

TEXTE

34/2024

Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA

Abschlussbericht

TEXTE 34/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 51 102 0
FB000330

Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA

Abschlussbericht

von

Claus Matzer, Konstantin Weller, Martin Opetnik, Stefan
Hausberger
Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik mbH, Graz

Wolfram Knörr
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
GmbH, Heidelberg

Benedikt Notter
INFRAS, Forschung und Beratung, 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:

Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH
Inffeldgasse 19
8010 Graz
Österreich

Abschlussdatum:

April 2020

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Christiane Vitzthum von Eckstädt

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2024

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

Danksagung

Die Projektnehmer möchten sich für die Ermöglichung dieses Projekts sowie für die gute Zusammenarbeit beim UBA Deutschland recht herzlich bedanken. Die Erkenntnisse dieses Projekts waren wesentliche Grundlagen für die HBEFA-Aktualisierung. Ohne dieses Projekts wäre die HBEFA-Aktualisierung in diesem Umfang nicht möglich gewesen.

Des Weiteren möchten sich die Projektnehmer auch bei dem Kraftfahrt-Bundesamt Deutschland, der Deutschen Umwelthilfe e. V. und bei den Institutionen in ganz Europa bedanken, die wichtige Daten für dieses Projekt zur Verfügung gestellt haben.

Kurzbeschreibung: Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA

Im Rahmen dieses Projekts wurden mehrere neue Methoden entwickelt, die für das Update des HBEFA 4.1 verwendet wurden. Mit den erarbeiteten Methoden ist es u.a. möglich, RDE-Messdaten mithilfe der entwickelten CO₂-Leistungsinterpolationsmethode zu verwenden. Durch Einbeziehung von RDE-Messungen konnte die Anzahl gemessener Kfz erhöht und insbesondere die Repräsentativität der gemessenen Fahrzustände entscheidend verbessert werden. Zusätzlich wurden im Rahmen dieses Projekts auch Methoden entwickelt, um Umrüstungen von Dieselfahrzeugen berücksichtigen zu können. Diese Methodenentwicklung inkludiert auch die Berücksichtigung von Umgebungstemperatureinflüssen auf das NO_x-Emissionsniveau sowie Kaltstartzusatzemissionen. Im HBEFA 4.1 wurde die Umrüstung aufgrund des EA 189-Pflichtrückrufs abgebildet.

Durch Messungen, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, sowie auch von weiteren Institutionen, wie z.B. DUH oder KBA, zur Verfügung gestellt wurden, konnten repräsentative Emissionsfaktoren für das HBEFA 4.1 unter Anwendung der erarbeiteten Methoden erstellt werden.

Abstract: Field monitoring of motorised vehicles and updating of HBEFA

In this project several new methods were developed which were used for the update of the HBEFA 4.1. For example, the developed methods allow considering RDE measurement data by using the developed CO₂ interpolation method. By including RDE measurements, the number of measured vehicles was increased and the representativeness of measured driving conditions was decisively improved. In addition, methods were developed to consider retrofitting for diesel vehicles in the HBEFA 4.1. This method development also includes the consideration of ambient temperature influences on NO_x emissions as well as additional cold start emissions. In HBEFA 4.1 the EA 189 mandatory recall was considered.

Measurements carried out as part of this project and also provided by other institutions, such as DUH or KBA, made it possible to establish representative emission factors for HBEFA 4.1 using the newly developed methods.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung	18
Summary	27
1 Aufgabenstellung	36
2 Entwicklung von Methoden für die Generierung von Emissionsfaktoren für das HBEFA 4.1	38
2.1 Methoden zur Kennfelderstellung, um Rollenprüfstand- sowie RDE-Messdaten zu integrieren	38
2.1.1 Vergleich Messung und Simulation an ausgewählten PKW	38
2.1.1.1 Exemplarische Mess- und Simulationsdaten Fahrzeug 1	40
2.1.1.2 Exemplarische Mess- und Simulationsdaten Fahrzeug 2	41
2.1.2 Vergleich Messung und Simulation an ausgewählten SNF	42
2.2 Optionen zur Auffüllung der Emissionskennfelder	42
2.3 Optionen für die Kennfelderstellung unter Verwendung der CO ₂ -Interpolationsmethode und Optionen zur Simulation der Abgasnachbehandlung	44
2.3.1 End-of-Tailpipe Emissionskennfeld	45
2.3.2 NSK-Konvertierung mit Simulation der NSK-Regenerationsphasen	46
2.3.3 Option zur fahrzeugspezifischen Anpassung des generischen Motorkennfelds	47
2.3.4 Engine-Out Emissionskennfeld, erzeugt aus RDE-Messung am Auspuff mittels invertiertem Default SCR-Wirkungsgradkennfeld	48
2.3.5 Default-Engine-Out Kennfeld mit angepasstem SCR-Wirkungsgrad	49
2.3.6 Abhängigkeit SCR-Wirkungsgrad von Abgastemperatur mit/ohne zusätzlicher Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit	49
2.3.7 Verwendung der RDE- bzw. Rollenmessdaten mit/ohne variabler Zeitverschiebung	49
2.3.8 Simulation mit detaillierter Berücksichtigung des SCR-Abgasnachbehandlungssystems	50
3 Anforderungskatalog für Kfz-Emissionsmessungen für HBEFA	52
4 PKW-Messungen	53
4.1 Messtechnik und Auswertetool	53
4.1.1 Rollenprüfstand für PKW	53
4.1.2 Portable Emission Measurement System für PKW	54
4.1.3 Auswertetool	54

4.2	Vermessene PKW	54
4.2.1	Ausgewählte Fahrzeuge	54
4.2.2	Messprogramm	56
4.2.2.1	RDE-Messungen	58
4.2.2.2	Rollenprüfstandzyklen	59
4.2.3	Auswertung der Messdaten	62
4.2.3.1	Emissionsgrenzwerte	62
4.2.3.2	Auswertung der RDE-Routen nach den allgemeinen Tripparametern	64
4.2.3.3	Emissionsniveauvergleich von Rollenzyklen sowie der RDE-Fahrten	64
4.2.3.4	Überprüfung der Detektion zur NEFZ-Erkennung von Fahrzeugen mit EA 189-Motor	68
5	LKW-Messungen	70
5.1	Messungen Fahrzeug 1	70
5.1.1	Fahrzeugdaten	70
5.1.2	Rollenmessungen Fahrzeug 1	70
5.1.2.1	Ermittlung der Fahrwiderstände für die LKW-Rollenmessungen	71
5.1.2.2	Ergebnisse Rollenmessungen Fahrzeug 1	72
5.1.3	RDE-Messungen Fahrzeug 1	74
5.1.3.1	Messplan RDE Fahrzeug 1	74
5.1.3.2	Ergebnisse RDE-Messungen Fahrzeug 1	75
5.1.3.3	Vergleich zwischen RDE Messungen und Rollenmessungen	77
5.2	Messungen Fahrzeug 2	78
5.2.1	Fahrzeugdaten	78
5.2.2	Rollenmessungen Fahrzeug 2	79
5.2.2.1	Ermittlung der Fahrwiderstände für die LKW-Rollenmessungen	79
5.2.2.2	Ergebnisse Rollenmessungen Fahrzeug 2	80
5.2.3	RDE-Messungen Fahrzeug 2	81
5.2.3.1	Messplan RDE Fahrzeug 2	81
5.2.3.2	Ergebnisse RDE-Messungen Fahrzeug 2	81
5.2.3.3	Vergleich zwischen RDE-Messungen und Rollenmessungen	83
5.3	Vergleich Emissionsfaktoren SNF HBEFA 3.3 und 4.1	84
6	Verwendete PKW-Datenbasis für die Emissionsfaktorengenerierung sowie Erarbeitung von Zusatzfunktionen für HBEFA 4.1	86
6.1	Neue PKW-Messungen für HBEFA	86
6.2	Erzeugung von Alterungsfunktionen für SNF für HBEFA	89

6.3	NO _x -Umgebungstemperaturkorrektur für PKW und LNF für HBEFA	91
6.4	Abbildung von Umrüstungen von PKW im HBEFA	94
6.4.1	Anforderungen an Messdaten zur Abbildung der Effekte von Umrüstungen	94
6.4.2	Überprüfung der vorliegenden Messdaten	95
6.4.2.1	Euro 5 EA 189-Pflichtrückruf des VW-Konzerns	95
6.4.2.2	Euro 5 freiwillige Rückrufe	97
6.4.2.3	Euro 6b freiwillige/verpflichtende Rückrufe	97
6.4.3	Erarbeitung und Anwendung einer Methode zur Abbildung von Umrüstungen	99
6.4.3.1	Methode zur Darstellung der Basisemissionsfaktoren vor und nach Umrüstung	99
6.4.3.2	Methode zur Darstellung von Kaltstartzusatzemissionen	104
6.4.3.3	Methode zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO _x - Emissionen	105
6.4.4	Implementierung der Emissionsfaktoren ins HBEFA und TREMOD	107
7	Ausblick	110
8	Quellenverzeichnis	112
A	Anhang zu den vermessenen Fahrzeugen	113
A.1	Fahrzeug VW Sharan 2.0 TDI	113
A.2	Fahrzeug Peugeot 508 SW	114
A.3	Fahrzeug Skoda Superb 2.0 TDI	116
A.4	Fahrzeug Audi A4 Avant 2.0 TDI	118
A.5	Fahrzeug VW Golf 1.6 TDI	119
A.6	VW Golf Variant 1.6 TDI	121
A.7	VW Passat Kombi 2.0 TDI	123
A.8	Fahrzeug Renault Master 2.3 dCi	124
A.9	Fahrzeug Mini Cooper	125
B	Anhang zu den für die Emissionsfaktoren verwendeten PKW	127
B.1	Spezifikationen von PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	127

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	NO _x -Alterungsfunktion für Euro VI SNF	90
Abbildung 2:	Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei Option 1.....	100
Abbildung 3:	Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei Option 2.....	101
Abbildung 4:	Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei Option 3.....	102
Abbildung 5:	Grafische Darstellung des Differenzenkennfelds für Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor.....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Die zur Methodenauswahl verwendeten PKW	39
Tabelle 2:	Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 1 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 1	40
Tabelle 3:	Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 1 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 2	41
Tabelle 4:	Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 2 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 1	41
Tabelle 5:	Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 2 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 2	41
Tabelle 6:	Abweichung Simulation zu Messung für die Gesamtrunde bestehend aus Basis-RDE-Messfahrt mit den Erweiterungsfahrten bei unterschiedlich gefüllten Emissionskennfeldern für Fahrzeug 2	43
Tabelle 7:	Abweichung Simulation zu Messung für die kurzen Teilstrecken mit Voll- und 2/3 Lastbeschleunigungen bei unterschiedlich gefüllten Emissionskennfeldern für Fahrzeug 2	43
Tabelle 8:	Abweichung Simulation zu Messung von CO ₂ , NO _x und CO für RDE-Fahrten, simuliert mit End-of-Tailpipe Emissionskennfeld.....	45
Tabelle 9:	Abweichung Simulation zu Messung für eine Route mit und ohne NSK-Simulation.....	47
Tabelle 10:	Abweichungen CO ₂ und NO _x im CADC.....	48
Tabelle 11:	Anforderungskatalog für Kfz-Emissionsmessungen (Matzer, 2016b).....	52
Tabelle 12:	Leistungsdaten des PKW-Rollenprüfstands.....	53
Tabelle 13:	Fahrzeugdaten, Teil 1	55
Tabelle 14:	Fahrzeugdaten, Teil 2	55
Tabelle 15:	Fahrzeugdaten, Teil 3	56
Tabelle 16:	Durchgeführtes Messprogramm	57

Tabelle 17:	Emissionsgrenzwerte für vermessene Diesel-PKW sowie für das vermessene Diesel-LNF im Typprüfzyklus NEFZ	62
Tabelle 18:	Emissionsgrenzwerte für den vermessenen Otto-PKW im Typprüfzyklus NEFZ	63
Tabelle 19:	Konformitätsfaktoren für RDE-Messungen von PKW und LNF	63
Tabelle 20:	NEFZ-Abweichung zwischen Zulassungsschein und Messwert vor bzw. nach Umrüstung des VW Golf Variant 1.6 TDI.....	68
Tabelle 21:	NEFZ-Abweichung zwischen Zulassungsschein und Messwert vor bzw. nach Umrüstung des VW Passat 2.0l	69
Tabelle 22:	Fahrzeugdaten Fahrzeug 1	70
Tabelle 23:	Gemessene Zyklen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 1	71
Tabelle 24:	Rolleneinstellungen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 1	72
Tabelle 25:	limitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1	73
Tabelle 26:	nichtlimitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1	74
Tabelle 27:	RDE-Ergebnisse LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1	74
Tabelle 28:	Messprogramm RDE Fahrzeug 1	75
Tabelle 29:	Ergebnisse Auswertung Emroad Fahrzeug 1	75
Tabelle 30:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, gesamte RDE-Fahrt.....	76
Tabelle 31:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, Anteil Stadt.....	76
Tabelle 32:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, Anteil Überland	76
Tabelle 33:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, Anteil Autobahn	77
Tabelle 34:	Vergleich RDE Messung und RDE Rollenzyklen, Fahrzeug 1	78
Tabelle 35:	Fahrzeugdaten Fahrzeug 2	78
Tabelle 36:	Gemessene Zyklen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 2.....	79
Tabelle 37:	Rolleneinstellungen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 2	79
Tabelle 38:	limitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 2	80
Tabelle 39:	nichtlimitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 2	80
Tabelle 40:	RDE-Ergebnisse LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 2	81
Tabelle 41:	Messprogramm RDE Fahrzeug 2	81
Tabelle 42:	Ergebnisse Auswertung Emroad Fahrzeug 2	82
Tabelle 43:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, gesamte RDE Fahrt.....	82
Tabelle 44:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, Anteil Stadt.....	82
Tabelle 45:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, Anteil Überland	83
Tabelle 46:	Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, Anteil Autobahn	83
Tabelle 47:	Vergleich RDE Messung und RDE Rollenzyklen, Fahrzeug 2	84
Tabelle 48:	Vergleich HBEFA 3.3 und 4.1, schwere Nutzfahrzeuge, Verkehrssituation für den deutschen Durchschnitt, Flottenmix 2018.....	85

Tabelle 49:	Verwendete Messdaten von Euro 6a,b Diesel-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW).....	87
Tabelle 50:	Verwendete Messdaten von Euro 6d-Temp Diesel-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW).....	88
Tabelle 51:	Verwendete Messdaten von Euro 6a,b Otto-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW).....	88
Tabelle 52:	Verwendete Messdaten von Euro 6c Otto-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)	88
Tabelle 53:	Verwendete Messdaten von Euro 6d-Temp Otto-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW).....	89
Tabelle 54:	Verwendete Messdaten von Euro 5 CNG-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)	89
Tabelle 55:	Verwendete Messdaten von Euro 6a,b CNG-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW).....	89
Tabelle 56:	Korrekturfaktoren für NO _x in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für PKW	93
Tabelle 57:	Korrekturfaktoren für NO _x in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für LNF	93
Tabelle 58:	Verfügbare Euro 5 Fahrzeugen mit EA 189-Pflichtrückruf	96
Tabelle 59:	Nutzbare Messdaten zu Euro 5 Fahrzeugen mit EA 189- Pflichtrückruf	96
Tabelle 60:	Verfügbare Euro 5 PKW mit freiwilligen Rückrufen	97
Tabelle 61:	Für die Basisfaktoren nutzbare Euro 5 PKW mit freiwilligen Rückrufen	97
Tabelle 62:	Verfügbare Euro 6b PKW mit Umrüstung	98
Tabelle 63:	Für die Basisfaktoren nutzbare Euro 6b PKW mit Umrüstung	99
Tabelle 64:	Gewichtungsfaktoren der Einzelkennfelder für Euro 5 Fahrzeuge mit EA 189 Pflichtrückruf (für Deutschland).....	103
Tabelle 65:	Gewichtungsfaktoren für NO _x - Umgebungstemperaturkorrekturfunktion für Euro 5 Fahrzeuge mit Pflichtrückruf EA 189 für Deutschland	107
Tabelle 66:	Korrekturfaktoren für NO _x in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189- Motor.....	107
Tabelle 67:	Umrüstungszahlen für Euro 5 Fahrzeuge mit EA 189- Pflichtrückruf in Deutschland	109
Tabelle 68:	Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Sharan 2.0 TDI	113
Tabelle 69:	Prüfstandeinstellungen für VW Sharan 2.0 TDI.....	113
Tabelle 70:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Sharan 2.0 TDI	113
Tabelle 71:	Allgemeine RDE-Tripparameter der VW Sharan 2.0 TDI Messungen	114
Tabelle 72:	Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Peugeot 508 SW.....	114
Tabelle 73:	Prüfstandeinstellungen für Peugeot 508 SW	115

Tabelle 74:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für Peugeot 508 SW.....	115
Tabelle 75:	Allgemeine RDE-Tripparameter der Peugeot 508 SW Messungen	116
Tabelle 76:	Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Skoda Superb 2.0 TDI.....	116
Tabelle 77:	Prüfstandeinstellungen für Skoda Superb 2.0 TDI.....	116
Tabelle 78:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für Skoda Superb 2.0 TDI.....	116
Tabelle 79:	Allgemeine RDE-Tripparameter der Skoda Superb 2.0 TDI Messungen	117
Tabelle 80:	Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Audi A4 Avant 2.0 TDI.....	118
Tabelle 81:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für Audi A4 Avant 2.0 TDI.....	118
Tabelle 82:	Allgemeine RDE-Tripparameter der Audi A4 Avant 2.0 TDI Messungen	119
Tabelle 83:	Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Golf 1.6 TDI.....	119
Tabelle 84:	Prüfstandeinstellungen für VW Golf 1.6 TDI	120
Tabelle 85:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Golf 1.6 TDI.....	120
Tabelle 86:	Allgemeine RDE-Tripparameter der VW Golf 1.6 TDI Messungen	121
Tabelle 87:	Euro 5b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Golf Variant 1.6 TDI vor Umrüstung	121
Tabelle 88:	Prüfstandeinstellungen für VW Golf Variant 1.6 TDI	122
Tabelle 89:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Golf Variant 1.6 TDI vor Umrüstung	122
Tabelle 90:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Golf Variant 1.6 TDI nach Umrüstung.....	122
Tabelle 91:	Allgemeine RDE-Tripparameter der VW Golf Variant 1.6 TDI Messungen	123
Tabelle 92:	Euro 5b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Passat Kombi 2.0 TDI vor Umrüstung	123
Tabelle 93:	Prüfstandeinstellungen für VW Passat Kombi 2.0 TDI	123
Tabelle 94:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Passat Kombi 2.0 TDI vor Umrüstung	123
Tabelle 95:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Passat Kombi 2.0 TDI nach Umrüstung.....	124
Tabelle 96:	Allgemeine RDE-Tripparameter der VW Passat Kombi 2.0 TDI Messungen	124
Tabelle 97:	Euro 5b Grenzwerte und Zulassungswerte Renault Master 2.3 dCi.....	124
Tabelle 98:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für Renault Master 2.3 dCi.....	125

Tabelle 99:	Allgemeine RDE-Tripparameter der Renault Master 2.3 dCi Messungen	125
Tabelle 100:	Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Mini Cooper	125
Tabelle 101:	Prüfstandeinstellungen für Mini Cooper	126
Tabelle 102:	Messwerte der limitierten Schadstoffe für Mini Cooper	126
Tabelle 103:	Spezifikationen von Euro 6a,b Diesel-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	127
Tabelle 104:	Spezifikationen von Euro 6d-Temp Diesel-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	131
Tabelle 105:	Spezifikationen von Euro 6a,b Otto-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	131
Tabelle 106:	Spezifikationen von Euro 6c Otto-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	133
Tabelle 107:	Spezifikationen von Euro 6d-Temp Otto-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	133
Tabelle 108:	Spezifikationen von Euro 5 CNG-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	134
Tabelle 109:	Spezifikationen von Euro 6a,b CNG-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden	134

Abkürzungsverzeichnis

AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
Abw.	Abweichung
ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V.
Agg.	Aggressiv
AGR	Abgasrückführung
AMT	Automatic Manual Transmission
BEV	Battery Electric Vehicle
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CF	Conformity Factor
CO	Kohlenmonoxid
CO₂	Kohlendioxid
CPC	Condensation Particle Counter
CUC	Clean Up Catalyst
CVS	Constant Volume Sampling
DB	Datenbank
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	Diesel oxidation catalyst
DPF	Dieselpartikelfilter
DSG	Doppelkupplungsgetriebe
DUH	Deutsche Umwelthilfe e.V.
EFM	Exhaust Flow Meter
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ERMES	European Research on Mobile Emission Sources
Fzg.(e)	Fahrzeug(e)
FVT	Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH
GPS	Global Positioning System
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Kohlenwasserstoffe
ID	Identifikator
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
ISC	In Service Conformity
IUF	Inrets Urbain Fluide Court
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
JRC	Joint Research Centre
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt

KF	Kennfeld
Kfz	Kraftfahrzeug
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
max	maximal
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
MIL	Malfunction Indication Lamp
NH₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO₂	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickstoffoxide
NSC	Nitrogen oxide Storage Catalyst
NSK	Stickstoffoxidspeicherkatalysator
OBD	On Board Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer
PC	Passenger Car
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger car and Heavy-duty Emission Model
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
RWC	Real World Cycle
SCR	Selective Catalytic Reduction
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SUV	Sport Utility Vehicle
TDI	Turbocharged Diesel Injection
TNO	Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung
TREMOT	Transport Emission Model
TÜV NORD	Technischer Überwachungsverein Nord
TU Graz	Technische Universität Graz
UBA	Umweltbundesamt
U_{temp}	Umgebungstemperatur
v	Geschwindigkeit
VECTO	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool
Vorkond.	Vorkonditionierung
VW	Volkswagen

WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WLTC	Worldwide harmonized Light duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light duty Test Procedure

Zusammenfassung

Bisherige Verbrauchs- und Emissionsfaktoren des HBEFA basierten für schwere Nutzfahrzeuge vor allem auf Messungen am Motorprüfstand sowie am LKW-Rollenprüfstand. Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge wurden bislang nur Messdaten vom PKW-Rollenprüfstand verwendet. Damit wurden Motor-Emissionskennfelder bedatet, die eine wesentliche Grundlage für die Simulation der Emissionsfaktoren sind. Die Qualität der Emissionskennfelder ist somit entscheidend für die Qualität der Emissionsfaktoren. Für repräsentative Emissionsfaktoren sollen daher eine große Anzahl an Kfz in repräsentativen Verkehrssituationen gemessen werden. Durch Einbeziehung von RDE-Messungen in die Ausarbeitung des HBEFA 4.1 Updates konnte die Anzahl gemessener Kfz erhöht und insbesondere die Repräsentativität der gemessenen Fahrzustände entscheidend verbessert werden. Allerdings ist bei RDE-Messungen das Problem, dass die für die Kennfelderstellung notwendige Motorleistung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen im Allgemeinen nicht oder nur zu ungenau bekannt ist. Hingegen stellt die Messung von Emissionen und Motordrehzahl heute bei RDE-Messungen eine Standardanwendung dar. Deshalb wurde für das HBEFA 4.1 Update eine Methode entwickelt, mit der aus gemessenem CO₂-Massenstrom und Motordrehzahl die aktuelle Motorleistung bestimmt werden kann. Im Projekt wurden Untersuchungen und Validierungen zu der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode durchgeführt, damit RDE-Messungen ohne bekannter Motorleistung im HBEFA integriert werden können. Damit einhergehend ergaben sich auch die Aufgabenstellungen dieses Projekts mit:

- ▶ Absicherung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode zur Implementierung der RDE-Messdaten ins HBEFA
- ▶ Implementierung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode in das Simulationsmodell PHEM, um die verfügbaren RDE-Tests automatisiert, schnell und kostengünstig zu verwenden

Zugehörig zu diesen zwei Punkten gehörte zur Aufgabenstellung auch die

- ▶ Erstellung eines Anforderungskatalogs an RDE-Messungen zur Verwendung in PHEM und im HBEFA sowie die
- ▶ Vermessung von fünf Diesel-PKW, einem Otto-PKW, einem leichten Nutzfahrzeug sowie zwei schwerer Nutzfahrzeuge in Real-World-Zyklen und am Rollenprüfstand.

Aufgrund des im Laufe des Projekts vorgefallenen VW-Dieselskandal wurde die Aufgabenstellung während des Projekts um folgende Punkte erweitert:

- ▶ Erarbeitung einer Methode zur Integration von Umrüstungen an Dieselfahrzeugen inklusive Messung von zwei betroffenen Euro 5-Dieselfahrzeugen
- ▶ Anwendung der Methode an verfügbaren Emissionsmessdaten von DUH, KBA sowie externe Messungen im Auftrag des UBA Deutschland. Als Daten waren jeweils Messungen von Dieselfahrzeugen vor und nach Umrüstung Voraussetzung für eine Ableitung von Emissionsfaktoren.
- ▶ Messdaten zu Umrüstungen, die im Rahmen dieses Projekts verfügbar waren, wurden in die ERMES-Datenbank integriert. Sofern die Anforderungen für eine Implementierung ins HBEFA erfüllt waren, wurden damit entsprechende Emissionsfaktoren mit dem

Simulationsmodell PHEM erzeugt. Den Anforderungskatalog zur Messdatenauswahl erfüllten insgesamt Messdaten von acht PKW mit EA 189-Motor des VW-Konzerns. Damit konnte im HBEFA der EA 189-Pflichtrückruf abgebildet werden.

Weiters ergaben sich im Laufe des Projektes neue Erkenntnisse zu relevanten Einflussfaktoren auf das Emissionsniveau, so dass noch folgende Effekte aus Messdaten bestimmt wurden:

- ▶ NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktionen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge
- ▶ Erzeugung von Alterungsfunktionen für schwere Nutzfahrzeuge

Die Ergebnisse zu diesen Aufgabenstellungen sollen nun im Rahmen dieser Zusammenfassung kurz erläutert werden.

Mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode können Messungen von RDE-Fahrten nun auch für das HBEFA verwendet werden, wenn kein entsprechendes Lastsignal über OBD verfügbar ist. Dabei wird für jeden Zeitschritt aus einem generischen CO₂-Kennfeld die Motorleistung mithilfe der gemessenen Motordrehzahl und dem gemessenen CO₂-Massenstrom interpoliert. Mit bekannter Motorleistung und Motordrehzahl können alle weiteren Emissionskomponenten in ein Emissionskennfeld eingerastert werden. Die Validierung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode lieferte das Ergebnis, dass diese für die Berechnung der Leistung und diese wiederum zur Kennfelderstellung herangezogen werden kann. Die Validierung erfolgte durch Vergleich von interpolierter Leistung mit gemessener Leistung vom Rollenprüfstand bzw. mit OBD-Daten. Die Abweichungen liegen bei den untersuchten Fahrzeugen bei Verwendung von generischen CO₂-Kennfeldern im Durchschnitt zwischen 5 % und 20 %. Werden die generischen CO₂-Kennfelder fahrzeugspezifisch kalibriert, so liegen die Abweichungen unter 5 %.

Mit der Verwendung von RDE-Fahrten verbessert sich die Kennfeldabdeckung erheblich. Dennoch wurde auch noch untersucht, ob zusätzlich spezielle Fahrmanöver benötigt werden, um das Emissionskennfeld weiter auffüllen zu können. Das Ergebnis der Analyse zeigte, dass solche zusätzlichen Fahrmanöver zur Auffüllung der Emissionskennfelder geringe Verbesserungen bringen, und diese auch nur bei der Simulation extremer Fahrmanöver zu finden sind. Für HBEFA ist das Standard-Testprogramm mit RDE-richtlinienkonformen Testfahrten nach derzeitigen Erkenntnissen ausreichend. Erweiterungen des Testprogramms mit Volllastbeschleunigungen sind daher optional. Falls Volllastbeschleunigungen durchgeführt werden, können sie natürlich für HBEFA herangezogen werden.

Das Verhalten von Abgasnachbehandlungssystemen kann großen Einfluss auf das Emissionsverhalten von Fahrzeugen haben. Im Rahmen dieses Projekts wurden Optionen zur Simulation von SCR-Abgasnachbehandlungssystemen untersucht. In Kombination wurden auch Optionen für die Emissionskennfelderstellung unter Verwendung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode im Detail betrachtet. Dabei wurde die geeignetste Methode für die Erstellung der Emissionsfaktoren für HBEFA 4.1 aus folgenden Optionen herangezogen:

- ▶ Einfaches Emissionskennfeld für Emissionsniveau am Auspuff: Abweichungen sind für übliche Fahrzyklen ähnlich wie die Simulation mit Engine-Out Kennfeldern und Simulation der Effizienz der Abgasnachbehandlung. Aufgrund der vorliegenden Messdaten (Fahrzeuge werden meist nur End-of-Tailpipe gemessen) sollen die herkömmlichen Fahrzyklen nach wie vor mit den End-of-Tailpipe Kennfeldern berechnet werden. Nur spezielle

Fahrsituationen wie z.B. Stauzyklen sollen mit detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung simuliert werden.

- ▶ Engine-Out Kennfeld, erzeugt aus RDE-Messungen am Auspuff mittels invertiertem generischen SCR-Wirkungsgradkennfeld: Die Untersuchungen zeigten, dass die Erzeugung eines Engine-Out Kennfeldes mit invertiertem generischen SCR-Wirkungsgradkennfeld riskant ist. Hohe NO_x-Konvertierungsraten des SCR können zu hohen Engine-Out NO_x führen, da das Emissionsniveau am Auspuff mittels Division durch eine sehr kleine Zahl in Engine-Out Emissionen umgewandelt wird. Das Engine-Out Kennfeld sollte daher aus Messdaten vor SCR bedatet werden.
- ▶ Generisches Engine-Out-Kennfeld mit angepasstem SCR-Wirkungsgrad: Die Verwendung von generischen Engine-Out-Kennfeldern mit der Berechnung des SCR-Wirkungsgrades hat sich als stabilere Methode als die Verwendung eines generischen SCR-Wirkungsgrades erwiesen. Für die Simulation von kritischen Fahrsituationen mit detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung für Euro 6 Diesel-Fahrzeuge soll daher ein generisches Engine-Out-Kennfeld vorgegeben werden.
- ▶ Abhängigkeit des SCR-Wirkungsgrades von Abgastemperatur mit/ohne zusätzlicher Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit: Die Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit ist technisch abgesichert, weshalb ein Ansatz ohne Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit aus heutiger Sicht nicht sinnvoll erscheint.
- ▶ Abhängigkeit NSK-Konvertierung von NO_x-Speicherstand und Simulation der NSK-Regenerationsphasen: Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Fahrzeug mit unbekannten Regenerationsstrategien des NSK in der Simulation nicht sicher repräsentativ abgebildet werden kann und sich mit generischen Strategien keine Verbesserung der Modellgenauigkeit gegenüber der Verwendung von End-of-Tailpipe Emissionskennfeldern ergibt. Eine detaillierte Simulation des NSK wurde daher für das HBEFA nicht verfolgt.
- ▶ Verwendung der RDE- bzw. Rollenmessdaten mit/ohne variabler Zeitverschiebung: Der Einfluss der Zeitverschiebung ist umso größer, je größer das Volumen zwischen Motorauslass und Entnahmestelle der Abgasanalyse ist. Daher wurde eine variable Zeitverschiebung entwickelt, die für die Verschiebung der Massenemissionen von der Entnahmestelle bis zum Motorauslass diese unterschiedlichen Gaslaufzeiten korrigiert. Eine genaue zeitliche Zuordnung der Emissionen zu Motordrehzahl und Motorleistung ist für die Erzeugung repräsentativer Motorkennfelder aus dynamischen Real-World-Tests eine wesentliche Grundlage.
- ▶ Fahrzeugspezifische Anpassung des generischen Kennfelds für die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode: Das für die CO₂-Leistungsinterpolation notwendige CO₂-Kennfeld kann anhand PKW-Rollenprüfstandmessungen kalibriert werden. Dazu wird das generische CO₂-Kennfeld verwendet, um den Rollenzyklus mit den entsprechenden Rollenprüfstandparametern zu simulieren. Durch Vergleich der simulierten CO₂-Daten mit den gemessenen Daten kann eine Differenzfunktion in Abhängigkeit von Motorleistung und

Motordrehzahl gebildet werden, welche wiederum auf das generische CO₂-Kennfeld addiert bzw. subtrahiert werden kann. Damit ergibt sich das fahrzeugspezifische CO₂-Kennfeld.

Für die Fahrzeugmessungen wurde ein sogenannter Anforderungskatalog erstellt, der die aus den bereits durchgeführten Messungen und Methodenuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse in einem „Best Practice“ Katalog zusammenfasst. Der „Best Practice“ Katalog definiert Mindestanforderungen sowie Zusatzwünsche bei Rollenprüfstand- und RDE-Tests, wenn die Daten für PHEM und HBEFA genutzt werden sollen. Zusätzlich wurden zwei Excel-Dateien angelegt. Eine listet die in ERMES Labors gemessenen sowie die für Messungen geplanten Kfz auf, um die Fahrzeugauswahl zu koordinieren. Die andere zeigt das Normformat, mit denen Messergebnisse an die ERMES-Datenbank sowie an PHEM übergeben werden sollen.

Folgende Fahrzeuge wurden im Rahmen dieses Projekts auf der Straße sowie am Rollenprüfstand vermessen. Die Messdaten wurden für die Methodenentwicklungen sowie für das HBEFA-Update herangezogen:

- a) VW Sharan 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- b) Peugeot 508 SW, Diesel, Euro 6b
- c) Skoda Superb 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- d) Audi A4 Avant 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- e) VW Golf 1.6 TDI, Diesel, Euro 6b
- f) VW Golf Variant 1.6 TDI, Diesel, Euro 5b (vom sogenannten Dieselskandal betroffen, Rückrufaktion EA 189)
- g) VW Passat Kombi 2.0 TDI, Diesel, Euro 5b (vom sogenannten Dieselskandal betroffen, Rückrufaktion EA 189)
- h) Renault Master, Diesel, Euro 5b (leichtes Nutzfahrzeug)
- i) Mini Cooper, Otto, Euro 6b
- j) Renault MDA2C, N2, Diesel, Euro VI
- k) DAF LF 250, N3, Diesel, Euro VI

Bei den Fahrzeugen a) bis e) sowie j) und k) wurden auch die NO_x-Engine-Out Emissionen sowie die Abgastemperatur vor SCR bzw. NO_x-Speicherkatalysator gemessen. Diese Daten wurden benötigt, um NO_x-Rohemissionskennfelder sowie Abgastemperaturkennfelder zu erarbeiten, um Fahrzeuge mit SCR in speziellen Fahrsituationen, wie z.B. Niederlastzyklen, mit detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung zu simulieren und so auch die verschiedenen Simulationsvarianten bewerten zu können.

Bei den **PKW-Messungen** sowie der Messung des leichten Nutzfahrzeugs lagen CO₂-Emissionen in der Größenordnung von 100 g/km (PKW im NEFZ) bis 290 g/km (leichtes Nutzfahrzeug auf Straße) und NO_x-Emissionen in der Größenordnung von 30 mg/km (PKW im NEFZ) bis 2700 mg/km (leichtes Nutzfahrzeug auf Straße) vor. Bei den Messungen auf der Straße wurde auch der Fahrstil sowie die Beladungen variiert, um sogenannte „Best Case“- und „Worst Case“-Fahrten für das Abgasnachbehandlungssystem durchzuführen.

Von den acht vermessenen PKW waren zwei vom sogenannten VW-Dieselskandal betroffen und gehörten zur Rückrufaktion EA 189 auf Grund von Manipulationsnachweisen des KBA. Die PKW des Motortyps EA 189 müssen demnach vom Hersteller mit einem Softwareupdate versehen werden, welches Einfluss auf Leistung des Abgasnachbehandlungssystems hat. Dabei galt es zu

untersuchen, welchen Effekt die Umrüstung auf Verbrauch und Emissionen haben. Um das herauszufinden, wurden die Testfahrzeuge vor und nach der Umrüstung vermessen. Das Messprogramm war dabei vor und nach der Umrüstung identisch und setzte sich jeweils aus zwei RDE-Fahrten auf der Straße sowie Rollenzyklen am PKW-Rollenprüfstand zusammen.

Durch das Nachfahren einer gekürzten RDE-Fahrt am Rollenprüfstand konnte untersucht werden, ob generell eine Prüfstanderkennung der betroffenen Fahrzeuge vorlag. Im Messprogramm war auch die Messung des Typprüfzyklus NEFZ enthalten. Zusätzlich wurde auch ein NEFZ+ vermessen, der sich nur geringfügig vom NEFZ unterschied, indem das Fahrzeug vor dem eigentlichen Zyklusstart schon gestartet und kurz beschleunigt wurde. Damit konnte untersucht werden, ob eine Zykluserkennung vorlag. Durch die Auswertung der Messdaten liegen folgende Schlussfolgerungen vor:

- Vor der Umrüstung konnte bei beide Fahrzeuge kein Unterschied im Emissionsniveau zwischen RDE-Fahrten am Rollenprüfstand und RDE-Messung auf der Straße festgestellt werden. Vor Umrüstung wurden signifikant höhere NO_x -Emissionen bei Messungen im NEFZ+ im Gegensatz zu Messungen im NEFZ festgestellt. Nach der Softwareumrüstung konnte der Effekt nicht mehr beobachtet werden.
- Die durchschnittliche Minderung auf Real-World- NO_x -Emissionen durch die Umrüstung hat unter den beiden gemessenen PKW eine große Streuung und reicht von einer minimalen Verringerung, (VW Passat Kombi 2.0 TDI) bis zu einer größeren Reduktion von 33 % (VW Golf Variant 1.6 TDI).

Bei den **SNF-Messungen** am Rollenprüfstand und im realen Straßenverkehr zeigten beide Fahrzeuge ein niederes Emissionsniveau bei den reglementierten Schadstoffkomponenten in den Prüfzyklen. Nur bei langanhaltenden Niederlastzyklen erhöhten sich die NO_x -Emissionen durch die ungünstigen Bedingungen für den SCR-Katalysator merklich. Auffällig waren zudem noch die erhöhten N_2O -Emissionen bei einem der beiden Fahrzeuge, die durch ihr hohes Treibhausgaspotential nicht zu vernachlässigen sind.

Zum Vergleich zwischen den Rollenprüfstandmessungen und den Straßenmessungen wurde ein verkürzter RDE Zyklus auf dem Rollenprüfstand nachgefahren und die Ergebnisse gegenübergestellt. Ein Vergleich ergab keine Auffälligkeiten, die auf unterschiedliche Betriebsstrategien hindeuten würden.

Anhand von Messungen von Fahrzeugen mit hoher Laufleistung (mehr als 500 000 km) wurden Auswirkungen der Alterung auf die Emissionen untersucht. Dafür wurden Messdaten von fünf Fahrzeugen mit mehr als 500 000 km Laufleistung herangezogen, die im Zuge des Projektes „91180: Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen – Los 1“ für UBA Deutschland vermessen wurden. Dabei ergab sich keine Veränderung des Emissionsniveaus über der Laufleistung für das untersuchte Euro V Fahrzeug. Bei den vier vermessenen Euro VI Fahrzeugen wurden mit steigendem Tachostand erhöhte NO_x -Emissionen festgestellt. Auf Basis dieser Daten wurde eine laufleistungsabhängige lineare Alterungsfunktion erstellt, die wie folgt erklärt werden kann:

- Der Hauptgrund für die Erhöhung der NO_x -Emissionen könnte der DOC sein. Wenn dieser infolge chemischer und thermischer Alterung eine sinkende Effizienz hat, wird beim SCR nicht das ideale Verhältnis zwischen NO und NO_2 erreicht und somit die Effektivität des SCR reduziert. Weitere Gründe könnten noch die Alterung von NO_x -Sensoren oder die chemische und mechanische Alterung des SCR-Katalysators selbst sein.

- Die laufleistungsbedingte Emissionserhöhung wird sich erwartungsgemäß bis ca. 900 000 km fortsetzen. Danach sollte das Emissionsniveau im Flottenmittel auf einem etwa konstanten Level bleiben. Der Grund dafür ist das OBD-Limit von 1,5 g/kWh NO_x, bei dessen Überschreitung das Fahrzeug über die MIL in die Werkstatt beordert wird. Aus der Steigung der Alterungsfunktion wurde diese Laufleistung als Alterungsgrenze ermittelt.

Neben den von der TU Graz vermessenen Fahrzeugen gab es noch weitere durchgeführte **PKW-Messungen** von DUH, KBA, EMPA, TÜV Nord, ADAC, JRC, TNO, DEKRA sowie TU Dresden. Auch diese Messungen wurden, sofern vollständige Messdaten verfügbar waren, für das HBEFA-Update herangezogen. Damit konnte die Anzahl der für das HBEFA-Update herangezogenen Messungen erheblich gesteigert werden.

Im HBEFA sind die Basisemissionsfaktoren auf 20 °C Umgebungstemperatur bezogen. Messungen haben gezeigt, dass die NO_x-Emissionen von Diesel-PKW im Flottenmittel bei niedrigeren Umgebungstemperaturen ansteigen. Der Grund dafür ist, dass NO_x-Reduktionsstrategien einige Nachteile haben und daher offensichtlich bei einer Vielzahl von Fahrzeugmodellen außerhalb des Umgebungstemperaturfensters bei Typprüfungen (20 - 30 °C) reduziert bzw. deaktiviert wurden. Beispiele dafür sind:

- Senkung der Abgasrückführungsraten
- Reduzierung der AdBlue-Dosierung bei Fahrzeugen mit SCR
- Reduzierung der Regenerationen für NO_x-Speicherkatalysatoren

Aufgrund der vielfältigen betroffenen Technologien und der unterschiedlichen Strategien verschiedener Hersteller in denen NO_x-Reduktionsstrategien verringert werden, wäre eine repräsentative Korrekturfunktion auf Basis von Fahrzeugtests nur mittels Messung vieler PKW und daher mit hohem Messaufwand möglich. Für die Aktualisierung der NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur wurden daher Remote-Sensing-Daten von Schweiz, England und Schweden verwendet. So konnten für Euro 3 bis Euro 6a,b Diesel-PKW und leichte Diesel-Nutzfahrzeuge Korrekturfunktionen für HBEFA 4.1 hergeleitet werden. Allerdings erfolgte die NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur für Fahrzeuge mit Umrüstung auf Fahrzeugmessdaten vom PKW-Rollenprüfstand bzw. von RDE-Messungen, da betroffene Fahrzeuge nicht aus den Remote-Sensing-Daten separiert werden konnten.

Insgesamt lagen für Fahrzeuge vor und nach Umrüstung folgende Messdaten vor:

- Euro 5 Pflichtrückruf PKW des VW-Konzerns mit EA 189-Motor
- Euro 5 freiwillige Rückrufe
- Euro 6b freiwillige/verpflichtende Rückrufe

Damit die Messdaten der Fahrzeuge mit Umrüstung für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts herangezogen werden konnten, wurden sie zuerst nach der bei der Messung vorliegenden Umgebungstemperatur unterteilt. Messungen im Umgebungstemperaturbereich von 15 °C bis 30 °C wurden für die Ableitung der Emissionsfaktoren herangezogen. Messungen bei Umgebungstemperaturen unter 15 °C wurden herangezogen, um die Einflüsse der Umgebungstemperatur auf die NO_x-Emissionen zu untersuchen. Für die Untersuchungen zur Implementierung von Umrüstungen im HBEFA waren dafür neben den von der TU Graz

vermessen Fahrzeugen zusätzliche vermessene Fahrzeuge von KBA, DUH und TU Dresden verfügbar¹:

- ▶ Bei den Euro 5 Fahrzeugen mit EA 189-Pflichtrückruf lagen Messdaten von insgesamt elf Fahrzeugen vor, wovon die Messdaten von acht Fahrzeugen weiterverwendet werden konnten.
- ▶ Bei den freiwilligen Rückrufen für die Abgasnorm Euro 5 waren die Messdaten von acht Fahrzeugen bekannt, nach Durchsicht der Messergebnisse konnten die Messdaten von fünf Fahrzeugen weiter im Detail untersucht werden.
- ▶ Von den Euro 6 Fahrzeugen, bei denen freiwillige bzw. verpflichtende Rückrufe vorlagen, waren Messungen von elf Fahrzeugen verfügbar, nach Durchsicht konnten sieben Fahrzeuge weiterverwendet werden.

Die Erarbeitung einer Methode zur Abbildung von Umrüstungen wurde in folgende Punkte untergliedert:

- a) Methode zur Darstellung der Emissionsfaktoren vor und nach Umrüstung für 20 °C Umgebungstemperatur
- b) Methode zur Darstellung von Kaltstartzusatzemissionen
- c) Methode zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen

Die erarbeitete Methode zur Darstellung der Umrüstung war die Erstellung eines Differenzenkennfelds aus den Kennfeldern vor und nach Umrüstung. Damit können die Reduktionspotentiale als Funktion des Betriebspunktes korrekt wiedergegeben werden.

Für die Abschätzung der Kaltstartzusatzemissionen sollten idealerweise für jedes Kfz Tests in Real-World-Zyklen mit Kalt- und Warmstart verfügbar sein. Solche Daten lagen aber für die vor- und nach Umrüstung gemessenen Fahrzeuge nicht vor, so dass folgende Methoden zur Abschätzung der betriebswarmen Emissionen entwickelt wurden, um die Kaltstarttests nutzen zu können:

- ▶ Subtrahieren der simulierten Warmemissionen in der Kaltstartphase von den gemessenen Emissionen nach Kaltstart. Die Differenz ergibt die Zusatzemissionen in g/Start, die aufgrund des Kaltstarts vorliegen.
- ▶ Ermittlung der Kaltstartzusatzemissionen nur aus Messdaten. Die Methodik soll anhand der NO_x-Emissionen erläutert werden. Es erfolgt eine Berechnung der Mittelwerte der sekundlichen CO₂ und NO_x in der Dauer der Kaltstartphase sowie in einer Phase mit betriebswarmem Motor. Für beide Zeitintervalle wurden die Verhältnisse NO_x zu CO₂ bestimmt. Wird das Verhältnis NO_x zu CO₂ des warmen Betriebsbereiches mit dem CO₂ der Kaltstartphase multipliziert, so ergibt sich eine Näherung für NO_x mit betriebswarmem Motor für die Kaltstartphase. Werden diese „Quasi-Warmstart NO_x“ von den nach Kaltstart gemessenen NO_x subtrahiert, so ergeben sich die Kaltstartzusatzemissionen.

¹ Zur Verwendung im Simulationsmodell PHEM waren jeweils RDE-Tests zwischen 15 °C und 30 °C vor/nach Umrüstung mit sekundlicher Aufzeichnung von zumindest CO₂, Motordrehzahl und NO_x ohne Sondereffekte, wie DPF-Regeneration, nötig, um zumindest die Basisemissionskennfelder erstellen zu können.

Beide Optionen wurden auf die Messdaten der VW-Konzernfahrzeuge, die vom Pflichtrückruf EA 189 betroffen waren, angewandt. Die Kaltstartzusatzemissionen der Euro 5 Dieselfahrzeugflotte liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die berechneten Zusatzemissionen der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor und nach Umrüstung. Für die anderen Fahrzeuge mit Umrüstung lag nur eine beschränkte Anzahl an Messungen vor (Kaltstart nur in WLTC), weshalb hier keine repräsentativen Kaltstartzusatzemissionen berechnet werden konnten.

Die Messdaten der PKW vor und nach Umrüstung wurden auch hinsichtlich des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen untersucht. Wie bereits vorhin erwähnt, können die NO_x-Emissionen mit abnehmender Umgebungstemperatur ansteigen, falls NO_x-Reduktionsstrategien verändert werden. Für insgesamt fünf Fahrzeuge mit EA 189-Motor war aufgrund der vorliegenden Datenlage eine Untersuchung möglich. Da die NO_x-Emissionsänderung durch Umgebungstemperaturänderungen aber aufgrund zusätzlicher Einflussgrößen wie verschiedene Verkehrssituationen, Beladungen und Tripdynamiken bei RDE-Tests aus einem Vergleich der Messergebnisse nicht sicher bestimmt werden können, wurde eine Methode entwickelt, um die Änderung der NO_x-Emissionen nur als Funktion der Umgebungstemperaturänderung festzustellen. Dabei werden Einzelemissionskennfelder von Messungen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen mittels der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode in PHEM erstellt. Mit diesen Einzelkennfeldern bei verschiedenen Umgebungstemperaturen wird der realitätsnahe Zyklus CADC für jedes Fahrzeug simuliert. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen mit den verschiedenen Kennfeldern stellen dann den Einfluss der Umgebungstemperatur dar. Einflüsse von Fahrstil, Verkehr und Beladung sind durch die Simulation eines einheitlichen Zyklus mit einheitlichem Fahrermodell und gleicher Beladung eliminiert.

Die umgebungstemperaturbedingte NO_x-Änderung im simulierten CADC ist nachfolgend für jedes Fahrzeug kurz beschrieben. Die für die Simulation benötigten Emissionskennfelder wurden von den Real-World-Zyklen gemessen am PKW-Rollenprüfstand- sowie RDE-Messungen abgeleitet, d.h. die vorliegenden Tendenzen sind auch in den Messungen wiederzufinden.

- ▶ VW Golf Variant 1.6 TDI: Vor der Umrüstung zeigte dieses Fahrzeug eine Zunahme der NO_x-Emissionen um etwa 10 % von 18 °C auf 10 °C. Nach der Umrüstung stiegen die NO_x-Emissionen von 18 auf 10 °C um 4 % an.
- ▶ VW Passat 1.6 TDI: Vor Umrüstung stiegen die NO_x beim VW Passat 1.6 TDI von 18 °C auf 10 °C um etwa 5 % an. Nach der Umrüstung sanken die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 11 %.
- ▶ VW Passat Kombi 2.0 TDI: Vor der Umrüstung lag keine NO_x-Umgebungstemperaturabhängigkeit vor. Nach der Umrüstung stiegen die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 5 % an.
- ▶ Audi A3 2.0 TDI: Beim Audi A3 sanken die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 7 %. Nach der Umrüstung betrug die NO_x-Erhöhung von 18 °C auf 10 °C 10 %.
- ▶ Skoda Octavia 1.6 TDI: Vor der Umrüstung sanken die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 5 %. Nach der Umrüstung stiegen die NO_x allerdings von 18 °C auf 10 °C um etwa 12 % an.

Um eine Aussage für die gesamte Euro 5 Flotte mit EA 189-Motor treffen zu können, wurden die einzelnen NO_x-Umgebungstemperatureffekte dieser Fahrzeuge zu einer durchschnittlichen NO_x-

Umgebungstemperaturkorrekturfunktion zusammengefasst. Die durchschnittlichen Effekte der Umrüstung an PKW mit EA 189-Motoren wurden für das HBEFA jeweils durch bestandsanteilgewichtete Mittelung der Ergebnisse der einzelnen Motormodelle berechnet.

Für die sonstigen Euro 5 und Euro 6 Diesel-PKW mit teils freiwilligen und teils verpflichtenden Rückrufen konnten die Umgebungstemperatureinflüsse sowie die Kaltstartzusatzemissionen dagegen nicht verlässlich ermittelt werden, da bislang für zu wenig betroffene Fahrzeuge Messungen bei verschiedenen Umgebungstemperaturniveaus verfügbar sind. Da für eine Aussage zur Emissionsänderung im realen Betrieb in Deutschland der Umgebungstemperatureinfluss wesentlich ist, und aus den Daten nicht sicher geschlossen werden kann, wie sich das Umgebungstemperaturverhalten im Mittel infolge der Umrüstung verändert, wurde auf eine Implementierung der Umrüstungen bis auf Ausnahme des EA 189-Pflichtrückrufs im HBEFA 4.1 verzichtet. Für den EA 189-Pflichtrückruf konnten folgende NO_x-Änderungen für HBEFA 4.1 ermittelt werden:

- ▶ Für die vermessenen Fahrzeuge des VW-Konzerns mit EA 189-Motor liegt für 20 °C Umgebungstemperatur und betriebswarmem Motor eine NO_x-Reduktion von 34,7 % für den deutschen Mix an innerorts Verkehrssituationen und 29,3 % für den deutschen Mix an inner- und außerorts Verkehrssituationen vor. Betrachtet man die gesamte Euro 5 Diesel-PKW-Flotte, so ergibt sich für das Jahr 2019 (100 % Umsatzrate der Umrüstung sowie 38,7 % Anteil der betroffenen VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor an gesamter Euro 5 Diesel-PKW-Flotte) eine NO_x-Reduktion von 13,4 % für Deutschland innerorts und 11,3 % für Deutschland inner- und außerorts.
- ▶ Für die vermessenen Fahrzeuge des VW-Konzerns mit EA 189-Motor liegt für die durchschnittliche Umgebungstemperatur in Deutschland und betriebswarmem Motor eine NO_x-Reduktion von 31,0 % für den deutschen Mix an innerorts Verkehrssituationen und 25,3 % für den deutschen Mix an inner- und außerorts Verkehrssituationen vor. Betrachtet man die gesamte Euro 5 Diesel-PKW-Flotte für das Jahr 2019, so ergibt sich eine NO_x-Reduktion von 9,3 % für Deutschland innerorts und 7,6 % für Deutschland inner- und außerorts.

Folgende in dieser Zusammenfassung beschriebenen Methoden und Messdaten wurden für das HBEFA-Update herangezogen:

- ▶ Die Erweiterung der Software PHEM mit der CO₂-Methode zur automatisierten Kennfelderstellung zur Nutzung aller verfügbaren RDE-Messungen bei PKW, leichten und schweren Nutzfahrzeugen
- ▶ Die Berücksichtigung der Einflüsse von SCR-Temperatur und NH₃-Füllstand auf die NO_x-Emissionen bei Zyklen mit niedriger Abgastemperatur
- ▶ Die Alterungsfunktion der schweren Nutzfahrzeuge
- ▶ Die NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion für Diesel-PKW
- ▶ Die Auswirkungen der Umrüstung durch die EA 189-Pflichtrückrufaktion

Summary

Fuel consumption and emission factors of the HBEFA for heavy duty vehicles were mainly based on measurements on the engine test bench and on the chassis dyno so far. For passenger cars and light commercial vehicles, only measurement data from the chassis dyno were used. From these measurements the engine emission maps for the software PHEM were produced, which are a main input for the simulation of the emission factors. The quality of the emission maps is therefore decisive for the quality of the emission factors. For representative emission factors, a large number of vehicles should be measured in representative traffic situations. By including RDE measurements in the development of the HBEFA 4.1 update, the number of measured vehicles could be increased and so the representativeness of driving conditions could also be improved. However, the problem with RDE measurements was that the engine power of passenger cars and light commercial vehicles required for the engine map creation is usually not known since a measurement of engine torque is either costly or is too inaccurate. On the other hand, the measurement of emissions and engine speed is a standard application for RDE measurements today. Therefore, a so-called CO₂ interpolation method was applied for the HBEFA 4.1 update to integrate also RDE measurements without known engine power signal. The tasks of this project reads as follows:

- ▶ Validation of the CO₂ interpolation method for the consideration of RDE measurement data for HBEFA.
- ▶ Implementation of CO₂ interpolation method in the simulation model PHEM to use future RDE tests quickly and cost-effectively.

Belonging to these two points, the tasks also included following topics:

- ▶ Creation of a catalogue of requirements for RDE measurements to use the test results in PHEM and HBEFA.
- ▶ Measurement of five diesel cars, one petrol car, one light commercial vehicle and two heavy duty vehicles in real-world cycles and on the chassis dyno.

Due to the VW diesel scandal that occurred during this project, the following points were added as additional tasks:

- ▶ Development of a method for the integration of software and hardware retrofitting including measurement of two affected Euro 5 diesel vehicles before and after retrofitting.
- ▶ Analysis of new available emission measurement data from DUH, KBA and tests performed for UBA Germany of diesel vehicles before and after retrofitting. Useful data from vehicles with software or hardware retrofitting were required for creation of emission factors.
- ▶ Measurement data from vehicles with software or hardware retrofitting available within the framework of this project were integrated into the ERMES database. As far as the requirements for implementation in HBEFA were fulfilled, corresponding emission factors were created with the simulation model PHEM. The catalogue of requirements for the selection of measurement data was fulfilled by measurement data of eight passenger cars with EA 189 engine of the VW group. Thus, the EA 189 mandatory recall was implemented in HBEFA 4.1.

During the course of the update of HBEFA two more relevant influences on the real world emission levels were identified and quantified for the implementation in HBEFA 4.1:

- NO_x ambient temperature correction functions for passenger cars and light commercial vehicles
- Deterioration functions for heavy duty vehicles

The results of these mentioned tasks are explained briefly in this summary.

With the CO₂ interpolation method, measurements of RDE trips can now also be used for the HBEFA if no corresponding load signal is available via OBD. For each time step, the engine power is interpolated from a generic CO₂ map using the measured engine speed and the measured CO₂ mass flow. With known engine power and engine speed, all other emission components can be integrated into an engine emission map. The validation was carried out by comparing interpolated power with measured power from the chassis dyno or with OBD data. The deviations for the examined vehicles using generic CO₂ maps are on average between 5 % and 20 %. If the generic CO₂ map are calibrated for the investigated vehicle, the deviations are less than 5 %.

The use of RDE data improves the map coverage. Nevertheless, it was also investigated if additional special driving manoeuvres could lead to a further improvement of map coverage and to a higher accuracy of the emission simulation. The result of the analysis showed that such additional driving manoeuvres result only in minor improvements, which are visible only in the simulation of extreme driving manoeuvres. For the standard RDE tests, RDE-compliant tests are sufficient. For HBEFA, the standard test program with RDE compliant tests is sufficient according to current knowledge. Extensions of the measurement program with full-load accelerations are optional. If full-load accelerations are performed, they could be used for HBEFA.

The behaviour of exhaust after-treatment systems can have a major influence on the emission behaviour of vehicles. Within this project, options for the simulation of SCR systems were investigated. In addition, options for the creation of engine emission maps using the CO₂ interpolation method were investigated. The most appropriate method was used to create emission factors for HBEFA 4.1 from following options:

- End-of-tailpipe emission map: The uncertainty in the simulation for usual cycles using end-of-tailpipe maps is similar to the simulation with engine-out maps and a detailed simulation of the after-treatment system efficiency. Based on the available measurement data (vehicles are often only measured end-of-tailpipe), the conventional cycles should still be calculated with end-of-tailpipe maps. Only for special driving situations with relevant impacts of the exhaust after-treatment temperature on the end-of-tailpipe emission levels, such as stop&go cycles, clear advantages were found for the simulation with detailed consideration of the exhaust after-treatment system.
- Engine-out emission map, generated from RDE measurements at end-of-tailpipe using an inverted generic SCR efficiency map: The investigations showed that the creation of an engine-out emission map with inverted generic SCR efficiency map is risky. High NO_x conversion rates of the SCR can lead to artificially high engine-out NO_x levels, since the emission level end-of-tailpipe is converted into engine-out emissions by division by a very

small number. The engine-out emission map should therefore be created with measurement data before SCR.

- ▶ Generic engine-out emission map with adapted SCR efficiency: The use of generic engine-out emission maps with the calculation of the SCR efficiency has proven to be a more stable methodology. For the simulation of low load driving situations with detailed consideration of exhaust after-treatment system for Euro 6 diesel vehicles, a generic engine-out emission map should be used.
- ▶ Dependency of SCR efficiency on exhaust gas temperature with/without additional dependency on space velocity: The dependency on space velocity is technically ensured, which is why an approach without dependency on space velocity does not seem reasonable from today's point of view.
- ▶ Dependency of NSC conversion rate on NO_x storage level and simulation of NSC regeneration phases: The analysis showed, that a vehicle with unknown regeneration strategies for the NSC cannot be represented reliably in the simulation by generic regeneration strategies. A simulation using the end-of-tailpipe engine emission maps shows similar accuracy as the detailed generic NSC model but is much simpler. A detailed simulation of the NSC was therefore not executed for the HBEFA.
- ▶ Use of the RDE or chassis dyno measurement data with/without variable time shift: The greater the volume between the engine-out and the sample point for the emission analysers is, the greater is the influence of the time shift. A variable time shift has therefore been developed, which correctly takes these different gas running times into account when shifting mass emissions from the sample point to the engine-out point. A correct time alignment between emissions and engine speed and power is important to produce representative engine emission maps from transient real world tests.
- ▶ Vehicle specific calibration of the generic map for the CO₂ interpolation method: The CO₂ map required for CO₂ interpolation can be calibrated using chassis dyno measurements. The generic CO₂ map is used to simulate the cycle measured on chassis dyno with the corresponding chassis dyno settings. By comparing the simulated CO₂ data with the measured data, a difference function can be determined showing the error as function of engine speed and power. This function can be added to or subtracted from the generic CO₂ map. This results in the vehicle-specific CO₂ map.

A so-called catalogue of requirements was worked out for vehicle measurements, which summarises the findings gained from the measurements and methodological investigations in a "Best Practice" catalogue. The "Best Practice" catalogue defines minimum requirements as well as additional requests for chassis dyno and RDE tests, if these data should be used for PHEM and HBEFA. In addition, two Excel files were created. One lists the vehicles measured and planned to be measured by the ERMES labs to coordinate the vehicle selection and the other shows the standard format with which measurement results are uploaded to the ERMES database and to PHEM.

The following vehicles were measured on the road and on the chassis dyno as part of this project. The measurement data were used for method development and for the HBEFA update:

- a) VW Sharan 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- b) Peugeot 508 SW, Diesel, Euro 6b
- c) Skoda Superb 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- d) Audi A4 Avant 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- e) VW Golf 1.6 TDI, Diesel, Euro 6b
- f) VW Golf Variant 1.6 TDI, Diesel, Euro 5b (affected by the so-called VW diesel scandal, mandatory recall EA 189)
- g) VW Passat Kombi 2.0 TDI, Diesel, Euro 5b (affected by the so-called VW diesel scandal, mandatory recall EA 189)
- h) Renault Master, Diesel, Euro 5b (light commercial vehicle)
- i) Mini Cooper, Petrol, Euro 6b
- j) Renault MDA2C, N2, Diesel, Euro VI
- k) DAF LF 250, N3, Diesel, Euro VI

For vehicles a) to e) as well as j) and k), the NO_x engine-out emissions and the exhaust gas temperature before SCR and NSC were also measured. These data were needed to develop NO_x engine-out emission maps and exhaust gas temperature maps to simulate vehicles with SCR in special driving situations, such as low load cycles, with detailed consideration of exhaust after-treatment system.

The measurements of **light duty vehicles** provided CO₂ emissions in the range of 100 g/km (passenger car in NEDC) to 290 g/km (light commercial vehicle on the road) and NO_x emissions in the range of 30 mg/km (passenger car in NEDC) to 2700 mg/km (light commercial vehicle on the road). For the RDE tests, driving style and loadings were also varied in order to perform "best case" and "worst case" driving situations for the exhaust after-treatment system.

Two of the eight cars measured were affected by the VW diesel scandal and were part of the mandatory EA 189 recall, based on evidence of tampering by KBA. According to this, a software update had to be installed by the manufacturer, which has an influence on the performance of the exhaust after-treatment system. The aim was to investigate the effects of the retrofitting on consumption and emissions. To find this out, the test vehicles were measured before and after the retrofitting. The measurement program was identical before and after the retrofitting and consisted of two RDE-trips on the road and chassis dyno tests.

By testing a shortened RDE-trip on the chassis dyno, it was possible to investigate if the chassis dyno was detected by the defeat device and if emission reduction strategies are adjusted by the vehicle. The measurement program also included the measurement of the type approval test cycle NEDC. In addition, a NEDC+ was measured, which differed only slightly from the NEDC by briefly accelerating the vehicle before the actual cycle start. This made it possible to determine if the cycle is detected by the defeat device with corresponding adjustments of the vehicles emission level. The evaluation of the measurement data led to the following conclusions:

- Before the retrofitting, no difference in emission levels between RDE measurements on the chassis dyno and RDE measurements on the road could be detected for both vehicles. Before the retrofitting, significantly higher NO_x emissions were detected during measurements in the NEDC+ compared to measurements in the NEDC. After the retrofitting, the effect could not be longer observed.

- The average reduction of real-world NO_x emissions by retrofitting has a wide spread among the two measured vehicles, ranging from a minimal reduction (VW Passat Kombi 2.0 TDI) to a larger reduction of 33 % (VW Golf Variant 1.6 TDI).

The measurements of two **heavy duty vehicles** on the chassis dyno and in real drive conditions showed a low emission level for both vehicles regarding the regulated pollutants. In long low load cycles, which are not tested for regulatory reasons, the NO_x emission level of the vehicles was obviously higher due to the unfavourable conditions at the SCR catalyst. In addition one vehicle produced quite high N₂O emissions. Due to the high greenhouse gas potential of N₂O these emissions have to be considered.

Another issue was the comparison between chassis dyno and RDE measurements. Shortened extracts of RDE cycles were driven on the chassis dyno and the emissions were compared with the RDE results. These investigations did not show significant differences which would indicate special defeat devices.

Based on measurements of „aged“ vehicles (mileage higher than 500 000 km) possible deterioration effects on the emission performance dependent on the mileage have been investigated. For the investigation, measurement data from five vehicles with a mileage of more than 500 000 km were used, which were measured for the project „91180: Real world emissions from vehicles and machinery - Lot 1“ for UBA Germany. The data of one Euro V vehicle did not show any changes of the emission level and consequently no deterioration function for this vehicle category was elaborated. The four Euro VI vehicles showed higher NO_x levels for the “aged” vehicles compared to the “new” ones. This data was used for an elaboration of a linear deterioration function for Euro VI vehicles:

- The main reason for the deterioration could be an aging of the DOC. If the conversion efficiency of this catalyst drops due to thermal and chemical aging, the ratio between NO and NO₂ at the SCR catalyst is not in the ideal range any more. This reduces the conversion efficiency of the SCR. Further possible reasons could be the aging of NO_x sensors and mechanical and chemical aging of the SCR catalyst itself.
- The linear deterioration function increases the emissions up to 900 000 km. For vehicles with higher mileage the NO_x emissions should stay on a rather constant level. The reason for that is the not-to-exceed limit of 1.5 g/kWh NO_x which has to be monitored by the OBD. Exceeding this limits activates the MIL and the vehicle has to visit the garage for repair. The slope of the deterioration function suggests, that this border is reached approximately at 900 000 km.

In addition to the measurements of **light duty vehicles** by TU Graz, further measurements were carried out by DUH, KBA, EMPA, TÜV Nord, ADAC, JRC, TNO, DEKRA and TU Dresden. These measurements were also used for the HBEFA update as long as complete measurement data were available. Thus, the number of measurements on chassis dyno and on road used for the HBEFA update could be increased considerably.

In HBEFA, the base emission factors are related to 20 °C ambient temperature. Measurements have shown that NO_x emissions from the passenger cars increase on average at lower ambient temperatures. The reason for this is that NO_x reduction strategies have some disadvantages and have therefore obviously been reduced or deactivated in a large number of vehicle models outside the thermal window in type approval tests (20 - 30 °C). Examples are:

- ▶ Reduction of exhaust gas recirculation rates
- ▶ Reduction of AdBlue dosing in vehicles with SCR
- ▶ Reduction of regeneration interval of NSC

Due to the wide variety of technologies involved and the different strategies of different manufacturers on how NO_x reduction strategies are implemented, a representative correction function based on vehicle tests would result in high test effort and costs. Therefore, remote sensing data from Switzerland, England and Sweden were used to update the NO_x ambient temperature correction function. NO_x ambient temperature correction functions were found for Euro 3 to Euro 6a,b diesel passenger cars and light commercial vehicles. On the contrary, the NO_x ambient temperature correction function for vehicles with EA 189 retrofitting were derived from vehicle testing on chassis dyno and RDE tests, because the affected vehicles could not be separated from the remote sensing data.

In total, the following measurement data were available for vehicles before and after retrofitting:

- ▶ Euro 5 mandatory recall for VW group vehicles with EA 189 engine
- ▶ Euro 5 voluntary retrofitting
- ▶ Euro 6b voluntary/mandatory retrofitting

For using the measurement data of these vehicles for the HBEFA update, the data were first subdivided according to the ambient temperature. Measurements in an ambient temperature range from 15 °C to 30 °C were used for the creation of the base emission factors. Measurements below 15 °C were used to investigate the effects of the ambient temperature on NO_x emissions. In addition to the vehicles measured by TU Graz, also data of measured vehicles by KBA, DUH and TU Dresden were available for the investigations of the retrofitting implementation in HBEFA²:

- ▶ For the Euro 5 vehicles with EA 189 mandatory recall, measurement data was available from eleven vehicles, of which the measurement data from eight vehicles could be used for further investigations.
- ▶ For the Euro 5 emissions standard with voluntary retrofitting, the measurement data of eight vehicles was available, after reviewing the measurement data, the measurements of five vehicles could be further used for investigations.
- ▶ Of the Euro 6 vehicles, which got a voluntary or mandatory retrofitting, measurements of eleven vehicles were available, where seven vehicles could be further used.

² Minimum request to set up the base engine emission maps are RDE-tests before and after the retrofitting, in the 15 °C to 30 °C ambient temperature range for CO₂, rpm and NO_x in 1 Hz resolution without unusual events, such as a DPF regeneration.

The development of a method for implementing the retrofitting in HBEFA was subdivided into the following points:

- a) Method for creating the base emission factors before and after retrofitting for 20 °C ambient temperature
- b) Method for consideration of additional cold start emissions
- c) Method for taking into account the influence of ambient temperature on NO_x emissions

To display the influence of the retrofitting on the base emission factors a difference engine emission map was calculated from the maps before and after retrofitting. This allows the reduction potentials to be correctly represented as a function of the engine load point.

To calculate the cold start extra emissions, for each vehicle before and after retrofitting identical cycles should be available with hot and with cold start to calculate the differences. Since the data included no such test pairs, the following methods have been developed to assess the hot start emission level for cycles tested with cold start:

- Subtracting the simulated hot emissions in the cold start phase from the measured emissions. The difference is the additional emission due to the cold start in g/start.
- Determination of additional cold start emissions from measurement data only by applying an "Emission/CO₂" ratio from the hot part of the test and the cold phase. E.g. the CO₂ and NO_x emissions per second for the duration of the cold start phase and for a phase with hot engine operating are averaged. For the hot time interval the ratio NO_x to CO₂ is determined. If the ratio NO_x to CO₂ of the phase with hot engine condition is multiplied with the CO₂ of the cold start phase, the theoretical NO_x with hot engine condition in the cold start phase is obtained. If this NO_x is subtracted from the measured NO_x, the additional cold start emissions result.

Both options were applied to the measurement data of the VW group vehicles affected by the mandatory recall EA 189. The additional cold start emissions of the Euro 5 diesel fleet are also similar to the additional emissions before and after retrofitting of the affected VW group vehicles with EA 189 engine. Only a limited number of measurements were available for the vehicles with voluntary retrofitting (cold start only in WLTC), which is why it was not possible to calculate additional real world cold start extra emission values for this vehicle segment.

The measurement data of the affected vehicles were also investigated regarding to the influence of ambient temperature on NO_x emissions. As mentioned earlier, NO_x emissions may increase with decreasing ambient temperature if NO_x reduction strategies are changed. For five vehicles with EA 189 engine an investigation was possible based on the available data. The NO_x emission changes due to ambient temperature differences in different RDE tests cannot be assessed directly from the test results due to variabilities additional influencing parameters such as vehicle loading, traffic situation, trip dynamics, etc. Therefore, a methodology was developed to determine the change in NO_x emissions only as a function of the ambient temperature change. For that, single engine emissions maps were created from measurements at different ambient temperatures for each vehicle by using the CO₂ interpolation method in PHEM. The real world CADC cycle was simulated for each vehicle with these single maps for the different ambient temperatures and the difference in the results gives the ambient temperature effect since in the simulation the same vehicle data, loading, gear shift behaviour etc. was used.

The NO_x change in dependence of the ambient temperature in the simulated CADC is briefly described below for each vehicle. The emission maps required for the simulation were derived from the chassis dyno and RDE tests, i.e. the NO_x trends can also be found in the measurements.

- ▶ VW Golf Variant 1.6 TDI: Before the retrofitting, this vehicle showed an increase in NO_x emissions of about 10 % from 18 °C to 10 °C. After the retrofitting, NO_x emissions increased by 4 % from 18 °C to 10 °C.
- ▶ VW Passat 1.6 TDI: Before the retrofitting, NO_x emissions from the VW Passat 1.6 TDI increased by around 5 % from 18 °C to 10 °C. After the retrofitting, NO_x emissions decreased from 18 °C to 10 °C by about 11 %.
- ▶ VW Passat Kombi 2.0 TDI: Before the retrofitting there was no NO_x ambient temperature dependency. After the retrofitting, NO_x emissions increased by about 5 % from 18 °C to 10 °C.
- ▶ Audi A3 2.0 TDI: Before the retrofitting, the NO_x emissions from the Audi A3 decreased by around 7 % from 18 °C to 10 °C. After the retrofitting, the NO_x increase from 18 °C to 10 °C was 10 %.
- ▶ Skoda Octavia 1.6 TDI: Before the retrofitting, NO_x emissions decreased from 18 °C to 10 °C by around 5 %. After the retrofitting, NO_x emissions increased by about 12 % from 18 °C to 10 °C.

To be able to make a statement for the entire Euro 5 fleet with EA 189 engines, the individual NO_x ambient temperature correction functions of these vehicles were averaged into an average NO_x ambient temperature correction function, which was used to determine a NO_x ambient temperature correction function. The averaging used a weighting according to the share of the different engine models in the fleet with retrofitting of EA 189 engines.

For the other Euro 5 and Euro 6 cars with voluntary and mandatory retrofitting the emission reduction at hot engine in the range of 20 °C have been elaborated from the test data as described. For these segments however, the available test data did not allow to assess the influence of lower ambient temperatures and of cold start extra emissions since a too small number of vehicles was tested at different ambient temperatures. Since the change in NO_x emissions at lower ambient temperatures is a relevant effect for Germany, the implementation of retrofitting was not performed in HBEFA 4.1 with the exception of the mandatory EA 189 recall. For the mandatory EA 189 recall, following NO_x changes for HBEFA 4.1 could be determined by data of measured vehicles with EA 189 retrofitting:

- ▶ For the measured vehicles with EA 189 engine, there is a NO_x reduction for an ambient temperature of 20 °C and hot engine condition of 34.7 % for the German mix of urban traffic situations and 29.3 % for the German mix of urban and rural traffic situations. Looking at the entire Euro 5 diesel passenger car fleet, the NO_x reduction for the year 2019 (100 % implementation rate of the retrofitting and 38.7 % share of the affected VW group vehicles with EA 189 engine in the entire Euro 5 diesel passenger car fleet) is 13.4 % for the German mix of urban traffic situations and 11.3 % for German mix of urban and rural traffic situations.

- For the measured vehicles with EA 189 engine, there is a NO_x reduction for the average German ambient temperature and hot engine condition of 31.0 % for the German mix of urban traffic situations and 25.3 % for the German mix of urban and rural traffic situations. Looking at the entire Euro 5 diesel passenger car fleet for 2019, the NO_x reduction is 9.3 % for German mix of urban traffic situations and 7.6 % for German Mix of urban and rural traffic situations.

The methodologies and measurement data described in this summary were used for the HBEFA update:

- The extension of the software PHEM with the CO₂ interpolation method for efficient and automated computation of engine emission maps was used for all available instantaneous test data from cars, LCVs and HDVs, where CO₂ and engine speed signals were recorded.
- The model to simulate the effects from a decreasing SCR temperature and NH₃ level on the end-of-tailpipe NO_x emissions was activated for cycles with low exhaust gas temperature.
- The deterioration function for NO_x emissions from Euro VI heavy duty vehicles
- The NO_x ambient temperature correction function for diesel vehicles
- The effects from retrofitting for the EA 189 mandatory recall campaign

1 Aufgabenstellung

Die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren des HBEFA werden basierend auf zeitaufgelösten Messdaten von Fahrzeugtests mit dem Simulationsmodell PHEM berechnet. Als Datenquelle wurden bisher

- Für schwere Nutzfahrzeuge vorwiegend Messungen am Motorprüfstand sowie am LKW-Rollenprüfstand und zu geringem Umfang auch schon RDE-Messungen verwendet.
- Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge wurden ausschließlich Messdaten vom PKW-Rollenprüfstand verwendet.

Aus den zeitaufgelösten Messdaten erzeugt PHEM Emissionskennfelder, indem die gemessenen Emissionen entsprechend der jeweiligen Motorleistung und Motordrehzahl in ein Emissionskennfeld eingerastert werden. Danach wird für jedes Kennfeldraster der Mittelwert aller dort einsortierten Emissionswerte gebildet. Damit entsteht für jede gemessene Abgaskomponente ein Kennfeld über Leistung und Drehzahl des Motors. Dieses Verfahren eignet sich damit für jede Art von Messung, bei der qualitativ hochwertige Messdaten für Motorleistung, Motordrehzahl oder Drehmoment sowie Emissionen in zumindest 1 Hz Auflösung verfügbar sind.

Aus den Emissionskennfeldern der einzelnen gemessenen Kfz werden dann für die Berechnung der Emissionsfaktoren mittlere Emissionskennfelder je Kfz-Schicht gebildet (z.B. ein Durchschnittskennfeld für PKW-Diesel Euro 5). Dafür werden die Kennfeldachsen normiert und die Emissionswerte je Kennfeldpunkt über die zugehörigen Kfz gemittelt. Mit diesen Kennfeldern und den Fahrzeugdaten (Masse, Luft-, Rollwiderstand, usw.) werden die Emissionen und der Verbrauch der Kfz-Schichten in allen HBEFA-Fahrzyklen simuliert. Diese Emissionsfaktoren werden dann in das HBEFA importiert.

Damit ist die Qualität der Emissionskennfelder entscheidend für die Qualität der HBEFA Emissionsfaktoren. Für repräsentative Emissionsfaktoren müssen die Kennfelder daher aus einer ausreichend großen und repräsentativen Anzahl an Kfz, die in repräsentativen Verkehrssituationen gemessen wurden, erstellt werden.

Durch Einbeziehung von RDE-Messungen in die Ausarbeitung des HBEFA 4.1 Updates konnte die Anzahl gemessener Kfz erhöht und insbesondere die Repräsentativität der Fahrzustände verbessert werden. Rollenmessungen decken ja nur einen kleinen Teilbereich der real vorkommenden Fahrzustände und Umgebungsbedingungen ab. Zudem ist anzunehmen, dass Hersteller inzwischen ihre Kfz auch schon in den gängigen Real-World-Rollenzyklen messen und dort alleine schon wegen der Öffentlichkeitswirkung hohe Emissionen vermeiden wollen. Damit können bei realen Fahrten eventuell andere Emissionsniveaus auftreten, als bei der Rollenprüfstandmessung. Derartige Effekte können mit RDE-Messdaten sehr gut detektiert werden, wenn die Messkampagnen passend designt sind (z. B. können höhere NO_x infolge reduzierter Abgasrückführung bei Zuständen, die bei Rollenprüfstandtests üblicherweise nicht geprüft werden, einfach festgestellt werden, wenn entsprechende Bedingungen im Messprogramm vorgesehen werden).

Die Messung von Emissionen und Motordrehzahl stellt heute bei PEMS eine Standardanwendung dar. Eine Messung des Drehmomentes am Motor ist dagegen sehr aufwendig und vor allem bei PKW mit großen Unsicherheiten oder hohen Kosten behaftet. Damit war die Verwendung von RDE-Messdaten zur Erzeugung von Emissionskennfeldern für PHEM und somit für HBEFA in der Vergangenheit nur sehr eingeschränkt möglich.

Da die aktuelle Abgasgesetzgebung für SNF bereits Straßenemissionsmessungen mit PEMS vorschreibt, bei denen die aktuelle Motorleistung mit definierter Genauigkeit vom Motorsteuergerät ausgelesen werden kann, konnten schon für HBEFA 3.2 einige derart gemessene Kfz erfolgreich in den Datensatz an Motor-Emissionskennfeldern implementiert werden. Bei PKW und LNF ist allerdings keine gesetzliche Regelung zur Ausgabe genauer Leistungsdaten aus dem Steuergerät vorgesehen, so dass dazu ein passendes Verfahren zu entwickeln war. Dieses Verfahren sollte auch für alle RDE-Messungen an SNF anwendbar sein, bei denen die Motorleistung nicht oder nur ungenau erfasst ist.

Dazu wurden an der FVT im Juni 2015 bereits in Eigenleistung Untersuchungen an einem PKW durchgeführt, und ein innovatives Verfahren entwickelt. Dieses Verfahren wurde in diesem Projekt mit schon vorhandenen Messdaten der FVT validiert und bei den im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen angewandt und optimiert.

Damit konnten bestehende und zukünftige RDE-Messungen in einem ausreichend genauen, sicheren und automatisierten Verfahren in Emissionskennfelder übergeführt werden.

Im Detail lautete die Aufgabenstellung wie folgt:

- ▶ Absicherung der Methodik zur Implementierung der RDE-Messdaten ins HBEFA
- ▶ Implementierung der Methode in das Simulationsmodell PHEM, um zukünftige RDE-Tests schnell und kostengünstig nutzen zu können
- ▶ Erstellung eines Anforderungskatalogs an RDE-Messungen zur Verwendung in PHEM und in HBEFA
- ▶ Vermessung von fünf Diesel-PKW, einem Otto-PKW, einem leichten Nutzfahrzeug sowie zwei SNF in Real-World-Zyklen und am Rollenprüfstand

Im Laufe des Projekts wurden die oben erwähnten Punkte hinsichtlich folgender Aufgabenstellungen im Zuge eines Aufstockungsantrages noch erweitert:

- ▶ Neue verfügbare Emissionsmessdaten von DUH, KBA und Rahmenvertragsmessungen für UBA Deutschland sollen, falls die Randbedingungen für eine Implementierung ins HBEFA erfüllt waren, in die ERMES-Datenbank integriert werden und entsprechende Emissionskennfelder für PHEM erzeugt werden.
- ▶ Erzeugung von Alterungsfunktionen für SNF
- ▶ NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktionen für PKW und LNF
- ▶ Untersuchungen von Umrüstungen an Dieselfahrzeugen inklusive Messung von zwei betroffenen Euro 5 Dieselfahrzeugen

2 Entwicklung von Methoden für die Generierung von Emissionsfaktoren für das HBEFA 4.1

Unter diesem Kapitel sind die Methoden beschrieben, die im Rahmen dieses Projekts entwickelt und validiert wurden, um Emissionsfaktoren aus PKW-Rollenprüfstand- sowie RDE-Messungen zu erstellen.

2.1 Methoden zur Kennfelderstellung, um Rollenprüfstand- sowie RDE-Messdaten zu integrieren

Ziel ist es, die sekundlichen Messdaten zu verwenden, um Emissionskennfelder mit PHEM zu erzeugen. Damit können RDE-Messungen analog zur bisher bei Rollentests angewandten Methode für die Erstellung von Emissionsfaktoren verwendet werden. Wie zuvor beschrieben, stellt bei der Verwendung der RDE-Daten das meist nicht verfügbare Signal zur sekundlichen Motorleistung das zentrale Problem dar.

Die im Angebot vorgeschlagene Methode zur einfachen und genauen Ermittlung der Motorleistung wurde weiterentwickelt und bereits anhand von zwei PKW und einem SNF, die mit PEMS auf der Straße sowie auf der Rolle gemessen wurden, geprüft. Es wurden dabei gemäß Angebot drei verschiedene Optionen zur Berechnung der zeitaufgelösten Motorleistung getestet:

- Option 1: Verwendung von Willans-Linien analogen Kennlinien (Velines), die die aktuelle Radleistung als Funktion der CO₂-Emissionen darstellen. Die Veline muss allerdings für jedes Kfz durch eine WLTC-Rollenmessung erstellt werden.
- Option 2: Interpolation der Motorleistung anhand der gemessenen Motordrehzahl und der gemessenen CO₂-Emissionen aus generischen Motorkennfeldern
- Option 3: Verwendung gemessener Motorleistungs- oder Momentsignale

Bei den zwei getesteten Kfz sowie dem SNF war es nicht möglich, ein brauchbares Momentensignal aus der OBD-Schnittstelle auszulesen. Es wurde daher vorerst das Signal vom Rollenprüfstand zum Radmoment als „Ist-Größe“ verwendet, um die übrigen Methoden zu vergleichen.

Bei den drei gemessenen Kfz zeigte sich eindeutig, dass Option 2 eine einfach anwendbare, stabile und gegen Messfehler robuste Methode darstellt. Die Genauigkeit ist ähnlich wie bei Methode 1, erfordert aber nicht, dass das Kfz auch am Rollenprüfstand gemessen wird. Zusätzlich werden Effekte unterschiedlicher Schaltstrategien auf die CO₂-Emissionen in Option 2 bei der Leistungsberechnung berücksichtigt, was bei vom „normalen“ Gebrauch abweichenden Schaltverhalten die Genauigkeit gegenüber Option 1 erhöht. Die Option 2 wurde dementsprechend im Modell PHEM implementiert und für HBEFA 4.1 für alle Kfz-Kategorien genutzt.

2.1.1 Vergleich Messung und Simulation an ausgewählten PKW

Für die nähere Untersuchung der CO₂-Interpolationsmethode ausgewählten Diesel-PKW mit den Fahrzeugspezifikationen laut nachfolgender Tabelle haben die Abgasnorm Euro 5 bzw. Euro 6b und wurden mit PEMS auf der Straße sowie am Rollenprüfstand vermessen.

Tabelle 1: Die zur Methodenauswahl verwendeten PKW

Fahrzeug ID	Segment	Abgasnorm	Abgasnachbehandlung	Getriebe
1	D-Segment, 2.0l, 120kW	Euro 6b	NSK und DPF	6-Gang manuell
2	D-Segment, 1.6l, 77kW	Euro 5	Oxi-Kat und DPF	7-Gang Automatik

Die Messfahrten auf der Straße wurden unter Einhaltung der RDE-Vorgaben laut dem Stand der damals vorliegenden Gesetzgebung durchgeführt. Es handelte sich dabei um eine Route von Graz nach Sinabelkirchen (östlich von Graz), im Weiteren als „Ries-Route“ bezeichnet, sowie um eine Route von Graz Richtung Köflach (westlich von Graz) und eine Route von Graz nach Arzberg (nördlich von Graz). Die mittlere Umgebungstemperatur (U_{temp}) der RDE-Routen lag zwischen 1,5 °C und 30 °C. Vollständigkeitshalber sei erwähnt, dass nicht mit allen Fahrzeugen auf allen Strecken gefahren wurde. Des Weiteren wurden am Rollenprüfstand NEFZ, WLTC sowie auch Real-World-Zyklen gemessen. Eine Übersicht der durchgeführten Messungen ist im Anhang A gegeben.

Wird exemplarisch die Motorleistung für eine Köflach-Route mit dem Fahrzeug 1 interpoliert, so ist aus der Verteilung der Betriebspunkte erkennbar, dass das zu erstellende Kennfeld vor allem im Teil- und Mittellastbereich gut mit Messdaten gefüllt werden kann. Im Hochlastbereich fehlen Messdaten, diese müssen aber aufgrund des geringen Hochlastanteils im realen Betrieb auch nicht zwangsläufig vorhanden sein. Bereiche mit hohen Motordrehzahlen und Motorleistungen sind nur bei hohen Steigungen relevant.

Werden mit den generierten Kennfeldern die gefahrenen Zyklen nachgerechnet, kann eine Qualitätsüberprüfung durchgeführt werden. Aus den gemessenen RDE-Routen Arzberg, Köflach, Ries sowie mit dem gemessenen Rollenzyklus ERMES wurden jeweils mit der CO₂-Interpolationsmethode die Motorkennfelder generiert. Die so erzeugten Motorkennfelder enthalten die eingerasterten Messpunkte von NO_x und CO sowie die CO₂-Werte des generischen Basiskennfelds.

Mit diesen Kennfeldern wurden dann im Fall des Fahrzeugs 1 wiederum die Routen Arzberg, Köflach und Ries simuliert. Die prozentuellen Angaben in den Tabellen der Unterkapitel 2.1.1.1 und 2.1.1.2 zeigen die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen zu den Messwerten und schließen neben den Messunsicherheiten auch Unsicherheiten in der Simulation ein, wie z.B. durch Ungenauigkeiten bei der

- Steigungsberechnung aus den GPS-Daten
- Leistungsberechnung durch generische Fahrwiderstände
- Energieverbrauchsbestimmung der Nebenaggregate des Versuchsfahrzeugs
- Kennfelderzeugung bzw. Abweichungen zwischen generischem Verbrauchskennfeld und realem Verbrauchskennfeld des vermessenen Kfz

Die nachfolgend angeführten Ergebnisse stellen einen Auszug aus den Untersuchungen dar.

2.1.1.1 Exemplarische Mess- und Simulationsdaten Fahrzeug 1

Tabelle 2 und Tabelle 3 vergleicht die Messdaten in zwei RDE-Routen (Arzberg und Ries) mit der PHEM-Simulation, bei der das Abgasemissionskennfeld aus unterschiedlichen Fahrten erzeugt wurde. Der ERMES-Zyklus wurde am Rollenprüfstand gemessen und stellt die bislang übliche Vorgehensweise dar.

Da jeweils dasselbe generische Verbrauchskennfeld zur Kennfelderzeugung verwendet wurde, sind die Simulationsergebnisse für CO₂ bei allen Kennfeldvarianten gleich. Die relativ große Differenz zwischen Messung und Simulation ist auf die schon zuvor beschriebenen Unsicherheiten zurückzuführen. Für die Beurteilung der Kennfeldqualität sind Differenzen zwischen den Kennfeldern relevant, so dass keine Kalibrierung der Absolutwerte vorgenommen wurde (für die HBEFA-Anwendung wurde eine Methode zur Kalibrierung ausgearbeitet).

Bei der NO_x-Simulation fällt das Kennfeld aus dem Rahmen, das bei ca. 2 °C Umgebungsbedingungen gemessen wurde. Offensichtlich führt die niedere Umgebungstemperatur zu deutlich höheren NO_x-Emissionen, so dass dieses Kennfeld in der Simulation die Messwerte bei höheren Umgebungstemperaturen deutlich überschätzt. Dieser Effekt dürfte auf reduziertes AGR zurück zu führen sein, da gleichzeitig die CO-Emissionen bei niedriger Umgebungstemperatur deutlich abnehmen.

Bei CO ergeben die Kennfelder aus Köflach ($U_{temp} = 1,5\text{ °C}$) und ERMES große Abweichungen. Da mit PEMS der CO-Messwert auch ca. um den Faktor 10 größer ist als bei den Fahrzeugen 2 und 3 ist, dürfte dies entweder auf fehlerhafte Abgasnachbehandlungskomponenten des Fahrzeugs und/oder auf eine fehlerhafte Kalibrierung des CO-Analysators zurückzuführen sein. Grundsätzlich wurden bei CO öfters hohe relative Abweichungen zwischen PEMS und Rollenprüfstandanalysatoren festgestellt, die auch auf das niedere CO-Emissionsniveau moderner PKW zurückzuführen sind.

Insgesamt zeigt sich, dass – gleiche Umgebungstemperaturen vorausgesetzt – die Simulationsgenauigkeit von PHEM mit den nach neuem Verfahren aus RDE-Messungen gewonnenen Kennfeldern und dem nach Standardverfahren aus Rollenprüfstandtest gewonnenen Kennfeldern erhalten bleibt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 1 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 1

Emission	Messung Arzberg ($U_{temp} = 27,5\text{ °C}$)	Arzberg simuliert mit KF aus Köflach ($U_{temp} = 23,5\text{ °C}$)	Arzberg simuliert mit KF aus Köflach ($U_{temp} = 1,5\text{ °C}$)	Arzberg simuliert mit KF aus Arzberg ($U_{temp} = 27,5\text{ °C}$)	Arzberg simuliert mit KF aus ERMES ($U_{temp} = 23\text{ °C}$)	Arzberg simuliert mit KF aus Ries ($U_{temp} = 26\text{ °C}$)
CO ₂ [g/km]	165	-11 %	-11 %	-11 %	-11 %	-11 %
NO _x [g/kgCO ₂]	2,77	-13 %	55 %	0 %	8 %	18 %
CO [g/kgCO ₂]	3,44	5 %	-66 %	4 %	-92 %	-21 %

Tabelle 3: Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 1 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 2

Emission	Messung Ries ($U_{temp} = 26\text{ °C}$)	Ries simuliert mit KF aus Köflach ($U_{temp} = 23,5\text{ °C}$)	Ries simuliert mit KF aus Köflach ($U_{temp} = 1,5\text{ °C}$)	Ries simuliert mit KF aus Arzberg ($U_{temp} = 27,5\text{ °C}$)	Ries simuliert mit KF aus ERMES ($U_{temp} = 23\text{ °C}$)	Ries simuliert mit KF aus Ries ($U_{temp} = 26\text{ °C}$)
CO ₂ [g/km]	148	-5 %	-5 %	-5 %	-5 %	-5 %
NO _x [g/kgCO ₂]	2,33	-14 %	49 %	14 %	32 %	17 %
CO [g/kgCO ₂]	2,40	47 %	-51 %	44 %	-84 %	8 %

2.1.1.2 Exemplarische Mess- und Simulationsdaten Fahrzeug 2

Mit dem Fahrzeug 2 wurde die Ries Route 2-mal gefahren, daher auch die Bezeichnung Ries 1 und Ries 2 (Tabelle 4 und Tabelle 5). Die Abweichungen bezüglich CO₂ dürften wiederum aus ungenauen Daten zu Fahrwiderständen und Steigung bzw. aus dem generischen Kennfeld resultieren und wurden für spätere HBEFA-Anwendungen noch kalibriert.

Bei Fahrzeug 2 liegen die Abweichungen nach dem neuen Verfahren aus RDE-Messungen gewonnenen Kennfeldern ähnlich wie bei Fahrzeug 1.

Tabelle 4: Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 2 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 1

Emission	Messung Ries 1 ($U_{temp} = 18\text{ °C}$)	Ries 1 simuliert mit KF aus Köflach ($U_{temp} = 18\text{ °C}$)	Ries 1 simuliert mit KF aus Ries 1 ($U_{temp} = 17\text{ °C}$)	Ries 1 simuliert mit KF aus Ries 2 ($U_{temp} = 9\text{ °C}$)
CO ₂ [g/km]	148	-19 %	-19 %	-19 %
NO _x [g/kgCO ₂]	8,40	12 %	6 %	14 %
CO [g/kgCO ₂]	0,34	-36 %	11 %	-6 %

Tabelle 5: Ergebnisse der Emissionssimulation mit PHEM für Fahrzeug 2 mit Emissionskennfeldern aus verschiedenen Messfahrten, Teil 2

Emission	Messung Ries 2 ($U_{temp} = 9\text{ °C}$)	Ries 2 simuliert mit KF aus Köflach ($U_{temp} = 18\text{ °C}$)	Ries 2 simuliert mit KF aus Ries 1 ($U_{temp} = 17\text{ °C}$)	Ries 2 simuliert mit KF aus Ries 2 ($U_{temp} = 9\text{ °C}$)
CO ₂ [g/km]	126	-10 %	-10 %	-10 %
NO _x [g/kgCO ₂]	8,69	7 %	-1 %	8 %
CO [g/kgCO ₂]	0,27	-20 %	51 %	13 %

2.1.2 Vergleich Messung und Simulation an ausgewählten SNF

Bei LKW wurde die Methode ebenfalls an vermessenen Fahrzeugen getestet.

Zur Validierung der Leistungsbestimmung mit der CO₂-Kennfeldmethode (Option 2) für LKW wurde das mittels dieser Methode berechnete Leistungssignal mit der anhand des OBD-Drehmomentsignals ermittelten Leistung bei einem Euro VI Fahrzeug verglichen. Dieses Signal eignet sich bei Euro VI Nutzfahrzeugen besonders gut zur Validierung, da dieses auch für die Bewertung der arbeitsbasierten Emissionen im In-Service-Conformity Test herangezogen wird und deshalb hohen Genauigkeitsanforderungen unterliegt. Mit diesem Drehmoment kann zusammen mit der Motordrehzahl die Motorleistung berechnet werden und daraus die positive Arbeit, die während eines Zyklus geleistet wird. Die bekannte Fehlertoleranz beträgt +/-5% für den OBD-Wert. Bei dem untersuchten LKW lagen die mit der CO₂-Methode ermittelten Werte für die Zyklusarbeit in allen Fällen innerhalb der Toleranzbreite des Referenzwerts aus dem OBD Signal.

Neben den kumulierten positiven Arbeiten über den gesamten Zyklus können auch noch direkt die sekundlichen Leistungs- bzw. Drehmomentwerte verglichen werden. Eine hohe Qualität der zeitlichen Auflösung ist hierbei zur Erstellung der PHEM Kennfelder essentiell. Aus den Untersuchungen war zu erkennen, dass das mittels CO₂-Methode ermittelte Signal gut mit dem OBD-Signal korreliert, lediglich auf schnelle Drehmomentänderungen reagiert die CO₂-Methode leicht verzögert. Dies kann u.a. mit dem nicht optimalen Ansprechverhalten der Analysatoren erklärt werden. Verbesserungen in diesem Bereich sind durch die ebenfalls entwickelte variable Zeitverschiebung (Kapitel 2.3.7) zu erwarten. Es kann bereits ohne diese Verbesserungen keine starke Abweichung der zeitlich aufgelösten Werte zwischen CO₂-Methode und OBD Referenzsignal erkannt werden. Zudem unterliegen die Schadstoffemissionen, die in das Kennfeld eingerastert werden, einem ähnlichen Glättungs- und Zeitverschiebungseffekt wie CO₂. Wenn also die Leistung für diese Einrasterung aus CO₂ berechnet wird, könnte die Zuordnung sogar besser sein als bei Verwendung des schnelleren Momentensignals. Somit kann die CO₂-Methode auch nach diesem Bewertungskriterium als sehr gut geeignet erachtet werden.

2.2 Optionen zur Auffüllung der Emissionskennfelder

Es wurden Optionen getestet, ob in Zukunft RDE-richtlinienkonforme RDE-Messungen erweitert werden sollen, um die Erzeugung von Emissionsfaktoren möglichst gut zu unterstützen. Grundsätzlich zeigte sich, dass bei „normal gefahrenen“ und RDE-richtlinienkonformen RDE-Messungen Bereiche mit hoher Motorleistung und Motordrehzahl speziell bei PKW nicht ausreichend oder gar nicht angefahren werden. Dies ist für Emissionsfaktoren für „normale“ Fahrten nicht relevant, da diese ja im Modell PHEM dann auch nicht in den extremeren Motorlastpunkten unterwegs sind. Ungenauigkeiten ergeben sich aber bei der Simulation der Emissionsfaktoren für Bergauf-Strecken, wo das HBEFA +2 %, +4 % und +6 % Steigung angibt. Diese Strecken bewegen sich häufiger in Bereichen hoher Motorleistung und Motordrehzahl und müssten somit aus den RDE-Daten extrapoliert werden. Extrapolationen sind bei Emissionen naturgemäß unsicher.

Es wurden zu diesem Thema ausgiebige Testfahrten mit zwei Diesel-PKW durchgeführt, die folgende Umfänge hatten:

- Option 1: Basis-RDE-Tests konform mit der RDE-Gesetzgebung auf drei Routen
- Option 2: Erweiterungsfahrten auf Passagen mit hoher Längsneigung

- Option 3: Erweiterungsfahrten mit Beschleunigungen bei ca. 65 % und 100 %
Gaspedalstellung bis Nenndrehzahl (sofern im gewählten Gang mit Verkehr und Tempolimit verträglich)

Die PHEM-Emissionskennfelder wurden dann einmal nur aus den Basis-RDE-Tests erzeugt und dann unter zusätzlicher Verwendung der Erweiterungsfahrten. Mit den unterschiedlichen Kennfeldern wurden alle Messfahrten simuliert und die Differenz zum Messwert bestimmt.

Tabelle 6 zeigt beispielhaft Ergebnisse für die Basis-RDE-Messung auf der Strecke Köflach mit den Erweiterungsfahrten. Die Erweiterungsfahrten wurden auf zwei Strecken getestet und im Ergebnis entsprechend beide Varianten gezeigt.

Es ist zu sehen, dass das Simulationsergebnis mit den Kennfeldern, die auch die Erweiterungsfahrten beinhalten, für die gesamte Testrunde nicht besser wird, als wenn nur mit dem Kennfeld aus der Basis-RDE-Fahrt simuliert wird. Die Simulationsergebnisse sind hier durch die Genauigkeit für die 90-minütige Basisfahrt dominiert, Abweichungen bei den wenigen Minuten Vollastbeschleunigungen bei den Erweiterungsfahrten sind für die gesamte Genauigkeit hier wenig relevant.

Tabelle 6: Abweichung Simulation zu Messung für die Gesamtrunde bestehend aus Basis-RDE-Messfahrt mit den Erweiterungsfahrten bei unterschiedlich gefüllten Emissionskennfeldern für Fahrzeug 2

Emission	Basis-RDE	Basis-RDE + Erweiterungsoption 1	Basis-RDE + Erweiterungsoption 2
CO ₂	-5 %	-5 %	-5 %
NO _x	2 %	15 %	6 %
CO	13 %	10 %	11 %

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse für eine Strecke, wo nur die kurzen Zeiträume der Erweiterungsfahrten mit PHEM simuliert wurden. Werden die Vollastbeschleunigungen aus dem Basis-RDE-Kennfeld simuliert, so ergeben sich Unterschätzungen der NO_x-Emissionen von 30 % bei diesem Testfahrzeug. Bei den anderen zwei Fahrzeugen mit geringerer Motorleistung blieben die Unterschätzungen jeweils unter 12 %. Wenn die Messdaten der Vollastbeschleunigungen in das Kennfeld integriert werden, sinkt die Unterschätzung bzw. kann sich auch zu einer Überschätzung drehen.

Tabelle 7: Abweichung Simulation zu Messung für die kurzen Teilstrecken mit Voll- und 2/3 Lastbeschleunigungen bei unterschiedlich gefüllten Emissionskennfeldern für Fahrzeug 2

Emission	Basis-RDE	Basis-RDE + Erweiterungsoption 1	Basis-RDE + Erweiterungsoption 2
CO ₂	-6 %	-6 %	-6 %
NO _x	-30 %	14 %	-9 %
CO	25 %	20 %	10 %

Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass solche zusätzlichen Fahrmanöver geringe Verbesserungen bringen, und diese auch nur bei der Simulation extremer Fahrmanöver. Für HBEFA ist das Standard-Testprogramm mit RDE-richtlinienkonformen Testfahrten nach derzeitigen Erkenntnissen ausreichend. Erweiterungen mit Volllastbeschleunigungen nach Ende einer RDE-richtlinienkonformen Testfahrt sind daher optional. Falls Volllastbeschleunigungen durchgeführt werden, können sie für HBEFA natürlich herangezogen werden. Die Messungen und Analysen zur Kennfeldauffüllung sind im Detail in einer Masterarbeit beschrieben (Klingler, 2016).

2.3 Optionen für die Kennfelderstellung unter Verwendung der CO₂-Interpolationsmethode und Optionen zur Simulation der Abgasnachbehandlung

Dieses Kapitel behandelt Optionen für die Kennfelderstellung sowie Optionen wie Emissionskennfelder von Fahrzeugen mit SCR und NSK am besten mit RDE-Messdaten bedatet und in weiterer Folge simuliert werden können. Da bei diesen NO_x-Minderungskonzepten die Abgastemperatur eine zentrale Rolle spielt, und diese von der Vorgeschichte des Zyklus abhängt, ist eine pure kennfeldbasierte Modellierung nicht ausreichend, um emissionsrelevante Abkühleffekte abzubilden.

Folgende Optionen wurden dazu getestet:

- ▶ Einfaches Emissionskennfeld für Emissionsniveau am Auspuff als Basis
- ▶ Rohemissionskennfeld, erzeugt aus RDE-Messungen am Auspuff mittels invertiertem generischen SCR-Wirkungsgradkennfeld
- ▶ Generisches Rohemissionskennfeld mit angepasstem SCR-Wirkungsgrad
- ▶ Abhängigkeit SCR-Wirkungsgrad von Abgastemperatur mit/ohne zusätzlicher Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit
- ▶ Abhängigkeit NSK-Konvertierung von NO_x-Speicherstand und Simulation der NSK-Regenerationsphasen
- ▶ Verwendung der RDE- bzw. Rollenmessdaten mit/ohne variabler Zeitverschiebung
- ▶ Fahrzeugspezifische Anpassung des generischen Kennfelds für die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode

Alle simulativen Untersuchungen zu den o.a. Varianten wurden mit dem Simulationstool PHEM durchgeführt. Als Inputdaten für die Simulation wurden Messdaten eines SUV Plug-In Hybridfahrzeugs mit 3.0 l und 190 kW Dieselmotor sowie einem 94 kW E-Motor herangezogen. Da dieses Fahrzeug der Abgasnorm Euro 6b über einen NSK, einen DPF mit SCR-Beschichtung sowie einen NH₃-Sperrkat verfügte, eignete es sich gut für die Untersuchung der erwähnten Optionen. Mit dem Fahrzeug wurde sechs Mal die Ries-Route mit PEMS gefahren. Mit dem PEMS-Messgerät AVL MOVE wurden die Emissionen CO₂, CO und NO_x am Auspuffende, im Weiteren als End-of-Tailpipe Emissionen bezeichnet, gemessen. Die Emissionsdaten wurden für die Untersuchungen zum Motorauslass zeitlich verschoben, um die Emissionen zur aktuellen Motorleistung zuordnen zu können. Die zeitliche Verschiebung der Emissionen ist unter Kapitel 2.3.7 beschrieben. Zusätzlich wurden über die OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs relevante

Messgrößen wie z.B. Motordrehzahl, Abgastemperatur vor SCR usw. aufgezeichnet. Über OBD konnten von diesem Fahrzeug keine Messdaten von Emissionen vor und nach NSK bzw. vor SCR ausgelesen werden. Aufgrund der baulichen Anordnung des Abgasnachbehandlungssystems konnten auch keine Sensoren verbaut werden. Emissionen vor und nach NSK- bzw. SCR-System sind notwendig, um den NSK- bzw. SCR-Wirkungsgrad ermitteln zu können. Da von diesem Fahrzeug der NSK- und SCR-Wirkungsgrad nicht bestimmt werden konnte, wurden für die Simulation generische NSK- bzw. SCR-Wirkungsgradkennfelder herangezogen. Dies stellt auch den typisch zu erwartenden Anwendungsfall für die PKW-Messdaten für das HBEFA dar, da für PKW im Allgemeinen nur End-of-Tailpipe Emissionen gemessen werden. Wirkungsgradverschlechterung durch Alterungseffekte der Katalysatoren wurde in den generischen Kennfeldern bereits berücksichtigt. Die Ergebnisse sowie Schlussfolgerungen der Untersuchungen werden nachfolgend beschrieben.

2.3.1 End-of-Tailpipe Emissionskennfeld

Bevor das entsprechende Emissionskennfeld mit den gemessenen End-of-Tailpipe Emissionen erstellt wurde, musste die Motorleistung mittels der CO₂-Interpolationsmethode sekundlich für alle Routen berechnet werden. Dafür wurde ein generisches Verbrauchskennfeld verwendet, das die entsprechende Technologie des Dieselmotors repräsentierte.

Mit der ermittelten Leistung konnte mit den Emissionsmessdaten ein Emissionskennfeld erstellt werden. Mit diesem wurden die einzelnen RDE-Fahrten nachsimuliert, indem Motordrehzahl und Motorleistung von jeder Fahrt vorgegeben wurden. Tabelle 8 zeigt die Abweichungen zwischen Simulation und Messung für CO₂, NO_x und CO.

Tabelle 8: Abweichung Simulation zu Messung von CO₂, NO_x und CO für RDE-Fahrten, simuliert mit End-of-Tailpipe Emissionskennfeld

Emission	Ries 1	Ries 2	Ries 3	Ries 4	Ries 5	Ries 6
CO ₂	1 %	2 %	1 %	0 %	-1 %	1 %
NO _x	63 %	-30 %	37 %	-8 %	24 %	-2 %
CO	11 %	-30 %	-17 %	1 %	18 %	36 %

Da mit der CO₂-Interpolationsmethode mit gemessener Motordrehzahl und CO₂ die Motorleistung aus einem generischen Verbrauchskennfeld berechnet wurde, und für die Nachrechnung wiederum Motordrehzahl und errechnete Motorleistung vorgegeben wurden, sieht man aus der CO₂-Abweichung den numerischen Interpolationsfehler.

Die gemessenen NO_x-Absolutwerte in g/km der einzelnen Strecken liegen in der Größenordnung von RDE-Stage 2 Fahrzeugen (CF = 1.43). Die NO_x-Abweichungen zwischen Simulation und Messung schwanken zwischen 62,8 % und -30,4 %, im Mittel über alle RDE-Fahrten ergibt sich eine Abweichung von 13,8 %. Da im End-of-Tailpipe Emissionskennfeld indirekt der NSK, dessen Regenerationsphasen sowie auch der SCR abgebildet wurden, sind diese Abweichungen erklärbar.

Die CO-Abweichungen liegen zwischen 35,9 % und -30,4 %, das Mittel über alle Fahrten liegt bei 3,2 %. Die Abweichungen lassen sich durch das geringe Absolutniveau der CO-Emissionen erklären. Geringe Abweichungen in den absoluten CO-Werten resultieren in größeren prozentuellen Abweichungen.

2.3.2 NSK-Konvertierung mit Simulation der NSK-Regenerationsphasen

Es wurde versucht, die Einspeicherung von NO_x im NO_x -Speicherkatalysator, der bei steigender Speicherbelegung zunehmende NO_x -Schlupf sowie die NSK-Regeneration mit einem vereinfachten, kennfeldbasierten Modell abzubilden. Wie auch beim SCR ist die Abgastemperatur vor NSK bzw. der Massenstrom durch den NSK für die NO_x -Reduktion ausschlaggebend. Zusätzlich hat die Beladung im NSK erheblichen Einfluss auf die NO_x -Einspeicherung. Nimmt die Beladung zu, so nimmt auch der NO_x -Schlupf zu. Der Verlauf des Schlupfs kann in Abhängigkeit von Beladung, Abgastemperatur und Massenstrom in einem Kennfeld hinterlegt werden. Das Kennfeld soll das durchschnittliche Verhalten eines NSK widerspiegeln.

Die Simulation der NSK-Regeneration erfolgt ab einer definierten Beladung des NSK. Zusätzlich muss die Bedingung erfüllt sein, dass der Betriebspunkt innerhalb eines vordefinierten Bereichs liegt. In diesem Bereich kann der Motor kurzfristig fett betrieben werden, was für die NSK-Regeneration Voraussetzung ist. In der Realität sind von den Herstellern meist komplexere Regenerationsstrategien hinterlegt. Damit ergeben sich über den NSK NO_x -Minderungen, die nicht nur von Abgastemperatur und Volumenstrom, sondern auch von der Vorgeschichte im Zyklus maßgeblich abhängen.

Des Weiteren ist die Kenntnis über die absolute NO_x -Regenerationsrate in g/s notwendig, die ebenfalls aus einem generischen Kennfeld errechnet wird.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Vielzahl an generischen Daten das Messergebnis in der Simulation nicht in allen Fällen repräsentativ nachgebildet werden kann. Vor allem durch die generischen Regenerationsphasen können größere NO_x -Abweichungen zwischen Simulation und Messung auftreten. In Tabelle 9 ist die Abweichung einmal mit und ohne detaillierter NSK-Simulation für den Plug-In SUV auf der gleichen Route dargestellt. Ohne detaillierte NSK-Simulation heißt, keine Berücksichtigung des NSK in der Simulation, sondern indirekte Abbildung im End-of-Tailpipe Emissionskennfeld. Detaillierte NSK-Simulation steht für die Berücksichtigung des NSK-Modells in der Simulation. Dabei wurden von allen RDE-Fahrten die gemessenen NO_x mittels invertiertem SCR-Kennfeld und invertiertem NSK-Modell auf Engine-Out Emissionsniveau zurückgerechnet. Anschließend wurde ein Emissionskennfeld erstellt. Mit diesem Kennfeld, dem NSK- sowie SCR-Modell wurden die RDE-Fahrten unter Vorgabe von Motordrehzahl und Motorleistung simuliert. Für dieses Fahrzeug ist die Abweichung mit Berücksichtigung der NSK-Simulation größer als ohne. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Fahrzeug mit unbekannten Regenerationsalgorithmen der NSK in der Simulation nicht sicher repräsentativ abgebildet werden kann. Für die Bestimmung der Regenerationsalgorithmen wird eine Vielzahl an Parametern benötigt, wie z.B.:

- Lambda-Signale vor und nach NSK zum Erkennen der Regeneration
- Betriebspunkte, in welchen die Regeneration stattfindet
- Schwellwerte, ab welcher NO_x -Beladung der NSK regeneriert wird

Da diese Parameter zusammen mit dem NSK-Wirkungsgrad nur mit großem zeitlichen und finanziellen Aufwand für PKW mit NSK zu ermitteln wären, erscheint daher eine detaillierte Simulation des NSK zur Bestimmung der Emissionsfaktoren im HBEFA nicht sinnvoll. Die Konvertierungsraten des NSK sollen implizit über das End-of-Tailpipe Emissionskennfeld abgebildet werden.

Tabelle 9: Abweichung Simulation zu Messung für eine Route mit und ohne NSK-Simulation

Simulation	Abweichung
NO _x -Abweichung [%] ohne NSK-Simulation	-1 %
NO _x -Abweichung [%] mit NSK-Simulation	-54 %

2.3.3 Option zur fahrzeugspezifischen Anpassung des generischen Motorkennfelds

Das für die CO₂-Leistungsinterpolation notwendige CO₂-Kennfeld wird bis dato durch ein generisches Motorkennfeld abgebildet, da das Verbrauchsmotorkennfeld (könnte einfach in CO₂-Kennfeld umgerechnet werden) von den Fahrzeugherstellern nicht zur Verfügung gestellt wird. Daher soll das generische CO₂-Kennfeld die Motortechnologie des untersuchten Fahrzeuges so gut wie möglich repräsentieren. In den Arbeiten zum HBEFA 4.1 hat sich gezeigt, dass das generische Verbrauchskennfeld großteils gute Ergebnisse liefert. Die Abweichung zwischen fahrzeugspezifischem und generischem Kennfeld ist allerdings je nach Kfz unterschiedlich. Die Differenz kann relativ genau bestimmt werden, wenn ein Rollentest mit dem generischen Kennfeld nachgerechnet wird. Durch die jeweils bekannten Fahrzeugeinstellungen am Rollenprüfstand kann dafür derselbe Zyklus im Simulationstool PHEM unter Verwendung des generischen Basiskennfeldes simuliert werden. Die Differenz zwischen Messung und Simulation zeigt die kennfeldbedingte Abweichung, sowie auch Effekte von in der Simulation nicht genau bekanntem Leistungsbedarf der Nebenaggregate und Verlusten im Antriebsstrang, die in PHEM auch mittels generischer Verlustfunktionen simuliert werden.

Neben der Analyse der Abweichungen zwischen realem und generischem Kennfeld kann mittels Rollenprüfstandtests auch eine fahrzeugspezifische Anpassung am generischen Kennfeld erfolgen. Der simulierte sowie der gemessene Verbrauch kann über die Motorleistung und über die Motordrehzahl aufgetragen werden. Als Zyklus wurde hier jeweils der CADC gewählt, da dieser die dynamischen Straßenmessungen gut repräsentiert. Die Mess- sowie Simulationsdaten werden für die Anpassung über 20 s gemittelt. Damit wird sichergestellt, dass etwaige Zuordnungsfehler von CO₂ zum Leistungssignal nur geringen Einfluss auf die Anpassung haben. Wird das CO₂ über die Motorleistung jeweils für Messung und Simulation aufgetragen, können zugehörige Trendlinien erstellt werden. Sowohl für CO₂ über Motorleistung wie auch CO₂ über Motordrehzahl können dann aus den Trendlinien Differenzfunktionen gebildet werden. Werden diese Differenzfunktionen vom generischen Kennfeld subtrahiert bzw. addiert, so ergibt sich das fahrzeugspezifisch angepasste Kennfeld.

Die beschriebene Methode wurde bei insgesamt vier Fahrzeugen angewandt. Exemplarisch sind hier die Ergebnisse für ein Dieselfahrzeug des Segments D mit 2.0l, 103 kW und Euro 5 gezeigt. Für die Ergebnisse der weiteren Fahrzeuge sei auf (Matzer, 2017) verwiesen. Die nachfolgende Tabelle liefert für das erwähnte Dieselfahrzeug die CO₂- und NO_x-Abweichung zwischen Simulation und Messung für den CADC, einmal simuliert mit dem generischen CO₂-Basiskennfeld sowie auch mit dem angepassten fahrzeugspezifischen Kennfeld. Die CO₂-Abweichungen mit dem angepassten Kennfeld liegen zwischen -6 % und 2 %, die NO_x-Abweichungen zwischen 7 % und -4 %. Für alle vier untersuchten Fahrzeuge liegen die CO₂-Abweichungen mit dem angepassten Kennfeld zwischen +/- 6 %, die NO_x-Abweichungen zwischen +/- 20 %.

Tabelle 10: Abweichungen CO₂ und NO_x im CADC

Zyklus	Abweichung CO ₂ generisches Basiskennfeld gegenüber Messung [%]	Abweichung CO ₂ kalibriertes Kennfeld gegenüber Messung [%]	Abweichung NO _x generisches Basiskennfeld gegenüber Messung [%]	Abweichung NO _x kalibriertes Kennfeld gegenüber Messung [%]
CADC urban	-32 %	-6 %	-19 %	1 %
CADC rural	-16 %	2 %	-12 %	7 %
CADC motorway	-14 %	-3 %	-16 %	-4 %

Die beschriebene Methode kann für HBEFA für jedes Fahrzeug für sich angewendet werden, Voraussetzung ist ein gemessener dynamischer Zyklus (z.B. CADC oder ERMES) mit betriebswarmem Motor bei Zyklusstart am Rollenprüfstand. Falls kein dynamischer Zyklus gemessen wird, können für HBEFA auch generische CO₂-Kennfelder für die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode herangezogen werden. Die Unsicherheiten werden dadurch aber größer. So lagen bei dem oben gezeigten Dieselfahrzeug zum Zeitpunkt dieser Arbeiten durch die Verwendung des generischen CO₂-Kennfelds CO₂-Abweichungen zwischen +/- 35 % und NO_x-Abweichungen zwischen +/- 20 % vor. Bei den anderen drei Fahrzeugen in (Matzer, 2017) lagen mit dem generischen CO₂-Kennfeld geringere CO₂-Abweichungen vor. Im Mittel betrugen die Abweichungen -15 %. Die NO_x-Abweichungen lagen bei den drei Fahrzeugen mit generischem CO₂-Kennfeld bei +/- 30 %. In den generischen CO₂-Kennfeldern für Diesel- und Otto-PKW wurden im Rahmen des Projekts „Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs“ (Eisenmann, 2019), finanziert vom UBA Deutschland, u.a. noch weitere Motortechnologien berücksichtigt, sodass die CO₂-Abweichung mit generischen Kennfeldern unter +/- 10 % gesenkt werden konnte.

2.3.4 Engine-Out Emissionskennfeld, erzeugt aus RDE-Messung am Auspuff mittels invertiertem Default SCR-Wirkungsgradkennfeld

Die Untersuchungen zeigten, dass die Erzeugung eines Rohemissionskennfelds mit invertiertem Default SCR-Wirkungsgradkennfeld riskant ist. Hohe NO_x-Konvertierungsraten des SCR können zu hohen Engine-Out NO_x führen, da das Emissionsniveau am Auspuff mittels Division durch eine sehr kleine Zahl in Engine-Out Emissionen umgewandelt wird. Einzelne Zeitschritte, wo die reale Konvertierung deutlich niedriger ist, als die des Default-SCR-Kennfelds, führen dann zu sehr hohen Engine-Out Emissionen, die in Realität gar nicht vorliegen. Das Rohemissionskennfeld sollte daher aus Messdaten vor SCR bedatet werden. Da NO_x vor SCR aber nur für wenige Fahrzeuge gemessen wurde, ist es insgesamt sinnvoll, die normalen Fahrsituationen mit End-of-Tailpipe Kennfeldern zu simulieren, da die dazu nötigen Daten für alle gemessenen Kfz vorliegen. Für Stauzyklen – bzw. generell, wenn die SCR-Temperatur soweit absinkt, dass die NO_x-Konvertierung nachlässt – ergab sich als sinnvollste Methode, die relativen Änderungen zum Normalniveau mit den verfügbaren Rohemissionskennfeldern und dem SCR-Modell zu simulieren und die relativen Änderungen auf die End-of-Tailpipe Ergebnisse der Flotte zu übertragen. Dies wurde im Simulationstool PHEM umgesetzt und wird im Kapitel 2.3.8 näher beschrieben.

2.3.5 Default-Engine-Out Kennfeld mit angepasstem SCR-Wirkungsgrad

Die Verwendung von Default-Engine-Out Kennfeldern und die Berechnung des SCR-Wirkungsgrades hat sich im Rahmen dieses Projekts als stabilere Methode als die Verwendung von Default-SCR-Konvertierungskennfeldern erwiesen. Für die Simulation von kritischen Fahrsituationen mit detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung für Euro 6 Dieselfahrzeuge soll daher ein Default-Engine-Out Kennfeld vorgegeben werden. Das Default-Engine-Out Kennfeld wird u.a. aus den verfügbaren Messungen von den unter Kapitel 4 untersuchten Dieselfahrzeugen der Abgasnorm Euro 6a,b abgeleitet, da in der Regel für Standard-RDE-Messungen keine Engine-Out Emissionen verfügbar sind.

2.3.6 Abhängigkeit SCR-Wirkungsgrad von Abgastemperatur mit/ohne zusätzlicher Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit

Derzeit umfasst das verwendete SCR-Kennfeld die Abhängigkeit von SCR-Temperatur und Raumgeschwindigkeit. Untersuchungen zu Varianten ohne Raumgeschwindigkeit wurden nicht durchgeführt. Die Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit ist technisch abgesichert, so dass ein Ansatz ohne Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit aus heutiger Sicht nicht sinnvoll erscheint.

2.3.7 Verwendung der RDE- bzw. Rollenmessdaten mit/ohne variabler Zeitverschiebung

Massenemissionen werden aus Massenstrom und Konzentration an jener Stelle berechnet, an der das Abgas des Fahrzeugs für die Messgeräte entnommen wird. Für PEMS-Messgeräte erfolgt die Entnahme des Abgases in der Regel unmittelbar nach dem Fahrzeugauspuff. Am Rollenprüfstand ist die Entnahmestelle durch das oft verwendete Messprinzip der Abgasverdünnung mit Frischluft in einem CVS-Tunnel deutlich weiter entfernt. Da die Massenemissionen an der Entnahmestelle berechnet werden, müssen diese danach zur Motorleistung zugeordnet werden, indem die Gaslaufzeit von Motorauslass bis Entnahmestelle korrigiert wird. Da diese Gaslaufzeit aber vom Betriebspunkt des Motors abhängt (z.B. Leerlauf oder Volllast), ist die oft verwendete konstante Zeitverschiebung bei sekundlicher Betrachtung der Messwerte nicht korrekt. Es werden dabei im Allgemeinen Niederlastteile (wenig Abgasvolumenstrom, langsamer Transport durch die Leitungen) zu wenig, Hochlastteile dagegen zu viel verschoben. Der Einfluss der Zeitverschiebung ist umso größer, je größer das Volumen zwischen Motorauslass und Entnahmestelle ist. Daher wurde am IVT der TU Graz eine variable Zeitverschiebung entwickelt, die für die Verschiebung der Massenemissionen von der Entnahmestelle bis zum Motorauslass genau diese unterschiedlichen Gaslaufzeiten korrekt berücksichtigt. Bevorzugt sollen daher Rollenprüfstands- und RDE-Messdaten mit der variablen Zeitverschiebung ausgewertet werden. Allerdings kann es bei Prüfstandmessungen vorkommen, dass aufgrund des Messprinzips kein Abgasmassenstrom bekannt ist. Dieser wird aber benötigt, um mit der variablen Zeitverschiebung auswerten zu können. In solchen Fällen soll dann auf die konstante Zeitverschiebung zurückgegriffen werden. Sowohl die variable als auch die konstante Zeitverschiebung sind im Auswertetool des IVT implementiert, weshalb der zeitliche Aufwand sowie auch der Datenaufwand für die Auswertung durch den Bearbeiter derselbe ist. (Weller, 2016)

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit bei der Simulation von Schadstoffemissionen bei konstanter Zeitverschiebung von Straßenmessungen mit PEMS gegenüber der variablen Zeitverschiebung um ca. 2 %-Punkte sinkt. Bei PKW-Rollenprüfstandtests sinkt die Genauigkeit aufgrund des Messprinzips mittels CVS-Tunnel und den damit einhergehenden größeren Rohrvolumina um ca. 5 %-Punkte. (Hirt, 2019)

2.3.8 Simulation mit detaillierter Berücksichtigung des SCR-Abgasnachbehandlungssystems

Der Vorteil der detaillierten Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems im Simulationstool PHEM liegt darin, dass z.B. Stadtzyklen mit Stop&Go Verkehr (wie sie auch im HBEFA vorkommen) sowie auch lange Berg- bzw. Talfahrten genauer simuliert werden können. Diese Verkehrssituationen bzw. geografische Gegebenheiten können erheblichen Einfluss auf die NO_x -Konvertierung bei Diesel-Fahrzeugen mit SCR haben, da sie das Temperaturniveau im Abgasnachbehandlungssystem beeinflussen. Wenn dabei zu niedrige Abgastemperaturen vor SCR auftreten (ca. $< 200^\circ\text{C}$, je nach SCR-Typ), sinkt einerseits der NO_x -Konvertierungsgrad stark ab und andererseits kann auch kein AdBlue mehr dosiert werden. Bleiben die Abgastemperaturen länger auf niedrigem Niveau, so ist das im SCR gespeicherte NH_3 verbraucht und im SCR findet keine NO_x -Konvertierung mehr statt. Durch die Verwendung eines Rohemissionskennfelds mit einem SCR-Konvertierungskennfeld über SCR-Temperatur und Raumgeschwindigkeit können solche Auskühleffekte simuliert werden. Physikalisch ist ein Auskühlen des SCRs bei niedriger Motorlast zu erwarten, allerdings können die Motoren diesen Effekt durch aktive Heizstrategien zumindest teilweise kompensieren. Mit Auswertung der Messdaten sowie der Simulationsdaten konnten folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Die Berechnung kritischer Fahrsituationen für Diesel-PKW mit SCR ist nur durch Simulation mit detaillierter Abgasnachbehandlung sicherzustellen, hingegen kann herkömmliches Fahren auch mit End-of-Tailpipe Kennfeldern repräsentativ abgebildet werden. Aus den Erkenntnissen wird daher für das HBEFA 4.1 Update vorgeschlagen, herkömmliche Fahrzyklen nach wie vor mit End-of-Tailpipe Kennfeldern abzubilden. Nur kritische Fahrsituationen für Diesel-Fahrzeuge mit SCR (Abgasnorm Euro 6a und neuer) sollen mit detaillierter Abgasnachbehandlung simuliert werden, da dies einen Mehraufwand an Zeit ohne Vorteile in der Genauigkeit gegenüber der einfachen End-of-Tailpipe Simulation bedeutet. Die Umsetzung der detaillierten Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems ist im Detail im HBEFA 4.1 Endbericht (Matzer, 2019) beschrieben.
- Die gemessenen Stauzyklen mit einer Länge von etwa 25 Minuten zeigten, dass auch am Ende der Stauzyklen noch eine NO_x -Reduktion bei den PKW vorlag. Aus den detaillierten Messungen des Versuchsfahrzeugs mit SCR kann daher abgeleitet werden, dass während des Stauzyklus ausreichend NO_x -Reduktionsmittel NH_3 im SCR gespeichert war, da durch die niedrigen Abgastemperaturen während der Stauzyklen kein Reduktionsmittel mehr aus AdBlue erzeugt werden konnte. Um diese Messdaten zu validieren, wurde ein NH_3 -Speichermodell entwickelt, das zeitaufgelöst das im SCR gespeicherte NH_3 aus der Reaktion mit NO und NO_2 berechnet. Das NH_3 -Speichermodell bestätigt, dass ausreichend NH_3 in den gemessenen Zyklen vorlag. Dieses Modell wurde in PHEM implementiert, sodass es für das HBEFA 4.1 Update verwendet werden konnte. Die SCR-Temperatur wird dabei aus Abgasmassenstrom und -temperatur sowie den Wärmeübergängen zwischen Abgas und Abgasanlage simuliert. Das NH_3 -Speichermodell aktiviert sich automatisch, wenn die berechnete SCR-Temperatur unter den Schwellwert für AdBlue-Dosierung fällt. Mit dem Modell können auch Stauzyklen mit einer Dauer von mehr als 30 Minuten (erwartungsgemäß sollte bei diesen Zyklen das gespeicherte NH_3 dann vollständig aufgebraucht worden sein) physikalisch richtig abgebildet werden.

- ▶ Um mit einer detaillierten Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung kritische Fahrsituationen zu simulieren, werden entsprechende Anfangsbedingungen (z.B. Starttemperaturen des Abgasnachbehandlungssystems) am Beginn des Zyklus benötigt. Dafür sollen repräsentative Konditionierungszyklen den eigentlichen Zyklen vorgeschaltet werden. Von den vorgeschalteten Konditionierungszyklen werden keine Emissionsfaktoren berechnet, sie dienen lediglich zur Bestimmung der Anfangsbedingungen der betrachteten Zyklen. Im Update der Zyklen für das HBEFA 4.1 durch Heinz Steven wurde die Vorkonditionierung bereits entsprechend berücksichtigt.
- ▶ Bei den untersuchten PKW konnte im Zuge der Stauzyklen auf der Teststrecke keine Heizstrategie des Motors erkannt werden, zumindest nicht für die betrachtete Zyklusdauer. Daraus kann abgeleitet werden, dass vorerst kein Motorheizen bei Fahrzyklen mit niedrigen Abgastemperaturen für die konventionellen Euro 6a,b Diesel-PKW im HBEFA berücksichtigt werden muss. Da bis dato noch keine Abgastemperaturmessdaten von Euro 6d-Temp und Euro 6d Diesel-PKW verfügbar sind, wird vorerst auch für diese Euro-Klassen kein Motorheizen bei Fahrzyklen mit niedrigen Abgastemperaturen angenommen.

3 Anforderungskatalog für Kfz-Emissionsmessungen für HBEFA

Die aus den Messungen und Methodenuntersuchungen gewonnenen Anforderungen sind in einem „Best Practice“ Katalog (Matzer, 2016b) zusammengefasst, welcher aus einem Textdokument und zwei Excel-Dateien besteht. Das Textdokument definiert Mindestanforderungen sowie optionale Zusatzwünsche für „Best Practice“ bei Rollenprüfstand- und RDE-Tests, wenn die Daten für HBEFA bzw. PHEM genutzt werden sollen.

Die beiden Excel-Dateien enthalten weitere Informationen. Eine dient zur Auflistung der gemessenen Kfz (Information für alle ERMES-Mitglieder zur Vermeidung ungewollter Doppeltests) und die andere zeigt das Normformat, mit denen Messergebnisse an die ERMES-Datenbank sowie an PHEM übergeben werden sollen.

Tabelle 11 zeigt die Inhalte, die in diesem Paket beschrieben sind.

Tabelle 11: Anforderungskatalog für Kfz-Emissionsmessungen (Matzer, 2016b)

Teilverfahren	Kurzbeschreibung
Equipment Checks	Vergleich PEMS mit Analysatoren Rollenprüfstand
Fahrzeug	Verwendung definierter generischer Werte für Fahrwiderstände am Rollenprüfstand, sofern keine Kfz Real-World-Daten vorhanden sind. Falls möglich, in Anlieferungszustand messen, um Bild der Realität zu erzeugen. Zustand bei Messung (as received, after service, new,...) und eventuelle emissionsrelevante Defekte dokumentieren.
Testzyklen	Mindestanforderung Rolle: neben NEFZ oder WLTC zumindest ERMES oder CADC. Mindestanforderung RDE-Tests: wie in RDE-Gesetzgebung vorgeschrieben. Vollastbeschleunigungen optional. Zusätzlich „Kurztest“ vor Losfahren zur Analyse der Zeitverzögerung bzw. des Volumens der Abgasanlage. Wenn möglich, definierte Beladung verwenden (zwei Fahrer + PEMS bei PKW, 25 % bei LNF, 50 bis 60 % bei SNF)
Messsignale	Mindestanforderung für Rolle: CO ₂ , NO _x , CO, Motordrehzahl, Geschwindigkeit, Umgebungszustand (Temperatur, Druck), Information ob Warm- oder Kaltstart. Mindestanforderung für PEMS: zusätzlich noch GPS-Koordinaten. Weitere optional gemäß Detailliste im Paket.

4 PKW-Messungen

Mit den ausgewählten PKW wurden Messungen am PKW-Rollenprüfstand sowie RDE-Messungen durchgeführt. Die Vorteile der PKW-Rollenprüfstandmessung kompensieren dabei die Nachteile der RDE-Messung und vice versa. So können z.B. reproduzierbare Emissionsmessungen bei definierten Umgebungsbedingungen, wie etwa Kaltstarts bei definierten Temperaturen, am PKW-Rollenprüfstand durchgeführt werden. Die stationären Messgeräte des PKW-Rollenprüfstands umfassen mehr Abgaskomponenten (HC, nicht limitierte Komponenten) und sind auch genauer als jene der mobilen Systeme. Allerdings sind Messungen am PKW-Rollenprüfstand mit höherem Aufwand und Kosten verbunden. Die Motorbetriebspunkte von einer RDE-Messung decken im Allgemeinen einen größeren Teil des Motorkennfelds ab. Im Folgenden sind die verwendeten Messeinrichtungen des PKW-Rollenprüfstands, das PEMS-Messsystem sowie auch die vermessenen PKW näher beschrieben.

4.1 Messtechnik und Auswertetool

4.1.1 Rollenprüfstand für PKW

Für die Rollenprüfstandmessungen wird das jeweilige Fahrzeug am Rollenprüfstand aufgebaut. Der Rollenprüfstand kann Fahrwiderstand, Steigung sowie Massenträgheit des Fahrzeugs simulieren.

Der Prüfstand kann im stationären und instationären Betrieb betrieben werden, wobei Brems- und Schleppbetrieb möglich ist. Die Vorgabe der Soll-Geschwindigkeit und Gangvorgabe erfolgt am Fahrerleitsystem. In Tabelle 12 sind die wichtigsten Leistungsdaten des Prüfstands ersichtlich.

Tabelle 12: Leistungsdaten des PKW-Rollenprüfstands

PKW-Rollenprüfstand	
Bremse	56 kW Gleichstrommaschine 100 kW Wechselstrommaschine
Max. Geschwindigkeit	160 km/h
Regelbare Temperatur im Prüfraum	-30 °C bis 40 °C
Simulierbare Fahrzeugmasse	567 bis 2325 kg
CVS-Durchfluss	6, 10 oder 20 m ³ /min

Die Messung der gasförmigen Emissionen CO₂, CO, HC und NO_x erfolgt über eine CVS-Anlage und Abgasanalysatoren der Firma AVL (AMA i60). Die Emissionen werden als Beutelwert und im zeitlichen Verlauf erfasst und ausgegeben. Aus dem verdünnten Abgasvolumenstrom wird die Partikelmasse gravimetrisch erfasst. Für die Messung der Partikelanzahl wird ein Teilstrom einem Sekundärverdünnungssystem und anschließend einem CPC zugeführt.

Durch ein Prüfstandsinterface können auch Fahrzeugdaten über die OBD-Schnittstelle, wie z.B. Motordrehzahl, während der Messung mitaufgezeichnet werden.

4.1.2 Portable Emission Measurement System für PKW

Das portable Emissionsmessgerät (auch als On-Board Messsystem bezeichnet) kann im bzw. am Fahrzeug angebracht werden und für Messung von Emissionen am Rollenprüfstand, aber vor allem für die Messung von Emissionen im realen Straßenverkehr verwendet werden. Als Messsystem wird bei der FVT ein Gas- sowie PN-PEMS der Firma AVL verwendet (Markenname: AVL MOVE). Hauptbestandteile sind die Analysatoren, das EFM sowie die System Control. Mit dem Gas-PEMS können die Emissionen CO₂, NO, NO₂ sowie CO aufgezeichnet werden. Mit dem PN-PEMS kann zusätzlich die Partikelanzahl gemessen werden. Das AVL MOVE entnimmt das Abgas am Auspuffende unverdünnt. Neben den Emissionen kann auch eine Vielzahl an weiteren Parametern über die OBD-Schnittstelle (z.B. Motordrehzahl) bzw. mittels der mobilen Wetterstation (z.B. Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck) aufgezeichnet werden.

4.1.3 Auswertetool

Die Auswertung der Messdaten für RDE-Messung sowie PKW-Rollenprüfstandmessungen erfolgt mit einem selbst entwickelten Auswertetool, dem sogenannten ERMES-Tool. Dieses rechnet aus den gemessenen Konzentrationen in Volumenprozent und dem Massenstrom die Massenemissionen und korrigiert dabei auch die Gaslaufzeit vom Motor bis hin zur Emissionsmessstelle entsprechend der momentanen Abgasvolumenströme. Die Ausgabe der Emissionen erfolgt modal sowie auch als Zyklusmittelwert in g/h bzw. g/km.

4.2 Vermessene PKW

Im Nachfolgendem werden die im Rahmen dieses Projekts vermessenen Fahrzeuge, sowie die gemessenen Zyklen am Rollenprüfstand sowie auf der Straße beschrieben. Des Weiteren wird auf die Messergebnisse eingegangen.

4.2.1 Ausgewählte Fahrzeuge

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden folgende PKW und leichte Nutzfahrzeuge für die Messungen ausgewählt:

- ▶ VW Sharan 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- ▶ Peugeot 508 SW, Diesel, Euro 6b
- ▶ Skoda Superb 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- ▶ Audi A4 Avant 2.0 TDI, Diesel, Euro 6b
- ▶ VW Golf 1.6 TDI, Diesel, Euro 6b
- ▶ Renault Master, Diesel, Euro 5b (leichtes Nutzfahrzeug)
- ▶ Mini Cooper, Otto, Euro 6b

Im Rahmen eines Ausstockungsantrags vom Auftraggeber wurden zwei zusätzliche Fahrzeuge vermessen, die im Rahmen des sogenannten VW-Dieselskandals vom Pflichtrückruf EA 189 betroffen waren:

- ▶ VW Golf Variant 1.6 TDI, Diesel, Euro 5b
- ▶ VW Passat Kombi 2.0 TDI, Diesel, Euro 5b

Im Zuge der Pflichtrückrufaktion wurden für diese beiden Fahrzeuge folgende Arbeiten in der VW-Fachwerkstätte durchgeführt:

- a) Beim VW Golf Variant 1.6 TDI wurde ein Strömungsgleichrichter sowie Schwingungsdämpfer eingebaut und ein Update der Motorsteuerungssoftware durchgeführt. Es erfolgten sonst keine weiteren Arbeiten.
- b) Beim VW Passat Kombi 2.0 TDI wurde ein Softwareupdate durchgeführt, Hardwareänderungen waren für dieses Fahrzeug nicht vorgesehen. Es erfolgten sonst keine weiteren Arbeiten.

Nachfolgend sind die wichtigsten Fahrzeugdaten aller neun Versuchsfahrzeuge tabellarisch angeführt. Aufgrund des Datenumfangs sind die Fahrzeugdaten auf drei Tabellen aufgeteilt.

Tabelle 13: Fahrzeugdaten, Teil 1

Fahrzeughersteller und Modell	Fahrzeug-kategorie und Klasse	Genehmigungs-datum	Motor-technologie	Emissions-klasse	Kilometer-stand bei Mess-serienstart [km]
VW Sharan 2.0 TDI	M	14.10.2015	Diesel	Euro 6b	1000
Peugeot 508 SW	M	09.10.2015	Diesel	Euro 6b	12000
Skoda Superb 2.0 TDI	M	21.07.2016	Diesel	Euro 6b	15800
Audi A4 Avant 2.0 TDI	M	17.06.2016	Diesel	Euro 6b	170
VW Golf 1.6 TDI	M	27.03.2017	Diesel	Euro 6b	5900
VW Golf Variant 1.6 TDI	M	12.07.2011	Diesel	Euro 5b	69300
VW Passat Kombi 2.0 TDI	M	09.05.2011	Diesel	Euro 5b	120000
Renault Master 2.3 dCi	N1 Klasse 3	11.12.2014	Diesel	Euro 5b	21000
Mini Cooper	M	09.02.2016	Otto	Euro 6b	20000

Tabelle 14: Fahrzeugdaten, Teil 2

Fahrzeughersteller und Modell	DIN-Leermasse [kg]	Nennleistung [kW] @Drehzahl [U/min]	Getriebe	Technologien zur Senkung der Schadstoffemissionen
VW Sharan 2.0 TDI	1821	110 @3500	6-Gang manuelles Getriebe	AGR sowie Oxi-Kat mit DPF+SCR und NH ₃ -Sperrkat
Peugeot 508 SW	1445	88 @3500	6-Gang Automatik-getriebe	AGR sowie Oxi-Kat und DPF + SCR
Skoda Superb 2.0 TDI	1532	140 @4000	6-Gang DSG	AGR sowie Oxi-Kat mit DPF + SCR und NH ₃ -Sperrkat

Fahrzeughersteller und Modell	DIN-Leermasse [kg]	Nennleistung [kW] @Drehzahl [U/min]	Getriebe	Technologien zur Senkung der Schadstoffemissionen
Audi A4 Avant 2.0 TDI	1550	90 @3500	6-Gang manuelles Getriebe	AGR sowie Oxi-Kat mit DPF + SCR und NH ₃ -Sperrkat
VW Golf 1.6 TDI	1305	66 @2750	5-Gang manuelles Getriebe	AGR sowie NSK mit DPF
VW Golf Variant 1.6 TDI	1370	66 @4200	5-Gang manuelles Getriebe	AGR sowie Oxi-Kat und DPF
VW Passat Kombi 2.0 TDI	1526	103 @4200	6-Gang DSG	AGR sowie Oxi-Kat und DPF
Renault Master 2.3 dCi	2613	92 @3500	6-Gang manuelles Getriebe	AGR sowie Oxi-Kat und DPF
Mini Cooper	1085	100 @4400	6-Gang manuelles Getriebe	3-Wege-Kat

Tabelle 15: Fahrzeugdaten, Teil 3

Fahrzeughersteller und Modell	Bereifung bei den durchgeführten Messungen
VW Sharan 2.0 TDI	215/ 60 R16 Continental ContiPremiumContact 2 (Sommerreifen)
Peugeot 508 SW	215/ 60 R16 Michelin Energy Saver + (Sommerreifen)
Skoda Superb 2.0 TDI	235/ 50 R19 Pirelli Cinturato P7 (Sommerreifen)
Audi A4 Avant 2.0 TDI	225/ 50 R17 Hankook Ventus S1 evo (Sommerreifen)
VW Golf 1.6 TDI	205/ 55 R16 Semperit Speed-Grip 3 (Winterreifen)
VW Golf Variant 1.6 TDI	205/ 55 R16 Hankook Ventus prime 2 (Sommerreifen)
VW Passat Kombi 2.0 TDI	205/ 55 R16 Dunlop Winter Sport 5 (Winterreifen)
Renault Master 2.3 dCi	225/ 65 R16 (Reifenhersteller und Modell nicht verfügbar)
Mini Cooper	195/ 55 R16 Pirelli Winter 210 SnowControl Serie 3 (Winterreifen)

4.2.2 Messprogramm

Nachfolgende Tabelle enthält das durchgeführte Messprogramm mit den neun Fahrzeugen.

Tabelle 16: Durchgeführtes Messprogramm

Fahrzeug	Messungen am PKW-Rollenprüfstand	Messungen auf der Straße	Messungen auf abgesperrter Teststrecke
VW Sharan 2.0 TDI	2x NEFZ, 2x WLTC, 2x CADC, 1x RWC	4x Ries, 2x Arzberg	-
Peugeot 508 SW	2x NEFZ, 2x WLTC, 2x CADC, 1x RWC	4x Ries, 2x Arzberg	-
Skoda Superb 2.0 TDI	2x NEFZ, 2x WLTC, 2x CADC, 1x RWC	4x Ries, 2x Arzberg	-
Audi A4 Avant 2.0 TDI	-	4x Ries, 3x Arzberg, 2x Deutschlandsberg, 1x Stadtzyklus	5x Stauzyklus
VW Golf 1.6 TDI	2x NEFZ, 2x WLTC, 1x CADC, 1x ERMES, 1x RWC	4x Ries, 4x Arzberg	2x Stauzyklus
VW Golf Variant 1.6 TDI	2x NEFZ, 2x NEFZ+, 2x CADC, 2x RWC	4x Ries	-
VW Passat Kombi 2.0 TDI	2x NEFZ, 2x NEFZ+, 2x CADC, 2x RWC	4x Ries	-
Renault Master 2.3 dCi	-	7x Ries	-
Mini Cooper	2x NEFZ, 2x WLTC, 2x CADC	-	-

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das durchgeführte Messprogramm vom ursprünglichen Messprogramm aufgrund neuer Erkenntnisse im Zuge des Projekts für folgende Fahrzeuge geringfügig abwich:

- Audi A4 Avant 2.0 TDI
- VW Golf 1.6 TDI
- Renault Master 2.3 dCi

Der Audi A4 Avant 2.0 TDI wurde nur auf der Straße vermessen, da für dieses Fahrzeug das Messprogramm auf der Straße aufgrund zusätzlich benötigter Messdaten für die Methodenuntersuchungen in Rücksprache mit dem Auftraggeber erheblich erweitert wurde. Dieses Zusatzmessprogramm setzt sich aus Messungen von Stausituationen im realen Stadtverkehr sowie Messungen von künstlichen Stauzyklen auf einer Teststrecke zusammen. Des Weiteren wurden Straßenfahrten durchgeführt, die den SCR sowohl im unteren Katalysatortemperaturfenster als auch im oberen -temperaturfenster an die Funktionsgrenzen brachten. Die Messungen dieses Versuchsfahrzeug am PKW-Rollenprüfstand wurden aufgrund des finanziellen Mehraufwands nicht durchgeführt.

Aufgrund der Fahrzeugabmessungen wurden für das leichte Nutzfahrzeug Renault Master ebenfalls keine Messungen am PKW-Rollenprüfstand durchgeführt. Dafür wurde das

Messprogramm für den VW Golf 1.6 TDI mit NSK ebenfalls wie beim Audi A4 Avant 2.0 TDI hinsichtlich kritischer Fahrsituationen in Rücksprache mit dem Auftraggeber erweitert.

In den nachfolgenden Unterkapiteln sind die Zyklen und RDE-Messungen im Detail beschrieben.

4.2.2.1 RDE-Messungen

Auf der Straße wurden auf drei verschiedenen Routen RDE-Messungen durchgeführt. Die RDE-Fahrten wurden immer in Graz gestartet und beendet. Der Routenname gibt Rückschluss darauf, in welche Richtung von Graz aus gefahren wurde. Z. B. kann dem Routennamen Arzberg entnommen werden, dass von Graz nach Arzberg (liegt nördlich von Graz) und wieder zurück gefahren wurde. Auf folgenden Strecken wurden RDE-Messungen durchgeführt:

- ▶ Arzberg-Route
- ▶ Deutschlandsberg-Route
- ▶ Ries-Route
- ▶ Graz-Stadt-Route
- ▶ Testgelände

Die Bezeichnung einer RDE-Messfahrt setzt sich aus dem Routennamen und der Nummer der x-ten Fahrt auf dieser Route zusammen. Arzberg01 steht somit für die 1. RDE-Fahrt auf der Arzberg-Strecke mit dem jeweiligen Testfahrzeug.

Die Streckenzusammenstellung der Ries-Route entspricht den gesetzlichen RDE-Anforderungen, wie auch in Kapitel 3 beschrieben. Zusätzlich erfolgten auch Streckenzusammenstellung für zwei weitere Routen (Arzberg- und Deutschlandsberg-Route). Die zurückgelegten kumulierten Höhenmeter bei einer Arzberg- oder Deutschlandsberg-Fahrt übersteigen die in der RDE-Gesetzgebung limitierten kumulierten Höhenmeter, weshalb die Routen auch nur an die RDE-Gesetzgebung angelehnt sind. Allerdings decken die Arzberg- und Deutschlandsberg-Route aufgrund des Höhenprofils das Auskühl- und Aufheizverhalten von Abgasnachbehandlungssystemen besser ab. Die Messdaten zum Auskühl- und Aufheizverhalten flossen für die detaillierte Berücksichtigung der Abgasnachbehandlungssysteme in der Simulation der Emissionsfaktoren für HBEFA 4.1 nach Kapitel 2.3.8 ein.

Die minimale Fahrzeugtestmasse setzte sich dabei aus der Ist-Fahrzeugleermasse sowie dem PEMS-Messgerät (ca. 120 kg für Gas+PN PEMS inklusive Batterien) und einem Insassen zusammen. Weitere Fahrten mit Zusatzbeladung wurden ebenfalls durchgeführt. Die Bereifung der Fahrzeuge ist jene, die unter Tabelle 15 angeführt ist. Der Reifendruck wurde nach den Herstellerangaben eingestellt. Während der RDE-Fahrten waren Radio, Licht und Klimaanlage eingeschaltet. Der Sollwert der Fahrzeuginnenraumtemperatur betrug rund 22 °C.

Im nachfolgenden sind die Routen kurz beschrieben.

4.2.2.1.1 Arzberg-Route

Die Route führt von Graz ausgehend über Schillingsdorf nach Kumberg und von dort weiter nach Arzberg und Frohnleiten. In Frohnleiten führt die Route auf die Autobahn A9 bzw. A2 Richtung Graz durch den Plabutschunnel wieder zurück zum Startpunkt nach Graz. Die Länge der Strecke beträgt etwa 107 km, die Zeit die für die Strecke benötigt wird, ist vom Verkehrsaufkommen abhängig.

4.2.2.1.2 Deutschlandsberg-Route

Die Route Deutschlandsberg führt ausgehend von ihrem Startpunkt in der Inffeldgasse über die A9 Pyhrnautobahn und B76 Radlpass Straße nach Deutschlandsberg. In Deutschlandsberg zweigt die Route auf die L619 Weinebenestraße ab und führt bis nach Trahütten, wo gewendet wird. Der Abschnitt Deutschlandsberg-Trahütten wird zweimal befahren. Von Deutschlandsberg führt die Route über die B76 und A9 zurück zu ihrem Endpunkt in Seiersberg bei Graz. Die Länge der Strecke beträgt etwa 93 km.

4.2.2.1.3 Ries-Route

Die Ries-Route führt von 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. Die Länge der Strecke beträgt etwa 84 km.

4.2.2.1.4 Graz-Stadt-Route

Wie in Kapitel 4.2.2 erwähnt, wurde das Messprogramm im Laufe des Projekts angepasst, um die gewonnenen Erkenntnisse aus den bereits durchgeführten Messungen entsprechend berücksichtigen zu können. Deshalb wurden unter anderem auch Staufahrten durchgeführt, um ein etwaiges Auskühlen des Abgasnachbehandlungssystems von Dieselfahrzeugen untersuchen zu können. Diese Erkenntnisse sollen ebenfalls in die Methodenentwicklung miteinfließen. Wird die Graz-Stadt-Route zu Zeiten starker Verkehrsdichte befahren, so liegt eine Staufahrt vor.

4.2.2.1.5 Testgelände

Zusätzlich zu den gemessenen realen Staufahrten im Grazer Stadtgebiet wurden Messungen auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt. Der Vorteil hierbei ist, dass Stauzyklen beliebig gefahren werden können und bei Bedarf auch gut reproduzierbar sind. Die Soll-Geschwindigkeitsverläufe für den künstlichen Stau wurden von den Staufahrten im Grazer Stadtgebiet sowie aus HBEFA-Stauzyklen abgeleitet.

4.2.2.2 Rollenprüfstandzyklen

Am Rollenprüfstand wurden folgende Zyklen gemessen:

- ▶ NEFZ
- ▶ NEFZ+
- ▶ WLTC
- ▶ CADC
- ▶ ERMES
- ▶ RWC

Beim NEFZ und WLTC handelt es sich um Typprüfzyklen. Des Weiteren wurden die Zyklen CADC und ERMES gemessen und gekürzte RDE-Fahrten (im Folgenden auch als Real World Cycle, kurz RWC, bezeichnet) am PKW-Rollenprüfstand nachgefahren. Durch die Verwendung der erwähnten Zyklen ist eine breite Abdeckung an Betriebspunkten gegeben. So können ggf. Optimierungsstrategien im Typprüfzyklus erkannt werden. Durch die realitätsnahen Zyklen CADC und ERMES kann das Emissionsverhalten bei realitätsnahen Motorbetriebspunkten ermittelt werden. Der ERMES enthält zusätzlich zum CADC auch Motorbetriebspunkte an der Vollastkurve, um auch Vollastbeschleunigungen abzudecken. Hingegen bildet der CADC

Niederlastpunkte des Motors (z.B. Stadtfahrten) besser ab als der ERMES. Da der RWC aus einer fahrzeugspezifischen RDE-Fahrt erstellt wird, kann damit überprüft werden, ob das Emissionsverhalten des Fahrzeugs am Rollenprüfstand ident mit der Fahrt auf der Straße ist. Eine Zusammenfassung aller Testmassen und Fahrwiderstände für NEFZ, WLTC, CADC, ERMES und RWC in tabellarischer Form kann dem Anhang entnommen werden. Die Zyklen sind in (Matzer, 2106b) beschrieben, nachfolgend ist daraus eine Zusammenfassung gegeben.

4.2.2.2.1 NEFZ

Der NEFZ war als Zyklus für die Typisierung der untersuchten Fahrzeuge vorgeschrieben. Die Gesamtlänge des Zyklus beträgt ca. 11 km und besteht aus einem Stadt- und Überlandanteil. Die Testmasse setzt sich aus der DIN Leermasse + 100 kg zusammen.

Im Rahmen einer Typisierung werden die Fahrwiderstände über genormte Ausrollversuche bestimmt. Da diese Fahrwiderstände nicht öffentlich bekannt sind, wurden im Rahmen dieses Projektes die Fahrwiderstände vereinfacht ermittelt und werden daher als generische Daten bezeichnet. Der Fahrwiderstand setzt sich dabei aus Roll- und Luftwiderstand zusammen. Der Rollwiderstand wurde vom Reifenlabel abgeleitet. Der Luftwiderstand setzt sich u.a. aus der Querschnittsfläche sowie dem Luftwiderstandsbeiwert zusammen. Es wurde versucht, diese Größen über Literaturrecherche zu eruieren. Für jene Fahrzeuge, wo keine Literaturdaten vorhanden waren, wurden Daten von segmentähnliche Fahrzeugen übernommen. Eine genaue Beschreibung dazu ist in (Matzer, 2016b) gegeben.

Die Prüfraumtemperatur betrug nach NEFZ-Vorgabe 25 °C. Die Fahrzeugbatterie wurde vor dem NEFZ geladen, alle aktiven Nebenverbraucher während des Zyklus deaktiviert. Da beim NEFZ standardmäßig mit aktivierter Start-Stop Funktion gefahren wird, wurde versucht, bei den Messungen der Testfahrzeuge ebenfalls die Start-Stop Funktion zu aktivieren. Die dafür notwendigen Einstellungen für den PKW-Rollenprüfstandbetrieb konnten aber nicht für alle Fahrzeuge eruiert werden, weshalb einige Fahrzeuge mit deaktivierter Start-Stop Funktion gemessen wurden. Eine Beeinflussung des Emissionsverhaltens der Testfahrzeuge (außer im Stillstand) durch die fehlende Start-Stop Funktion konnte, wie auch die Messergebnisse im Anhang A zeigen, ausgeschlossen werden.

Alle gemessenen NEFZ wurden, wie es die Gesetzgebung für die Typisierung auch vorsieht, mit kaltem Motor gestartet.

4.2.2.2.2 NEFZ+

Der NEFZ+ wurde für die zwei Euro 5b PKW mit EA 189 Motor gemessen, um zu überprüfen, ob das Motorsteuergerät mit der Defeat-Software den Typprüfzyklus NEFZ identifizieren zu versucht. Der Zyklus entspricht dabei dem NEFZ, nur das vor dem eigentlichen Zyklusstart das Fahrzeug am Prüfstand noch kurz beschleunigt und wieder verzögert wird. Damit soll der NEFZ+ nicht als NEFZ erkannt werden und die vorhandene Defeat-Software nicht greifen. Fahrzeug- und Prüfstandeinstellungen wurden gleich wie beim NEFZ gewählt.

4.2.2.2.3 WLTC

Der WLTC ist der neue Typprüfzyklus für Fahrzeuge typisiert ab der Abgasnorm Euro 6c. Die Gesamtlänge des Zyklus beträgt ca. 23 km und besteht aus vier Phasen, die Stadt-, Land- und Autobahn repräsentieren sollen. Die Testmasse setzt sich aus der DIN Leermasse + 100 kg, der Zusatzausstattung sowie einem repräsentativen Anteil der Zuladung zusammen.

Als Fahrwiderstände für den WLTC wurden ebenfalls generische Daten herangezogen, da für die untersuchten Fahrzeuge noch keine WLTP-Daten vorlagen. Dabei wurden die Fahrwiderstände vom NEFZ als Basis verwendet und Faktoren aufgeschlagen. Diese Faktoren wurden aufgrund

damaliger noch nicht bekannter Datenlage abgeschätzt und sollen die Änderungen im Rahmen des Typisierungsverfahrens von NEFZ auf WLTC berücksichtigen. Eine Beschreibung der WLTP generischen Daten ist ebenfalls in (Matzer, 2016b) gegeben. Die Prüfraumsolltemperatur betrug nach WLTP-Vorgabe 23 °C. Da der WLTC ebenfalls standardmäßig mit aktivierter Start-Stop Funktion gefahren wird, wurde analog zum NEFZ versucht, bei den Messungen der Testfahrzeuge ebenfalls die Start-Stop Funktion zu aktivieren.

Alle gemessenen WLTC wurden, wie es die Gesetzgebung für die Typisierung auch vorsieht, mit kaltem Motor gestartet.

4.2.2.2.4 CADC

In einem CADC liegen ähnliche Lastpunkte wie bei einer Fahrt im Straßenverkehr vor. Der Zyklus setzt sich auch aus einem Stadt-, Land- sowie Autobahnanteil (später auch als urban, rural und motorway bezeichnet) zusammen. Die Gesamtlänge des CADC beträgt ca. 51 km. In der Ergebnisbetrachtung werden die einzelnen Anteile Stadt-, Land- und Autobahn für den CADC Mittelwert gleich gewichtet. Deshalb spricht man auch von einem CADC 1/3 Mix. Um möglichst repräsentatives Fahren abbilden zu können, entsprach die am Prüfstand eingestellte Fahrzeugtestmasse der Testmasse der RDE-Fahrten des jeweiligen Fahrzeugs. Die eingestellten Fahrwiderstände wurden wiederum vereinfacht abgeleitet, da von den meisten Fahrzeugen keine Ausrolldaten unter realen Bedingungen bekannt waren. Die CADC Fahrwiderstände basieren auf den NEFZ generischen Werten, wobei anteilmäßige Erhöhungen des Rollwiderstands im Zuge geringeren Reifendrucks, nasser Fahrbahn, Winterreifen usw. berücksichtigt wurden. Auch der Luftwiderstand wurde entsprechend erhöht, um anteilmäßig Fahrzeugaufbauten bzw. -anbauten, wie z.B. Dachboxen usw. zu berücksichtigen. Details über die gewählten generischen Fahrwiderstände sind unter (Matzer, 2016b) ersichtlich. Per Definition wurden alle Nebenverbraucher während der CADC-Messungen sowie die Start-Stop Funktion deaktiviert und die Temperatur im Prüfraum auf 23 °C eingestellt.

Alle gemessenen CADC wurden mit betriebswarmem Motor gestartet, um für die spätere Emissionskennfelderstellung die gesamte Länge des Zyklus verwenden zu können.

4.2.2.2.5 ERMES

Wie beim CADC liegen auch beim ERMES ähnliche Lastpunkte wie bei einer Straßenfahrt vor. Zusätzlich zum CADC enthält der ERMES-Zyklus auch Vollastbeschleunigungsphasen. Der ERMES Zyklus ist deutlich kürzer als der CADC und kann daher eher in nationale Messprogramme als Add-on integriert werden. Fahrwiderstände und Prüfraumeinstellungen wurden analog zum CADC gewählt.

4.2.2.2.6 RWC

Um zu eruieren, ob die vom sogenannten Softwareskandal betroffenen VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor den Typprüfzyklus NEFZ und/oder den Rollenprüfstand an sich erkennen, wurden RDE-Route am Prüfstand nachgefahren. Da laut RDE-Gesetz eine RDE-Fahrt mindestens 5400 Sekunden betragen muss, wurde der Zyklus für den Prüfstand gekürzt, um Aufwand und Kosten bei gleicher Aussagekraft zu reduzieren. Der RWC ist fahrzeugspezifisch und wurde von den RDE-Fahrten abgeleitet. Die Messdaten einer gefahrenen RDE-Route werden dabei auf etwa 30 Minuten gekürzt, wobei auf einen zeitlichen 1/3 Mix von Stadt, Land und Autobahn, um jede Phase repräsentativ abbilden zu können, geachtet wurde. Die einzelnen Phasen wurden wieder gleich gewichtet, womit sich analog zum CADC der 1/3 Mix RWC ergibt.

Für das Nachfahren des RWC am Prüfstand wurden Fahrzeuggeschwindigkeit, Steigung und Schaltpunkte für Fahrzeuge mit manuellem Schaltgetriebe der gekürzten RDE-Fahrt vorgegeben. Die Steigung wurde dabei aus der GPS-Seehöhe nach RDE-Richtlinien errechnet. Am

Rollenprüfstand waren dieselben Nebenverbraucher eingeschaltet wie bei den RDE-Fahrten, welche Licht, Radio und Klima mit einer Innenraumsolltemperatur von 22 °C waren. Des Weiteren wurde im Prüfraum die Temperatur so gewählt, dass sie der mittleren Umgebungstemperatur der jeweiligen RDE-Fahrt entsprach.

Die eingestellte Fahrzeugtestmasse am Rollenprüfstand war jene, die auch bei der RDE-Fahrt vorlag. Die Fahrwiderstände der Fahrzeuge wurden aus den vorhin beschriebenen Gründen vom CADC gewählt. Die Start-Stop Funktion wurde wie bei der jeweiligen RDE-Fahrt eingestellt. Alle gemessenen RWC wurden bereits mit betriebswarmem Motor und gleicher Vorkonditionierung wie bei der RDE-Fahrt gestartet.

4.2.3 Auswertung der Messdaten

Bei der Auswertung der Messdaten wurde auf folgende Schwerpunkte eingegangen, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden:

- Auswertung der RDE-Fahrten nach den allgemeinen Tripparametern, um eine Übersicht von z. B. durchschnittlicher und maximaler Fahrzeuggeschwindigkeit, Umgebungstemperatur usw. zu bekommen.
- Emissionsniveauvergleich von Rollenzyklen sowie der RDE-Fahrten.
- Vergleich des Emissionsniveaus für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor und nach der Installation eines werkseitigen Softwareupdates zur Reduzierung der NO_x-Emissionen um den Einfluss auf die real emittierten NO_x-Emissionen zu bestimmen. Dafür war es zwingend notwendig herauszufinden, ob eine Prüfstand- oder Zykluserkennung durch die Defeat-Software vorlag.

4.2.3.1 Emissionsgrenzwerte

Die vermessenen Fahrzeuge der Abgasnormen Euro 5b und Euro 6b wurden im Typprüfzyklus NEFZ typisiert. Für eine erfolgreiche Typisierung dürfen die limitierten Emissionen im Rahmen der NEFZ-Messung nicht über den gesetzlich definierten Grenzwerten liegen, die abhängig von der Abgasnorm, Motor- und Fahrzeugtechnologie sind. Um eine Vergleichsbasis für die in Kapitel 4.2.3.3 und Anhang A gezeigten Messdaten zu haben, sind in Tabelle 20 und Tabelle 21 die gesetzlich definierten Grenzwerte eingefügt.

Tabelle 17: Emissionsgrenzwerte für vermessene Diesel-PKW sowie für das vermessene Diesel-LNF im Typprüfzyklus NEFZ

Abgasnorm	Fahrzeug-kategorie und Klasse	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Euro 5	M	0,180	0,500	0,230	0,0045	6,00E+11
Euro 6	M	0,080	0,500	0,170	0,0045	6,00E+11
Euro 5	N1 Klasse 3	0,280	0,740	0,350	0,0050	6,00E+11

Tabelle 18: Emissionsgrenzwerte für den vermessenen Otto-PKW im Typprüfzyklus NEFZ

Abgas-norm	Fahrzeug-kategorie und Klasse	NO _x [g/km]	CO [g/km]	THC [g/km]	NMHC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert Euro 6	M	0,060	1,000	0,100	0,068	0,0045	6,00E+12

Im Rahmen dieses Projekts wurden mit den Versuchsfahrzeugen auch RDE-Fahrten durchgeführt, um das reale Emissionsniveau ermitteln zu können. Dabei wurden die RDE-Fahrten nach dem RDE-Gesetz für aktuelle Fahrzeuge (ab Euro 6c) durchgeführt. Die vermessenen Fahrzeuge unterlagen noch keiner RDE-Gesetzgebung, dennoch sei hier zum besseren Überblick ein Auszug an Randbedingungen für RDE-Fahrten aufgelistet:

- Die Messfahrt soll aus 34 % Stadtanteil, 33 % Überlandanteil und 33 % Autobahnanteil bestehen. Anteile beziehen sich auf die Wegstrecke, eine Zuordnung wird über die Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt (Stadt: $v \leq 60$ km/h, Überland: $60 < v \leq 90$ km/h, Autobahn: $v > 90$ km/h).
- Einstellungen der Nebenverbraucher, wie z. B. Klimaanlage, sollen dem realen Fahren entsprechen.
- Die maximale Stillstandzeit der Messfahrt ist beschränkt.
- Start- und Endpunkt der Messfahrt dürfen nicht mehr als 100 m Höhendifferenz zueinander haben.
- Kein abnormales moderates oder aggressives Fahren.
- Die positiv kumulierten Höhenmeter dürfen die Grenze von 1200 m / 100 km nicht überschreiten.
- Die Höhenmeter dürfen zu keinem Zeitpunkt über 1300 m liegen.

Die NO_x- und PN-Emissionen aktueller Fahrzeuge dürfen für eine richtlinienkonforme RDE-Fahrt nicht über dem Not-to-Exceed-Limit liegen. Das Not-to-Exceed-Limit setzt sich aus den Grenzwerten der Abgasnorm und einem Konformitätsfaktor zusammen. Der Konformitätsfaktor für NO_x und PN ist in Tabelle 19 angeführt. So dürfen für Diesel-PKW nach der Abgasnorm Euro 6d die NO_x-Emissionen nach gesetzekonformer RDE-Gewichtung nicht über 114,4 g/km, die PN-Emissionen nicht über 9 E11 #/km liegen. Für Otto-PKW gelten für Euro 6d die NTE-Limits von 85,8 g/km für NO_x und 9 E11 #/km für PN.

Tabelle 19: Konformitätsfaktoren für RDE-Messungen von PKW und LNF

Abgasnorm	Konformitätsfaktor für NO _x	Konformitätsfaktor für PN
Euro 6c	-	1 + 0,5 für Messunsicherheit
Euro 6d-Temp	2,1	1 + 0,5 für Messunsicherheit
Euro 6d	1 + 0,43 für Messunsicherheit	1 + 0,5 für Messunsicherheit

4.2.3.2 Auswertung der RDE-Routen nach den allgemeinen Tripparametern

Im Anhang sind die wichtigsten Tripparameter der RDE-Messungen für jedes Fahrzeug in tabellarischer Form ersichtlich. Gelistete Parameter dabei sind die Testmasse, durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit, Dauer, Umgebungstemperatur sowie der Fahrstil. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt, wurde das Messprogramm während des Projekts angepasst, um für die Methodenentwicklung entsprechende Messdaten zur Verfügung zu haben. Dabei wurde unter anderem auch der Fahrstil variiert, von ökonomischem über normalem bis zum aggressiven Fahrstil. Der ökonomische Fahrstil sah dabei keine Vollastbeschleunigungen vor, ebenfalls wurden die Beschleunigungen sehr moderat gewählt. Beim aggressiven Fahrstil wurden hingegen starke Beschleunigungen gewählt, sowie wurde auch versucht, über längerer Streckenabschnitte bei geringer bis mittlerer Motordrehzahl an der Vollastkurve des Motors zu fahren.

4.2.3.3 Emissionsniveauvergleich von Rollenzyklen sowie der RDE-Fahrten

Aufgrund des Umfangs der Messdaten und der einfacheren Lesbarkeit ist nachfolgend für jedes Fahrzeug das Emissionsverhalten der limitierten Schadstoffkomponenten kurz zusammengefasst. Im Anhang A sind die zugehörigen detaillierten Messergebnisse in tabellarischer Form enthalten.

4.2.3.3.1 VW Sharan 2.0 TDI

Werden die zwei gemessenen NEFZ vom VW Sharan 2.0 TDI gemittelt, so ergibt sich ein CO₂-Wert von 131 g/km. Dieser stimmt nahezu mit dem eingetragenen Typisierungswert von 130 g/km überein. Der aus zwei WLTC-Messungen gemittelte Wert liegt in etwa um 10 % höher als der aus den Messungen gemittelte NEFZ-Wert. Werden die CO₂-Werte der realitätsnahen PKW-Rollenzyklen gemittelt, so ergibt sich in etwa 188 g/km, welcher um 45 % über den NEFZ-Wert liegt. Dies ist vor allem auf die höheren Fahrwiderstände, Testmassen sowie aktivierten Nebenverbrauchern im RWC zurückzuführen. Der gemittelte NO_x-Wert aus den NEFZ-Messungen liegt bei etwa 40 mg/km. Der gesetzliche Grenzwert für Dieselfahrzeuge nach Euro 6b im NEFZ beträgt 80 mg/km. Werden die NO_x-Werte der beiden vermessenen WLTC herangezogen, so ergibt sich in 84 mg/km, was geringfügig über den Grenzwert liegen würde. An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, dass dieses Fahrzeug nur den NO_x-Wert im Typisierungszyklus NEFZ einhalten muss. Bei den realitätsnahen Zyklen lag im Mittel ein NO_x-Wert von etwa 70 mg/km vor. Die CO-Emissionen im NEFZ waren mit 112 mg/km im Mittel am höchsten, bei den anderen Zyklen auf einem niedrigeren Niveau. HC mit 10 mg/km, PM mit 0,4 mg/km und PN mit 6,5 E10 #/km im Mittel waren durchgängig auch auf einem sehr niedrigen Niveau.

Werden die RDE-Fahrten betrachtet, ergibt sich im Mittel ein um etwa 20 % höherer CO₂-Wert als der aus den Messungen gemittelte NEFZ-Wert. Die NO_x-Werte lagen im Mittel bei etwa 70 mg/km, der Minimalwert betrug 40 mg/km und der Maximalwert 180 mg/km. Die CO-Emissionen lagen bei allen RDE-Fahrten unter 55 mg/km. Für die RDE-Fahrten sind keine PN-Emissionen im Anhang ersichtlich, da zum Zeitpunkt der Messung das PN-PEMS noch nicht verfügbar war. HC wird bei den PKW-PEMS-Systemen nicht gemessen, daher können für die RDE-Fahrten keine Ergebnisse zu HC angegeben werden.

4.2.3.3.2 Peugeot 508 SW

Der mittlere CO₂-Wert aus den beiden NEFZ-Messungen betrug beim Peugeot 508 SW 101 mg/km und liegt somit um etwa 3 % unterhalb des eingetragenen Typisierungswerts. Der mittlere CO₂-Wert im WLTC lag bei 110 g/km und somit um 9 % oberhalb des gemittelten NEFZ-Werts. Der CO₂-Wert der realitätsnahen Zyklen am PKW-Rollenprüfstand betrug im Mittel etwa

140 g/km. Das ergibt eine Abweichung von etwa 40 % zum Mittelwert der gemessenen NEFZ. Das liegt vor allem am realitätsnahen Geschwindigkeitsprofil, der realitätsnahen Fahrwiderstände und aktivierten Nebenverbrauchern im RWC. Der gemittelte NO_x-Messwert im NEFZ beträgt 70 mg/km und liegt somit unterhalb des Grenzwerts im NEFZ nach Euro 6b für Dieselfahrzeuge. Die NO_x-Emissionen lagen im WLTC im Mittel bei 143 mg/km. Bei den Zyklen CADC und RWC lagen die NO_x-Werte zwischen 270 mg/km und 550 mg/km, im Mittel bei 444 mg/km. Die höchsten gemessenen CO-Emissionen lagen beim NEFZ vor, im Mittel bei 140 mg/km. Für alle anderen Zyklen lagen die CO-Emissionen weit unter diesem Wert. Die PM-Emissionen lagen bei den meisten Zyklen im mg/km-Bereich, allerdings alle unter dem gesetzlichen Wert von 4,5 mg/km im NEFZ. HC und PN waren bei allen Zyklen auf einem sehr niedrigen Niveau.

Bei den RDE-Fahrten lagen die CO₂-Emissionen im Mittel bei 138 g/km und damit um 37 % über dem Mittelwert der gemessenen NEFZ. Diese Abweichung entspricht in etwa der Größenordnung der realitätsnahen Zyklen vom PKW-Rollenprüfstand zum NEFZ. Allerdings waren die NO_x-Emissionen bei den RDE-Fahrten um einiges höher als die vom PKW-Rollenprüfstand. Der Minimalwert bei den RDE-Fahrten betrug 400 mg/km, der Maximalwert 850 mg/km. Im Mittel ergibt sich für die durchgeführten RDE-Fahrten ein NO_x-Wert von 625 mg/km, der um das 9,2-fache höher war als der Mittelwert der gemessenen NEFZ. Die CO-Emissionen der RDE-Fahrten lagen unter 70 mg/km, die PN-Emissionen unter 9,1 E9 #/km.

4.2.3.3.3 Skoda Superb 2.0 TDI

Die gemessenen CO₂-Emissionen vom Skoda Superb 2.0 TDI lagen im Mittel bei 119 g/km. Dieser Mittelwert ist nahezu identisch mit dem eingetragenen CO₂-Wert im Typenschein mit 120 g/km. Die CO₂-Werte im WLTC lagen mit 125 g/km nur geringfügig über den NEFZ-Messwerten. Bei den Zyklen CADC und RWC lagen die CO₂-Emissionen um 25 % über dem Mittelwert der gemessenen NEFZ. Die NO_x-Emissionen im NEFZ betrugen im Mittel 43 mg/km, was in etwa die Hälfte des Grenzwerts laut Euro 6b für Dieselfahrzeuge ausmacht. Die NO_x-Werte mit 30 mg/km im WLTC waren geringer als die von den NEFZ. Von den realitätsnahen Zyklen lagen im Mittel NO_x-Emissionen in der Höhe von 74 mg/km vor, was ebenfalls noch unter dem Grenzwert nach Euro 6b im NEFZ lag. CO, HC, PM und PN waren bei allen PKW-Rollenprüfstandzyklen auf einem niedrigen Niveau.

Werden die RDE-Fahrten mit den PKW-Rollenprüfstanddaten verglichen, so ist ersichtlich, dass die CO₂-Emissionen im Mittel um 40 % höher sind als der Mittelwert der gemessenen NEFZ-Werte. Wie bereits in 4.2.3.2.1 beschrieben, kann der große Unterschied vor allem auf die höheren Fahrwiderstände und aktivierten Nebenverbrauchern sowie entsprechender Zuladung durch das Messequipment zurückgeführt werden. Die NO_x-Emissionen lagen im Mittel bei 135 mg/km. Die CO- und PN-Emissionen lagen mit etwa 40 mg/km bzw. 1,8 E10 #/km im Mittel auf einem niedrigen Niveau.

4.2.3.3.4 Audi A4 Avant 2.0 TDI

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt, stellte sich im Laufe des Projekts heraus, dass eine Adaptierung des Messplans für die Methodenuntersuchungen von großem Vorteil wäre. Deshalb wurde für dieses Fahrzeug das Messprogramm nach Absprache mit dem Auftraggeber auf der Straße um Stauzyklen sowie auch um sogenannte Fahrten mit ökonomischem sowie auch aggressivem Fahrstil erweitert, um den Einfluss auf das Emissionsniveau außerhalb des gewohnten Betriebsbereichs des Abgasnachbehandlungssystems zu untersuchen und in die Methodenentwicklungen einfließen zu lassen. Dafür wurde aber aufgrund Zeit und Budgetgründen auf Messungen am PKW-Rollenprüfstand verzichtet.

Die CO₂-Emissionen lagen bei den RDE-Fahrten zwischen 129 und 166 g/km, im Mittel bei 145 g/km. Dies liegt um 34 % über dem typisierten Wert im NEFZ. Die Gründe für die Abweichungen liegen in aktivierten Nebenverbräuchern, höherer Testmasse sowie den höheren Fahrwiderständen. Die NO_x-Emissionen variierten zwischen 56 mg/km und 700 mg/km. Im Mittel lag ein NO_x-Niveau von 250 mg/km vor. Niedrige NO_x-Emissionen lagen bei Fahrten mit normalem Fahrstil und keiner zusätzlichen Zuladung vor. Werden anspruchsvolle RDE-Fahrten mit aggressivem Fahrstil auf Routen mit entsprechendem Höhenprofil und maximaler Zuladung durchgeführt, so erhöhen sich die NO_x-Emissionen deutlich. Dazu sei erwähnt, dass diese Extremfahrten u.a. für die Untersuchung des SCR-Auskühlverhaltens durchgeführt wurden und nach RDE-Gesetz aufgrund des vorliegenden Höhenprofils nicht gültig wären. Die CO- und PN-Emissionen waren bei allen Fahrten nieder und damit unauffällig.

4.2.3.3.5 VW Golf 1.6 TDI

Wie auch beim Audi A4 Avant 2.0 TDI wurde beim VW Golf 1.6 TDI das ursprüngliche Messprogramm hinsichtlich neuer Erkenntnisse nach Absprache mit dem Auftraggeber erweitert. Ein zusätzlicher Grund dafür war auch, dass dieses Fahrzeug einen NO_x-Speicherkat als Abgasnachbehandlungssystem verbaut hatte, währenddessen alle anderen untersuchten Euro 6b Fahrzeuge mit einem SCR-System ausgestattet waren. Deshalb wurden statt der vorgesehenen sechs RDE-Fahrten, insgesamt acht RDE-Fahrten mit verschiedenen Beladungen und Fahrstilen durchgeführt. Des Weiteren wurden Messungen von zwei Stauzyklen am abgesperrtem Testgelände durchgeführt.

Die beiden vermessenen NEFZ-Zyklen lagen im Mittel bei 107 g/km CO₂ und damit um 2 % unterhalb des eingetragenen Typisierungswerts. Die CO₂-Messwerte im WLTC waren in etwa ähnlich wie die von den gemessenen NEFZ. Die realitätsnahen Zyklen CADC, ERMES und RWC lagen im Mittel um 25 % höher als der Mittelwert der gemessenen NEFZ. Dies ist vor allem auf die höheren Fahrwiderstände sowie Testmassen und Nebenverbräuchern im RWC zurückzuführen. Die NO_x-Emissionen bei den Prüfstandmessungen lagen im Mittel bei 80 mg/km, was dem Grenzwert für Euro 6b im NEFZ für Dieselfahrzeuge entspricht. Bei allen anderen Zyklen lagen die NO_x-Werte im Mittel bei etwa 170 mg/km. Die CO-Emissionen lagen bei den NEFZ-Werten bei etwa 270 mg/km, bei allen anderen Zyklen auf einem sehr niedrigen Niveau. Auch HC, PM und PN lagen durchgängig bei allen Zyklen sehr nieder.

Die CO₂-Emissionen lagen im Mittel bei etwa 140 g/km und somit 31 % über dem Mittelwert der gemessenen NEFZ. Diese Abweichung liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die realitätsnahen Zyklen CADC, ERMES und RWC, gemessen am PKW-Rollenprüfstand. Die NO_x-Emissionen der Straßenmessungen lagen zwischen 180 mg/km und 710 mg/km, im Mittel bei 330 mg/km. Dieser Streubereich kann damit erklärt werden, dass verschiedene Fahrstile mit verschiedenen Beladungen durchgeführt wurden. CO- und PN-Emissionen waren bei den durchgeführten Fahrten mit 40 mg/km bzw. 8 E10 #/km im Mittel gering.

4.2.3.3.6 VW Golf Variant 1.6 TDI

Der VW Golf Variant 1.6 TDI war vom sogenannten Pflichtrückruf für VW-Konzernfahrzeuge des Motortyps EA 189 betroffen. Um eine Aussage der Umrüstung machen zu können, wurde dieses Fahrzeug sowohl vor als auch nach der Umrüstung in den gleichen Zyklen vermessen. Vor Umrüstung wurde im NEFZ für CO₂ etwa 129 g/km gemessen. Nach Umrüstung wurde im NEFZ 128 g/km CO₂ gemessen. Die Differenz durch die Umrüstung liegt im Rahmen der Messgenauigkeit. Nach der Umrüstung liegt allerdings eine Verbrauchserhöhung in den Real-World-Zyklen CADC 1/3 Mix und RWC um etwa 6 % im Mittel vor. Eine Minderung durch die Umrüstung zeigt sich für NO_x. Es ist gut erkennbar, dass zwischen den Zyklen NEFZ und NEFZ+ das NO_x-Niveau vor der Umrüstung unterschiedlich ist. Dies ist auf eine Zykluserkennung durch

die Defeat-Software zurückzuführen. Nach der Umrüstung ist das NO_x-Niveau beim NEFZ+ im Bereich des NEFZ. Im NEFZ wird auch der Zulassungswert gut getroffen. Das NO_x-Niveau ist durch die Umrüstung in den Real-World-Zyklen CADC 1/3 Mix und RWC im Mittel um ca. 30 % gesunken. Das CO-Niveau ist beim VW Golf Variant 1.6 TDI bis auf NEFZ und NEFZ+ vor und nach der Umrüstung ähnlich. Bei den NEFZ sinkt das CO-Niveau nach der Umrüstung deutlich ab. Bei den HC gibt es vor und nach der Umrüstung keinen eindeutigen Trend. Nach der Umrüstung liegen die PM-Emissionen unter bzw. auf gleichem – sehr niederem – Niveau wie vor der Umrüstung. Der Trend bzgl. PN ist über die Zyklen nicht einheitlich. Die Absolutwerte sind allerdings durch den eingesetzten Dieselpartikelfilter niedriger.

Die Emissionen der RDE-Fahrten lagen sowohl vor der Umrüstung als auch danach im Bereich des zugehörigen CADC.

4.2.3.3.7 VW Passat Kombi 2.0 TDI

Der VW Passat Kombi 2.0 TDI war ebenfalls vom Pflichtrückruf EA 189 betroffen. Weshalb analog zum VW Golf Variant 1.6 auch Messungen vor und nach der Umrüstung durchgeführt wurden. Beim VW Passat 2.0 ergab sich in allen Testzyklen eine geringe Verbrauchsänderung durch die Umrüstung. Zwischen NEFZ und NEFZ+ ist keine große Abweichung des CO₂-Werts vorhanden. Der Trend der Umrüstungseffekte bzgl. NO_x schwankt über die Zyklen. Tendenziell ist durch die Umrüstung eine Reduktion festzustellen. Auch hier ist wieder deutlich die Zykluserkennung im NEFZ+ mit der Defeat-Software erkennbar. In den Real-World-Zyklen CADC 1/3 Mix und RWC ergaben sich keine Abnahmen der NO_x-Emissionen durch die Umrüstung. Für die CO-Emissionen sind vor und nach der Umrüstung keine großen Schwankungen zu erkennen. Hervorzuheben ist das deutlich niedrige Absolutniveau der CO-Emissionen. Die HC-Emissionen steigen nach der Umrüstung bis auf den NEFZ leicht an, wobei das Absolutniveau wiederum sehr gering ist. Die Partikelmasse sinkt nach der Umrüstung bei allen Zyklen bis auf den CADC motorway. Dort steigt sie an. Die Partikelanzahl ändert sich durch die Umrüstung nur gering. Bei den CADC Messungen vor Umrüstung sind die PN-Emissionen des Fahrzeugs sogar so gering, dass die Hintergrundkonzentration der Verdünnungsluft im CVS-Tunnel höher ist. Deshalb sind die PN-Emissionen für den CADC 0 #/km. Für die RDE-Fahrten sind keine PN-Emissionen dargestellt, da zum Zeitpunkt der Messung das PN-PEMS noch nicht verfügbar war.

Auch bei diesem Fahrzeug lagen die Emissionen der RDE-Fahrten sowohl vor der Umrüstung als auch danach im Bereich des zugehörigen CADC.

4.2.3.3.8 Renault Master 2.3 dCi

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt, wurden aufgrund der Fahrzeugabmessungen mit dem Renault Master nur RDE-Fahrten durchgeführt. Insgesamt wurden auf der Ries-Strecke sieben RDE-Fahrten mit verschiedenen Fahrstilen und Beladungen durchgeführt. Im Mittel lagen die CO₂-Emissionen bei etwa 270 g/km. Die NO_x-Emissionen lagen im Mittel bei 1.9 g/km, wobei die Bandbreite an Messergebnissen zwischen 1.3 und 2.7 g/km lag. Die CO-Emissionen sind wie für ein Dieselfahrzeug üblich, entsprechend gering und lagen alle unter 140 mg/km. Für die RDE-Fahrten sind keine PN-Emissionen im Anhang ersichtlich, da zum Zeitpunkt der Messungen das PN-PEMS noch nicht verfügbar war.

4.2.3.3.9 Mini Cooper

Mit dem Benzinfahrzeug Mini Cooper wurden ausschließlich Messungen am PKW-Rollenprüfstand durchgeführt. Der NEFZ lag im Mittel bei 114 g/km CO₂, was in etwa 9 % über dem Typprüfwert liegt. Aufgrund der gewählten generischen Fahrwiderstände können diese Abweichungen erklärt werden. Das CO₂-Niveau der WLTC-Messungen war in einer ähnlichen Größenordnung wie die NEFZ-Messungen. Der CO₂-Wert der gemessenen CADC lag in etwa 35 %

über den gemessenen NEFZ, aufgrund der eingestellten höheren Fahrwiderstände und Testmasse ist diese Abweichung ebenfalls erklärbar.

Die gemessenen NO_x-Werte lagen im NEFZ unter 50 mg/km und damit auch unterhalb des Grenzwerts nach Euro 6b mit 60 mg/km für Ottofahrzeuge. Bei allen Zyklen lagen die NO_x-Messwerte unter 160 mg/km. Die CO-Werte lagen bei allen Zyklen unter 305 mg/km und sind somit auch alle unter dem NEFZ-Grenzwert von 1000 mg/km. HC und PM sind auf einem niedrigen Niveau. Die PN-Emissionen lagen über 6 E11 #/km, dies ist vermutlich auf die Direkteinspritzung des Ottomotors und noch nicht verbautem Partikelfilter zurückzuführen.

4.2.3.4 Überprüfung der Detektion zur NEFZ-Erkennung von Fahrzeugen mit EA 189-Motor

Wie bereits in Kapitel 4.2.2.2 erwähnt, wurde der NEFZ+ sowie eine gekürzte RDE-Fahrt am PKW-Rollenprüfstand für den VW Golf Variant 1.6 TDI sowie für den VW Passat Kombi 2.0 TDI nachgefahren. Damit soll untersucht werden, ob die Defeat-Software Messungen am Rollenprüfstand grundsätzlich erkennt und die Emissionsminderungsstrategie bei PKW-Rollenprüfstandtests anpasst. In diesem Fall wären alle Real-World-Zyklen, wie z.B. CADC oder ERMES, die mit solchen Fahrzeugen für das HBEFA in der Vergangenheit am PKW-Rollenprüfstand durchgeführt wurden, für das reale Fahren nicht repräsentativ.

4.2.3.4.1 Überprüfung einer möglichen Detektion des Typprüfzyklus

Die Messungen mit dem VW Golf Variant 1.6 TDI vor Umrüstung zeigten deutliche Unterschiede zwischen dem Typprüfzyklus NEFZ und dem leicht geänderten NEFZ+. Im NEFZ+ sind die NO_x-Emissionen um 350 % über dem Zulassungswert. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass das Fahrzeug mit einer so genannten Defeat-Software erkannt hat, wenn es sich im Fahrzyklus der Typprüfung befunden hat. Nach der Umrüstung ist dieser Effekt nicht mehr vorhanden.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Abweichungen für CO₂ und NO_x der gemessenen NEFZ zu den Typprüfwerten im Zulassungsschein als Zahlenwerte, um den Einfluss der Defeat-Software speziell auf die NO_x-Emissionen zu verdeutlichen. CO, PN, PM und HC+NO_x wurden nicht betrachtet.

Tabelle 20: NEFZ-Abweichung zwischen Zulassungsschein und Messwert vor bzw. nach Umrüstung des VW Golf Variant 1.6 TDI

Zyklus	Softwarestand	Quelle	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	Abw. CO ₂ Messung zu Zulassung	Abw. NO _x Messung zu Zulassung
NEFZ	alt	Zulassung	119,0	0,125	-	-
NEFZ	alt	Messung	128,8	0,110	8 %	-12 %
NEFZ+	alt	Messung	122,9	0,563	3 %	350 %
NEFZ	neu	Messung	127,5	0,152	7 %	22 %
NEFZ+	neu	Messung	128,9	0,146	8 %	17 %

Beim VW Passat Kombi mit 2.0l-Motor zeigt die Messung vor Umrüstung auch deutliche Unterschiede zwischen NEFZ und dem leicht geänderten NEFZ+. Im NEFZ+ sind die NO_x-Emissionen um 200 % über dem Zulassungswert. Dies zeigt auch bei diesem Fahrzeug eindeutig die Wirkung der Defeat-Software. Nach der Umrüstung ist dieser Effekt nicht mehr gegeben.

Die Gegenüberstellung der gemessenen NEFZ für den VW Passat Kombi 2.0 TDI ist in nachfolgender Tabelle angeführt.

Tabelle 21: NEFZ-Abweichung zwischen Zulassungsschein und Messwert vor bzw. nach Umrüstung des VW Passat 2.0l

Zyklus	Softwarestand	Quelle	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	Abw. CO ₂ Messung zu Zulassung	Abw. NO _x Messung zu Zulassung
NEFZ	alt	Zulassung	135,0	0,122	-	-
NEFZ	alt	Messung	147,8	0,142	9 %	16 %
NEFZ+	alt	Messung	145,3	0,372	8 %	205 %
NEFZ	neu	Messung	140,0	0,161	4 %	32 %
NEFZ+	neu	Messung	142,4	0,178	5 %	46 %

Zusammenfassend aus den Erkenntnissen dieser beiden Fahrzeuge kann gesagt werden, dass von einer Zykluserkennung ausgegangen werden kann.

4.2.3.4.2 Überprüfung einer möglichen Detektion des PKW-Rollenprüfstands

Um eine Überprüfung der Detektion des PKW-Rollenprüfstands durchzuführen, wurde ein gekürzter RWC-Zyklus am Prüfstand gemessen. Der RWC-Zyklus pro Fahrzeug besteht aus einem zeitlichen 1/3 Mix Stadt, Land und Autobahn, um jede Phase repräsentativ abbilden zu können. Für die Emissionsdaten der RWC wurde somit ein 1/3 Mix gebildet, da ansonsten die Emissionen der Autobahnphase das Messergebnis maßgeblich bestimmen würden. Selbiges gilt unter diesem Kapitel auch für die Emissionen der Straßenfahrten, um dieselbe Vergleichsbasis zu haben.

Die Messung der Emissionen erfolgte für diesen Vergleich auf der Straße sowie auf am PKW-Rollenprüfstand mit dem AVL MOVE, um die gleiche Messgerätebasis sicherzustellen.

Die Fahrwiderstände der Fahrzeuge waren nicht bekannt, weshalb generische Werte verwendet wurden, die aber eine Unsicherheit darstellen. Weitere Unsicherheiten ergeben sich z. B. durch die Steigungsberechnung, unterschiedliche Nebenverbraucherstrategien des Fahrzeugs, speziell der Klimaanlage, und fehlende Kurvendynamik am Rollenprüfstand. Diese Unsicherheiten können leicht zu einer Abweichung der CO₂-Emissionen um 10 % zwischen PKW-Rollenprüfstand und RDE-Fahrt führen.

Bei allen Fahrzeugen kann gesagt werden, dass die Unterschiede der CO₂-Messwerte zwischen Rollenmessung und RDE-Fahrt im Bereich der Schwankungsbreite der zuvor erwähnten Unsicherheiten liegen. Im Fall des VW Golf Variant 1.6 TDI konnte die CO₂-Emission der RDE-Fahrt gut reproduziert werden. Für den VW Passat Kombi 2.0 TDI sind die Abweichungen größer, aber noch innerhalb des Toleranzbereichs. Wie bereits bei den CO₂-Vergleichen ersichtlich, stimmt der NO_x-Emissionswert beim VW Golf Variant 1.6 TDI zwischen PKW-Rollenmessung und Straßenmessung gut, beim VW Passat Kombi 2.0 TDI liegt der gemessene NO_x-Wert am PKW-Rollenprüfstand unterhalb des Messwerts der RDE-Fahrt. Die NO_x-Emissionen korrelieren somit mit den gemessenen CO₂-Emissionen.

Somit ist eine Erkennung der Rollenprüfstandmessung durch die Motorsteuerungssoftware nahezu auszuschließen.

5 LKW-Messungen

Im Rahmen des Projekts wurden zwei schwere Nutzfahrzeuge sowohl am Rollenprüfstand als auch im realen Straßenverkehr mittels PEMS gemessen.

5.1 Messungen Fahrzeug 1

5.1.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeug 1 ist ein Verteilerfahrzeug der Emissionsklasse Euro VI, ein Renault MDA2C. Dieses Fahrzeug wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber aufgrund von Lücken im HBEFA für die Verteilerklasse ausgewählt.

Tabelle 22 zeigt die Zusammenfassung der Fahrzeugdaten für den Renault MDA2C.

Tabelle 22: Fahrzeugdaten Fahrzeug 1

Fahrzeugdaten Renault MDA2C	
Marke	Renault
Modell	MDA2C
Zulassungsjahr	2013
Klasse	N2
Eigengewicht Fahrzeug	6.140 kg
Höchst zulässige Gesamtmasse Fahrzeug	12.000 kg
Km-Stand	16.500 km
Getriebe	6 Gang MT
Antriebsart	Diesel
Nennleistung	177 kW
Nenndrehzahl	2.200 U/min
Emissionsklasse	Euro VI
Abgasnachbehandlung	AGR, DOC, DPF, SCR, CUC

5.1.2 Rollenmessungen Fahrzeug 1

Insgesamt wurden auf dem Rollenprüfstand acht Messungen mit Fahrzeug 1 durchgeführt. Dazu wurden neben dem WHVC, noch der HBEFA Stop&Go Zyklus und RDE-Rollenzyklen gemessen.

Der WHVC wird einmal 2-phasig gefahren, wobei die erste Phase den Kaltstartanteil darstellt und mit 14 % gewichtet wird. Daraufhin muss das Fahrzeug 10 Minuten im Leerlauf stehen (Soak time), bevor die zweite Phase (Wiederholung der ersten Phase) gefahren wird.

Mit diesem Zyklus kann das Emissionsverhalten des Fahrzeugs indikativ mit den Grenzwerten für den in der Typprüfung relevanten Motorprüfstandzyklus WHTC verglichen werden.³ Zusätzlich wird noch ein weiterer WHVC heiß vorkonditioniert gefahren und stellt das Emissionsverhalten nach einer anhaltenden Autobahnfahrt dar.

Der Stop&Go Zyklus stellt einen „Worst Case“-Fall für Niedriglast und Niedrigtemperaturbetrieb von LKW dar und eignet sich für die Analyse der Funktionsweise der SCR-Abgasnachbehandlung. Der Zyklus wird einmal heiß vorkonditioniert und beim zweiten Mal nach einer längeren Leerlaufphase gestartet, d.h. mit betriebswarmem Motor aber ausgekühlter Abgasanlage.

Die Kombination dieser beiden Zyklen eignet sich sehr gut für die Modellerstellung in PHEM⁴, da diese Messungen die zentralen Leistungs-, Drehzahl und Abgastemperaturbereiche abdecken.

Die zusätzlichen RDE-Rollenzyklen stellen exakte Ausschnitte aus den zuvor getätigten RDE Messungen dar. Mit diesen soll das Emissionsverhalten des Fahrzeugs direkt mit dem Verhalten auf der Straße verglichen werden.

Bei allen Rollenzyklen wurde zusätzlich mit der PEMS-Messeinrichtung mitgemessen, damit die Genauigkeit des PEMS validiert werden kann.

In Tabelle 23 sind Startbedingungen, Dauer und Umgebungstemperatur je Zyklus zusammengefasst.

Tabelle 23: Gemessene Zyklen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 1

Zyklus	Vorkonditionierung	Zeit [s]	Umgebungstemperatur [°C]
WHVC 2-phasig	Kaltstart	3.600	22
WHVC	10 Minuten bei 80 km/h	1.800	25
HBEFA Stop&Go hot	10 Minuten bei 80 km/h	1.230	27
HBEFA Stop&Go int.	30 Minuten Leerlauf	1.230	26
Rollenzyklus RDE Urban 1	170°C nach SCR	1.137	22
Rollenzyklus RDE Urban 2	170°C nach SCR	1.137	24
Rollenzyklus RDE Motorway 1	270°C nach SCR	585	24
Rollenzyklus RDE Motorway 2	270°C nach SCR	585	25

5.1.2.1 Ermittlung der Fahrwiderstände für die LKW-Rollenmessungen

Die Fahrwiderstände und Fahrzeugmasse werden für den WHVC in Abhängigkeit der Nennleistung so bestimmt, dass das Drehzahl- und Lastkollektiv dem Motorprüfstandzyklus WHTC sehr nahekommt. Dies ist in (Six, 2014) genauer ausgeführt.

³ Dieses Verfahren wurde im Rahmen der Global Technical Regulation zur Emissionszertifizierung von hybridisierten schweren Nutzfahrzeugen entwickelt. Dabei werden in Abhängigkeit von der Motorleistung die am Rollenprüfstand einzustellende Fahrzeugmasse und Fahrwiderstände berechnet. Zusätzlich wird zum WHVC Geschwindigkeitsprofil ein Steigungsverlauf ermittelt. Wird das SNF so auf dem Rollenprüfstand vermessen, ergibt sich für den Motor ein Drehzahl- und Lastkollektiv, dass dem Motorprüfstandzyklus WHTC sehr nahekommt. Details dazu siehe (Six, 2014).

⁴ Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model; Emissionsmodell der TU Graz das zur Berechnung der Emissionsfaktoren im HBEFA verwendet wird.

Für den HBEFA Stop&Go Stauzyklus werden dieselben Fahrwiderstände wie für den WHVC verwendet.

Für die RDE Rollenzyklen werden Realfahrwiderstände auf Basis des Reifenlabels und der Fahrzeugkategorie herangezogen. Die Daten dafür stammen aus einer Datensammlung, die während der Entwicklung der CO₂ Bestimmungsmethode für SNF (Regulation, 2017) erstellt wurde. Die Masse des Fahrzeugs wird entsprechend der RDE Fahrten eingestellt

In Tabelle 24 sind die Rolleneinstellungen für die acht Fahrzyklen zusammengefasst.

Tabelle 24: Rolleneinstellungen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 1

Zyklus	R0 [N]	R2 [Ns ² /m ²]	Masse [kg]
WHVC 2-phasig	841,9	2,592	13299
WHVC	841,9	2,592	13299
HBEFA Stop&Go hot	841,9	2,592	13299
HBEFA Stop&Go int.	841,9	2,592	13299
Rollenzklus RDE Urban 1	641,2	2,032	9535
Rollenzklus RDE Urban 2	641,2	2,032	9535
Rollenzklus RDE Motorway 1	641,2	2,032	9535
Rollenzklus RDE Motorway 2	641,2	2,032	9535

5.1.2.2 Ergebnisse Rollenmessungen Fahrzeug 1

Neben den limitierten Schadstoffkomponenten (siehe Tabelle 25) wurden zusätzlich noch einige nichtlimitierte Schadstoffkomponenten mittels Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer FTIR (siehe Tabelle 26) gemessen. Außerdem wurde auch mit dem PEMS (siehe Tabelle 27) am Rollenprüfstand mitgemessen, damit gegebenenfalls Abweichungen zwischen den Messgeräten festgestellt werden können. Zudem wurde ein Massenstromsignal für die Emissionsmassenberechnung von Micro-Soot Sensor und FTIR, die beide aus dem unverdünnten Abgas entnehmen, benötigt.

Für die Berechnung der Emissionsmassen des 2-phasigen WHVCs wird Phase 1 (Kaltstart) mit 14 % und Phase 2 (folgt auf 10 Minuten Leerlauf nach Phase 1) mit 86 % gewichtet. Diese Gewichtung ist gesetzliche Vorgabe für den WHTC und wird somit auf dem Rollenprüfstand für den WHVC übernommen.

Der Kraftstoffverbrauch wird aus der Kohlenstoffbilanz der gemessenen gasförmigen Emissionen berechnet (siehe Tabelle 26).

Die Partikelemissionen sind deutlich geringer als der Grenzwert, somit scheint der DPF voll funktionsfähig zu sein.

Beim Vergleich des 2-phasigen WHVC NO_x-Werts mit dem Grenzwert von 0,46 g/kWh kann man feststellen, dass dieser eingehalten wird. Wie bereits erwähnt ist beim Vergleich der gemessenen Werte und der Grenzwerte aber zu beachten, dass der WHVC den WHTC nur annähert und nicht exakt die gleichen Betriebspunkte angefahren werden. Auch alle übrigen

gemessenen Emissionskomponenten (siehe Tabelle 25 bis Tabelle 27) liegen im 2-phasigen WHVC ebenfalls, teilweise deutlich, unter dem Grenzwert.

Bei genauerer Betrachtung des Kaltstartteils des WHVC kann man erkennen, dass die Abgasnachbehandlung nach etwa 15 Minuten eine Temperatur von 200 °C erreicht. Ab dieser Betriebstemperatur kann AdBlue eindosiert werden, da dann die Thermo- und Hydrolyse zur Umwandlung von AdBlue in NH_3 funktionieren. Der Vergleich der Emissionen vor und nach Katalysator bestätigen, dass ab diesem Zeitpunkt eine effektive Stickoxidreduktion vorliegt. In der zehnminütigen Leerlaufphase kühlt die Abgasnachbehandlung zwar wieder unter 200 °C ab, jedoch steigt die Temperatur mit Beginn der Warmstartphase schnell wieder über diese 200 °C an. Trotz dieser Abkühlung steigen die Stickoxidemissionen aber nicht merklich an. Dies deutet darauf hin, dass in der ersten Phase des Zyklus genügend NH_3 im SCR-Katalysator für die Stickoxidreduktion in dieser kurzen Periode unter 200 °C eingespeichert werden konnte.

Interessant ist der Vergleich der beiden HBEFA Stop&Go Zyklen. Auffällig sind dabei die hohen spezifischen NO_x -Emissionen bei Vorkonditionierung im Leerlauf, d. h. mit ausgekühlter Abgasnachbehandlungsanlage aber betriebswarmem Motor. Durch die anhaltende Niederlast erreicht die Abgasnachbehandlung in diesem Zyklus nie die für AdBlue-Dosierung notwendige Temperatur von mindestens ca. 200 °C. Deshalb wird das eingespeicherte NH_3 im SCR-Katalysator zur NO_x -Reduktion verbraucht, womit die gespeicherte NH_3 Masse graduell abnimmt. Mit dieser Abnahme reduziert sich auch die mögliche Konvertierung im Katalysator. Deshalb ergibt sich beim Vergleich der NO_x -Engine-Out und End-of-Tailpipe Emission eine relativ geringe NO_x -Konvertierung über den gesamten Zyklus. Beim heiß vorkonditionierten Stop&Go Zyklus kühlt die Abgasnachbehandlung durch den niederlastigen Betrieb ebenfalls unter ihre Arbeitstemperatur von 200 °C ab. Bei diesem Zyklus reicht die vor Zyklusbeginn eingespeicherte NH_3 -Menge aber aus, um im gesamten Zyklus eine relativ gute Konvertierung zu gewährleisten.

Bei den hochlastigen Zyklen (WHVC und RDE motorway) sind die relativ hohen N_2O -Emissionen auffällig. Die Auswirkungen sind durch das mit 265 hohe CO_2 -Äquivalent von N_2O und dem daraus resultierenden zusätzlichen Treibhausgas von teilweise über 10 % doch beträchtlich.

Tabelle 25: limitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1

Zyklus	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO_x [g/kWh]	PM [g/kWh]	PN [#g/kWh]
WHVC 2-phasig	0,183	0,001	0,368	0,000	4,151 E10
WHVC	0,136	0,004	0,093	0,000	3,660 E10
HBEFA Stop&Go hot	0,057	0,010	0,351	0,000	4,574 E10
HBEFA Stop&Go int.	0,186	0,026	6,127	0,000	2,984 E10
Rollenzyklus RDE Urban 1	0,390	0,006	0,726	0,976	5,670 E11
Rollenzyklus RDE Urban 2	0,377	0,007	0,042	0,008	1,089 E11
Rollenzyklus RDE Motorway 1	0,011	0,000	0,008	0,016	1,396 E11
Rollenzyklus RDE Motorway 2	0,004	0,000	0,033	0,012	5,974 E10

Tabelle 26: nichtlimitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	NO ₂ [g/kWh]	NH ₃ [g/kWh]	N ₂ O [g/kWh]	HNCO [g/kWh]
WHVC 2-phasig	754,8	239,7	0,285	0,00104	0,25991	0,01166
WHVC	741,3	235,4	0,088	0,00121	0,43371	0,01030
HBEFA Stop&Go hot	1375,1	436,6	0,199	0,00336	0,12889	0,06547
HBEFA Stop&Go int.	1376,6	437,0	4,086	0,00297	0,16566	0,06474
Rollenzyklus RDE Urban 1	1041,2	330,7	0,610	0,00183	0,07176	0,03800
Rollenzyklus RDE Urban 2	1106,2	351,3	0,010	0,00211	0,10995	0,04125
Rollenzyklus RDE Motorway 1	687,7	218,3	0,001	0,00069	0,24215	0,00865
Rollenzyklus RDE Motorway 2	693,8	220,3	0,001	0,00080	0,37807	0,00909

Tabelle 27: RDE-Ergebnisse LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 1

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	NO _x - Engine- Out [g/kWh]	Soot [g/kWh]
WHVC 2-phasig	756,7	0,843	0,000	0,426	6,882	0,00007
WHVC	741,7	0,775	0,000	0,091	7,086	0,00005
HBEFA Stop&Go hot	1411,7	0,187	0,049	0,530	12,396	0,00015
HBEFA Stop&Go int.	1400,4	0,256	0,095	7,010	11,761	0,00029
Rollenzyklus RDE Urban 1	1030,4	0,533	0,000	0,978	11,962	0,00026
Rollenzyklus RDE Urban 2	1067,9	0,382	0,017	0,145	12,634	0,00058
Rollenzyklus RDE Motorway 1	700,9	0,310	-	0,028	7,821	0,00016
Rollenzyklus RDE Motorway 2	701,9	0,381	0,004	0,095	7,981	0,00016

5.1.3 RDE-Messungen Fahrzeug 1

5.1.3.1 Messplan RDE Fahrzeug 1

Insgesamt wurden fünf RDE-Messungen durchgeführt. Neben vier ISC-konformen Fahrten auf zwei unterschiedlichen Routen, welche den gesetzlichen Rahmenbedingungen für In-Use Tests für schwere Nutzfahrzeuge entsprechen (Regulation, 2011), wurde zusätzlich noch eine RDE-Stadtfahrt für die Überprüfung des Niederlastverhaltens des Fahrzeugs im Realverkehr durchgeführt. Die ISC Fahrten wurden pro Route jeweils am Morgen und am Nachmittag durchgeführt, damit mögliche Einflüsse der Umgebungstemperatur untersucht werden können.

Leider war durch die relative konstante Umgebungstemperatur an den Messtagen keine große Differenz bei der Umgebungstemperatur zwischen den einzelnen Messungen vorhanden. Das Fahrzeug wurde für die Messungen ungefähr mit der Hälfte der möglichen Zuladung beladen. Das Messprogramm ist in Tabelle 28 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 28: Messprogramm RDE Fahrzeug 1

Zyklus	Start- bedingung	Fahrzeug- masse [kg]	Beladung	Dauer [min]	Strecke [km]	Umgebungs- temperatur [°C]
Ries 1	Warm	9535	57,9 %	181,1	133,3	13
Ries 2	Warm	9535	57,9 %	151,0	133,3	17
Köflach 1	Warm	9535	57,9 %	165,6	138,0	17
Köflach 2	Warm	9535	57,9 %	142,0	137,7	19
Stadtrunde	Warm	9535	57,9 %	81,0	13,2	17

5.1.3.2 Ergebnisse RDE-Messungen Fahrzeug 1

Tabelle 29 zeigt die Ergebnisse für die ISC-konformen Messungen auf der Ries- und der Köflach-Route. Diese wurden mittels der 90 % Perzentil Methode des gesetzlichen Auswertetools EMROAD für die einzelnen Messfahrten dargestellt. Diese Werte entsprechen dem offiziellen Ergebnis gemäß der Auswertung der ISC Tests für den Vergleich mit den Grenzwerten. Jedoch sind die zeitlichen Anteile, teilweise abweichend von den vorgegebenen Anteilen. Diese sind für Fahrzeuge der N2 Kategorie mit 45 % Stadt-, 25 % Überland- und 30 % Autobahnanteil mit einer Toleranz von 5 % vorgegeben. Trotzdem lassen die Ergebnisse eine sinnvolle Einschätzung des Emissionsverhaltens von Fahrzeug 1 im Realbetrieb zu.

Die Grenzwerte werden für CO, HC und NO_x bei allen Messfahrten deutlich eingehalten.

Tabelle 29: Ergebnisse Auswertung Emroad Fahrzeug 1

Zyklus	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	Anteil Stadt	Anteil Überland	Anteil Autobahn
Ries 1	0,670	0,000	0,170	53,3 %	20,9 %	25,9 %
Ries 2	0,420	0,000	0,110	43,4 %	24,0 %	32,6 %
Köflach 1	0,620	0,000	0,110	49,9 %	17,3 %	32,8 %
Köflach 2	0,610	0,000	0,110	37,1 %	24,8 %	38,1 %

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse, die sich aus der gesamten Emissionsmasse und verrichteter Arbeit für die jeweiligen Zyklen bzw. Abschnitte ergeben. Erst werden diese für die gesamte RDE Messung dargestellt und danach aufgeteilt in die einzelnen Abschnitte (Stadt, Überland und Autobahn).

Die Ergebnisse sind für alle Emissionskomponenten für alle unterschiedlichen Straßenkategorien auf einem geringen Niveau. Auffällig sind die geringen NO_x-Emissionen bei der RDE-Stadtfahrt. Trotz der durchgängig niederen Last sind die Konvertierungsraten offensichtlich immer noch sehr hoch. Dies bestätigt das Ergebnis des Stauzyklus auf der Rolle mit heißer Vorkonditionierung, der ebenso ein sehr geringes Emissionsniveau aufweist.

Wie bereits erwähnt ist der Unterschied in der Umgebungstemperatur zwischen Vormittags- und Nachmittagsfahrt relativ gering. Somit kann auf Basis dieser Messungen ein möglicher Einfluss der Umgebungstemperatur nicht untersucht werden.

Tabelle 30: Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, gesamte RDE-Fahrt

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	673,2	214,0	0,603	0,003	0,180
Ries 2	661,7	210,2	0,290	0,003	0,100
Köflach 1	669,7	212,8	0,393	0,000	0,082
Köflach 2	663,9	210,9	0,293	0,000	0,089
Stadtrunde	808,5	256,8	0,377	0,001	0,064

Tabelle 31: Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, Anteil Stadt

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	769,5	244,7	0,770	0,005	0,242
Ries 2	733,5	233,1	0,403	0,002	0,120
Köflach 1	781,4	248,3	0,532	0,000	0,077
Köflach 2	757,3	240,6	0,373	0,000	0,080
Stadtrunde	808,8	256,9	0,377	0,001	0,064

Tabelle 32: Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, Anteil Überland

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	643,6	204,6	0,570	0,002	0,196
Ries 2	643,5	204,4	0,244	0,003	0,086
Köflach 1	620,8	197,2	0,330	0,000	0,081
Köflach 2	634,2	201,4	0,122	0,000	0,091

Tabelle 33: Ergebnisse RDE Fahrzeug 1, Anteil Autobahn

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	635,1	201,9	0,528	0,001	0,139
Ries 2	637,4	202,5	0,257	0,001	0,096
Köflach 1	634,1	201,5	0,350	0,000	0,086
Köflach 2	632,3	200,9	0,342	0,000	0,092

5.1.3.3 Vergleich zwischen RDE Messungen und Rollenmessungen

Um das Verhalten der Fahrzeuge auf dem Rollenprüfstand genau nachvollziehen zu können beziehungsweise eine Abweichung in der Betriebsstrategie von RDE zum Rollenprüfstand feststellen zu können, wurden einzelne Abschnitte der Straßenmessungen auf dem Rollenprüfstand nachgemessen. Dabei handelt es sich um die Zyklen RDE urban und RDE motorway.

Folgend werden genau diese Abschnitte aus den RDE Fahrten mit den Ergebnissen der Rollenprüfstandmessungen verglichen. Dazu werden die Ergebnisse des PEMS verglichen, damit eine mögliche Abweichung durch unterschiedliche Messgeräte ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 34 zeigt die Ergebnisse genau für die RDE Abschnitte, die dann auch auf dem Rollenprüfstand nachgemessen wurden. RDE urban steht dabei für den Stadtabschnitt und RDE motorway für den Autobahnabschnitt. Rollenzyklus RDE urban und Rollenzyklus RDE motorway repräsentieren jeweils die dazu passenden Rollenmessungen. Beide Zyklen wurden zweimal gemessen, um Messausreißer ausschließen zu können. Zudem ist die Abweichung der Rollenzyklen zu der jeweiligen RDE Messung gezeigt.

Es ist zu erkennen, dass die CO₂ Ergebnisse von RDE Messung und passendem Rollenzyklus gut zueinander passen. Das bedeutet, dass die Betriebspunkte im Durchschnitt relativ gut nachgefahren werden konnten. Bei CO und NO_x zeigen sich teilweise sehr große Abweichungen. Die Vorkonditionierung der Zyklen wurde so gestaltet, dass die Katalysatortemperaturen denen der RDE Messungen am Zyklusbeginn entsprechen. Offensichtlich reicht dies aber nicht aus, um genau das Emissionsverhalten in den entsprechenden Zyklen nachstellen zu können. Bei der Betrachtung von NO_x spielt die im SCR-Katalysator eingespeicherte NH₃-Menge zusätzlich noch eine wichtige Rolle, was speziell durch die unterschiedlichen NO_x-Emissionen bei den beiden Rollenzyklen RDE urban 1 und 2 zu erkennen ist. Bei CO liegt bei den betrachteten Zyklen prinzipiell ein geringes Emissionsniveau vor und deshalb sind die relativen Abweichungen eher hoch. Unterschiedliche Motorbetriebsstrategien, die Auswirkungen auf das Verhalten des Oxidationskatalysators oder der Abgasrückführung haben, konnten auf Basis der vorhandenen Daten nicht identifiziert werden. Entscheidend ist hier aber, dass die Rollenmessungen teilweise höhere Ergebnisse als die RDE Messungen liefern und somit nicht von einer besonderen Betriebsstrategie auf dem Rollenprüfstand ausgegangen werden kann.

Tabelle 34: Vergleich RDE Messung und RDE Rollenzyklen, Fahrzeug 1

Zyklus	CO ₂ [g]	Abw. [%]	CO [g]	Abw. [%]	NO _x [g]	Abw. [%]
RDE urban	2737,1	-	1,425	-	0,818	-
RDE motorway	5977,1	-	5,317	-	1,413	-
Rollenzklus RDE Urban 1	2636,1	-3,7 %	1,362	-4,4 %	2,503	206,0 %
Rollenzklus RDE Urban 2	2595,8	-5,2 %	0,928	-34,8 %	0,354	-56,8 %
Rollenzklus RDE Motorway 1	6052,5	1,3 %	2,676	-49,7 %	0,243	-82,8 %
Rollenzklus RDE Motorway 2	6093,0	1,9 %	3,306	-37,8 %	0,823	-41,8 %

5.2 Messungen Fahrzeug 2

5.2.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeug 2 ist ein Verteilerfahrzeug der Emissionsklasse Euro VI, ein DAF LF 250. Dieses Fahrzeug wurde, gleich wie Fahrzeug 1, in Abstimmung mit dem Auftraggeber aufgrund von Lücken im HBEFA für die Verteilerklasse ausgewählt.

Tabelle 35 zeigt die Zusammenfassung der Fahrzeugdaten für den DAF LF 250.

Tabelle 35: Fahrzeugdaten Fahrzeug 2

Fahrzeugdaten DAF LF 250	
Marke	DAF
Modell	LF 250
Zulassungsjahr	2016
Klasse	N3
Eigengewicht Fahrzeug	7.050 kg
Höchst zulässige Gesamtmasse Fahrzeug	16.000 kg
Km- Stand	1.200 km
Getriebe	6 Gang AMT
Antriebsart	Diesel
Nennleistung	180 kW
Nenndrehzahl	2.250 U/min
Emissionsklasse	Euro VI
Abgasnachbehandlung	AGR, DOC, DPF, SCR, CUC

5.2.2 Rollenmessungen Fahrzeug 2

Bei Fahrzeug 2 wurde das gleiche Messprogramm wie bei Fahrzeug 1 auf dem Rollenprüfstand durchgeführt.

Ebenso wurde bei allen Rollenzyklen zusätzlich mit der PEMS-Messeinrichtung mitgemessen, damit die Genauigkeit des PEMS validiert werden kann.

In Tabelle 36 sind Startbedingungen, Dauer und Umgebungstemperatur je Zyklus zusammengefasst.

Tabelle 36: Gemessene Zyklen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 2

Zyklus	Vorkonditionierung	Zeit [s]	Umgebungstemperatur [°C]
WHVC 2-phasig	Kaltstart	3.600	28
WHVC	10 Minuten bei 80 km/h	1.800	30
HBEFA Stop&Go hot	10 Minuten bei 80 km/h	1.230	31
HBEFA Stop&Go int.	30 Minuten Leerlauf	1.230	30
Rollenzklus RDE Urban 1	180°C nach SCR	786	29
Rollenzklus RDE Urban 2	180°C nach SCR	786	31
Rollenzklus RDE Motorway 1	260°C nach SCR	409	31
Rollenzklus RDE Motorway 2	260°C nach SCR	409	32

5.2.2.1 Ermittlung der Fahrwiderstände für die LKW-Rollenmessungen

Die Zyklen und die Fahrwiderstände wurden gleich wie bei Fahrzeug 1 bestimmt. In Tabelle 37 sind die Rolleneinstellungen für die acht Fahrzyklen zusammengefasst.

Tabelle 37: Rolleneinstellungen am LKW-Rollenprüfstand, Fahrzeug 2

Zyklus	R0 [N]	R2 [Ns ² /m ²]	Masse [kg]
WHVC 2-phasig	856,8	2,612	13595
WHVC	856,8	2,612	13595
HBEFA Stop&Go hot	856,8	2,612	13595
HBEFA Stop&Go int.	856,8	2,612	13595
Rollenzklus RDE Urban 1	635,0	2,966	11780
Rollenzklus RDE Urban 2	635,0	2,966	11780
Rollenzklus RDE Motorway 1	635,0	2,966	11780
Rollenzklus RDE Motorway 2	635,0	2,966	11780

5.2.2.2 Ergebnisse Rollenmessungen Fahrzeug 2

Die Auswertemethodik und die eingesetzten Messgeräte sind gleich wie bei Fahrzeug 1. Die Ergebnisse sind den folgenden Tabellen zu entnehmen.

Auch bei diesem Fahrzeug sind die Partikelemissionen unter dem Grenzwert, wodurch man auf einen funktionierenden Dieselpartikelfilter schließen kann. Die Grenzwerte des 2 phasigen WHVCs werden auch bei diesem Fahrzeug eingehalten. Hier ist aber auch wieder darauf hinzuweisen, dass der WHVC den WHTC nur annähert und nicht exakt die gleichen Betriebspunkte darstellt.

Bei den HBEFA Stop&Go Zyklen ist wieder zu erkennen, dass die heiß vorkonditionierte Messung ein geringes NO_x-Ergebnis im Vergleich zum Leerlaufvorkonditionierten darstellt. Dies ist auch hier auf die geringe Katalysatortemperatur durch die Niederlast und den damit verbundenen Verbrauch des eingespeicherten Ammoniaks zurückzuführen. Teilweise sind die N₂O-Emissionen auch wieder über 0,1 g/kWh und sind somit nicht zu vernachlässigen.

Tabelle 38: limitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 2

Zyklus	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]	PN [#kWh]
WHVC 2-phasig	0,012	0,065	0,828	0,007	5,262 E11
WHVC	0,000	0,056	0,036	0,005	1,212 E11
HBEFA Stop&Go hot	0,000	0,335	0,244	0,000	3,44 E10
HBEFA Stop&Go int.	0,226	0,650	5,089	0,029	2,846 E10
Rollenzyklus RDE Urban 1	0,014	0,060	0,761	0,016	4,911 E10
Rollenzyklus RDE Urban 2	0,020	0,034	0,618	0,014	2,543 E10
Rollenzyklus RDE Motorway 1	0,000	0,009	0,004	0,012	5,089 E10
Rollenzyklus RDE Motorway 2	0,027	0,007	0,005	0,014	5,327 E10

Tabelle 39: nichtlimitierte Schadstoffkomponenten LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 2

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	NO ₂ [g/kWh]	NH ₃ [g/kWh]	N ₂ O [g/kWh]
WHVC 2-phasig	761,9	241,9	0,020	0,022	0,066
WHVC	735,0	233,4	0,001	0,004	0,071
HBEFA Stop&Go hot	1375,1	436,8	0,071	0,002	0,098
HBEFA Stop&Go int.	1417,2	450,7	0,013	0,001	0,152
Rollenzyklus RDE Urban 1	1013,1	321,6	0,022	0,001	0,117
Rollenzyklus RDE Urban 2	978,8	310,7	0,013	0,001	0,130
Rollenzyklus RDE Motorway 1	682,0	216,5	0,001	0,007	0,072
Rollenzyklus RDE Motorway 2	678,7	215,5	0,001	0,024	0,112

Tabelle 40: RDE-Ergebnisse LKW-Rollenmessungen Fahrzeug 2

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	NO _x - Engine- Out [g/kWh]	Soot [g/kWh]
WHVC 2-phasig	783,0	0,291	0,002	0,398	5,255	-
WHVC	739,8	0,067	0,000	0,059	5,829	-
HBEFA Stop&Go hot	1370,1	0,425	0,004	0,241	8,566	-
HBEFA Stop&Go int.	1444,2	0,569	0,502	5,162	8,609	-
Rollenzyklus RDE Urban 1	1051,1	1,272	0,000	0,936	7,038	-
Rollenzyklus RDE Urban 2	1018,3	1,532	-	0,622	6,847	-
Rollenzyklus RDE Motorway 1	735,4	0,643	0,000	0,000	5,055	-
Rollenzyklus RDE Motorway 2	727,4	0,070	0,000	0,022	5,236	-

5.2.3 RDE-Messungen Fahrzeug 2

5.2.3.1 Messplan RDE Fahrzeug 2

Bei diesem Fahrzeug wurden insgesamt vier RDE-Messungen durchgeführt und stellen vier ISC-konforme Fahrten auf zwei unterschiedlichen Routen, welche den gesetzlichen Rahmenbedingungen für In-Use Tests für schwere Nutzfahrzeuge entsprechen, dar. Trotz der Messungen am Vormittag und am Nachmittag ergab sich kein großer Umgebungstemperaturunterschied zwischen den einzelnen Fahrten. Das Fahrzeug wurde für die Messungen ungefähr mit der Hälfte der möglichen Zuladung beladen. Das Messprogramm ist in Tabelle 41 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 41: Messprogramm RDE Fahrzeug 2

Zyklus	Start- bedingung	Fahrzeug- masse [kg]	Beladung	Dauer [min]	Strecke [km]	Umgebungs- temperatur [°C]
Ries 1	Warm	11780	52,8 %	181,6	164,4	13
Ries 2	Warm	11780	52,8 %	162,4	164,6	11
Köflach 1	Warm	11780	52,8 %	138,8	149,5	20
Köflach 2	Warm	11780	52,8 %	132,2	149,9	12

5.2.3.2 Ergebnisse RDE-Messungen Fahrzeug 2

Tabelle 42 zeigt die Ergebnisse für die ISC-konformen Messungen auf der Ries- und der Köflach-Route. Die Zeitanteile sind für Fahrzeuge der N3 Kategorie mit 20 % Stadt-, 25 % Überland- und 55 % Autobahnanteil mit einer Toleranz von 5 % vorgegeben. Auch wenn nicht alle Fahrten

genau in den Toleranzbereichen liegen, lassen die Ergebnisse trotzdem eine sinnvolle Einschätzung des Emissionsverhaltens von Fahrzeug 1 im Realbetrieb zu.

Die Grenzwerte werden für CO, HC und NO_x bei allen Messfahrten deutlich eingehalten.

Tabelle 42: Ergebnisse Auswertung Emroad Fahrzeug 2

Zyklus	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	Anteil Stadt	Anteil Überland	Anteil Autobahn
Ries 1	0,440	-	0,100	38,3 %	19,6 %	42,1 %
Ries 2	0,180	0,000	0,290	32,8 %	19,1 %	48,1 %
Köflach 1	0,080	0,000	0,060	25,2 %	21,0 %	53,9 %
Köflach 2	0,220	0,000	0,080	20,2 %	25,5 %	54,4 %

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse, die sich aus der gesamten Emissionsmasse und verrichteter Arbeit für die jeweiligen Zyklen bzw. Abschnitte ergeben.

Die Ergebnisse sind für alle Emissionskomponenten für alle unterschiedlichen Straßenkategorien auf einem geringen Niveau, wobei diese bei den Autobahnabschnitten besonders niedrig sind. Dafür sorgen die relativ hohen Lasten und somit die hohen Katalysatortemperaturen des SCR-Katalysators.

Tabelle 43: Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, gesamte RDE Fahrt

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	716,640	227,707	0,423	0,000	0,052
Ries 2	672,918	213,694	0,147	0,004	0,106
Köflach 1	636,176	201,981	0,052	0,002	0,046
Köflach 2	645,607	205,044	0,188	0,005	0,051

Tabelle 44: Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, Anteil Stadt

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	842,680	267,834	0,671	0,000	0,113
Ries 2	766,812	243,563	0,245	0,022	0,221
Köflach 1	784,089	248,983	0,148	0,007	0,187
Köflach 2	792,733	251,830	0,334	0,016	0,165

Tabelle 45: Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, Anteil Überland

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	670,916	213,164	0,374	0,000	0,061
Ries 2	680,782	216,186	0,151	0,001	0,212
Köflach 1	609,742	193,592	0,069	0,001	0,044
Köflach 2	626,433	198,938	0,165	0,004	0,047

Tabelle 46: Ergebnisse RDE Fahrzeug 2, Anteil Autobahn

Zyklus	CO ₂ [g/kWh]	FC [g/kWh]	CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]
Ries 1	635,440	201,882	0,335	0,000	0,025
Ries 2	629,655	199,932	0,115	0,000	0,044
Köflach 1	622,307	197,566	0,033	0,001	0,027
Köflach 2	629,589	199,952	0,175	0,004	0,033

5.2.3.3 Vergleich zwischen RDE-Messungen und Rollenmessungen

Bei diesem Fahrzeug wurde wiederum ein Ausschnitt einer Autobahnfahrt und einer Stadtfahrt auf dem Rollenprüfstand nachgefahren, um mögliche Abweichungen in der Betriebsstrategie zu erkennen.

Dazu werden wieder die RDE-Ergebnisse verglichen, damit eine Abweichung durch unterschiedliche Messgeräte ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 34 zeigt die Ergebnisse genau für die RDE Abschnitte, die dann auch auf dem Rollenprüfstand nachgemessen wurden. RDE urban steht dabei für den Stadtabschnitt und RDE motorway für den Autobahnabschnitt. Rollenzyklus RDE urban und Rollenzyklus RDE motorway repräsentieren jeweils die dazu passenden Rollenmessungen. Beide Zyklen wurden zweimal gemessen, um Messausreißer ausschließen zu können. Zudem ist die Abweichung der Rollenzyklen zu der jeweiligen RDE Messung gezeigt.

Die CO₂-Messwerte passen sehr gut zusammen, somit ist anzunehmen, dass die Motorleistung gut nachgefahren wurde. Bei CO sind die Messergebnisse bei den Rollenmessungen teilweise deutlich höher, jedoch können diese Abweichungen durch das prinzipiell geringe CO-Emissionsniveau bei den Straßenfahrten erklärt werden. Bei einem Zyklus ist der Rollenmesswert deutlich geringer, was dem erst erkannten Trend widerspricht. Bei den Rollenmessungen der Stadtfahrten sind die NO_x-Emissionen ebenfalls deutlich höher, jedoch bei den Autobahnmessungen auf dem gleichen Niveau bzw. sogar geringer. Die Ursachen für die Abweichungen im Innerortsteil auf der Rolle und auf der Straße könnten aus der unterschiedlichen Vorgeschichte und damit unterschiedlichem NH₃-Füllstand im SCR vor Testbeginn stammen. Da die NO_x-Emissionen im Rollentest höher liegen, kann eher keine Zyklerkennung angenommen werden.

Tabelle 47: Vergleich RDE Messung und RDE Rollenzyklen, Fahrzeug 2

Zyklus	CO ₂ [g/h]	Abw. [%]	CO [g/h]	Abw. [%]	NO _x [g/h]	Abw. [%]
RDE urban	13502,4	-	11,292	-	1,327	-
RDE motorway	26951,2	-	3,524	-	0,791	-
Rollenzklus RDE Urban 1	13396,8	-0,8 %	16,210	43,6 %	11,930	799,0 %
Rollenzklus RDE Urban 2	13094,6	-3,0 %	19,697	74,4 %	7,996	502,5 %
Rollenzklus RDE Motorway 1	26117,8	-3,1 %	22,830	547,9 %	0,000	-100,0 %
Rollenzklus RDE Motorway 2	25941,9	-3,7 %	2,501	-29,0 %	0,775	-2,0 %

5.3 Vergleich Emissionsfaktoren SNF HBEFA 3.3 und 4.1

2019 wurde das HBEFA 4.1, in das die in dieser Arbeit dargestellten Messdaten eingeflossen sind, veröffentlicht. Beim Vergleich mit der Version 3.3 ist zu erkennen, dass sich die Emissionsfaktoren für schwere Nutzfahrzeuge teilweise merklich geändert haben (siehe Tabelle 48).

Dies hat unterschiedliche Gründe:

- Im Rahmen des HBEFA 4.1 wurden überarbeitete Fahrzeugdaten auf Basis der Erkenntnisse aus den Arbeiten zu VECTO für alle Fahrzeugkategorien und Euro Klassen eingeführt. Dadurch verändern sich die Fahrwiderstände in den einzelnen Zyklen und führen somit zu anderen Motorbetriebspunkten. Dies hat folglich auch Auswirkungen auf die Emissionsfaktoren von Fahrzeugkategorien, zu denen keine neuen Messdaten vorhanden waren.
- Zudem wurden neue Fahrzyklen eingeführt. Hier ist speziell die Kategorie „Stop&Go 2“ zu erwähnen, welche Zyklen mit sehr niedriger Last darstellt. Um das Verhalten in Niederlastzyklen realitätsnah darstellen zu können, wird im Simulationstool PHEM das Eindosieren von AdBlue und das Speichern von NH₃ im SCR-Katalysator seit HBEFA 4.1 abgebildet. Zudem wurden Vorkonditionierungszyklen eingeführt, welche sich auf die Temperaturen der Abgasnachbehandlung und somit der Konvertierung im SCR-Katalysator zu Beginn der Zyklen auswirken.
- Für Euro VI wurden neue Messdaten erhoben. Hier ist neben der breiteren Datenbasis zu erwähnen, dass neben Rollen- und Motorprüfstandmessungen nun auch Messungen im realen Verkehr mittels PEMS zur Verfügung standen. Somit ergibt sich für diese Fahrzeugkategorie ein besser mit Messdaten abgesichertes Emissionsverhalten.
- Ein weiterer Punkt ist die Einführung einer lauleistungsabhängigen Alterungsfunktion für SCR-Katalysatoren. In den vorangegangenen Versionen des HBEFA wurde dies noch nicht berücksichtigt, Messungen für das HBEFA 4.1 zeigen hier aber einen Einfluss. Dies wirkt sich auf die NO_x-Emissionen von Fahrzeugen mit SCR-Katalysator aus. Details dazu sind in Kapitel 6.2 genauer dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Emissionsfaktoren sowohl für CO₂ als auch für NO_x erhöht haben.

Tabelle 48: Vergleich HBEFA 3.3 und 4.1, schwere Nutzfahrzeuge, Verkehrssituation für den deutschen Durchschnitt, Flottenmix 2018

Abgasnorm	CO ₂ [g/km] – HBEFA 3.3	CO ₂ [g/km] – HBEFA 4.1	NO _x [g/km] – HBEFA 3.3	NO _x [g/km] – HBEFA 4.1
Euro III	511	678	5,193	6,158
Euro IV	487	640	2,626	3,621
Euro V	631	743	2,321	3,112
Euro VI	645	796	0,263	0,915

6 Verwendete PKW-Datenbasis für die Emissionsfaktorengenerierung sowie Erarbeitung von Zusatzfunktionen für HBEFA 4.1

Dieses Kapitel setzt sich aus folgenden Unterkapiteln zusammen:

- ▶ Neue PKW-Messungen für HBEFA 4.1
- ▶ Erzeugung von Alterungsfunktionen für SNF für HBEFA 4.1
- ▶ NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur für PKW und LNF für HBEFA 4.1
- ▶ Integration des EA 189-Pflichtrückrufs an Dieselfahrzeugen des VW-Konzerns im HBEFA 4.1

6.1 Neue PKW-Messungen für HBEFA

Die unter Kapitel 4 und 5 beschriebenen Messungen wurden für die Emissionsfaktorengenerierung herangezogen. Dies stellt allerdings nur einen kleinen Teil der verwendeten Messdaten für die Emissionsfaktorengenerierung für HBEFA 4.1 dar. Für die PKW wurden alle passenden Messdaten, die von verschiedenen Institutionen in Europa erfasst wurden, genutzt. Die Messdaten von den leichten sowie schweren Nutzfahrzeugen werden in diesem Bericht nicht separat angeführt, es sei an dieser Stelle auf den HBEFA 4.1 Endbericht (Matzer, 2019) verwiesen. Nachfolgend aufgelistet ist eine Übersicht der im Rahmen des HBEFA 4.1 Updates verwendeten PKW:

- ▶ 93 Euro 6a,b Diesel-PKW, gemessen in 297 Zyklen
- ▶ 6 Euro 6d-Temp Diesel-PKW, gemessen in 24 Zyklen
- ▶ 43 Euro 6a,b Otto-PKW, gemessen in 55 Zyklen
- ▶ 3 Euro 6c Otto-PKW, gemessen in 10 Zyklen
- ▶ 4 Euro 6d-Temp Otto-PKW, gemessen in 15 Zyklen
- ▶ 3 Euro 5 CNG-PKW, gemessen in 3 Zyklen
- ▶ 3 Euro 6a,b CNG-PKW, gemessen in 5 Zyklen

Die Messdaten der aufgelisteten Fahrzeuge wurden verwendet, um die Emissionsfaktoren des HBEFA 4.1 für Euro 6a,b und neuer zu überarbeiten. Von einer Implementierung etwaiger neuer Messdaten von älteren Euro-Klassen wurde abgesehen, da diese ohnehin schon mit einer ausreichenden Anzahl an Messungen abgebildet waren.

Die Auswahl der neuen Messdaten erfolgte anhand eines definierten Anforderungskatalogs. Messdaten, die diese Anforderungen erfüllten, konnten für das HBEFA-Update verwendet werden. Ein Auszug der Anforderungen ist nachfolgend angeführt:

- a) Es konnten nur Messdaten berücksichtigt werden, die vor Ablauf der Abgabefrist übermittelt wurden. Später ermittelte oder zur Verfügung gestellte Messdaten bleiben für HBEFA 4.2 in derERMES-Datenbank.

- b) Die modalen Messdaten mussten zumindest CO₂ und eine weitere Emissionskomponente, Umgebungstemperatur sowie Motordrehzahl in einer entsprechenden zeitlichen Auflösung enthalten. Für die Validierung war auch noch Fahrzeuggeschwindigkeit und Steigung zeitaufgelöst erforderlich.
- c) Messdaten, bei denen die Einheiten der Messgrößen nicht verfügbar waren, wurden nicht verwendet.
- d) Da sich die Basisemissionsfaktoren im HBEFA auf einen Umgebungstemperaturbereich zwischen 15 °C und 30 °C beziehen, sind Messungen in diesem Bereich erforderlich. Dieser Umgebungstemperaturbereich wird auch als T20 bezeichnet. Zusätzliche Messungen zu T20 können für die Validierung der NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion herangezogen werden. Dazu wurden weitere Umgebungstemperaturbereiche mit T30 (≥ 30 °C), T10 (≥ 5 °C und < 15 °C) und T0 definiert (< 5 °C).
- e) Typprüf- und Niederlastzyklen (wie z.B. NEFZ und IUFC) sowie auch der WLTC wurden nicht verwendet, da für das HBEFA vor allem realitätsnähere Zyklen relevant sind. Der IUFC wurde von EMPA für die Berechnung der Kaltstartzusatzemissionen genutzt.
- f) Messdaten mit DPF-Regeneration wurden nicht berücksichtigt, da dies in einem anderen Emissionsverhalten resultiert. Die Emissionsänderung durch DPF-Regeneration wird separat durch sogenannte Ki-Faktoren aufgeschlagen. Die Ki-Faktoren sind im Endbericht zum HBEFA 4.1 (Matzer, 2019) beschrieben.
- g) Waren die zeitaufgelösten Messdaten mehr als drei aufeinanderfolgende Sekunden ausgefallen, wurde die Messdaten nicht verwendet. Bis einschließlich drei Sekunden wurde mit dem letzten und dem nächsten bekannten Wert linear interpoliert.
- h) Waren die für die Simulation relevanten Parameter wie Nenndrehzahl oder Leerlaufdrehzahl nicht bekannt, so wurden generische Daten für Diesel- bzw. Ottofahrzeuge herangezogen. Für Diesel-PKW Euro 5 bzw. Euro 6 wurde als Nenndrehzahl 3999 U/min und als Leerlaufdrehzahl 750 U/min verwendet. Für die Otto-PKW wurde 4999 U/min als Nenndrehzahl und 800 U/min als Leerlaufdrehzahl eingefügt.

Nachfolgend ist im Detail ersichtlich, welche PKW-Messdaten die erwähnten Anforderungen erfüllten und für die Emissionskennfelderstellung in PHEM herangezogen wurden. Diese Messdaten sind auch in der ERMES-Datenbank vorhanden. Eine detaillierte Auflistung der Fahrzeuge kann dem Anhang(Tabelle 103 bis Tabelle 109) entnommen werden.

Tabelle 49: Verwendete Messdaten von Euro 6a,b Diesel-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
ADAC	1 (1)	1 (1)	-	1 (1)	-	3 (2)
DUH-EKI	-	-	-	-	127 (22)	127 (22)
EMPA	16 (15)	9 (9)	-	-	1 (1)	26 (15)
JRC/Vela2	-	-	-	-	5 (4)	5 (4)
KBA	-	-	-	-	39 (12)	39 (12)
TNO	-	-	-	-	3 (2)	3 (2)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
TÜV NORD	-	24 (24)	-	-	-	24 (24)
TU Graz	15 (8)	14 (7)	2 (1)	4 (3)	35 (6)	70 (12)
# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)	32 (24)	48 (41)	2 (1)	5 (4)	210 (47)	297 (93)

Tabelle 50: Verwendete Messdaten von Euro 6d-Temp Diesel-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
TU Graz	7 (6)	7 (6)	-	-	10 (5)	24 (6)

Tabelle 51: Verwendete Messdaten von Euro 6a,b Otto-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
DEKRA	-	15 (15)	-	-	-	15 (15)
EMPA	7 (6)	6 (6)	-	-	3 (1)	16 (7)
JRC/Vela2	-	-	-	-	4 (2)	4 (2)
TÜV NORD	-	18 (18)	-	-	-	18 (18)
TU Graz	2 (1)	-	-	-	-	2 (1)
# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)	9 (7)	39 (39)	0 (0)	0 (0)	7 (3)	55 (43)

Tabelle 52: Verwendete Messdaten von Euro 6c Otto-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
EMPA	3 (3)	3 (3)	-	-	4 (2)	10 (3)

Tabelle 53: Verwendete Messdaten von Euro 6d-Temp Otto-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
TU Graz	2 (2)	3 (2)	-	-	10 (4)	15 (4)

Tabelle 54: Verwendete Messdaten von Euro 5 CNG-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
TU Graz	-	3 (3)	-	-	-	3 (3)

Tabelle 55: Verwendete Messdaten von Euro 6a,b CNG-PKW (Anzahl Zyklen und Anzahl PKW)

Institution	# CADC (# PKW gemessen im CADC)	# ERMES (# PKW gemessen im ERMES)	# WLTC hot (# PKW gemessen im WLTC hot)	# RWC (# PKW gemessen im RWC)	# RDE (# PKW gemessen im RDE)	# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)
EMPA	-	-	-	-	3 (1)	3 (1)
TU Graz	-	2 (2)	-	-	-	2 (2)
# Zyklen gesamt (# PKW gesamt)	0 (0)	2 (2)	0 (0)	0 (0)	3 (1)	5 (3)

6.2 Erzeugung von Alterungsfunktionen für SNF für HBEFA

Die Alterungsfunktionen von SNF sind aus Messungen einzelner Kfz abgeleitet. Dazu wurden fünf SNF (ein Euro V Fahrzeug, vier Euro VI Fahrzeuge) von unterschiedlichen Herstellern mit einer Laufleistung von über 500 000 km am Rollenprüfstand und im realen Straßenverkehr gemessen. Die Messergebnisse wurden dann mit den Ergebnissen der Fahrzeuge mit verhältnismäßig geringer Laufleistung verglichen (alle weniger als 200 000 km). Dabei ist noch zu erwähnen, dass die gealterten Fahrzeuge nicht genau die gleichen, wie die Fahrzeuge mit geringer Laufleistung sind.

Die Messungen der Fahrzeuge mit hoher Laufleistung wurden im Rahmen des Projekts „91180: Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen – Los 1“ für das UBA Deutschland durchgeführt.

Das vermessene Euro V Fahrzeug zeigte keine Verschlechterung bezüglich des Emissionsniveaus verglichen mit den „jungen“ Euro V Fahrzeugen mit geringer Laufleistung. Somit wurde keine Alterungsfunktion für diese Fahrzeugkategorie eingeführt. Da jedoch nur ein Fahrzeug

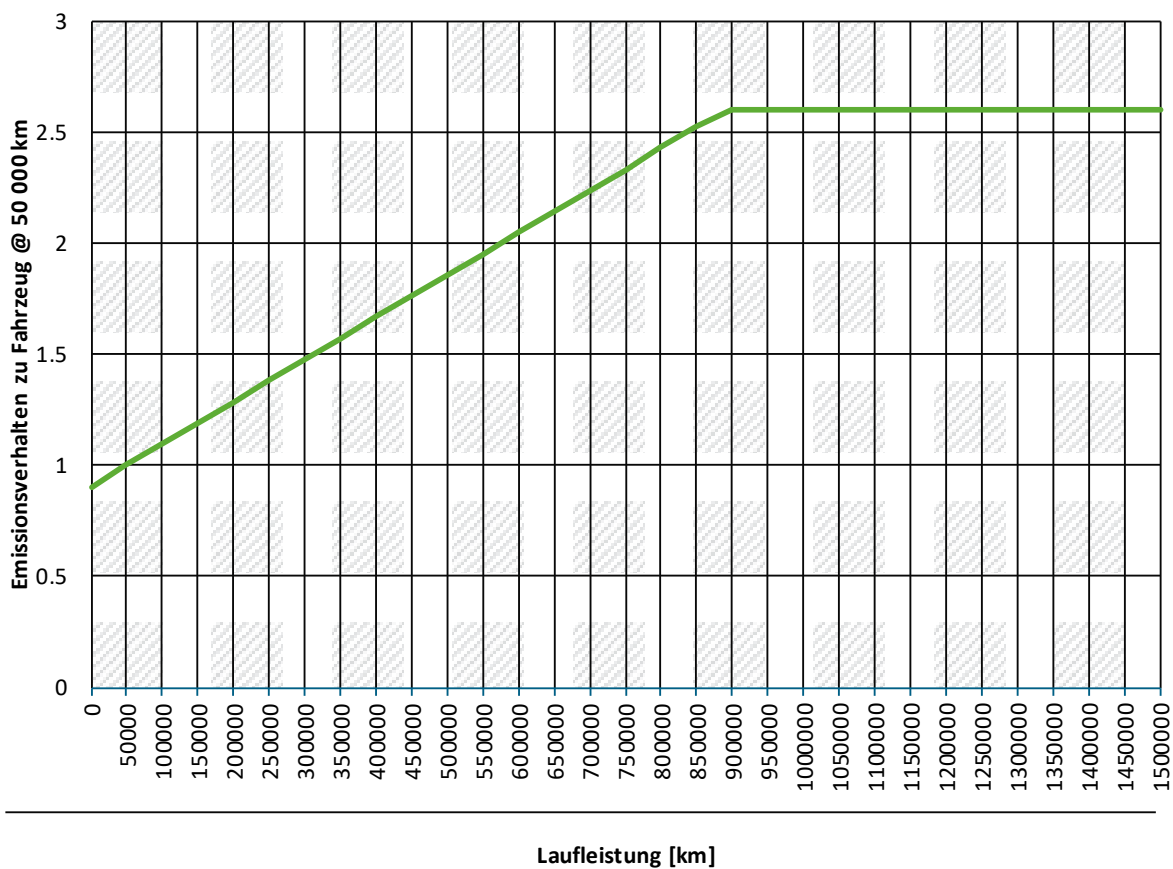
vermessen wurde, kann bei weiteren Messungen eine Änderung der Sachlage nicht ausgeschlossen werden.

Die Messergebnisse der Euro VI Fahrzeuge zeigen nur bei den NO_x-Emissionen eine Erhöhung in Abhängigkeit der Laufleistung. Das Emissionsniveau der anderen Komponenten hat sich nicht merklich verändert.

Für die Erstellung der Alterungsfunktion wurde ein „altes“ und ein „neues“ Durchschnittsfahrzeug aus den ISC (In-Use RDE Test nach gesetzlichen Vorgaben) Messdaten erzeugt. Dabei wurden die Marktanteile der jeweiligen Hersteller in der EU 28 bei der Gewichtung der einzelnen Fahrzeuge beachtet. Die Ergebnisse der beiden Durchschnittsfahrzeuge werden dann zu einer Geraden verbunden, bei der die Steigung die Alterung angibt. Da für die getesteten Fahrzeuge der OBD-Grenzwert bei 1500 mg NO_x/kWh (bezieht sich auf den WHTC) liegt und die Fahrzeuge gemäß OBD Gesetzgebung bei Überschreiten in den Notbetrieb wechseln müssen, ist die Alterung bei 900 000 km begrenzt, da dann etwa das Niveau von 1500 mg NO_x/kWh in der Regel erreicht wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge dann repariert werden, andere sich aber gleichzeitig wieder verschlechtern und somit das Emissionslevel ab dieser Laufleistung konstant bleibt.

Abbildung 1 zeigt die Alterungsfunktion für Euro VI SNF für NO_x-Emissionen über der Laufleistung, die bei 50 000 km den Wert 1,0 und bei 900 000 km den Wert 2,6 annimmt.

Abbildung 1: NO_x-Alterungsfunktion für Euro VI SNF



Quelle: HBEFA 4.1

Ein Grund für die stetige NO_x-Emissionserhöhung über das Alter von Euro VI SNF bzw. über deren Laufleistung könnte die Alterung des DOC sein. Dieser oxidiert neben HC und CO auch einen Teil des NO zu NO₂. Wenn die Effizienz des DOC geringer wird, hätte dies zur Folge, dass das Verhältnis von NO zu NO₂ am SCR-Katalysator nicht mehr bei 1 zu 1 liegt. Bei einem ausgeglichenen Verhältnis der beiden Komponenten läuft die schnellste Reaktion am SCR Katalysator ab und zudem verbessert sich das Verhalten bei geringeren Abgastemperaturen. Das gleichbleibende Emissionsniveau bei dem Euro V Fahrzeug deutet auch auf den DOC als Ursache hin, da diese Fahrzeugkategorie keinen DOC hat und somit dieser Effekt nicht auftreten kann. Natürlich können noch andere Dinge wie zum Beispiel die Alterung von NO_x-Sensoren und die chemische und mechanische Alterung des SCR Katalysators zur Erhöhung der Emissionen am Fahrzeug über die Zeit beitragen.

6.3 NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur für PKW und LNF für HBEFA

Die NO_x-Bildung bei der Verbrennung kann mit dem Zeldovich-Mechanismus, z.B. (Hausberger, 2016), beschrieben werden und ist abhängig von der Verbrennungstemperatur und der Sauerstoffkonzentration an der Flammenfront im Brennraum. Höhere Verbrennungstemperaturen und ausreichend Sauerstoff führen zu höheren NO_x-Engine-Out Emissionen am Motorauslass, wenn alle anderen Randbedingungen unverändert bleiben. So führen bei herkömmlichen Motortechnologien niedrigere Umgebungstemperaturen zu einer niedrigeren Verbrennungstemperatur an der Flammenfront und damit zu geringeren NO_x-Engine-Out Emissionen am Motorauslass, wenn die Abgasrückführungsrate unverändert bleibt. Wenn die AGR-Rate in Richtung niedriger Umgebungstemperaturen reduziert wird, z.B. um Kondensation im AGR-Kühler zu vermeiden, kann sich insgesamt ein Anstieg der NO_x-Engine-Out Emissionen ergeben. Durch Abgasnachbehandlungssysteme können die NO_x-Engine-Out Emissionen bei ordnungsgemäßer Betriebsweise gesenkt werden, sofern die Systeme auf Betriebstemperatur sind. Hier besteht also auch eine Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

Eine Änderung der NO_x-Reduktionsstrategien sowohl bei der Verbrennung als auch bei der Abgasnachbehandlung zieht auch eine Änderung der NO_x-Emissionen am Auspuff nach sich. Höhere NO_x-Emissionen können aufgrund folgender Änderungen der Regelstrategien vorliegen:

- Senkung der AGR-Raten (Erhöhung der NO_x-Engine-Out Emissionen)
- Reduzierung der AdBlue-Dosierung bei Fahrzeugen mit SCR (geringere NO_x-Reduktion im Abgasnachbehandlungssystem)
- Reduzierung der Regenerationen für NO_x-Speicherkatalysatoren (geringere NO_x-Reduktion im Abgasnachbehandlungssystem)

Nachfolgend sind Effekte und Beweggründe für solche Regeleingriffe zusammengefasst.

Die NO_x-Reduktionsstrategien haben auch Nachteile, wie z.B. Verkokung des Abgasrückführungssystems, erhöhter Treibstoffverbrauch aufgrund Regenerationsphasen des NO_x-Speicherkatalysators oder AdBlue-Verbrauch bei Fahrzeugen mit SCR-Systemen. Daher wurde offensichtlich bei einer Vielzahl von Fahrzeugmodellen die Reduzierung der NO_x-Reduktionsstrategien außerhalb des Umgebungstemperaturfensters bei Typprüfungen (20 – 30 °C) durchgeführt.

Die Abgasrückführung, im Weiteren auch als AGR bezeichnet, nutzt die Eigenschaften vom sogenannten Inertgas, um Abgastemperatur und Sauerstoffkonzentration durch Rückführung

von (gekühltem) Abgas zu reduzieren und damit die Primärbildung von NO_x zu mindern. Durch die Rückführung von Verbrennungsprodukten steigt die Wasserdampfkonzentration im Abgas mit der AGR-Rate an. Folglich sind niedrigere Umgebungstemperaturen kritischer in Bezug auf Kondensationseffekte im AGR-Pfad bei höheren AGR-Raten. Die Kondensation von Wasser mit Partikeln und Kohlenwasserstoffen im Destillat kann zu schwerwiegenden Problemen führen, wie z. B. das Zusetzen des Kühlers oder des Einlasssystems durch Verkokung. Daher kann die AGR reduziert oder deaktiviert werden, um Schäden an Komponenten im AGR-Pfad zu vermeiden. Wenn die AGR-Rate bei niedrigeren Umgebungstemperaturen aufgrund Kondensationseffekte reduziert wird, führt dies zu mehr NO_x -Engine-Out Emissionen⁵.

SCR-Katalysatoren benötigen NH_3 für die NO_x -Umwandlung. NH_3 wird aus AdBlue gewonnen, welches allerdings als Betriebsmittel im Fahrzeug regelmäßig nachgefüllt werden muss. Die Umwandlung von AdBlue in NH_3 beginnt erst bei Abgastemperaturen über ca. 200 °C. Aus AdBlue erzeugtes NH_3 kann im SCR-Katalysator auch mit bis zu 1g je Liter Katalysatorvolumen gespeichert werden. Damit kann in Niederlastphasen ohne vorhandener AdBlue-Dosierung die NO_x -Reduktion zumindest solange stattfinden, solange gespeichertes NH_3 vorhanden ist. Für einen optimalen Wirkungsgrad des gesamten SCR-Katalysatorsystems ist eine Abgastemperatur über ca. 220 °C notwendig (Temperaturbereich abhängig von der SCR-Technologie). Niedrigere Umgebungstemperaturen führen auch zu niedrigeren Abgastemperaturen und damit zu einer Verringerung des SCR-Wirkungsgrades, insbesondere bei Niederlastfahrten⁶. Neben diesem physikalischen Effekt ist ein niedriger AdBlue-Verbrauch für die Kunden attraktiv, so dass nachweislich einige Fahrzeugmodelle bei Umgebungstemperaturen außerhalb des Typgenehmigungsfensters den AdBlue-Verbrauch drosseln, was zu erhöhten NO_x -Emissionen führt.

NO_x -Speicherkatalysatoren haben zusätzlich zu den für Oxidation und Reduktion üblichen Katalysatormaterialien eine Schicht in der die Stickoxide als Nitrate eingespeichert werden. Die Speicherkapazität ist begrenzt, so dass der Katalysator regelmäßigen Regenerationsphasen unterliegt, welche den Kraftstoffverbrauch erhöhen. Weniger Regenerationsereignisse außerhalb des Typgenehmigungsfensters können für die Kunden als attraktiv angesehen werden, erhöhen aber die NO_x -Emissionen.

Aufgrund der vielfältigen betroffenen Technologien und der unterschiedlichen Strategien verschiedener Marken und Modelle, sowie möglicherweise unterschiedlicher Umgebungstemperaturbereiche, in denen NO_x -Reduktionsstrategien angewandt werden, wäre eine repräsentative Korrekturfunktion auf Basis von Fahrzeugtests mit hohem Messaufwand verbunden. Einige Fahrzeuge wurden für HBEFA 3.3 (Hausberger, 2017) gemessen, aber die Durchschnittsdaten der Flotte wurden aus Remote-Sensing-Daten in Schweden und der Schweiz gewonnen.

Für die Aktualisierung der NO_x -Umgebungstemperaturkorrektur für HBEFA 4.1 wurden ebenfalls Remote-Sensing-Daten verwendet. Neben den Daten aus Schweden und der Schweiz wurde auch ein großer Datensatz aus England analysiert. Die in (Grange, 2019) analysierten Daten umfassen auch leichte Nutzfahrzeuge und ältere Euro-Klassen. So konnten auch für diese Segmente Korrekturfunktionen für HBEFA 4.1 hergeleitet werden. Da die Remote-Sensing-Daten hauptsächlich einen Umgebungstemperaturbereich von 5 °C bis 20 °C sowie auch noch keine Euro 6c bis Euro 6d Fahrzeuge abdecken, wurden folgende Annahmen getroffen:

⁵ Aktuelle Dieselmotoren verwenden ebenfalls AGR, verfügen aber typischerweise über ein Steuerungssystem, um die Kühlung zu begrenzen und Kondensation zu vermeiden.

⁶ Aktuelle Dieselmotoren haben Heizstrategien, um den SCR auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen mit entsprechendem Wirkungsgrad betreiben zu können.

- Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die NO_x-Emissionen liegt bei Euro 3 bis Euro 6d nur unter 20 °C vor (Effekte über 30 °C können vorhanden sein).
- Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die NO_x-Emissionen für Euro 6d-Temp und Euro 6d wird durch die in der RDE-Gesetzgebung definierten Randbedingungen begrenzt (Grenzwerte ohne Umgebungstemperaturkorrektur müssen bis zu 3 °C für Euro 6d-Temp und bis zu -3 °C⁷ für Euro 6d eingehalten werden). Umgebungstemperatureinflüsse sind nur unterhalb dieser Umgebungstemperaturschwellen für zukünftige Fahrzeuge relevant.
- NO_x steigt unter 0 °C nicht weiter an. Die verfügbaren Daten decken keine niedrigeren Umgebungstemperaturen ab, so dass derzeit keine Aussage über das tatsächliche Verhalten möglich ist. Es wird davon ausgegangen, dass die AGR im Flottendurchschnitt bereits auf fast 0 % bei 0 °C reduziert ist, so dass es zu keiner weiteren Erhöhung der NO_x-Emissionen kommt.

Die NO_x-Korrektur für die Umgebungstemperaturen 0 °C und 18 °C sind in Tabelle 56 für PKW und in Tabelle 57 für leichte Nutzfahrzeuge dargestellt. Aufgrund unterschiedlicher Wirkungsweisen der Abgasnachbehandlungssysteme von Fahrzeugen in der jeweiligen Schadstoffklasse, fallen die Korrekturfaktoren für PKW und leichte Nutzfahrzeuge in den einzelnen Schadstoffklassen unterschiedlich hoch aus. Zwischen den Umgebungstemperaturen wird der Korrekturfaktor linear interpoliert.

Tabelle 56: Korrekturfaktoren für NO_x in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für PKW

Umgebungs- temperatur [°C]	Korrektur- faktor Euro 3	Korrektur- faktor Euro 4	Korrektur- faktor Euro 5	Korrektur- faktor Euro 6a,b und Euro 6c	Korrektur- faktor Euro 6d-Temp	Korrektur- faktor Euro 6d
0 bzw. -6 für Euro 6d	1,40	1,70	1,78	1,92	1,15	1,15
18 bzw. 3 für Euro 6d- Temp bzw. -3 für Euro 6d	1	1	1	1	1	1

Tabelle 57: Korrekturfaktoren für NO_x in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für LNF

Umgebungs- temperatur [°C]	Korrektur- faktor Euro 3	Korrektur- faktor Euro 4	Korrektur- faktor Euro 5 (inkl. EA 189 vor Umrüstung)	Korrektur- faktor Euro 6a,b und Euro 6c	Korrektur- faktor Euro 6d-Temp	Korrektur- faktor Euro 6d
0 bzw. -6 für Euro 6d	1,40	1,70	1,71	1,40	1,15	1,15
18 bzw. 3 für	1	1	1	1	1	1

⁷ Nach der aktuellen Gesetzgebung beträgt die Grenztemperatur 0 °C. Da für Euro 6d noch keine Messdaten vorliegen und nicht klar ist, ob die OEMs die Toleranzen vollständig ausnutzen werden, wurden -3 °C verwendet.

Umgebungs- temperatur [°C]	Korrektur- faktor Euro 3	Korrektur- faktor Euro 4	Korrektur- faktor Euro 5 (inkl. EA 189 vor Umrüstung)	Korrektur- faktor Euro 6a,b und Euro 6c	Korrektur- faktor Euro 6d-Temp	Korrektur- faktor Euro 6d
Euro 6d- Temp bzw. -3 für Euro 6d						

6.4 Abbildung von Umrüstungen von PKW im HBEFA

Wie vom Kraftfahrt-Bundesamt bestätigt, wurde bei Fahrzeugen mehrerer Hersteller mit den Abgasnormen Euro 5 und Euro 6b eine Software werkseitig verwendet, die die Wirkung von NO_x-Emissionsminderungstechnologien nur in den eingeschränkten Bedingungen der Typprüfung garantiert, außerhalb derer die Minderungsleistung des Abgasnachbehandlungssystems jedoch reduziert oder ganz verhindert werden kann.

Im Rahmen von Pflichtrückrufaktionen der Bundesbehörde KBA wurden von den Herstellern Softwareupdates und teilweise auch Hardwarenachschrüstungen installiert. Mit der Umrüstung sollten keine Unterschiede mehr zwischen dem NO_x-Emissionsverhalten im Typprüftest auf dem PKW-Rollenprüfstand und im realen Fahrbetrieb auf der Straße auftreten. Da die Umrüstung allerdings zu einem unterschiedlichen NO_x-Emissionsniveau für Fahrzeuge vor und nach der Umrüstung im realen Fahrbetrieb führt, wurde im Rahmen dieses Projekts eine Methode erarbeitet, wie solche Umrüstungen im HBEFA 4.1 berücksichtigt werden können. Neben den obligatorischen Rückrufaktionen bieten einige Hersteller auch freiwillige Rückrufe an, welche die NO_x-Emissionen im realen Fahrbetrieb ebenfalls reduzieren soll. Eine Rückrufaktion betrifft ggf. eine bestimmte Familie von Fahrzeugtypen des gleichen Motor- und Abgasnachbehandlungskonzeptes.

6.4.1 Anforderungen an Messdaten zur Abbildung der Effekte von Umrüstungen

Um den Effekt der Umrüstung auf die NO_x-Emissionen quantifizieren und im HBEFA abbilden zu können, waren zusätzlich zu den Kriterien nach dem Anforderungskatalog zur Messdatenauswahl (Kapitel 6.1) folgende Daten der Emissionsmessungen notwendig:

- Angaben der betroffenen Fahrzeugtypen
- Angaben zur Anzahl der betroffenen Fahrzeuge pro Rückrufaktion
- Angaben zur Umsetzrate pro Jahr
- Angaben zum Bestand der gesamten in Betrieb befindlichen Fahrzeuge pro Abgasnorm
- Messungen von verfügbaren Fahrzeugen vor und nach Umrüstung im jeweils gleichem Umgebungstemperaturfenster bei T20. Für die Ableitung der NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion werden auch Messungen am selben Fahrzeug vor und nach Umrüstung im gleichen Temperaturfenster bei T0 und T10 benötigt.

Die Abbildung von Umrüstungen für HBEFA wurde in folgende Schritte untergliedert, die in nachfolgenden Kapiteln im Detail beschrieben werden:

1. Überprüfung der vorliegenden Messdaten auf Vollständigkeit (Kriterien siehe Kapitel 6.1).
2. Erarbeitung und Anwendung einer Methode zur Abbildung von Umrüstungen.
3. Implementierung der Emissionsfaktoren ins HBEFA und TREMOD.

Nach der Überprüfung der Messdaten von Fahrzeugen, die im Zuge der Umrüstung aufgenommen wurden, konnte lediglich die Vollständigkeit für die Fahrzeuge mit dem Motortyp EA 189 bestätigt werden. Deshalb war es ausschließlich nur für diese Fahrzeuggruppe möglich, eine separate Schicht mit zugehörigen Emissionsfaktoren in allen Facetten des HBEFA abbilden zu können. Genauere Informationen zu den Kriterien werden in Kapitel 6.4.2 beschrieben.

Alle anderen vorliegenden Messdaten von Fahrzeugen, die vor und nach Umrüstung aufgenommen wurden, konnten lediglich wie folgt für das HBEFA genutzt werden. Messungen an den Euro 5 PKW vor Umrüstung bei T20 wurden dem Datenpool der Basisemissionsfaktoren für Euro 5 Diesel-PKW zugeführt, sofern diese rechtzeitig für die Erstellung der Basisemissionsfaktoren übermittelt wurden. Die Temperaturfunktion konnte für diese Fahrzeuge in diesem Fahrzeugzustand aus dem Remote-Sensing-Daten abgeleitet werden (Matzer, 2019). Für die Euro 6 Diesel-PKW wurden ebenfalls Messdaten vor Umrüstung, sofern diese auch rechtzeitig für die Erstellung der Basisemissionsfaktoren übermittelt wurden, im gleichen Verfahren für HBEFA verwendet. Eine Implementierung der Messdaten nach Umrüstung mit Ausnahme der Fahrzeuge mit EA 189-Motor erschien aufgrund fehlender Daten zu NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur, Kaltstartzusatzemissionen und Anzahl der betroffenen sowie umgerüsteten Fahrzeuge im HBEFA 4.1 nicht vertretbar.

6.4.2 Überprüfung der vorliegenden Messdaten

Bei der Abgasnorm Euro 5 gibt es sowohl freiwillige als auch verpflichtende Rückrufe. Eine verpflichtende Rückrufaktion des VW-Konzerns wurde bei Euro 5 auch als EA 189-Pflichtrückruf bezeichnet, da es die EA 189-Motoren des VW-Konzerns betraf. Bei der Abgasnorm Euro 6 gab es ebenfalls freiwillige und verpflichtende Rückrufe. Folgende Messdaten waren zum Zeitpunkt dieses Projektes verfügbar:

- Euro 5 Pflichtrückruf PKW des VW-Konzerns mit EA 189-Motor
- Euro 5 freiwillige Rückrufe
- Euro 6b freiwillige/verpflichtende Rückrufe

6.4.2.1 Euro 5 EA 189-Pflichtrückruf des VW-Konzerns

Bei den Euro 5 Fahrzeugen des EA 189-Pflichtrückrufs lagen Messdaten von insgesamt elf Fahrzeugen vor. Tabelle 58 gibt Hersteller und Modell sowie die wichtigsten Fahrzeugdaten an. Nach Durchsicht der Messdaten und Vergleich mit dem Anforderungskatalog laut Kapitel 6.1, konnten die Messdaten von drei Fahrzeugen (VW Golf Variant, Skoda Yeti, Audi A4) nicht berücksichtigt werden, da bei diesen Messungen keine Umgebungstemperatur aufgezeichnet war und Unterschiede in den Emissionen vor und nach der Umrüstung somit auch von Umgebungstemperaturdifferenzen stammen können. Tabelle 59 berücksichtigt dies und listet nur Informationen zu verwendeten Messzyklen der Fahrzeuge auf, die im HBEFA 4.1 einfließen konnten, da nur für diese acht Fahrzeuge alle unter 6.4.1 genannten Kriterien bzw. Informationen vollständig vorlagen.⁸

⁸ WLTC-Messungen mit Kaltstart wurden nur für die Untersuchung der Kaltstartzusatzemission herangezogen.

Tabelle 58: Verfügbare Euro 5 Fahrzeugen mit EA 189-Pflichtrückruf

Institution	Marke	Modell	Hub- raum [l]	Nennleistung [kW]	Nenndrehzahl [U/min]	Für HBEFA herangezogen?
TU Graz	VW	Golf Variant 1.6 TDI	1.6	66	4200	Ja
TU Graz	VW	Passat 1.6 TDI	1.6	77	4400	Ja
TU Graz	VW	Passat Kombi 2.0 TDI	2.0	103	4200	Ja
TU Dresden	Audi	A3	2.0	103	4200	Ja
TU Dresden	Skoda	Octavia	1.6	77	4400	Ja
DUH	VW	Sharan	2.0	130	3999	Ja
DUH	VW	Tiguan	2.0	103	4200	Ja
DUH	VW	Caddy	2.0	103	4400	Ja
DUH	VW	Golf Variant	1.6	77	3999	Nein
DUH	Skoda	Yeti	2.0	-	3999	Nein
DUH	Audi	A4	2.0	105	4200	Nein

Tabelle 59: Nutzbare Messdaten zu Euro 5 Fahrzeugen mit EA 189-Pflichtrückruf

Institution	Marke	Modell	Messdaten vor SU	Messdaten nach SU
TU Graz	VW	Golf Variant 1.6 TDI	1x CADC (T20), 1x RWC (T10), 2x RDE (T10)	1x CADC (T20), 1x RWC (T10), 2x RDE (T10)
TU Graz	VW	Passat 1.6 TDI	1x CADC (T20), 1x RWC (T0), 2x RDE-Messungen (T0)	1x CADC (T20), 1x RWC (T0), 1x RDE (T20), 1x RDE-Messung (T30)
TU Graz	VW	Passat Kombi 2.0 TDI	1x CADC (T20), 1x RWC (T0), 2x RDE-Messungen (T0)	1x CADC (T20), 1x RWC (T0), 1x RDE (T0), 1x RDE-Messung (T10)
TU Dresden	Audi	A3 2.0 TDI	1x ERMES (T20), 1x ERMES (T0), 1x WLTC (T0), 1x WLTC (T20)	1x ERMES (T20), 1x ERMES (T0), 1x WLTC (T0), 1x WLTC (T20)
TU Dresden	Skoda	Octavia 1.6 TDI	1x ERMES (T20), 1x ERMES (T10), 1x ERMES (T0), 1x WLTC (T0), 1x WLTC (T10), 1x WLTC (T20)	1x ERMES (T20), 1x ERMES (T10), 1x ERMES (T0), 1x WLTC (T0), 1x WLTC (T10), 1x WLTC (T20)
DUH	VW	Sharan 2.0 TDI	3 x RDE-Messungen (T20)	8 x RDE-Messungen (T20)
DUH	VW	Tiguan 2.0 TDI	10 x RDE-Messungen (T20)	3 x RDE-Messungen (T20)
DUH	VW	Caddy 2.0 TDI	7 x RDE-Messungen (T20)	10 x RDE-Messungen (T20)

6.4.2.2 Euro 5 freiwillige Rückrufe

Bei den freiwilligen Rückrufen für die Abgasnorm Euro 5 waren die Messdaten von acht Fahrzeugen bekannt. Diese sind in Tabelle 60 aufgelistet. Nach Durchsicht dieser Daten wurde festgestellt, dass keines dieser Fahrzeuge alle unter 6.4.1 beschriebenen Kriterien erfüllt und somit nicht für eine separate Fahrzeugschicht in der Abgasnorm Euro 5 genutzt werden kann. Im Detail sind dies fehlende Informationen zu Kaltstartzusatzemissionen und NO_x-Emissionsverhalten bei niedrigen Umgebungstemperaturen vor und nach Umrüstung. Des Weiteren lagen der FVT zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine Zahlen zu den Umsetzraten der Euro 5 Fahrzeuge mit freiwilligen Rückrufen vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden dennoch die NO_x-Änderungen der Fahrzeuge, wo Messdaten zur Umrüstung bei T20 vorhanden waren (siehe Tabelle 61), untersucht, obwohl diese für HBEFA 4.1 aufgrund der vorhin beschriebenen Gründe nicht herangezogen wurden. Sollten die fehlenden Informationen für diese Fahrzeuge in Zukunft verfügbar sein, so könnten die Euro 5 Fahrzeuge mit freiwilligen Rückrufen ebenfalls für das nächste HBEFA-Update herangezogen werden.

Tabelle 60: Verfügbare Euro 5 PKW mit freiwilligen Rückrufen

Institution	Marke	Modell	Hub- raum [l]	Nennleistung [kW]	Nenndrehzahl [U/min]	Für Untersuchung herangezogen?
KBA	Audi	A6	3.0	180	4000	Nein
KBA	Mercedes	GLK220	-	125	4200	Ja
KBA	Mercedes	C220	-	125	4200	Ja
KBA	Fzg2	-	2.0	135	3999	Ja
KBA	Fzg3	-	2.0	135	3999	Ja
KBA	Mercedes	B180	-	80	4014	Ja
KBA	Mercedes	C200d	-	100	4014	Nein
KBA	Mercedes	E350	-	170	4014	Nein

Tabelle 61: Für die Basisfaktoren nutzbare Euro 5 PKW mit freiwilligen Rückrufen

Institution	Marke	Modell	Messdaten vor SU	Messdaten nach SU
KBA	Mercedes	GLK220	1 x RDE (T20)	1 x RDE (T20)
KBA	Mercedes	C220	1 x RDE (T20)	1 x RDE (T20)
KBA	Fzg2	-	1 x RDE (T20)	1 x RDE (T20)
KBA	Fzg3	-	1 x RDE (T20)	1 x RDE (T20)
KBA	Mercedes	B180	1 x RDE (T20)	1 x RDE (T20)

6.4.2.3 Euro 6b freiwillige/verpflichtende Rückrufe

Alle Euro 6 Fahrzeuge, die eine freiwillige oder verpflichtende Rückrufe bekamen und zu denen Messungen davon vorliegen, sind in Tabelle 62 aufgelistet. Auch hier wurde nach Durchsicht

dieser Daten festgestellt, dass keines dieser Fahrzeuge die unter 6.4.1 beschriebenen Kriterien vollständig erfüllt und somit keine separate Fahrzeugschicht in der Abgasnorm Euro 6 im HBEFA abgebildet werden konnte. Aus den verfügbaren Messdaten konnten keine Kaltstartzusatzemissionen sowie NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktionen abgeleitet werden. Des Weiteren lagen im Rahmen dieser Arbeit der FVT keine Zahlen zu den betroffenen Fahrzeugen sowie Zahlen zu den zugehörigen Umsetzraten vor.

Allerdings wurden, wie auch unter Kapitel 6.4.2.2, NO_x-Änderungen der Fahrzeuge, wo Messdaten zur Umrüstung bei T20 vorhanden waren (siehe Tabelle 63), untersucht. Sollten die fehlenden Daten in Zukunft verfügbar sein, so könnten die Euro 6 Umrüstungen für das nächste HBEFA-Update herangezogen werden.

Tabelle 62: Verfügbare Euro 6b PKW mit Umrüstung

Institution	Marke	Modell	Hub- raum [l]	Nennleistung [kW]	Nenndrehzahl [U/min]	Für Untersuchung herangezogen?
KBA	Opel	Corsa	1.3	70	3750	Ja
KBA	Opel	Insignia	1.6	100	3500	Ja
KBA	Audi	A6	3.0	235	3999	Nein
KBA	Porsche	Cayenne	3.0	193	4000	Nein
KBA	Mercedes	Vito Tourer	-	120	3800	Ja
KBA	Fzg1	-		125	3999	Ja
KBA	Audi	A6	3.0	240	3999	Ja
KBA	Audi	A8	4.2	280	3999	Ja
KBA	Mercedes	GLC220d	-	125	3999	Ja
KBA	Mercedes	C220d	-	125	3999	Nein
KBA	Mercedes	Vito	1.6	65	3999	Nein
KBA	Mitsubishi	Outlander	2.2	110	3999	Nein
KBA	Porsche	Macan	3.0	190	3999	Nein

Tabelle 63: Für die Basisfaktoren nutzbare Euro 6b PKW mit Umrüstung

Institution	Marke	Modell	Messdaten vor SU	Messdaten nach SU
KBA	Opel	Corsa	2 x RDE (T20)	2 x RDE (T20)
KBA	Opel	Insignia	1 x RDE (T20), 1 x RDE (T10)	2 x RDE (T20)
KBA	Mercedes	Vito Tourer	1x RDE (T20)	1x RDE (T20)
KBA	Fzg1	-	1x RDE (T20)	1x RDE (T20)
KBA	Audi	A6	1x RDE (T20)	1x RDE (T20)
KBA	Audi	A8	1x RDE (T20)	1x RDE (T20)
KBA	Mercedes	GLC220d	1x RDE (T20)	1x RDE (T20)

6.4.3 Erarbeitung und Anwendung einer Methode zur Abbildung von Umrüstungen

Die Erarbeitung einer Methode zur Abbildung von Umrüstungen kann in folgende Punkte untergliedert werden:

- Methode zur Darstellung der Basisemissionsfaktoren vor und nach Umrüstung für den T20 Umgebungstemperaturbereich und betriebswarmem Motor.
- Methode zur Berechnung von Kaltstartzusatzemissionen, für den Fall, dass sie vor und nach Umrüstung unterschiedlich sind.
- Methode zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen, für den Fall, dass der Einfluss vor und nach Umrüstung unterschiedlich ist.

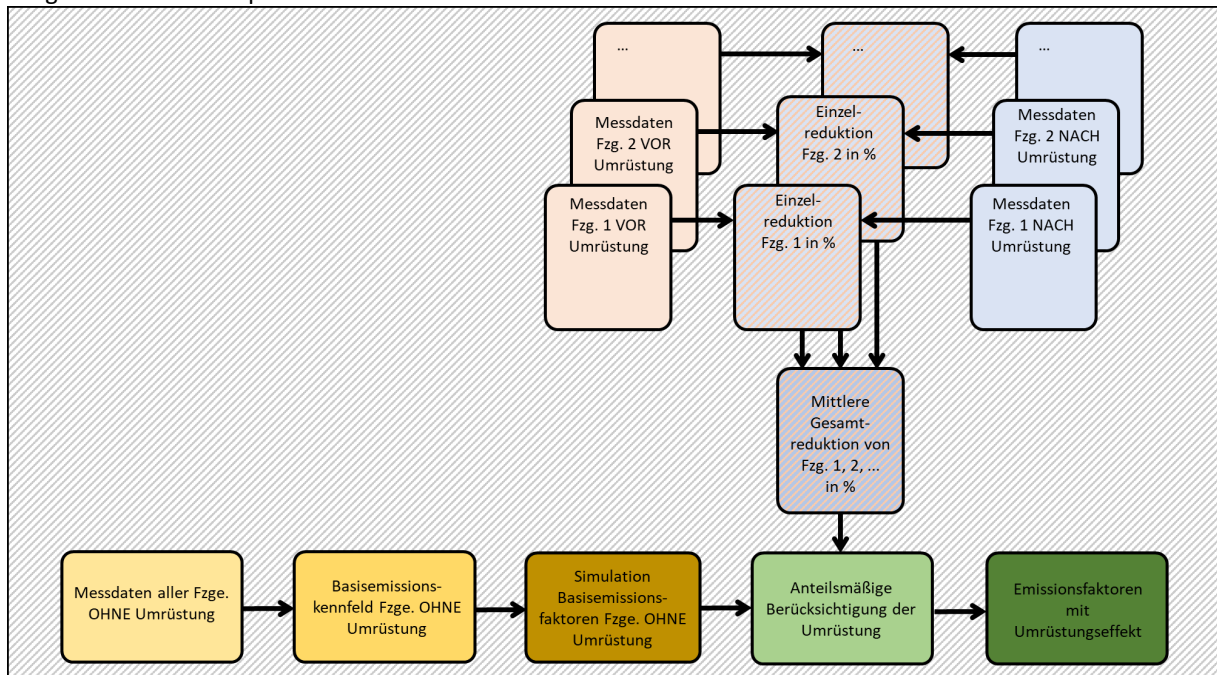
6.4.3.1 Methode zur Darstellung der Basisemissionsfaktoren vor und nach Umrüstung

Für die Erarbeitung der Basisemissionsfaktoren für Umrüstungen wurden mehrere Optionen untersucht:

- Option 1: Ermittlung einer mittleren Gesamtreduktion aus den Einzelreduktionen der umgerüsteten Fahrzeuge. Diese könnte von den Basisemissionsfaktoren der gesamten Euro 5 Diesel-PKW-Flotte anteilmäßig abgezogen werden. Abbildung 2 zeigt die grafische Darstellung der Vorgehensweise. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die mittlere Reduktion möglicherweise eine Verzerrung der Reduktionspotentiale für Stadt-, Überland- und Autobahnzyklen liefert.

Abbildung 2: Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei Option 1

Vorgehensweise bei Option 1

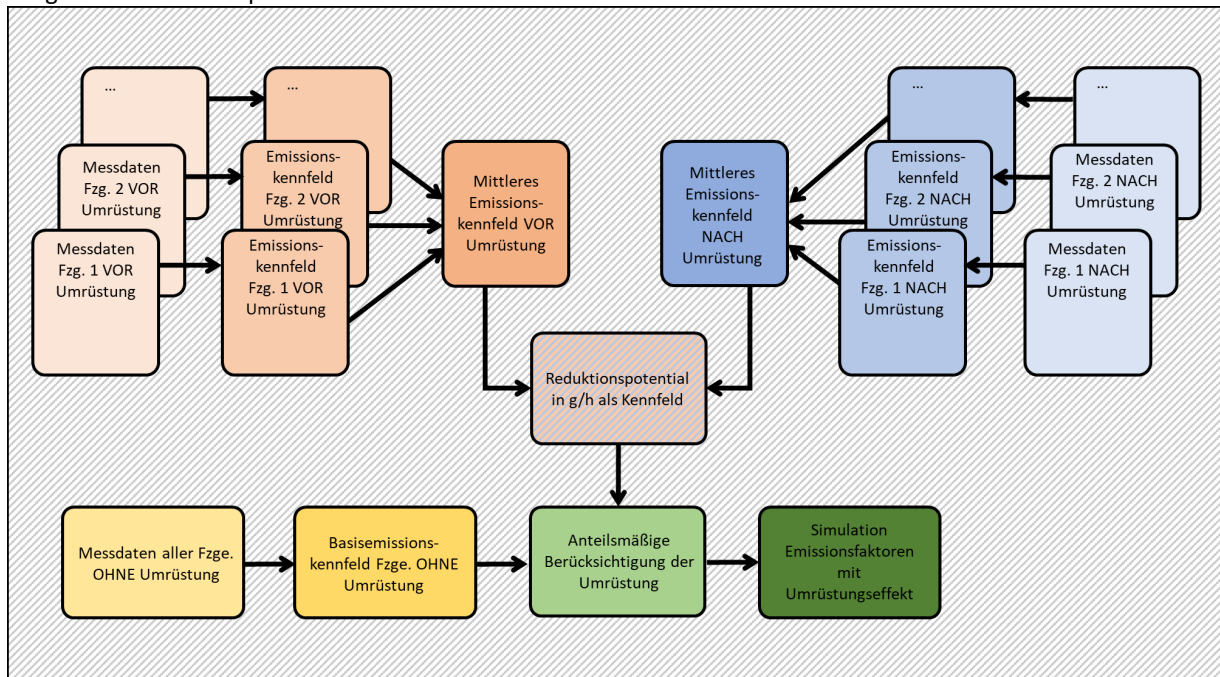


Quelle: eigene Darstellung, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH

- Option 2: Subtrahieren des Reduktionspotentials in g/h, gewichtet über alle Hersteller, vom Euro 5 Basisemissionskennfeld. Die Reduktion ergibt sich je Kennfeldpunkt aus der Differenz des Kennfeldwertes nach und vor Umrüstung. Werden mit diesem Emissionskennfeld die HBEFA-Zyklen berechnet, so ergeben sich die Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung der NO_x-Reduktion durch die Umrüstung. In Abbildung 3 ist die Vorgehensweise grafisch dargestellt. Vorteil dieser Variante ist eine genaue Abbildung der absoluten Reduktionen durch die Umrüstung für die einzelnen Verkehrssituationen. Nachteilig ist, dass zwar die Reduktionsmengen absolut g/km korrekt dargestellt werden, das absolute Emissionsniveau der betroffenen Flotte aber nicht unbedingt denen der umgerüsteten Kfz entspricht. Wegen der geringen Anzahl gemessener Kfz der umgerüsteten Schichten wäre das absolute Emissionsniveau aber ohnehin nur sehr unsicher.

Abbildung 3: Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei Option 2

Vorgehensweise bei Option 2

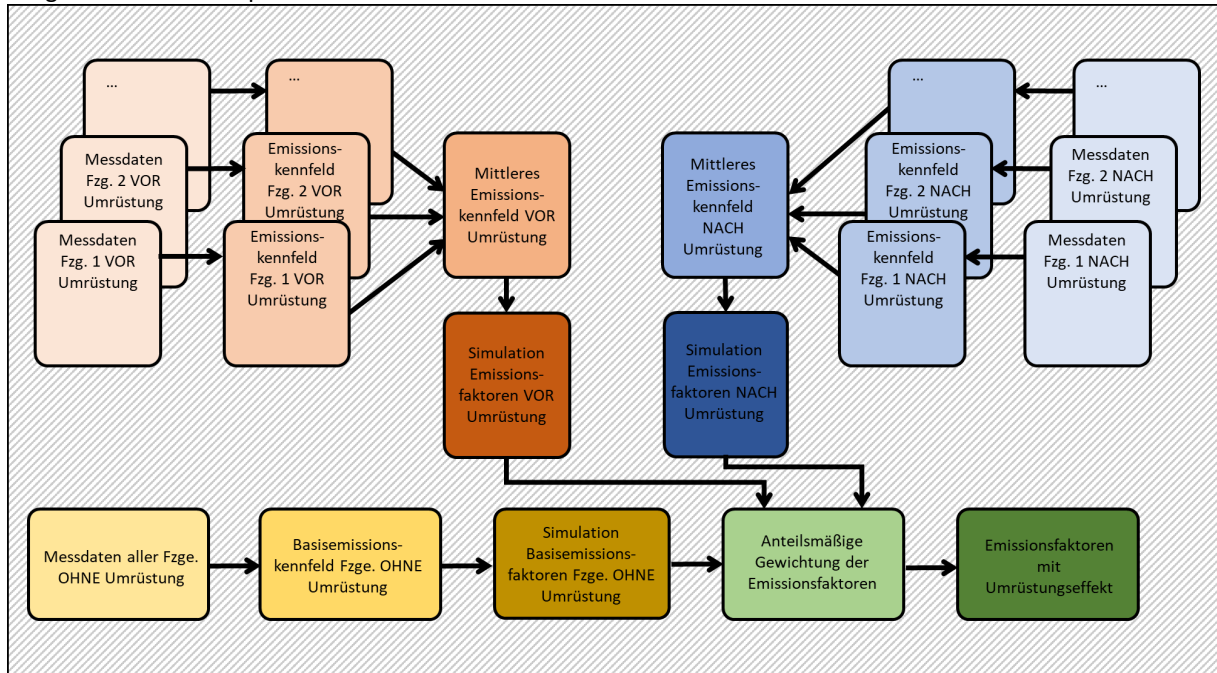


Quelle: eigene Darstellung, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH

- Option 3: Eigene gemittelte Emissionskennfelder vor und nach Umrüstung für die betroffenen Fahrzeuge. Mit diesen können entsprechende Emissionsfaktoren vor und nach Umrüstung berechnet werden, welche als einzelne Schichten im HBEFA implementiert werden. Mit der Gewichtung der Emissionsfaktoren der Fahrzeuge ohne Umrüstung mit den Fahrzeugen mit Umrüstung ergeben sich die Emissionsfaktoren mit anteilmäßiger Berücksichtigung der Umrüstung (siehe Abbildung 4). Vorteil dieser Option ist, dass weder die Reduktionspotentiale für die einzelnen Verkehrssituationen verzerrt werden, als auch die Absolutniveaus zu den Messdaten passen. Für belastbare Absolutwerte sollte zumindest ein Fahrzeug je von der Umrüstung betroffenen Fahrzeugfamilie vorhanden sein. Je mehr Fahrzeuge je betroffener Fahrzeugfamilie vermessen werden, desto repräsentativer ist das Ergebnis.

Abbildung 4: Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei Option 3

Vorgehensweise bei Option 3



Quelle: eigene Darstellung, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH

Das Ergebnis der Untersuchungen der Optionen 1 bis 3 war, dass aufgrund der vorliegenden begrenzten Datenmenge Option 3 nicht gewählt wurde, da die Angabe unterschiedlicher Absolutwerte von einer geringen Anzahl an vermessenen Fahrzeugen fraglich ist. Option 1 wurde ebenfalls nicht weiterverfolgt, da mögliche Verzerrungen des Reduktionspotentials nach Verkehrssituationen vermieden werden sollten. Daher wurde Option 2 ausgewählt.

Option 2 wurde wie folgt umgesetzt: Es wurden Emissionskennfelder für jedes Fahrzeug vor und nach Umrüstung mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode in PHEM erstellt. Für die Emissionskennfelderstellung wurden Messdaten vom betriebswarmen Motor zwischen 15 °C und 30 °C (= T20 Umgebungstemperaturbereich) verwendet. Diese Einzelemissionskennfelder wurden zu Durchschnittskennfeldern zusammengefasst. D. h. so wurden z. B. alle Einzelkennfelder von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor vor Umrüstung zu einem Durchschnittskennfeld vor Umrüstung, sowie auch alle Einzelkennfelder von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor nach Umrüstung zu einem Durchschnittskennfeld nach Umrüstung zusammengefasst. Die Einzelemissionskennfelder gehen gewichtet je nach Bestandsanteilen an der Flotte pro Jahr in das jeweilige Durchschnittskennfeld ein. Tabelle 64 zeigt die Gewichtungsfaktoren für die Einzelkennfelder der EA 189-Fahrzeug für Deutschland. Diese wurden von den betroffenen Stückzahlen der jeweiligen Modellreihen der EA 189-Fahrzeuge abgeleitet, welche vom KBA zur Verfügung gestellt wurden (Daten vom März 2017). Analoge Arbeiten wurden auch für die T20 Messdaten aus Kapitel 6.4.2.2 und 6.4.2.3 durchgeführt. Wie in diesen beiden Kapiteln bereits erwähnt, wurden diese Messdaten nur im Rahmen dieser Arbeit untersucht und konnten aufgrund fehlender Daten u.a. zu Kaltstartzusatzemissionen und NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur nicht im HBEFA 4.1 implementiert werden. Für die Fahrzeuge aus Kapitel 6.4.2.2 und 6.4.2.3 lagen der FVT zum Zeitpunkt dieser Arbeiten keine Gewichtungsfaktoren vor, weshalb für diese Untersuchung die

Einzelkennfelder zu Durchschnittskennfeldern vor und nach Umrüstung einfach gemittelt wurden.

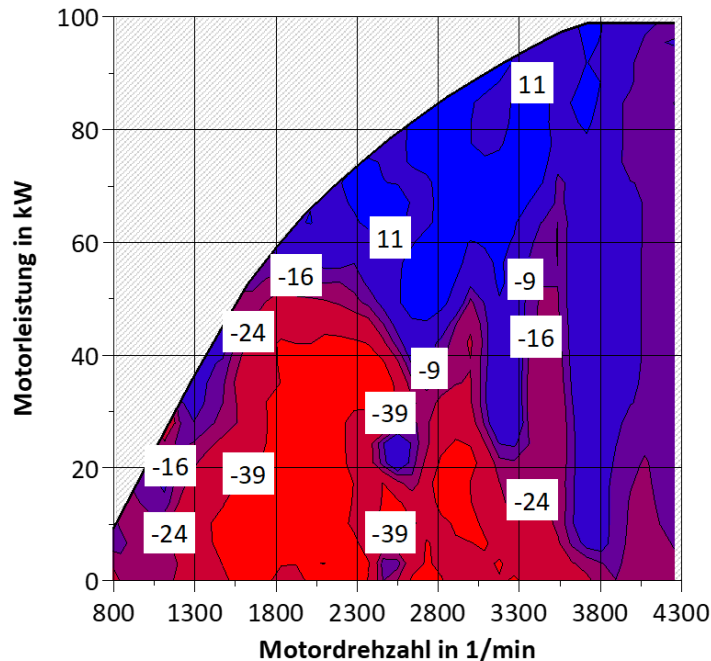
Tabelle 64: Gewichtungsfaktoren der Einzelkennfelder für Euro 5 Fahrzeuge mit EA 189 Pflichtrückruf (für Deutschland)

Institution	Marke	Modell	Gewichtungsfaktor für Einzelkennfelder
TU Graz	VW	Golf Variant 1.6 TDI	14 %
TU Graz	VW	Passat 1.6 TDI	14 %
TU Graz	VW	Passat Kombi 2.0 TDI	24 %
TU Dresden	Audi	A3 2.0 TDI	8 %
TU Dresden	Skoda	Octavia 1.6 TDI	14 %
DUH	VW	Sharan 2.0 TDI	8 %
DUH	VW	Tiguan 2.0 TDI	8 %
DUH	VW	Caddy 2.0 TDI	10 %

Aus den ermittelten Durchschnittskennfeldern der Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge vor und nach Umrüstung wurden entsprechende Differenzenkennfelder für den T20 Umgebungstemperaturbereich errechnet. D.h. die Änderung der jeweiligen Emissionskomponente wurde in g/h im Kennfeld als Funktion von Motorleistung und -drehzahl abgebildet. Exemplarisch ist in Abbildung 5 das NO_x-Differenzenkennfeld für Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor gezeigt. Zur besseren Veranschaulichung ist die NO_x-Änderung nicht in g/h, sondern in %-Änderung zu Emissionsniveau EA 189 vor Umrüstung dargestellt. Bereiche mit den höchsten NO_x-Reduktionen sind in Rot gehalten, Bereiche mit NO_x-Erhöhungen sind in Blau dargestellt. Es ist ersichtlich, dass NO_x-Reduktionen bis ca. 40 % im mittleren Lastbereich vorliegen. An der Volllastkurve bei höheren Motordrehzahl können auch leichte NO_x-Erhöhungen vorliegen.

Abbildung 5: Grafische Darstellung des Differenzenkennfelds für Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor

Differenzenkennfeld der Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge



NO_x-Änderung in % bei 20 °C Umgebungstemperatur

Quelle: eigene Darstellung, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH

6.4.3.2 Methode zur Darstellung von Kaltstartzusatzemissionen

Die Kaltstartzusatzemissionen werden für das HBEFA mittels IUFC-Messungen ermittelt. Der IUFC besteht dabei aus einem mehrmals hintereinander gereihten gleichen Mikrozyklus. Wird dieser Zyklus mit kaltem Motor gestartet, dann stellt sich nach Ende der Kaltstartphase ein konstantes Emissionsniveau ein. Somit können die Zusatzemissionen bestimmt werden, indem die Warmemissionen von den Emissionen in der Kaltstartphase abgezogen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung der Kaltstartzusatzemissionen ist unter (Notter, 2019) gegeben. Da für die Fahrzeuge mit dem verpflichtenden EA 189-Pflichtrückruf keine IUFC-Messungen verfügbar waren, wurden andere PKW-Rollenprüfstand- und RDE-Messungen mit Kaltstart herangezogen. Für die weiteren Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge mit freiwilligen bzw. verpflichtenden Rückrufen aus Kapitel 6.4.2.2 und 6.4.2.3 konnten aufgrund der verfügbaren begrenzten Datenlage keine repräsentativen Kaltstartzusatzemissionen vor sowie nach Umrüstung bestimmt werden. Dies war auch ein Grund, weshalb die Umrüstungen der Fahrzeuge aus Kapitel 6.4.2.2 und 6.4.2.3 nicht ins HBEFA 4.1 implementiert wurden.

Für die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor wurden die Kaltstartzusatzemissionen anhand der PKW-Rollenprüfstand- und RDE-Messungen untersucht. Die Dauer des Kaltstarts wurde von Motorstart bis zum Erreichen einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C definiert. Ab 70 °C Kühlmitteltemperatur hat der Motor demnach per Definition den betriebswarmen Zustand erreicht. Ist die Kühlmitteltemperatur in den Messdaten nicht vorhanden, wird die Dauer der Kaltstartphase mit 300 Sekunden festgelegt. Die Ermittlung der Kaltstartzusatzemissionen erfolgte anhand zwei Optionen, die im nachfolgenden kurz beschrieben sind. Bei beiden Methoden mussten die Emissionen in betriebswarmem Zustand berechnet werden, da in den verfügbaren Daten Kaltstarttests nicht mit Warmstart wiederholt wurden.

- Option a: Bei dieser Methode wurden bei den untersuchten Fahrzeugen jene Emissionen mit PHEM simuliert, die mit betriebswarmem Motor anhand des gemessenen Fahrzyklus in der Kaltstartphase vorgelegen wären. Anschließend wurden diese simulierten Emissionen von denen der Messung (mit kaltem Motor) abgezogen. Diese Differenz ergibt die Zusatzemissionen, die aufgrund des Kaltstarts in g/Start vorliegen.
- Option b: Bei der zweiten Methode wurden die Kaltstartzusatzemissionen durchgängig aus den Messdaten berechnet. Dabei wurden die Mittelwerte von sekundlichem CO₂ und NO_x in der Dauer der Kaltstartphase gebildet. Des Weiteren wurden in einer Phase mit betriebswarmem Motor ebenfalls die Mittelwerte von CO₂ und NO_x gebildet. Im nächsten Schritt wurde für das betriebswarme Zeitintervall die entsprechenden NO_x durch die zugehörigen CO₂-Emissionen dividiert. Das Verhältnis von NO_x zu CO₂ in der betriebswarmen Phase kann mit dem CO₂-Wert vom Kaltstart multipliziert werden, um die NO_x-Emissionen mit betriebswarmem Motor für die Kaltstartphase zu berechnen. Diese wurden dann wieder von den Messwerten in der Kaltstartphase abgezogen, was die Kaltstartzusatzemissionen ergibt.

Beide Optionen ergaben für die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor folgendes Ergebnis:

- Die Kaltstartzuschläge waren vor und nach Umrüstung zwar leicht unterschiedlich, aber aufgrund des geringen Absolutniveaus im Vergleich zu den betriebswarmen Emissionen nicht ausschlaggebend. Die Kaltstartzusatzemissionen sind in einer ähnlichen Größenordnung wie der Kaltstartzuschlag für die gesamte Euro 5 Flotte vor Umrüstung.

6.4.3.3 Methode zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen

Hintergründe, weshalb die NO_x-Emissionen auch maßgeblich von der Umgebungstemperatur beeinflusst werden können, wurden bereits im Kapitel 6.3 beschrieben. In diesem Kapitel wurde auch erwähnt, dass die Herleitung der NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur auf Daten von Remote-Sensing-Messungen beruht. Da aus diesen Daten aber die Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor- und nach Umrüstung sowie auch die weiteren Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge mit Umrüstung, zumindest bislang, nicht separiert werden konnten, wurde die NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur für die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor aus PKW-Rollenprüfstand- und RDE-Messungen bei unterschiedlicher Umgebungstemperatur abgeleitet. Für die weiteren Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge mit Umrüstung waren keine entsprechenden PKW-Rollenprüfstand- und RDE-Messungen verfügbar. Dies war zusätzlich zu den fehlenden Kaltstartzusatzemissionen ein Grund, weshalb die Fahrzeuge aus Kapitel 6.4.2.2 und 6.4.2.3 nicht im HBEFA abgebildet wurden.

Da das Emissionsniveau von RDE-Messungen der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor aufgrund unterschiedlicher Fahrzeugtestmassen, Tripdynamiken, usw. nur eingeschränkt miteinander vergleichbar war, wurde eine Methode entwickelt, um die Änderung der NO_x-Emissionen nur als Funktion der Änderung der Umgebungstemperatur festzustellen. Dazu wurden Einzelemissionskennfelder von Messungen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen mittels der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode in PHEM erstellt. Mit diesen Einzelkennfeldern bei verschiedenen Umgebungstemperaturen wurde der Real-World-Zyklus CADC für jedes Fahrzeug simuliert. Das Ergebnis ist die Änderung der NO_x-Emissionen als Funktion der Umgebungstemperatur, die als Gerade beschrieben werden kann. Zusätzliche Einflussfaktoren

auf die NO_x-Änderungen wie z. B. verschiedene Fahrstile oder Beladungen, wie sie bei Messungen vorliegen, können somit weitgehend ausgeschlossen werden, da die Simulation immer mit derselben Beladung für denselben Zyklus und dasselbe Schaltmuster durchgeführt wurde. In geringem Umfang können Unterschiede in den Testfahrten die Emissionen in den Kennfeldern beeinflusst haben (z. B. etwas andere Motortemperaturniveaus bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen).

Wie bereits erwähnt, müssen dafür Messungen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen zusätzlich zu den Messungen im T20-Umgebungstemperaturbereich an ein und demselben Fahrzeug für die Ermittlung der NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur verfügbar sein. Mit den vorliegenden Messdaten war das nur für die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor der Fall, die von der TU Dresden und TU Graz gemessen wurden. Die NO_x-Änderung im simulierten CAD-C ist nachfolgend für jedes Fahrzeug kurz beschrieben. Die für die Simulation benötigten Emissionskennfelder wurden von den PKW-Rollenprüfstand- sowie RDE-Messungen abgeleitet. D. h. die vorliegenden Tendenzen sind auch in den Messungen wiederzufinden.

- ▶ VW Golf Variant 1.6 TDI: Vor der Umrüstung zeigte dieses Fahrzeug eine Zunahme der NO_x-Emissionen um etwa 10 % von 18 °C auf 10 °C. Nach der Umrüstung war das NO_x-Emissionsniveau bei 18 °C geringer als vor Umrüstung, die Steigerung der NO_x-Emissionen von 18 auf 10 °C lag bei 4 % nach der Umrüstung.
- ▶ VW Passat 1.6 TDI: Vor Umrüstung stiegen die NO_x beim VW Passat 1.6 TDI von 18 °C auf 10 °C um etwa 5 % an. Nach der Umrüstung war das NO_x-Emissionsniveau bei 18 °C geringer als vor Umrüstung. Zusätzlich sanken die NO_x-Emissionen nach Umrüstung von 18 °C auf 10 °C um etwa 11 %.
- ▶ VW Passat Kombi 2.0 TDI: Vor der Umrüstung lag keine NO_x-Umgebungstemperaturabhängigkeit vor. Nach der Umrüstung war das NO_x-Emissionsniveau bei 18 °C ähnlich dem vor Umrüstung, allerdings stiegen nach Umrüstung die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 5 % an.
- ▶ Audi A3 2.0 TDI: Vor der Umrüstung sanken beim Audi A3 die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 7 %. Nach der Umrüstung lag das NO_x-Emissionsniveau bei 18 °C unter jenem vor Umrüstung. Die NO_x-Erhöhung nach Umrüstung von 18 °C auf 10 °C betrug 10 %.
- ▶ Skoda Octavia 1.6 TDI: Vor der Umrüstung sanken die NO_x-Emissionen von 18 °C auf 10 °C um etwa 5 %. Nach der Umrüstung waren die NO_x-Emissionen bei 18 °C geringer als vor Umrüstung, die NO_x stiegen allerdings von 18 °C auf 10 °C um etwa 12 % an.

Die Messdaten dieser fünf Pkw zeigen verschiedene Trends vor und nach Umrüstung bzgl. des Einflusses der Umgebungstemperatur. Dabei beträgt die maximale NO_x-Änderung +/-10 % in Bezug auf Emissionen bei T20. Um eine Aussage für die VW-Konzernflotte mit EA 189-Motor treffen zu können, wurden die einzelnen NO_x-Umgebungstemperaturfunktionen dieser Fahrzeuge zu einer durchschnittlichen NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion zusammengefasst. Die Gewichtungsfaktoren dafür wurden wieder analog zu Tabelle 64 abgeleitet und sind in Tabelle 65 dargestellt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass aufgrund der geringen Anzahl an Messdaten die Annahme getroffen wurde, dass sich die gesamte VW-Konzernflotte mit EA 189-Motor gleich den vermessenen fünf Fahrzeugen verhält (Tabelle 65).

Tabelle 65: Gewichtungsfaktoren für NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion für Euro 5 Fahrzeuge mit Pflichtrückruf EA 189 für Deutschland

Institution	Marke	Modell	Gewichtungsfaktor für NO _x -Umgebungstemperaturkorrekturfunktion
TU Graz	VW	Golf Variant 1.6 TDI	15,5 %
TU Graz	VW	Passat 1.6 TDI	15,5 %
TU Graz	VW	Passat Kombi 2.0 TDI	26,4 %
TU Dresden	Audi	A3 2.0 TDI	27,1 %
TU Dresden	Skoda	Octavia 1.6 TDI	15,5 %

Tabelle 66 zeigt die mittleren Korrekturfaktoren für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor und nach Umrüstung für die Umgebungstemperaturen 18 °C und 0 °C. Dazwischen wurde der Korrekturfaktor linear interpoliert. Unterhalb 0 °C und oberhalb 18 °C wird, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, von keiner weiteren Änderung mehr ausgegangen.

Tabelle 66: Korrekturfaktoren für NO_x in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor

Umgebungstemperatur [°C]	Korrekturfaktor EA 189 vor Umrüstung	Korrekturfaktor EA 189 nach Umrüstung
0	0,98	1,11
18	1	1

6.4.4 Implementierung der Emissionsfaktoren ins HBEFA und TREMOD

Wie unter Kapitel 6.4 bereits erwähnt, wurden im HBEFA 4.1 nur die VW-Konzernfahrzeuge des EA 189-Pflichtrückrufs implementiert.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Emissionsfaktoren zur Berücksichtigung des EA 189-Pflichtrückrufs erfolgte prinzipiell nach der in Kapitel 6.4.3.1. beschriebenen Option 2, d. h. vom Basisemissionskennfeld der Euro 5 Flotte wird anteilmäßig die NO_x-Reduktion aufgrund der Umrüstung der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor abgezogen. Das Basisemissionskennfeld bezieht sich auf eine Umgebungstemperatur von 20 °C. Um für niedrigere Umgebungstemperaturen die NO_x-Korrektur für die Euro 5 Flotte berechnen zu können, müsste eine NO_x-Korrektur angewandt werden, die sich aus Anteilen einer NO_x-Korrektur ohne VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor, NO_x-Korrektur der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor Umrüstung und NO_x-Korrektur der umgerüsteten VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor zusammensetzt. Da vor allem die Implementierung dieser NO_x-Korrekturberechnung aufgrund der vorliegenden Datenstruktur im HBEFA nur schwer zu bewerkstelligen gewesen wäre, wurde folgende alternative Implementierung gewählt:

1. Separate NO_x-Korrektur für PKW ohne VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor, für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor Umrüstung und für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor nach Umrüstung mit der jeweiligen Korrekturfunktion.
2. Zusammengewichtung dieser drei Schichten.

Dadurch wird die Implementierung erheblich erleichtert. Das Endergebnis durch die alternative Implementierung bleibt dabei unverändert. Die Implementierung des EA 189-Pflichtrückrufs erfolgte, indem drei Euro 5 Schichten für Dieselfahrzeuge im HBEFA angelegt wurden. Diese sind im HBEFA wie folgt bezeichnet:

- a) Schicht „PC diesel Euro 5“
- b) Schicht „PC diesel Euro 5 EA 189 before software update“
- c) Schicht „PC diesel Euro 5 EA 189 after software update“

Alle drei Schichten beschreiben jeweils die gesamte Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte, lediglich zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Basisemissionsfaktoren bei 20 °C der Schicht a) sind jene Emissionsfaktoren, welche für die gesamte Euro 5 Flotte vor Umrüstung vorlagen. Die Emissionsfaktoren der Schicht b) sind aufgrund der geringen Anzahl an vermessenen Fahrzeugen nicht aus den Messungen berechnet worden, sondern entsprechen bei 20 °C jenen der Schicht a), d. h. bei T20 sind die NO_x-Emissionsfaktoren für a) und b) identisch. Schicht c) repräsentiert das Emissionsniveau durch die Umrüstung, berechnet durch Subtraktion des Reduktionspotentials von Schicht a). Die Schicht b) bzw. c) darf nicht als Schicht für die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor angesehen werden. Bedingt durch die HBEFA-Programmierstruktur ermöglicht diese separate Schicht lediglich getrennte NO_x-Korrekturen bei unterschiedlicher Umgebungstemperatur. Schicht a) bekommt die NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur ohne VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor, Schicht b) die NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur jener VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor Umrüstung. Schicht c) erhält die NO_x-Umgebungstemperaturkorrektur jener VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor nach Umrüstung.

Durch entsprechende Gewichtung der Anteile dieser drei Schichten an der Euro 5 PKW-Diesel-Flotte ergibt sich der Emissionsfaktor für die Euro 5-Diesel-PKW-Flotte mit entsprechender Berücksichtigung der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor nach Umrüstung. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich durch den Flottenanteil der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor an der gesamten Euro 5-Flotte. Durch die Umrüstungszahlen ist auch bekannt, wieviel VW-Konzernfahrzeuge zu welchem Zeitpunkt umgerüstet waren. Diese sind in Tabelle 67 ersichtlich. Zusätzlich sind in Tabelle 67 die Anzahl der gesamten Euro 5 Diesel-PKW-Flotte, sowie die Anteile der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor an der gesamten Euro 5 Diesel-PKW-Flotte für die Jahre 2015 bis 2019 dargestellt. Die Annahme dabei war, dass am Beginn der Bekanntgabe des Dieselskandals im Oktober 2015 noch keine Fahrzeuge umgerüstet waren. Die Abarbeitungsquote wurde entsprechend auf einer Datenbasis von KBA anhand betroffener bzw. umgerüsteter Fahrzeuge für die Jahresmitte errechnet, die repräsentativ für die Emissionsberechnung im HBEFA ist.

Tabelle 67: Umrüstungszahlen für Euro 5 Fahrzeuge mit EA 189-Pflichtrückruf in Deutschland

Bezugsjahr	Euro 5 Diesel-PKW in Deutschland (Bestand)	Betroffene EA 189 PKW in Deutschland (Bestand)	Anteil EA 189 PKW an gesamter Euro 5 Diesel-PKW-Flotte in Deutschland (Bestand)	Abgewickelte EA 189 PKW in Deutschland	Abarbeitungsquote
Oktober 2015	5 952 394	2 360 111	40 %	0	0 %
Juni 2016	5 944 797	2 326 795	39 %	458 294	20 %
Juni 2017	5 700 128	2 177 213	38 %	1 374 881	63 %
Juni 2018	5 438 548	2 022 663	37 %	1 924 518	95 %
Juni 2019	5 149 781	1 994 438	39 %	1 994 438	100 %

Die Alterungsfunktionen wurden aufgrund der vorliegenden begrenzten Datenlage von der gesamten Euro 5 Diesel-PKW-Flotte vor Umrüstung übernommen und für die drei Schichten a), b) und c) gleich angenommen. Ebenfalls wurde für alle drei Schichten der Kaltstartzuschlag identisch angenommen, da der Kaltstartzuschlag von den VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor ähnlich der gesamten Euro 5 Diesel-PKW-Flotte vor Umrüstung war (siehe Kapitel 6.4.2.2).

Für die Emissionsberechnung im HBEFA und TREMOD werden die beschriebenen Kennzahlen und Annahmen für die Emissionsberechnung übernommen. Nach der vollständigen Umrüstung aller Fahrzeuge des EA 189-Pflichtrückrufs im Jahr 2019 geht deren Bestand im Trendszenario somit proportional zur Bestandsentwicklung aller Euro 5-Diesel-PKW wieder zurück. Der Fahrleistungsanteil der Fahrzeuge mit Umrüstung des EA 189-Pflichtrückrufs an der gesamten PKW-Fahrleistung liegt im Jahr 2019 bei 6 %, im Jahr 2025 bei 3 % und im Jahr 2030 bei 1,3 %.

7 Ausblick

Insgesamt basieren die mit PHEM modellierten HBEFA 4.1 Emissionsfaktoren auf einer viel breiteren Datenbasis an realen Tests als bisher. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen dieses Projekts bleibt als Ausblick für das nächste HBEFA-Update immer noch ein gewisser Spielraum für Verbesserungen. Anregungen für das nächste HBEFA-Update wären:

- ▶ In den Emissionsfaktoren von Euro 6c und 6d-Temp **PKW** ist nur eine begrenzte Anzahl an gemessenen Fahrzeugen eingeflossen, da diese zum Zeitpunkt der Arbeiten für das HBEFA 4.1 erst die Markteinführung hatten. Daher wäre in Zukunft eine Aktualisierung dieser Euro-Klassen erforderlich. Für Euro 6d Fahrzeuge waren für HBEFA 4.1 noch gar keine Messdaten verfügbar, so dass spätestens nach Vorlage erster Messungen an Euro 6d Fahrzeugen ein HBEFA-Update notwendig wird.
- ▶ Emissionsfaktoren für Euro 5 und Euro 6a,b PKW und leichte Nutzfahrzeuge mit obligatorischem und freiwilligem Rückruf wurden bisher nur für den obligatorischen EA 189-Pflichtrückruf von Euro 5 PKW aus dem VW-Konzern durchgeführt. Für das nächste HBEFA-Update werden weitere Messungen von laufenden und geplanten Rückrufen empfohlen, damit diese auch abgebildet werden können. Ein kompletter Datensatz besteht aus Messungen vor und nach der Umrüstung, einschließlich Kaltstarttest und Tests bei verschiedenen Umgebungstemperaturen, um Kaltstartzusatzemissionen sowie NO_x-Umgebungstemperaturabhängigkeiten berücksichtigen zu können.
- ▶ Im HBEFA 4.1 waren die Messdaten nur von einem Euro 6a,b Diesel-PKW verfügbar, um die Abkühlungseffekte des SCR-Nachbehandlungssystems zu untersuchen (was zu einem Anstieg von NO_x führen kann). Daher sollten für das nächste HBEFA-Update mehr PKW und leichte Nutzfahrzeuge in Stauzyklen gemessen werden, um ein breiteres Wissen über das Verhalten der Flotte in solchen Verkehrslagen zu erhalten.
- ▶ Für das nächste HBEFA-Update sollten Messungen an leichten Nutzfahrzeugen in allen drei Größenklassen für die aktuellen Abgasnormen (Euro 6c, 6d-Temp und 6d) durchgeführt werden, wenn eine geringere Unsicherheit ihrer Emissionsfaktoren gefordert wird. Auch für leichte Diesel-Nutzfahrzeuge Euro 6a, b der Größenklasse N1-I lagen für HBEFA 4.1 keine Messdaten vor.
- ▶ Bisher basieren die **SNF** Euro VI Modelle auf Euro VI a und b Daten. Da die Flottenanteile von Euro VI c und d Fahrzeuge zunehmend relevant werden, sollten auch für diese Schichten Messungen durchgeführt werden.
- ▶ Zusätzliche Messungen an **Stadtbussen** und **Reisebussen** würden eine Validierung der Simulationsmodelle für diese Kategorien ermöglichen. Falls erforderlich, könnte eine Modellverbesserung auf der Grundlage solcher neuen Daten erfolgen.
- ▶ Die Datenbank für die Analyse der Verschlechterungseffekte von Euro VI-Fahrzeuge sollte um Fahrzeugmessungen erweitert werden, die im Verteilerverkehr eingesetzt werden. Insbesondere geht es um Stadtbusse, da nicht klar ist, inwieweit die Verschlechterung vom Nutzungsprofil abhängt.

- ▶ Die NO_x-Emissionen aus RDE-Messungen für SNF von AVL-MTC, TU Graz und TNO zeigen erhebliche Streuungen. Inwieweit diese auf Fahrverhalten, Verkehrseinfluss oder Kfz-Typen zurückzuführen sind, müsste näher untersucht werden.
- ▶ Für die Validierung der Simulationsmodelle für **BEVs** und **PHEVs** wurden die Messdaten von nur einem BEV verwendet. Für das nächste HBEFA-Update werden weitere BEV- und PHEV-Messungen vorgeschlagen, falls der simulierte Energieverbrauch weniger Unsicherheiten hinsichtlich der Repräsentativität für den BEV-Flottendurchschnitt aufweisen soll.

8 Quellenverzeichnis

Grange, S.K.; Farren, N.J.; Vaughan, A.R.; Rose, R.A.; Carslaw, D.C. (2019): Strong temperature dependence for light-duty diesel vehicle NO_x emissions. Environmental Science & Technology. Submitted 2019.

Matzer, C.; Weller, K.; Dippold, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2019): Update of emission factors for HBEFA Version 4.1; Final report DRAFT V1, I-05/19/CM EM-I-16/26/679 from 12.04.2019, TU Graz

Notter, B.; Keller, M.; Althaus, H.-J.; Cox, B.; Knörr, W.; Heidt, C.; Biemann, K.; Räder, D.; Jamet, M. (2019): HBEFA 4.1 Development Report, Draft report, Bern, Heidelberg, 18 March 2019.

Eisenmann, C.; Tietge, U.; Allekotte, M.; Althaus, H.-J.; Hausberger, S. (2019), et al.: Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs, Dessau-Roßlau, Februar 2019.

Hirt, H.-G. (2019): Messung und Simulation von PKW-Emissionen mit Real World Zyklen und Vergleich von Interpolations-Routinen, Bachelorarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, 2019.

Hausberger, S.; Matzer, C. (2017): Update of Emission Factors for EURO 4, EURO 5 and EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA Version 3.3, Final report No. Report No. I-09/17/ CM EM 16/26/679 from 01.06.2017.

Matzer, C.; Hausberger, S.; Rexeis, M.; et al. (2017): Update of Emission Factors for Euro 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA; TAP conference 2017; Zürich, Switzerland, November 2017.

Regulation (EU) 2017/2400, "VECTO"

Hausberger, S.; Sams T. (2016): Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil I und II, Skriptum Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, Graz, 2016.

Klingler, R. (2016): Messung und Simulation von Real World Emissionen beim PKW, Masterarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, Mai 2016.

Matzer, C.; Hausberger, S.; Lipp, S.; Rexeis, M. (2016a): A new approach for systematic use of PEMS data in emission simulation; TAP conference 2016; Lyon, France, May 2016.

Matzer, C.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2016b): Proposal for test description for cars and LCV for chassis dyno tests and RDE tests as basis for emission factors, TU Graz, Status: Version 3.0 from 24.06.2016

Weller, K.; Rexeis, M.; Hausberger, S.; Zach, B. (2016): A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements; TAP conference 2016; Lyon, France, May 2016.

Six, C.; Silberholz, G. et al. (2014): Development of an exhaust emission and CO₂ measurement test procedure for heavy-duty hybrids (HDH), Vienna University of Technology, Vienna 2014

(https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/4064802/20141027_ACEA_Report.pdf?api=v2)

Regulation (EU)582/2011

A Anhang zu den vermessenen Fahrzeugen

A.1 Fahrzeug VW Sharan 2.0 TDI

Tabelle 68: Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Sharan 2.0 TDI

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,080	0,500	0,170	0,0045	6,00E+11
Zulassung	130,0	0,041	0,159	0,065	n.v.	n.v.

Tabelle 69: Prüfstandeinstellungen für VW Sharan 2.0 TDI

Zyklus	Schwung-massen-klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs-temperatur [°C]	Neben-verbraucher
NEFZ	1930	111	0,83	0,495	25	keine
WLTC	1930	151	1,12	0,495	23	keine
CADC	1930	182	1,20	0,676	23	keine
RWC	1930	182	1,20	0,676	23	Licht + Radio + Klima 22 °C

Tabelle 70: Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Sharan 2.0 TDI

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ 01	131,7	0,035	0,094	0,021	0,0008	4,85E+09
NEFZ 02	129,4	0,046	0,130	0,028	0,0006	4,61E+09
WLTC 01	143,5	0,067	0,013	0,006	0,0003	8,00E+09
WLTC 02	141,7	0,102	0,011	0,006	0,0004	4,23E+11
CADC urban 01	234,9	0,122	0,000	0,007	0,0006	7,88E+09
CADC rural 01	142,3	0,035	0,000	0,003	0,0003	1,34E+09
CADC motorway 01	196,2	0,084	0,000	0,002	0,0004	5,71E+08
CADC 01 (1/3 Mix)	191,1	0,080	0,000	0,004	0,0004	3,26E+09
CADC urban 02	233,9	0,140	0,000	0,006	0,0000	3,54E+09
CADC rural 02	138,2	0,070	0,000	0,003	0,0004	1,73E+10
CADC motorway 02	189,2	0,045	0,000	0,002	0,0002	1,63E+09
CADC 02 (1/3 Mix)	187,1	0,085	0,000	0,004	0,0002	7,48E+09

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
RWC urban	141,4	0,054	0,000	0,003	0,0000	9,92E+08
RWC rural	199,8	0,012	0,000	0,008	0,0010	1,81E+09
RWC motorway	214,3	0,031	0,000	0,003	0,0000	4,21E+08
RWC (1/3 Mix)	185,2	0,032	0,000	0,005	0,0003	1,07E+09
Ries 01	163,8	0,045	0,028	-	-	-
Ries 02	156,6	0,057	0,039	-	-	-
Ries 03	144,0	0,048	0,042	-	-	-
Ries 04	147,0	0,039	0,044	-	-	-
Arzberg 01	178,6	0,180	0,033	-	-	-
Arzberg 02	159,7	0,068	0,044	-	-	-

Tabelle 71: Allgemeine RDE-Tripparameter der VW Sharan 2.0 TDI Messungen

Route	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	2048	6195	50,4	138,0	Normal	22
Ries 02	2048	6073	51,0	133,8	Normal	20
Ries 03	1973	5539	56,1	133,2	Normal	19
Ries 04	1973	5563	55,9	135,1	Normal	18
Arzberg 01	2048	7612	51,2	133,2	Normal	24
Arzberg 02	1973	6168	61,3	134,3	Normal	18

A.2 Fahrzeug Peugeot 508 SW

Tabelle 72: Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Peugeot 508 SW

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,080	0,500	0,170	0,0045	6,00E+11
Zulassung	104,0	0,038	0,114	0,045	n.v.	n.v.

Tabelle 73: Prüfstandeinstellungen für Peugeot 508 SW

Zyklus	Schwingungs- massen- klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs- temperatur [°C]	Neben- verbraucher
NEFZ	1590	90	0,67	0,370	25	keine
WLTC	1590	93	0,69	0,370	23	keine
CADC	1700	110	0,76	0,479	23	keine
RWC	1700	110	0,76	0,479	11	Licht + Radio +Klima 22 °C

Tabelle 74: Messwerte der limitierten Schadstoffe für Peugeot 508 SW

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ 01	101,5	0,070	0,149	0,012	-	5,78E+10
NEFZ 02	100,6	0,067	0,126	0,009	0,0018	6,14E+09
WLTC 01	109,8	0,123	0,040	0,001	-	2,27E+10
WLTC 02	110,3	0,163	0,026	0,000	0,0005	2,75E+10
CADC urban 01	201,5	0,631	0,000	0,004	0,0020	2,43E+10
CADC rural 01	117,7	0,353	0,000	0,002	0,0004	4,78E+09
CADC motorway 01	133,8	0,639	0,008	0,001	0,0011	2,78E+09
CADC 01 (1/3 Mix)	151,0	0,541	0,003	0,002	0,0012	1,06E+10
CADC urban 02	203,7	0,726	0,000	0,014	0,0041	1,43E+10
CADC rural 02	113,9	0,393	0,000	0,000	0,0013	6,31E+09
CADC motorway 02	130,8	0,440	0,002	0,000	0,0008	4,17E+09
CADC 02 (1/3 Mix)	149,5	0,519	0,001	0,005	0,0021	8,25E+09
RWC urban	98,7	0,255	0,000	0,000	0,0010	4,53E+09
RWC rural	152,6	0,277	0,000	0,003	0,0010	1,55E+10
RWC motorway	118,2	0,282	0,000	0,001	0,0010	7,21E+09
RWC (1/3 Mix)	123,2	0,271	0,000	0,001	0,0010	9,08E+09
Ries 01	134,4	0,551	0,050	-	-	8,08E+08
Ries 02	135,5	0,584	0,062	-	-	8,74E+08
Ries 03	137,7	0,632	0,051	-	-	1,04E+09
Ries 04	121,8	0,403	0,030	-	-	1,27E+09
Arzberg 01	157,0	0,847	0,015	-	-	9,09E+09
Arzberg 02	140,7	0,733	0,067	-	-	2,20E+09

Tabelle 75: Allgemeine RDE-Tripparameter der Peugeot 508 SW Messungen

Route	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	1726	7284	41,4	141,7	Normal	14
Ries 02	1726	6277	47,4	134,3	Normal	11
Ries 03	1726	6236	50,0	145,9	Normal	10
Ries 04	1726	6912	45,3	134,4	Normal	10
Arzberg 01	1726	6423	60,4	142,2	Normal	9
Arzberg 02	1801	6086	62,6	145,6	Normal	8

A.3 Fahrzeug Skoda Superb 2.0 TDI

Tabelle 76: Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Skoda Superb 2.0 TDI

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,080	0,500	0,170	0,0045	6,00E+11
Zulassung	120,0	0,059	0,081	0,071	0,0002	n.v.

Tabelle 77: Prüfstandeinstellungen für Skoda Superb 2.0 TDI

Zyklus	Schwung-massen-klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs-temperatur [°C]	Neben-verbraucher
NEFZ	1590	95	0,71	0,418	25	keine
WLTC	1700	101	0,76	0,418	23	keine
CADC	1810	128	0,95	0,439	23	keine
RWC	1810	128	0,95	0,439	18	Licht + Radio +Klima 22 °C

Tabelle 78: Messwerte der limitierten Schadstoffe für Skoda Superb 2.0 TDI

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ 01	118,3	0,045	0,031	0,009	0,0017	2,30E+11
NEFZ 02	119,8	0,042	0,040	0,012	0,0003	4,38E+10
WLTC 01	124,7	0,030	0,008	0,004	0,0005	1,06E+11
WLTC 02	125,2	0,029	0,006	0,010	0,0002	2,92E+10

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
CADC urban 01	231,8	0,120	0,000	0,014	0,0013	2,91E+11
CADC rural 01	116,2	0,143	0,000	0,002	0,0003	2,71E+10
CADC motorway 01	138,7	0,028	0,000	0,002	0,0005	5,44E+09
CADC 01 (1/3 Mix)	162,2	0,097	0,000	0,006	0,0007	1,08E+11
CADC urban 02	221,0	0,093	0,000	0,003	0,0018	6,70E+10
CADC rural 02	116,7	0,082	0,000	0,000	0,0003	1,46E+10
CADC motorway 02	143,5	0,023	0,000	0,001	0,0006	3,82E+09
CADC 02 (1/3 Mix)	160,4	0,066	0,000	0,001	0,0009	2,85E+10
RWC urban	107,8	0,069	0,000	0,000	0,0010	5,83E+11
RWC rural	203,4	0,029	0,000	0,002	0,0010	3,06E+10
RWC motorway	67,8	0,082	0,002	0,002	0,0000	2,84E+10
RWC (1/3 Mix)	126,3	0,060	0,001	0,001	0,0007	2,14E+11
Ries 01	155,7	0,121	0,042	-	-	8,78E+10
Ries 02	162,1	0,089	0,040	-	-	2,47E+09
Ries 03	166,1	0,120	0,037	-	-	2,84E+09
Ries 04	178,3	0,130	0,050	-	-	7,06E+09
Arzberg 01	168,2	0,192	0,042	-	-	3,15E+09
Arzberg 02	162,6	0,160	0,041	-	-	1,58E+09

Tabelle 79: Allgemeine RDE-Tripparameter der Skoda Superb 2.0 TDI Messungen

Route	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	1868	6389	49,4	131,7	Normal	19
Ries 02	1868	6956	44,4	133,7	Normal	17
Ries 03	1868	6362	49,0	135,5	Normal	22
Ries 04	1868	6440	47,7	133,9	Normal	9
Arzberg 01	1868	6433	60,5	133,0	Normal	17
Arzberg 02	1868	6455	59,2	133,0	Normal	16

A.4 Fahrzeug Audi A4 Avant 2.0 TDI

Tabelle 80: Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Audi A4 Avant 2.0 TDI

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,080	0,500	0,170	0,0045	6,00E+11
Zulassung	108,0	0,052	0,120	0,071	0,0000	0,13E+11

Tabelle 81: Messwerte der limitierten Schadstoffe für Audi A4 Avant 2.0 TDI

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	PN [# /km]
Ries 01	131,4	0,061	0,030	1,72E+09
Ries 02	129,1	0,056	0,024	1,66E+09
Ries 03	133,1	0,107	0,022	4,74E+11
Ries 04	137,9	0,063	0,034	1,68E+09
Arzberg 01	143,0	0,078	0,043	1,80E+09
Arzberg 02	143,6	0,159	0,079	1,64E+10
Arzberg 03	156,1	0,306	0,087	7,01E+11
Deutschlandsberg 01	165,3	0,698	0,042	4,04E+09
Deutschlandsberg 02	162,9	0,687	0,072	1,82E+10
Stadtzyklus 01	195,8	0,144	0,050	3,50E+09
Stauzyklus 01 inkl. Vorkond.	263,3	0,777	0,089	1,31E+12
Stauzyklus 02 inkl. Vorkond.	431,1	0,720	0,244	2,32E+10
Stauzyklus 03 inkl. Vorkond.	369,9	1,153	0,405	3,99E+10
Stauzyklus 04 inkl. Vorkond.	342,4	1,443	0,123	2,32E+10
Stauzyklus 05 inkl. Vorkond.	298,8	1,197	0,098	2,31E+10

Tabelle 82: Allgemeine RDE-Tripparameter der Audi A4 Avant 2.0 TDI Messungen

Route	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	1857	6001	51,1	114,2	Normal	31
Ries 02	1857	5964	51,4	110,6	Normal	21
Ries 03	1782	5860	52,4	112,9	Eco	28
Ries 04	1857	6120	50,1	131,2	Normal	33
Arzberg 01	1857	6316	57,5	129,4	Normal	29
Arzberg 02	1857	5999	62,6	141,1	Normal	27
Arzberg 03	1782	6360	57,4	135,8	Aggr.	28
Deutschlands berg 01	2037	6197	60,8	138,6	Aggr.	22
Deutschlands berg 02	2037	6439	59,8	136,2	Aggr.	19
Stadtzyklus 01 inkl. Vorkond.	1857	2709	18,4	60,8	Normal	19
Stauzyklus 01 inkl. Vorkond.	1857	364	34,1	102,7	Normal	24
Stauzyklus 02 inkl. Vorkond.	1857	1890	5,4	15,1	Normal	28
Stauzyklus 03 inkl. Vorkond.	1857	2259	12,1	108,6	Normal	32
Stauzyklus 04 inkl. Vorkond.	1857	2126	10,8	105,3	Normal	34
Stauzyklus 05 inkl. Vorkond.	1857	1815	11,9	108,1	Normal	36

A.5 Fahrzeug VW Golf 1.6 TDI

Tabelle 83: Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Golf 1.6 TDI

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,080	0,500	0,170	0,0045	6,00E+11
Zulassung	109,0	0,057	0,358	0,102	n.v.	n.v.

Tabelle 84: Prüfstandeinstellungen für VW Golf 1.6 TDI

Zyklus	Schwung- massen- klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs- temperatur [°C]	Neben- verbraucher
NEFZ	1360	82	0,61	0,355	25	keine
WLTC	1470	89	0,66	0,355	23	keine
CADC bzw. ERMES	1470	151	0,00	0,550	23	keine
RWC	1470	151	0,00	0,550	14	Licht + Radio +Klima 22 °C

Tabelle 85: Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Golf 1.6 TDI

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ 01	104,9	0,074	0,208	0,037	0,0001	1,47E+09
NEFZ 02	108,8	0,084	0,321	0,041	0	3,95E+10
WLTC 01	109,3	0,090	0,009	0,020	0,0008	6,72E+09
WLTC 02	108,9	0,090	0,010	0,021	0,0006	8,58E+09
CADC urban	197,0	0,380	0,000	0,000	0,0000	1,12E+10
CADC rural	120,4	0,339	0,000	0,011	0,0000	5,38E+09
CADC motorway	179,6	0,365	0,021	0,023	0,0012	1,37E+10
CADC (1/3 Mix)	165,7	0,362	0,007	0,011	0,0004	1,01E+10
ERMES	102,4	0,159	0,006	0,019	0,0006	5,67E+09
RWC urban	151,9	0,244	0,000	0,011	0,0000	0
RWC rural	155,6	0,079	0,000	0,001	0,0000	0
RWC motorway	98,2	0,168	0,000	0,015	0,0000	0
RWC (1/3 Mix)	135,2	0,164	0,000	0,009	0,0000	0
Ries 01	141,5	0,199	0,050	-	-	4,08E+09
Ries 02	136,9	0,206	0,021	-	-	1,98E+09
Ries 03	146,6	0,250	0,034	-	-	1,32E+11
Ries 04	129,7	0,222	0,052	-	-	3,29E+10
Arzberg 01	141,8	0,460	0,022	-	-	2,62E+09
Arzberg 02	142,0	0,184	0,051	-	-	2,26E+09
Arzberg 03	150,8	0,382	0,068	-	-	4,92E+11
Arzberg 04	143,2	0,708	0,036	-	-	4,11E+09
Stauzyklus 01 inkl.	255,6	0,979	0,045	-	-	6,45E+09

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Vorkond.						
Stauzyklus 02 inkl. Vorkond.	359,5	0,780	0,061	-	-	4,61E+09

Tabelle 86: Allgemeine RDE-Tripparameter der VW Golf 1.6 TDI Messungen

Route	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	1476	5902	51,9	127,5	Normal	14
Ries 02	1476	6543	46,9	125,6	Normal	16
Ries 03	1476	6510	47,2	113,1	Normal	16
Ries 04	1476	5623	54,5	123,6	Normal	13
Arzberg 01	1476	6198	61,2	135,0	Normal	16
Arzberg 02	1476	7065	51,4	121,1	Normal	15
Arzberg 03	1476	6699	56,8	130,4	Aggr.	16
Arzberg 04	1476	6533	58,2	125,6	Aggr.	13
Stauzyklus 01 inkl. Vorkond.	1476	3775	8,3	99,7	Normal	17
Stauzyklus 02 inkl. Vorkond.	1476	1234	4,6	9,1	Normal	17

A.6 VW Golf Variant 1.6 TDI

Tabelle 87: Euro 5b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Golf Variant 1.6 TDI vor Umrüstung

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,180	0,500	0,230	0,0045	6,00E+11
Zulassung	119,0	0,125	0,282	0,154	0,0004	n.v.

Tabelle 88: Prüfstandeinstellungen für VW Golf Variant 1.6 TDI

Zyklus	Schwung- massen- klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs- temperatur [°C]	Neben- verbraucher
NEFZ	1470	100	0,75	0,409	25	keine
CADC	1590	112	0,83	0,430	23	keine
RWC	1590	112	0,83	0,430	10	Licht + Radio +Klima 22 °C

Tabelle 89: Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Golf Variant 1.6 TDI vor Umrüstung

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ	128,8	0,110	0,638	0,106	0,001	5,21E+10
NEFZ+	122,9	0,563	0,669	0,092	0,001	1,91E+09
CADC urban	195,0	1,069	0,018	0,025	0,004	1,44E+10
CADC rural	106,1	0,581	0,005	0,008	0,001	1,77E+09
CADC motorway	137,0	0,840	0,000	0,003	0,001	3,80E+08
CADC (1/3 Mix)	146,0	0,830	0,008	0,012	0,002	5,51E+09
RWC (1/3 Mix)	134,0	0,628	0,007	0,020	0,001	1,26E+11
Ries 01	129,9	0,887	0,068	-	-	2,41E+10
Ries 02	129,7	0,729	0,066	-	-	1,59E+09

Tabelle 90: Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Golf Variant 1.6 TDI nach Umrüstung

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ	127,5	0,152	0,395	0,123	0,001	1,07E+11
NEFZ+	128,9	0,146	0,412	0,076	0,001	3,60E+07
CADC urban	207,2	0,717	0,048	0,062	0,003	1,24E+10
CADC rural	112,2	0,345	0,021	0,010	0,001	5,67E+09
CADC motorway	148,8	0,614	0,006	0,007	0,001	1,92E+09
CADC (1/3 Mix)	156,1	0,559	0,025	0,026	0,002	6,66E+09
RWC (1/3 Mix)	139,7	0,434	0,001	0,012	0,001	6,25E+10
Ries 03	135,3	0,516	0,045	-	-	3,27E+09
Ries 04	136,6	0,531	0,045	-	-	1,41E+09

Tabelle 91: Allgemeine RDE-Trippparameter der VW Golf Variant 1.6 TDI Messungen

Route	Software-stand	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	alt	1638	5936	51,7	136,0	Normal	13
Ries 02	alt	1638	6118	50,2	110,0	Normal	10
Ries 03	neu	1638	6033	51,0	135,0	Normal	14
Ries 04	neu	1638	6203	49,3	130,0	Normal	12

A.7 VW Passat Kombi 2.0 TDI

Tabelle 92: Euro 5b Grenzwerte und Zulassungswerte VW Passat Kombi 2.0 TDI vor Umrüstung

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,180	0,500	0,230	0,0045	6,00E+11
Zulassung	135,0	0,122	0,128	0,138	0,0006	n.v.

Tabelle 93: Prüfstandeinstellungen für VW Passat Kombi 2.0 TDI

Zyklus	Schwing-massen-klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs-temperatur [°C]	Neben-verbraucher
NEFZ	1590	129	0,96	0,399	25	keine
CADC	1700	137	1,02	0,418	23	keine
RWC	1700	137	1,02	0,418	1.5	Licht+ Radio + Klima

Tabelle 94: Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Passat Kombi 2.0 TDI vor Umrüstung

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ	147,8	0,142	0,113	0,034	0,001	7,10E+09
NEFZ+	145,3	0,372	0,054	0,029	0,001	2,53E+09
CADC urban	242,7	1,106	0,000	0,018	0,003	0,00E+00
CADC rural	123,7	0,727	0,000	0,007	0,002	0,00E+00
CADC motorway	159,4	0,792	0,000	0,004	0,000	0,00E+00
CADC (1/3 Mix)	175,3	0,875	0,000	0,010	0,002	0,00E+00
RWC (1/3 Mix)	145,4	0,625	0,004	0,010	0,003	5,31E+09

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Ries 01	164,1	1,073	0,046	-	-	-
Ries 02	159,8	0,968	0,053	-	-	-

Tabelle 95: Messwerte der limitierten Schadstoffe für VW Passat Kombi 2.0 TDI nach Umrüstung

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ	140,0	0,161	0,069	0,030	0,001	1,43E+10
NEFZ+	142,4	0,178	0,076	0,031	0,001	8,28E+08
CADC urban	243,7	1,225	0,000	0,038	0,002	9,47E+09
CADC rural	127,3	0,735	0,000	0,015	0,001	1,85E+09
CADC motorway	157,6	0,701	0,000	0,007	0,001	1,89E+09
CADC (1/3 Mix)	176,2	0,887	0,000	0,020	0,001	4,40E+09
RWC (1/3 Mix)	141,2	0,667	0,001	0,032	0,001	5,19E+09
Ries 03	155,4	0,992	0,067	-	-	-
Ries 04	156,3	0,544	0,067	-	-	-

Tabelle 96: Allgemeine RDE-Trippparameter der VW Passat Kombi 2.0 TDI Messungen

Route	Software-stand	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	alt	1730	5962	51,6	122,0	Normal	2
Ries 02	alt	1730	6042	50,5	128,0	Normal	3
Ries 03	neu	1730	5964	51,6	129,0	Normal	4
Ries 04	neu	1730	5768	53,3	126,0	Normal	11

A.8 Fahrzeug Renault Master 2.3 dCi

Tabelle 97: Euro 5b Grenzwerte und Zulassungswerte Renault Master 2.3 dCi

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC+NO _x [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,280	0,740	0,350	0,0050	6,00E+11
Zulassung	216,0	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Tabelle 98: Messwerte der limitierten Schadstoffe für Renault Master 2.3 dCi

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]
Ries 01	254,1	2,013	0,133
Ries 02	268,0	1,789	0,140
Ries 03	283,2	2,710	0,033
Ries 04	287,9	1,683	0,065
Ries 05	272,5	2,106	0,108
Ries 06	250,7	1,673	0,068
Ries 07	272,9	1,319	0,073

Tabelle 99: Allgemeine RDE-Tripparameter der Renault Master 2.3 dCi Messungen

Route	Testmasse [kg]	Dauer [s]	v [km/h]	v max [km/h]	Fahrstil	Umgebungs-temperatur [°C]
Ries 01	2977	6469	48,2	126,0	Normal	17
Ries 02	2977	6716	46,4	119,5	Normal	19
Ries 03	3352	5206	56,3	121,6	Normal	16
Ries 04	3352	5969	52,1	123,9	Normal	25
Ries 05	2977	6475	48,0	126,7	Normal	22
Ries 06	2977	5981	52,0	117,8	Normal	27
Ries 07	2977	6905	45,1	118,2	Normal	28

A.9 Fahrzeug Mini Cooper

Tabelle 100: Euro 6b Grenzwerte und Zulassungswerte Mini Cooper

NEFZ	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	THC [g/km]	NMHC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
Grenzwert	n.d.	0,060	1,000	0,100	0,068	0,0045	6,00E+12
Zulassung	105,0	0,009	0,155	0,036	n.v.	0,0002	n.v.

Tabelle 101: Prüfstandeinstellungen für Mini Cooper

Zyklus	Schwung- massen- klasse [kg]	R0 [N] (generisch)	R1 [Ns/m] (generisch)	R2 [Ns ² /m ²] (generisch)	Umgebungs- temperatur [°C]	Neben- verbraucher
NEFZ	1130	69	0,51	0,348	25	keine
WLTC	1250	73	0,55	0,348	23	keine
CADC	1360	109	0,81	0,365	23	keine

Tabelle 102: Messwerte der limitierten Schadstoffe für Mini Cooper

Zyklus	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	PM [g/km]	PN [# /km]
NEFZ 01	112,9	0,030	0,196	0,012	0,0013	8,26E+11
NEFZ 02	115,1	0,049	0,147	0,018	0,0011	8,38E+11
WLTC 01	110,7	0,051	0,123	0,003	0,0010	1,43E+12
WLTC 02	112,6	0,057	0,136	0,005	0,0008	9,30E+11
CADC urban 01	229,5	0,165	0,160	0,000	0,0006	8,33E+11
CADC rural 01	108,6	0,070	0,103	0,000	0,0003	6,59E+11
CADC motorway 01	133,3	0,043	0,291	0,000	0,0009	2,03E+12
CADC 01 (1/3 Mix)	157,1	0,093	0,185	0,000	0,001	1,17E+12
CADC urban 02	221,3	0,157	0,141	0,000	0,0016	8,44E+11
CADC rural 02	110,7	0,081	0,115	0,000	0,0006	5,83E+11
CADC motorway 02	132,9	0,046	0,304	0,000	0,0010	1,82E+12
CADC 02 (1/3 Mix)	155,0	0,095	0,187	0,000	0,001	1,08E+12

B Anhang zu den für die Emissionsfaktoren verwendeten PKW

B.1 Spezifikationen von PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Tabelle 103: Spezifikationen von Euro 6a,b Diesel-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Mess-serienstart [km]
100051	ADAC	BMW	118d Urban Line Steptronic	1995	110	4000	3459
100052	ADAC	BMW	320d Gran Turismo Sport Line Steptronic	1995	140	4000	5042
110371	EMPA	VW	Golf VII 1.6 TDI	1598	81	3200	15076
110372	EMPA	Mazda	CX-5 D LP 4WD	2191	110	4500	16351
110373	EMPA	BMW	530d Xdrive Touring F11	2993	190	4000	17663
110374	EMPA	Mercedes	GLK220 BlueTec	2143	125	3200	28402
110375	EMPA	VW	Passat 2.0 Bl. TDI	1968	103	4200	18241
110376	EMPA	Renault	Scenic 1.6 dCi130	1598	96	4000	39141
110476	EMPA	Mini	Cooper D	1496	85	4000	7132
110477	EMPA	Mercedes	A220 CDI	2143	125	3400	6517
110478	EMPA	BMW	X3 xDrive 20D	1995	140	4000	11545
110479	EMPA	Mercedes-Benz	ML 350 Bluetec	2987	190	3600	22392
110480	EMPA	Porsche	Macan S Diesel	2967	190	4000	3658
110481	EMPA	Peugeot	308 SW Blue HDI	1997	110	3750	15398

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Mess-serienstart [km]
110482	EMPA	Opel	Astra K 16DTH ST	1598	100	3500	15706
110483	EMPA	Ford	S-MAX 2.0 TDCi	1997	110	3750	13435
110484	EMPA	Renault	Megane	1461	81	4000	5288
200123	TU Graz	Peugeot	508 SW	1560	88	3500	12000
200124	TU Graz	VW	Sharan	1968	110	3500	1200
200125	TU Graz	Audi	A4 Avant	1968	90	3500	170
200126	TU Graz	VW	Golf VII	1598	66	2750	5626
200127	TU Graz	Skoda	Superb	1968	140	4000	17000
200131	TU Graz	Kia	Carens	1685	104	4000	200
200132	TU Graz	Mazda	CX-5	2191	110	4500	6000
200133	TU Graz	BMW	530d	2993	180	4000	2700
200134	TU Graz	BMW	X5	2993	180	4000	400
200135	TU Graz	Audi	A4 Allroad	2967	180	4000	15000
200136	TU Graz	BMW	320d Touring Efficient Dynamics	1995	120	4000	15000
200137	TU Graz	Audi	Q7	2967	160	4000	30000
320001	DUH-EKI	Ford	Mondeo 2.0 Duratorq TDCi	1997	110	3999	17050
320002	DUH-EKI	Nissan	Qashqai 1.6 dCi	1598	96	3999	19511
320003	DUH-EKI	Renault	Scenic 1.6 dCi	1598	96	3999	2255
320004	DUH-EKI	Ford	Kuga 2.0 TDCi 2x4	1997	88	3999	4808
320006	DUH-EKI	Ford	Focus 1.5 TDCi	1499	88	3999	30590
320007	DUH-EKI	Jeep	Renegade 1.6 Multijet	1598	88	3999	3878
320012	DUH-EKI	Fiat	500X 1.6	1598	88	3999	2627

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
320013	DUH-EKI	Volvo	XC60 2.0D	1969	140	3999	3367
320014	DUH-EKI	Toyota	Auris 1.4 D	1364	66	3999	9000
320015	DUH-EKI	Opel	Zafira 1.6 CDTi	1598	100	3999	6000
320017	DUH-EKI	BMW	320d GT xDrive	1995	135	3999	20100
320018	DUH-EKI	Hyundai	i30 1.6 CRDi	1582	81	3999	16780
320019	DUH-EKI	Hyundai	Tucson 2.0 CRDi	1995	100	3999	7461
320022	DUH-EKI	VW	Golf VII 1.6 TDI Variant	1598	81	3999	-
320030	DUH-EKI	Audi	A4 2.0 TDI Avant	1968	110	3999	2467
320031	DUH-EKI	VW	Passat 2.0 TDI Variant	1968	110	3999	3553
320035	DUH-EKI	Audi	Q3 2.0 TDI quattro	1968	110	3999	1569
320036	DUH-EKI	Mercedes	E 220 d Limousine	1950	143	3999	10614
320041	DUH-EKI	Renault	Captur 1.5 dCi 110	1461	81	3999	17723
320043	DUH-EKI	Mercedes	B180 d	1461	80	3999	5046
320051	DUH-EKI	BMW	520d Touring	1995	140	3999	42298
320057	DUH-EKI	Fiat	500X 1.6	1598	88	3999	6684
350027	KBA	BMW	218d	1995	110	3999	-
350029	KBA	BMW	318d	1995	110	3999	-
350032	KBA	Fiat	500X	1956	103	3999	-
350034	KBA	Ford	Mondeo	1997	110	3999	-
350035	KBA	Hyundai	i30	1582	81	3999	-
350037	KBA	Mercedes	C220d	2143	125	3999	-
350038	KBA	Mercedes	E350d	2987	190	3999	-
350040	KBA	Mercedes	GLC220	2143	125	3999	-

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
350041	KBA	Mercedes	Vito Tourer 109	1598	65	3999	-
350043	KBA	Opel	Corsa	1248	70	3750	-
350044	KBA	Opel	Insignia	1598	103	3500	-
350048	KBA	VW	Touareg	2967	193	3999	-
410558	TÜV NORD	Nissan	QashQai	1461	81	3999	4068
410559	TÜV NORD	Nissan	QashQai	1461	81	3999	5146
410560	TÜV NORD	Nissan	QashQai	1461	81	3999	5401
410567	TÜV NORD	BMW	X1	1995	140	3999	11222
410568	TÜV NORD	BMW	X1	1995	140	3999	4914
410569	TÜV NORD	BMW	X1	1995	140	3999	8198
410575	TÜV NORD	Ford	Mondeo	1499	88	3999	12018
410598	TÜV NORD	Audi	A4	1968	140	3999	24959
410599	TÜV NORD	Audi	A4	1968	140	3999	23843
410600	TÜV NORD	Audi	A4	1968	140	3999	30651
410601	TÜV NORD	Volvo	V70	1969	133	3999	49880
410602	TÜV NORD	Volvo	V70	1969	133	3999	57111
410603	TÜV NORD	Volvo	V70	1969	133	3999	76993
410611	TÜV NORD	Kia	Ceed	1582	100	3999	13628
410612	TÜV NORD	Kia	Ceed	1582	100	3999	14859
410614	TÜV NORD	VW	Passat	1968	140	3999	52554
410615	TÜV NORD	VW	Passat	1968	140	3999	35785
410616	TÜV NORD	VW	Passat	1968	140	3999	8239
410624	TÜV NORD	Nissan	QashQai	1197	85	3999	-
410625	TÜV NORD	Nissan	QashQai	1197	85	3999	-
410626	TÜV NORD	Nissan	QashQai	1197	85	3999	-
410627	TÜV NORD	Volvo	V40	1969	88	3999	-
410628	TÜV NORD	Volvo	V40	1969	88	3999	-
410629	TÜV NORD	Volvo	V40	1969	88	3999	-
440018	JRC/Vela2	BMW	530d	2993	195	4000	4810
440019	JRC/Vela2	Citroen	C4 Cactus	1560	73	3750	4792

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Mess-serienstart [km]
440024	JRC/Vela2	Peugeot	Partner	1560	73	3750	79
440028	JRC/Vela2	Audi	A3	1968	110	3999	24473
171765	TNO	Ford	Focus	1499	70	3600	6500
171777	TNO	Mercedes	C220	2143	125	3000	17100

Tabelle 104: Spezifikationen von Euro 6d-Temp Diesel-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Mess-serienstart [km]
200144	TU Graz	Honda	Civic	1597	88	4000	800
200146	TU Graz	Kia	Ceed	1461	100	4000	750
200143	TU Graz	Peugeot	308	1499	96	3750	400
200141	TU Graz	BMW	X1 sDrive 16d	1496	85	4000	400
200148	TU Graz	BMW	218d	1995	110	4000	2500
200149	TU Graz	Skoda	Karoq	1598	85	3250	3000

Tabelle 105: Spezifikationen von Euro 6a,b Otto-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Mess-serienstart [km]
110462	EMPA	Audi	A3 1.4 TFSI	1395	92	5000	22252
110470	EMPA	VW	Golf VII R	1984	221	5500	31646
110471	EMPA	BMW	428i	1997	180	5000	24400
110472	EMPA	Alfa-Romeo	Giulietta 1.4 TB	1368	125	5500	20978
110473	EMPA	Fiat	500	875	77	5500	18693
110474	EMPA	Skoda	Octavia C 1.8 4x4	1798	132	5100	13742
110475	EMPA	Suzuki	SX4-Cross	1586	92	5000	16320

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Mess-serienstart [km]
200092	TU Graz	Mini	Cooper F56 B38	1499	100	4400	20000
410561	TÜV NORD	Opel	Astra	1399	92	4999	13310
410562	TÜV NORD	Opel	Astra	1399	92	4999	16473
410563	TÜV NORD	Opel	Astra	1399	92	4999	16332
410572	TÜV NORD	Citroren	C3	1199	60	4999	5403
410585	TÜV NORD	Peugot	308	1199	96	4999	13309
410586	TÜV NORD	Peugot	308	1199	96	4999	11735
410589	TÜV NORD	Ford	Fiesta	998	74	4999	24548
410590	TÜV NORD	Ford	Fiesta	998	74	4999	30119
410593	TÜV NORD	Renault	Clio	898	66	4999	7224
410594	TÜV NORD	Renault	Clio	898	66	4999	13698
410595	TÜV NORD	Renault	Clio	898	66	4999	20060
410606	TÜV NORD	Suzuki	Swift	1242	69	4999	16450
410607	TÜV NORD	Suzuki	Swift	1242	69	4999	9711
410608	TÜV NORD	Suzuki	Swift	1242	69	4999	29389
410609	TÜV NORD	Suzuki	Swift	1242	69	4999	9550
410619	TÜV NORD	Toyota	Avensis	1798	108	4999	29047
410620	TÜV NORD	Toyota	Avensis	1798	108	4999	-
410621	TÜV NORD	Toyota	Avensis	1798	108	4999	-
440021	JRC_Vela2	Fiat	Panda	1242	51	5500	2336
440023	JRC_Vela2	Opel	Astra	999	77	5500	2074
480002	DEKRA	Opel	Astra	1364	103	4999	22149
480003	DEKRA	Mercedes	C-Klasse	1991	135	4999	26531
480004	DEKRA	Opel	Corsa	1364	74	4999	10757
480005	DEKRA	Seat	Ibiza	1197	66	4999	17569
480006	DEKRA	Mini	Cooper	1198	75	4999	5163
480007	DEKRA	Audi	A1	999	70	4999	2266
480008	DEKRA	Audi	A3 Limousine	1395	110	4999	13403
480009	DEKRA	Opel	Corsa-E	1398	66	4999	10731

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
480010	DEKRA	Mercedes	B 180	1595	90	4999	14483
480011	DEKRA	Nissan	Qashqai	1618	120	4999	18632
480012	DEKRA	Hyundai	i20	998	74	4999	12624
480013	DEKRA	VW	Up	999	55	4999	7052
480014	DEKRA	Toyota	Auris	1197	85	4999	8361
480015	DEKRA	smart	fortwo coupe	898	66	4999	2289
480016	DEKRA	VW	Golf	1498	110	4999	19499

Tabelle 106: Spezifikationen von Euro 6c Otto-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
110488	EMPA	Ford	C-Max 1.0 SCTi	1000	92	6000	12728
110489	EMPA	Peugeot	308 1.2iSTT	1000	96	6000	9120
110487	EMPA	VW	Golf Variant	1500	110	5000	15641

Tabelle 107: Spezifikationen von Euro 6d-Temp Otto-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB ⁹	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
200142	TU Graz	Peugeot	208	1199	61	5750	400
200145	TU Graz	Ford	Focus	998	92	6000	800

⁹ Zusätzlich wurden die Messdaten von zwei Fahrzeugen berücksichtigt. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind diese Fahrzeugdaten hier nicht angeführt.

Tabelle 108: Spezifikationen von Euro 5 CNG-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
200110	TU Graz	Opel	Zafira	1600	110	5000	31000
200111	TU Graz	VW	Up	999	50	6200	13500
200107	TU Graz	VW	Caddy	1984	80	5400	61000

Tabelle 109: Spezifikationen von Euro 6a,b CNG-PKW, die für die Emissionsfaktorengenerierung verwendet wurden

Fahrzeug ID in ERMES DB	Institution	Hersteller	Modell	Hubraum [ccm]	Nennleistung [kW]	Nenn-drehzahl [U/min]	Tachostand bei Messserienstart [km]
110463	EMPA	Audi	A3	1395	81	4800	32865
200108	TU Graz	Audi	A3	1395	81	4800	7500
200122	TU Graz	Audi	A4	1984	125	4450	600