveau (siehe Abbildung 68). Dies zeigt, dass CO Emissionen bereits bei Euro 6 Fahrzeugen sehr effektiv reduziert werden.

Abbildung 68: Konformitätsfaktoren, CO



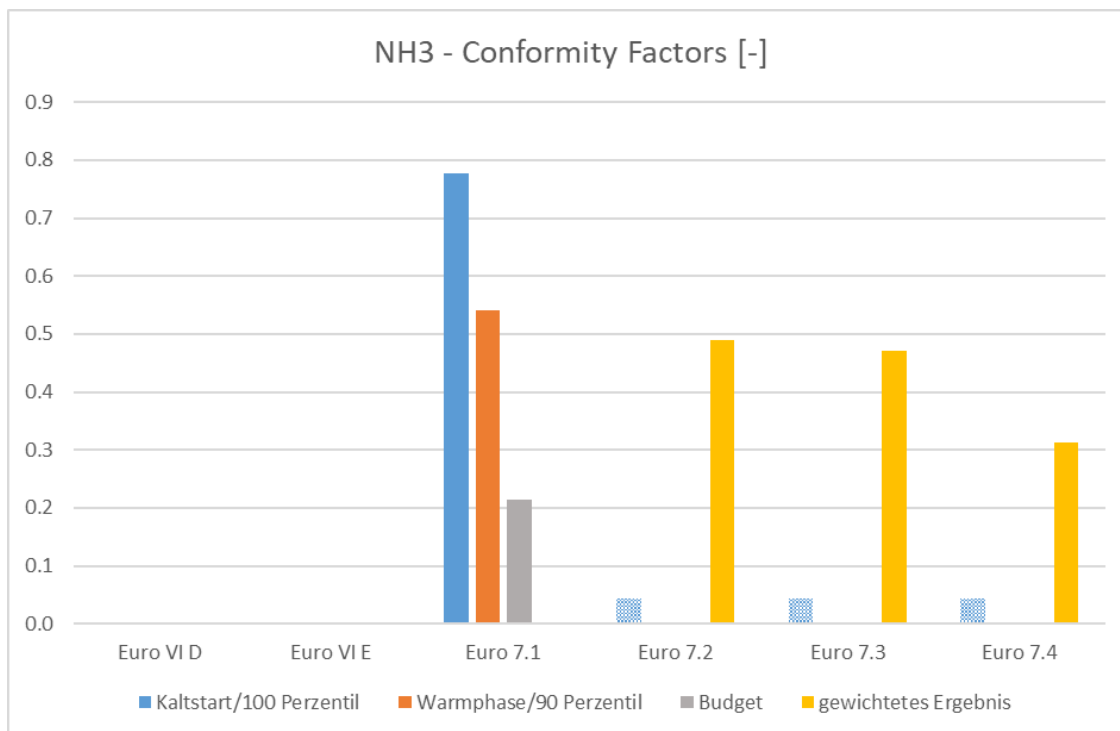
Quelle: Eigene Abbildung, FVT

Aufgrund dieses geringen Niveaus ist die Auswahl einer der Auswertemethoden für CO von Diesel-LKW nicht relevant.

Abbildung 69 zeigt die Konformitätsfaktoren für NH₃. Auch hier ist zu erkennen, dass der kritische Bereich die Warmphase ist, in der AdBlue eindosiert wird. Bei steigenden Temperaturen ist zudem noch die NH₃-Speicherfähigkeit der SCR Katalysatoren geringer. Folglich ist wiederum das 100 Perzentil Limit am kritischsten. Durch die Gewichtung von Kalt- und Warmphase (Euro 7.2, 7.3 und 7.4) ist die Auswertung weniger streng.

Da die sortierten MAWs der NH₃ Emissionen auch wieder relativ konstant ansteigen, ohne spezielle Phase, wie zum Beispiel Kaltstart bei NO_x, ist auch hier der Mittelwert für die Warmphase (Euro 7.4) geringer als das entsprechende 90. Perzentil (Euro 7.2).

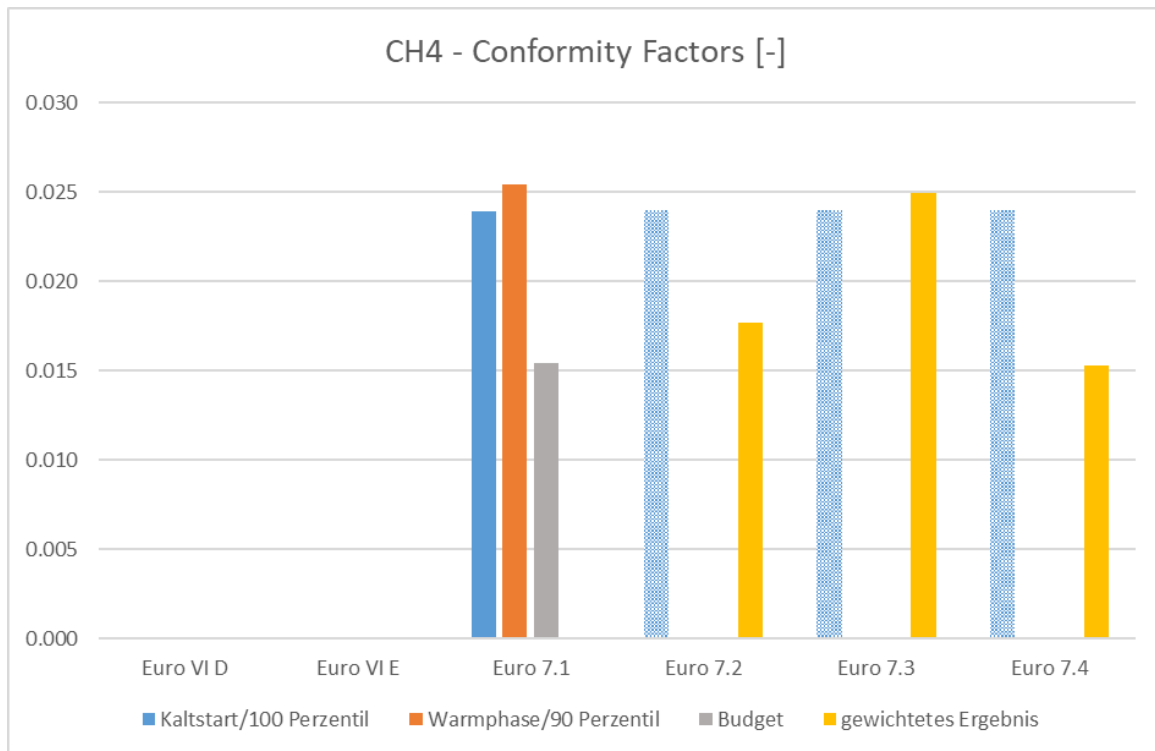
Abbildung 69: Konformitätsfaktoren, NH₃



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

CH₄ ist bei diesem Dieselfahrzeug auf sehr geringem Niveau, wie Abbildung 70 zeigt. Die gewählte Methode ist wie bei CO für das Einhalten der Grenzwerte durch Dieselantriebe wenig relevant. Die CH₄ Limits sind für Gasfahrzeuge angepasst. Bei diesen ist mit höheren Emissionen zu rechnen.

Abbildung 70: Konformitätsfaktoren, CH₄



Quelle: Eigene Abbildung, FVT

E On Board Monitoring (OBM)

Autor*innen: Norbert Ligterink, Rob Cuelenaere, TNO, Den Haag; Stefan Hausberger, FVT

Datum: 23. November 2023

E.1 Introduction

The proposed OBM is a new aspect in vehicle legislation and a departure from the OBD system and its functionalities, only partly checked in type-approval. In this report, the possible reasons for OBM, its requirements, its use, and its limitations are discussed. There are many technical details introduced in OBM, in part to serve different purposes. But, eventually, the OBM is important for general fleet information to ensure the proper status of the vehicle. Although outside the scope of type-approval, the link to repair, PTI (Periodic Technical Inspection), and RSI (Road Side Inspection), is apparent. A good OBM is an enabler of many ways in which the lifetime emission can be kept in check. The manufacturer should be this enabler, by providing appropriate and accurate information.

E.2 Observations for OBM in Euro-7

With the introduction of Euro-6d-ISC vehicles the last stage of current vehicle emission legislation has been reached. The practical aspects of ISC testing, the changes in modern vehicle emissions over their lifetime, and the limitations on repair and PTI of emission control systems, are the gaps in Euro-6d that should be addressed in subsequent legislation, like Euro-7 but also PTI. New vehicles are nowadays generally clean, and the focus should shift towards keeping them clean over their lifetime and finding more effective the remaining issues with in-service compliance, than random sampling of vehicles. There are important lessons from Euro-6d, which are briefly summarized in this chapter, as the basis for OBM and thus setting the requirements for OBM.

E.2.1 The use of sensors in emission control

The omnipresence of sensors in vehicles for active emission control can also be the basis of the monitoring of the emissions and the quality of the emission control system. In the case of active control the sensors provide the feedback for the actuation of the emission control. Best known is the SCR system, which nowadays removes about 98-99% of the NO_x from the engine out exhaust gas, in warm conditions. Hence, there must be an accurate reading of concentrations by sensors in order to inject the right amount of AdBlue. The NO_x sensors for diesel are very common and well-known. Since they are sensitive for NH₃ as well, this artefact is turned to an advantage, making such sensors, e.g., in combination with a lambda sensor, common for TWC, suitable for NO_x and NH₃ both. The sensors are made suitable for petrol as well. Many different PM sensors are developed, suitable mainly for detecting large defects, e.g., with DPFs, but not at the PN accuracy level and not suitable for the low particle mass and the hot exhaust gas from gasoline engines. They are not widely applied, unlike NO_x and lambda sensors. One manufacturer has a separate NH₃ sensor for diesel, which is used by, at least, one engine manufacturer. This sensor has a limited application range, albeit suitable to detect AdBlue and NH₃ slippage issues, at the core of high NH₃ emissions that need to be controlled.

E.2.2 Limited effectiveness of OBD for emissions

The OBD system intertwines legal and industrial standards. It is related mainly to known aspects of maintenance, rather than detecting faults in general. Vehicles with high and very high emissions often have no indication of a malfunction on the OBD. They also pass the PTI test without problem and common servicing often does not remove these defects. The legal part of OBD relies on manufacturer's systems and internal industry standards. The inspection authority also has problems to use OBD to ensure vehicles in proper order, and tampering is detected. In practice functionality tests of the OBD systems are limited tests that do not guarantee the functionality of the emission control systems as a whole. One issue of OBD seems to be that its basic functionality needs to be demonstrated only during type approval tests using the type approval test cycles (WLTC and WHTC for LDVs and HDVs respectively). Thus, routines in the ECU to identify malfunctions in any driving conditions may be less efficient since the OEMs would rather avoid notifying their customers, without full confidence and understanding of a problem and its solution.

E.2.3 Lack of vehicle availability for ISC testing

Some vehicles have obscure emission related OBD errors in the system that excludes them currently from GTAA and independent ISC testing, according to RDE legislation. These errors are for example retained after AdBlue refill, based on a warning to the owner, and excludes vehicle for a month or longer in normal use, based on rules for clearing the OBD history. When vehicles are serviced some OBD errors seem not always related to actual repair or maintenance. Possibly, they are only cleared, to reappear soon after, and keeping the vehicles excluded from ISC testing. There is a clear gap of vehicles in proper state, suitable from ISC testing to check compliance, and vehicles that need to be repaired according to the internal OBD systems. The problem varies with manufacturer. This gap should be closed.

E.2.4 Deterioration beyond the ISC requirements

New modern petrol cars, especially from Euro-4 on, with a warm engine, have pollutant emissions in the single digits, i.e., a few mg per kilometre. With a defect the emission increases are easily hundredfold, making it essential to detect defects that occur in less than 1% of the cases, to retain the low impact on the environment. Nowadays, from remote sensing it is observed that the majority of the emissions are from "aged" vehicles. This is a mixture of the effects of aging, defects, and tampering, although the relative impact of the different aspects is poorly known because it cannot be determined without large and complex follow-up research. On the other hand, it is not relevant why average emissions increase manifold over the lifetime. All these aspects need to be detected and addressed to make vehicle emission legislation effective. The current PTI has limited effectiveness, partly because it cannot rely on certified on-board systems that can point towards emission problems. A vehicle should, in itself, point out problems, even if the cause is not known. This requires the use of sensors to measure emissions, and report increases well beyond type-approval values. Small variations in emissions are normal, but tampering, defects, and excessive aging do no longer cause fractional increases, but, instead, increases by factors ten or more. Detecting and fixing those has a large impact on the total and average emissions.

E.3 Possible purposes of OBM

The OBM system is introduced to detect and report emission exceedances. The Emissions Exceedances Driver Warning System (EEDWS) is central to the OBM, and it basically fills the need to induce repair if emissions of any individual vehicle are well above the limit. This is a general statement, and with the proposal further details are given, but often not spelled out explicitly. In the AGVES it is clarified that the extreme outlier, over 2.5 times the limit, is taken as the boundary for repair. This must be combined with, firstly, the ISC RDE testing, and its procedures and limits, and secondly, with the assurance the reported emissions by the OBM are proper and accurate. In this chapter further explanations are given.

E.3.1 Reporting emissions

Sensors are currently intended to provide feedback to the emission control system, when it is active. This excludes normally the cold start operation and emissions. They are a major part of the total emissions, and therefore there has been some insisting to include them, possibly by modelling, and to ensure the sensor starts reading after 40 seconds or less, rather than the common 200-300 seconds observed now. State of the art is about 60 seconds warm up time. If this purpose is to ensure the catalytic aftertreatment system is working in general the cold start emissions are not needed. However, since cold start emissions are the majority of the total emissions, some indication of the heat up of the systems, at its impact on emissions is very welcome. It could be argued that the cold start emissions are needed to check the emission levels against the legal limit that does include cold start emissions.

Making emissions of a vehicle available is the first step in a better control of emissions in ISC, MaSu, PTI, RSI, and consumer participation. Part of the discussion focusses on who can have access to the OBM reported lifetime emissions, and in what detail. In order to assist many stakeholders, details of the emission changes, with variations in use, in the last ten or twenty trips, should be available from the vehicle, i.e., with the key access to the vehicle. This will allow for root cause analyses of emission problems, by garages, inspectors, independent parties, and type-approval authorities, as part of their tasks, and specific testing of the OBM system. The Commission has focussed on remote fleet access for risk-based studies, or non-compliance investigation with high statistics. Moreover, fleet wide access will help to determine the true environmental impact of vehicles. The OBFCM analyses abode little good from remote fleet access and analyses. Without the context of the vehicle and its use this data will remain ambiguous. Requesting more information on the OBM, with friction with privacy legislation has been considered a path forward for fleet level remote access.

E.3.2 Readiness for ISC testing

Without the reliance of OBD, and its complex and ambiguous messages, the OBM can be the final say on the question whether the vehicle is in a good state, and suitable for ISC testing, or the vehicle is not in a good state, and need to be repaired. Despite the large exceedance of a factor 2.5 before the OBM excludes the vehicle for testing, there are some concerns on intermediate states of the vehicle, where the OBM system is not able to discern the true state, due to the lack of data. This can be from specific vehicle operations, with only short trips or no high velocity, or from the slow change in the OBM state variables. In the last AGVES meetings the notion arose to use the much-discussed “amber state” for this purpose. If the amber state is raised, the vehicle

should have more extensive preconditioning (longer duration and covering all velocities), to ensure the OBM has data to establish the vehicle state, with respect to ISC requirements.

E.3.3 Vehicle selection for ISC and MaSu

Type-approval and inspection authorities have to make a risk-based assessment of the vehicle families they will select for ISC and Market Surveillance testing respectively. OBM data, both of the whole fleet, as well of the vehicles to be selected, can be important and relevant information. If only to exclude vehicles that need to be repaired. Selecting vehicles for testing from the whole fleet data seems less likely because of data access and privacy issues. Vehicles with higher emissions, vehicle families with more variation, and vehicles indicating problems may be selected based on the risk of increased emissions for that family. Eventually, with the limited resources of the authorities, and possibly their changing role, proper information on vehicles both in vehicle selection and vehicle testing is essential for effective control.

E.3.4 Non-compliance based on fleet data

The Commission proposed a procedure for a non-compliance conclusion based on a statistical procedure with the over-the-air OBM fleet data. Not all OBM data is collected in ISC-compliant conditions, and therefore it will be a complex case to separate ISC-compliant from other data. This increases the complexity of OBM data significantly, as pulling of trailers, altitudes, etc. need to be incorporated, and excluded or compensated for. Moreover, there are many short trips driven in Europe, leading to a greater contribution to the overall emissions and urban air-quality, than is reflected in the RDE-ISC tests. Authorities may wish to investigate issues surrounding cold start emissions and short trips separately, not restricted by the OBM reporting requirements tailored to fleet-based compliance determinations.

While the necessity of detecting vehicles with need of repair more efficiently by OBM than currently with OBD seems to be evident, the additional cost/benefit ratio of an OBD based non-compliance check for vehicle fleets is not clear. It could make the entire OBM regulation much more complicated, and, for example, the industry has argued that access to all vehicles will be a burden.

E.3.5 Enforcing repair of defects

Eventually, the owner is responsible for the proper state of the vehicle, once registered and in normal use. This may exclude the vehicle from ISC-RDE testing, and thus not formally falling within the scope of type-approval legislation. However, the simple statement in Road Side Inspection legislation: "Emission control equipment fitted by the manufacturer [i.e., type approved] absent, modified, or obviously defective", contains in principle the need to be able to check the emission control equipment against the manufacturer's intended functionality. Hence, type-approval should specify the function and point out deviations, that can be concurred as "defective". Currently, there is a gap, which OBM should fill. Proving defective systems on vehicles, without this help of the manufacturer, has become extensively complicated. Therefore, vehicles can drive around with defects.

E.3.6 Simplifying PTI

Continuing the discussion on the need to detect and repair defects effectively, the PTI is the last-stop station. If the OBM/EEDWS ensures vehicles with excess emissions are repaired, the PTI should check if the OBM is working and reporting correctly. Hence, these checks should be easy and relevant, with the limited expertise and equipment at PTI stations in some member states. Comparing concentrations with external equipment in different circumstances (idling, high RPM idling, constant speed, etc.) allows for these checks. Moreover, insight in the state of the vehicle according to OBM should provide information if the vehicle has possible issues that should be addressed.

E.4 Technical aspects of OBM

The OBM is an alternative to PEMS, and it requires the same elements like concentration and flow measurements. The accuracy is, of course, limited, but the coverage of the vehicles and the usage is a huge benefit, with respect to the very limited ISC-RDE testing.

E.4.1 Translation concentrations into mass flow

Emission sensors measure only concentrations. The actual mass flow of emissions can only be determined with the exhaust mass flow, to link to type-approval limits like g/km and g/kWh. The need for this translation arises from the fact that the mass flow per km or per kWh respectively can vary substantially with the engine load and with the air-to-fuel ratio. Without the link to the emission limits boundaries for OBM have to be set wide, making them less effective. On the other hand, the translation to mass flow will be based on engine signals, that cannot be verified easily. Reporting also concentrations will be useful for inspection and control.

E.4.2 Available sensors and their limitations

There are different studies on the accuracy of sensors. In the wide range of vehicle technologies and test circumstances, the focus has been on the worst-cases. However, these worst-cases are also an overall problem to test and to control emissions, especially with very tight emission limits. Very high-volume flows lead to very low concentrations, for the emissions below the limit. With the appropriate limits for ISC RDE, it is likely the situations for OBM will also be resolved. The accuracy of NO_x and NH₃ sensors is intended to provide the feedback to the emission control system to control emission to a low concentration. They are generally very successful at keeping emissions at very low levels and therefore they must be able to measure at these low levels, thus indicating limited issues with accuracy and reliability. A number of studies suggest poor accuracy, up to deviations that are 50% of the proposed emission limits. Based on the successfulness of Euro-6d in lowering emissions to well below the Euro-6 limits, using these sensors in the control system. Risks of deviations of the OBM, can be mitigated by appropriate statistics, not relying on limited or biased data. Sensor manufacturers provide accuracies for their products, which are currently between 5 to 10 ppm for NO_x in measurement ranges below 100 to 200 ppm and 2% to 10% of the reading above. To compile this information into uncertainties in mg/km and mg/kWh one needs to consider the instantaneous volume flows and emission levels. Depending on the corresponding assumptions, different results occur.

For PM/PN the situation is different, and these sensors are not at that level. They will be able to detect major defects, e.g., cracks, in the DPF. But likely the PN limit is unattainable as accuracy, unless the vehicle is operated for a very long time to provide the necessary statistics.

E.4.3 Cold start emissions and warm-up periods

The key issue for comparison of OBM and RDE-ISC (PEMS) are the cold start emissions, which can be 90% of the total emissions and are not captured by the sensors, because they also need time to heat up. Ensuring cold start emissions remain checked with OBM is therefore problematic. Moreover, basing the requirements of the OBM on the check in RDE-ISC, i.e., the complete PEMS result, will put the focus on the cold start emissions and likely the modelling of those in OBM. Excluding the cold start emissions, e.g., the first 40 seconds after engine on, will simplify the requirements and checks of the OBM systems, and bring into focus the essential role to ensure the functioning of the catalytic emission control technology. In such a case, one may consider lower thresholds for OBM warnings for NO_x emissions than the factor 2.5 compared to the limits (which include high cold start emissions).

E.4.4 Small sample bias for skewed distributions

Incidents of high emissions will remain part of normal operation of vehicles. Therefore, the statistics of emission results, PEMS or OBM, will be an essential part of interpreting the results and reach any conclusion. The sample size and the decision must account for that, and is best covered by using all of the results that become available during testing. Many complex discussions focus on the sample size and possible bias. Some examples of samples are artificial and unlikely to occur in random testing. Any discussion must start with the underlying probability distribution and, especially, the tail of this distribution that entails the risk for non-compliance.

E.5 Linking OBM and ISC/RDE

The requirements of modern vehicles are foremost defined by the ISC RDE test conditions and limits. Any restriction in the ISC RDE test conditions will reduce the comparability of OBM results in normal use with these ISC RDE requirements. The comparison is restricted and complex, if much normal usage such as short trips have to be excluded. High emissions observed in OBM can, with a restricted ISC RDE requirements, be excluded and therefore be valid results. On the other hand, Due to the high share of cold start emissions in the total NO_x emissions of a PEMS test, comparisons of OBM and PEMS, in ISC RDE, will focus on cold starts and modelling, rather than the measured results. For the sensor-based detection of defects, malfunctions and tampering, the cold start phase cannot be used due to the heat up time of the sensors. As discussed before, from technical point of view it may be preferable to monitor once the sensor is active but use a lower NO_x threshold to indicate needs for repair, e.g., 1 or 1.5 x the limit (see also 5.2).

In addition, a demonstration of the functionality of OBM may be requested in type approval. The demonstration test should be during an RDE test and not in the lab test. If OBM functionalities are monitored only via ISC-tests and not in type approval, the chance of finding OBM systems that do not work well is not very high (need of having a defect vehicle in the sample which are tested under conditions where they exceed the OBM threshold).

E.5.1 Trip level results, cold start emissions

High level comparisons and evaluation, only at a trip level, will restrict the manner to simplify the OBM implementation and use. The emission limits are central to type-approval legislation, but the test execution and evaluation are the important elements that determine the actual stringency. The valid RDE ISC test results are compared with the emission limits, urban and total. If OBM is compared at that level only, the comparison is restricted and requires the evaluations performed in ISC RDE testing to be applied in OBM as well, and cold start to be added. If OBM is intended to operate at the RDE ISC emission limit level, with similar accuracy, this is a problem. But the OBM as a way to check extreme outlier levels does shift the requirements of the OBM.

E.5.2 Issues with evaluation methods

The simpler the OBM, the more acceptable it is, and the easier to check the functionality and the easier it may be to obtain the agreement of all relevant parties. The main task, i.e. to efficiently identify high emitting vehicles, shall be the driver in method developments.

The RDE ISC requirements complicate the evaluation of OBM results, and will create a gap between normal usage OBM data and RDE ISC data. An alternative would be to keep the functionality of OBM simpler: raw OBM emissions with a warm engine, which should be a lower bound on the emissions, as cold start emissions are expected to add to the average as indicated above.

Especially, for heavy-duty with the complex statistical evaluation with the MAW method, the implementation of this evaluation in OBM in normal use may be prohibitively computationally complex without improving the effectiveness in identifying high emitters. For this task, monitoring the hot phase, e.g. via the average emissions after first WHTC-work window until test end, would be sufficient if the NO_x thresholds are adjusted to hot conditions, considering also the analyser uncertainties. The difference between normal use and RDE ISC requirements must be bridged in an efficient manner.