

TEXTE

231/2020

Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs

Abschlussbericht

TEXTE 231/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 58 180 0
FB000242

Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs

Abschlussbericht

von

Uwe Tietge, Jan Dornoff, Sonsoles Díaz, Peter Mock
ICCT, Berlin

Michel Allekotte, Christoph Heidt, Wolfram Knörr
ifeu, Heidelberg

Hans-Jörg Althaus, Benedikt Notter, Quirin Oberpriller,
Alex Läderach
INFRAS, Bern / Zürich

Stefan Hausberger, Claus Matzer
TU Graz, Graz

Christine Eisenmann, Tobias Kuhnimhof
DLR, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
[Internet: www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

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

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

Durchführung der Studie:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Im Weiher 10
69121 Heidelberg

Abschlussdatum:

Februar 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Helge Jahn

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

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

Kurzbeschreibung: Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer neuen Methode zur Ermittlung und Modellierung des realen Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen in den Modellen HBEFA und TREMOD sowohl für zurückliegende Jahre als auch für die Zukunft. Weiteres Ziel war die Aktualisierung des Emissionsinventars in TREMOD unter Berücksichtigung der Differenzen zwischen dem berechneten Energieverbrauch und den Absatzzahlen der Energiestatistik.

Um die Diskrepanz zwischen offiziellen und realen Verbrauchswerten von europäischen Pkw zu ermitteln, wurden zwölf Datenquellen in Betracht gezogen. Die Ergebnisse der Auswertung waren die Grundlage der Methodenentwicklung und Modellierung der realen Verbrauchswerte mit dem Modell PHEM, welches die Basis für das HBEFA liefert.

Schließlich wurden die neue Methodik und die aktualisierten Verbrauchswerte in das HBEFA übernommen und der gesamte Energieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland mit TREMOD neu berechnet. Der mit TREMOD berechnete Energieverbrauch des Inlandsverkehrs ist höher als der in Deutschland abgesetzte Kraftstoff nach der Energiestatistik. Aufgrund vorliegender Erkenntnisse aus verschiedenen Studien kann diese Differenz überwiegend mit Betankungsdifferenzen („graue Importe“) zwischen Deutschland und den Nachbarländern erklärt werden, allerdings sind die Unsicherheiten hoch und bedürfen einer vertieften Betrachtung.

Abstract: Development of a methodology for the determination and modelling of CO₂ emissions from motor vehicle traffic

The aim of the present research project was to develop a new method to determine and model the real fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars and light commercial vehicles in the HBEFA and TREMOD models both for past years and for the future. Another objective was to update the emissions inventory in TREMOD, taking into account the differences between the calculated energy consumption and the sales figures of the energy statistics.

In order to determine the discrepancy between official and real consumption values of European passenger cars, twelve data sources were considered. The results of the evaluation were the basis for the methodology development and modelling of the real consumption values with the PHEM model, which provides the basis for the HBEFA.

Finally, the new methodology and the updated consumption values were transferred to HBEFA and the total energy consumption of road traffic in Germany was recalculated with TREMOD. The energy consumption of domestic traffic calculated with TREMOD is higher than the fuel sold in Germany. Based on available findings from various studies, this difference can mainly be explained by differences in refuelling ("grey imports") between Germany and its neighbouring countries, although the uncertainties are high and require in-depth consideration.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	17
1 Einleitung.....	23
2 Ermittlung der realen Energieverbräuche.....	24
2.1 Divergenz zwischen Messungen im Labor und Realbetrieb	24
2.1.1 Übersicht der Datenquellen.....	24
2.1.2 Vergleich mit Flottenmerkmalen	28
2.1.2.1 Anteil von Getriebe- und Antriebsarten	28
2.1.2.2 Anteil von Fahrzeugsegmenten	29
2.1.2.3 Anteil von Herstellermarken.....	31
2.1.3 Methodik.....	33
2.1.4 Ergebnisse	34
2.2 Vergleich mit RDE Messungen	40
2.2.1 Hintergrund.....	40
2.2.2 Datenquellen.....	41
2.2.3 Methodik.....	41
2.2.4 Ergebnisse	42
2.3 Kalibrierung der Modelleingabedaten.....	46
2.3.1 Methode	46
2.3.2 Simulationsprogramm PHEM.....	47
2.3.3 Ergebnisse Fahrzeugsample.....	48
2.3.3.1 Kalibrierfaktoren für Beladung, Fahrwiderstände und Nebenverbraucher	48
2.3.3.2 Abweichung zwischen Simulation und Messung bei Typprüfung, RDE-Tests und Spritmonitor.de	49
2.3.4 Ergebnisse Kfz-Flotten	50
2.4 Anpassung der Fahrverhaltensdaten	53
3 Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche in HBEFA	55
3.1 Aufgabenstellung	55
3.2 Eingangsdaten.....	55
3.3 Methodik.....	56

3.3.1	Kalibration der Kraftstoffeffizienz in HBEFA	56
3.3.2	Neuer Preprocessor für Fahrzeugkategorien mit CO ₂ -Monitoring.....	56
3.3.3	Länderspezifische Anpassung des Realverbrauchszuschlags	57
3.4	Ergebnisse	58
4	Ermittlung der grauen Im- und Exporte	60
4.1	Methodenbeschriebe.....	61
4.1.1	Ökonometrisches Tankstellen-Modell.....	61
4.1.2	Vergleich Grenzgebiet mit Kerngebiet.....	61
4.1.3	Grenzquerender Verkehr	62
4.1.3.1	DIW 2005 und «Verkehr in Zahlen».....	62
4.1.4	Mikroökonomisches Kosten/Nutzen-Modell.....	63
4.1.5	Residualgröße	63
4.2	Methodenvergleich.....	64
4.3	Vergleich «Verkehr in Zahlen» mit anderen Studien.....	65
4.3.1	Schweiz	66
4.3.2	Österreich	66
4.4	Wahl Plausibilisierungsmethode in diesem Projekt.....	67
5	Aktualisierung des Verkehrsmengengerüsts und der Verbrauchsdaten in TREMOD	69
6	Quellenverzeichnis	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für vier deutsche Datenquellen	12
Abbildung 2:	Anteil von Getriebe- und Antriebsarten.....	29
Abbildung 3:	Anteil von Fahrzeugsegmenten.....	31
Abbildung 4:	Anteil von Herstellermarken	33
Abbildung 5:	Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für vier deutsche Datenquellen	36
Abbildung 6:	Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für drei europäische Onlineplattformen.....	37
Abbildung 7:	Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten mit Schwerpunkt auf Dienstwagenflotten	38
Abbildung 8:	Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für leichte Nutzfahrzeuge (LNF)	39
Abbildung 9:	Spanne des 95-prozentigen Konfidenzintervalls der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten aus Spritmonitor.de (Größe der Stichprobe in Klammern).	40
Abbildung 10:	Divergenz zwischen Mess- und Typprüfwerten nach Fahrzeugsegment	43
Abbildung 11:	Divergenz zwischen Mess- und Typprüfwerten nach Hubraumklasse	44
Abbildung 12:	Vergleich Verbrauchsfaktoren PKW (Durchschnitt Deutschland, nach Emissionsstandard) zwischen HBEFA-Versionen 3.3 (2017) und 4.1 (2019)	59
Abbildung 13:	Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland 2000-2017 - Benzin	70
Abbildung 14:	Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland 2000-2017 - Diesel	71
Abbildung 15:	Vergleich der spezifischen Energieverbrauchswerte der neuen Methodik mit den bisherigen Werten (TREMODO 5.83) von 2000 bis 2017	72
Abbildung 16:	Entwicklung des berechneten Inlandsverbrauchs und des Kraftstoffabsatzes nach Energiebilanz des Straßenverkehrs (in PJ) in Deutschland 2000-2017	73
Abbildung 17:	Abweichung des berechneten Inlandsverbrauchs von der Energiebilanz 2000-2017	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der untersuchten Datenquellen.....	25
Tabelle 2:	Spreizung von Zylinderanzahl, Hubraum und Fahrzeugmasse in den verschiedenen HBEFA Hubraumklassen.....	45
Tabelle 3:	Durchschnitt der gemessenen und simulierten CO ₂ -Emissionen der 4 untersuchten Diesel-Pkw	50
Tabelle 4:	Durchschnitt der gemessenen und simulierten CO ₂ -Emissionen der 4 untersuchten Otto-Pkw	50
Tabelle 5:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b vom Diesel-Durchschnitts-Pkw	51
Tabelle 6:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b vom Otto-Durchschnitts-Pkw	51
Tabelle 7:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA die EURO-Klassen 3 bis 6a,b von leichten Nutzfahrzeugen I-III Diesel-Durchschnitt	52
Tabelle 8:	CO ₂ -Emissionen von NEFZ, Spritmonitor.de und HBEFA für die EURO-Klassen 3 bis 6a,b von leichten Nutzfahrzeugen I-III Otto- Durchschnitt	52
Tabelle 9:	Anteil der Fahrleistungen nach Höchstgeschwindigkeitsklassen in Deutschland im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6.....	54
Tabelle 10:	Anteil der Fahrleistungen nach Level of Service in Deutschland im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6.....	54
Tabelle 11:	Vergleich Berechnungsmethoden – Informationen	64
Tabelle 12:	Vergleich Berechnungsmethoden – Kriterien	65
Tabelle 13:	Benzin: Graue Importe aus der Schweiz.....	66
Tabelle 14:	Benzin: Graue Importe aus Österreich.....	67

Abkürzungsverzeichnis

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
ViZ	«Verkehr in Zahlen»
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren von INFRAS AG
TREMOT	Transport Emission Model
DLR	Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
ICCT	International Council on Clean Transportation
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model der TU Graz
PEMS	Portable Emission Measurement Systems
RDE	Real Driving Emissions (Test / Testprozedur)

Zusammenfassung

Einleitung

Verschiedene Untersuchungen weisen darauf hin, dass bei neu zugelassenen Fahrzeugen die Differenz zwischen dem Verbrauchswert, gemessen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), und dem realen Kraftstoffverbrauch des Kunden auf der Straße in den letzten Jahren signifikant zugenommen hat. Hier stehen Differenzen von bis zu 40 % zur Diskussion. Diese Abweichungen schwächen die Wirksamkeit der europäischen CO₂-Gesetzgebung zur Minderung der Verbrauchs- und CO₂-Werte der Pkw- und LNF-Neuwagenflotte. Darüber hinaus unterschätzen die verwendeten Eingangsdaten für Pkw und LNF den tatsächlichen Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen in den vom UBA genutzten Modellen HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) und TREMOD (Transport Emission Model). Trotz einer Kalibrierung der Gesamtverbräuche auf den gesamten Treibstoffabsatz in diesen Modellen bleiben größere Unsicherheiten bezüglich der Verbräuche in den einzelnen Fahrzeugsegmenten, weil der Absatz bisher mit plausiblen aber dennoch eher pauschalen Annahmen auf die einzelnen Fahrzeugsegmente aufgeteilt wurde. In TREMOD hat die Unterschätzung der Verbräuche von Pkw und LNF zudem auch eine Überschätzung der Verbräuche von schweren Nutzfahrzeugen (SNF), wie Lkw und Bussen, zur Folge.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer neuen Methode zur Ermittlung und Modellierung des realen Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen in den Modellen HBEFA und TREMOD sowohl für zurückliegende Jahre als auch für die Zukunft. Randbedingung war dabei, dass die neue Methode mit vertretbarem Aufwand jährlich fortgeschrieben werden kann, um die Daten der beiden Modelle zu aktualisieren.

Weiteres Ziel war die Aktualisierung des Emissionsinventars in TREMOD unter Berücksichtigung der grauen Kraftstoffim- und Exporte mit dem Ziel, ein konsistentes Gesamtgerüst von Inlandsverbrauch und Kraftstoffabsatz darzustellen. Dazu wurden verschiedene Untersuchungen zur Bestimmung der grauen Kraftstoffim- und exporte analysiert und mögliche Ansätze zur Berücksichtigung vorgeschlagen.

Ermittlung der realen Energieverbräuche

Um die Diskrepanz zwischen offiziellen und realen Verbrauchswerten von europäischen Pkw zu ermitteln, wurden zwölf Datenquellen in Betracht gezogen. Die Hälfte der Datensätze beinhaltet Realverbrauchsdaten die vorwiegend in Deutschland erfasst wurden, während die andere Hälfte aus anderen europäischen Ländern (Niederlande, Großbritannien und Frankreich) stammt. Zusammen betrachtet, decken die Datensets rund 1,4 Mio. Fahrzeuge ab, von denen ca. 660.000 in Deutschland registriert waren.

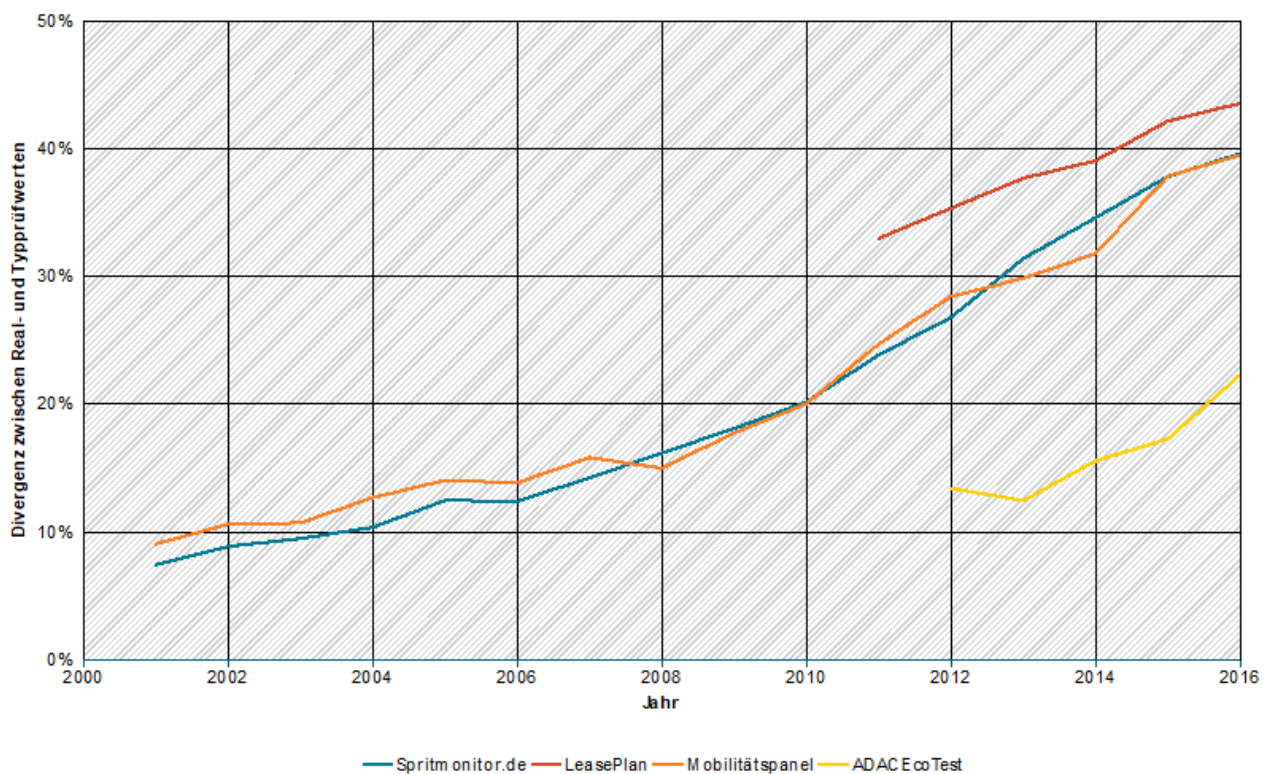
Die Datensätze lassen sich nach der Art der Erhebung in vier Gruppen einteilen: Selbstauskunft der Fahrer via Webseite, automatische Datenerfassung via Tankkarte, Testfahrten zur Verbrauchsermittlung mit Nachtanken oder mittels Portable Emission Measurement Systems (PEMS) und Verbrauchsmessungen auf dem Rollenprüfstand. Darüber hinaus bildet die jährliche Erhebung zum Realverbrauch von Pkw des deutschen Mobilitätspanels eine gesonderte Kategorie.

Die verfügbaren Daten werden der Zusammensetzung der Neuwagenflotte in Deutschland über die Jahre 2001 bis 2016 gegenübergestellt. Die Quellen Spritmonitor.de und Mobilitätspanel

erfassen in erster Linie Privatfahrzeuge. Sie decken eine Zeitspanne von 16 Jahren ab und erlauben somit eine Analyse der Entwicklung der Divergenz vor und nach der Einführung der EU-CO₂-Emissionsstandards für neue Pkw im Jahr 2009. Wie Abbildung 1 zeigt, zeigen beide Datenquellen übereinstimmend, dass die Abweichung im Jahr 2016 einen Wert von 40% erreichte und damit mehr als fünfmal so groß war wie im Jahr 2001. Bis zum Jahr 2009 ist eine relativ langsame Zunahme zu beobachten. Während der ersten Phase der CO₂-Standards, ab dem Jahr 2009 bis zum Jahr 2015, das erste Zieljahr der Regulierung, nahm die Abweichung dagegen rasch zu. Im Jahr 2016 verlangsamte sich das Wachstum der Divergenz wieder.

Die Dienstwagen-Flotte von LeasePlan zeichnet sich durch höhere Abweichungswerte aus. Die durchschnittliche Abweichung stieg laut LeasePlan Daten von rund 33% im Jahr 2011 auf knapp 44% im Jahr 2016 an. Am unteren Ende des Spektrums befindet sich der laborbasierte ADAC EcoTest. Dies erklärt sich durch die methodische Anlehnung vom EcoTest an den offiziellen Prüfzyklus. Dennoch stieg auch die Divergenz zwischen den EcoTest-Ergebnissen und den offiziellen Prüfwerten von 15% im Jahr 2012 auf 24% im Jahr 2016 an, ohne dass sich die Testmethoden von ADAC in dieser Zeit verändert hätten.

Abbildung 1: Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für vier deutsche Datenquellen



Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den realen Alltagswerten der vier Datenquellen Spritmonitor.de, LeasePlan, Mobilitätspanel, sowie ADAC EcoTest, für die Jahre 2001 bis 2016.

In einem zweiten Schritt wurden die CO₂-Messdaten aus Real Driving Emissions (RDE) Typgenehmigungsfahrten für 228 Fahrzeuge erhoben. Diese wurden mit Hilfe von Portable Emission Measurement Systems (PEMS) während einer Fahrt auf öffentlichen Straßen ermittelt.

Zur Beurteilung, ob die distanzspezifischen CO₂ Emissionen in den ausgewerteten RDE Tests repräsentativ für jene im Realbetrieb sind, wurde die prozentuale Abweichung zwischen den RDE CO₂ Emissionen und den NEDC Typgenehmigungsfahrten („Divergenz“) bestimmt und mit der Divergenz, die sich aus den Spritmonitor und LeasePlan Daten ergibt, verglichen. Die aus diesen Konsumentendaten bestimmte Divergenz wird aufgrund der großen Anzahl an Fahrzeugen, die in diesen Datenquellen erfasst werden, als realitätsnah angesehen.

Es zeigt sich, dass die Divergenz für die RDE Messungen mit durchschnittlich 22% wesentlich niedriger als die aus den Verbraucherdaten ermittelte Abweichung ist, welches über alle Segmente gemittelt ca. 40% im Jahr 2016 beträgt. Zum anderen bewegt sich die Divergenz in den RDE Messungen für alle Segmente auf einem sehr ähnlichen Niveau, abgesehen von Segment F (Luxusklasse) und S (Sportwagen). Dagegen weisen die LeasePlan und Spritmonitor Daten eine deutliche Abhängigkeit der Divergenz vom Segment auf, mit einer tendenziell steigenden Divergenz für Fahrzeuge größerer Segmente (insbesondere Segment E und F).

Eine weitere Analyse der Daten zeigt, dass die CO₂ Emissionen der RDE Tests nur geringfügig über den WLTP CO₂ Emissionen liegen. Im Mittel über alle Segmente liegt diese Abweichung bei nur 3.8% und damit deutlich unter der für den Realbetrieb erwarteten Abweichung von 16-22%. Da es für die Sicherstellung einer gültigen RDE Typgenehmigungsfahrt und damit einer möglichst zeit- und kosteneffektiven Typgenehmigung vorteilhaft ist, sich bezüglich Zuladung und Fahrdynamik möglichst nahe am WLTP zu orientieren, ist die beobachtete geringe Abweichung zwischen RDE und WLTP CO₂ Emissionen nicht überraschend. Die CO₂ Emissionen, die aus den vorliegenden Daten der RDE- Typgenehmigungs-Tests ermittelt wurden, werden daher nicht als repräsentativ für den Realbetrieb angesehen. Eine unmittelbare Verwendung der Messdaten aus RDE Typgenehmigungsfahrten für die Ermittlung des Realverbrauches wird aus diesem Grund nicht empfohlen.

Modelleingaben und Fahrverhalten

Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen von PKW und leichten Nutzfahrzeugen werden für das HBEFA mit dem Fahrzeugmodell PHEM berechnet. PHEM bestimmt die erforderliche Motorleistung aus der Fahrzeug Masse, der Beladung, den Fahrwiderständen und dem Leistungsbedarf von Nebenaggregaten wie etwa Klimaanlage, Beleuchtung etc.. In der Vergangenheit wurden die Fahrzeugmasse und die Fahrwiderstände aus Messdaten derERMES Datenbank bestimmt und der Energieverbrauch der Klimaanlage durch einen CO₂-Aufschlag berücksichtigt. Für die vorliegende Arbeit wurden die Datenquellen geprüft und die Werte angepasst, da die mit PHEM berechneten Verbrauchswerte für die meisten Fahrzeuge unter den von Online-Plattformen (z.B. spritmonitor.de) erfassten Werten lagen. Dabei wurden Einflüsse von Seitenwind, Dachboxen, Anhängern, Regen, nasser Fahrbahn, Winterreifen und Schnee etc. analysiert und nach den Anteilen im realen Fahrbetrieb bei den Fahrwiderständen in den Eingabedaten von PHEM berücksichtigt. Weiter wurde auch die mittlere Beladung von PKW angehoben, da Urlaubsfahrten in den zuvor angenommenen Werten unterrepräsentiert schienen. Der Leistungsbedarf der Nebenaggregate wurde direkt zu der aus den Fahrwiderständen berechneten Motorleistung addiert. Mit der simulierten Motorleistung und –drehzahl kann der Kraftstoffverbrauch aus Motorkennfeldern interpoliert werden. Die Motorkennfelder wurden im Rahmen der Arbeit aus HBEFA 3.3 übernommen und mit aktuellen Messdaten kalibriert. Mit diesem Datensatz wurden alle Verkehrssituationen des HBEFA nachgerechnet und ein nach Fahrleistungsanteilen gewichteter Mittelwert für CO₂ und Verbrauch je km berechnet. Dieser stellt den mittleren real-world Verbrauch der jeweiligen Kfz-Kategorie dar (z.B. PKW-Diesel EURO 6ab). Nachdem die o.a. Korrekturen der Fahrwiderstände

und Beladungen vorgenommen wurden, ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung der mittleren real-world Verbrauchswerte mit den spritmonitor.de Daten. Die neuen Modellparameter wurden sowohl im HBEFA 4.1 übernommen als auch in weiterer Folge in TREMOD genutzt. Die höheren Fahrwiderstände haben im HBEFA auch merkbare Effekte auf die mit PHEM berechneten Schadstoffemissionen, da diese ja auch aus Motorkennfeldern ermittelt werden und daher leistungsabhängig sind.

Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche in HBEFA

Die Kraftstoffverbräuche der Pkw wurden für alle "HBEFA-Länder" (Deutschland, Schweiz, Österreich, Frankreich, Schweden und Norwegen) in HBEFA Version 4.1 (Publikation September 2019) gemäß den oben beschriebenen Ergebnissen aktualisiert und kalibriert.

Die Kalibration verwendet als Eingangsdaten

- ▶ die nach dem oben beschriebenen Verfahren aktualisierten Basis-Verbrauchsfaktoren nach HBEFA-Fahrzeugschicht und HBEFA-Verkehrssituation aus dem PHEM-Modell,
- ▶ Der Durchschnitt der CO₂-Emissionen nach NEFZ für alle Neuzulassungen nach Jahr und Technologie aus dem CO₂-Monitoring,
- ▶ die gemäß oben beschriebenen Verfahren ermittelten Realverbrauchszuschläge (ausgedrückt in % der CO₂-Monitoring-Werte) für die Neuzulassungen nach Jahr und Technologie,
- ▶ die Verteilung der Verkehrssituationen in den HBEFA-Ländern,
- ▶ die Anteile der Emissionsstandards (Euro-Stufen) an den Neuzulassungen pro Jahr und Technologie für die HBEFA-Länder.

Operationell wurden die bisherigen Modellparameter von HBEFA zum spezifischen Kraftstoffverbrauch beibehalten; es wurde aber ein neuer Preprocessor in der HBEFA Expert Version eingeführt, welcher aus den oben aufgeführten Eingangsdaten direkt die benötigten Modellparameterwerte berechnet. Somit lassen sich in der HBEFA Expert Version die Modellparameter für Fahrzeugkategorien, für welche CO₂-Monitoring und Realverbrauchszuschläge verfügbar sind, rascher und einfacher ermitteln; gleichzeitig kann die bisherige Methode, welche auf jährlichen Absenkraten und einer Basiskorrektur basiert und somit z.B. für Zukunftsprognosen oder Fahrzeugkategorien ohne CO₂-Monitoring eher der Art der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten entspricht, weiter verwendet werden.

Der Realverbrauchszuschlag, welcher in den oben beschriebenen Schritten für Deutschland bestimmt wurde, wurde an die anderen HBEFA-Länder basierend auf der Annahme angepasst, dass sich v.a. die Verteilung der Verkehrssituationen zwischen den Ländern unterscheidet. Daher wurde pro Kraftstofftyp und Land das Verhältnis aus dem fahrleistungsgewichteten Durchschnitt der Verkehrssituationen-spezifischen Verbräuche eines PHEM-Durchschnittsfahrzeugs zum entsprechenden Wert aus Deutschland gebildet, und der resultierende Anpassungsfaktor anschließend mit den jährlichen Realverbrauchszuschlägen multipliziert.

Die Ergebnisse der Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche sind in der im September 2019 publizierten HBEFA-Version 4.1 abrufbar. Der Vergleich zum 2017 publizierten HBEFA 3.3 für Deutschland zeigt, dass die Absenkung des spezifischen Endenergieverbrauchs mit der neuen

Methode weniger deutlich ausfällt als in HBEFA 3.3 angenommen. Dies ist das Resultat der besseren Berücksichtigung der über die Zeit zunehmenden Divergenz zwischen Kraftstoffverbrauch gemäß Typenprüfung und dem realen Verbrauch auf der Straße.

Graue Importe / Exporte

Graue Kraftstoffimporte oder -exporte bedeutet, dass Kraftstoff im Ausland getankt und im Inland verfahren wird oder umgekehrt. Eine Abschätzung dieser Zahlen kann verwendet werden um bottom-up modellierte Kraftstoffverbräuche mit top-down bestimmten Kraftstoffabsätzen zu vergleichen bzw. erstere an letzteren zu plausibilisieren oder gar zu kalibrieren.

Die Methoden zur Bestimmung von grauen Kraftstoffimporten oder -exporten, die in verschiedenen Studien aus Deutschland, Österreich und der Schweiz zur Anwendung kamen, wurden analysiert und bezüglich der Anwendbarkeit für die Kalibrierung der realen Verbräuche in TREMOD beurteilt. Die Methoden basieren entweder auf einer extensiven Empirie und sind entsprechend mit einem großen Aufwand verbunden (z. B. das Ökonometrische Tankstellenmodell), oder sie können nur relative Veränderungen der grauen Import- / Exportmengen bestimmen. Zu letzteren gehören einerseits Vergleiche zwischen Grenz- und Kerngebiet, in denen der Kraftstoff Absatz an vergleichbaren Tankstellen in grenznahen und grenzfernen Gebieten verglichen wird. Unterschiede werden durch graue Importe / Exporte erklärt. Andererseits gehören auch Modelle, die auf Basis von Veränderungen bei den Preisdifferenzen und der grenzquerenden Verkehrsmenge abschätzen, wie sich die grauen Importe oder Exporte verändert haben.

Für Deutschland sind nur Daten nach der letzten Methode verfügbar, wenn auch nicht publiziert. Die Daten werden im Rahmen von „Verkehr in Zahlen“ abgeschätzt. Die Unsicherheit dieser Methode ist hoch, weil deren Basis (Schätzung aus dem Jahr 2002) sehr unsicher ist und weil die Methode der Fortschreibung eher qualitativer Natur ist.

Ein Vergleich der „Verkehr in Zahlen“ Daten mit Daten aus Österreich und der Schweiz hat gezeigt, dass die verschiedenen Methoden um einen Faktor 2-4 unterschiedliche Ergebnisse erzeugen, was die sehr hohe Unsicherheit der Schätzungen unterstreicht. Daraus folgern wir, dass die Datenqualität heute nicht ausreicht, um das Verbrauchsmodell daran zu kalibrieren. Andererseits sind auch die Fahrleistungen und die spezifischen Verbräuche mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet. Darum empfiehlt sich, alle Parameter einzeln bottom-up zu bestimmen und so zu justieren, dass die Gesamtbilanz stimmig und plausibel wird. Dies bedingt eine verstärkte Koordination zwischen den beteiligten Stellen (AG Energiebilanzen, DLR und IFEU).

Verkehrsmengengerüst und Verbrauchsdaten in TREMOD

Die in diesem Vorhaben entwickelte Methodik zur Verbrauchsermittlung wurde im HBEFA 4.1 und in der TREMOD-Version 6 umgesetzt. Mit den neuen Verbrauchsdaten aus dem HBEFA 4.1 und dem aktualisierten Verkehrsmengengerüst aufgrund neuer Fahrleistungsdaten wurde das Emissionsinventar in TREMOD neu berechnet.

Mit der neuen Methodik werden bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen zum Teil deutlich höhere spezifische Verbräuche als bisher berechnet. Bei allen Kategorien nimmt der Abstand der neuen Werte gegenüber den alten im Zeitverlauf zu. Das Ausgangsniveau im Jahr 2000 ist bei den leichten Nutzfahrzeugen und den Diesel-Pkw höher als bisher, nur bei den Benzin-Pkw etwas niedriger. Am deutlichsten ist der Unterschied bei den leichten Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb, deren Niveau im Jahr 2000 um 20 % höher liegt als bisher und sich bis zum Jahr

2017 auf 29 % vergrößert. Bei den Diesel-Pkw liegt das Ausgangsniveau im Jahr 2000 um 8 % höher. Die Differenz nimmt zeitweise ab, steigt ab 2010 wieder an und erreicht im Jahr 2017 einen Unterschied von 10 %. Bei den Benzin-Pkw liegt das Ausgangsniveau im Jahr 2000 um 3 % niedriger als bisher und 2017 um 6 % höher. Die Verbesserung der Energieeffizienz bis 2017 ist damit wie erwartet geringer als bisher.

Mit diesen Energiekennzahlen und dem neuen Verkehrsmengengerüst wird der gesamte Energieverbrauch des Straßenverkehrs im Inland berechnet und den Ansatzzahlen der Energiebilanz gegenübergestellt, mit folgenden Ergebnissen:

- ▶ Der Benzinverbrauch des Straßenverkehrs nimmt in der Zeitreihe von 2000 bis 2017 ab, während der Dieserverbrauch im gleichen Zeitraum zunimmt. Die Absatzzahlen liegen bei beiden Kraftstoffen stets unter den mit dem TREMOD-Modell berechneten Inlandsverbräuchen. Der Abstand zwischen Absatz und Inlandsverbrauch nimmt insbesondere in den Jahren 2000 bis 2008 zu.
- ▶ Im Jahr 2000 liegen die Berechnungsergebnisse für das Inland und die Absatzzahlen bei Benzin und Diesel – zufälligerweise - auf dem gleichen Niveau. Die Abweichung des berechneten Inlandsbrauchs nimmt in der Zeitreihe bei Benzin von 2000 bis 2012 kontinuierlich bis auf 17 % zu. Danach nimmt sie bis 2017 auf rund 10 % ab. Beim Diesel steigt die Abweichung bis zum Jahr 2008 auf mehr als 16 % an und nimmt danach wieder auf etwa 9 % ab.

Die mit dem TREMOD-Modell berechneten Kraftstoffverbräuche und die Differenzen zu den Absatzzahlen sind plausibel. Das DLR kommt in «Verkehr in Zahlen» für das Jahr 2017 für den Inländerverbrauch von Benzin, der sich kaum vom Verbrauch im Inland unterscheidet (die Pkw-Inlands- und Inländerfahrleistung sind nahezu identisch), auf ähnliche Unterschiede und vermutet als Ursache nahezu ausschließlich die grauen Importe.

Beim Dieselmotorkraftstoff sind Inländerverbrauch («Verkehr in Zahlen») und Inlandsverbrauch (TREMOD) wegen des Fahrleistungssaldos im Güterverkehr (mehr Güterfahrleistung durch Ausländer im Inland als von Inländern im Ausland) nicht unmittelbar vergleichbar. Es ist jedoch plausibel, dass ein größerer Teil des Saldos zwischen Absatz und Verbrauch des Inlandsverkehrs ebenfalls auf graue Importe zurückzuführen ist.

Im Rahmen dieser Studie war es nicht mehr möglich, die Berechnungsergebnisse aus TREMOD, die im Laufe des Jahres 2019 publizierten geänderten Daten der Mineralölstatistik und die Arbeiten zur Berücksichtigung der Energiestatistikanpassung in «Verkehr in Zahlen» 2019/2020 zu berücksichtigen und abzugleichen. Ein solcher Abgleich sollte jedoch 2020 nachgeholt werden und wäre eine gute Grundlage für die Fortentwicklung der Methode zur Bestimmung der grauen Im- und Exporte.

Summary

Introduction

Various studies indicate that for newly registered vehicles the difference between the fuel consumption measured in the New European Driving Cycle (NEDC) and the real fuel consumption of the vehicle on the road has increased significantly in recent years. Differences of up to 40% have been reported. These differences weaken the effectiveness of European CO₂ legislation to reduce the fuel consumption and CO₂ emissions of newly registered passenger cars and light commercial vehicles (LCV). In addition, the input data used for passenger cars and LCV also underestimate actual fuel consumption and CO₂ emissions in HBEFA (Handbook on Emission Factors in Road Traffic) and TREMOD (Transport Emission Model), which are used by UBA. Despite calibration at the national level of total fuel consumption to total fuel sales in these models, uncertainties regarding fuel consumption at the level of individual vehicle segments remain. This is because the allocation of fuel consumption to the individual vehicle segments must be based on assumptions as no more detailed data is available. In TREMOD, for example, the underestimation of fuel consumption by passenger cars and LCV results in an overestimation of the fuel consumption of heavy commercial vehicles (HCV), such as trucks and buses.

The aim of the present research project was to develop a new method for determining and modelling the real fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars and light commercial vehicles in HBEFA and TREMOD both for past years and for the future. The boundary condition was that the new method could be updated annually at a reasonable cost in order to update the data of the two models.

Another objective was to update the emissions inventory in TREMOD, to take grey fuel imports and exports into account. The aim of this was to present a consistent overall framework of domestic consumption and fuel sales. To this end, various studies for the determination of grey fuel imports and exports were analysed and possible approaches suggested for consideration.

Determination of real energy consumption

The first step was to determine the discrepancy between official and real consumption values of European passenger cars. Twelve data sources were considered for this purpose. Half of the data sets include real consumption data collected mainly in Germany, while the other half comes from other European countries (the Netherlands, Great Britain and France). Taken together, the data sets cover about 1.4 million vehicles, of which about 660,000 were registered in Germany.

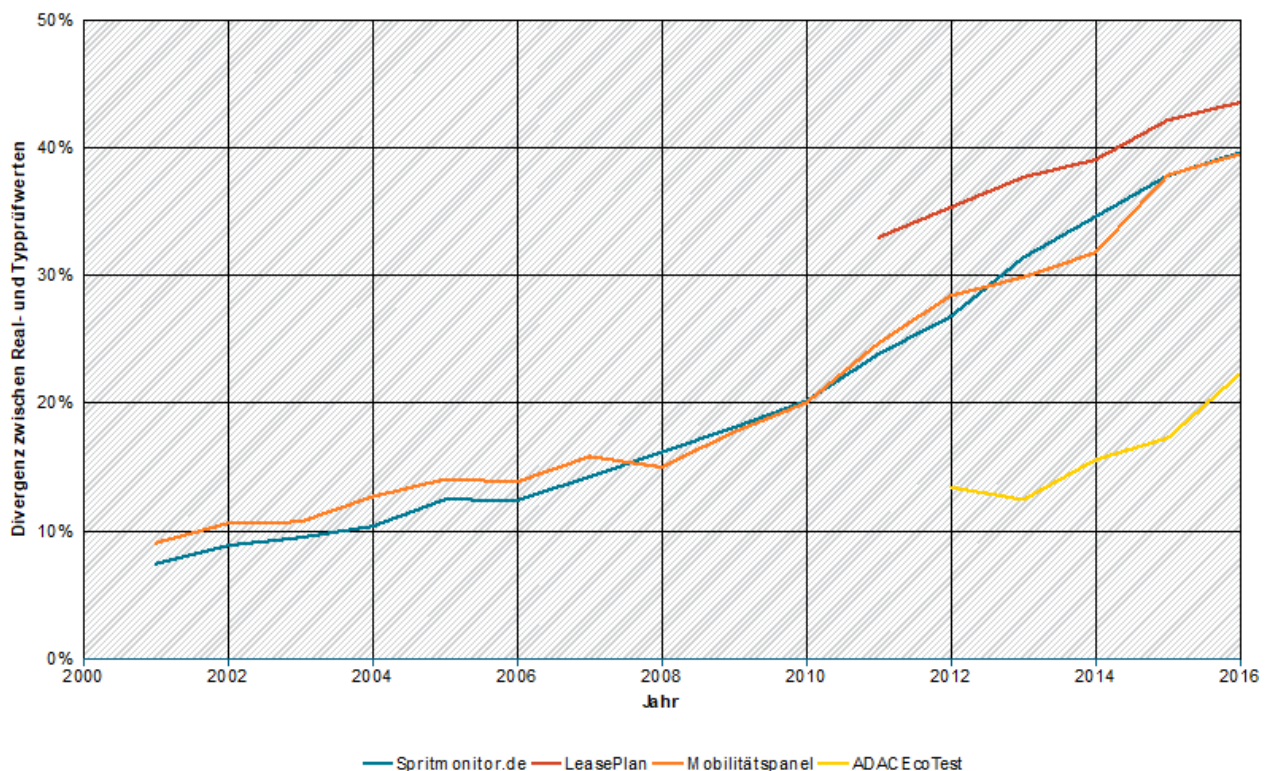
The data sets can be divided into four groups according to the type of survey: Drivers' self-disclosure via website, automatic data acquisition via fuel card, test drives to determine fuel consumption with refuelling or using Portable Emission Measurement Systems (PEMS) and fuel consumption measurements on the chassis dynamometer. In addition, the annual survey on the real consumption of passenger cars conducted by the German Mobility Panel forms a separate category.

The available data are compared with the composition of the new car fleet in Germany over the years 2001 to 2016. The sources Spritmonitor.de and Mobility Panel primarily cover private vehicles. They cover a period of 16 years and thus allow an analysis of the development of the divergence before and after the introduction of the EU CO₂ emission standards for new passenger cars in 2009. As Figure 1 shows, both data sources show that the divergence reached a value of 40% in 2016 and was thus more than five times as large as in 2001. A relatively slow increase can be observed until 2009. During the first phase of the CO₂ standards, from 2009 to

2015, the first target year of regulation, the deviation increased rapidly. In 2016, the growth of divergence slowed again.

LeasePlan's fleet of company cars is characterised by higher deviation values. According to LeasePlan data, the average deviation rose from around 33% in 2011 to just under 44% in 2016. At the lower end of the spectrum is the laboratory-based ADAC EcoTest. This can be explained by the similarity of the of the EcoTest to the official test cycle. Nevertheless, the divergence between the EcoTest results and the official test values increased from 15% in 2012 to 24% in 2016, without ADAC's test methods having changed during this period.

Figure 1: Development of the average divergence between real and type test values for four German data sources



The figure shows the average deviation between the official type test values and the real everyday values of the four data sources Spritmonitor.de, LeasePlan, Mobility Panel and ADAC EcoTest for the years 2001 to 2016.

In a second step, the CO₂ measurement data from Real Driving Emissions (RDE) type approval drives for 228 vehicles were collected. These were determined using Portable Emission Measurement Systems (PEMS) while driving on public roads. To assess whether the distance-specific CO₂ emissions in the evaluated RDE tests are representative for those in real operation, the percentage deviation between the RDE CO₂ emissions and the NEDC type approval runs ("divergence") was determined and compared with the divergence resulting from the fuel monitor and LeasePlan data. The divergence determined from these consumer data is considered realistic due to the large number of vehicles recorded in these data sources.

The divergence for the RDE measurements, with an average of 22%, is considerably lower than the divergence determined from the consumer data, which, in average over all segments, amounts to approx. 40% in 2016. Also, the divergence in the RDE measurements is very similar

for all segments except segment F (luxury class) and S (sports cars). The LeasePlan and Spritmonitor data, on the other hand, show a clear dependence of the divergence on the segment, with a tendency towards increasing divergence for vehicles in larger segments (especially segments E and F).

A further analysis of the data shows that the CO₂ emissions of the RDE tests are only slightly above the WLTP CO₂ emissions. On average across all segments, this deviation is only 3.8% and thus well below the deviation of 16-22% expected for real operation. This small difference between RDE and WLTP CO₂ emissions is not surprising because it is both cost- and time-efficient to ensure that RDE type-approval runs are valid by keeping both payload and driving dynamics similar to the WLTP during tests. The CO₂ emissions determined from the available data of the RDE type approval tests are therefore not considered representative for real operation. A direct use of the measurement data from RDE type-approval runs for the determination of the real consumption is therefore not recommended.

Model input and driving behaviour

Fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars and light commercial vehicles are calculated for HBEFA using the PHEM vehicle model. PHEM determines the required engine power from the vehicle mass, the load, the driving resistances and the power requirement of auxiliary units such as air conditioning, lighting, etc.. In the past the vehicle mass and the driving resistances were determined from measured data of the ERMES database and the energy consumption of the air conditioning system was considered by a CO₂ surcharge. For the present work, the data sources were checked and the values adjusted, since the consumption values calculated with PHEM for most vehicles were below the values recorded by online platforms (e.g. spritmonitor.de). Influences of crosswind, roof boxes, trailers, rain, wet road, winter tyres and snow etc. were analysed and considered in the input data of PHEM according to the proportions of driving resistance in real driving conditions. Furthermore, the average load of passenger cars was also increased, as holiday trips seemed underrepresented in the previously assumed values. The power requirement of the auxiliary units was directly added to the engine power calculated from the driving resistances. With the simulated engine power and speed, the fuel consumption can be interpolated from engine maps. The engine maps were taken from HBEFA 3.3 and calibrated with current measurement data. With this data set all traffic situations of the HBEFA were recalculated and a weighted average value for CO₂ and consumption per km was calculated. This represents the average real-world consumption of the respective vehicle category (e.g. passenger car diesel EURO 6ab). After the abovementioned corrections of the driving resistances and loads had been made, the mean real-world fuel consumption values were in very good agreement with the spritmonitor.de data. The new model parameters were adopted in HBEFA 4.1 and subsequently used in TREMOD. The higher driving resistances in HBEFA also have noticeable effects on the pollutant emissions calculated with PHEM, since these are also determined from engine maps and are therefore performance-dependent.

Update of fuel consumption in HBEFA

The fuel consumption of the vehicles was updated and calibrated for all "HBEFA countries" (Germany, Switzerland, Austria, France, Sweden and Norway) in HBEFA Version 4.1 (publication September 2019) according to the results described above.

The calibration uses as input data

- ▶ the basic consumption factors according to HBEFA vehicle layer and HBEFA traffic situation from the PHEM model updated according to the procedure described above,
- ▶ the average CO₂ emissions according to NEDC for all new registrations by year and technology from CO₂ monitoring,
- ▶ the real consumption surcharges (expressed as % of CO₂ monitoring values) for new registrations by year and technology determined in accordance with the procedure described above,
- ▶ the distribution of traffic situations in the HBEFA countries,
- ▶ the shares of emission standards (Euro levels) in new registrations per year and technology for the HBEFA countries.

In operational terms, the previous model parameters of HBEFA for specific fuel consumption were retained; however, a new preprocessor was introduced in the HBEFA Expert version, which calculates the required model parameter values directly from the input data listed above. Thus, in the HBEFA Expert version, the model parameters for vehicle categories for which CO₂ monitoring and real consumption surcharges are available can be determined more quickly and easily; at the same time, the previous method, which is based on annual reduction rates and a base correction and thus corresponds more closely to the type of input data available, e.g. for future forecasts or vehicle categories without CO₂ monitoring, can continue to be used.

The real consumption surcharge, which was determined for Germany in the steps described above, was adjusted to the other HBEFA countries based on the assumption that the distribution of traffic situations differs between countries. Therefore, per fuel type and country, the ratio of the mileage-weighted average of the traffic situation-specific consumption of a PHEM average vehicle to the corresponding value from Germany was calculated, and the resulting adjustment factor was then multiplied by the annual real consumption surcharges.

The results of the fuel consumption update are available in HBEFA Version 4.1 published in September 2019. The comparison with HBEFA 3.3 for Germany published in 2017 shows that the reduction in specific final energy consumption with the new method is less significant than assumed in HBEFA 3.3. This is the result of better consideration of the increasing divergence over time between fuel consumption according to type testing and real consumption on the road.

Grey imports / exports

Grey fuel imports or exports refer to fuel purchased abroad and used domestically or vice versa. An estimation of these figures can be used to compare bottom-up modelled fuel consumption with top-down specific fuel sales or to verify or even calibrate the former against the latter.

The methods for determining grey fuel imports or exports, which were used in various studies from Germany, Austria and Switzerland, were analysed and evaluated with regard to their applicability for the calibration of real fuel consumption in TREMOD. The methods are either based on an extensive empirical approach and therefore involve a large effort (e.g. the econometric petrol station model), or they can only determine relative changes in the grey import / export quantities. The latter include, on the one hand, comparisons of fuel sales at comparable filling stations close to the border and in the heartland. Differences are explained by

grey imports / exports. On the other hand, models that estimate how grey imports or exports have changed on the basis of changes in price differences and cross-border traffic volumes are also included.

For Germany, data are only available according to the last method. The data are estimated within the framework of "Verkehr in Zahlen" but not published, due to concerns about data quality. The uncertainty of this method is quite high because its basis (2002 estimate) is very uncertain and because the method of extrapolation is rather qualitative.

A comparison of the "Verkehr in Zahlen" data with data from Austria and Switzerland has shown that the different methods produce different results by a factor of 2-4, which underlines the very high uncertainty of the estimates. From this we conclude that the data quality today is not sufficient to calibrate the consumption model. On the other hand, driving performance and specific consumption are also subject to relatively high uncertainties. It is therefore advisable to determine all the parameters individually from the bottom up and adjust them so that the overall balance is consistent and plausible. This requires increased coordination between the participating bodies (AG Energiebilanzen, DIW, DLR and ifeu).

Traffic volume structure and fuel consumption data in TREMOD

The methodology for determining fuel consumption developed in this project was implemented in HBEFA 4.1 and TREMOD Version 6. With the new fuel consumption data from HBEFA 4.1 and the updated traffic volume structure due to new driving performance data, the emission inventory was recalculated in TREMOD.

With the new methodology, the specific fuel consumption of passenger cars and light commercial vehicles is in some cases significantly higher than before. In all categories, the gap between the new values and the old values increases over time. The starting level in 2000 is higher for light commercial vehicles and diesel passenger cars than before, only slightly lower for petrol passenger cars. The difference is most marked for diesel-powered light commercial vehicles, whose level in 2000 is 20% higher than before and increases to 29% by 2017. In the case of diesel passenger cars, the starting level is 8 % higher in 2000. The difference temporarily decreases, increases again from 2010 and reaches a difference of 10% in 2017. In the case of petrol passenger cars, the starting level in 2000 is 3 % lower than before and 6 % higher in 2017. As expected, the improvement in energy efficiency by 2017 is therefore lower than previously.

With these key energy figures and the new traffic volume structure, the total energy consumption of road traffic in Germany is calculated and compared with the initial figures of the energy balance, with the following results:

- ▶ The fuel consumption of road traffic decreases in the time series from 2000 to 2017, while diesel consumption increases in the same period. The sales figures for both fuels are always lower than the domestic consumption calculated with the TREMOD model. The gap between sales and domestic consumption is increasing, especially in the years 2000 to 2008.
- ▶ In 2000, the calculation results for Germany and the sales figures for petrol and diesel were - coincidentally - at the same level. The deviation of the calculated domestic consumption increases continuously in the time series for petrol from 2000 to 2012 up to 17 %. It then falls to around 10% by 2017. For diesel, the deviation increases to more than 16% by 2008 and then decrease again to around 9%.

The fuel consumption calculated with the TREMOD model and the differences to the sales figures are plausible. DLR reports a similar difference in "Verkehr in Zahlen" for petrol and attributes this difference almost exclusively to grey imports. The difference in system boundaries between TREMOD and "Verkehr in Zahlen" (TREMOD includes total fuel consumption within national borders while "Verkehr in Zahlen" includes total fuel consumption by the resident population inside and outside of Germany's borders) is not relevant in this case since overall mileage of passenger cars within Germany's borders is almost the same as the overall mileage driven by German residents.

Diesel consumption reported in "Verkehr in Zahlen" and in TREMOD are not directly comparable due to the different system boundaries. TREMOD reports higher diesel consumption since the mileage of foreign HGVs in Germany is higher than the mileage of German HGV outside Germany. This also contributes to higher grey imports in the perspective taken by TREMOD.

It was not possible to compare and balance the calculation results from TREMOD with the amended data of the mineral oil statistics published in the course of 2019 and the work on taking into account the energy statistics adjustment in "Verkehr in Zahlen" 2019/2020. However, such a comparison should be carried out in 2020 and would be a good basis for the further development of the method for determining grey imports and exports.

1 Einleitung

Das Thema der standardisierten Bestimmung der CO₂-Emissionen aus neu zu gelassenen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge (LNF) und deren Vergleich mit realen Kraftstoffverbrauchswerten ist durch die Aktivitäten auf politischer Ebene (WLTP) aber auch durch Aktivitäten von NGO's in den letzten Jahren in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Beispielsweise weisen der International Council on Clean Transportation (ICCT) und der Allgemeinen Deutsche Automobil-Club (ADAC) darauf hin, dass bei neu zugelassenen Fahrzeugen die Differenz zwischen dem Verbrauchswert, gemessen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), und dem realen Kraftstoffverbrauch des Kunden auf der Straße in den letzten Jahren signifikant zugenommen hat. Hier stehen Differenzen von bis zu 40 % zur Diskussion.

Die zunehmende Abweichungen von Real- und Normverbrauch schwächen die Wirksamkeit der europäischen CO₂-Gesetzgebung zur Minderung der Verbrauchs- und CO₂-Werte der Pkw- und LNF-Neuwagenflotte. Darüber hinaus unterschätzen die verwendeten Eingangsdaten für Pkw und LNF den tatsächlichen Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen in den vom UBA genutzten Modellen HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) und TREMOD (Transport Emission Model). Denn die seit 2005 im Fahrzeugbetrieb erzielten Verbrauchsminderungen für Pkw und LNF wurden bisher mangels verlässlicher Daten in den beiden Modellen nur pauschal abgeschätzt.

Die Unterschätzung der Verbräuche von Pkw und LNF hat zudem auch eine Überschätzung der Verbräuche von schweren Nutzfahrzeugen (SNF), wie Lkw und Bussen, in TREMOD zur Folge. Denn der Gesamtverbrauch des Kfz-Verkehrs wird mit den Absatzmengen der jeweiligen Kraftstoffsorten in Deutschland (unter Berücksichtigung des Tanktourismus) abgeglichen, wobei der Absatz bisher mit plausiblen aber dennoch eher pauschalen Annahmen auf die einzelnen Fahrzeugsegmente aufgeteilt wurde.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer neuen Methode zur Ermittlung und Modellierung des realen Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen in den Modellen HBEFA und TREMOD sowohl für zurückliegende Jahre als auch für die Zukunft. Randbedingung war dabei, dass die neue Methode mit vertretbarem Aufwand jährlich fortgeschrieben werden kann, um die Daten der beiden Modelle zu aktualisieren.

Weiteres Ziel war die Aktualisierung des Emissionsinventars in TREMOD unter Berücksichtigung der grauen Kraftstoffim- und Exporte mit dem Ziel, ein konsistentes Gesamtgerüst von Inlandsverbrauch und Kraftstoffabsatz darzustellen. Dazu wurden verschiedene Untersuchungen zur Bestimmung der grauen Kraftstoffim- und exporte analysiert und mögliche Ansätze zur Berücksichtigung vorgeschlagen.

2 Ermittlung der realen Energieverbräuche

Um das Ziel, die realen Verbrauchswerte der Pkw in Deutschland mit den Daten im HBEFA möglichst exakt zu treffen, wurden folgende Arbeiten unternommen:

1. Analyse der Flottenverbrauchswerte aus verfügbaren statistischen Datensätzen
2. Kalibrierung der Eingabedaten für das Modell PHEM (z. B. Anpassungen bzgl. Fahrzeugbeladung, Seitenwind, Anteile Fahrten mit Anhängern etc.), um die Verbrauchswerte aus 1) zu treffen
3. Anpassung der Fahrverhaltensdaten im HBEFA, um die identifizierten Abweichungen zu beseitigen (Fahrzyklen und deren Anteil an den gesamten Fahrzeugkilometern in Deutschland)

Die dabei verwendeten Methoden sind nachfolgend beschrieben.

2.1 Divergenz zwischen Messungen im Labor und Realbetrieb

2.1.1 Übersicht der Datenquellen

Um die Diskrepanz zwischen offiziellen und realen Verbrauchswerten von europäischen Pkw zu ermitteln, wurden zwölf Datenquellen in Betracht gezogen. Vier dieser Datenquellen umfassen ebenfalls einen signifikanten Anteil an leichten Nutzfahrzeugen (LNF), deren Verhalten in dieser Studie gesondert ausgewertet wird. Tabelle 1 bietet einen Überblick über die wesentlichen Merkmale der untersuchten Datensets sowie eine Zusammenfassung ihrer Vor- und Nachteile.

Die Hälfte der Datensätze beinhaltet Realverbrauchsdaten die vorwiegend in Deutschland erfasst wurden, während die andere Hälfte aus anderen europäischen Ländern (Niederlande, Großbritannien und Frankreich) stammt. Zusammen betrachtet, decken die Datensets rund 1,4 Mio. Fahrzeuge ab, von denen ca. 660.000 in Deutschland registriert waren. Die Gesamtzahl an Fahrzeugen pro Modelljahr¹ schwankt zwischen etwa 68.000 und 114.000. Dabei umfasst die Mehrheit der Datensätze Pkw und LNF der Modelljahre um die frühen 2000er bis Modelljahr 2016.

Die Datensätze lassen sich nach der Art der Erhebung in vier Gruppen einteilen: Selbstauskunft der Fahrer via Webseite, automatische Datenerfassung via Tankkarte, Testfahrten zur Verbrauchsermittlung mit Nachtanken oder mittels Portable Emission Measurement Systems (PEMS) und Verbrauchsmessungen auf dem Rollenprüfstand. Darüber hinaus bildet die jährliche Erhebung zum Realverbrauch von Pkw des deutschen Mobilitätspanels eine gesonderte Kategorie. Im Rahmen dessen werden die Teilnehmer gebeten, für jeden Pkw ihres Haushalts ein Tankbuch über einen Zeitraum von acht Wochen auszufüllen. Das Deutsche Mobilitätspanel ist eine seit 1994 stattfindende Haushaltsbefragung zum Mobilitätsverhalten der in Deutschland lebenden Bevölkerung, die als Panelerhebung mit rotierender Stichprobe durchgeführt wird².

¹ Der Begriff Modelljahr wird hier als Sammelbegriff verwendet, der die verschiedenen Konventionen zur Datierung der erfassten Fahrzeuge umfasst. Die in diesem Bericht berücksichtigten Datenquellen verwenden vier verschiedenen Datierungskonventionen: Baujahr (das Jahr, in dem ein Fahrzeug gebaut wurde), Modelljahr (das Jahr, in dem eine neue Modellgeneration auf den Markt gebracht wurde), Testjahr (das Jahr, in dem ein Fahrzeug getestet wurde) und Flottenjahr (das Jahr, in dem ein Fahrzeug zu einer Flotte gehörte).

² Eine detaillierte Beschreibung der Methodik und der Stichprobenzusammensetzung des Mobilitätspanels sowie statistische Zusammenfassungen jedes Erhebungsjahres können aus der wissenschaftlichen Begleitung, die jährlich veröffentlicht, entnommen werden (siehe <https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/Downloads.php>).

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Datenquellen

Datenquellen mit Schwerpunkt Deutschland

	Spritmonitor	LeasePlan	ADAC EcoTest	AUTO BILD	auto motor und sport	Mobilitätspanel
Umfang des Datensets:						
Registrierte Nutzer	ca. 380.000	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Anzahl aller Fahrzeuge	ca. 550.000	ca. 100.000	ca. 1.500	ca. 2.000	ca. 1.900	ca. 7.000
Modelljahre	2001-2016	2006-2016	2002-2016	2008-2016	2003-2016	2001-2016
Anzahl gültiger Fahrzeuge p.a.	ca. 9.000	ca. 20.000	ca. 120	ca. 280	ca. 150	ca. 430
Art des Datensets:						
Art der Erhebung	Selbstauskunft via Webseite	Automatisch via Tankkarte	Labormessung	Testfahrt mit Nachtanken	Testfahrt mit Nachtanken	Selbstauskunft via Tankbuch
Geografische Abdeckung	Vorwiegend Deutschland	Vorwiegend Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland
Art der Fahrzeuge	Vorwiegend private Pkw	Vorwiegend Dienstwagen	Pkw	Pkw	Pkw	Vorwiegend private Pkw
Fahrweise	Realer Fahrbetrieb auf der Straße, freiwillige Angabe zum Fahrstil	Realer Fahrbetrieb, keine Angabe zum Fahrstil	Früher NEFZ, heute WLTC; mit geringen Modifikationen; teils PEMS	Testfahrt (155 km) auf standardisierter Route, professionelle Fahrer	Testfahrt auf standardisierter Route, professionelle Fahrer	Realer Fahrbetrieb, keine Angabe zum Fahrstil
Vergleich mit Typprüfwerten	Bei 2/3 nachträglich hinzugefügt	Bereits enthalten	Bereits enthalten	Bereits enthalten	Bereits enthalten	Nachträglich hinzugefügt
Betreiber	Fischl und Fischl (privat)	LeasePlan (kommerziell)	ADAC (kommerziell)	AUTO BILD (kommerziell)	AMS (kommerziell)	BMVI (gemeinnützlich)
Aktualisierung	Jährlich	Jährlich	Jährlich	Jährlich	Jährlich	Jährlich
Kosten f. jährliche Abfrage	ca. €5.000	Kostenlos	Geringe Gebühr für Forschungszwecke	Kostenlos	Kostenlos	Kostenlos
Fazit:						
Pro	Großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, laufende Aktualisierung, geringe Kosten	Großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, laufende Aktualisierung, geringe Kosten	Standardisiertes Testverfahren, laufende Aktualisierung, geringe Kosten, dauerhafte Fortführung relativ sicher	Standardisierte Route und Fahrstil, laufende Aktualisierung, geringe Kosten, dauerhafte Fortführung sicher	Standardisierte Route und Fahrstil, laufende Aktualisierung, geringe Kosten, dauerhafte Fortführung sicher	Repräsentativ für die deutsche Bevölkerung, geringe Kosten, dauerhafte Fortführung sicher
Contra	Keine Standardisierung, erfordert statistische Aufbereitung, dauerhafte Fortführung nicht garantiert	Vorwiegend Dienstwagen, keine Details zur statistischen Aufbereitung, dauerhafte Fortführung nicht garantiert	Geringer Datenumfang, mehrfache Änderung der Testbedingungen, Ausrollwerte laut Herstellerangabe	Geringer Datenumfang, selektive Auswahl der getesteten Fahrzeugmodelle	Geringer Datenumfang, selektive Auswahl der getesteten Fahrzeugmodelle	Keine Standardisierung, geringer Datenumfang

Datenquellen mit Schwerpunkt Ausland

	Travelcard	Honestjohn.co.uk	Allstar	Fiches-Auto.fr	Emissions Analytics	Cleaner Car Contracts (Niederlande)
Umfang des Datensets:						
Registrierte Nutzer	n/a	unbekannt	n/a	unbekannt	n/a	n/a
Anzahl aller Fahrzeuge	ca. 200.000	ca. 100.000	ca. 390.000	ca. 50.000	ca. 800	ca. 22.000
Modelljahre	2005-2016	2001-2016	2006-2015	20015-2016	2012-2016	2010-2016
Anzahl gültiger Fahrzeuge p.a.	ca. 25.000	ca. 6.500	ca. 2.000-48.000	ca. 1.500	ca. 170	ca. 3.000
Art des Datensets:						
Art der Erhebung	Automatisch via Tankkarte	Selbstauskunft via Webseite	Automatisch via Tankkarte	Selbstauskunft via Webseite	Testfahrt mit PEMS	Diverse, meist via Tankkarte
Geografische Abdeckung	Vorwiegend Niederlande	Vorwiegend Grossbritannien	Vorwiegend Grossbritannien	Vorwiegend Frankreich	Vorwiegend Grossbritannien	Vorwiegend Niederlande
Art der Fahrzeuge	Vorwiegend Dienstwagen	Vorwiegend private Pkw	Vorwiegend Dienstwagen	Vorwiegend private Pkw	Pkw und LNF	Pkw und LNF
Fahrweise	Realer Fahrbetrieb, keine Angabe zum Fahrstil	Realer Fahrbetrieb, keine Angabe zum Fahrstil	Realer Fahrbetrieb, keine Angabe zum Fahrstil	Realer Fahrbetrieb, keine Angabe zum Fahrstil	Testfahrt auf standardisierter Route, professionelle Fahrer	Realer Fahrbetrieb, keine Angaben zum Fahrstil
Vergleich mit Typprüfwerten	Bereits enthalten	Bereits enthalten	Bereits enthalten	Nachträglich hinzugefügt	Bereits enthalten	Bereits enthalten
Betreiber	Travelcard (kommerziell) & TNO (Forschung)	HonestJohn.co.uk Ltd (kommerziell)	Allstar (kommerziell)	Naudot Emilien (privat)	Emissions Analytics (kommerziell)	Zusammenschluss europäischer NGOs
Aktualisierung	Jährlich	Jährlich	Einmalig	Jährlich	Jährlich	Jährlich
Kosten f. jährliche Abfrage	Kostenlos	Kostenlos	Kostenlos	Kostenlos	Bislang kostenlos	Kostenlos
Fazit:						
Pro	Großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, laufende Aktualisierung, geringe Kosten	Großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, laufende Aktualisierung, geringe Kosten	Großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, geringe Kosten	Relativ großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, laufende Aktualisierung, geringe Kosten	Standardisierte Route und Fahrstil, laufende Aktualisierung, geringe Kosten, dauerhafte Fortführung sicher	Relativ großer Datenumfang, realer Fahrbetrieb, laufende Aktualisierung, geringe Kosten
Contra	Keine Standardisierung, nur bedingt Details zur statistische Aufbereitung, dauerhafte Fortführung nicht garantiert	Keine Standardisierung, erfordert statistische Aufbereitung, dauerhafte Fortführung nicht garantiert	Keine Standardisierung, erfordert statistische Aufbereitung, viele fehlerhafte Einträge, dauerhafte Fortführung nicht möglich	Keine Standardisierung, erfordert Textmining sowie statistische Aufbereitung, dauerhafte Fortführung nicht garantiert	Geringer Datenumfang, selektive Auswahl der getesteten Fahrzeugmodelle	Keine Standardisierung, erfordert statistische Aufbereitung, begrenzter Datenzugang, dauerhafte Fortführung nicht garantiert

Es wurden insgesamt zwölf Datenquellen für eine nähere Untersuchung in Betracht gezogen. Hiervon liegt der Schwerpunkt von sechs Datenquellen (Spritmonitor, LeasePlan, ADAC EcoTest, AUTO BILD, auto motor und sport, sowie Mobilitätspanel) eher auf Deutschland, sowie von sechs weiteren Datenquellen (Travelcard, Honestjohn.co.uk, Allstar, Fiches-Auto.fr, Emissions Analytics, sowie Cleaner Car Contracts) eher auf dem Ausland.

Knapp die Hälfte der betrachteten Fahrzeuge wurde über die Webseiten Spritmonitor.de, HonestJohn.co.uk und Fiches-Auto.fr erfasst, die jeweils ihren Nutzern ermöglichen, Online-Tankbücher kostenlos zu führen. Die übrige Hälfte bilden Fahrzeuge, deren Verbrauch mittels Tankkarte erfasst wurde. Während in die oben genannten Webseiten vorwiegend Daten aus privaten Fahrzeugen eingepflegt werden, werden Tankkarten hauptsächlich für Dienstwagenflotten eingesetzt. Ansonsten machen sowohl die im Mobilitätspanel erfassten Pkw als auch diejenigen Fahrzeuge, deren Verbrauch entweder mit PEMS oder im Labor ermittelt wurde, jeweils etwa 0,5% der Gesamtprobe aus.

Vorteilhaft bei allen untersuchten Online-Plattformen, insbesondere bei der deutschen Spritmonitor.de und der britischen HonestJohn.co.uk, ist ihr großer Umfang an realen Verbrauchsdaten, die laufend aktualisiert und zu geringen Kosten zur Verfügung gestellt werden. Spritmonitor.de umfasst als größte Datenquelle etwa 550.000 Fahrzeuge. Außerdem enthält die deutsche Webseite als einzige Quelle Angaben zum Fahrstil auf Basis einer freiwilligen Selbsteinschätzung. Die Erfassung der Verbrauchsdaten ist allerdings bei keinen der drei Plattformen standardisiert und ihre Nutzung erfordert eine statistische Aufbereitung. Daten aus der französischen Webseite Fiches-Auto.fr müssen zusätzlich zunächst mittels Text Mining vorbereitet werden. Eine dauerhafte Fortführung dieser drei Datensätze ist nicht garantiert.

Ähnlich sieht es bei den Datensets der hier betrachteten Tankkartenanbietern LeasePlan, Travelcard und Allstar aus: alle drei stellen kostenfrei ein hohes Datenvolumen zur Verfügung, das, mit Ausnahme von Allstar, stets aktualisiert wird³. Von Nachteil ist jedoch, dass die Datenerfassung ebenfalls keinem standardisierten Verfahren folgt und ihre Fortsetzung nicht garantiert bzw. im Fall von Allstar nicht möglich ist. Zudem werden LeasePlan- und Travelcard-Daten mit relativ wenigen Detailinformationen übermittelt, sodass eine tiefergehende statistische Analyse nur bedingt möglich ist. Darüber hinaus liefert die niederländische Initiative Cleaner Car Contracts – ein Zusammenschluss von Umwelt-NGOs und Leasingunternehmen – Verbrauchsdaten, die via Tankkarten oder Tankbücher in Papierform erfasst werden und mit ähnlichen Vor- und Nachteilen wie die Daten der drei genannten Tankkartenanbietern verbunden sind. Allerdings ist der Aufwand für die Aufbereitung der Daten aus Cleaner Car Contracts vergleichsweise aufwändig, da ihr Umfang deutlich kleiner ist, als im Fall der führenden Tankkartenanbieter.

Des Weiteren umfassen die vom Mobilitätspanel zur Verfügung gestellten Kraftstoffverbrauchsdaten zwar eine vergleichsweise kleine Stichprobe von Pkw, diese kann aber als repräsentativ für die Pkw-Nutzung der in Deutschland lebenden Bevölkerung betrachtet werden. Damit bietet das Mobilitätspanel ein Alleinstellungsmerkmal. Aufgrund der inhaltlichen Relevanz und des langen Durchführungszeitraums des Panels kann von seiner dauerhaften Fortführung ausgegangen werden. Zudem werden die Daten über die Clearingstelle für Verkehr der DLR kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Erfassung der Daten ist jedoch nicht standardisiert und ihre Auswertung erfordert eine statistische Aufbereitung.

Demgegenüber umfassen die übrigen vier Datensätze jeweils nur eine geringe Anzahl an Fahrzeugen, die selektiv für Verbrauchs- und teilweise auch Abgasemissionsmessungen ausgewählt und nach standardisierten Verfahren getestet werden. Verantwortlich für diese Datensets sind zwei deutsche Autozeitschriften (Auto Bild und auto motor und sport), die britische Firma Emissions Analytics und der deutsche Verkehrsclub ADAC.

³ LeasePlan wird, laut eigenen Angaben, aus datenschutzrechtlichen Gründen vorerst keine neuen Daten für eine Auswertung zur Verfügung stellen.

Die Zeitschriften Auto Bild und auto motor und sport führen Straßentests im Umfang von etwa 280 bzw. 150 Pkw pro Jahr durch. Zur Ermittlung des realen Verbrauchs werden die Testfahrzeuge vor und nach der Testfahrt vollgetankt. Dagegen ermittelt Emissions Analytics den CO₂-Ausstoß der Testfahrzeuge mittels PEMS. Die Firma testet insgesamt rund 170 Pkw und LNF jährlich. Bisher wurden die Messergebnisse der drei Unternehmen kostenlos zur Verfügung gestellt. Zudem beabsichtigen alle drei ihre Messaktivitäten dauerhaft fortzuführen.

Der ADAC EcoTest stellt die einzige Datenquelle dar, die laborbasierte Verbrauchsmessungen liefert und zwar im Umfang von ca. 120 Pkw pro Jahr. Getestet wird auf dem Rollenprüfstand unter Verwendung von Ausrollwerten laut Herstellerangabe. Die Messungen erfolgen weitestgehend in den Zulassungszyklen. Früher wurde nach NEFZ getestet und seit wenigen Jahren nach WLTP (WLTC). Seit 2016 werden Fahrzeuge, die sich im Labor als besonders effizient erweisen, zusätzlich mit PEMS auf der Straße geprüft. Da ADAC die Testbedingungen über den Jahren mehrfach geändert hat, sind die Daten verschiedener Modelljahre nur bedingt vergleichbar. Die dauerhafte Fortführung des ADAC EcoTests gilt als relativ sicher.

Jede der hier betrachteten Datenquellen bringt somit Vor- und Nachteile mit sich, welche in Tabelle 1 nochmals unter dem Punkt "Pro/Contra" zusammengefasst sind. Für eine tiefergehende Analyse der Einschränkungen der diversen Datenquellen wird auf (Tietge et al., 2016) sowie (Tietge et al., 2017) verwiesen. Folgende zwei sind hier jedoch hervorzuheben. Erstens basieren Verbrauchsdaten aus Online-Plattformen auf Eigenangaben der registrierten Fahrer, was eine Verzerrung der Stichprobe durch Selbstselektion verursachen kann. Zweitens stammen die Daten der Tankkartenanbieter vorwiegend aus Dienstwagen, die gegebenenfalls anders (z. B. häufiger mit höherer Geschwindigkeit) als Privatwagen gefahren werden. Dies bedeutet keine Verzerrung bei der Abschätzung des Realverbrauchs solcher Fahrzeuge, sondern vielmehr, dass die Ergebnisse nicht unmittelbar auf Privatwagen übertragen werden können.

Zuletzt sollte noch vermerkt werden, dass die Verbrauchstypprüfwerte der einzelnen Fahrzeuge, die als Referenz zur Berechnung der Divergenz notwendig sind, in allen Datensätzen enthalten sind, außer in Spritmonitor.de, Fiches-Autos.fr und im Mobilitätspanel. Im Ersteren wird zwar den Nutzern nahegelegt, den Typprüfwert einzugeben. Dieser ist aber nur bei etwa einem Drittel der Fahrzeuge vorhanden. Im Fall von diesen Datensets müssen die Typprüfwerte dementsprechend nachträglich hinzugefügt werden.

2.1.2 Vergleich mit Flottenmerkmalen

Im Folgenden werden die zwei umfangreichsten deutschen Datensets – Spritmonitor.de und LeasePlan – sowie der repräsentative Datensatz des Mobilitätspanels der Zusammensetzung der Neuwagenflotte in Deutschland über die Jahre 2001 bis 2016 bzw. im Fall von LeasePlan 2011 bis 2016 gegenübergestellt. Hierzu sollte betont werden, dass Spritmonitor.de und Mobilitätspanel vorwiegend Daten zu privaten Pkw enthalten, während LeasePlan hauptsächlich Dienstwagen abdeckt. Die ersten beiden umfassen ca. 9.000 bzw. etwa 430 Fahrzeuge pro Modelljahr und LeasePlan um die 20.000 Fahrzeuge pro Modelljahr.

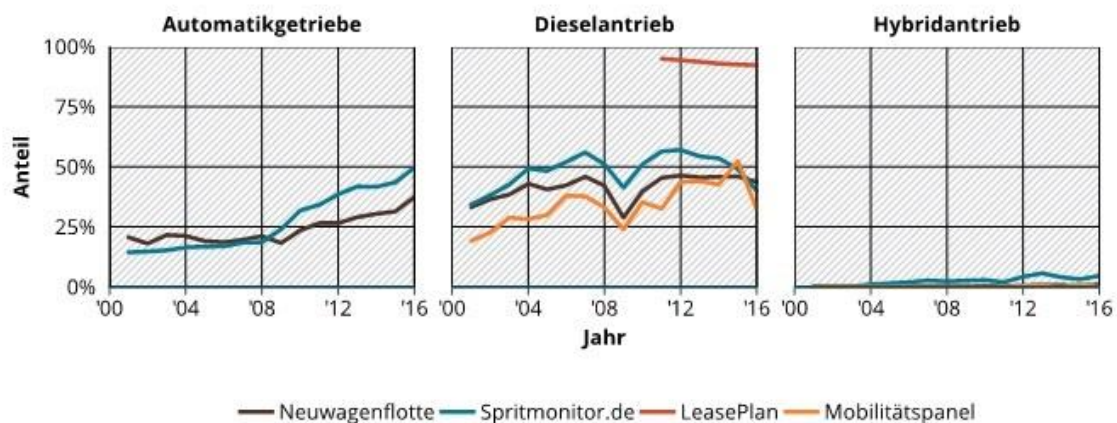
2.1.2.1 Anteil von Getriebe- und Antriebsarten

In Abbildung 2 werden zunächst die Anteile von Fahrzeugen mit Automatikgetriebe sowie die Anteile von Diesel- und Hybridantrieben über die vier Datensätze hinweg verglichen. Analog dazu zeigt Abbildung 3 und Abbildung 4 jeweils einen Vergleich der Anteile von einzelnen Fahrzeugsegmenten und von den populärsten Automarken.

Wie Abbildung 2 zeigt, spiegelt sich die seit Modelljahr 2008 wachsende Popularität von Fahrzeugen mit Automatikgetriebe in Spritmonitor.de wider. Allerdings sind Fahrzeuge mit Automatikgetriebe ab Modelljahr 2009 in der Online-Plattform überrepräsentiert. LeasePlan und Mobilitätspanel enthalten keine Information zur Getriebeart der Fahrzeuge, sodass ein Vergleich nicht möglich ist.

Auch bezüglich der Verteilung von Diesel- und Hybridantrieben folgt Spritmonitor.de der Marktentwicklung weitestgehend, obwohl beide Antriebsarten in so gut wie allen Modelljahren überrepräsentiert sind. Bei Dieselwagen liegt Spritmonitor.de bis zu ca. 13 Prozentpunkte über dem Dieselanteil der Neuwagenflotte. Des Weiteren ist der Hybridanteil auf der Webseite durchgehend höher als bei den deutschen Neuzulassungen, besonders in den letzten Jahren mit einem Höhepunkt von nahezu fünf Prozentpunkten Unterschied im Modelljahr 2013. Mobilitätspanel zeigt ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit dem Markttrend. Jedoch sind hier Dieselmotoren insbesondere in den früheren Modelljahren unterrepräsentiert. Ansonsten weicht der Hybridanteil nur geringfügig vom Marktanteil ab. Dagegen ist LeasePlan hinsichtlich der Antriebsarten vom Markttrend entkoppelt: Dieselwagen machen durchgehend über 90% der Stichprobe aus und Hybridantriebe wurden aufgrund ihrer geringen Anzahl nicht gesondert aufgetragen.

Abbildung 2: Anteil von Getriebe- und Antriebsarten



Anteil von Fahrzeugen mit Automatikgetriebe, Dieselantrieb, bzw. Hybridantrieb an der Pkw-Neuwagenflotte in Deutschland zwischen 2001 und 2016. Im Vergleich dazu die entsprechenden Anteile von Fahrzeugen in den Datenquellen Spritmonitor.de, LeasePlan und Mobilitätspanel.

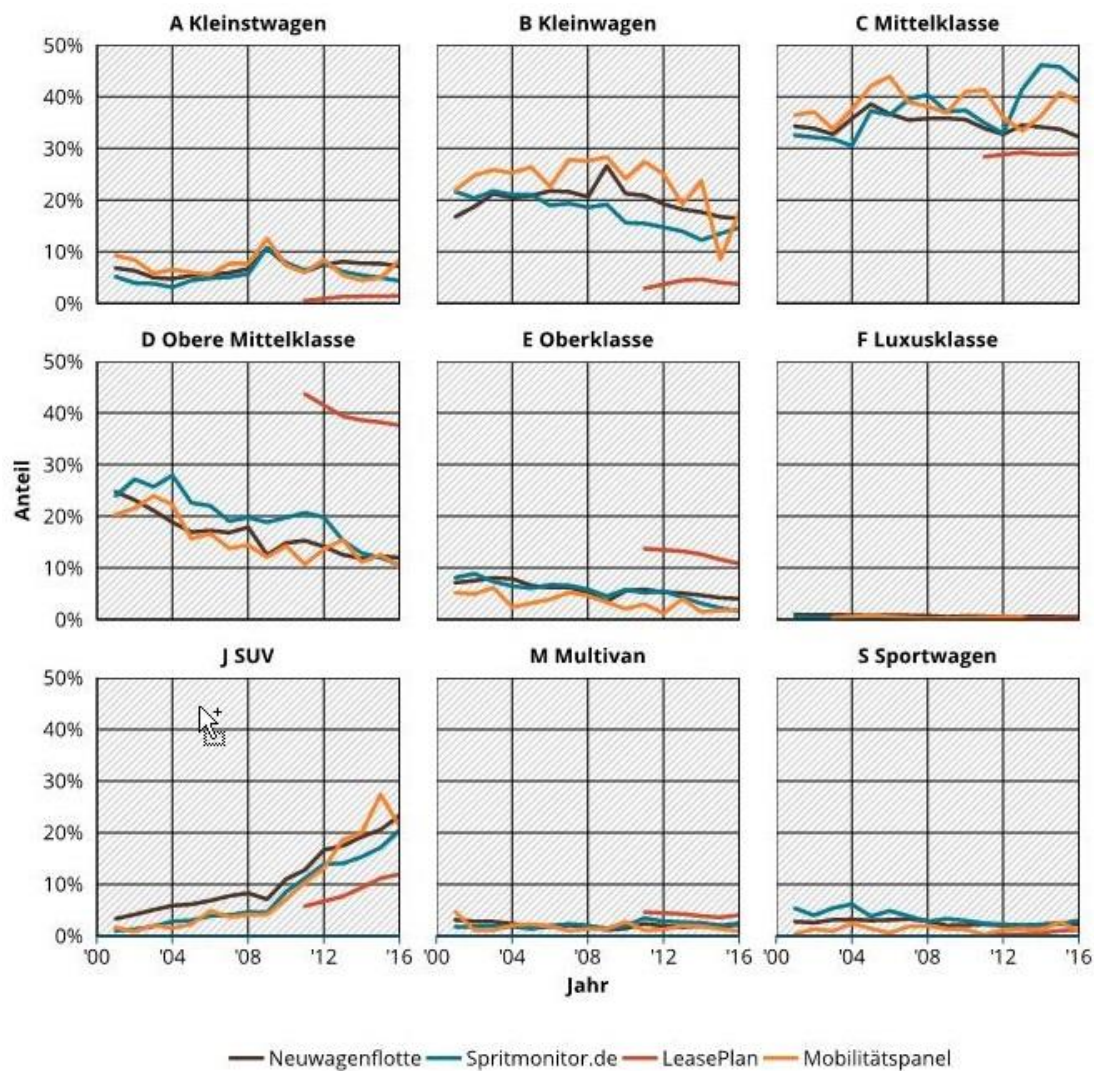
2.1.2.2 Anteil von Fahrzeugsegmenten

Abbildung 3 zeigt, dass die Segmentverteilung von Spritmonitor.de die Verteilung der deutschen Neuwagenflotte durchgehend recht gut widerspiegelt. Pkw der Mittelklasse sind sowohl bei den Neuzulassungen als auch in Spritmonitor mit kontinuierlich über 30% Anteil am populärsten. Insbesondere seit Modelljahr 2012 ist jedoch die Mittelklasse überrepräsentiert und zwar mit einem Unterschied zur Neuwagenflotte von bis zu 12 Prozentpunkten. Auch die Obere Mittelklasse ist in Spritmonitor etwas häufiger vertreten als bei der Neuwagenflotte. Dagegen sind Kleinstwagen und Kleinwagen aber auch SUVs tendenziell unterrepräsentiert, obwohl der Unterschied zum Sollwert bei maximal sieben Prozentpunkten liegt. Die restlichen Segmente bilden jeweils unter 10% der Neuzulassungen und ihre Anteile in Spritmonitor.de entsprechen weitestgehend der Neuzulassungsverteilung.

Im Fall von Mobilitätspanel ist zunächst zu bemerken, dass die sprunghafte Entwicklung der Segmentanteile auf den relativ kleinen Umfang des Datensatzes zurückzuführen ist. Dementsprechend wäre ein detaillierter Vergleich der Mobilitätspanel- und der Neuwagenflotte nach Segment nicht aussagekräftig. Generell ist allerdings zu beobachten, dass die Segmentverteilung der beiden Flotten grundsätzlich parallel verläuft. Die bedeutsamsten Unterschiede lassen sich bei den Kleinwagen und der Mittelklasse feststellen, die tendenziell überrepräsentiert sind, sowie bei der Oberklasse und den SUVs, die leicht unterrepräsentiert sind.

Bei LeasePlan sind die kleinsten Segmente erwartungsgemäß unterrepräsentiert. Dennoch macht die Mittelklasse auch hier etwa 30% der Flotte aus und wird nur von der Oberen Mittelklasse übertroffen. Diese ist erheblich überrepräsentiert, ihr Anteil liegt bei durchschnittlich 26 Prozentpunkten über dem Sollwert. Zusammen betrachtet, decken die Mittelklasse und die Obere Mittelklasse im Schnitt etwa 68% der LeasePlan-Flotte ab (versus 47% bei den Neuzulassungen). Auch die Oberklasse ist populärer in der LeasePlan-Flotte als bei den Neuzulassungen. Sie macht im Schnitt ca. 13% der Fahrzeuge aus, während nur 5% der neuzugelassenen Pkw der Oberklasse gehören. SUVs erfreuen sich auch in der LeasePlan-Flotte wachsender Beliebtheit, sind jedoch deutlich seltener vertreten als in der neuen Pkw-Flotte. Ansonsten sind Multivans leicht überrepräsentiert und Sportwagen sowie die Luxusklasse leicht unterrepräsentiert.

Abbildung 3: Anteil von Fahrzeugsegmenten



Anteil von Fahrzeugen nach Segmenten, für die Pkw-Neuwagenflotte in Deutschland zwischen 2001 und 2016. Im Vergleich dazu die entsprechenden Anteile von Fahrzeugen in den Datenquellen Spritmonitor.de, LeasePlan und Mobilitätspanel.

2.1.2.3 Anteil von Herstellermarken

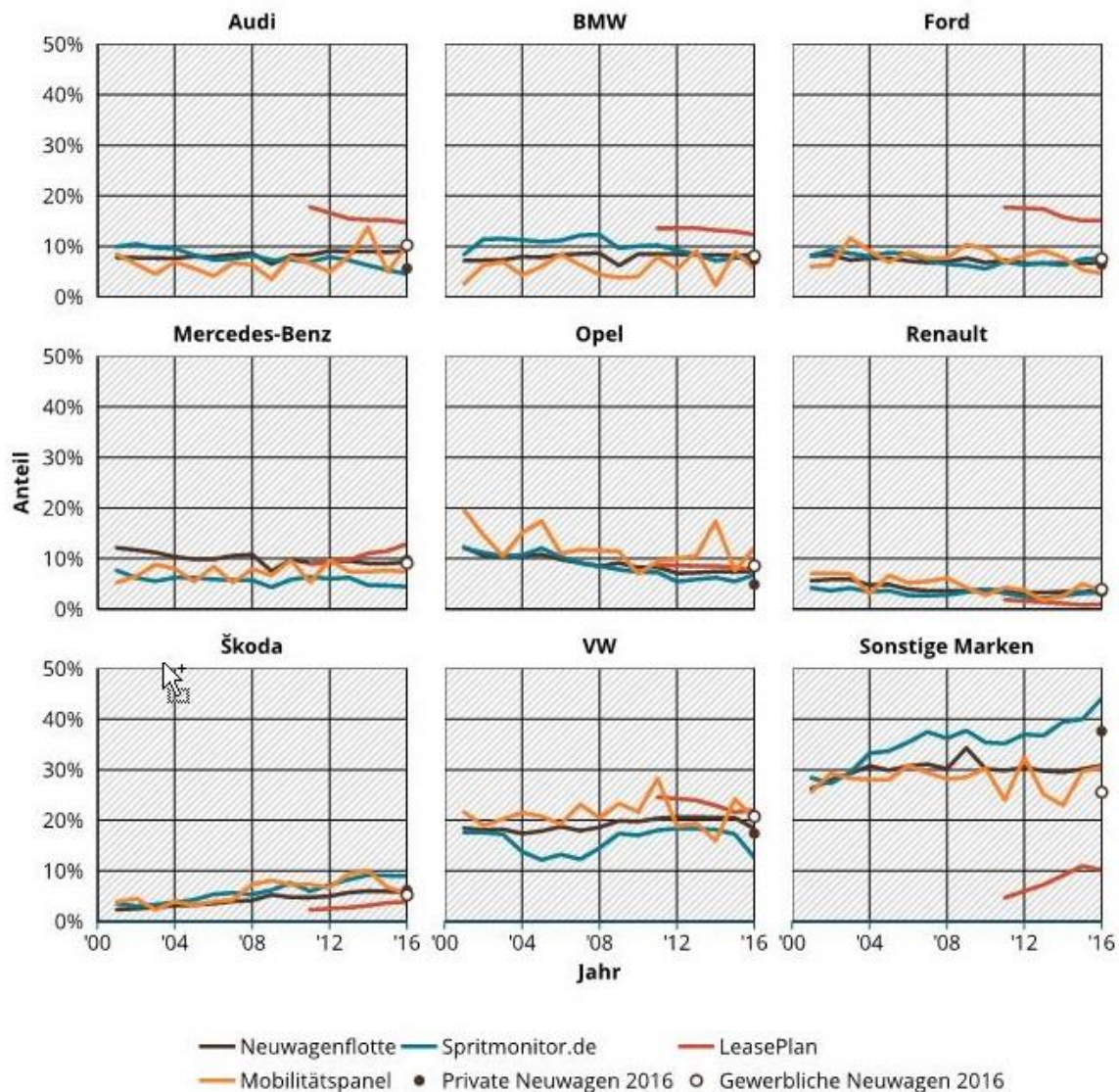
Wie Abbildung 4 zeigt, gibt es bei der Verteilung der Mehrheit der Marken (Audi, BMW, Ford, Opel und Renault) nur leichte Abweichungen zwischen Spritmonitor.de und der Neuwagenflotte. Die Marken Mercedes-Benz und VW sind dagegen durchlaufend eindeutig unterrepräsentiert, auch wenn Spritmonitor.de die Entwicklung ihrer Neuzulassungszahlen weitestgehend widerspiegelt. Schließlich sind Skoda und insbesondere die sonstigen Marken zunehmend überrepräsentiert. Die Grafik zeigt zudem, wie hoch die Anteile von privaten und gewerblichen Neuzulassungen je nach Marke im Modelljahr 2016 ausfallen. Dies ermöglicht aussagekräftigere Vergleiche: Wird der Spritmonitor.de Datensatz ausschließlich mit den privaten Neuwagen verglichen, verringern sich tendenziell die Abweichungen. Das trifft besonders auf Fahrzeuge der Marke Audi und der sonstigen Marken zu.

Auch hinsichtlich der Pkw-Marken stimmt die Verteilung des Mobilitätspanels mit der Struktur der deutschen Neuwagenflotte stark überein. Premiumhersteller wie Audi, BMW und Mercedes-

Benz sind allerdings erwartungsgemäß eher leicht unterrepräsentiert. Dagegen sind populärer deutsche Marken wie VW, Opel und Škoda im Mobilitätspanel verbreiteter als unter den Neuzulassungen. Wie bereits oben erwähnt, hängt das sprunghafte Verhalten der Mobilitätspanel-Werte mit der kleinen Stichprobe zusammen.

LeasePlan zeigt auch in Hinsicht auf die Verteilung der Automarken eine gewisse Entkopplung von der Marktentwicklung. Allerdings liegen die Unterschiede zwischen den Anteilen von den meistverkauften Marken bei der LeasePlan-Flotte versus der Neuwagenflotte bei unter fünf Prozentpunkten, mit Ausnahme von Audi und Ford. Beide Marken sind deutlich häufiger vertreten in LeasePlan als in der neuen Pkw-Flotte. Jedoch bleibt VW die populärste Marke in LeasePlan, wie unter den Neuzulassungen. Der bedeutsamste Unterschied ergibt sich bei den sonstigen Marken, deren Anteil bei LeasePlan maximal 10% ausmacht, während sie etwa 30% der neuzugelassenen Pkw bilden. Ein Vergleich der LeasePlan-Verteilung zur Verteilung der gewerblichen Neuwagen nach Marke im Modelljahr 2016 legt dar, dass die Abweichungen vom Sollwert sich bei allen Automarken verringern. Jedoch bleibt im Fall der sonstigen Marken einen erheblichen Unterschied von rund 15 Prozentpunkten bestehen.

Abbildung 4: Anteil von Herstellermarken



Anteil von Herstellermarken für die Pkw-Neuwagenflotte in Deutschland zwischen 2001 und 2016. Im Vergleich dazu die entsprechenden Anteile von Fahrzeugen in den Datenquellen Spritmonitor.de, LeasePlan und Mobilitätspanel.

2.1.3 Methodik

Bei der Analyse aller Datenquellen wurde methodisch wie folgt vorgegangen. Für die Segmentzuordnung wurde die Datenbank des statistischen ICCT-Jahrbuchs (siehe ICCT, 2018), zugrunde gelegt. Hierbei wurden lediglich die Segmentnamen ins Deutsche übersetzt. In diesem Zusammenhang wurden LNF in Pick-ups (z. B. VW Amarok), Hochdachkombis (z. B. VW Caddy), Kastenwagen (z. B. VW Transporter) und sonstige Segmente unterteilt. Bei der Analyse von Pkw wurden LNF-ähnliche Pkw generell ausgeschlossen, da diese Fahrzeuge nicht eindeutig als Pkw (M1) oder LNF (N1) eingeordnet werden können.

Die Analyse berücksichtigt konventionelle Otto- und Dieselfahrzeuge sowie Mild- und Vollhybride der Baujahre 2001 und jünger. Plug-in-Hybride und andere Treibstoffe (z. B. CNG) wurden aufgrund mangelnder Menge und Qualität der Daten ausgeschlossen.

Die Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten wurde in allen Datenquellen wie folgt berechnet:

$$Divergenz = \frac{Realwert}{Typprüfwert} - 1$$

Sämtliche CO₂-Emissions-Typprüfwerte für die Berechnung der Divergenz beruhen auf dem NEFZ. In einigen Datenquellen (z. B. Spritmonitor.de) wurde eine Umrechnung von Verbrauchs- in CO₂-Emissionswerte benötigt. Dabei wurden Emissionswerte pro Liter Treibstoff in Höhe von 2.334 g CO₂/l für Benzin und 2.684 g CO₂/l für Diesel angewendet.

Anschließend werden methodische Besonderheiten der einzelnen Datenquellen zusammengefasst. Im Fall ADAC wurde die Divergenz zwischen folgenden vier CO₂-Werten und dem NEFZ-Typprüfwert untersucht: das Ergebnis des ADAC EcoTest, das Messergebnis eines NEFZ-Tests mit kaltem Motor, das Messergebnis eines WLTC-Tests mit warmem Motor und das Ergebnis des ADAC Autobahnzyklus. Hierzu ist anzumerken, dass das EcoTest-Ergebnis einer Gewichtung mehrerer Tests entspricht. In der dritten und bislang gültigen Testversion, die im September 2016 eingeführt wurde, berechnet sich der EcoTest-CO₂-Wert zu 70% aus der gemittelten Summe von WLTC kalt und WLTC heiß und zu 30% aus dem Ergebnis des ADAC Autobahnzyklus.

Bezüglich der Analyse von Spritmonitor-Daten ist Folgendes hervorzuheben. Sämtliche LNF-ähnliche Fahrzeuge wurden der LNF-Kategorie zugeordnet. Des Weiteren wurden bei der Berechnung der Divergenz der LNF ausschließlich die von Spritmonitor-Nutzern angegebenen Typprüfwerte verwendet. Im Gegensatz dazu wurden in der Pkw-Analyse Typprüfwerte aus der oben genannten ICCT-Datenbank ergänzt und für die Analyse verwendet. Ansonsten wurden ausländische Fahrzeuge, Fahrzeuge mit weniger als 1.500 eingetragenen Kilometern sowie Ausreißer - unter Verwendung der standardisierten Peirce's Criterion Methodik - von der Auswertung ausgeschlossen.

Bei der Auswertung der Mobilitätspanel-Daten wurden LNF-ähnliche Fahrzeuge ausgeschlossen. Ansonsten wurden Pkw-Typprüfwerte aus der oben genannten ICCT-Datenbank hinzugefügt und für die Berechnung der Divergenz zugrunde gelegt. Fahrzeuge, die einem Typprüfwert nicht zugeordnet werden konnten, wurden von der Analyse ausgeschlossen.

Im Fall von LeasePlan wurden die Rohdaten bereits vom Datenerheber eindeutig in Pkw und LNF unterteilt. Um einen aussagekräftigen Vergleich mit anderen Datenquellen zu ermöglichen, wurden dennoch LNF-ähnliche Fahrzeuge aus dem Pkw-Datensatz entfernt.

2.1.4 Ergebnisse

Abbildung 5 stellt die Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen offiziellen und realen CO₂-Emissionswerten der deutschen Datensätze LeasePlan, Spritmonitor.de, Mobilitätspanel und ADAC EcoTest dar. Auch wenn die Datenerfassung auf unterschiedlichen Wegen erfolgte, zeigen alle vier Datenquellen auf, dass der Realverbrauch im Laufe der letzten Jahre zunehmend vom Typprüfwert abwich. Zudem weist die Divergenz in den vier Fällen eine nahezu gleiche Steigung auf.

Wie in Abbildung 5 ersichtlich wird, weichen die Divergenzwerte von Spritmonitor.de nur geringfügig von denjenigen des Mobilitätspanels ab. Allerdings ist beim Letzteren das 95-prozentige Konfidenzintervall deutlich sichtbar, was auf die geringe Anzahl von Fahrzeugen pro Modelljahr zurückzuführen ist. Beide Quellen decken eine Zeitspanne von 16 Jahren ab und

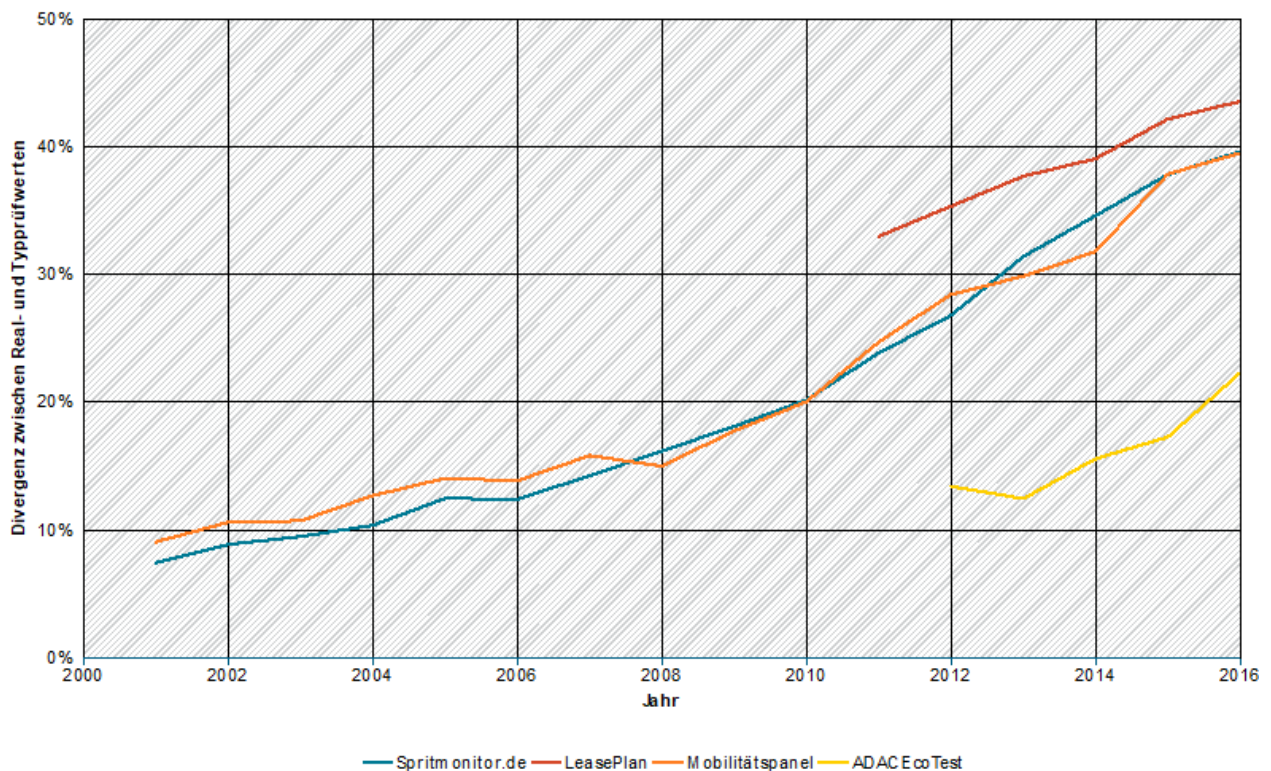
erlauben somit eine Analyse der Entwicklung der Divergenz vor und nach der Einführung der EU-CO₂-Emissionsstandards für neue Pkw im Jahr 2009. Wie Abbildung 5 zeigt, erreichte die Abweichung im Jahr 2016 einen Wert von 40% und war damit mehr als fünfmal so groß wie im Jahr 2001. Bis zum Jahr 2009 ist eine relativ langsame Zunahme zu beobachten. Während der ersten Phase der CO₂-Standards, ab dem Jahr 2009 bis zum Jahr 2015, das erste Zieljahr der Regulierung, nahm die Abweichung dagegen rasch zu. Im Jahr 2016 verlangsamte sich das Wachstum der Divergenz wieder.

Die Dienstwagen-Flotte von LeasePlan zeichnet sich durch die höchsten Abweichungswerte aus. Die durchschnittliche Abweichung stieg von rund 33% im Jahr 2011 auf knapp 44% im Jahr 2016 an. Die höheren Werte sind darauf zurück zu führen, dass LeasePlan-Fahrzeuge weniger kraftstoffsparend gefahren werden als private Pkw. Zum einen übernehmen die Arbeitgeber in der Regel die Kraftstoffkosten für LeasePlan-Fahrer. Zum anderen werden die Fahrzeuge laut LeasePlan typischerweise für lange Strecken auf der deutschen Autobahn eingesetzt, wo bislang kein generelles Tempolimit gilt. LeasePlan-Fahrer überschreiten oft 130 km/h, bei denen die CO₂-Emissionen drastisch ansteigen.

Am unteren Ende des Spektrums befindet sich der laborbasierte ADAC EcoTest. Dies erklärt sich durch die methodische Anlehnung vom EcoTest an den offiziellen Prüfzyklus. Dennoch stieg die Divergenz zwischen den EcoTest-Ergebnissen und den offiziellen Prüfwerten von 15% im Jahr 2012 auf 24% im Jahr 2016 an, ohne dass sich die Testmethoden von ADAC in dieser Zeit verändert haben⁴. Wie im Fall des Mobilitätspanels, ist hier das 95-prozentige Konfidenzintervall aufgrund der kleinen Anzahl an Testfahrzeugen pro Jahr bemerkbar.

⁴ In dem Zeitraum von April 2012 bis August 2016 wurden für die Berechnung der EcoTest-CO₂-Bewertung die CO₂-Messwerte aus dem NEFZ-Test mit kaltem Motor und dem WLTP-Test gemittelt. Dieser gemittelte Wert wurde dann mit 70% und der Wert aus dem ADAC Autobahnzyklus mit 30% gewichtet (siehe https://www.adac.de/_mmm/pdf/27473_118924.pdf)

Abbildung 5: Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für vier deutsche Datenquellen

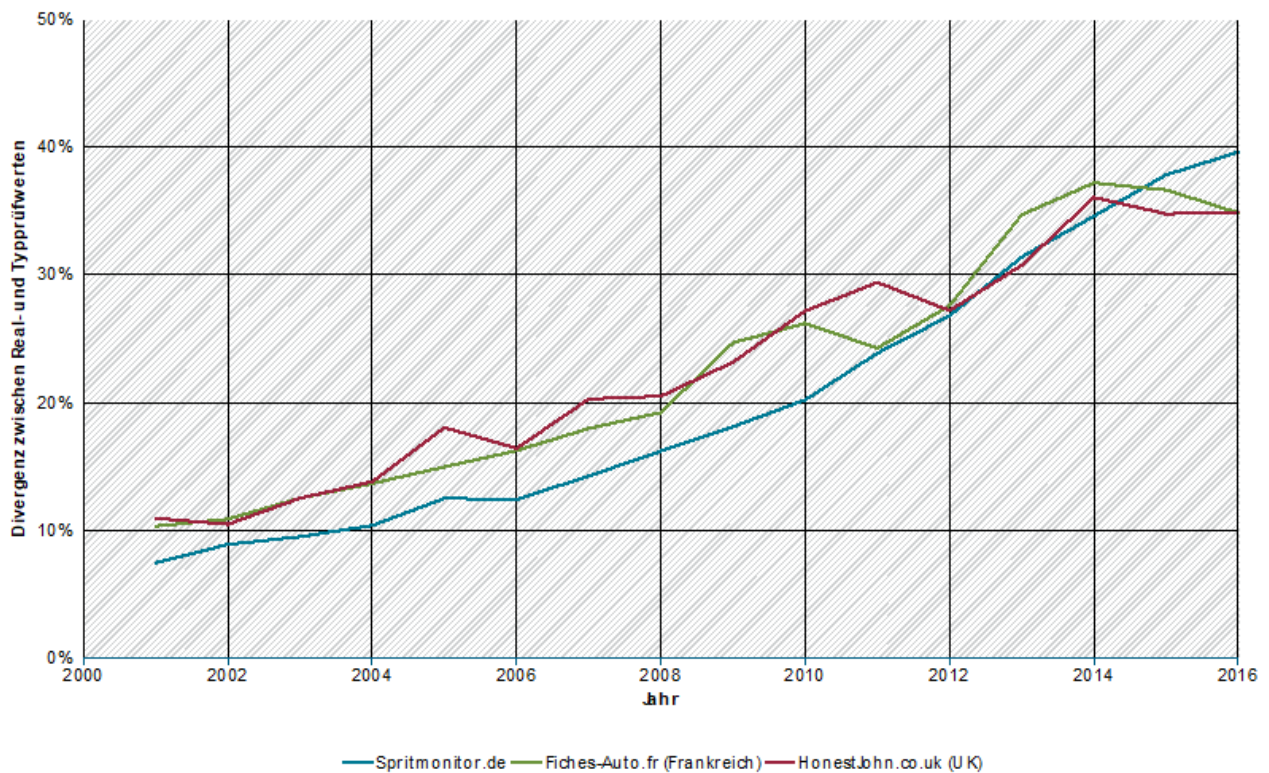


Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den realen Alltagswerten der vier Datenquellen Spritmonitor.de, LeasePlan, Mobilitätspanel, sowie ADAC EcoTest, für die Jahre 2001 bis 2016.

Abbildung 6 präsentiert einen Vergleich der Entwicklung der Divergenz über die drei hier betrachteten Online-Plattformen zur Erfassung von realen Verbrauchsdaten hinweg. Obwohl jede der Plattformen aus einem anderen Land stammt (Spritmonitor.de aus Deutschland, Fiches-Auto.fr aus Frankreich, HonestJohn.co.uk aus Großbritannien), weisen alle drei ein ähnliches Entwicklungsmuster auf.

Während die Datierung der Spritmonitor.de-Fahrzeuge auf Grundlage des Baujahrs erfolgt, wird bei HonestJohn.co.uk und Fiches-Auto.fr das Modelljahr verwendet. Im Vergleich zum Baujahr führt die Verwendung des Modelljahres zu einer weniger gleichmäßigen Verteilung der Einträge, was teilweise den sprunghaften Trend der Divergenzwerte aus HonestJohn.co.uk und Fiches-Auto.fr erklärt. Zudem ist der Stichprobenumfang der britischen und insbesondere der französischen Webseite in den letzten Jahren relativ klein, was sich in der Breite des Konfidenzintervalls widerspiegelt. Die Stichprobe von Fiches-Auto.fr ging von knapp 590 Fahrzeuge im Jahr 2013 auf rund 110 Fahrzeuge im Jahr 2016 zurück. Demgegenüber umfasst Spritmonitor.de durchlaufend über 6.000 Fahrzeuge pro Jahr.

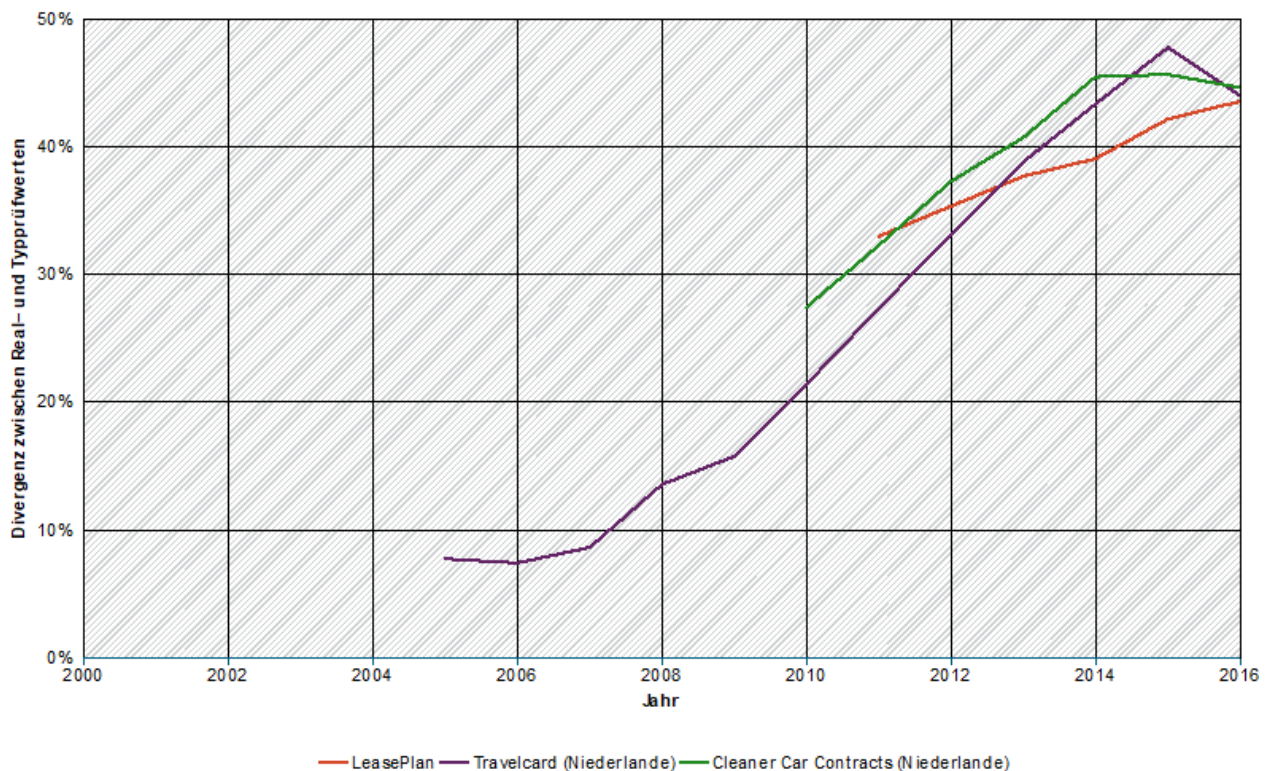
Abbildung 6: Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für drei europäische Onlineplattformen



Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den realen Alltagswerten der drei Datenquellen Spritmonitor.de (Deutschland), Fiches-Auto.fr (Frankreich), sowie HonestJohn.co.uk (Großbritannien), für die Jahre 2001 bis 2016.

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich von drei Datenquellen, welche vorwiegend Dienstwagen abdecken. Das sind für Deutschland LeasePlan, sowie für die Niederlande Travelcard und Cleaner Car Contracts. Aus Abbildung 7 geht hervor, dass die Abweichung zwischen realen und offiziellen CO₂-Emissionen in allen drei Flotten in den letzten Jahren deutlich angestiegen ist. Die höchste Abweichung ist meist für die Flotte von Cleaner Car Contracts, die im Schnitt rund 3.000 Fahrzeuge pro Modelljahr umfasst, zu verzeichnen. Die durchschnittliche Diskrepanz ist dabei von 25% im Jahr 2010 auf 45% im Jahr 2016 gestiegen. Ähnliche Werte sind bei den LeasePlan- und Travelcard-Flotten zu beobachten.

Abbildung 7: Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten mit Schwerpunkt auf Dienstwagenflotten



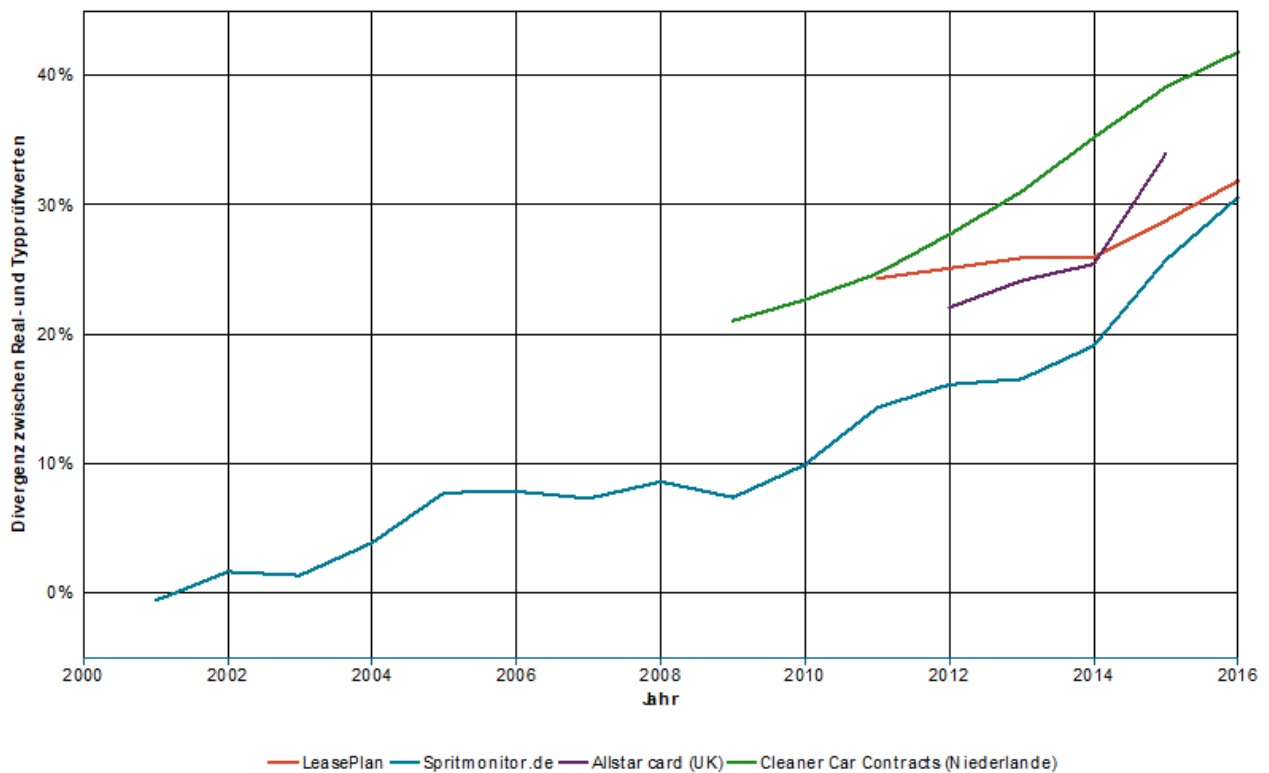
Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den realen Alltagswerten der drei Datenquellen LeasePlan (Deutschland), Travelcard (Niederlande), sowie Cleaner Car Contracts (Niederlande), für die Jahre 2003 bis 2016.

Während die bisherigen Abbildungen zur Entwicklung der Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten den Fokus auf Pkw legten, basiert Abbildung 8 auf Daten für LNF. Betrachtet werden hierbei vier Datenquellen: Spritmonitor.de, LeasePlan, Allstar Card und Cleaner Car Contracts. Wie aus Abbildung 8 ersichtlich wird, zeigen die vier LNF-Flotten eine ähnliche Aufwärtsentwicklung der Divergenz wie Pkw-Flotten.

Spritmonitor.de deckt als einzige Datenquelle der Abbildung vorwiegend LNF ab, welche für private Zwecke oder von Selbständigen genutzt werden. Wie Abbildung 8 zeigt, haben solche LNF geringere Divergenzwerte als diejenigen die von Angestellten zu dienstlichen Zwecken gefahren werden. Es wird erwartet, dass Angestellte meist weniger Anreiz haben, kraftstoffsparend zu fahren, da der Arbeitgeber in der Regel für die Kraftstoffkosten aufkommt. Zwischen 2001 und 2016 stieg die durchschnittliche Divergenz der LNF-Flotte von Spritmonitor.de von etwa -1% auf 31%. Es ist anzumerken, dass Spritmonitor.de im Schnitt nur ca. 140 LNF pro Modelljahr umfasst, was das besonders breite 95-prozentige Konfidenzintervall erklärt.

Am anderen Ende des Spektrums zeigt die Flotte von Cleaner Car Contracts durchgehend die höchste Diskrepanz zwischen offiziell und realem Verbrauch auf. Im Jahr 2016 erreichte hier die Divergenz ein absolutes Maximum von etwa 42%. Ansonsten liegen die Tankkartenanbieter LeasePlan und Allstar Card, die mit ca. 4.500 bzw. 21.000 LNF pro Modelljahr die umfangreichsten Datensätze bilden, durchgehend zwischen Cleaner Car Contracts und Spritmonitor.de.

Abbildung 8: Entwicklung der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für leichte Nutzfahrzeuge (LNF)



Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den realen Alltagswerten der vier Datenquellen LeasePlan (Deutschland), Spritmonitor.de (Deutschland), Allstar (Großbritannien), sowie Cleaner Car Contracts (Niederlande), für die Jahre 2001 bis 2016.

Abschließend werden in Abbildung 9 für jede mögliche Kombination von Baujahr, Hubraumklasse und Kraftstoffart aus Spritmonitor.de die Spanne des Konfidenzintervalls der durchschnittlichen Divergenz (obere Zahl, in Prozentpunkten) sowie die Größe der Stichprobe (untere Zahl, in Klammern) gezeigt. Je dunkler die Farbe einer Zelle, desto enger das Konfidenzintervall. Beispielsweise ist das Konfidenzintervall der durchschnittlichen Divergenz von Ottofahrzeugen mit einem Hubraum von unter 1,4 Litern 1,2 Prozentpunkte breit. Solche Fahrzeuge sind über 1.000 Mal im Datensatz vertreten.

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass je umfangreicher eine Stichprobe, desto enger das entsprechende Konfidenzintervall der Divergenz. Die Konfidenzintervalle bei Ottofahrzeugen mit einem Hubraum von bis zu 2,0 Litern sowie Dieselfahrzeugen mit 1,4- bis 2,0-Liter-Motoren weisen über alle Jahre hinweg eine Spanne von maximal 1,6 Prozentpunkten auf. Die Stichproben umfassen dabei jeweils über 1.000 Fahrzeuge. Dieselfahrzeuge mit größerem Hubraum sind ebenfalls häufig vorhanden, allerdings nicht in den ersten sowie letzten Jahren des betrachteten Zeitraums. Selten sind dagegen kleine Dieselmotoren (unter 1,4 Liter), die in keinem Jahr mit mehr als 300 Stück vertreten sind, sowie Ottomotoren mit mehr als 2,0 Liter, die über die Jahre an Popularität verloren haben.

Abbildung 9: Spanne des 95-prozentigen Konfidenzintervalls der durchschnittlichen Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten aus Spritmonitor.de (Größe der Stichprobe in Klammern).



2.2 Vergleich mit RDE Messungen

2.2.1 Hintergrund

Im Frühjahr 2016 wurde die Real Driving Emissions (RDE) Testprozedur in der europäischen Typgenehmigungs-Gesetzgebung eingeführt. Sie ergänzt die bisher nur im Labor durchgeführten Abgastests mit einer Schadstoffmessung mittels Portable Emission Measurement System (PEMS) während einer Fahrt auf öffentlichen Straßen. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die Schadstoffemissionen auch im realen Fahrbetrieb die gesetzlich vorgeschriebenen Limits nicht überschreiten. Mit dem Ziel, dass RDE Tests repräsentativ für reale Fahrten sind, wurden in der Gesetzgebung Randbedingungen für Umgebungsbedingungen sowie Fahrprofil und Fahrdynamik definiert, die jeweils 90-95% der realen Bedingungen abdecken sollen (Bonnell et al., 2018).

Die Verwendung der CO₂-Messdaten aus RDE Typgenehmigungsfahrten zur Abschätzung des Realverbrauches erscheint aus mehreren Gründen sinnvoll. Zum einen stehen die Daten bereits ab Typgenehmigung eines Fahrzeuges und somit bei Markteinführung zur Verfügung, wohingegen Verbraucherdaten in signifikanter Anzahl, je nach Fahrzeugmodell, erst mit ca. einem Jahr Verzögerung abrufbar sind. Zum anderen wird die Datenbasis kontinuierlich erweitert, da die Messungen für die Typgenehmigung verpflichtend sind. Ein weiterer Vorteil ist aber die Verfügbarkeit der Daten. Die Gesetzgebung sieht vor, dass die Mess- und Fahrzeugdaten der RDE Tests von den Herstellern allen Interessenten auf Anfrage kostenfrei in einem einheitlichen Format zur Verfügung gestellt werden müssen.⁵

Die RDE-Gesetzgebung sieht eine Gültigkeitsüberprüfung und Gewichtung der RDE-Messungen vor mit dem Ziel, dass RDE Tests repräsentativ für reale Fahrten sind. Für die Gültigkeit wird

⁵ Paragraph 3.1.3.3. des Anhangs IIIA der VERORDNUNG (EU) 2017/1151 DER KOMMISSION vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission, Official Journal of the European Union L 175, 7 July 2017, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1151&from=DE>

neben Fahrdynamik, Streckeneigenschaften und Umgebungsbedingungen auch die Abweichung zu den CO₂ Emissionen, die im Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) gemessen wurden, herangezogen. Die CO₂ Emissionen werden im WLTC getrennt für die vier Testphasen Low, Medium, High und Extra-High bestimmt und zur Ermittlung des WLTC Testergebnisses anhand der gefahrenen Distanz in den Phasen gewichtet. Zur Beurteilung der Gültigkeit einer RDE Fahrt wird aus den spezifischen CO₂-Ergebnissen und der jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeit der WLTC Phasen Low, High und Extra-High eine CO₂ Referenzkurve gebildet. Für einen gültigen Test dürfen sich die RDE CO₂ Emissionen im Mittel in einem gewissen Korridor um diese Referenzkurve bewegen.

In diesem Arbeitspaket wurde überprüft, ob die im Rahmen der Typgenehmigung gemessenen RDE CO₂ Emissionen im Mittel repräsentativ für den realen Fahrbetrieb sind.

2.2.2 Datenquellen

Für die Untersuchung standen insgesamt 1.122 PEMS Messungen, die an 355 Fahrzeugen durchgeführt wurden, zur Verfügung. Davon stammen 383 Messungen, durchgeführt an 228 Fahrzeugen, aus RDE Typgenehmigungsfahrten. Die übrigen Messungen stammen aus verschiedenen Quellen und wurden nicht auf Gültigkeit bezüglich der gesetzlichen Anforderungen geprüft und werden daher getrennt betrachtet.

Die RDE Messdaten-Datenbank wurde, soweit verfügbar, mit allen relevanten Fahrzeugparametern ergänzt:

- ▶ Antriebskonzept
- ▶ Getriebetyp
- ▶ Kraftstofftyp
- ▶ Hubraum
- ▶ CO₂ Emissionen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)
- ▶ CO₂ Emissionen im WLTC
- ▶ Masse in fahrbereitem Zustand
- ▶ Testmasse für RDE Test
- ▶ EU Fahrzeugsegment

2.2.3 Methodik

Zur Beurteilung, ob die distanzspezifischen CO₂ Emissionen in den ausgewerteten RDE Tests repräsentativ für jene im Realbetrieb sind, wurde die prozentuale Abweichung zwischen den RDE CO₂ Emissionen und den NEFZ Typgenehmigungswerten („Divergenz“) bestimmt und mit der Divergenz, die sich aus den Spritmonitor und LeasePlan Daten ergibt, verglichen. Die aus diesen Konsumentendaten bestimmte Divergenz wird aufgrund der großen Anzahl an Fahrzeugen, die in diesen Datenquellen erfasst werden, als realitätsnah angesehen.

Im ersten Schritt wurden die Messdaten geprüft und gefiltert. Aufgrund der geringen Anzahl an Messungen für leichte Nutzfahrzeuge Kategorie N1 Klasse 1 wurde die Auswertung nur für Pkw der Kategorie M1 durchgeführt. Aus dem gleichen Grund wurden gasbetriebene Fahrzeuge und Pkws mit Hybridantrieb ebenfalls nicht betrachtet. Schließlich wurden Messungen mit fehlenden oder ungültigen Messwerten herausgefiltert.

Die verbleibende Anzahl an Messungen für die CO₂ Divergenzanalyse beträgt 947, welche an 313 Fahrzeugen durchgeführt wurden. Hiervon stammen 347 Messungen aus Typgenehmigungstests von 206 Fahrzeugen.

Eine Gewichtung oder Normalisierung der Messdaten wurde nicht vorgenommen. Die Einflüsse von Umgebungs- und Randbedingungen sowie der Fahrweise auf die CO₂ Emissionen sind damit in den Testergebnissen enthalten.

Für die vorliegende Analyse wurden die sekundlich aufgelösten PEMS Rohdaten verwendet. Die Berechnung der distanzspezifischen CO₂ Emissionen erfolgte durch Integration des PEMS CO₂ Massenstroms und der Fahrzeuggeschwindigkeit. Für Messungen, die keine gültigen Messwerte für den CO₂ Massenstrom enthielten, wurde dieser, wenn möglich, aus geeigneten Messgrößen berechnet.

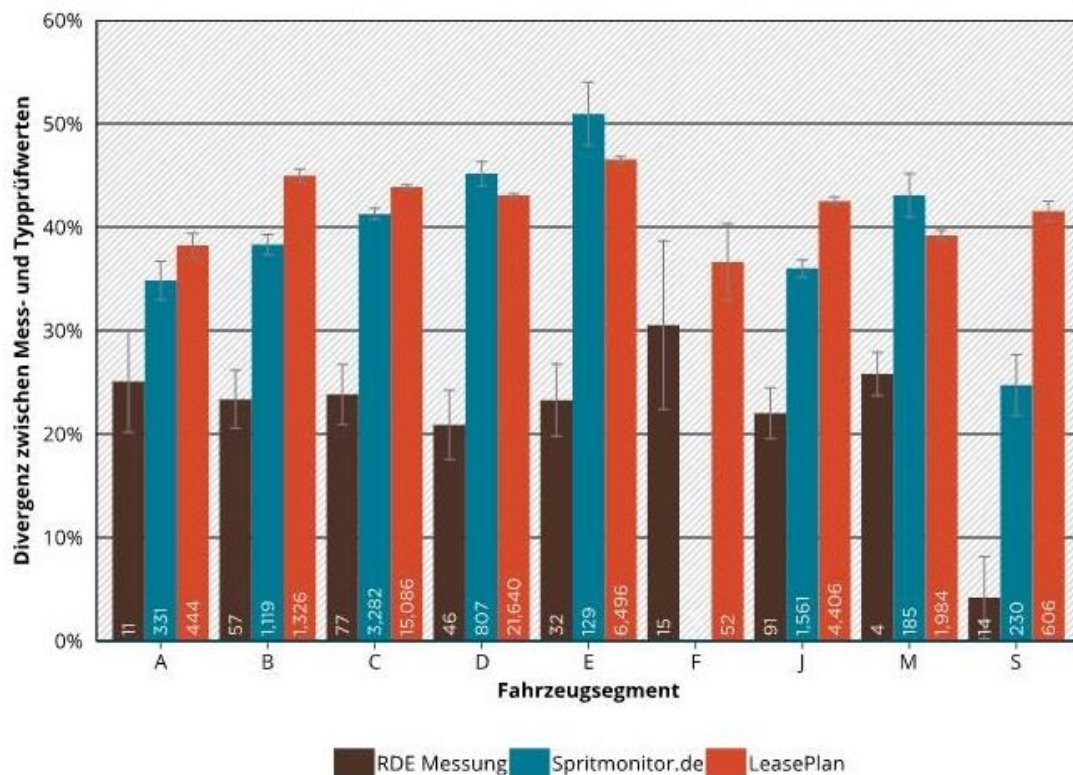
Im letzten Schritt wurde die Divergenz zwischen RDE und NEFZ Typgenehmigungswerten berechnet und den Spritmonitor.de und LeasePlan Daten gegenübergestellt.

2.2.4 Ergebnisse

Zur Beurteilung, ob die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von RDE Tests, die im Rahmen der Typgenehmigung durchgeführt werden, repräsentativ für die Emissionen im Realbetrieb sind, wurden die CO₂ Divergenz der RDE Messungen, Spritmonitor.de und LeasePlan Daten in Abbildung 10 getrennt nach EU-Fahrzeugsegment gegenübergestellt. Die Berechnung der RDE Divergenz bezieht alle gültigen RDE Herstellermessdaten mit ein welche mit Fahrzeugen der Modelljahre 2016-2018 durchgeführt wurden. Zum Vergleich wurden die aktuellsten, für das Jahr 2016 erhobenen, Spritmonitor.de und LeasePlan Daten herangezogen.

Aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Messungen pro Segment im RDE Datensatz ist die Standardabweichung für diese Datenquelle in jedem Segment erwartungsgemäß höher. Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen die folgenden Aussagen ableiten. Zum einen ist die Divergenz für die RDE Messungen mit durchschnittlich 22% wesentlich niedriger als die aus den Verbraucherdaten ermittelte Abweichung, welches über alle Segmente gemittelt ca. 40% im Jahr 2016 beträgt (s. Abbildung 5). Zum anderen bewegt sich die Divergenz in den RDE Messungen für alle Segmente auf einem sehr ähnlichen Niveau, abgesehen von Segment F (Luxusklasse) und S (Sportwagen). Dagegen weisen die LeasePlan und Spritmonitor.de Daten eine deutliche Abhängigkeit der Divergenz vom Segment auf, mit einer tendenziell steigenden Divergenz für Fahrzeuge größerer Segmente (insbesondere Segment E (Oberklasse) und F).

Abbildung 10: Divergenz zwischen Mess- und Typprüfwerten nach Fahrzeugsegment



Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den Messwerten der drei Datenquellen RDE Messungen (Modelljahr 2016-2018), Spritmonitor.de, sowie LeasePlan (beide Berichtsjahr 2016), untergliedert nach Fahrzeugsegment⁶.

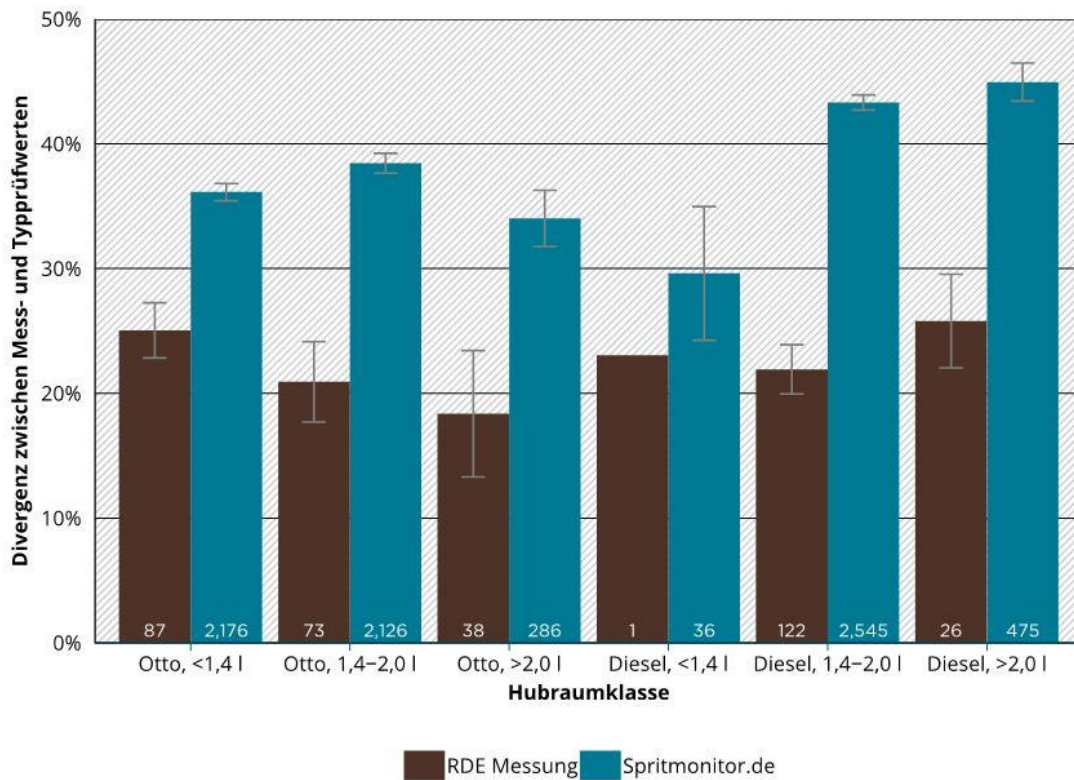
Die Erklärung für die geringe Divergenz der RDE Messungen liegt vermutlich darin begründet, dass es für die Sicherstellung einer gültigen RDE Typgenehmigungsfahrt und damit einer möglichst zeit- und kosteneffektiven Typgenehmigung vorteilhaft ist sich bezüglich Zuladung und Fahrdynamik möglichst nahe am WLTP zu orientieren. Denn, wie beschrieben, werden sowohl die Abweichung zu den WLTP CO₂ Emissionen als auch die Fahrdynamik zur Bewertung der Gültigkeit eines RDE Tests herangezogen. Auch wenn die Gesetzgebung RDE Tests unter relativ weiten Randbedingungen erlaubt, ist das Testen in den Randbereichen im Rahmen der Typgenehmigung nicht erforderlich.

In Abbildung 11 ist die Divergenz der RDE und Spritmonitor Daten für die drei HBEFA Hubraumklassen getrennt für Otto- und Dieselfahrzeuge dargestellt.

Die relativ geringe Anzahl an Daten aus RDE Messungen pro Hubraumklasse bei einer gleichzeitig großen Spreizung von Zylinderanzahl, Hubraum und Fahrzeugmasse in jeder Hubraumklasse, wie in Tabelle 2 aufgeführt, erlaubt es nicht, allgemeingültige Schlüsse für die gesamte Fahrzeugflotte zu ziehen.

⁶ A: Kleinstwagen, B: Kleinwagen, C: Mittelklasse, D: Obere Mittelklasse, E: Oberklasse, F: Luxusklasse, J: SUV, M: Multivan, S: Sportwagen

Abbildung 11: Divergenz zwischen Mess- und Typprüfwerten nach Hubraumklasse



Dargestellt ist die durchschnittliche Abweichung zwischen den offiziellen Typprüfwerten sowie den Messwerten der beiden Datenquellen RDE Messungen (Modelljahr 2016-2018), sowie Spritmonitor.de (Berichtsjahr 2016), untergliedert nach Hubraumklassen.

Die RDE Daten zeigen für Fahrzeuge mit Ottomotor eine abnehmende Divergenz mit steigendem Hubvolumen, wohingegen die Spritmonitor-Daten die höchste Divergenz für die HBEFA Klasse „1,4-2,0l“ aufweist. Hierbei ist zu beachten, dass in den Spritmonitor Daten der Einfluss unterschiedlichen Nutzerverhaltens enthalten ist, während sich die RDE Messungen, wie beschrieben, deutlich an den WLTP CO₂ Referenzwerten orientieren.

Für Dieselfahrzeuge können aufgrund der Anzahl der Datensätze nur die beiden oberen Hubraumklassen verglichen werden. Hier weisen RDE und Spritmonitor-Daten den gleichen Trend steigender Divergenz mit größerem Hubvolumen auf.

Tabelle 2: Spreizung von Zylinderanzahl, Hubraum und Fahrzeugmasse in den verschiedenen HBEFA Hubraumklassen

Antriebsart	HBEFA Hubraumklasse	Anzahl Zylinder	Hubraum [l]	Fahrzeugmasse [t]
Diesel	< 1,4l	4	1,3	1,3
Diesel	1,4 - 2,0l	3, 4	1,5 - 2,0	1,4 - 2,1
Diesel	> 2,0l	4, 6, 8	2,2 - 4,0	1,7 - 2,4
Otto	< 1,4l	3, 4	1,0 - 1,4	1,2 - 1,8
Otto	1,4 - 2,0l	3, 4	1,5 - 2,0	1,4 - 2,6
Otto	> 2,0l	5, 6, 8	2,5 - 6,6	1,6 - 2,5

Die ebenfalls berechnete Divergenz zwischen den CO₂ Emissionen im RDE Test und im WLTC bestärkt die Annahme, dass sich die RDE Typgenehmigungsfahrten weitgehend an der WLTC CO₂ Referenzkurve orientieren (s. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Im Mittel über alle Segmente liegt diese Abweichung bei nur 3.8 % und damit deutlich unter der für den Realbetrieb erwarteten Abweichung von 16-22%⁷.

Zur weitergehenden Untersuchung dieser Annahme wurde für 197 RDE Tests, die mit 133 Fahrzeugen durchgeführt wurden, der Zyklusenergiebedarf in kWh pro Kilometer mit einer Längsdynamikberechnung⁸ abgeschätzt. Der Zyklusenergiebedarf beschreibt wie viel Energie an den Antriebsrädern geleistet werden muss um das Fahrzeug bei der gewünschten Geschwindigkeit gegen die Fahrwiderstände zu bewegen und ist abhängig von der Fahrweise (Geschwindigkeit, Beschleunigung), dem Streckenprofil (Steigung, Gesamthöhendifferenz) und dem Fahrzeuggewicht (Zuladung). Dieser RDE Zyklusenergiebedarf wurde dem entsprechenden Wert im WLTC und im für Deutschland gewichteten HBEFA-Zyklus gegenübergestellt. Letzterer wurde dem Handbuch Emissionsfaktoren (Version 3.3) entnommen und gilt als repräsentativ für Pkw in Deutschland.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der Zyklusenergiebedarf der RDE Fahrten im Mittel lediglich 10% über dem Wert liegt, der im WLTP an den Antriebsrädern zur Verfügung stehen muss. Der Energiebedarf im HBEFA Zyklus ist hingegen 18% höher als im WLTP was wiederum bedeutet, dass die durchschnittliche Mehrarbeit, die im HBEFA Zyklus relativ zum WLTP aufgewendet werden muss, fast doppelt so hoch ist wie die zusätzliche Arbeit, die in den RDE Tests geleistet werden musste.

Aus dieser deutlichen Abweichung im Zyklusenergiebedarf und unter Berücksichtigung, dass die gleiche Fahrzeugmasse für die Berechnung des RDE- und HBEFA-Zyklusenergiebedarfs verwendet wurde, lässt sich schließen, dass die RDE-Typgenehmigungsfahrten deutlich weniger anspruchsvoll hinsichtlich Fahrweise und Streckenprofil sind als der als repräsentativ angenommene HBEFA-Vergleichszyklus.

Die CO₂ Emissionen, die aus den vorliegenden Daten der RDE-Typgenehmigungs-Tests ermittelt wurden, können daher nicht als repräsentativ für den Realbetrieb angesehen werden. Eine

⁷ Abschätzung, die sich aus der für 2016 beobachteten Abweichung zwischen Realbetrieb und NEDC Typgenehmigungswert von 40% und der erwarteten Abweichung zwischen WLTP und NEDC von 15-20% ergibt; siehe auch Dornoff et al., 2018

⁸ Siehe Kapitel 3 Abschnitt 3.1.5, Breuer et al., 2015

unmittelbare Verwendung der Messdaten aus RDE Typgenehmigungsfahrten für die Ermittlung des Realverbrauches wird daher nicht empfohlen.

2.3 Kalibrierung der Modelleingabedaten

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Fahrzeugparameter für die Simulation der Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsfaktoren mit dem Simulationsprogramm PHEM so zu kalibrieren, dass die mittleren Fahrzeug-Zustände der deutschen Flotte nachgebildet werden. Damit werden auch die simulierte Motorleistung und Drehzahl kalibriert, wodurch neben repräsentativen Verbrauchswerten auch genauere Schadstoffemissionswerte gewonnen werden können. Folgende Fahrzeugparameter wurden für HBEFA 4.1 im Rahmen des Projektes für PKW und leichte Nutzfahrzeuge neu kalibriert:

- Fahrzeugleergewicht (anhand der Neuzulassungsstatistik für Deutschland, vorher EU Mittelwerte)
- Beladung (anhand der Abstimmung mit den Ergebnissen aus Kap. 2.1)
- Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte (anhand Analysen zu Anteiligen Fahrten mit Seitenwind, Dachträgern, etc. und Abstimmung mit den Ergebnissen aus Kap. 2.1)
- Energieverbrauch von Nebenaggregaten (Klimaanlage etc.; diese wurden zuvor als pauschaler CO₂-Aufschlag gehandhabt)

Die Daten und Methoden dazu sind nachfolgend beschrieben.

2.3.1 Methode

Für die Simulation werden Fahrzeugdaten, wie z. B. Fahrzeugmasse, Beladung, Fahrwiderstände (Roll- und Luftwiderstand), Leistungsbedarf der Nebenverbraucher usw., vorgegeben. Die Fahrwiderstände in der Typgenehmigung sind aufgrund der im NEFZ zulässigen Toleranzen im Allgemeinen deutlich niedriger als die realen Fahrwiderstände, weshalb Typprüfdaten nicht direkt für die Simulation herangezogen werden können. Im realen Fahrbetrieb treten auch Effekte auf, die die Fahrwiderstände sowohl gegenüber Rollentests als auch gegenüber „typischen“ RDE Messfahrten erhöhen:

- ▶ Nasse Fahrbahn
- ▶ Höherer Rollwiderstand durch nicht optimal eingestellten Reifendruck, die Verwendung von Winterreifen sowie die Verwendung von größeren Reifendimensionen
- ▶ Verwendung von Dachboxen und Anhängern
- ▶ Seitenwind
- ▶ Höhere Fahrzeugbeladungen

Zusätzlich zu den aufgezählten Parametern erhöht sich die Motorleistung bei einer Fahrt auf der Straße im Vergleich zur Typprüfung auf dem Rollenprüfstand durch folgende Gegebenheiten:

- ▶ Fahrbahnlängsneigung

- Leistungsbedarf von nicht auf dem Prüfstand aktiven Nebenverbrauchern (Klimaanlage, Sitzheizung usw.)

Die Kombination dieser Effekte führt zu höheren Motorlasten, möglicherweise anderem Schaltverhalten und damit zu deutlich anderen Emissionswerten im realen Fahrbetrieb als in der Typgenehmigung, insbesondere im Vergleich zur Typgenehmigung nach NEFZ-Vorschriften.

Im Rahmen dieses Projektes lag daher ein Schwerpunkt auf der Ableitung von realen Fahrzeugdaten für die Simulation, um auch realistische Emissionsergebnisse zu erhalten.

Durch die Simulation von NEFZ, WLTC (neuer Typprüfzyklus), RDE-Tests und durchschnittlichem realen Fahren können unsichere Parameter in der Simulation durch bekannte Kraftstoffverbräuche kalibriert werden. Ziel ist es, die gemessenen CO₂-Emissionen und/oder den Kraftstoffverbrauch (=direkter Zusammenhang mit CO₂-Emissionen) zu treffen. Für EURO 6d-Temp typgeprüfte Fahrzeuge sind die Fahrwiderstände sowie Testmassen der Fahrzeuge im WLTP bereits öffentlich zugänglich. Ausgehend von diesen Daten wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Für den NEFZ wurde die Reduzierung der Fahrwiderstände und der Nebenverbraucherleistung im Vergleich zu den WLTC-Einstellungen durch Anpassung dieser Daten an die gemessenen NEFZ-CO₂-Emissionen durchgeführt.
2. Für RDE-Tests wurden die realen Fahrwiderstände und der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher durch Kalibrierung ermittelt, um die gemessenen CO₂-Emissionen aus RDE-Tests zu treffen.
3. Abschließend wurde der von 2. resultierende Fahrzeugdatensatz weiter kalibriert, um die von den Nutzern gemeldeten Kraftstoffverbrauchswerte für die gesamte Fahrzeugflotte zu treffen (Spritmonitor.de für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge). Diese finale Kalibrierung liefert den zusätzlichen Luftwiderstand aufgrund von anteiligen Fahrten mit Seitenwind, Dachbox und Anhänger sowie eine Abschätzung der realen Fahrzeugbeladung sowie Leistungsbedarf der Nebenverbraucher.

Die Schritte 1., 2. und 3. wurden anhand von vier Benzin- und vier Diesel-EURO-6-Fahrzeugen angewendet, die an der TU-Graz im Rahmen von Diplomarbeiten getestet wurden. Die relativen Änderungen der Fahrwiderstände, Fahrzeugbeladungen usw. im Vergleich zu den in dieser Analyse gefundenen Typgenehmigungseinstellungen wurden dann auf die Fahrzeugdatensätze, die die durchschnittlichen Fahrzeuge pro Segment beschreiben, angewandt. Alle Schritte zu dieser Arbeit sind in (Opetnik, 2019) beschrieben. Die Ergebnisse der Einzelfahrzeuge sowie für die durchschnittlichen Fahrzeuge pro Segment sind nachfolgend zusammengefasst. Als Simulationsprogramm wurde das Passenger Car and Heavy Duty Emission Model (PHEM) verwendet, welches im Folgenden ebenfalls kurz erklärt wird.

2.3.2 Simulationsprogramm PHEM

PHEM wurde in den 90er Jahren am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik von der TU-Graz erstellt und wird seither ständig weiterentwickelt, um neue Fahrzeugtechnologien abzudecken und neue, verbesserte Methoden zur Simulation zu integrieren.

PHEM berechnet den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen von Fahrzeugen in 1Hz für einen gegebenen Fahrzyklus, basierend auf der Fahrzeuglängsdynamik und den Kraftstoffverbrauchs- sowie Emissionskennfeldern. Der Leistungsbedarf des Motors wird für die Zyklen aus den Fahrwiderständen, Verlusten im Antriebsstrang sowie der Berücksichtigung der Nebenverbraucherleistung berechnet. Die Motordrehzahl wird durch den Reifendurchmesser,

das Achsgetriebe und die Übersetzung sowie ein Fahrer-Schaltmodell simuliert. Die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch werden dann aus den Emissions- bzw. Kraftstoffverbrauchskennfeldern interpoliert. In PHEM kann ebenfalls das Abgasnachbehandlungssystem eines Fahrzeugs detailliert berücksichtigt werden. Die Temperaturen von Katalysatoren werden durch ein 0-dimensionales Wärmemodell und aus dem Wärmeübergang zwischen Abgas und Katalysator sowie zwischen Katalysator und Umgebung simuliert.

Da das Fahrzeuglängsdynamikmodell die Motorleistung und Drehzahl aus physikalischen Zusammenhängen berechnet, kann mit diesem Ansatz jeder erdenkliche Fahrzustand simuliert werden. Das Modell kann auch verschiedene Kombinationen von Motor, Antriebsstrang und Fahrzeug abbilden, einschließlich Elektro- und Hybridfahrzeug. Weitere Details können der Literatur entnommen werden (Matzer, 2017), (Hausberger, 2016), (Rexeis, 2013), (Luz, 2013), (Hausberger, 2012), (Zallinger, 2010), (Hausberger, 2009), (Rexeis, 2009), (Hausberger, 2003).

2.3.3 Ergebnisse Fahrzeugsample

Für die Einzelfahrzeugsimulationen der jeweils vier untersuchten Otto- und Diesel-Pkw werden im Folgenden die für die Simulation verwendeten Einstellungen und die erzielten Ergebnisse beschrieben.

2.3.3.1 Kalibrierfaktoren für Beladung, Fahrwiderstände und Nebenverbraucher

In allen Zyklen pro Fahrzeugschicht wurden das gleiche Kraftstoffverbrauchskennfeld und das gleiche Getriebeverlustrmodell verwendet. Für die Simulation der Typprüfzyklen wurden die zugehörigen Gangschaltpunkte laut Gesetzgebung verwendet. Für die Simulation der RDE-Tests wurden die gemessenen Motordrehzahlen als Modelleingabe verwendet. Für die Simulation der HBEFA-Verkehrssituationen wurde das Schaltmodell von PHEM verwendet, das auf die Darstellung des durchschnittlichen realen Schaltverhaltens ausgelegt ist (Zallinger, 2010). Für die Fahrzeugparameter wurden folgende zyklenspezifische Einstellungen gewählt:

- a) NEFZ: Für die Simulation wurde die Testmasse mit DIN-Masse plus 100 kg entsprechend der EU Regulierung zum NEDC gewählt. Da die Fahrwiderstände in der Typgenehmigung nicht verfügbar waren, wurden der Luftwiderstandsbeiwert aus den WLTP-Low-Einstellungen des Fahrzeugs um 17%, der Rollwiderstandsbeiwert um 20% reduziert, um die Toleranzen bei der Fahrzeug- und Reifenwahl und bei der Einstellung der Fahrwiderstände am Rollenprüfstand bei NEFZ-Tests zu berücksichtigen. Für die Nebenverbraucher wurde ein mechanischer Leistungsbedarf von 100 W angenommen, da die Batterie bei Teststart in der Regel vollständig geladen ist und die Lichtmaschine nur im Leerlauf mitläuft. Anstelle der Sollgeschwindigkeit wurde für die untersuchten Pkw zusätzlich ein optimierter Geschwindigkeitsverlauf vorgegeben. Dieser soll ein Fahrerverhalten nachahmen, dass die Geschwindigkeitstoleranzen ausnutzt, um den Energieverbrauch im Test zu minimieren.
- b) WLTC: Testmasse und Fahrwiderstände für den WLTC waren für jedes der analysierten Fahrzeuge bekannt. Für die Leistung der Nebenverbraucher wurde im Durchschnitt 600 W angenommen, da gemäß WLTP Unterschiede im Ladezustand der Batterie (SOC) zwischen Start und Ende des Tests korrigiert werden.
- c) RDE: Für die Simulation der RDE-Tests (PEMS Tests) wurden die abgewogenen Fahrzeugmassen und die Fahrwiderstände gemäß den WLTC-High-Einstellungen verwendet. Obwohl die getesteten Fahrzeuge nicht die Worst-Case-Varianten der Modelle waren, berücksichtigen die WLTC-High Einstellungen in diesem Fall den erhöhten

Luftwiderstand durch das montierte Emissionsmesssystem und die bei den Tests verwendeten Winterreifen.

- d) HBEFA-Zyklen: Die folgenden Kalibrierfunktionen ergeben sich aus der Kalibrierung des simulierten Kraftstoffverbrauchs für den HBEFA-Verkehrssituationsmix mit den Daten von Spritmonitor.de für jedes der analysierten Fahrzeugmodelle⁹. Die Ergebnisse basieren also nicht auf Statistiken (z. B. Anteil der Fahrtstrecken mit Winterreifen), sondern stellen Ergebnisse der Kalibrierung innerhalb plausibler Grenzen dar. Als Fahrzeugmasse wurde die DIN-Masse + 5% gewählt, um ebenfalls Zusatzausstattungen zu berücksichtigen, die per Definition in der DIN-Masse noch nicht enthalten sind. Die durchschnittliche Beladung für Diesel-Pkw wurde mit 215 kg, für Otto-Pkw mit 120 kg ermittelt. Die unterschiedliche Beladung dürfte widerspiegeln, dass Diesel-Pkw im Durchschnitt größer sind und häufiger für Langstreckenfahrten, einschließlich Urlaubsreisen, eingesetzt werden, während die kleineren Benzinfahrzeuge häufiger für den Pendelverkehr verwendet werden. Der Luftwiderstand (Querschnittsfläche x Luftwiderstandsbeiwert der Fahrzeuge wurde im Vergleich zum Durchschnitt aus WLTC-Low und WLTC-High um 8,5% aufgrund folgender Punkte erhöht:
- ▶ Seitenwind, der bei typischen Europäischen Windgeschwindigkeiten den Luftwiderstand um ca. 3% erhöht, z. B. (Windsor, 2014), (Lohnauer, 2019)
 - ▶ Verwendung von Anhängern, die den Luftwiderstand um ca. 100% anheben, (Lohnauer, 2019)
 - ▶ Verwendung von Dachboxen, die den Luftwiderstand um ca. 25% anheben, (Lohnauer, 2019)
 - ▶ höhere Luftdichte als unter Normbedingungen aufgrund der niedrigeren Durchschnittstemperatur (12°C Durchschnitt in Deutschland statt 20°C)

Der Rollwiderstandskoeffizient wurde gegenüber den WLTC-Werten um 6,3% aufgrund folgender Punkte erhöht:

- ▶ Berücksichtigung von Fahrten auf nasser Fahrbahn
- ▶ Verwendung von Winterreifen sowie Berücksichtigung von nicht optimal gewähltem Reifendruck

Für Diesel-Pkw wurde ein weiterer Anstieg von 5% durch die Wahl größerer Reifendimensionen mit möglicherweise höherem Rollwiderstand im Vergleich zu WLTC angenommen. Diese letzte Kalibrierung war nur für die Diesel-Pkw notwendig, um näher an die spritmonitor.de Werte zum Realverbrauch zu kommen. Die Differenzen sind nachfolgend beschrieben.

2.3.3.2 Abweichung zwischen Simulation und Messung bei Typprüfung, RDE-Tests und Spritmonitor.de

In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die Mess- und Simulationsergebnisse für die untersuchten Diesel- und Otto-Pkw ersichtlich. Die NEFZ-Simulation hat die in den Fahrzeugpapieren angegebenen CO₂-Werte aus der Typgenehmigung für die analysierten Diesel-Fahrzeuge

⁹ Spritmonitor.de liefert den von den Autobesitzern gemeldeten Kraftstoffverbrauch im täglichen Gebrauch, siehe Kap. 2.1

durchschnittlich um 1% unterschätzt, für die analysierten Otto-Fahrzeuge um 6% überschätzt. Ein Grund für die Überschätzung könnte die Ausnutzung der Toleranzen der Messeinrichtung am Rollenprüfstand sein, die in der Simulation nicht abgebildet werden. Die durchschnittlichen Abweichungen zwischen WLTC-Simulation und WLTC-Messung der analysierten Diesel-Fahrzeuge lag bei 6% und bei den untersuchten Otto-Fahrzeugen bei 0%. Die Abweichung der CO₂-Emissionen in den RDE-Tests lag im Mittel bei 0% für die Diesel- als auch für die Otto-Pkw. Trotz der höheren Fahrwiderstände wurde der simulierte Kraftstoffverbrauch für die vier untersuchten Diesel-Pkw-Modelle in den gewichteten HBEFA-Zyklen gegenüber den angegebenen Verbräuchen auf Spritmonitor.de im Durchschnitt um 14% unterschätzt. Wie oben beschrieben, wurden die Fahrzeugparameter im Rahmen des plausiblen Bereiches angehoben. Weitere Erhöhungen erschienen nicht sinnvoll, da ja sowohl in den spritmonitor.de Daten als auch in den verwendeten HBEFA Zyklen Unsicherheiten bezüglich der Repräsentativität für den Deutschen Durchschnitt für die einzelnen Kfz Marken und Typen stecken.

Für die vier Benzin-Pkw betrug die Abweichung von der Simulation gegen Spritmonitor.de -4%.

Wie im nächsten Kapitel dargestellt, trifft allerdings die Simulation für die durchschnittliche Diesel- und Otto-Pkw-Flotte fast genau den auf Spritmonitor.de angegebenen Kraftstoffverbrauch. Als Simulationseinstellungen wurden dafür jene Kalibrierfunktionen herangezogen, wie sie aus der Kalibrierung für die Einzelfahrzeuge ermittelt. Eine mögliche Ursache für die Abweichung bei den einzelnen Diesel-Pkw ist, dass die Gewichtung der HBEFA-Verkehrssituationen nicht repräsentativ war. Möglicherweise haben die vier untersuchten Diesel-Pkw im spritmonitor.de Datensatz einen wesentlich höheren Anteil an Autobahnfahrten gehabt, als der durchschnittliche deutsche Diesel- Pkw. Eine andere Erklärung für die Unterschätzung wurde bisher nicht gefunden.

Tabelle 3: Durchschnitt der gemessenen und simulierten CO₂-Emissionen der 4 untersuchten Diesel-Pkw

	NEFZ	WLTC	RDE TU-Graz	Sprit-monitor.de	HBEFA
Messung in g/km	109,7	112,9	147,2	158,1	-
Simulation in g/km	108,1	119,3	147,7	-	136,6

Tabelle 4: Durchschnitt der gemessenen und simulierten CO₂-Emissionen der 4 untersuchten Otto-Pkw

	NEFZ	WLTC	RDE TU-Graz	Sprit-monitor.de	HBEFA
Messung in g/km	138,5	161,3	186,6	192,5	-
Simulation in g/km	145,8	161,5	186,5	-	184,2

2.3.4 Ergebnisse Kfz-Flotten

Als Basis wurden je Segment die durchschnittliche Fahrzeug-DIN-Masse und die Motornennleistung aus der CO₂-Monitoring Datenbank, nach den Neuzulassungen in Deutschland gewichtet, verwendet.

Der neue Preprocessor ist in der Dokumentation von HBEFA 4.1 (INFRAS et al. 2019) im Detail beschrieben. Seine Funktionsweise lässt sich in Kürze wie folgt zusammenfassen:

- In einem ersten Schritt werden pro Segment und Jahr individuelle Kalibrationsfaktoren hergeleitet. Diese berechnen sich aus dem Quotient aus
 - a) dem durchschnittlichen “Ist-Verbrauchs faktor”, welcher dem nach Verkehrssituationen-Anteil und Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen fahrleistungsgewichteten Durchschnitt der Verbrauchsfaktoren aus PHEM entspricht, und
 - b) dem “Soll-Verbrauchs faktor”, welcher dem CO₂-Monitoring-Wert plus dem Realverbrauchszuschlag entspricht.
 In a) lässt sich optional ein Kaltstartanteil miteinberechnen, sofern der Realverbrauchszuschlag den Kaltstart mit enthält (was bei den Ergebnissen aus Kap. 2 der Fall ist):

$Kalibrationsfaktor_{Segment,Jahr} =$

$$\frac{\sum Fzkm_{Subsgm,Jahr,VS,Land} \times Verbrauchsfaktor_{Subsgm,Jahr,VS}}{\sum Fzkm_{Subsgm,Jahr,Land}} \times (1 + Kaltstartanteil)$$

$$CO_2Monitoring_{Segment,Jahr,Land} \times (1 + Realverbrauchszuschlag)_{Segment,Jahr,Land}$$

wobei:

$Fzkm$ = Fahrzeugkilometer

$Subsgm$ = HBEFA-Subsegment (Segment + Emissionsstandard)

VS = Verkehrssituation

$CO_2Monitoring$ = CO₂-Emission/Fzkm gemäss NEFZ

- In einem zweiten Schritt werden aus den Kalibrationsfaktoren des ersten Schrittes die Parameter “Base correction” und “Reduction Rate” hergeleitet. Dabei entspricht die “Base correction” dem Kalibrationsfaktor im Basisjahr, und die “Reduction Rates” den relativen Änderungen der Kalibrationsfaktoren von Jahr zu Jahr.

3.3.3 Länderspezifische Anpassung des Realverbrauchszuschlags

Der Realverbrauchszuschlag bildet die Unterschiede in Rollwiderstand, Luftwiderstand, Fahrzeugmasse (d.h. -beladung), Zusatzverbrauchern wie AC, Längsneigung und Fahrprofil zwischen realem Verbrauch und Testbedingungen ab (s. auch Kapitel 2.3). Während bei den meisten dieser Parameter angenommen werden kann, dass sie sich im Durchschnitt zwischen den HBEFA-Ländern nicht unterscheiden (bzw. keine Daten dazu vorliegen), so sind aufgrund der Verteilungen der HBEFA-Verkehrssituationen die unterschiedlichen Verteilungen von Fahrprofilen und Längsneigungen in den Ländern vorhanden. Daher wurden die Realverbrauchszuschläge ausgehend von Deutschland länderspezifisch angepasst.

Dafür wurden Anpassungsfaktoren pro Land und Segment als der Quotient aus dem fahrleistungsgewichteten Durchschnitt der Verkehrssituationen-spezifischen Verbräuche eines PHEM-Durchschnittsfahrzeugs für jedes Land zum entsprechenden Wert aus Deutschland gebildet:

$Anpassungsfaktor_{Segment, Land} =$

$$\frac{\frac{\sum Fzkm_{\emptyset-Fzg, Jahr, VS, Land} \times Verbrauchsfaktor_{\emptyset-Fzg, Jahr, VS}}{\sum Fzkm_{\emptyset-Fzg, Jahr, Land}}}{\frac{\sum Fzkm_{\emptyset-Fzg, Jahr, VS, Deutschland} \times Verbrauchsfaktor_{\emptyset-Fzg, Jahr, VS}}{\sum Fzkm_{\emptyset-Fzg, Jahr, Deutschland}}}$$

Die Realverbrauchszuschläge nach Segment und Jahr für Deutschland wurden anschließend mit den Länder- und Segment-spezifischen Anpassungsfaktoren multipliziert, um die Realverbrauchszuschläge für die anderen Länder als Deutschland zu erhalten.

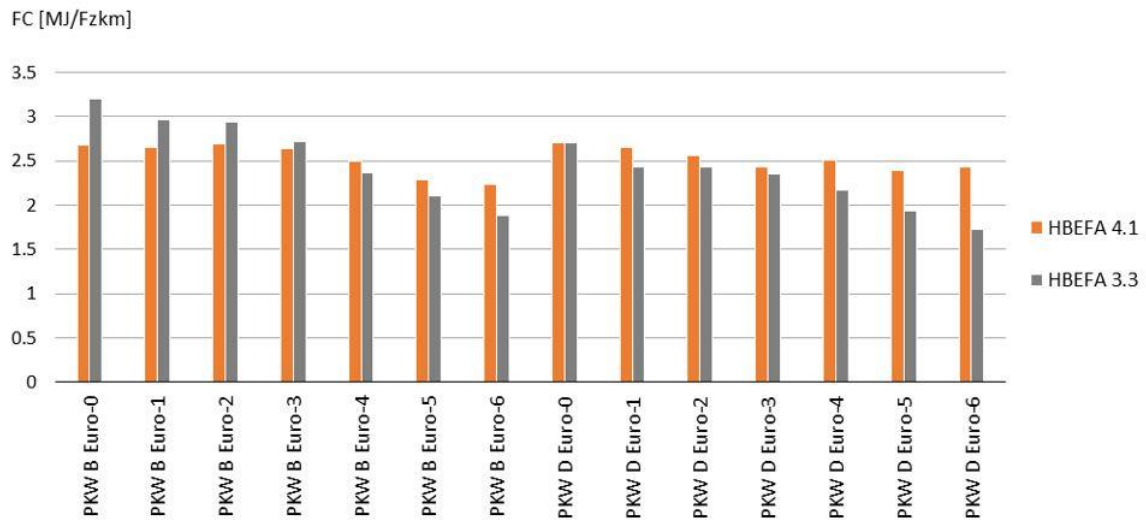
3.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Aktualisierung der Kraftstoffverbräuche sind in der im September 2019 publizierten HBEFA-Version 4.1 abrufbar.

Der Vergleich zwischen dem aktuellen HBEFA 4.1 und dem 2017 publizierten HBEFA 3.3 für Deutschland (s. Abbildung 12) zeigt unterschiedliche Abweichungen je nach Emissionsstandard. Die Absenkung des spezifischen Endenergieverbrauchs fällt gemäß der neuen Methode viel weniger deutlich aus als gemäß der bisherigen, was auf die neu besser berücksichtigte Divergenz zwischen Verbrauch gemäß Typenprüfung und dem realen Verbrauch auf der Straße zurückgeht. Die Abweichungen von HBEFA 4.1 bezogen auf HBEFA 3.3 betragen für die Benziner zwischen -16% (Euro-0) und +19% (Euro-6) und für die Diesel-PKW 0% (Euro-0) bis +41% (Euro-6). Dies für das Referenzjahr 2020 (was v.a. für Euro-6 eine Rolle spielt, da zukünftige Euro-6-Fahrzeuge mutmaßlich effizienter sein werden).

Für andere Länder fallen die Unterschiede je nach länderspezifischer Feinkalibration (z.B. Abgleich des modellierten Kraftstoffverbrauchs mit dem Absatz) etwas anders aus.

Abbildung 12: Vergleich Verbrauchsfaktoren PKW (Durchschnitt Deutschland, nach Emissionsstandard) zwischen HBEFA-Versionen 3.3 (2017) und 4.1 (2019)



FC = Treibstoffverbrauch (Fuel consumption); PKW B = Benzin-PKW/Ottomotor; PKW D = Diesel-PKW. Das Referenzjahr für diese Abbildung ist 2020 (was v.a. für Euro-6 eine Rolle spielt, da zukünftige Euro-6-Fahrzeuge mutmaßlich effizienter sein werden).

4 Ermittlung der grauen Im- und Exporte

Graue Kraftstoffimporte oder -exporte bedeutet, dass Kraftstoff im Ausland getankt und im Inland verfahren wird oder umgekehrt. Eine Abschätzung dieser Zahlen kann verwendet werden um bottom-up modellierte Kraftstoffverbräuche mit top-down bestimmten Kraftstoffabsätzen zu vergleichen bzw. erstere an letzteren zu plausibilisieren oder gar zu kalibrieren. HBEFA nutzt bisher eine entsprechende Abschätzung für die Schweiz zu diesem Zweck. Voraussetzung dazu ist, dass die verfügbaren quantitativen Informationen zu den grauen Kraftstoffimporten und -exporten so vertrauenswürdig sind, dass ihre Verwendung in der Gesamtbilanz zu einer Verbesserung der Datenqualität führt.

Es gibt eine Reihe von Studien, die den grauen Import oder Export von Kraftstoffen für verschiedenen Länder abschätzen, beispielsweise für die Schweiz INFRAS und CEPE 2010, INFRAS und MK Consulting 2014 und MK Consulting 2015 oder für Österreich Trafico et al. 2008 oder «Verkehr in Zahlen» (ViZ) für Deutschland. Die darin verwendeten unterschiedlichen Methoden werden im Folgenden beschrieben und verglichen. Dabei gilt für alle Methoden, dass viele relevante Einflussfaktoren nur indirekt oder gar nicht berücksichtigt werden, weil die entsprechenden Daten nicht verfügbar sind. Dies erhöht die Unsicherheit der Ergebnisse und erschwert eine jährliche Fortschreibung.

Grauer Nettoimport findet vor allem deshalb statt, weil Kraftstoffe in den Nachbarländern andere Preise haben. Gründe für Preisdifferenzen können unterschiedliche Steuern und Abgaben sein oder auch Schwankungen in Wechselkursen, z. B. im Falle der Schweiz, Dänemark oder Tschechien. Dadurch haben Kraftfahrer einen Anreiz jeweils dort zu tanken wo es billiger ist. Wie hoch der Nettoimport ausfällt, hängt einerseits von der Höhe der Preisdifferenz ab. Es gibt aber noch eine Reihe zusätzlicher Einflussfaktoren:

- ▶ Sowieso stattfindender Grenzverkehr (durch Pendler, Urlauber, Einkaufstouristen etc.) führt dazu, dass vermehrt nebenbei Kraftstoffe importiert oder exportiert werden.
- ▶ Grenzfriktionen (Kontrollen, etc.) und gesetzliche Vorgaben zur einfuhrbaren Maximalmenge verringern Importe.
- ▶ Maßnahmen zur Bekämpfung von «Tanktourismus» aus billigeren Nachbarländern (z. B. Rabatte für Bewohner der Grenzregionen in Südtirol, angedachte EU-weite Harmonisierung der Preise, etc.) verringern den Import von Kraftstoffen in Hochpreisländer.
- ▶ Die Tankgrößen von Kraftfahrzeugen haben zugenommen. Dadurch steigt die importierte oder exportierte Menge.
- ▶ Durch bessere Information im Rahmen der Digitalisierung (z. B. Preis-Apps) kennen Kraftfahrer Preisunterschiede präziser und können diese daher besser ausnutzen. Dadurch kann die importierte oder exportierte Menge steigen.
- ▶ Lkw-Betreiber betanken professionell (Kostenminimierung), da Dieselpreise einen erheblichen Anteil der Betriebskosten darstellen; Pkw-Besitzer tanken hingegen nicht immer kostenminimierend, da Informationen, Know-How, etc. fehlen.
- ▶ Die Reichweite von Lkw ist höher als die von Pkw (Lkw bis zu 3000 km vs. Pkw bis zu 1000 km).

- Lkw tanken oft in Betriebshöfen, wo die Preise geringer sind als im landesweiten Schnitt. Sie tanken somit auch dann im Heimatland, wenn die landesweiten Preise relativ hoch sind.

4.1 Methodenbeschriebe

4.1.1 Ökonometrisches Tankstellen-Modell

Diese Methode wurde in INFRAS und CEPE 2010 für die Schweiz angewandt. In der Schweiz waren vor 2010 Kraftstoffe günstiger als im Ausland. Daher schätzt die Studie graue Exporte ab. Mittels eines empirischen Modells wurden die Treibstoffabsätze von Tankstellen anhand verschiedener Einflussfaktoren erklärt: Einerseits sind dies der Kraftstoffpreis im In- und Ausland sowie die Distanz zur Grenze. Daneben wurden noch sozioökonomische Faktoren im Einzugsgebiet der Tankstellen, wie die Anzahl der Pkws, der Einwohner oder die durchschnittliche Einkommenshöhe, verwendet. Mit Hilfe der geschätzten Parameter lässt sich der gemäß Modell resultierende Treibstoffabsatz je Tankstelle berechnen, wenn es keine Preisdifferenz zum Ausland gäbe. Ein Vergleich dieser hypothetischen mit der tatsächlichen Absatzmenge erlaubt es, den Absatz aufgrund des grauen Exports je Tankstelle zu berechnen. Die Ergebnisse pro Tankstelle wurden dann nach Distanzen und angrenzendem Ausland sortiert. Es zeigt sich, dass gemäß dem Modell vor allem Tankstellen mit einem Abstand von weniger als 5 km von Preisentwicklungen im Ausland beeinflusst werden. Spürbar ist der Effekt bis zu einer Entfernung von ca. 20 km.

4.1.2 Vergleich Grenzgebiet mit Kerngebiet

Diese Methode wurde in INFRAS und CEPE 2010, INFRAS und MK Consulting 2014 und MK Consulting 2015 wiederum für die Schweiz zur Abschätzung der grauen Exporte angewandt. Sie vergleicht die Entwicklung des Treibstoffabsatzes im Grenzgebiet eines Landes (z. B. weniger als 20 km Entfernung zur Grenze) mit der Entwicklung im restlichen Kerngebiet. Die zentrale Annahme dieser Methode ist, dass sich landesweite Änderungen im Kraftstoffverbrauch – bzw. die zugrundeliegenden Ursachen, wie zumeist sozioökonomische Faktoren etc. - im Grenz- und Kerngebiet genau gleich auswirken. Die Entwicklung im Kerngebiet unterliegt keinen weiteren Einflüssen, die Entwicklung im Grenzgebiet wird hingegen zusätzlich von den grauen Exporten beeinflusst. Unter diesen Annahmen lässt sich der graue Export aus dem Vergleich der gemessenen Entwicklungen beider Gebiete ableiten.

Die Methode funktioniert allerdings nur wenn, zumindest einmalig für einen Zeitraum (Eichperiode), die absolute Menge des grauen Exports aus den Grenzgebieten mit einer anderen Methode ermittelt wurde, da der Vergleich per se nur relative Änderungen aufzeigt. Die absoluten Mengen können beispielsweise mit einem empirischen Schätzmodell für ein beliebiges Jahr bestimmt werden (siehe oben). Oder es gibt ein Jahr in dem die Kraftstoffpreise im In- und Ausland gleich waren. Dann kann man davon ausgehen, dass der graue Export in diesem Jahr zum Erliegen gekommen ist, die absolute Menge also null war.

Ist die absolute Menge grauen Exports für eine Eichperiode bekannt, kann dieser für eine andere Periode (Beobachtungsperiode) wie folgt bestimmt werden: In einem ersten Schritt wird die relative Entwicklung im Kerngebiet seit der Eichperiode bestimmt. Für die Grenzregion wird dann angenommen, dass es dieselbe relative Entwicklung für den Kraftstoffabsatz, der nicht dem grauen Export zuzurechnen ist, gegeben hätte. Der graue Export entspricht dann dem Unterschied in der Grenzregion zwischen dieser theoretischen Menge und dem tatsächlichen Kraftstoffabsatz.

Zur Veranschaulichung ein hypothetisches Beispiel: Die Entwicklung in der Kernregion ist +4% (Anstieg Kraftstoffabsatz von Eichperiode zu Beobachtungsperiode). In der Grenzregion war der Absatz in der Eichperiode 100 Mio. Liter. Davon konnte man z. B. aufgrund eines ökonometrischen Modells 30 Mio. Liter dem grauen Export zurechnen. In der Beobachtungsperiode ist der Absatz 110 Mio. Liter. Nun geht man davon aus, dass 70 Mio. Liter * 104% = 72.8 Mio. Liter auch ohne grauen Export in der Grenzregion abgesetzt worden wären. Der graue Export aus der Grenzregion ist in der Beobachtungsperiode folglich 37.2 Mio. Liter.

4.1.3 Grenzquerender Verkehr

Diese Methode wurde in INFRAS und CEPE 2010, Trafico et al. 2008 und für «Verkehr in Zahlen» angewandt, wobei sich die Ausgestaltung und die verwendeten Daten im Detail stark unterscheiden. Die Grundidee ist, dass man Statistiken zu grenzquerendem Verkehr koppelt mit Abschätzungen zu den Differenzen des Tankinhalts für die Ein- und Ausreise. Statistiken zu grenzquerendem Verkehr sind zumeist vorhanden (Grenzübertritte oder Zählungen an Autobahnen und Landstraße im Grenzgebiet). Zur Tankinhaltsdifferenz gibt es nur sehr vereinzelt und lückenhaft Daten (beispielsweise Trafico et al. 2008 und BMVIT 2005). Somit müssen diese über andere Methoden indirekt abgeschätzt werden. Hier unterscheiden sich die diversen Ansätze erheblich. Für die konkrete Wahl spielen weniger methodische Kriterien eine Rolle, sondern vielmehr welche Daten für eine solche Abschätzung zur Verfügung stehen (z. B. nur Verkehrszählung oder zusätzlich Befragungen zum Zweck der Reise, zum Anteil Diesel-/Benzinfahrzeuge, zur Herkunft (In- oder Ausländer), etc.).

4.1.3.1 DIW 2005 und «Verkehr in Zahlen»

Im Folgenden wird die in DIW 2005 genutzte spezielle Ausgestaltung der Methodik des grenzquerenden Verkehrs beschrieben. Bis heute werden in «Verkehr in Zahlen» graue Im- und Exporte unter Verwendung dieser Methodik fortgeschrieben¹¹. In DIW 2005 wird speziell beschrieben, wie die grauen Exporte für 2002 hergeleitet wurden. Die Autoren schätzen aufgrund des Pkw-Bestands in Grenznähe (rund 40% des deutschen Gesamtbestands) und der Erhebungen zu grenzüberquerendem Verkehr, dass rund 1–1.5 Mrd. Liter Kraftstoff durch in Deutschland zugelassene private Pkw-Halter grau importiert wurden. Aufgrund der Flottenzusammensetzung, unterschiedlicher Jahreslaufleistungen und Nutzungsart wurde diese Zahl in Diesel und Benzin-Verbrauch aufgeteilt. Daraus ergeben sich ca. 300 Mio. Liter Diesel und 900 Mio. Liter Benzin, die durch Pkw grau importiert wurden. Des Weiteren wurden die durch in Deutschland zugelassene Lkw importierten Mengen aufgrund von Grenzübertritten aus EU und nicht-EU Ländern und einer geschätzten durchschnittlich mitgeführten Dieselmenge von 200 Litern auf insgesamt 1.2 Mrd. Liter Diesel geschätzt. Zusammen ergibt dies für das Jahr 2002 einen abgeschätzten Grau-Import von 0.9 Mrd. Liter Benzin (nur Pkw) und 1.5 Mrd. Liter Diesel (1.2 Mrd. durch Lkw und 0.3 Mrd. Liter durch Pkw).

DIW 2005 folgt der Logik des Inländerverbrauchs, da dieser in «Verkehr in Zahlen» ausgewiesen wird. Das heißt, dass die von Ausländern in Deutschland getankte Menge nur insofern eine Rolle spielt, als dass sie vom Inlandsabsatz abgezogen wird. Ob die ausländischen Pkws diese Kraftstoffmenge in In- oder Ausland verfahren, ist in der Inländerlogik hingegen irrelevant. Für die vorliegende Studie spielt dies hingegen eine Rolle, da kein Unterschied zwischen in- und ausländischen Pkws gemacht wird. Relevant ist hier nur die innerhalb der Landesgrenze verbrauchte Kraftstoffmenge. Auch für Lkw ist der Unterschied zwischen Inländerverbrauch

¹¹ Die Werte für die Jahre 2004 bis 2016 standen für die Erarbeitung dieser Studie zur Verfügung. Da die Unsicherheiten als zu gross eingeschätzt werden, wurden die Daten aber nicht publiziert.

und Inlandsverbrauch relevant, da es eine erhebliche Anzahl von Lkw (in Deutschland und im Ausland zugelassene) im Ausland Diesel tanken und in Deutschland verfahren. Diesel-Exporte von im Ausland zugelassenen Lkw dürfte es hingegen kaum geben. Diese Unterschiede können nicht vollständig aufgelöst werden, da die Dokumentation in DIW 2005 diesbezüglich nicht detailliert genug ist. Wir gehen aber davon aus, dass die dadurch verursachte Unschärfe im Gegensatz zu den allgemeinen Unsicherheiten der Methoden nicht ins Gewicht fällt. Diese Punkte werden daher nicht weiterverfolgt.

Neben der Herleitung der Zahlen für das Jahr 2002, zeigt DIW 2005 zudem die grauen Importe von Diesel und Benzin für die Jahre 1994–2003. Wie diese abgeschätzt wurden, ist in der Studie jedoch nicht im Detail beschrieben, eine zentrale Basis sind aber die Kraftstoffpreisdifferenzen zum Ausland.

Ab 2004 werden diese Zahlen vom DIW und später vom DLR jährlich fortgeschrieben. Dabei werden aus Verkehrszählungen an den Grenzen und den Preisdifferenzen zum jeweiligen Nachbarland die nach Verkehrsströmen gewichteten Preisdifferenzen für Diesel und Benzin zum Ausland ermittelt, welche für die Abschätzung jahresaktuell berücksichtigt werden. Auf dieser Basis wird eine Expertenabschätzung getroffen, wie sich der graue Export bzw. der graue Import im Gegensatz zum Vorjahr entwickelt hat. Die Expertenschätzung korrigiert die durch Preisdifferenz und Grenzquerenden Verkehr ermittelten Werte um unter anderem folgende Veränderungen zu berücksichtigen, die in den letzten 15 Jahren einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hatten:

- ▶ Anteil Diesel-Pkw,
- ▶ Tankgröße,
- ▶ Reichweite,
- ▶ verändertes Mobilitätsverhalten.

Daneben gleichen die Experten die Werte auch ab über einen Vergleich von modelliertem Verbrauch und gemessenem Absatz (siehe Kapitel 4.1.5). Die Unsicherheit dieser Methode ist hoch, weil deren Basis (Schätzung aus dem Jahr 2002) sehr unsicher ist und weil die Methode der Fortschreibung eher qualitativer Natur ist.

4.1.4 Mikroökonomisches Kosten/Nutzen-Modell

Michaelis 2003 und Jackisch et al. 2017 verwenden ein mikroökonomisches Modell um auszurechnen, ab welcher Entfernung zur Grenze es sich lohnt, nur zu Tankzwecken über die Grenze zu fahren. Für diese Entscheidung wägt ein Akteur Kosten und Nutzen ab. Diese Methode wird hier nicht weiter besprochen, da sie sich erstens nur mit reinem Tanktourismus befasst (und nicht mit sowieso stattfindendem Grenzverkehr), zweitens auf sehr theoretischen Berechnungen beruht und diese drittens keine Aussagen zur Menge an grauen Importen macht. Für Letzteres wären zusätzliche komplexe Modellierungen und weitere Daten nötig (Mengengerüst Fahrzeuge in Grenznähe, etc.).

4.1.5 Residualgröße

Alle bisher vorgestellten Methoden modellieren die graue Importe und Exporte aus einer „bottom-up“ perspektive. Die Werte können aber auch Top-down als Residualgröße bestimmt werden. Konkret werden sie als Unterschied des gemessenen inländischen Absatzes und des bottom-up modellierten inländischen Verbrauchs, bestimmt (z. B. Trafico et al. 2008).

Diese Methode kann nicht zur Kalibrierung des Treibstoffverbrauchs in HBEFA oder TREMOD verwendet werden, da die Berechnung der grauen Importe und Exporte ja gerade auf den Resultaten dieser Modelle basiert.

4.2 Methodenvergleich

Die folgenden Tabellen vergleichen die oben beschriebenen Methoden. Tabelle 11 listet die Vor- und Nachteile der Methoden auf, sowie den Datenbedarf und die Quellen, in denen die Methoden beschrieben werden.

Tabelle 12 vergleicht die Methoden anhand einer Reihe von Kriterien.

Tabelle 11: Vergleich Berechnungsmethoden – Informationen

Methode	Vorteile	Nachteile	Datenbedarf	Quelle / Land
Ökonometrisches Tankstellen-Modell	Einbezug Empirie Bestimmung Absolute Menge	Auswertung Empirie aufwändig Sehr hoher Datenbedarf Graue Import ins Kerngebiet nicht berücksichtigt	Tankstellendaten (Absätze, Standorte, Preise) Sozioökonomische Daten auf Gemeindeebene	INFRAS und CEPE 2010 für Export aus der Schweiz
Vergleich Grenzgebiet mit Kerngebiet	Einbezug Empirie (vereinfacht) Einfache Berechnung und Fortschreibung	Hoher Datenbedarf Annahme linearer Beziehung Kern- und Grenzregion. Einmaliges «Eichen» durch andere Methode oder bei Preisdifferenz von null. Graue Import ins Kerngebiet nicht berücksichtigt	Absatzdaten Tankstellen für Kerngebiet und Grenzgebiete Graue Exporte der Eichperiode	MK Consulting 2015 INFRAS und MK Consulting 2014 Plausibilisierung INFRAS und CEPE 2010 alle für Export aus der Schweiz
Grenzquerender Verkehr: Methoden im Detail sehr unterschiedlich (auch bezgl. Datenanforderungen)	Unterscheidung Pkw und SNF Einfache Berechnung und Fortschreibung Bestimmung Absolute Menge Tanktourismus	Differenzen Tankinhalt kaum direkt zu ermitteln Auch Proxis zur Berechnung dieser Differenzen entweder empirisch kaum abgestützt oder Datenbedarf hoch	Statistiken / Befragungen zum grenzüberschreiten den Verkehr Tankinhaltsdifferenzen z oder Proxis z. B.: Befragungen zu Zweck der Reise, Herkunft (In- oder Ausländer), Preisentwicklung Kraftstoffe	Plausibilisierung aus INFRAS und CEPE 2010 Plausibilisierung aus Trafico et al. 2008 Für Export aus der Schweiz bzw. Österreich Methode «Verkehr in Zahlen» (DIW 2005, DLR) Für Nettoimport in Deutschland

Tabelle: INFRAS

Tabelle 12: Vergleich Berechnungsmethoden – Kriterien

Wichtige Merkmale	Ökonometrisches Tankstellen-Modell	Vergleich Grenzgebiet mit Kerngebiet	Grenzquerender Verkehr (DIW-Methode)	Grenzquerender Verkehr (anderer Methoden)
Daten für Deutschland bereits verfügbar?	Nein	Nein	Ja, allerdings nicht publiziert	Nein
Aufwand Erhebung Daten	Kraftstoffabsatz: 30–100 k€ Sozioökonomische Daten > 50 k€	Kraftstoffabsatz: 20–50 k€	Gering	Befragungen: 30–100 k€
Einfache Berechnung und Fortschreibung?	Nein	Ja, falls Daten sowieso erhoben werden	Ja	Ja, falls keine Befragungen mehr nötig sind
Unsicherheit	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch bis sehr hoch
Unterscheidung Diesel / Benzin möglich?	Ja	Ja	Ja	Ja
Unterscheidung Pkw / Lkw Diesel?	Eventuell	Nein	Ja	Ja
Direkte Bestimmung Absolute Menge Tanktourismus?	Ja	Nein	Nein	Ja
Einbezug Empirie	Hoch	Mittel	Gering	Mittel–Hoch
Kernland berücksichtigt?	Nein	Nein	Ja	Ja
Unterschiedlichen Grenzregionen berücksichtigt?	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabelle: INFRAS

4.3 Vergleich «Verkehr in Zahlen» mit anderen Studien

Die Ergebnisse aus «Verkehr in Zahlen» lassen sich nicht direkt mit anderen Methoden für Deutschland vergleichen, da in Deutschland keine von DIW 2005 unabhängige Studie graue Import oder Exporte bestimmt. Es existieren aber Studien aus der Schweiz (INFRAS und CEPE 2010, INFRAS und MK Consulting 2014, MK Consulting 2015) und Österreich (Trafico 2015) bezüglich der Kraftstoffflüsse in Richtung Deutschland. Deren Ergebnisse lassen sich mit den Ergebnissen aus «Verkehr in Zahlen» vergleichen. Dazu haben wir die Zahlen für die Schweiz und Österreich aus den Ergebnissen von «Verkehr in Zahlen» extrahiert. Die Anteile der Schweiz bzw. Österreich entsprechend dabei dem Anteil der nach Verkehrsstärke gewichteten Preisdifferenz. Diesen Vergleich haben wir nur für Benzin durchgeführt, da für Diesel zwischen Pkw und Lkw unterschieden werden müsste. Aufgrund methodischer Probleme ist dies jedoch

nur mit sehr hohen Unsicherheiten möglich und der zusätzliche Erkenntnisgewinn daher sehr gering.

4.3.1 Schweiz

Die Abschätzung der grauen Benzin-Importe aus der Schweiz (Schweizer Studien) sind verglichen mit den Ergebnissen aus «Verkehr in Zahlen» um einen Faktor drei tiefer (siehe Tabelle 13). Die Schweizer Studien basieren zwar alle auf INFRAS und CEPE 2010, benutzen aber unterschiedliche Methoden und können daher als relativ unabhängige Ergebnisse gewertet werden. Die Schweizer Studien berücksichtigen aufgrund der gewählten Methodik nur den Import nach Deutschland aus Schweizer Tankstellen aus dem Grenzgebiet (Distanz bis zu 20 km zu Grenze). Der graue Import aus dem Kerngebiet wird nicht berücksichtigt. Dessen Anteil schätzen wir aber als relativ klein ein (maximal 25%), so dass dieser methodische Unterschied die Diskrepanz der Studien nicht erklären kann. Auch beinhalten die Schweizer Studien sämtliche Importe aus der Schweiz, während «Verkehr in Zahlen» nur die Importe durch Inländer berücksichtigt, was eigentlich zu höheren Werten in den Schweizer Studien führen müsste.

Tabelle 13: Benzin: Graue Importe aus der Schweiz

Studie / Jahr	«Verkehr in Zahlen»	MK Consulting 2015 (Grenz- vs. Kerngebiet)	INFRAS und CEPE 2010 (Ökonometrie)	INFRAS und CEPE 2010 (grenzquerender Verkehr)
2004	100%		40%	
2005	100%		28%	
2006	100%		25%	
2007	100%		32%	41%
2008	100%	32%	24%	
2009	100%	35%		
2010	100%	42%		
2011	100%	43%		
2012	100%	34%		
2013	100%	32%		
2014	100%	44%		

Tabelle INFRAS. Quelle: MK Consulting 2015, INFRAS und CEPE 2010 und Verkehr in Zahlen (DIW 2005/DLR).

4.3.2 Österreich

Für Österreich sind nur Daten für 2005 direkt aus Trafico et al 2008 erhoben worden. Die Ergebnisse aus «Verkehr in Zahlen» sind wieder höher (siehe Tabelle 4). Aber der Unterschied ist mit rund 30–40% wesentlich geringer als bei dem Vergleich zu den Schweizer Studien.

Tabelle 14: Benzin: Graue Importe aus Österreich

Studie / Jahr	«Verkehr in Zahlen»	Trafico et al. 2008 (grenzquerender Verkehr)	Trafico et al. 2008 (grenzquerender Verkehr)
2004	100%		138%
2005	100%	72%	64%
2006	100%		75%

Tabelle INFRAS. Quelle: Trafico et al. 2008 und «Verkehr in Zahlen» (DIW 2005/DLR).

4.4 Wahl Plausibilisierungsmethode in diesem Projekt

Das DLR hat inzwischen die Berechnungsmethodik für «Verkehr in Zahlen» auf Basis der Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014, der neuen KBA-Fahrleistungsdaten unter Berücksichtigung der in diesem Vorhaben abgeleiteten Realverbrauchswerte für die Jahre ab 2017 angepasst. Die bisherigen Unsicherheiten bei der Abschätzung der grauen Importe bleiben jedoch bestehen. Die entsprechend abgeschätzten Mengen werden daher weiterhin nicht publiziert.

Trotz der hohen Unsicherheit und den teils großen Unterschieden zu den Studien aus anderen Ländern (v.a. Schweiz), plausibilisieren wir in diesem Projekt die TREMOD-Ergebnisse mit den DLR-Ergebnissen für «Verkehr in Zahlen». Wir tun dies aus folgenden Gründen:

- ▶ Außer den Daten der Verkehrszählungen an den Grenzen und den Preisdifferenzen zum jeweiligen Ausland stehen in Deutschland derzeit keine weiteren Daten zu Verfügung, um die grauen Importe oder Exporte mittels einer anderen Methode zu berechnen.
- ▶ Der Aufwand und die Kosten zur Erhebung von Daten, die für andere Methoden nötig wären, sind sehr hoch.
- ▶ Die Unsicherheiten anderer Methoden wären ebenfalls hoch.
- ▶ Im Rahmen dieses Vorhabens sowie der Studie ifeu 2019 werden die Fahrleistungen in Deutschland für TREMOD und «Verkehr in Zahlen», soweit es die unterschiedlichen Systemgrenzen¹², zulassen aufeinander abgestimmt. Eine gute Übereinstimmung der Modellrechnungen in TREMOD und «Verkehr in Zahlen» ist dabei nur zu erwarten, wenn die Bilanzierung der grauen Im- und Exporte ebenfalls vergleichbar ist.

Die resultierenden TREMOD-Ergebnisse im Vergleich zu den Absatzzahlen sowie die derzeit daraus ableitbaren Schlussfolgerungen werden in Kapitel 5 erläutert.

Weil die Unsicherheiten aller Methoden zur Bestimmung der grauen Importe und Exporte sowie die Unsicherheiten der Bestimmung des Anteils des Straßenverkehrs am totalen Kraftstoffabsatz zu hoch sind, wäre eine Kalibrierung des Verbrauchsmodells und / oder der Fahrleistungen auf dieser Basis nicht sinnvoll. Andererseits sind auch die Fahrleistungen und die spezifischen

¹² Inland- versus Inländerprinzip

Verbräuche mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet. Darum empfiehlt sich, alle Parameter einzeln bottom-up zu bestimmen und so zu justieren, dass die Gesamtbilanz stimmig und plausibel wird. Dies bedingt eine verstärkte Koordination zwischen den beteiligten Stellen (AG Energiebilanzen, DIW, DLR und ifeu).

5 Aktualisierung des Verkehrsmengengerüsts und der Verbrauchsdaten in TREMOD

Die in diesem Vorhaben entwickelte Methodik zur Verbrauchsermittlung wurde im HBEFA 4.1 (INFRAS et al., 2019) und in der TREMOD-Version 6 umgesetzt. Mit den neuen Verbrauchsdaten aus dem HBEFA 4.1 und dem aktualisierten Verkehrsmengengerüst aufgrund neuer Fahrleistungsdaten (siehe Jamet et al., 2019) wurde das Emissionsinventar in TREMOD neu berechnet. Das Vorgehen und die Ergebnisse sind im Detail in (Knörr et al., 2019) dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Die Abbildung 13 zeigt die Entwicklung des spezifischen Benzinverbrauchs der Fahrzeugkategorien Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und motorisierte Zweiräder in Deutschland für die Jahre 2000 bis 2017 in der Einheit MJ/km. Abgebildet ist der Durchschnittsverbrauch der mittleren Fahrzeugflotte in jedem Bezugsjahr. Der Verbrauch wurde mit dem Inventarmodell TREMOD, Version 6 auf Basis der im HBEFA 4.1 mit der neuen Methodik abgeleiteten Basisverbrauchswerte berechnet.

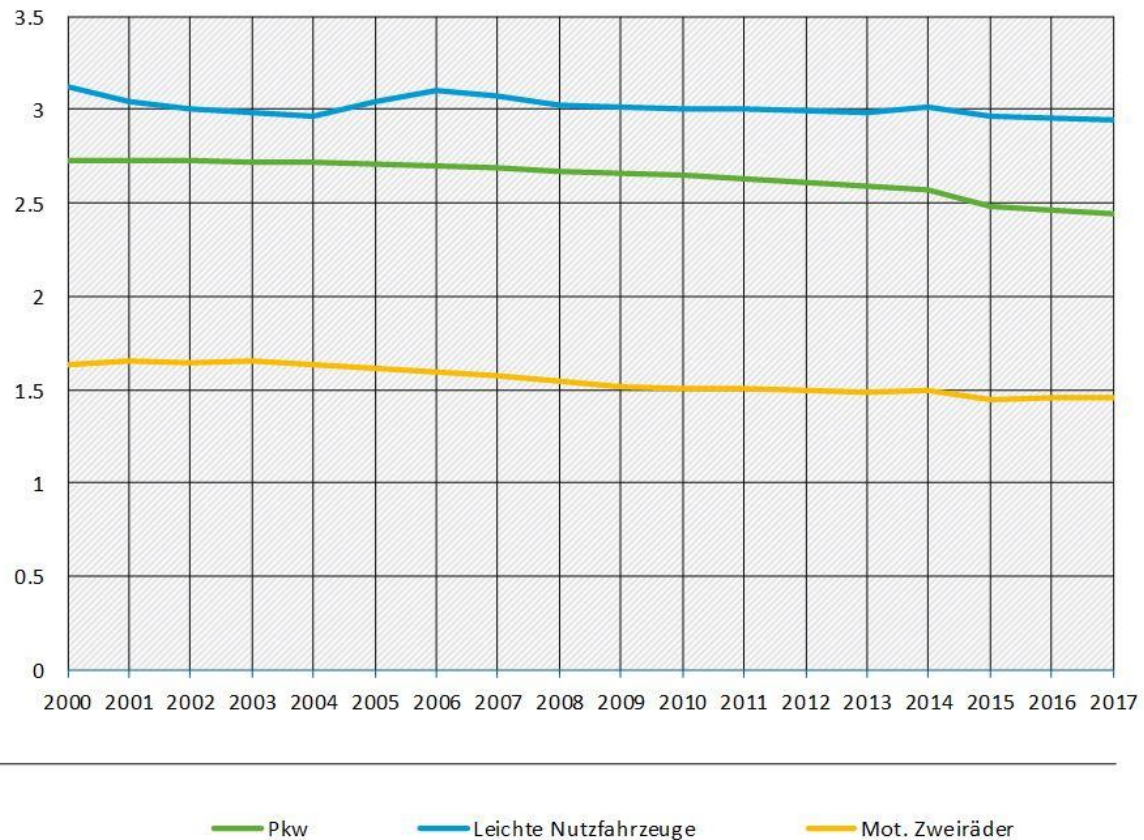
Bei den Pkw liegt der spezifische Verbrauch im Jahr 2000 bei 2,7 MJ/km. Bis zum Jahr 2017 geht er kontinuierlich auf 2,4 MJ/km zurück.

Bei den leichten Nutzfahrzeugen bleibt der spezifische Verbrauch in der gesamten Zeitreihe nahezu unverändert. Mit leichten Schwankungen verringert sich der Verbrauch im Jahr 2000 von 3,1 MJ/km auf 2,9 MJ/km im Jahr 2017.

Der spezifische Verbrauch der motorisierten Zweiräder geht von 1,6 MJ/km im Jahr 2000 auf 1,5 MJ im Jahr 2017 zurück.

Abbildung 13: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland 2000-2017 - Benzin

Mittlerer Benzinverbrauch der Fahrzeugflotte (in MJ/km)



HBEFA 4.1, TREMOD 6, Stand 31.10.2019 (Knörr et al. 2019), Eigene Berechnungen ifeu Heidelberg

Die Abbildung 14 zeigt die Entwicklung des spezifischen Dieserverbrauchs der Fahrzeugkategorien Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, Busse und schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland für die Jahre 2000 bis 2017 in der Einheit MJ/km. Abgebildet ist der Durchschnittsverbrauch der mittleren Fahrzeugflotte in jedem Bezugsjahr. Der Verbrauch wurde mit dem Inventarmodell TREMOD, Version 6 auf Basis der im HBEFA 4.1 mit der neuen Methodik abgeleiteten Basisverbrauchswerte berechnet.

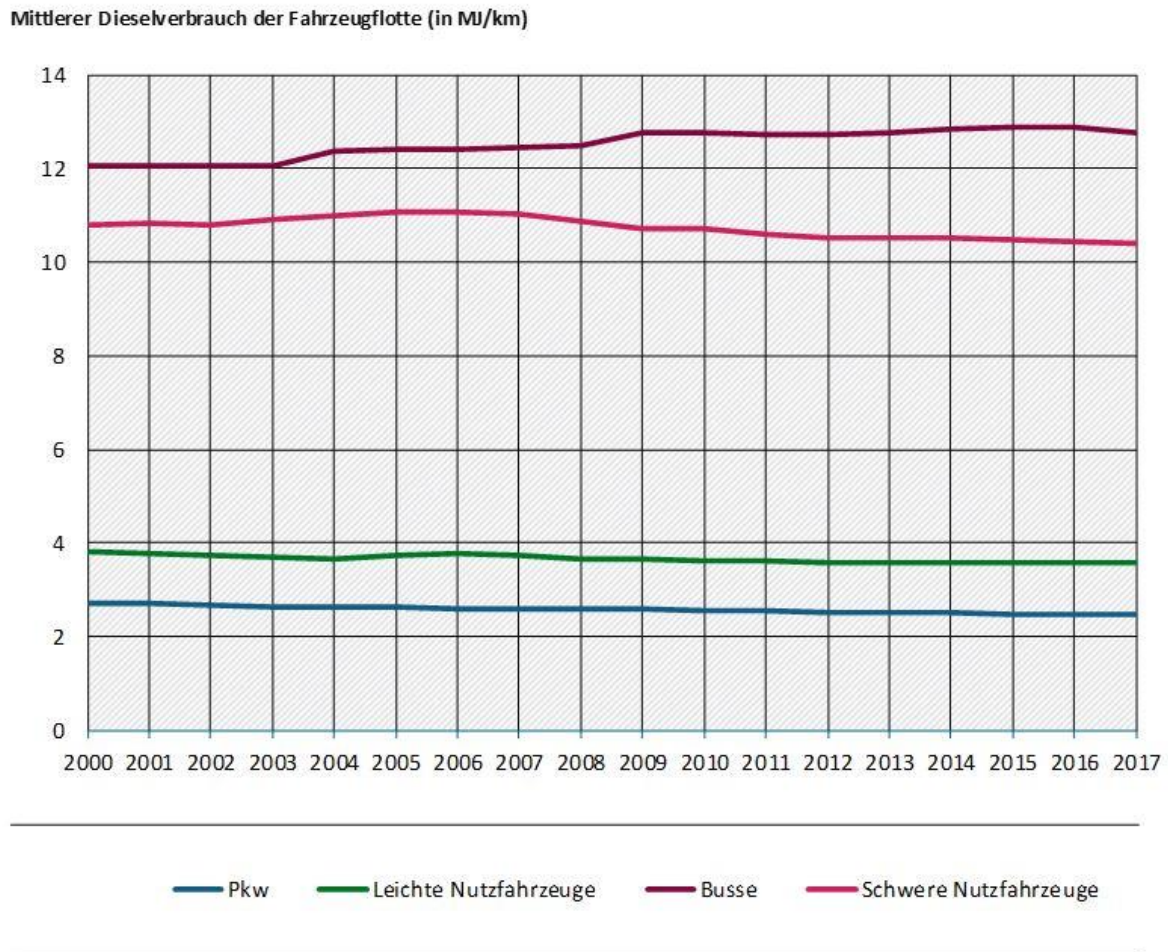
Bei den Pkw liegt der spezifische Verbrauch im Jahr 2000 bei 2,7 MJ/km. Bis zum Jahr 2017 geht er kontinuierlich auf 2,5 MJ/km zurück.

Der spezifische Verbrauch der leichten Nutzfahrzeuge geht von 3,8 MJ/km im Jahr 2000 auf 3,6 MJ im Jahr 2017 leicht zurück.

Bei den Bussen nimmt der spezifische Verbrauch von 2000 bis 2017 von 12,1 MJ/km auf 12,8 MJ/km leicht zu. Grund dafür ist die Änderung der mittleren Fahrzeugflotte hin zu größeren Fahrzeugen.

Die schweren Nutzfahrzeuge des Straßengüterverkehrs verzeichnen bis zum Jahr 2006 einen Zuwachs des spezifischen Verbrauchs von 10,8 MJ/km auf 11,1 MJ/km. Danach geht der Verbrauch bis zum Jahr 2017 auf 10,4 MJ/km zurück.

Abbildung 14: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland 2000-2017 - Diesel



HBEFA 4.1, TREMOD 6, Stand 31.10.2019 (Knörr et al. 2019), Eigene Berechnungen ifeu Heidelberg

Mit der neuen Methodik der Verbrauchsermittlung werden bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen zum Teil deutlich höhere spezifische Verbräuche als bisher berechnet. Die Unterschiede zwischen der aktuellen und der bisherigen Modellrechnung (TREMOD 5.83) sind in Abbildung 15 dargestellt.

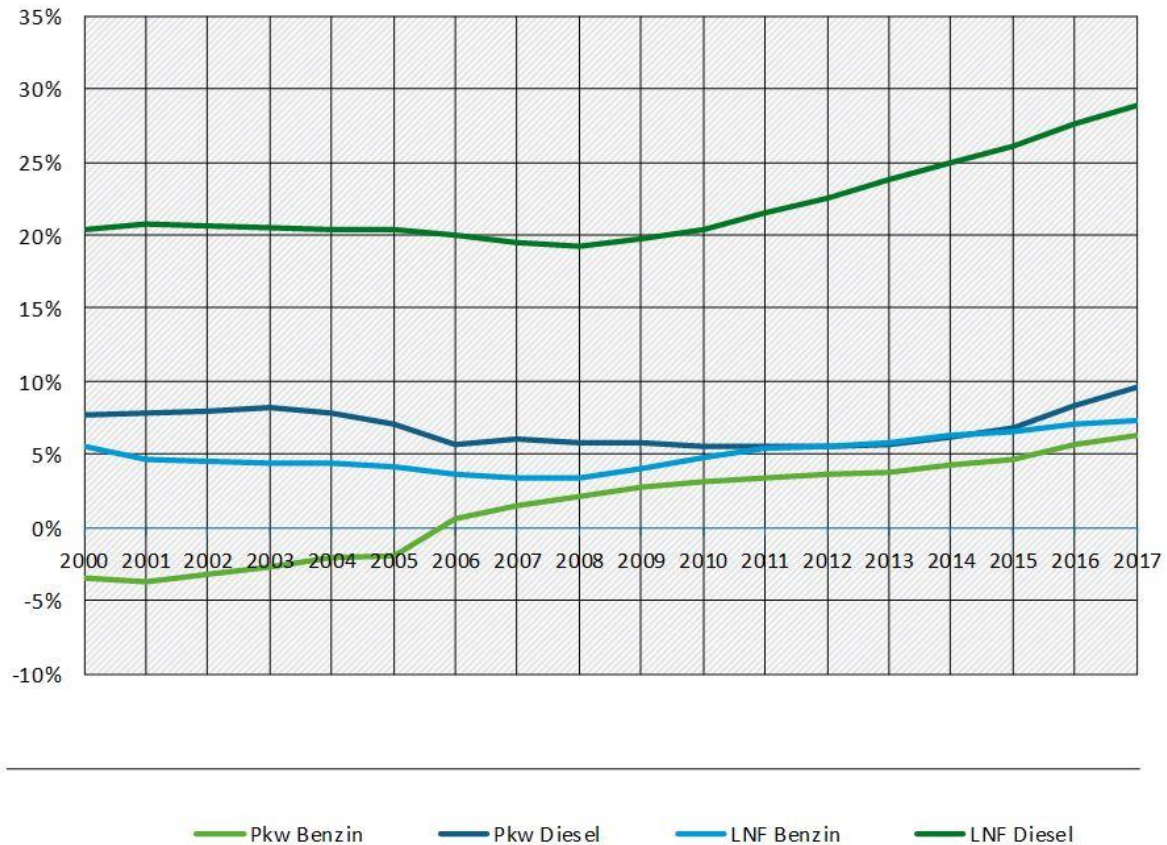
Die Abbildung 15 zeigt den prozentualen Unterschied der nach der neuen Methodik berechneten spezifischen Verbrauchswerte gegenüber den bisherigen Werten in TREMOD 5.83 auf Basis des HBEFA 3.3. Dargestellt sind die Unterschiede für die Pkw und leichten Nutzfahrzeuge (LNF), jeweils für Benzin- und Dieselfahrzeuge.

Bei allen Kategorien nimmt der Abstand der neuen Werte gegenüber den alten im Zeitverlauf zu. Das Ausgangsniveau im Jahr 2000 ist bei den leichten Nutzfahrzeugen und den Diesel-Pkw höher als bisher, nur bei den Benzin-Pkw etwas niedriger. Am deutlichsten ist der Unterschied bei den leichten Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb, deren Niveau im Jahr 2000 um 20 % höher liegt als bisher und sich bis zum Jahr 2017 auf 29 % vergrößert. Bei den Diesel-Pkw liegt das Ausgangsniveau im Jahr 2000 um 8 % höher. Die Differenz nimmt zeitweise ab steigt ab 2010 wieder an und erreicht im Jahr 2017 einen Unterschied von 10 %. Bei den Benzin-Pkw liegt das

Ausgangsniveau im Jahr 2000 um 3 % niedriger als bisher und 2017 um 6 % höher. Die Verbesserung der Energieeffizienz bis 2017 ist damit wie erwartet geringer als bisher.

Abbildung 15: Vergleich der spezifischen Energieverbrauchswerte der neuen Methodik mit den bisherigen Werten (TREMOD 5.83) von 2000 bis 2017

Unterschied des spezifischen Verbrauchs je km in Prozent



Quelle: HBEFA 3.3 und 4.1, TREMOD 5.83 und 6, Stand 31.10.2019, Eigene Berechnungen ifeu Heidelberg

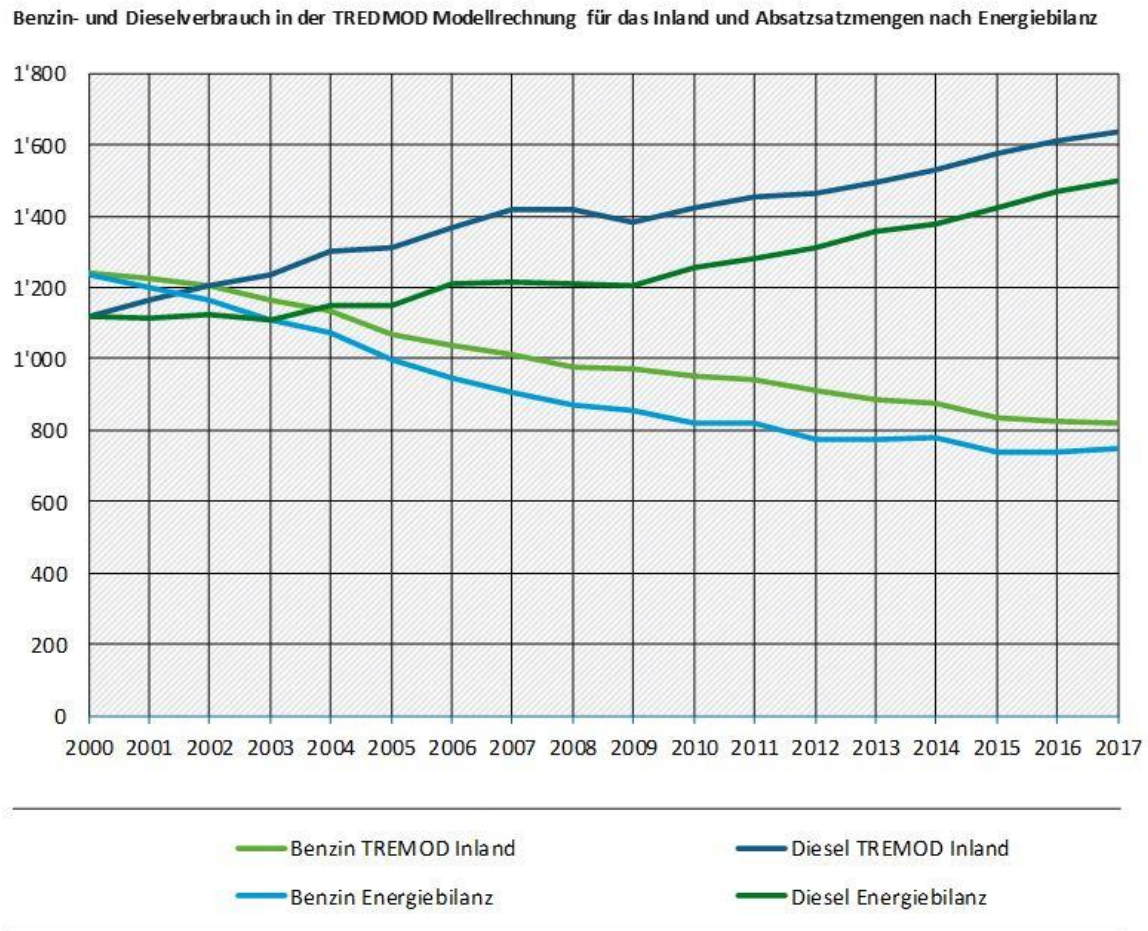
Auch bei den Bussen, motorisierten Zweirädern und schweren Nutzfahrzeugen sind die spezifischen Energieverbräuche im HBEFA 4.1 und in TREMOD 6 z.T. deutlich höher als bisher. Details dazu können in (Knörr et al. 2019) nachgelesen werden.

Die Abbildung 16 zeigt die Entwicklung des gesamten Benzin- und Dieserverbrauchs des Straßenverkehrs in Deutschland für die Jahre 2000 bis 2017 in der Einheit PJ. Abgebildet ist der Gesamtverbrauch an Benzin und Diesel in jedem Bezugsjahr, jeweils als Inlandsverbrauch und als Kraftstoffabsatz nach Energiebilanz. Der Inlandsverbrauch wurde mit dem Inventarmodell TREMOD, Version 6 auf Basis der im HBEFA 4.1 mit der neuen Methodik abgeleiteten Basisverbrauchswerte berechnet. Der Kraftstoffabsatz stellt die Ergebnisse der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen für den Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs dar.

Der Benzinverbrauch des Straßenverkehrs nimmt in der Zeitreihe von 2000 bis 2017 ab, während der Dieserverbrauch im gleichen Zeitraum zunimmt. Die Absatzzahlen liegen bei beiden Kraftstoffen stets unter den mit dem TREMOD-Modell berechneten Inlandsverbräuchen. Der Abstand zwischen Absatz und Inlandsverbrauch nimmt insbesondere in den Jahren 2000 bis 2008 zu.

Der Absatz an Benzin liegt im Jahr 2000 bei 1.237 PJ und nimmt bis zum Jahr 2017 um 39 % auf 724 PJ ab. Beim Dieselkraftstoff steigt der Absatz von 1.120 PJ im Jahr 2000 um 34 % auf 1.457 PJ. Der berechnete Inlandsverbrauch geht beim Benzin um 34 % zurück und steigt beim Diesel um 46 % an.

Abbildung 16: Entwicklung des berechneten Inlandsverbrauchs und des Kraftstoffabsatzes nach Energiebilanz des Straßenverkehrs (in PJ) in Deutschland 2000-2017

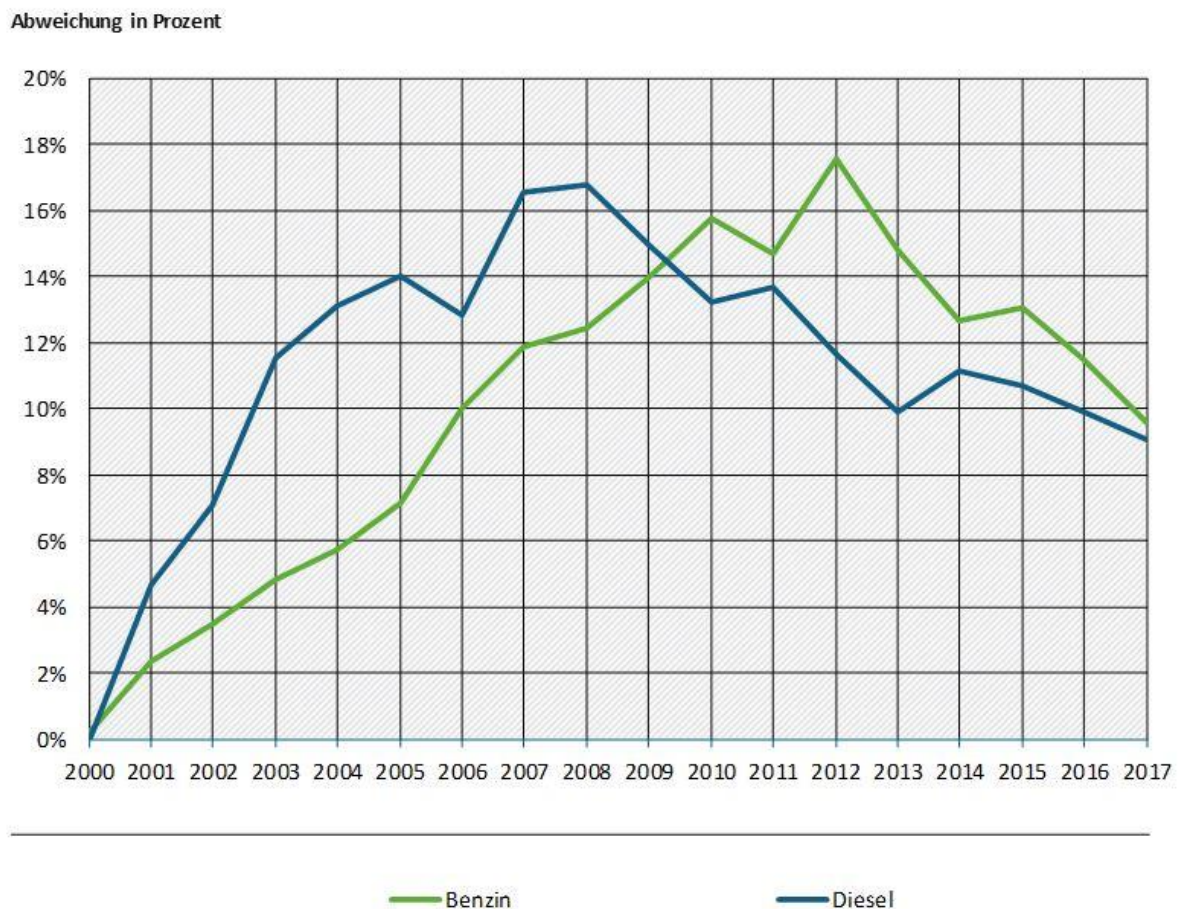


Quelle: TREMOD 6, Stand 31.10.2019 (Knörr et al., 2019), AG Energiebilanzen, Eigene Berechnungen ifeu Heidelberg

Die Abbildung 17 zeigt die Abweichung des mit TREMOD 6 für den Straßenverkehr im Inland berechneten gesamten Benzin- und Dieserverbrauch in Deutschland für die Jahre 2000 bis 2017 im Vergleich zu den Absatzzahlen der AG Energiebilanzen in der Einheit Prozent.

Im Jahr 2000 liegen die Berechnungsergebnisse für das Inland und die Absatzzahlen bei Benzin und Diesel – zufälligerweise – auf dem gleichen Niveau. Die Abweichung des berechneten Inlandsbrauchs nimmt in der Zeitreihe bei Benzin von 2000 bis 2012 kontinuierlich bis auf 17 % zu. Danach nimmt sie bis 2017 auf rund 10 % ab. Beim Diesel steigt die Abweichung bis zum Jahr 2008 auf mehr als 16 % an und nimmt danach wieder auf etwa 9 % ab.

Abbildung 17: Abweichung des berechneten Inlandsverbrauchs von der Energiebilanz 2000-2017



Quelle: TREMOD 6, Stand 31.10.2019 (Knörr et al., 2019), AG Energiebilanzen, Eigene Berechnungen ifeu Heidelberg

Die mit dem TREMOD-Modell berechneten Kraftstoffverbräuche und die Differenzen zu den Absatzzahlen sind plausibel. Ab 2000 hat sich der Kraftstoff in Deutschland durch die Ökosteuer über mehrere Jahre sukzessive verteuert, was die zunehmende Abweichung in der Tendenz erklärt. Unsicherheiten bestehen bei der Größenordnung der Abweichung. Aktuell kommt das DLR kommt in «Verkehr in Zahlen» für das Jahr 2017 für den Inländerverbrauch von Benzin, der sich kaum vom Verbrauch im Inland unterscheidet (die Pkw-Inlands- und Inländerfahrleistung sind nahezu identisch), auf ähnliche Unterschiede und vermutet als Ursache nahezu ausschließlich die grauen Importe.

Beim Dieselmotorkraftstoff sind Inländerverbrauch («Verkehr in Zahlen») und Inlandsverbrauch (TREMOD) wegen des Fahrleistungssaldos im Güterverkehr (mehr Güterfahrleistung durch Ausländer im Inland als von Inländern im Ausland) nicht unmittelbar vergleichbar. So berechnet das DLR für die Inländerfahrleistung 2017 einen Gesamtverbrauch, der nahezu mit den Absatzzahlen der Energiebilanz übereinstimmt, während TREMOD mit einer höheren Fahrleistung im Güterverkehr durch die Ausländer im Inland einen Mehrverbrauch des Inlandsverkehrs von 9 % berechnet. Angesichts eines Fahrleistungsanteils der ausländischen Lkw-, Last- und Sattelzüge von 20 % auf dem Territorium Deutschlands (Bäumer et al., 2016) ist diese Größenordnung plausibel, ebenso wie die Vermutung, dass ein größerer Teil dieser Differenz ebenfalls den grauen Importen zuzurechnen ist.

Hinzu kommen weitere Unsicherheiten, etwa bei der Aufteilung der Kraftstoffe auf die einzelnen Sektoren, oder Änderungen in der Zuordnung der Kraftstoffe in der Mineralölabsatzstatistik 2018 des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, 2018), die das DLR in der Ende 2019 erscheinenden Ausgabe von «Verkehr in Zahlen» 2019/2020 berücksichtigen wird.

Im Rahmen dieser Studie war es nicht mehr möglich, die erst zu Projektende vorliegenden Berechnungsergebnisse aus TREMOD, die im Laufe des Jahres 2019 publizierten geänderten Daten der Mineralölstatistik (BAFA) und die Arbeiten zur Berücksichtigung der Energiestatistikanpassung in «Verkehr in Zahlen» 2019/2020 zu berücksichtigen und abzugleichen. Ein solcher Abgleich sollte jedoch 2020 nachgeholt werden und wäre eine gute Grundlage für die Fortentwicklung der Methode zur Bestimmung der grauen Im- und Exporte.

6 Quellenverzeichnis

Monografien:

AG Energiebilanzen: Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland; erscheinungsweise jährlich

BAFA: Amtliche Mineralölstatistiken für die Bundesrepublik Deutschland; erscheint monatlich;

http://www.bafa.de/DE/Energie/Rohstoffe/Mineraloel/mineraloel_node.html

BAST, 2017: Tempolimits auf Bundesautobahnen 2015, Schlussbericht zum Arbeitsprogramm-Projekt F1100.6110020 Bernhard Kollmus Hartmut Treichel Friedhelm Quast, Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach, August 2017

Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2016): Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung - Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung. Mannheim. 2016.

Breuer, Stefan; Rohrbach-Kerl, Andrea (2015): Fahrzeugdynamik, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-09475-1_3

BMVIT, 2005: Erhebung des grenzüberschreitenden Personenverkehrs 2003 – Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.) (2005c), Wien, 2005.

DIW 2005: Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und für die Verkehrsleistung im Personenverkehr (MIV), Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, April 2005

DLR, IVT 2016: Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung, Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung, Marcus Bäumer, Heinz Hautzinger, Manfred Pfeiffer, Wilfried Stock, Barbara Lenz, Tobias Kuhnimhof, Katja Köhler, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mannheim, August 2016

Dornoff, J.; Miller, J.; Mock, P.; Tietge, U. (2018): The European Commission regulatory proposal for post-2020 CO₂ targets for cars and vans: A summary and evaluation.

[https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-CO₂-proposal_briefing_20180109.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-CO2-proposal_briefing_20180109.pdf)

DIW (2011): Methodenbericht zu «Verkehr in Zahlen» (ViZ) Ausgabe 2010/2011, DIW Berlin, Juni 2011.

EEA 2018: Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars – Regulation (EC) No 443/2009. European Environment Agency (EEA), 19. Dezember 2018. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-and-maps/data/co2-cars-emission-14> (letzter Zugriff 7. 2. 2019)

Hausberger, S. (2003): Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions, VKM-THD, Technische Universität Graz; Graz

Hausberger, S.; Rexeis, M.; Zallinger, M.; Luz, R. (2009): Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3, Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Graz

Heusch-Boesefeldt (1996): Palm, I., Regniet, G., Schmidt, G., Heusch-Boesefeldt: Ermittlung der Pkw- und Nfz-Jahresfahrleistungen 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland; im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen 1996

ICCT (2018). European vehicle market statistics—Pocketbook 2018/2019. The International Council on Clean Transportation. Retrieved from <https://www.theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-20182019>

Jamet, M., Knörr, W. (2019): Überleitung der Fahrleistungserhebung nach TREMOD, ifeu Heidelberg im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2019

INFRAS und CEPE 2010: Tanktourismus, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Bern, 6. Mai 2010.

INFRAS und MK Consulting 2014: Tanktourismus Aktualisierung 2013, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Bern, 10. April 2014.

INFRAS, TU Graz, ifeu, HSDAC, WSP 2019: HBEFA 4.1 Development Report. Im Auftrag von BAFU, UBA Deutschland, UBA Österreich, ADEME Frankreich, Trafikverket Schweden, Miljødirektoratet Norwegen. Bern, 21. August 2019. https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf [letzter Zugriff 15.11.2019]

Knörr, W., Heidt, C., Allekotte, M. (2019): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018); ifeu Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes, in Bearbeitung

Lohnauer Lukas: Einfluss von Anbauteilen und Umgebungsbedingungen auf Real Drive Emission Ergebnisse; Masterarbeit an der TU Graz; 2019

Luz, R.; Hausberger, S. (2013): User Guide for the Model PHEM, Version 11.2; Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Graz

MK Consulting 2015: Tanktourismus und Eurokurs Studie im Auftrag des Erdölvereinigung Schweiz, Bern, 18. Dezember 2015.

Rexeis, M. (2009): Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles, Dissertation, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Graz

Rexeis, M.; Hausberger, S.; Kühlwein, J.; Luz, R. (2013): Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2, Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Graz

Tietge, U., Díaz, S., Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., & Ligterink, N. (2016). From laboratory to road - A 2016 update of official and “real-world” fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe. The International Council on Clean Transportation. Retrieved from <http://www.theicct.org/laboratory-road-2016-update>

Tietge, U., Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., & Ligterink, N. (2017). From laboratory to road: A 2017 update of official and “real-world” fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe. The International Council on Clean Transportation. Retrieved from <http://theicct.org/publications/laboratory-road-2017-update>

Tietge, U., Mock, P., Bandivadekar, A., & Ligterink, N. (2019). From laboratory to road: A 2018 update of official and “real-world” fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe. The International Council on Clean Transportation. Retrieved from [...] NOCH ZU ERGÄNZEN

Trafico, TU Graz, e7 und Umweltbundesamt 2008: Abschätzung der Auswirkungen des Export im Kraftstofftank auf den Treibstoffabsatz und die Entwicklung der CO₂- und Luftschadstoffemissionen in Österreich – Aktualisierung bis 2007 und Prognose, Studie im Auftrag des Österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie Österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Graz, Dezember 08.

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

Zeitschrift

oekom Verlag [Hrsg.] (2016): Umwelt aktuell, 2016, 10, oekom Verlag, München

Zeitschriftenaufsatz

Jackisch, S. Namberger, P. Winder, G. (2017): Rentabilität beim grenzüberschreitenden Tanken am Beispiel der Region Selb-Asch im deutsch-tschechischen Grenzraum. In: Europa Regional 23.2015 (2017), 3, pp. 17-32. URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ss0ar-52893-5>

Michaelis, P. (2003): Tanktourismus: eine Szenario-Analyse, Volkswirtschaftliche Diskussionsreihe / Institut für Volkswirtschaftslehre der Universität Augsburg, No. 249, September 2003.

Tagungsbeiträge

Bonnel, P.; Valverde, V. (2018): EU Real Driving Emissions Regulation - Overview of Concepts & Requirements. RDE-IWG Meeting, 11. – 12.09.2018, Brüssel.

https://wiki.unece.org/download/attachments/64291426/EU_RDE_Overview_Update_09_2018.pdf?api=v2

Hausberger, S.; Rexeis, M.; Luz, R. (2011): PHEM das Modell der TU Graz zur Berechnung von Kfz-Emissionen und seine Datenbasis bei Euro 5 und Euro 6, Fachtagung Emissionen und Minderungspotenziale im Verkehrsbereich, 21.07.2011, Stuttgart

Hausberger, S.; Rexeis, M.; Luz R. (2012): New Emission Factors for EURO 5 & 6 Vehicles, 19th International Transport and Air Pollution Conference, 26. – 27.11.2012, Thessaloniki

Hausberger, S.; Lipp, S.; Matzer, C. (2016): Anforderungen durch die kommende Real Drive Emissions (RDE) Gesetzgebung für Pkw, ÖVK Vortrag Graz, 09.03.2016, Graz

Matzer, C.; Hausberger, S. (2017): Update of Emission Factors for EURO 4, EURO 5 and EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA Version 3.3, 22nd International Transport and Air Pollution Conference, 01.06.2017, Zürich

Windsor, S. (2014): Real World Drag Coefficient – Is It Wind Averaged Drag?, International Vehicle Aerodynamics Conference, 2014, Loughborough