

TEXTE

87/2021

Ermittlung von Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw mit Softwareupdate (EFA-SU)

von:

Martin Dippold, Stefan Hausberger

Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH,
Graz, Österreich

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 87/2021

Projektnummer 148307

FB000536

Ermittlung von Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw mit Softwareupdate (EFA-SU)

von

Martin Dippold, Stefan Hausberger

Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH,
Graz (Österreich)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Inffeldgasse 19
8010 Graz
Österreich

Abschlussdatum:

November 2020

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2021

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

Kurzbeschreibung: Ermittlung von Emissions-faktoren für Diesel-Pkw mit Softwareupdate (EFA-SU)

Für ein kommendes Update des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) wurden durch das KBA, DUH und TU Dresden Messungen an Pkw Euro 5 und 6 mit verpflichtenden und freiwilligen Softwareupdates durchgeführt. Die Messungen umfassen dabei Tests im realen Verkehr (RDE Messungen) mit portabler Messtechnik (PEMS-Geräte) bei unterschiedlichen Temperaturen sowie Messungen auf dem Rollenprüfstand im Fahrzyklus WLTC bei den Temperaturen 5°C, 10°C und 15°C. In dieser Studie wurden aus diesen Messdaten Emissionsfaktoren für betriebswarmen Zustand nach der Methode des HBEFA und damit auch die mit den Softwareupdates verbundenen NO_x-Minderungen bestimmt. Dafür wurden aus den RDE- Messungen Emissions-Motorkennfelder für die Fahrzeuge vor- und nach Softwareupdate für das Emissionsmodell PHEM generiert mit dem im Anschluss die Emissionsfaktoren simuliert wurden. Der Datensatz ist damit kompatibel mit den sonstigen Emissionsfaktoren im HBEFA und steht für kommende Updates zur Verfügung.

Aus den WLTC- Messungen wurden auch die NO_x-Temperaturkorrekturfunktionen und Kaltstartzusatzemissionen erstellt. Diese erzeugten Daten sollen im nächsten HBEFA- Update zusätzlich zu den EA 189 Software-Updates der VW-Konzernfahrzeuge einfließen.

Abstract: Ermittlung von Emissions-faktoren für Diesel-Pkw mit Softwareupdate (EFA-SU)

To update the Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA), KBA, DUH und TU Dresden performed measurements on Euro 5 and 6 cars with mandatory and voluntary software updates. The measurements included on-road measurements (RDE measurements) with portable measurement technology (PEMS) at different temperatures as well as measurements on the chassis dynamometer in the WLTC driving cycle at temperatures 5 °C, 10 °C and 15 °C. In this study, we used these measurement data to produce emission factors according to the HBEFA method and to assess the NO_x reductions related to the software updates. From the RDE measurements, we produced engine emission maps for the emission model PHEM, which was then used to compute the emission factors. The data is compatible to other emission factors in HBEFA and is available for upcoming updates.

Temperature correction functions for NO_x and cold start extra emissions were created from the WLTC measurements. These results shall be applied in the next HBEFA update beside the already existing emission factors for EA 189 Software-Updates from VW-group vehicles.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	11
1 Aufgabenstellung.....	13
2 Methodik	14
3 Betriebswarme Emissionen.....	16
3.1 Emissionskennfelder Euro 5/6 jeweils vor/nach SU	16
3.2 Temperaturabhängigkeit der NO _x -Emissionen	17
4 Kaltstartemissionen.....	21
5 Vorbereitung zur Integration der ermittelten Emissionsfaktoren in HBEFA.....	22
6 Diskussion der Ergebnisse	25
6.1 Simulation WLTC Phase 1-3	25
6.2 Simulation RDE-Zyklus	25
6.3 Abdeckung der betroffenen Fahrzeugcluster	26
6.4 Simulation ausgewählter HBEFA-Zyklen	26
7 Quellenverzeichnis	29
A Anhang	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: NO _x Temperaturfunktionen	18
Abbildung 2: Ausgewählte HBEFA 4.1 Fahrzyklen bei 12°C, Euro 5	27
Abbildung 3: Ausgewählte HBEFA 4.1 Fahrzyklen bei 12°C Euro 6	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere NO _x -Änderung der von Softwareupdate betroffenen Pkw für den gewichteten Deutschland-Fahrsituationsmix (alle Straßen, IO, AO, AB) nach Umgebungstemperaturen	10
Tabelle 2: Mittlere Temperaturen der gewichteten Emissionskennfelder	16
Tabelle 3: Temperaturkorrekturkurven der neuen Schichten im Vergleich zu HBEFA 4.1 (100%=keine Korrektur) in Bezug auf den Basisemissionsfaktor bei 20°C	19
Tabelle 4: Vergleich von Simulation WLTP Phase 2-3 mit Messung	20
Tabelle 5: Kaltstartzusatzemissionen	21
Tabelle 6: HBEFA 4.1 gewichteter Deutschland-Fahrsituationsmix bei 20°C	22
Tabelle 7: HBEFA 4.1 gewichteter Deutschland-Fahrsituationsmix nach Umgebungstemperaturen	24
Tabelle 8: Vergleich von Simulation WLTP Phase 1-3 mit Messung, jeweils für das gewichtete Flottenmittel betroffener Kfz	25
Tabelle 9: Vergleich von Simulation mittlere RDE-Zyklus mit Messung	26
Tabelle 10: Genutzte Fahrzeuge Euro 5	30
Tabelle 11: Genutzte Fahrzeuge Euro 6	30

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ca.	circa
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
cum.	cumulated
DUH	Deutsche Umwelthilfe
EFM	Exhaust Flow Meter
ERMES	European Research group on Mobile Emission Sources
FVT	Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH.
HC	Kohlenwasserstoffe
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
KBA	Kraftfahrt Bundesamt
NO _x	Stickoxide
OBD	On-Board-Diagnose
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
SOC	State-of-Charge
SU	Software update
Temp.	Temperatur
TU Graz/ TUG	Technische Universität Graz
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle

Zusammenfassung

Aus den verfügbaren amtlichen Messungen an Pkw Euro 5 und 6 mit verpflichtenden und freiwilligen Softwareupdates (SU) des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), des Umweltbundesamtes (UBA) und der Deutschen Umwelthilfe (DUH) wurden Emissionsfaktoren für das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) berechnet. Die Daten umfassen dabei Messungen im realen Fahrbetrieb (RDE) mit portabler Messtechnik (PEMS) bei unterschiedlichen Temperaturen sowie Messungen auf dem Rollenprüfstand im Fahrzyklus WLTC bei den Temperaturen 5°C, 10°C und 15°C. Datengrundlage sind 29 Kfz, die für oder durch das KBA vermessen wurden sowie ein Kfz, das für UBA an der TU Dresden und drei Fahrzeuge, die von DUH vermessen wurden. Die Messungen der TU Dresden umfassten zusätzliche Tests und wurden in einer vorangegangenen Machbarkeitsstudie genutzt, um die beste Methode zur Erzeugung der Emissionsfaktoren aus den Daten des KBA zu entwickeln.

Aus diesen Messungen wurden die Emissionskennfelder der Fahrzeugschichten Euro 5 und Euro 6 vor/nach SU aus den RDE- Messungen erzeugt. Die Temperaturkorrekturfunktionen sowie die Kaltstartzusatzemissionen wurden aus den Messdaten im WLTC gewonnen, da nur dieser Test bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden.

Zur Erstellung der Temperaturkorrekturfunktionen standen WLTC Daten für insgesamt acht Euro 5 Kfz und sechs Euro 6 Kfz zur Verfügung. Von diesen Messungen wurden die Emissionswerte der Phasen 2 bis 3 des WLTC für die drei gemessenen Temperaturbereiche herangezogen. Anschließend wurden die Messdaten der Einzelfahrzeuge nach Flottenanteilen der einzelnen Kfz-Modelle an den SUs zu einem Durchschnittsmesswert je Temperatur (5°C, 10°C und 15°C) und Abgasnorm gewichtet. Aus diesen Durchschnittswerten je Temperatur wurden die Temperaturkorrekturfunktionen abgeleitet.

Für Euro 5 vor SU ergaben sich keine großen Differenzen zur derzeit im HBEFA für Euro 5 Diesel Pkw eingesetzten Temperaturkorrekturfunktion, weswegen hier dieselbe Korrekturfunktion genutzt wurde. Die Euro 5 Kfz nach SU zeigten bis 5°C keine Temperaturabhängigkeit. Unter 5°C sind keine Messdaten verfügbar, so dass eine Abschätzung des Verlaufs unter 5°C aufgrund verringerter Nutzbarkeit von AGR vorgenommen wurde. Bei den Euro 6 vor SU wurde eine sehr starke Temperaturabhängigkeit festgestellt und aus den Messergebnissen eine eigene Korrekturkurve erstellt, während die Euro 6 nach SU keine Temperaturabhängigkeit aufwiesen. Für sie wurde daher dieselbe Korrekturkurve wie für die Euro 6d-Temp des HBEFA 4.1 angenommen.

Die Ermittlung der Kaltstartemissionen erfolgte ebenfalls über die WLTC Messungen. Dazu wurde die Differenz der absoluten Emissionen in Gramm aus den Phasen 1 (Kaltstartbereich) und Phase 2-3 (Warmstartbereich) in den unterschiedlichen Temperaturbereichen (5°C, 10°C und 15°C) jeweils bezogen auf die CO₂ Massenemissionen ermittelt. Insgesamt liegen die Kaltstartemissionen gegenüber den betriebswarmen Emissionen auf einem niedrigen Level von maximal +33mg/Start bis -64mg/Start.

Die Ergebnisse ergeben mit den on-board Tests ein stimmiges Bild.

Mit den RDE Daten von KBA, TU-Dresden und DUH wurden Emissions-Motorkennfelder nach der Methode des HBEFA für jedes vermessene Fahrzeug erzeugt (9 Datensätze für Euro 5 und 23 Datensätze für Euro 6). Um alle RDE Tests zu nutzen, auch jene die unter 15°C gefahren wurden und in der HBEFA- Basismethode üblicherweise nicht direkt genutzt werden, wurde der HBEFA-Ansatz hier etwas modifiziert. Bei diesem neuen Ansatz wurden alle Messdaten nach Flottenanteilen der SUs zu einem Durchschnittskennfeld gewichtet (getrennt vor/nach SU sowie Euro 5 und Euro 6). Analog wurden auch die gewichteten Temperaturen der RDE- Messungen

bestimmt. Dadurch ergaben sich mittlere Temperaturen von ca. 19°C für die Euro 5 Kfz vor/nach SU und ca. 10°C für die Euro 6 Kfz vor/nach SU. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde geprüft, ob Fahrzeuge mit besonders großer Anzahl an Software- Updates die Ergebnisse besonders stark beeinflussen. Dies war nicht der Fall.

Mit den NO_x-Temperaturkorrekturfunktionen wurden die Kennfelder für eine mögliche Integration in das HBEFA auf 20°C umgerechnet, die dort die Standardtemperatur ist. Dieselben Temperaturkorrekturfunktionen müssen dann auch im nächsten Update des HBEFA für diese Fahrzeuge hinterlegt werden, so dass auch bei unsicheren Temperaturkorrekturfunktionen das Ergebnis im Jahresdurchschnitt wenig Unsicherheiten enthalten sollte.

Bis zu einer möglichen Implementation der neuen Kfz- Schichten mit SU, können Emissionsfaktoren in Post-Processing angepasst werden. Dafür wurden alle HBEFA-Verkehrssituationen für vor/nach SU und Euro 5/6 simuliert und nach Anteilen der Verkehrssituationen gewichtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 beschrieben und in Tabelle 1 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die Minderungen bei niederen Temperaturen deutlich ausgeprägter sind. Eine wesentliche Kontrollgröße für die Reduktion der Emissionsminderungsmaßnahmen war demnach anscheinend die Umgebungstemperatur, wo nach SU außerhalb des NEDC- Testbereich von 20°C bis 30°C entsprechend der Datengrundlage die Wirksamkeit der Abgasnachbehandlungssysteme deutlich verbessert wurde.

Tabelle 1: Mittlere NO_x-Änderung der von Softwareupdate betroffenen Pkw für den gewichteten Deutschland-Fahrsituationsmix (alle Straßen, IO, AO, AB) nach Umgebungstemperaturen

Straße	Ergebnisse	Abgasnorm	5°C	10°C	12°C	20°C
Alle Straßen	Differenz in g/km	Euro 5 nach-vor SU	-0.882	-0.662	-0.573	-0.309
		Euro 6 nach-vor SU	-0.628	-0.307	-0.251	-0.014
	Reduktion	Euro 5 nach/vor SU -1	-56%	-48%	-45%	-30%
		Euro 6 nach/vor SU -1	-74%	-58%	-53%	-6%
IO	Differenz in g/km	Euro 5 nach-vor SU	-0.952	-0.725	-0.634	-0.362
		Euro 6 nach-vor SU	-0.738	-0.373	-0.309	-0.039
	Reduktion	Euro 5 nach/vor SU -1	-58%	-51%	-48%	-35%
		Euro 6 nach/vor SU -1	-76%	-62%	-58%	-15%
AO	Differenz in g/km	Euro 5 nach-vor SU	-0.653	-0.487	-0.420	-0.221
		Euro 6 nach-vor SU	-0.585	-0.294	-0.242	-0.026
	Reduktion	Euro 5 nach/vor SU -1	-55%	-47%	-44%	-29%
		Euro 6 nach/vor SU -1	-76%	-61%	-56%	-12%
AB	Differenz in g/km	Euro 5 nach-vor SU	-1.184	-0.882	-0.762	-0.400
		Euro 6 nach-vor SU	-0.593	-0.267	-0.210	0.030
	Reduktion	Euro 5 nach/vor SU -1	-55%	-47%	-44%	-29%
		Euro 6 nach/vor SU -1	-69%	-50%	-44%	13%

Summary

From the available official measurements on cars Euro 5 and 6 with mandatory and voluntary software updates (SU) of the Federal Motor Transport Authority (KBA), the Federal Environment Agency (UBA) and the Environmental Action Germany (DUH), emission factors for the Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) were calculated. The data include measurements with portable measurement technology (RDE measurements) at different temperatures as well as measurements on the chassis dynamometer in the WLTC driving cycle at temperatures 5°C, 10°C and 15°C. The data is based on 29 vehicles that were measured for or by the KBA, one vehicle that was measured for UBA at the TU Dresden and three vehicles measured by the DUH. The measurements of the TU Dresden included additional tests and were used in a previous feasibility study to develop the best method for generating the emission factors from the KBA data.

From these measurements, the emission maps for the Euro 5 and Euro 6 vehicle layers before / after SU were generated from the RDE measurements. The temperature correction functions and the additional cold start emissions were obtained from the measurement data in the WLTC, since only this test was carried out for different temperatures.

To create the temperature correction functions, WLTC data were available for a total of 8 Euro 5 vehicles and 6 Euro 6 vehicles. From these measurements, the emission values of phases 2 to 3 of the WLTC were used for the three measured temperature ranges. The measurement data of the individual vehicles were then weighted according to the fleet shares of the individual vehicle models in the SUs to an average measured value per temperature (5°C, 10°C and 15°C) and emission standard. The temperature correction functions were derived from these average values per temperature.

For Euro 5 before SU, there were no major differences to the temperature correction function currently used in the HBEFA for Euro 5 diesel cars therefore the same correction function was used here. The Euro 5 vehicles after SU showed no temperature dependence up to 5°C. Because there are no measurement data available below 5° C an estimate of the course below 5°C was made due to the reduced usability of EGR. In the case of the Euro 6 before SU, a very strong temperature dependency was determined and a separate correction curve was created from the measurement results, while the Euro 6 after SU showed no temperature dependence. The same correction curve was therefore assumed for them as for the Euro 6d-Temp of HBEFA 4.1.

The cold start emissions are also determined using the WLTC measurements. For this purpose, the difference between the absolute emissions in grams from phases 1 (cold start area) and phase 2-3 (warm start area) in the different temperature ranges (5°C, 10°C and 15°C) was determined in relation to the CO₂ mass emissions. Overall, the cold start emissions compared to the warm emissions are at a low level of a maximum of + 33mg / start to -64mg / start.

The results give a coherent picture with the on-board tests.

With the RDE data from KBA and TU-Dresden, emission engine maps were generated for each measured vehicle using the HBEFA method (9 data sets for Euro 5 and 23 data sets for Euro 6). In order to use all RDE tests, including those that have been run below 15 ° C and are usually not used directly in the HBEFA basic method, the HBEFA approach has been slightly modified here. With this new approach, all measurement data were weighted according to fleet shares of the SUs to an average map (separated before / after SU as well as Euro 5 and Euro 6). The weighted temperatures of the RDE measurements were determined analogously. This resulted in mean temperatures of approx. 19 °C for Euro 5 vehicles before / after SU and approx. 10 ° C for Euro 6 vehicles before / after SU. As part of this work, it was checked whether vehicles with a

particularly large number of software updates had a particularly strong influence on the results. This was not the case.

With the NO_x temperature correction functions, the maps were converted to 20°C, which is the standard temperature there, for possible integration into the HBEFA. The same temperature correction functions must then also be stored in the next update of the HBEFA for these vehicles, so that even with uncertain temperature correction functions, the annual average result should contain few uncertainties.

Until a possible implementation of the new vehicle layers with SU, emission factors can be adjusted in post-processing. For this purpose, all HBEFA traffic situations for before / after SU and Euro 5/6 were simulated and weighted according to the proportion of traffic situations. The results are described in Table 7 and summarized in Table 1. It can be seen that the reductions are much more pronounced at lower temperatures. An essential control variable for the reduction of the emission reduction measures was apparently the ambient temperature, where according to SU outside the NEDC test range of 20°C to 30°C, according to the data basis, the effectiveness of the exhaust gas aftertreatment system was significantly improved.

Table 1: Average NO_x reductions in the cars affected by the software update for the weighted Germany driving situation mix (all streets, urban, rural, motorway) according to ambient temperatures

Street	Results	Emission standard	5°C	10°C	12°C	20°C
All Streets	Difference in g/km	Euro 5 past-pre SU	-0.882	-0.662	-0.573	-0.309
		Euro 6 past-pre SU	-0.628	-0.307	-0.251	-0.014
	Reduction	Euro 5 past/pre SU -1	-56%	-48%	-45%	-30%
		Euro 6 past/pre SU -1	-74%	-58%	-53%	-6%
Urban	Difference in g/km	Euro 5 past-pre SU	-0.952	-0.725	-0.634	-0.362
		Euro 6 past-pre SU	-0.738	-0.373	-0.309	-0.039
	Reduction	Euro 5 past/pre SU -1	-58%	-51%	-48%	-35%
		Euro 6 past/pre SU -1	-76%	-62%	-58%	-15%
Rural	Difference in g/km	Euro 5 past-pre SU	-0.653	-0.487	-0.420	-0.221
		Euro 6 past-pre SU	-0.585	-0.294	-0.242	-0.026
	Reduction	Euro 5 past/pre SU -1	-55%	-47%	-44%	-29%
		Euro 6 past/pre SU -1	-76%	-61%	-56%	-12%
Motorway	Difference in g/km	Euro 5 past-pre SU	-1.184	-0.882	-0.762	-0.400
		Euro 6 past-pre SU	-0.593	-0.267	-0.210	0.030
	Reduction	Euro 5 past/pre SU -1	-55%	-47%	-44%	-29%
		Euro 6 past/pre SU -1	-69%	-50%	-44%	13%

1 Aufgabenstellung

Ab dem Jahr 2017 erfolgten Softwareupdates (SU) an mehreren Diesel-Pkw-Modellen und leichten Diesel- Nutzfahrzeug-Modellen, die zum Ziel hatten, das Emissionsverhalten insbesondere bezüglich NO_x im realen Betrieb zu verbessern (KBA, Januar 2020 und KBA, April 2020). Diese Updates erweiterten üblicherweise den Bereich, in dem Abgasrückführung (AGR) und ggf. auch NO_x-Speicherkatalysatoren (NSK) bzw. Katalysatoren zur selektiven Katalytischen Reduktion (SCR) hohe NO_x Minderungen bewirken. Die Bereiche können dabei Temperatur, Fahrzeit, Motorbetriebsbereiche etc. betreffen. Die hier betrachteten Softwareupdates wurden sowohl freiwillig als auch verpflichtend durchgeführt, letzteres im Fall von illegalen Abschaltvorrichtungen.

Diese Updates haben Auswirkung auf das reale Emissionsverhalten des betroffenen Teils der Kfz-Flotte und sollen daher, wenn möglich, auch im Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) berücksichtigt werden.

Um die Änderungen des Emissionsverhaltens, abgebildet über Emissionsfaktoren, belastbar zu bestimmen wurden die verfügbaren Messdaten an Kfz jeweils vor und nach den Softwareupdates herangezogen. Die Ergebnisse zu den Softwareupdates an Fahrzeugen mit dem Motor EA 189 des Volkswagen-Konzernes sind bereits im HBEFA 4.1¹ integriert. In diesem Bericht werden weitere betroffene Kfz Diesel Pkw Modelle mit den Abgasnormen Euro 5 und Euro 6 auf Änderungen am Emissionsverhalten hin untersucht. Die Integration in eine zukünftige Version des HBEFA ist aber nicht Bestandteil dieser Arbeiten.

Als Datengrundlage sollten amtliche Daten verwendet werden. Hier standen vorwiegend Messungen des Kraftfahrtbundesamts (KBA) zur Verfügung. Diese umfassen 29 Pkw mit nutzbaren RDE-Messungen, 14 davon auch mit WLTC-Tests bei verschiedenen Umgebungstemperaturen. Zusätzlich waren drei Pkw von der Deutsche Umwelthilfe (DUH) sowie Messdaten der TU Dresden für einen Pkw verfügbar, letztere im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) erhoben wurden. Da sich die Messdaten in einigen Punkten von denen unterscheiden, die bereits für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für Pkw mit SU (Fahrzeuge mit dem Motor EA 189) vorlagen, mussten neue Methoden entwickelt werden, um diese vorgegebenen Datensätze bestmöglich für die Emissionsfaktoren im HBEFA nutzen zu können. Die Methodenentwicklung erfolgte im vorher abgeschlossenen Projekt „Weiterentwicklung HBEFA – Bedarfsanalyse für HBEFA 4.2“ (Notter, 2020).

¹ Aktuelle Version des HBEFA ist diese Version 4.1.

2 Methodik

Im Projekt „Weiterentwicklung HBEFA – Bedarfsanalyse für HBEFA 4.2“ wurde die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise erarbeitet und in diesem Projekt umgesetzt.

Nach der inzwischen bewährten Methode des HBEFA wurden zunächst alle Daten zu **RDE-Messungen** von allen Kfz, für die Messungen vor und nach Softwareupdate verfügbar waren, genutzt, um die betriebswarmen Emissionsfaktoren zu erstellen. Dabei werden aus den zeitaufgelösten Emissionsmessungen Motorkennfelder erzeugt, die die Emissionen als Funktion von Motorleistung und Drehzahl abbilden. Mit diesem Schritt werden eventuelle Einflüsse unterschiedlicher Fahrweisen und Verkehrsbedingungen vor und nach Softwareupdate eliminiert.

Aus allen Kennfeldern der Kfz einer Schicht wird dann ein Durchschnittskennfeld gebildet. Die Anzahl der betroffenen Fahrzeuge wird entsprechend berücksichtigt. Diese Kennfelder wurden für folgende Kfz-Schichten erzeugt:

- ▶ Euro 5 Diesel-Pkw vor Softwareupdate
- ▶ Euro 5 Diesel-Pkw nach Softwareupdate
- ▶ Euro 6a/b² Diesel-Pkw vor Softwareupdate
- ▶ Euro 6a/b Diesel-Pkw nach Softwareupdate

Es erfolgt keine Unterscheidung zwischen Pflicht- und freiwilligen Rückrufaktionen.

Je nach Testdatum wurden diese Kennfelder allerdings bei unterschiedlichen mittleren Umgebungstemperaturen gemessen, da RDE-Messungen auf der Straße erfolgen und nicht bei einer definierten Temperatur im Labor.

Abweichend zur HBEFA- Methode zur Erstellung der Temperaturabhängigkeiten, wo *remote sensing* Daten zur Verfügung standen, wurden hier **WLTC-Messungen** genutzt. Aus den verfügbaren WLTC-Messungen, die jeweils bei 5°C, 10°C und 15°C durchgeführt wurden, wurde anhand der Ergebnisse der betriebswarmen Phasen 2 und 3 des WLTC die Temperaturabhängigkeit der Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x-Emissionen) für jede o.a. Kfz-Schicht bestimmt.

Mit diesen Temperaturkorrekturfunktionen wurden alle Kennfelder auf eine Temperatur von 20°C extrapoliert. Die Änderung der Emissionen bei anderen Temperaturen kann vereinfacht über einen festen Faktor bestimmt werden, der eine Funktion der Temperatur ist. Dies ist die sogenannte Temperaturkorrekturfunktion. Die Temperatur von 20°C ist die Basistemperatur des HBEFA. Mit dem Emissionsmodell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) werden dann die Emissionsfaktoren für alle Verkehrssituationen für die durchschnittlichen Fahrzeugdaten der Schicht für 20°C simuliert. Die Anpassung der Emissionsfaktoren an andere Temperaturen erfolgt dann nach Bedarf im HBEFA mit den o.a. Temperaturkorrekturfunktionen.

Die Kaltstartzusatzemissionen wurden aus den Messdaten der ersten Phase des WLTC für 5°C, 10°C und 15°C berechnet.

Üblicherweise werden im HBEFA keine Typprüfzyklen als Grundlagen für Emissionsfaktoren verwendet, da bei diesen teilweise unterschiedliche Trends beobachtet werden können und andere Emissionsniveaus als im mittleren realen Betrieb auftreten können. Für die Bestimmung

² Fahrzeuge dieser Abgasnormen sind im HBEFA 4.1 als eine Gruppe (sogenannte Schicht) zusammengefasst.

der Kaltstartzusatzemissionen und der Temperaturkorrekturfunktionen waren allerdings keine anderen Messdaten verfügbar, sodass diese dennoch behelfsweise als Grundlage genutzt wurden. Wegen der geringen Höhe der zusätzlichen NO_x-Kaltstartemissionen gegenüber den betriebswarmen Emissionen bei den betroffenen Diesel-Pkw, ist ein eventueller Typprüfzyklus-Effekt hier aber wenig relevant. Der Effekt der Softwareupdates auf die betriebswarmen Emissionen im gemessenen Temperaturbereich ist für die gesamten NO_x-Emissionen wesentlich relevanter und durch die RDE Tests als Basis gut abgesichert.

3 Betriebswarme Emissionen

3.1 Emissionskennfelder Euro 5/6 jeweils vor/nach SU

Wie zuvor beschrieben, werden getrennt für die Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge jeweils für den Zustand vor und nach Softwareupdate Emissionskennfelder erstellt. Die Emissionskennfelder rastern alle gemessenen Emissionen in Leistung/Drehzahlkennfelder. Dabei wird die Standard-CO₂-Interpolationsmethode von HBEFA 4.1 verwendet (Matzer, 2019).

Verwendet werden dafür alle RDE-Messdaten von Fahrzeugen, für die vor und nach dem Softwareupdate eine RDE-Messung vorliegt, solange die Temperaturdifferenz zwischen den mittleren Temperaturen der Messungen vor und nach SU unter 10 Kelvin liegt.

Von der vorhandenen Datengrundlage bestehend aus Modaldatensätzen, sind 8 Datensätze für Euro 5 und 21 Datensätze für Euro 6 des KBA vorhanden, die genutzt werden. Dazu werden Datensätze der DUH für drei Pkw und der von TU Dresden, im Auftrag des UBA, gemessene Pkw berücksichtigt. Alle Datensätze wurden manuell auf korrekte zeitliche Zuordnung der Messdaten³ geprüft und bei Bedarf korrigiert. Es waren keine Testabschnitte mit DPF Regeneration in den Datensätzen. Zusätzlich wurde auch die mittlere Umgebungstemperatur der zugrundeliegenden RDE Messung(en) aufgezeichnet. Eine Liste der für dieses Vorgehen genutzten Fahrzeuge ist in Anhang 1 enthalten.

Aus den einzelnen Messungen wurden Emissionskennfelder für jede Softwareupdateversion erstellt:

- Euro 5 Diesel-Pkw vor Softwareupdate
- Euro 5 Diesel-Pkw nach Softwareupdate
- Euro 6ab Diesel-Pkw vor Softwareupdate
- Euro 6ab Diesel-Pkw nach Softwareupdate

Die Gewichtung der einzelnen Kennfelder erfolgte nach Flottenanteilen der einzelnen Marken und Typen an der gesamten Flotte der von Softwareupdates betroffenen Pkw. Diese Anteile wurden vom Auftraggeber bereitgestellt und basieren auf Informationen des KBA (siehe Anhang). Zusammen mit den Emissionskennfeldern wurden auch die Temperaturen gewichtet, so dass für die Durchschnittskennfelder jeweils die zugehörige Temperatur bestimmt wurde. Dadurch ergaben sich die vier Emissionskennfelder für die in Tabelle 2 angegebenen Temperaturen.

Tabelle 2: Mittlere Temperaturen der gewichteten Emissionskennfelder

Abgasnorm	Update	Temperatur in °C
Euro 5	Pre	21,0
	Post	20,6
Euro 6	Pre	9,3
	Post	11,1

³ Die gemessenen Emissionen müssen zeitlich der gemessenen Motordrehzahl richtig zugeordnet werden, um ein Motorkennfeld erstellen zu können.

Die mittleren Temperaturen zeigen, dass die Messungen der Euro 5-Kfz eher bei sommerlichen Temperaturen durchgeführt wurden (ca. 21°C im Mittel), während die Euro 6 Messungen eher bei kalten Temperaturen durchgeführt wurden (ca. 10°C im Mittel).

Die Kennfelder wurden danach auf ein einheitliches Temperatur Niveau von 20 °C angepasst. Dafür wurde die, nachfolgend in Kapitel 3.2 näher beschriebene, Temperaturabhängigkeit entwickelt und verwendet. Zusätzlich erfolgte auch eine Anpassung der Verbrauchsemissionen der Kennfelder nach Softwareupdate, da die durchgeführten WLTC-Messungen einen leicht höheren Verbrauch aufwiesen. Die Verbrauchserhöhung beträgt für Euro 5 rund 1% und für Euro 6 rund 0,5%.

3.2 Temperaturabhängigkeit der NO_x-Emissionen

Die Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des Emissionsverhaltens bei betriebswarmem Motor und die Ermittlung der Funktionen zur Temperaturkorrektur auf Basis von WLTC-Daten folgen der in „Weiterentwicklung HBEFA – Bedarfsanalyse für HBEFA 4.2“ vorgeschlagenen Methode, welche in Kapitel 2 auch kurz beschrieben wurde.

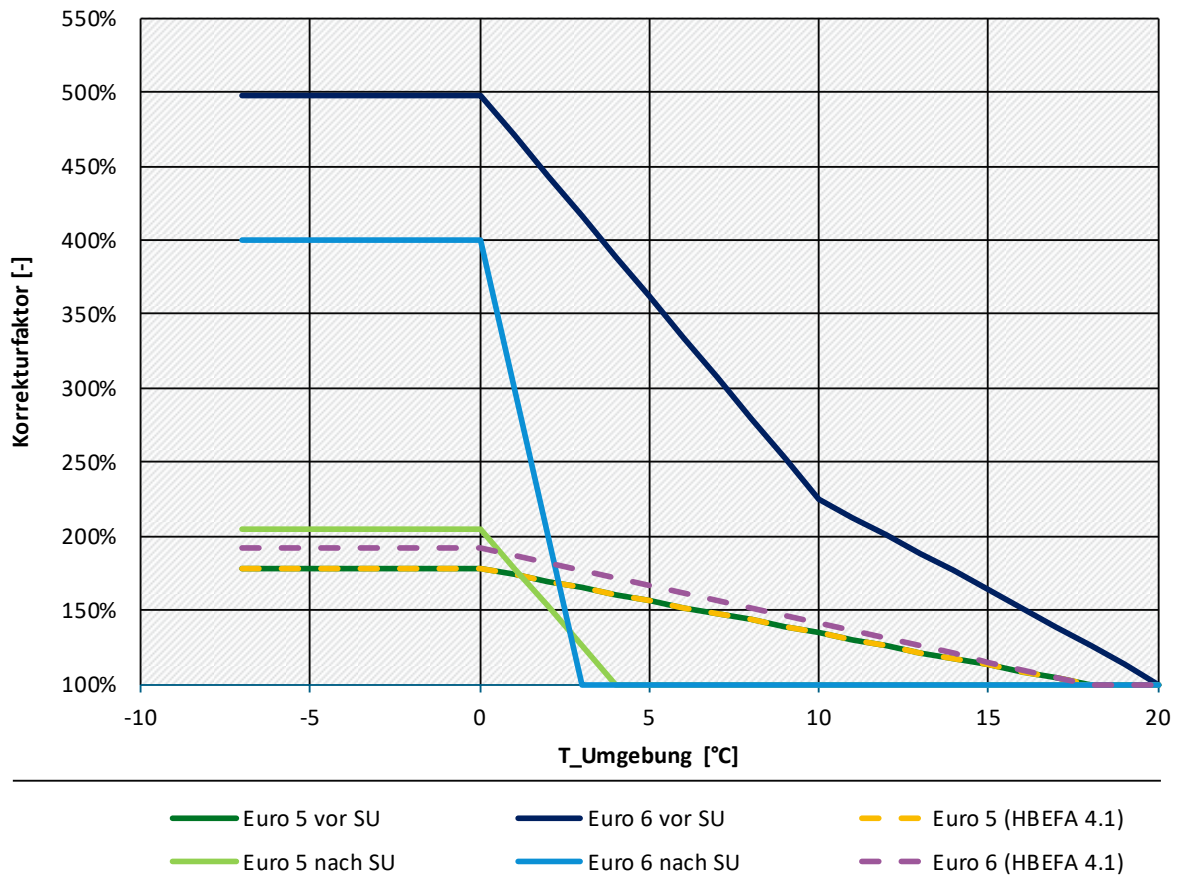
In den vom KBA übersandten Datenpaketen sind 8 Datensätze für Euro 5 und 6 Datensätze für Euro 6 vorhanden, in denen Messungen im WLTC bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt wurden. Diese wurden für die Analyse genutzt (siehe Anhang). Auch diese Daten wurden manuell auf korrekte zeitliche Zuordnung und DPF Regeneration geprüft und bei Bedarf korrigiert. In den Daten wurde keine DPF Regeneration ermittelt.

Zur Erstellung der Temperaturabhängigkeitskurven wurden jeweils Messdaten der Phasen 2 und 3 des WLTC bei den unterschiedlichen Temperaturen (5°C, 10°C, 15°C) als Stützstellen zusammengestellt. Diese Stützstellen wurden anschließend genutzt, um das Emissionsverhalten bei 20°C zu extrapolieren.

Die Funktionen zur Temperaturkorrektur wurden wie die Emissionskennfelder, mit analoger Gewichtung der einzelnen Kfz, bestimmt und ergaben sich wie folgend:

Abbildung 1: NO_x Temperaturfunktionen

Diesel Pkw Euro 5 und Euro 6 vor und nach Softwareupdate



ohne Pkw mit Motor EA-189

Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

- Euro 5 vor Softwareupdate: Die WLTC-Messungen zeigten einen geringen Unterschied zu der bereits im HBEFA 4.1 entwickelten Euro 5 Korrekturkurve für Diesel-Pkw. Insgesamt verläuft die Kurve etwas flacher als die HBEFA 4.1 Euro 5 Korrekturkurve und weist eine Abweichung von -12% bei einer Temperatur von 5°C, -10% bei 10°C und 0% bei 15°C von dieser auf. Aufgrund des sehr ähnlichen Verlaufs wurde die gleiche Kurve wie im HBEFA 4.1 zugrunde gelegt.
- Euro 5 nach Softwareupdate: Es zeigt sich nach den Softwareupdates keine Temperaturabhängigkeit in den WLTC-Emissionen. Deswegen wurde zwischen 20°C und 4°C keine Temperaturabhängigkeit der Emissionen angenommen. Unter 4°C ist zu erwarten, dass die AGR-Raten zurückgenommen werden müssen, um Kondensation im AGR-Kühler und damit einen Defekt zu vermeiden. Daher wurde zwischen 4°C und 0°C ein linearer Anstieg der Emissionen um das absolute durchschnittliche Niveau der Euro 5 Diesel Pkw angenommen, der unter 0°C dann konstant auf diesem Niveau bleibt. Die Emissionen steigen daher im Bereich auf Basis einer konservativen Annahme zwischen 0°C und 4°C um 105%. Entsprechende WLTC-Testdaten liegen für diesen Bereich leider nicht vor und auch nur ausgewählte RDE-Messungen.
- Euro 6 vor Softwareupdate: Bei den WLTC-Messungen vor Softwareupdate ergibt sich eine hohe Temperaturabhängigkeit der Emissionen. Bei einer Temperatur von 5°C ergeben sich Mehremissionen von +262% gegenüber 20°C, welche bis 15°C linear auf +65% abfallen. Die

Temperaturkorrekturfunktion für alle Euro 6 Pkw im HBEFA 4.1 zeigt bei 0°C +92% der NO_x-Emissionen von 20°C und fällt linear auf das Niveau von 20°C ab (dort 100%). Zur Erstellung des Gesamttemperaturverlaufs der Euro 6-Pkw vor dem Software Update wurde ein lineares Verhalten unter 5°C bis 0°C und über 15°C bis 20°C angenommen⁴. Somit ergibt sich bei 0°C ein Wert von +398% und bei 20°C von 100%.

- d) Euro 6 nach Softwareupdate: Die Messungen zeigen im Bereich von 15°C bis 5°C keine Temperaturabhängigkeit. Im HBEFA 4.1 wurde allerdings für die durchschnittlichen Euro 6 und auch die anderen Euro Schichten (Euro 6d-TEMP und d) unter 3°C aus Remote Sensing Testdaten eine Temperaturabhängigkeit ermittelt (Matzer, 2019). Da für die Euro 6ab-Fahrzeuge nach Softwareupdate kein besseres Temperaturverhalten als für die durchschnittlichen Euro 6- Pkw plausibel erscheint, wurde daher im Bereich von unter 3°C bis 0°C konservativ ein Anstieg von +301% hinterlegt⁵.

Tabelle 3: Temperaturkorrekturkurven der neuen Schichten im Vergleich zu HBEFA 4.1 (100%=keine Korrektur) in Bezug auf den Basisemissionsfaktor bei 20°C

T in °C	Euro 5 (HBEFA 4.1)	Euro 6 (HBEFA 4.1)	Euro 5 vor SU	Euro 5 nach SU	Euro 6 vor SU	Euro 6 nach SU
-7	178%	192%	178%	205%	498%	401%
-6	178%	192%	178%	205%	498%	401%
-5	178%	192%	178%	205%	498%	401%
-4	178%	192%	178%	205%	498%	401%
-3	178%	192%	178%	205%	498%	401%
-2	178%	192%	178%	205%	498%	401%
-1	178%	192%	178%	205%	498%	401%
0	178%	192%	178%	205%	498%	401%
1	174%	187%	174%	179%	471%	300%
2	169%	182%	169%	152%	444%	199%
3	165%	177%	165%	126%	416%	100%
4	161%	172%	161%	100%	389%	100%
5	156%	167%	156%	100%	362%	100%
6	152%	162%	152%	100%	334%	100%
7	148%	156%	148%	100%	307%	100%
8	143%	151%	143%	100%	280%	100%
9	139%	146%	139%	100%	252%	100%
10	135%	141%	135%	100%	225%	100%
11	130%	136%	130%	100%	213%	100%
12	126%	131%	126%	100%	201%	100%
13	122%	126%	122%	100%	189%	100%
14	117%	121%	117%	100%	177%	100%
15	113%	115%	113%	100%	165%	100%
16	109%	110%	109%	100%	152%	100%

⁴ Im HBEFA wurde auf Grundlage von remote sensing Daten im Bereich von 0-18°C ein lineares Verhalten ermittelt. Somit wurde hier ebenfalls dieses Verhalten angenommen.

⁵ Da nur ein kleinerer Teil der Fahrleistung unter 4°C erbracht wird ist dieser Effekt auf die durchschnittliche Minderung über alle Temperaturen nur von nachrangiger Bedeutung.

T in °C	Euro 5 (HBEFA 4.1)	Euro 6 (HBEFA 4.1)	Euro 5 vor SU	Euro 5 nach SU	Euro 6 vor SU	Euro 6 nach SU
17	104%	105%	104%	100%	139%	100%
18	100%	100%	100%	100%	126%	100%
19	100%	100%	100%	100%	113%	100%
20	100%	100%	100%	100%	100%	100%
21	100%	100%	100%	100%	100%	100%
22	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Zur Überprüfung der erstellten Kennfelder aus den RDE-Daten aus Abschnitt 3.1 und der spezifischen sowie der Standard-Temperaturkorrekturfunktionen wurde der WLTC in den Phasen 2-3 (Warmstartphase) mittels PHEM simuliert. Anschließend wurden die absoluten NO_x-Emissionen der Simulation bei 20°C mit den Temperaturkorrekturfunktionen auf die Temperaturen 0°C, 10°C und 15°C umgerechnet und mit dem gewichteten Mittelwert der Messungen vor und nach Softwareupdate verglichen.

Tabelle 4: Vergleich von Simulation WLTP Phase 2-3 mit Messung

SU	Temp. in °C	Messung gew. Mittel Euro 5 NO _x in g/km	Messung gew. Mittel Euro 6 NO _x in g/km	Korrigierte Simulation Euro 5 NO _x in g/km	Korrigierte Simulation Euro 6 NO _x in g/km
pre	5°C	0,467	0,181	1,243	0,793
	10°C	0,396	0,113	1,071	0,493
	15°C	0,354	0,082	0,898	0,361
	20°C	-	-	0,795	0,219
post	5°C	0,210	0,060	0,512	0,177
	10°C	0,261	0,051	0,512	0,177
	15°C	0,246	0,052	0,512	0,177
	20°C	-	-	0,512	0,177

Der Vergleich zeigt, dass die gewichteten Mittelwerte der Messungen der Euro 5 Kfz vor und nach Softwareupdate um den Faktor 2 niedriger liegen als die Simulation. Bei den Euro 6 Kfz liegt die Messung um den Faktor 4 niedriger.

Die Änderungen der Temperaturabhängigkeiten der NO_x-Emissionen nach gegenüber vor Softwareupdate sollten von der WLTC- Auswertung hinreichend repräsentativ abgebildet sein.

4 Kaltstartemissionen

Entsprechend der in „Weiterentwicklung HBEFA – Bedarfsanalyse für HBEFA 4.2“ vorgeschlagenen und in Kapitel 2 kurz beschriebenen Methode wurden die Kaltstartzusatzemissionen aus den WLTC-Tests (Phase 1) bei unterschiedlichen Temperaturen abgeleitet. Es werden dieselben Daten wie in Abschnitt 3.2 verwendet bzw. diejenigen Kfz herangezogen, für die vor und nach Softwareupdate jeweils WLTC-Tests mit vergleichbaren Kaltstartbedingungen vorhanden sind.

Die Kaltstartzusatzemissionen stellen die Differenz der NO_x -Emissionen dar, die mit Kaltstart gegenüber dem gleichen Zyklus bei Warmstart auftritt. Da die betriebswarmen NO_x -Emissionsniveaus in Phase 1 nicht gemessen wurden (nur Kaltstarttests und keine dezidierten Tests mit betriebswarmem Motor), diese wie zuvor beschrieben auch nicht mit den RDE-Emissionskennfeldern passend nachgebildet werden können, wurde eine alternative Methode genutzt.

Es wurden jeweils die Emissionen aus Phase 1 sowie 2 + 3 in $\text{g}_{\text{NO}_x}/\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}$ für den gewichteten Flottendurchschnitt je KFZ-Schicht berechnet. Damit sollten die unterschiedlichen Fahrverläufe der Phasen weitgehend eliminiert sein⁶. Die Differenz der $\text{g}_{\text{NO}_x}/\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}$ von Phase 1 und der Phasen 2 bis 3 wurde dann mit dem Kraftstoffverbrauch aus Phase 1 multipliziert, um die Zusatzemissionen in g/Start zu berechnen.

Die Kaltstartzusatzemissionen wurden wie die Emissionskennfelder für folgende Schichten, mit analoger Gewichtung einzelner Kfz, bestimmt:

- Euro 5 Diesel-Pkw vor Softwareupdate
- Euro 5 Diesel-Pkw nach Softwareupdate
- Euro 6 Diesel-Pkw vor Softwareupdate
- Euro 6 Diesel-Pkw nach Softwareupdate

Tabelle 5: Kaltstartzusatzemissionen

SU	Temp. in °C	Euro 5 NOx in g/Start	Euro 6 NOx in g/Start
pre	5°C	-0,042	-0,058
	10°C	-0,012	-0,003
	15°C	-0,064	-0,007
post	5°C	0,033	-0,006
	10°C	-0,031	0,005
	15°C	-0,038	-0,003

Die Ergebnisse zeigen über alle Temperaturbereiche sehr geringe negative Kaltstartzusatzemissionen. Da sie im Vergleich zu den warmen NO_x -Emissionen gering sind, werden sie bei allen weiteren Analysen und Simulationen vernachlässigt.

⁶ Die Einheit $\text{g}/\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}$ entspricht etwa der Einheit g/kWh . Wenn der Kaltstarteffekt im Vergleich zur Variabilität im betriebswarmen Zustand signifikant ist, können die $\text{g}/\text{kg}_{\text{Kraftstoff}}$ in Phase 2 und 3 zur Annäherung des betriebswarmen Niveaus genutzt werden. Wenn der Kaltstarteffekt gering ist, ist die Genauigkeit eingeschränkt, dann ist der Fehler bei den Kaltstartzusatzemissionen aber für die gesamte Emissionsbelastung nicht relevant.

5 Vorbereitung zur Integration der ermittelten Emissionsfaktoren in HBEFA

Mit den gewichteten Durchschnitts-Kennfeldern und den Temperaturkorrekturfunktionen aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 wurden die betriebswarmen Emissionen für die betroffenen Schichten für alle HBEFA 4.1 Verkehrssituationen mit dem HBEFA zu Grunde liegenden Emissionsmodell PHEM für folgende Kfz-Schichten berechnet:

- Euro 5 vor Softwareupdate
- Euro 5 nach Softwareupdate
- Euro 6 vor Softwareupdate
- Euro 6 nach Softwareupdate

In der Simulation wurden jeweils die Fahrzeugdaten (Masse, Querschnittsfläche, etc.) der Durchschnitts-Pkw Euro 5 und 6ab verwendet. Als Datenformat für die Ergebnisse wurde das HBEFA 4.1 Format verwendet, das für den Datentransfer zwischen TU Graz und Infrac seit HBEFA 3.2 definiert ist. Tabelle 6 zeigt die gewichteten, mittleren Emissionsfaktoren der relevanten Pkw-Schichten.

Tabelle 6: HBEFA 4.1 gewichteter Deutschland-Fahrsituationsmix bei 20°C

Fahrzeug	Gewichtete CO ₂ in g/km	Gewichtete NO _x in g/km
Euro 5 (HBEFA 4.1)	174,7	0,812
Euro 5 vor SU	174,7	1,015
Euro 5 nach SU	176,5	0,706
Euro 5 (HBEFA 4.1 EA189 SW-update)	181,5	0,583
Euro 6ab (HBEFA 4.1)	174,4	0,461
Euro 6 vor SU	174,4	0,235
Euro 6 nach SU	175,2	0,221

Die Ergebnisse der HBEFA 4.1 Zyklen Simulation mit den erstellten Kennfeldern aus Kap. 3.1 ergeben für den Gesamtdeutschlandmix (siehe auch Tabelle 7):

a) Für Euro 5:

- Im Deutschlandmix zeigt die „Euro 5 vor SU“⁷ Schicht einen leicht höheren NO_x-Emissionsfaktor bei 20°C als die gesamte Euro 5 Schicht in HBEFA 4.1. Die bisherige HBEFA 4.1 Euro 5 Schicht basiert auf deutlich mehr gemessenen Fahrzeugen und beinhaltet nicht nur Fahrzeuge, die einem freiwilligen oder verpflichtenden Update unterzogen wurden. Die bisherige Euro 5 Schicht sollte im nächsten HBEFA- Update um die Kfz bereinigt werden, die in der neuen „Euro 5 vor SU“ Schicht enthalten sind, wenn die Software- Updates integriert werden. Der zukünftige Euro 5- Emissionsfaktor von Diesel-Pkw setzt sich dann aus den nach Flottenanteilen gewichteten Emissionen von Euro 5 Diesel-Pkw der VW-EA 189 vor bzw. nach SU, den anderen von Softwareupdates betroffenen Euro 5 Diesel Pkw vor bzw. nach SU sowie den nicht von Softwareupdates betroffenen Euro 5 Diesel Pkw. Die

⁷ Nur diejenigen Pkw Modelle in der Euro 5 Flotte, die danach einem Softwareupdate unterzogen wurden.

Flottenanteile könnten je nach Umsetzungsrate in dem betreffenden Jahr variieren. Die Emissionsfaktoren können dabei, wie bisher für EA 189, auch separat ausgewiesen werden.

- ▶ Durch die Softwareupdates erfolgen NO_x-Minderungen je nach Umgebungstemperatur von 56% bis 30% bzw. absolute Minderungen von 0,882 g/km bis 0,309 g/km. Bei niedrigeren Temperaturen ergeben sich die höheren Minderungen durch das Softwareupdate.
- ▶ Im Verbrauch ergibt sich nach Softwareupdate ein Mehrverbrauch von ca. 1% gegenüber vor Softwareupdate.
- ▶ Bis zur Einführung der neuen Schichten in ein HBEFA-Update können Anwender die Emissionsfaktoren korrigieren, indem sie die Reduktionsraten (g/km) aus Tabelle 7 für die gewünschte Temperatur linear interpolieren und das Ergebnis entsprechend des Anteils der Kfz mit SU an der Flotte gewichtet verwenden. Es kann zur Vereinfachung sinnvoll sein, nur mittlere Minderungen unter Berücksichtigung des jährlichen Temperaturverlaufes und der Fahrleistungen zu verwenden, um möglichen Ungenauigkeiten der Temperaturkorrektur Rechnung zu tragen.

b) Für Euro 6:

- ▶ Die „Euro 6ab vor SU“ Schicht zeigt bei 20°C deutlich niedrigere NO_x-Emissionen als die bisherige (nicht von SU betroffenen) HBEFA 4.1 Euro 6ab-Schicht. Die Messdaten des WLTC zeigen aber einen deutlich stärkeren Anstieg der NO_x-Emissionen in Richtung sinkender Umgebungstemperaturen als bei der bisherigen HBEFA 4.1 Euro 6ab-Schicht.⁸
- ▶ Durch das Softwareupdate erfolgen NO_x-Minderungen je nach Umgebungstemperatur von 74% bis 6% sowie Minderungen von 0,628 g/km bis 0,014 g/km. Wie o.a. ergeben sich deutlich höhere NO_x-Reduktionen durch das Softwareupdate bei niedrigeren Umgebungstemperaturen infolge der starken Temperaturabhängigkeit (NO_x Zunahme bei sinkenden Temperaturen) der Schicht der Euro 6 Fahrzeuge vor SU.
- ▶ Im Verbrauch ergibt sich ein Anstieg von rund 0,5% zwischen Fahrzeugen vor und nach Softwareupdate.
- ▶ Wie bei Euro 5 vor/nach SU können auch für die Euro 6 Schicht bis zur Einführung der neuen Schichten in ein HBEFA Update die Emissionsfaktoren korrigiert werden, indem die Reduktionsraten (g/km) aus Tabelle 7 für die gewünschte Temperatur linear interpoliert und das Ergebnis entsprechend des Anteils der Kfz mit SU gewichtet wird. Es kann auch hier sinnvoll sein, nur mittlere Minderungen unter Berücksichtigung des jährlichen Temperaturverlaufes und der Fahrleistungen zu verwenden, um möglichen Ungenauigkeiten der Temperaturkorrektur Rechnung zu tragen.

⁸ Abschalteinrichtungen dürften also eher temperaturabhängig als z. B. lastabhängig geregelt worden sein.

Tabelle 7: HBEFA 4.1 gewichteter Deutschland-Fahrsituationsmix nach Umgebungstemperaturen

Verkehrs-situationsmix	Fahrzeug / Differenz Emission	Temp. Faktor bei 5°C	NOx in g/km bei 5°C	Temp. Faktor bei 10°C	NOx in g/km bei 10°C	Temp. Faktor bei 12°C	NOx in g/km bei 12°C	Temp. Faktor bei 20°C	NOx in g/km bei 20°C
Mix alle	EU5 vor SU	1,56	1,588	1,35	1,368	1,26	1,280	1,00	1,015
	EU5 nach SU	1,00	0,706	1,00	0,706	1,00	0,706	1,00	0,706
	Differenz	-	-0,882	-	-0,662	-	-0,573	-	-0,309
	EU6 vor SU	3,62	0,849	2,25	0,528	2,01	0,471	1,00	0,235
	EU6 nach SU	1,00	0,221	1,00	0,221	1,00	0,221	1,00	0,221
	Differenz	-	-0,628	-	-0,307	-	-0,251	-	-0,014
Mix Innerorts	EU5 vor SU	1,56	1,637	1,35	1,410	1,26	1,319	1,00	1,046
	EU5 nach SU	1,00	0,685	1,00	0,685	1,00	0,685	1,00	0,685
	Differenz	-	-0,952	-	-0,725	-	-0,634	-	-0,362
	EU6 vor SU	3,62	0,966	2,25	0,601	2,01	0,536	1,00	0,267
	EU6 nach SU	1,00	0,228	1,00	0,228	1,00	0,228	1,00	0,228
	Differenz	-	-0,738	-	-0,373	-	-0,309	-	-0,039
Mix Außerorts	EU5 vor SU	1,56	1,196	1,35	1,030	1,26	0,963	1,00	0,764
	EU5 nach SU	1,00	0,543	1,00	0,543	1,00	0,543	1,00	0,543
	Differenz	-	-0,653	-	-0,487	-	-0,420	-	-0,221
	EU6 vor SU	3,62	0,773	2,25	0,481	2,01	0,429	1,00	0,214
	EU6 nach SU	1,00	0,187	1,00	0,187	1,00	0,187	1,00	0,187
	Differenz	-	-0,585	-	-0,294	-	-0,242	-	-0,026
Mix Autobahn	EU5 vor SU	1,56	2,172	1,35	1,870	1,26	1,750	1,00	1,388
	EU5 nach SU	1,00	0,988	1,00	0,988	1,00	0,988	1,00	0,988
	Differenz	-	-1,184	-	-0,882	-	-0,762	-	-0,400
	EU6 vor SU	3,62	0,861	2,25	0,536	2,01	0,478	1,00	0,238
	EU6 nach SU	1,00	0,269	1,00	0,269	1,00	0,269	1,00	0,269
	Differenz	-	-0,593	-	-0,267	-	-0,210	-	0,030

6 Diskussion der Ergebnisse

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurden neben den in Kapitel 5 durchgeführten HBEFA 4.1 Simulation zusätzlich zwei weitere Simulationen durchgeführt:

6.1 Simulation WLTC Phase 1-3

Simuliert wurde der WLTC in den Phasen 1 – 3 mit den Kennfeldern aus Abschnitt 3.1. Dadurch ergeben sich Simulationsergebnisse bei 20°C, die keine Kaltstartemissionen enthalten. Damit eine Vergleichbarkeit mit den Messergebnissen zustande kommt, wurden die in Kapitel 4 ermittelten Kaltstartemissionen auf die Simulation aufgeschlagen.

Die Anpassung auf unterschiedliche Temperaturen erfolgte vor der Kaltstartanpassung über die ermittelten Temperaturkorrektionsfunktionen.

Tabelle 8: Vergleich von Simulation WLTP Phase 1-3 mit Messung, jeweils für das gewichtete Flottenmittel betroffener Kfz

SU	Temp.	Messung gew. Mittel Euro 5 NOx in g/km	Messung gew. Mittel Euro 6 NOx in g/km	Simulation Euro 5 NOx in g/km	Simulation Euro 6 NOx in g/km
pre	5°C	0,492	0,174	1,286	0,753
	10°C	0,416	0,118	1,132	0,502
	15°C	0,359	0,084	0,895	0,362
	20°C	-	-	0,785	0,217
post	5°C	0,231	0,062	0,580	0,179
	10°C	0,268	0,055	0,516	0,190
	15°C	0,251	0,054	0,509	0,182
	20°C	-	-	0,509	0,182

Der Vergleich zeigt, dass die simulierten Emissionen bei Euro 5 um den Faktor 2 und bei Euro 6 um den Faktor 4 größer als die Messungen sind, die Differenzen zwischen vor und nach Softwareupdate aber in etwa im gleichen Verhältnis wie die RDE Simulationen stehen (siehe unten).

Unsicherheiten bei der Simulation treten hier auf durch:

- Generelle Unsicherheiten in der Simulation mit Motorkennfeldern (ca. 25% bei NO_x möglich).
- Unsicherheiten in der Definition der durchschnittlichen Fahrzeugdaten (Massen, Fahrwiderstände, Getriebedaten) der Fahrzeugschichten. Diese Informationen waren für diese Arbeit nicht verfügbar.

6.2 Simulation RDE-Zyklus

Simuliert wurde jeweils für die Kfz-Schichten vor/nach SU ein gemessener RDE- Zyklus, der in seiner mittleren Geschwindigkeit am besten zum gewichteten Gesamtmittel aller gemessenen RDE Fahrten pro Schicht passte.

Die Simulationen wurden jeweils direkt mit dem gemittelten Kennfeld durchgeführt, also ohne das Kennfeld zuvor auf 20°C anzupassen. Somit liegen die Simulationsergebnisse in Tabelle 9 jeweils für die gewichtete, mittlere gemessene Temperatur vor.

Tabelle 9: Vergleich von Simulation mittlere RDE-Zyklus mit Messung

Abgasnorm	Update / Differenz	Bereich in s	Temp in °C	Simulation FC in g/km (ohne Temp. kor)	Simulation NOx in g/km (ohne Temp. kor)
EURO 5	pre	600-Ende	19,7	50,31	0,790
	post	600-Ende	18,8	50,14	0,560
	Differenz (post zu pre)	600-Ende	-	-0,3%	-29,0%
EURO 6	pre	600-Ende	9,7	54,28	0,610
	post	600-Ende	11,1	54,84	0,231
	Differenz (post zu pre)	600-Ende	-	1,0%	-62,2%

Die Euro 5 Messungen wurden bei höheren Temperaturen durchgeführt (ca. 21°C im Mittel), als die Euro 6 Messungen (ca. 10°C im Mittel).

Die Reduktion durch das Softwareupdate für Euro 5 und Euro 6 liegen im selben Bereich wie die Simulationen für den Deutschlandmix im jeweiligen Temperaturbereich (siehe Tabelle 1).

Betrachtet man die die Differenzen der NO_x-Emissionen vor/nach SU, so liegen diese im RDE-Zyklus im selben Größenverhältnis wie die der HBEFA- Simulationen für die vergleichbaren Temperaturbereiche (20°C bzw. 10°C).

6.3 Abdeckung der betroffenen Fahrzeugcluster

Zur Darstellung der Belastbarkeit der Ergebnisse wurde eine Untersuchung der dafür genutzten Fahrzeuge in den jeweiligen Clustern von betroffenen Motorfamilien durchgeführt. Damit die jeweils neu erstellten Kennfelder das Emissionsverhalten gut abbilden, sollte möglichst der Großteil der betroffenen Cluster durch Messdaten abdeckt sein. Als Grundlage für die Untersuchung wurden die Daten vom KBA zu den freiwilligen und verpflichtenden Softwareupdates vom 6.11.2020 genutzt, welche auch für die Bestimmung der Emissionsfaktoren verwendet wurden.

Bei den Euro 5 Fahrzeugen wurden 9 gemessene Fahrzeuge genutzt, die in Summe⁹ 520.460 Softwareupgedateten von 674.082 Fahrzeugen repräsentieren (dies entspricht einem Abdeckungsbereich von 77%). Bei den Euro 6 sind 23 Fahrzeuge vermessen worden, die in Summe 664.519 upgedateten von 913.482 Fahrzeugen entsprechen (Abdeckung von 73%).

6.4 Simulation ausgewählter HBEFA-Zyklen

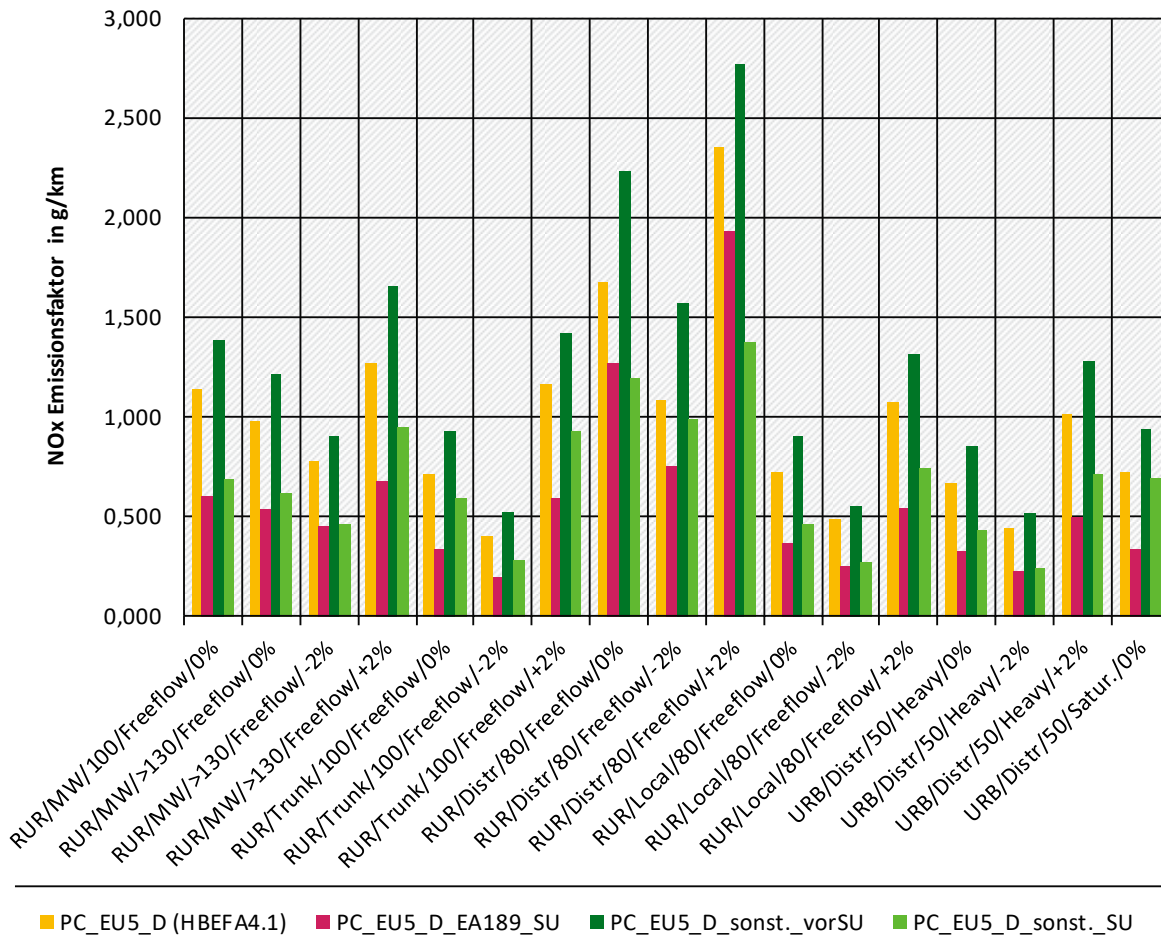
Zur Darstellung der Einflüsse der Softwareupdates auf die einzelnen HBEFA Fahrzyklen, wurden ausgewählte Fahrzyklen¹⁰ mit jeder neu erstellten (vor/nach SU Euro 5/6) und bereits vorhandenen HBEFA4.1 Fahrzeugschicht simuliert. Die Ergebnisse wurden auf 12°C Umgebungstemperatur umgerechnet.

⁹ Annahme hier ist, dass ein gemessenes Fahrzeug den Durchschnitt aller umzurüstenden Fahrzeuge der gleichen Marke und Typs entspricht

¹⁰ Alle Fahrzyklen die im Deutschlandmix ein Fahrleistungsgewicht >= 2% aufweisen

Abbildung 2: Ausgewählte HBEFA 4.1 Fahrzyklen bei 12°C, Euro 5

Euro 5 Diesel Pkw



PC...passenger car

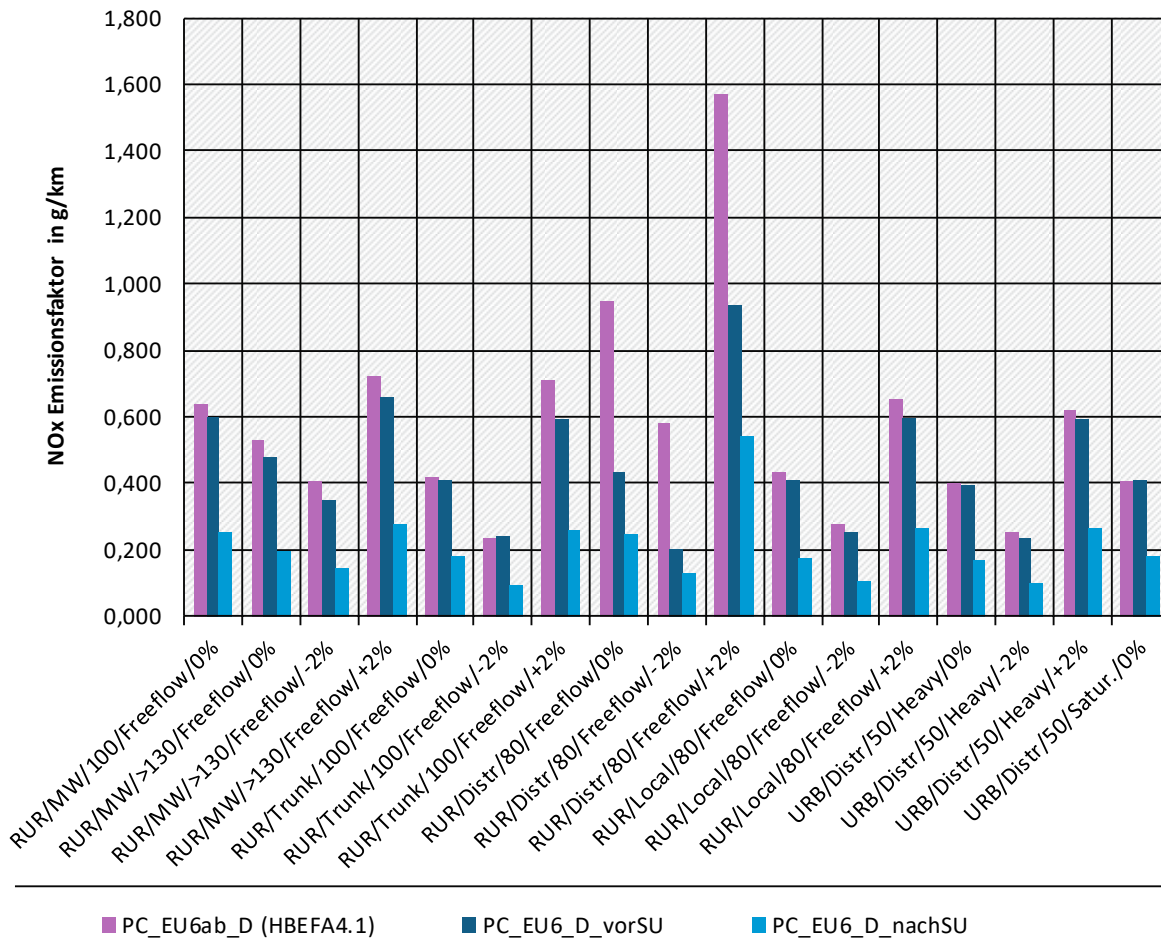
Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Die Ergebnisse der Simulation zeigen ein ähnliches Reduktionspotential vor / nach SU zwischen den im HBEFA4.1 verfügbaren Fahrzeugen und den neu erstellten. Die neu erstellten Schichten weisen vor dem Softwareupdate in den untersuchten Fahrsituationen meist einen höheren Emissionsfaktor auf als die HBEFA4.1 Schichten. Bei einer Unterteilung der Simulationen in Fahrzyklen mit positiver oder negativer Steigung oder in innerorts/außerorts/Autobahn Bereiche ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

Bei dem Vergleich muss allerdings berücksichtigt werden, dass die HBEFA 4.1 Fahrzeugschicht vor SU (PC_EU5_D (HBEFA4.1)) einen Mix aus Fahrzeugen mit/ohne SU enthält, während die neu erzeugte Schicht (PC_EU5_sonst._vorSU) nur noch Fahrzeuge enthält die einem SU unterliegen. Bei den Fahrzeugen nach SU sind in der HBEFA 4.1 Schicht nur Fahrzeuge mit dem verbauten Motor EA189 enthalten (PC_EU5_D_EA189_SU), während in der neu erstellten Schicht (PC_EU5_D_sonst._SU) unterschiedliche Marken und Typen enthalten sind.

Abbildung 3: Ausgewählte HBEFA 4.1 Fahrzyklen bei 12°C Euro 6

Euro 6 Diesel Pkw



PC...passenger car

Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Bei den Euro 6 Simulationen ergeben sich zwischen der HBEFA 4.1 Schicht (PC_EU6_D (HBEFA4.1)) und der neu erstellten (PC_EU6_D_vorSU) kaum Unterschiede. Lediglich der Fahrzyklus RUR/Distr./80/Freeflow ist dort eine Ausnahme in allen untersuchten Steigungen. Ein Vergleich der nach SU Ergebnisse ist hier nicht möglich da dies Fahrzeugschicht im HBEFA 4.1 derzeit nicht enthalten ist.

Auch bei dieser Untersuchung muss wie bei den Euro 5 Fahrzeugen berücksichtigt werden, dass die Emissionskennfelder, die die Schicht im HBEFA 4.1 bilden (PC_EU6ab_D (HBEFA4.1)) aus allen zur Verfügung stehenden Fahrzeugen erstellt wurden, während in der neuen Schicht (PC_EU6_D_vorSU) nur Fahrzeuge enthalten sind die einem SU unterliegen.

7 Quellenverzeichnis

Notter B., Dippold M., Hausberger S.: Weiterentwicklung HBEFA – Bedarfsanalyse für HBEFA 4.2; Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Nov. 2020

Zallinger M.: Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen. Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz, April 2010

Matzer C., Weller K., Dippold M., Lipp S., Röck M., Rexeis M., Hausberger S.: Update of emission factors for HBEFA Version 4.1; Final report, I-05/19/CM EM-I-16/26/679 from 09.09.2019, TU Graz

KBA: Ergebnisbericht zur Untersuchung der Wirksamkeit von Software-Updates zur Reduzierung von Stickoxiden bei Dieselmotoren, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, Januar 2020

KBA: Marktüberwachungsbericht 2019, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, April 2020

A Anhang

Tabelle 10: Genutzte Fahrzeuge Euro 5

UBA-SU-ID	Hersteller	Modell	Gewicht	WLTC
UBA-SU-1	Audi	A6 3.0l TDI	31309	Ja
UBA-SU-2	BMW	320d	35474.5	Ja
UBA-SU-3	BMW	520d	35474.5	Ja
UBA-SU-4	Mercedes	B180CDI	48329	Ja
UBA-SU-5	Mercedes	C220CDI	119790	Ja
UBA-SU-6	Mercedes	E350CDI	71786	Ja
UBA-SU-7	Mercedes	GLK220CDI	32381	Ja
UBA-SU-8	VW	Touareg 3.0l TDI	26126	Ja
UBA-SU-32	Mercedes	CLS 250 CDI	119790	Nein

Tabelle 11: Genutzte Fahrzeuge Euro 6¹¹

UBA-SU-ID	Hersteller	Modell	Gewicht	WLTC
UBA-SU-9	Audi	A6 3.0l TDI	28334	Nein
UBA-SU-10	Audi	A8 4.2l TDI	11976	Nein
UBA-SU-11	Mercedes	C200d	5705.5	Nein
UBA-SU-12	Mercedes	GLC220d	59160.5	Ja
UBA-SU-13	Mercedes	Vito Tourer	27607	Ja
UBA-SU-14	Mercedes	Vito 1.6l CDI	18797	Nein
UBA-SU-15	Porsche	Macan 3.0l TDI	12258	Nein
UBA-SU-16	Porsche	Cayenne 3.0l TDI	2929.5	Nein
UBA-SU-17	BMW	750d xDrive	3606	Nein
UBA-SU-18	Mercedes	GLE350d	23553.5	Ja
UBA-SU-19	Audi	A6 3.0l TDI	28334	Nein
UBA-SU-20	Mercedes	B200d	25404	Ja
UBA-SU-21	Mercedes	C220d	156810.5	Ja
UBA-SU-22	Mitsubishi	Outlander 2.2l AT	0	Nein
UBA-SU-23	Opel	Corsa 1.3l CDTi	0	Nein
UBA-SU-24	Opel	Insignia 1.6l CDTi	0	Nein
UBA-SU-25	VW	T6 2.0l TDI	95144	Ja
UBA-SU-26	Mazda	6 2.2l SkyActive	74722	Nein
UBA-SU-27	Subaru	Outback 2.0 D	8107	Nein
UBA-SU-28	Mercedes	CLA Shooting Brake 200CDI	25404	Nein
UBA-SU-29	Opel	Astra 1.6l CDTi	0	Nein
UBA-SU-30	Audi	A6	28334	Nein
UBA-SU-31	Mercedes	B220d	25404	Nein
UBA-SU-33	Porsche	Cayenne	2929.5	Nein

¹¹ Fahrzeuge dieser Abgasnormen sind im HBEFA 4.1 als eine Gruppe (sogenannte Schicht) zusammengefasst.