

Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 122

bast

Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge

**Bedarfsanalyse auf Basis
einer Vorstudie**

von

Alex Auf der Maur
Samuel Strassburg

Prognos AG
Basel

Wolfram Knörr
Christoph Heidt

IFEU
Heidelberg

Philipp Wuethrich

INFRAS
Zürich

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 122

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0518/2014:
Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge –
Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie

Fachbetreuung
Conrad Piasecki

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-360-2

Bergisch Gladbach, Februar 2018

Kurzfassung – Abstract

Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge

Das Fahrzeugsegment der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) hat in den vergangenen Jahren in Deutschland stark an Bedeutung gewonnen. Der Bestand ist im Jahr 2014 auf rund 2,1 Mio. Fahrzeuge angewachsen – das entspricht einem Wachstum von +133 % gegenüber 1990. Die Fahrleistungen der LNF haben nach den Annahmen für TREMOD im gleichen Zeitraum sogar um +170 % zugenommen.

Die zunehmende Bedeutung der LNF sowie die heutige Vielfalt der Einsatzzwecke spiegeln sich in der Modellierung der Emissionen von LNF in Deutschland zum Teil nicht wieder. Die Datengrundlagen für das Verkehrsemissionsmodell TREMOD (Transport Emission Model) sowie für das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) sind teilweise mehr als 20 Jahre alt. Die Aufteilung der Fahrleistung nach Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen geht beispielsweise auf eine Analyse von HEUSCH/BOESEFELDT aus dem Jahr 1996 zurück. Die Fahrzyklen, die den Verkehrssituationen und damit auch den Emissionsfaktoren zugrunde liegen, basieren gerade für leichte Nutzfahrzeuge auf wenigen Daten oder sind von Pkw abgeleitet. Zudem stehen nur eine beschränkte Anzahl von Emissionsmessungen für LNF zur Verfügung, auf deren Basis die Emissionsfaktoren für HBEFA abgeleitet werden.

Die Gesamtfahrleistung (Inlandsfahrleistung) der LNF in TREMOD basiert im Wesentlichen noch auf der Fahrleistungserhebung (FLE) 2002. Die Inlandsfahrleistung der LNF war hierbei etwa gleich hoch wie die Inländerfahrleistung. Jedoch wurde nur ca. die Hälfte der Fahrleistungen auf den freien Strecken gemäß Straßenverkehrszählung der BAST erfasst und die Differenz den Innerorts- und Gemeindestraßen in TREMOD zugeordnet. Die Fortschreibung der Fahrleistungen von 2002 bis 2014 erfolgte u. a. über die Straßenverkehrszählungen und die Bestandsentwicklung. Auswertungen der (bei Berichtslegung noch nicht definitiv vorliegenden) Fahrleistungserhebung 2014 müssen zeigen, ob die angenommenen Entwicklungen der Gesamtfahrleistung der LNF sowie pro Straßenkategorie plausibel sind. Vorläufige Ergebnisse der FLE 2014 zeigen deutlich höhere LNF-Inlandsfahrleistungen als aktuell in TREMOD hinterlegt. Eine

Detailanalyse und Interpretation der Ergebnisse konnte aber im Rahmen dieses Projektes noch nicht erfolgen.

Neben den bisher in TREMOD verwendeten Quellen wurden weitere Fahrleistungsdaten untersucht. Für das Jahr 2013 veröffentlichte das Kraftfahrtbundesamt (KBA) erstmals Inländerfahrleistungen je Fahrzeugkategorie und Fahrzeualter, basierend auf Tachostandinformationen von 26,5 Mio. deutschen Kraftfahrzeugen. Es wird empfohlen die Fahrleistungsstatistik vom KBA in zukünftige TREMOD-Aktualisierungen einzubeziehen.

Für die Herleitung der in HBEFA den LNF zugrunde gelegten Fahrmustern wurde bislang nicht nach Pkw und LNF unterschieden. Vergleiche der verfügbaren LNF- und Pkw-Fahrmuster bezüglich der Geschwindigkeit und der Wegedauer zeigen leichte Abweichungen in der Form, dass LNF tendenziell öfter mit geringeren Geschwindigkeiten und kürzerer Wegedauer unterwegs sind als Pkw. Die Unterschiede sind jedoch durchwegs gering. Es können auf der Basis der verfügbaren Datengrundlagen keine eigenständigen LNF-Fahrzyklen abgeleitet werden.

Die Emissionsfaktoren in HBEFA werden über das Simulationsmodell PHEM der FVT-TU Graz generiert. Aufgrund der unzureichenden Datenlage konnten bisher für PHEM keine LNF-spezifischen Emissionskennfelder verwendet werden, d. h. es wurden modifizierte Pkw-Kennfelder für die Modellierung der Emissionsfaktoren verwendet.

Mittlerweile stehen weitere LNF-Messungen für die Herleitung von Emissionskennfeldern zur Verfügung. Für die hinsichtlich der heutigen Fahrleistungen relevanten LNF-Fahrzeugschicht (N1-III-Diesel-Euro-5) liegen beispielsweise aktuell 10 zeitlich hochaufgelöste Emissionsmessungen vor, welche bei der nächsten Aktualisierung von HBEFA genutzt werden können.

Revision of the emission modeling for light duty vehicles

The importance of the category of light duty vehicles (LDV) has increased substantially over the past years. The LDV fleet increased to 2,1 million vehicles in 2014 – which amounts to a total growth of 133% since 1990. The driving performance of LDV increased by 170% (source: TREMOD) over the same period. The growing importance of LDV and the multitude of their applications are not reflected in the emissions modeling for LDV in Germany. The basis for the traffic emissions model TREMOD (Transport Emissions Model) as well as the Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) as input for TREMOD are, in parts, more than 20 years old. For example, the assignment of driving performance to traffic situations and road gradients is still based on an analysis by HEUSCH and BOESEFELDT from 1996. The driving cycles which underlie the traffic situations and hence the emission factors are based on just a few data sets for LDV or are derived from passenger cars. In addition, only few measurements are available for LDV emissions, which are used for HBEFA and TREMOD.

The domestic driving performance of LDV in TREMOD still mainly bases on the driving performance investigation (FLE) from 2002. According FLE 2002, the driving performance for LDV by residents was approximately equal to the territorial driving performance. This relationship has been carried forward since then. However, only about half of the driving performance is covered by the BAST statistics and the remainder is allocated to urban mileage and performance on municipal roads. Evaluations of FLE 2014 (which was not yet published at the time of this report) will show, whether residential and territorial driving performance are still equivalents. Preliminary results show significant deviations of the residential LDV driving performance compared to TREMOD.

In addition to the sources previously used in TREMOD more data on driving performance were examined. For the year 2013, the Federal Motor Transport Authority (KBA) published for the first time the driving performance by residents according to vehicle category and vehicle age based on speedometer readings of 26,5 million motor vehicles. It is recommended to integrate the KBA statistic into future TREMOD updates.

The derivation of the driving patterns which are applied to LDV in the HBEFA has up to now not differentiated between passenger cars and LDV. Comparisons between the available LDV and passenger car driving patterns in speed and time travelled show slight deviations. LDV drive with lower speed and shorter trips compared to passenger cars. However, the differences are too slight to derive stand-alone LDV driving patterns.

The emission factors in HBEFA are generated from the simulation model PHEM by FVT-TU Graz. Because of the scarce data situation, the PHEM model has so far not produced LDV-specific emission maps. Instead, modified passenger car emission maps were used to generate LDV emission factors.

By now additional LDV measurements for the derivation of emission maps have become available. For the LDV category, that is relevant regarding driving performance (N1-III-Diesel-Euro-5), there are currently 10 high-resolution measurements available, which could be used in the next HBEFA update.

Summary

Revision of the emission modeling for light duty vehicles

1 Introduction

The importance of the category of light duty vehicles (LDV) has increased substantially over the past years. The LDV fleet increased to 2,1 million vehicles in 2014 – which amounts to a total growth of 133% since 1990. The driving performance of LDV increased by 170% over the same period (Source: TREMOD). As a result, the fleet of LDV has a rising energy demand and growing CO₂ and nitrogen oxide emissions. However, the amount of particle emissions has been reduced since 1990 due to stricter rules for emissions treatment.

The growing importance of LDV and the multitude of their applications are not reflected in the emissions modeling for LDV in Germany. The basis for the traffic emissions model TREMOD (Transport Emissions Model) as well as the Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) as input for TREMOD are, in parts, more than 20 years old. For example, the assignment of driving performance to traffic situations and road gradients is still based on an analysis by HEUSCH and BOESEFELDT from 1996. The driving cycles which underlie the traffic situations and hence the emission factors are based on just a few data sets for LDV or derived from

passenger cars. In addition, only few measurements are available for LDV emissions, which are used for HBEFA and TREMOD.

The goal of this research project is to assess the current situation of emission modeling for LDV, identify the data basis and, finally, to formulate recommendations for the demand for further research.

2 TREMOD and HBEFA

Since the 1980s, the calculation of emissions represents the main method through which harmful emissions from traffic are estimated and forecasted and through which the necessity and impact of reduction measures is evaluated. The increasingly high standard for environmental information has made it necessary to apply more differentiated, scientifically sound and socially accepted unified methodologies and data in the emission models for the traffic sector. This necessitates a traffic emission model for all modes. Therefore, the German Federal Environment Agency created the “Transport Emission Model”, TREMOD. The model is tightly connected to the computer-database “Handbook Emission Factors for Road Traffic” (HBEFA), which processes the complex emission measurements.

Emissions modeling consists of three partial models:

- The fleet module estimates the vehicle stock and driving performance based on the number of new registrations and survival functions for

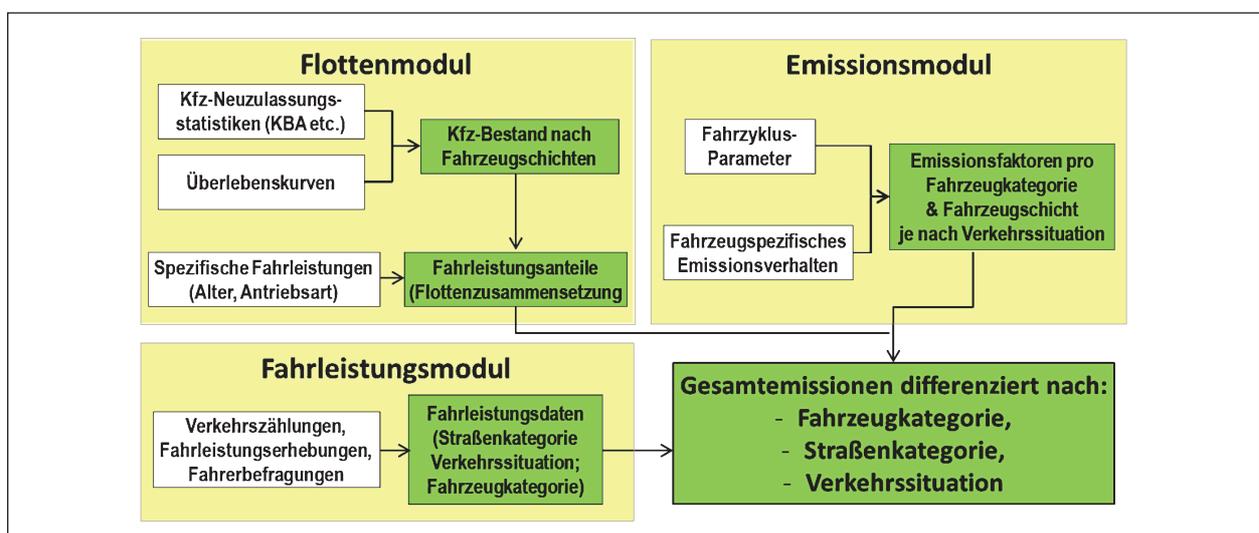


Fig. 1: Scheme of emissions modeling in TREMOD

scenarios. The total driving performance of the entire vehicle fleet is the sum of individual age- and power-based driving performances.

- The driving performance module breaks down the total annual fleet performance into street categories and traffic situations for which emission factors are available, using additional empirical information.
- The emission module processes the emission factors from the HBEFA, so that they can be integrated with the differentiated driving performance from the driving performance module and the fleet module.

Annual total emissions are derived in aggregated and differentiated formats from the integration of all information. The following diagram presents a simplified overview of the calculation process.

3 LDV-driving performance, driving patterns and emission factors

Driving performance

The domestic driving performance of LDV in TREMOD still mainly bases on the driving performance investigation (FLE) from 2002. It was realized that the driving performance abroad of LDV registered by residents was roughly equal to the inland driving performance of foreign vehicles. However, only about half of the driving performance is covered by the BAST statistics and the remainder is allocated to urban mileage and performance on municipal roads. TREMOD updates since 2002 were carried out i. e. by traffic counts statistics (BAST) and fleet development. Analysis of the forthcoming FLE for 2014 will have to show whether this approach is still appropriate. Preliminary results show significant deviations of the LDV driving performance by residents in comparison to the current values in TREMOD.

In addition to the sources previously used in TREMOD more data on driving performance were examined. For the year 2013 the Federal Motor Transport Authority (KBA) published for the first time the driving performance by residents according to vehicle category and vehicle age based on speedometer readings of 26,5 million motor

vehicles. A comparison of the LDV-driving performance by residents between KBA and TREMOD shows that the driving performance of residents according to vehicle age is well modeled in TREMOD.

Driving pattern

The derivation of the driving patterns which are applied to LDV in the HBEFA has up to now not differentiated between passenger cars and LDV. In the framework of the preliminary study, potential differences between the two vehicle categories were investigated.

The WLTP-database includes driving patterns of 20 LDV. The data stems from an investigation in Great Britain. According to the manager of the database (H. STEVEN), these vehicles are likely employed in postal delivery transport (KEP).

Comparisons between the available LDV and passenger car driving patterns in speed and time travelled show slight deviations. In towns LDV drive with lower speed and shorter trips compared to passenger cars. The differences are too slight to derive stand-alone LDV driving patterns. Because of high uncertainty and missing information about trip purpose and area, traffic intensity, road type, etc. it is not possible to form solid conclusions from this information.

Emission measurements

The emission factors in HBEFA are generated from the simulation model PHEM by FVT-TU Graz. For the current edition of the HBEFA 3.2 there are 81 bag and 5 high resolution modal measurements available. Because of the scarce data situation, the PHEM model has so far not produced LDV-specific emission maps. Instead, passenger car emission maps were modified to model LDV emission factors.

By now (since publication of the HBEFA 3.2 in 2014) additional LDV measurements have become available. For the category that is relevant for the driving performance (N1-III-Diesel-Euro-5) i. e. 10 high-resolution measurements are currently available. In our experience, circa 10 emission measurements per vehicle category are sufficient to derive a dependable emission map in PHEM. The existing foundations must accordingly be supplemented by additional emission measurements of selected LDV (especially EURO 6).

4 Research demand

The identified research demand is summarized as follows:

- The impact of LDV with high roofs on harmful emissions and energy consumption needs to be assessed. Substantially higher emissions due to additional abutting surface (higher aerodynamic resistance) would make a differentiation of fleet and driving performance according to roofs sensible.
- It is recommended to include the driving performance statistic of the KBA with its differentiation according to vehicle type and age into future TREMOD updates, because it provides an extensive data basis and annual updates. Possible discrepancies with the current FLE of 2014 should be analyzed and taken into account.
- The total driving performance of LDV in TREMOD was calibrated for territorial driving performance of the FLE in 2002. The difference with the residential driving performance of 2002 was minimal. From the FLE 2014 final results are not yet available. Therefore, it should be tested whether the current approach can still be maintained. If substantial discrepancies between residential and territorial driving performance become apparent, the TREMOD driving performance time series should be adjusted ex-post.
- The LDV driving performance could only be updated for certain road categories (only parent roads), while the difference has been estimated last in 2002. Using the new insights from the FLE 2014, the shares of different road types can be assessed critically.
- The assignment of LDV driving performance to traffic situations and gradients in TREMOD and HBEFA is based on an analysis by Heusch and Boesefeldt from 1996. With the information that has become available since then, it is not possible to evaluate this assignment within in the scope of this study. An analysis of the traffic situations would require a systematic assessment of relevant databases (i. e. counting data) – as was done in the Heusch-Boesefeldt study. Since this work has not been updated for a considerable time, it seems that this would be the most urgent research demand. An update would concern not only LDV, but all vehicle categories.
- Currently, modeling of the LDV emission factors is still based on (modified) passenger car emission maps because the last update of the HBEFA in 2014 had too few emission measurements for LDV available. By now more emission measurements for LDV have become available. For the most relevant LDV type (N1-III-Diesel-Euro-5) there are 10 high-resolution measurements available, which may be used for the next HBEFA update.
- The demand for additional emission measurements has been identified in the preliminary study. The focus lies on Euro-6-Diesel-LDV of the size categories N1-II and N1-III. For Euro-5-LDV additional measurement of the size category N1-II are necessary to derive sound emission maps.

Inhalt

Abkürzungen	11	3.3.2 Kaltstart-Zuschläge	32
1 Einleitung	13	3.3.3 Verdunstungsemissionen	32
2 Modellierung in TREMOD	14	4 Marktsegmentierung LNF	32
2.1 Hintergrund zu TREMOD	14	4.1 Statistische Abgrenzung und rechtliche Rahmenbedingungen von leichten Nutzfahrzeugen	33
2.2 Systemgrenzen	15	4.2 Datenquellen zur Markt- segmentierung	33
2.2.1 Verkehrsarten und Fahrzeug- kategorien	15	4.3 Fahrzeugseitige Entwicklung von leichten Nutzfahrzeugen	34
2.2.2 Betrachtete Komponenten	15	4.3.1 Hersteller und Fahrzeugmodelle	34
2.2.3 Abgrenzung der Umweltwirkungen	16	4.3.2 Größenklassen (zGG, zGM)	35
2.2.4 Räumliche und zeitliche Auflösung	16	4.3.3 Aufbauarten	36
2.3 Methodik	17	4.4 Nachfrage nach leichten Nutzfahrzeugen	37
2.3.1 Übersicht der Emissions- berechnung	17	4.4.1 Haltergruppen	37
2.3.2 Flottenzusammensetzung	17	4.4.2 Wirtschaftszweige	37
2.3.3 Fahrleistung	18	4.4.3 Berufsklassen	39
2.4 Datengrundlagen	19	4.4.4 Segmentierung nach Querschnittsgruppen	40
2.4.1 Flottenzusammensetzung	19	4.5 Synthese der Marktsegmentierung ...	40
2.4.2 Fahrleistung	21	5 Detailanalysen zu Fahrleistungen	41
3 Modellierung in HBEFA	23	5.1 Überblick zu LNF-Fahrleistungs- informationen	41
3.1 Einleitung und Überblick	23	5.2 Vergleich der Fahrleistungen in TREMOD zu anderen Fahrleistungsquellen	43
3.1.1 Geschichte und Entwicklung	23	5.2.1 Vergleich TREMOD zu KBA- Verkehr in Kilometern	43
3.1.2 Finanzierung	23	5.2.2 Vergleich TREMOD zu BAST nach Straßenkategorien	44
3.1.3 Anwendungsbereiche	24	5.2.3 Vergleich TREMOD zur Fahrleistungserhebung der BAST	45
3.2 Definitionen und Abgrenzungen	24	5.2.4 Vergleich TREMOD zu KiD 2010 nach Fahrzeugsegment	46
3.2.1 Überblick	24		
3.2.2 Systemabgrenzung und Definitionen	25		
3.3 Methodik Emissionsfaktoren leichte Nutzfahrzeuge	28		
3.3.1 Warme Emissionen	28		

5.3	Auswertung von KiD 2010	46
5.3.1	Datensatzbeschreibung	46
5.3.2	Vergleich der mittleren Jahresfahrleistungen	47
5.3.3	Abschätzung der KEP-Fahrleistung . .	49
5.4	Synthese der Fahrleistungsanalyse . .	49
6	Detailanalysen zu Emissionsfaktoren	50
6.1	Fahrmuster	50
6.1.1	LNF-Fahrmuster in HBEFA/ TREMOT: Verlauf und Emissionen . . .	50
6.1.2	Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des KEP-Verkehrs auf die Emissionen	55
6.1.3	Datenquellen für LNF-Fahrmuster, Auswertungen WLTP-Datenbank	56
6.1.4	Folgerungen 596.2 Emissionsmessungen	59
6.2.1	LNF-Emissionsmessungen für HBEFA 3.2.	59
6.2.2	Neu verfügbare LNF- Emissionsmessungen	60
6.2.3	Bedarf weitere LNF-Messungen	61
6.2.4	Nutzung von PEMS-Messungen für die Modellierung	61
7	Anforderungen an die Emissionsmodellierung und weiterer Forschungsbedarf	63
8	Literatur	66
	Bilder	70
	Tabellen	72
	Anhang	73

Abkürzungen

ATL	Abgasturbolader	NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit	NH ₃	Ammoniak
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale INFRAstruktur	NO _x	Stickoxide
CADC	Common Artemis Driving Cycle	PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
CH ₄	Methan	PEMS	Portable Emission Measurement System
CNG	Komprimiertes Erdgas (compressed natural gas)	PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
CO	Kohlenmonoxid	PM	Partikelemissionen
CO ₂	Kohlendioxid	PM ₁₀	Partikel mit Durchmesser < 10 Tausendstel-Millimeter
COPERT	Computer Programm to calculate Emission from Road Transport	PROBAS	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt	PRTR	Nationale Schadstoffregister Pollutant Release and Transfer Register
F+E	Forschung und Entwicklung	RPA	Relative positive Beschleunigung
FLE	Fahrleistungserhebung	RS	Remote Sensing
FZ	Fahrzeugzulassungen	RVP	Reid vapour pressure
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren	SNF	Schweres Nutzfahrzeug
HC	Kohlenwasserstoff	SO ₂	Schwefeldioxid
Hz	Hertz	SVZ	Straßenverkehrszählung
ISC	In Service Conformity Testing	TRACCS	Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt	TREMOD	Transport Emission Model
KEP	Kurier-Express-Paketdienst	TREMOVE	economic transport and emissions model
KiD	Kraftverkehr in Deutschland (Erhebung)	UBA	Umweltbundesamt
kPa	Kilopascal	WLTP	World-Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (Fahrzyklus)
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug	ZFZR	Zentrales Fahrzeugregister
LNG	Verflüssigtes Erdgas (liquified natural gas)	zGG	Zulässiges Gesamtgewicht
LPG	Flüssiggas	zGM	Zulässige Gesamtmasse
MZR	Motorisierte Zweiräder		
N ₂ O	Distickstoffmonoxid		

1 Einleitung

Das Fahrzeugsegment der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) hat in den vergangenen Jahren in Deutschland stark an Bedeutung gewonnen. Der Bestand ist von rund 900 Tsd. Fahrzeugen im Jahr 1990 auf rund 2,1 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2014 angewachsen – das entspricht einem Wachstum von +133 %. Gemäß Modellrechnungen haben die Fahrleistungen der LNF im gleichen Zeitraum um +170 % zugenommen. Trotz anhaltender Fortschritte bei der Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs und der Abgasnachbehandlung bei LNF, überkompensieren steigende Fahr- und Verkehrsleistungen diese Fortschritte. Das Ergebnis ist ein höherer Energieverbrauch sowie steigende Kohlendioxid- und Stickoxid-Emissionen. Allein die Partikel-Schadstoffe konnten dank Katalysator und strengeren Vorschriften bei der Abgasnachbehandlung seit 1990 reduziert werden.

Mit dem Bestandswachstum und der Fahrleistungszunahme hat sich auch die Nutzung der LNF stark geändert. Die Hersteller haben in den letzten Jahren die Modellvielfalt gerade bei LNF stark erhöht und berücksichtigen bei den Modellen immer stärker spezifische Kundenbedürfnisse, sodass diese Fahrzeuge für immer mehr Nutzer attraktiv wurden. Für Handwerker haben sich LNF in den letzten Jahren zu mobilen Werkstätten entwickelt, die den Aktionsradius dieser Unternehmen erhöhen und es gleichzeitig ermöglichen, kleinere Arbeiten direkt beim Kunden durchzuführen. Baufirmen und Landschaftsgärtner transportieren Baustoffe und Geräte flexibel mit LNF mit Pritsche. Der boomende Onlinehandel hat ein Wachstum bei Paketdienstleistern nach sich gezogen, der sich in den letzten Jahren

auch in einer zunehmenden Nachfrage nach LNF bemerkbar machte. Da die Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht kleiner als 3,5 Tonnen zudem keinem Lkw-Überholverbot und auf Autobahnen keinen generellen Geschwindigkeitsbegrenzungen unterliegen, ist dieses Fahrzeugsegment bei Kurier- und Expressdienstleistern sehr beliebt [Rapp Trans/Interface, 2013].

Die zunehmende Bedeutung der LNF bei Fahrleistung und Energieverbrauch sowie die heutige Vielfalt der Einsatzzwecke spiegeln sich in der Modellierung der Emissionen von LNF in Deutschland nicht wieder. Die Datengrundlagen für das Verkehrsemissionsmodell TREMOD (Transport Emission Model) sowie für das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) als Lieferant der Emissionsfaktoren für TREMOD sind teilweise mehr als 20 Jahre alt. Die Aufteilung der Fahrleistung auf Straßenkategorien, Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen geht beispielsweise auf eine Analyse von HEUSCH/BOESEFELDT für das Jahr 1993 zurück [HEUSCH/BOESEFELDT, 1996]. Die Fahrzyklen, die den Verkehrssituationen und damit auch den Emissionsfaktoren zugrunde liegen, basieren gerade für leichte Nutzfahrzeuge auf wenigen Daten oder sind von Pkw abgeleitet [INFRAS, 2014]. Die Einsatzzwecke unterschiedlicher Nutzer von LNF sind dabei nicht berücksichtigt. Zudem stehen nur eine beschränkte Anzahl von Emissionsmessungen für LNF zur Verfügung, auf deren Basis die Emissionsfaktoren für HBEFA und damit für TREMOD abgeleitet werden [TU Graz, 2013].

Während schwere Lkw mehrheitlich auf Bundesfernstraßen fahren, finden beachtlich Anteile der LNF-Fahrleistung in dichtbesiedelten Räumen

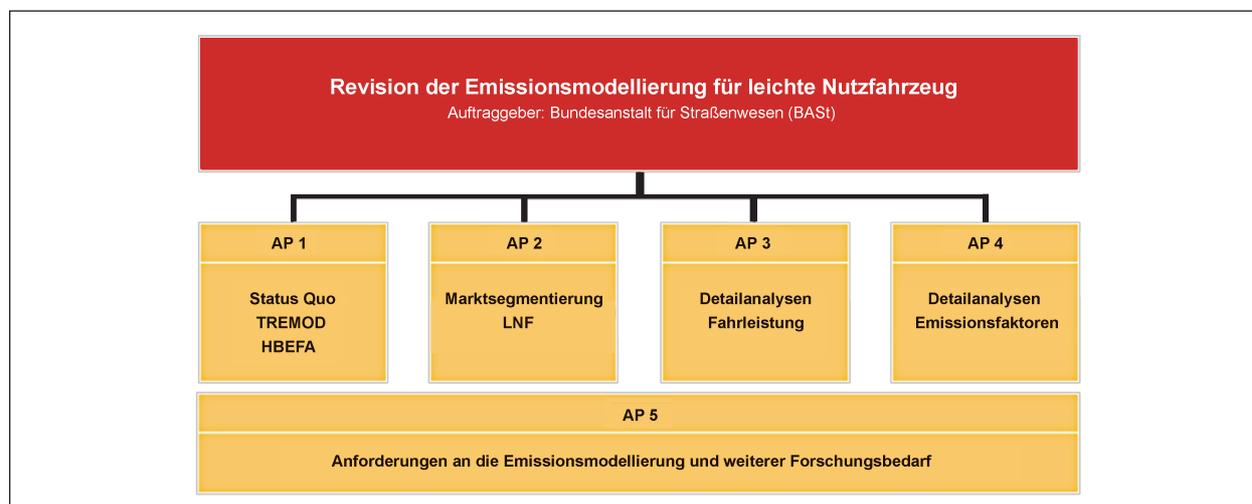


Bild 1: Übersicht Arbeitspakete

statt, wo gesundheitsgefährdende Luftschadstoff- und störende Lärm-Emissionen stärker zu werten sind.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Emissionsmodellierung für das Fahrzeugsegment der LNF zu prüfen, die aktuelle Datenlage zu identifizieren und schließlich Empfehlungen für weiteren Forschungsbedarf abzuleiten. Bild 1 veranschaulicht das Forschungsvorhaben für die Arbeitspakete (AP)-Struktur.

Das Arbeitspaket 1 wird in den Kapiteln 2: Modellierung und TREMOD und 3: Modellierung in HBEFA beschrieben. In Kapitel 4 folgt die Marktsegmentierung der LNF. In den Kapiteln 5 und 6 folgen die Beschreibungen von AP 3: Detailanalysen Fahrleistungen und AP 4: Detailanalysen Emissionsfaktoren. Die Handlungsempfehlungen und die Anforderungen an die Emissionsmodellierung bei LNF (AP 5) werden in Kapitel 7 dieses Berichts behandelt.

2 Modellierung in TREMOD

Aufgabe des aktuellen Kapitels ist es, die Emissionsberechnung in TREMOD allgemein und den Status quo für die Modellierung der leichten Nutzfahrzeuge im Detail zu beschreiben. Einleitend werden zusätzlich die wichtigsten Hintergründe und Anforderungen zu TREMOD erläutert.

2.1 Hintergrund zu TREMOD

Die Emissionsberechnung ist seit Anfang der 80er-Jahre die wesentliche Methode zur Abschätzung der Bedeutung der Schadstoffemissionen des Verkehrs, ihrer zukünftigen Entwicklung sowie der Notwendigkeit und Wirkung von Minderungsmaßnahmen. Sie stellt somit eine wichtige Grundlage für die wissenschaftliche und damit auch für die politische Entscheidungsfindung dar. Seit 1985 diente die Methode beispielsweise für den Nachweis der Effektivität der Einführung der Katalysortechnik. Weiter wurde damit die Realisierbarkeit des NO_x-Protokolls von Sofia für den Verkehrsbereich überprüft. Für die Klima-Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages wurden erstmals die Emissionen aller Verkehrsträger berechnet, alternative Szenarien der Zukunftsbeschreibung entwickelt und die Bedeutung des Nutzfahrzeugverkehrs für die Emissionen aufgezeigt.

Die gestiegenen Anforderungen an Umweltinformationen machten eine stärker differenzierte, wissenschaftlich weiter fundierte und gesellschaftlich akzeptierte einheitliche Methoden- und Datenbasis erforderlich.

Ende der achtziger Jahre wurden deshalb mehr als zehn F+E-Vorhaben im Auftrag des Umwelt- und des Verkehrsressorts zur Erstellung von Daten zum Emissionsverhalten [z. B. RWTÜV, 1993a; 1993b; TÜV Rheinland, 1994, 1995], zum Fahrverhalten und zur Fahrleistung [z. B. HEUSCH/BOESEFELDT 1994a, 1994b; IVT, 1993, 1994] durchgeführt. Diese umfangreiche und komplexe Datenbasis erforderte geeignete Instrumentarien, um den Stand des Wissens auch für die Emissionsberechnung verfügbar zu machen.

Dazu wurde ein Berechnungsmodell für die verkehrsbedingten Emissionen aller Verkehrsträger benötigt. Deshalb veranlasste das Umweltbundesamt die Erstellung des Transport Emission Model abgekürzt TREMOD. Dieses Modell ist eng verknüpft mit dem als PC-Datenbank realisierten Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA), welches die komplexe Datenbasis der Emissionsmessungen aufbereitet, aktuelle Version HBEFA 3.2 [INFRAS, 2014].

Das Aufgabenspektrum von TREMOD umfasst unter anderem:

Berichterstattung durch öffentliche Institutionen

- Emissionsberichterstattung Treibhausgase gemäß Klimarahmenkonvention (Kyoto-Protokoll) (jährlich),
- Projektionsbericht (Berichterstattung von Treibhausgas-Emissionsszenarien) gemäß Klimarahmenkonvention (alle zwei Jahre, ab 2014 voraussichtlich jährlich),
- Berichterstattung zur voraussichtlichen Netto-Treibhausgasemissionseinsparung aufgrund der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen gemäß EU Richtlinie 2009/28/EG,
- Emissionsberichterstattung Luftschadstoff gemäß Genfer Luftreinhaltkonvention (jährlich),
- Emissionsberichterstattung NEC-Richtlinie (jährlich),
- Daten zur Umwelt, TERM-Indikatoren für Europäische Umweltagentur (ohne Szenarien),

- Nationales Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR).

Analyse von Maßnahmen und Politikszenerarien (BMUB/UBA- sowie BMVI/BASSt-Ressortaufgaben)

- UBA-eigene Forschungsberichte zu Verkehrsthemen, z. B. CO₂-Minderung im Verkehr und Strategie für einen nachhaltigen Güterverkehr,
- Maßnahmenbewertung (z. B. Maut-Gestaltung, Effekte neuer EURO-Stufen u. a.); usw. ca. 5-10 Aktivitäten/Jahr mit Zukunftsbezug,
- Bundestagsanfragen etc.

Bereitstellung von Informationen für diverse Akteure

- Bereitstellung Verkehrsmengengerüst Deutschland für das Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr und andere europäische Modelle (COPERT, TREMOVE, aktuelles Projekt: TRACCS),
- Bereitstellung von Umweltkennzahlen für andere Datenbanken, Modelle und Berichte (z. B. Probas, Umweltdatenbank der Allianz Pro Schiene, Umweltbericht der DB),
- Anfragen von Bürgern und Organisationen (ca. 50/Jahr bei UBA resp. BMVI/BASSt und ca. 50/Jahr bei IFEU direkt).

Verwendung in aktuellen Forschungsvorhaben von BMUB, BMVI/BASSt, BMF, z. B.:

- Überleitung der Ergebnisse von GermanHy nach TREMOD (NOW),
- Interaktion Strom Wärme Verkehr (BMUB),
- Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050 (UBA),
- Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (BMVI),
- Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität (BMUB),
- Renewability (BMUB),
- Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr (UBA),
- Luftqualität 2020/2030 – Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien (UBA),

- Klimaschutz-Planer – Kommunaler Planungsassistent für Energie und Klimaschutz (BMUB).

2.2 Systemgrenzen

Nachfolgend werden die Systemgrenzen für die Emissionsberechnung von TREMOD erläutert.

2.2.1 Verkehrsarten und Fahrzeugkategorien

In TREMOD werden die Emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland berechnet. Diese umfassen:

- Straßenverkehr (Personen- und Güterverkehr),
- Schienenverkehr (Personen- und Güterverkehr),
- Binnenschifffahrt (Güterverkehr),
- Luftverkehr (Personen- und Güterverkehr).

Im Straßenverkehr werden folgende Fahrzeugkategorien berücksichtigt:

- MZR – motorisierte Zweiräder (weitere Unterteilung in Krafträder, Kleinkrafträder),
- Pkw – Personenkraftwagen,
- LNF – leichte Nutzfahrzeuge,
- SNF – schwere Nutzfahrzeuge (weitere Unterteilung in Lkw, Last- und Sattelzüge),
- Busse (weitere Unterteilung in Linien- und Reisebusse).

2.2.2 Betrachtete Komponenten

Die für die Emissionsberechnung des Verkehrs verwendeten Emissionsfaktoren für die relevanten Abgaskomponenten lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- Kraftstoffabhängige Komponenten
Zu den nicht limitierten Abgaskomponente gehören Kohlendioxid (CO₂) und Schwefeldioxid (SO₂). Bei den kraftstoffabhängigen Komponenten ergibt sich der Emissionsfaktor aus den Kraftstoffeigenschaften. Bei Kohlendioxid ist der Emissionsfaktor abhängig vom Kohlenstoffgehalt, bei Schwefeldioxid vom Schwefelgehalt im Kraftstoff. Beide werden bei der Verbrennung aufoxidiert zu CO₂ und SO₂. Weitere Komponenten aus unvollständiger Verbrennung, wie

etwa Kohlenmonoxid (CO), oxidieren in kurzer Zeit an der Luft ebenfalls zu CO₂. Die CO₂- und SO₂-Faktoren werden daher stets unter Annahme einer vollständigen Oxidation angegeben.

- **Limitierte Abgaskomponenten**
Zu den limitierten Abgaskomponente gehören Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO_x) und abgasbedingte Partikelemissionen (PM). Für diese Komponenten sind die Emissionsmengen gesetzlich limitiert. Zur Kontrolle der Grenzwert-Einhaltung und Emissionsmodellierung werden die Emissionen der Kraftfahrzeuge kontinuierlich europaweit gemessen und aufbereitet. Emissionsfaktoren für limitierte Komponenten liegen daher in hoher Differenzierung vor.
- **Abgeleitete Abgaskomponenten**
Enthalten sind einige differenzierte Kohlenwasserstoffkomponenten (Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, Benzol). Leitkomponente sind die gesetzlich limitierten Kohlenwasserstoffemissionen. Da für die differenzierten Kohlenwasserstoffe keine kontinuierlichen Messungen vorliegen, werden diese als Anteil an den Gesamt-Kohlenwasserstoffen abgeleitet.
- **Nicht-Limitierte Abgaskomponenten**
In TREMOD enthalten sind als nicht-limitierte Abgaskomponenten Distickstoffmonoxid (N₂O) und Ammoniak (NH₃). Auch für diese Komponenten liegen keine kontinuierlichen Messungen vor.
- **Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)**
sind nicht in HBEFA und TREMOD enthalten und werden daher hier nicht weiter diskutiert.

2.2.3 Abgrenzung der Umweltwirkungen

TREMOD berechnet sowohl direkte als auch indirekte Emissionen. Direkte Emissionen (tank-to-wheel) beinhalten die Auspuffemissionen am Fahrzeug, sowie Emissionen durch Tankatmung und Verdunstungsemissionen im Fahrbetrieb (sog. Running Losses). Indirekte Emissionen (auch well-to-tank) schließen alle Prozesse aus der ganzen Kraftstoffbereitstellungskette, also der Produktion, Verarbeitung, dem Transport und der Verteilung von Kraftstoffen mit ein. Emissionen für die Herstellung-

und Entsorgung von Fahrzeugen werden in TREMOD bislang nicht bilanziert.

Weiterhin werden in TREMOD zwei Arten von Ergebnissen, abhängig von den Anforderungen an die Bilanzierungsebene, produziert:

- **Energieverbrauch und Emissionen im Inland**
Die Inlandsemissionen werden grundsätzlich Bottom-Up auf Basis der im Inland erbrachten Fahr- und Verkehrsleistungen berechnet.
- **Energieverbrauch und Emissionen für die Emissionsberichterstattung**
Die Emissionen für den nationalen Inventarbericht NIR [vgl. UBA, 2013] werden für den Sektor Verkehr, analog zu den anderen Sektoren, auf Basis des inländischen Kraftstoffabsatzes bzw. Stromverbrauchs berechnet. Die hierfür relevante Größe ist der in den Energiebilanzen aufgeführte Endenergieverbrauch des Sektors Verkehr. Die Emissionen werden durch einen Anpassungsfaktor auf die Energiebilanz korrigiert, der sich prinzipiell aus der Differenz zwischen Inlandsverbrauch und Absatz nach Energiebilanz ergibt.

Die Berechnung nach Inlandsprinzip bildet somit für beide Ergebnisse eine zentrale Grundlage. Daher wird diese im Methodik-Kapitel zur Modellierung der LNF in TREMOD ausführlicher erläutert (Kapitel 2.3).

2.2.4 Räumliche und zeitliche Auflösung

Die Ergebnisse von TREMOD werden für Deutschland insgesamt berechnet. Eine räumliche Zuordnung findet nicht statt. Jedoch werden die Emissionen differenziert für verschiedene Straßenkategorien und Straßentypen berechnet.

Die Berechnung erfolgt jährlich und umfasst historische Zeitreihen von 1960 bis heute, welche auf Realdaten basieren (Realjahre), sowie Szenarien bis 2050 zur Bildung von Trendentwicklungen oder Maßnahmen. Eine weitere zeitliche Differenzierung, z. B. nach Jahreszeiten, Monaten, Wochen- und Tagesgängen wird nicht vorgenommen.

2.3 Methodik

2.3.1 Übersicht der Emissionsberechnung

Grundlage für die Emissionsberechnung in TREMOD sind detaillierte Informationen zu den Fahrleistungen und Emissionsfaktoren der einzelnen Fahrzeuge. Der Berechnungsablauf für den Straßenverkehr besteht dabei aus folgenden Elementen:

- **Flottenmodul**

Der differenzierte Fahrzeugbestand pro Fahrzeugkategorie aus der KBA-Statistik (Realbestand) oder der mittels eines Umschichtungsmodells aus Neuzulassungen und Überlebenskurven berechnete Bestand (Szenarien) wird mit Kennzahlen zur mittleren Fahrleistung der verschiedenen Fahrzeugschichten verknüpft. Man erhält so eine differenzierte jährliche Fahrleistungsverteilung der Fahrzeugflotte.

- **Fahrleistungsmodul**

Die jährlichen Gesamtfahrleistungen je Fahrzeugkategorie werden mit geeigneten empirischen Informationen oder Annahmen auf die Straßenkategorien heruntergebrochen und innerhalb jeder Straßenkategorie weiter auf die Verkehrssituationen, für die die Emissionsfaktoren vorliegen.

- **Emissionsmodul**

Im Emissionsmodul werden die Emissionsfaktoren aus dem HBEFA so aufbereitet, dass sie mit den differenzierten Fahrleistungen aus dem Fahrleistungsmodul und Fahrleistungsanteilen

der Flotte aus dem Flottenmodul verknüpft werden können.

Durch Verknüpfung aller Informationen ergeben sich die jährlichen Gesamtemissionen sowohl aggregiert als auch in hoher Differenzierung. Eine vereinfachte Übersicht des Berechnungsschemas und der wesentlichen Datengrundlagen ist in Bild 2 dargestellt. Auf die Datengrundlagen wird im Kapitel 2.4 näher eingegangen. Im Folgenden werden daher nur die methodischen Grundlagen erläutert.

2.3.2 Flottenzusammensetzung

Zur Bestimmung der Flottenzusammensetzung des Straßenverkehrs wird ein repräsentativer Bestand pro Bezugsjahr benötigt. Als repräsentativ für die Flottenzusammensetzung eines Jahres wird der Bestand zur Jahresmitte angenommen.

Der Bestand der LNF gliedert sich dabei nach den Merkmalen:

- Fahrzeugart (in diesem Falle LNF),
- Antriebsart (Otto, Diesel, CNG, LPG, Elektro, andere),
- Größenklasse nach Leergewicht (N1-I, N1-II, N1-III),
- Fahrzeugalter und Emissionsstufen.

Zusammen bilden diese Merkmale die Fahrzeugschicht, welche der Systematik der Emissionsfaktoren im HBEFA folgt.

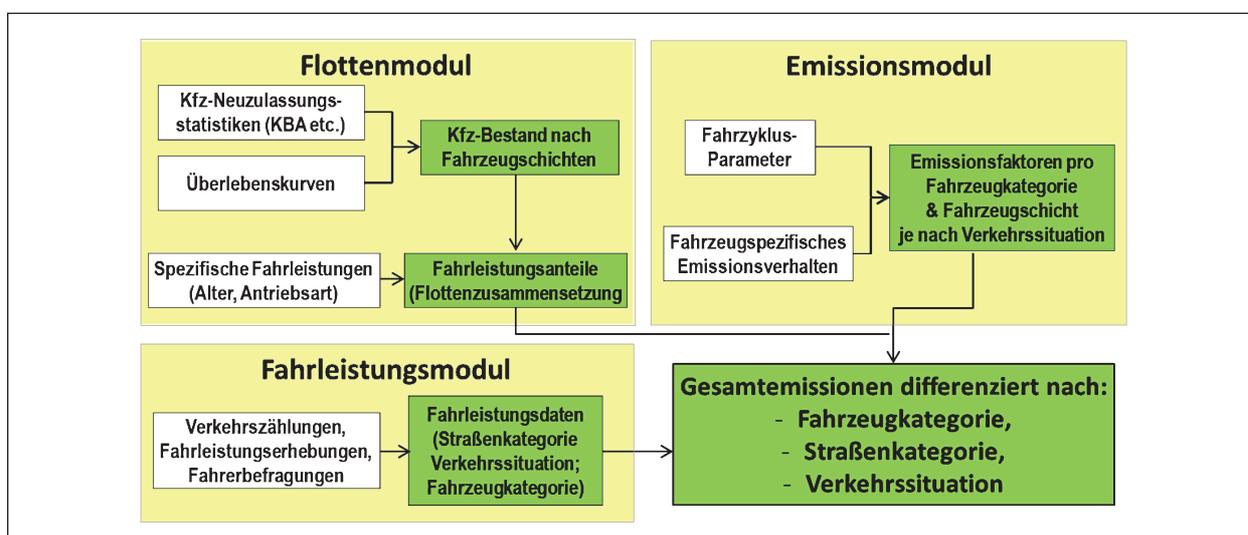


Bild 2: Berechnungsschema Straßenverkehr TREMOD

Fahrzeugkategorie	Otto	Diesel	CNG*	LPG	Strom	Wasserstoff
MZR						
Pkw			≥ 2006	≥ 2001	≥ 2013	
LNF			≥ 2006	≥ 2006	≥ 2013	
SNF						
Busse			≥ 2006			
Betrachtung in Realjahren						
* bei SNF wird zusätzlich verflüssigtes Erdgas (LNG) berücksichtigt						

Tab. 1: Übersicht Kraftstoffarten in TREMOD nach Bezugsjahr

Die Kraftstoffarten der LNF in TREMOD werden in gleicher Differenzierung wie bei den Pkw vorgenommen (Tabelle 1).

Aktuell in den Realjahren berücksichtigte Antriebskonzepte bei den LNF sind:

- Otto: reine Verbrenner und Hybride,
- Diesel: reine Verbrenner,
- Erdgas (CNG): CNG Mono-Fuel und CNG Bi-Fuel,
- Flüssiggas (LPG): LPG-Bi-Fuel,
- Strom: Batteriefahrzeuge.

Tabelle 2 zeigt weiterhin die Differenzierung nach Leergewichtsklassen analog zum HBEFA. Für weitere Details zur Größenklassierung der LNF siehe Anhang 1.

Weitere Kriterien (wie z. B. Aufbauartyp) werden in TREMOD und HBEFA nicht unterschieden. Folgende Liste enthält Beispielmotive für die drei Größenklassen der Lieferwagen:

- (M+)N1-I: Fiat Fiorino, Piaggio Porter,
- N1-II: VW Caddy, Renault Kangoo, Ford Transit Connect, Citroën Berlingo, Opel Combo,
- N1-III: Renault Trafic, Ford Transit Custom, VW T5 Transporter, IVECO Daily, Citroën Jumpy/Jumper.

Ebenfalls analog zu HBEFA werden Emissionsstufen (Euro 1 und früher, bis zu Euro 6c) zugeordnet. Eine sog. Fahrzeugschicht bezeichnet die unterste Gliederungsstufe über alle drei Ebenen, z. B. ein leichtes Nutzfahrzeug, Diesel N1-II, EURO 5.

Leergewicht	M-N1-I	N1-II	N1-III
Euro 1/2	< 1.250 kg	1.250-1.700 kg	> 1.700 kg
Ab Euro 3	< 1.305 kg	1.305-1.760 kg	> 1.760 kg

Tab. 2: Größenklassen der LNF in TREMOD Leergewicht (kg); (Quelle: INFRAS, 2010)

Benzin		Diesel	
Konv < 81	Euro 3	< 1986	Euro 3
Konv > 81	Euro 4	Anl XIII	Euro 4
Euro 1	Euro 5	Euro 1	Euro 5
Euro 2	Euro 6	Euro 2	Euro 6
	Euro 6c		Euro 6c

Tab. 3: Emissionsstufen der LNF in TREMOD (Quelle: HBEFA 3.2)

2.3.3 Fahrleistung

In TREMOD wird zur Ableitung des Fahrleistungsgerüsts die Inlandsfahrleistung in Deutschland zugrunde gelegt. Die Fahrleistungen werden zur Emissionsberechnung differenziert nach Fahrzeugkategorien, Straßentypen, Verkehrssituationen, Längsneigungsklassen sowie nach Fahrzeugschichten (Subsegment).

Fahrzeugkategorien

Die LNF werden in TREMOD analog zu den Emissionsfaktoren des HBEFA als eigene Fahrzeugkategorie abgebildet. Die Abgrenzung der LNF bei der Gesamtfahrleistung der LNF pro Straßenkategorie für jedes Bezugsjahr erfordert zusätzliche Annahmen, welche in Kapitel 2.4.2 erläutert sind.

Fahrzeugmerkmale

Der Fahrleistungsanteil einer Fahrzeugkategorie nach Fahrzeugmerkmalen, z. B. Antrieb, Größenklasse, Alter, ergibt sich zum einen aus den Anteilen der einzelnen Fahrzeugschichten im Bestand.

Zusätzlich zum Bestandsanteil erfolgt jedoch eine Gewichtung nach sog. Fahrleistungsrelationen, welche die spezifische Fahrleistung nach Fahrzeugmerkmalen abbilden soll. Aus den Fahrleistungsuntersuchungen (siehe Kapitel 2.4.2) ist beispielsweise bekannt, dass neuere LNF in der Regel eine höhere spezifische Jahresfahrleistung haben als älteren LNF.

Die Bestandsanteile werden hierbei direkt aus den Ergebnissen der KBA-Daten pro aktuellem

Bezugsjahr berechnet. Die Fahrleistungsrelationen leiten sich hingegen aus Einzeluntersuchungen ab (siehe Kapitel 2.4.2) und werden nicht regelmäßig aktualisiert. Aufgrund einer weniger umfangreichen Datenlage als bei Pkw erfolgt die Differenzierung der Fahrleistungsrelationen bei den LNF nur nach Größenklassen (N1-I, N1-II und N1-III) und nach Fahrzeualter. Antriebsarten und Straßenkategorien werden nicht differenziert.

Straßenkategorien und Verkehrssituationen

Die Fahrleistung wird in TREMOD nach den drei Straßenkategorien Autobahn, sonstige Außerortsstraßen und Innerortsstraßen und nach Straßentypen differenziert, wie sie in der Systematik der BAST verwendet werden.

Die Fahrleistung auf Bundesautobahnen wird zusätzlich nach der Anzahl der Fahrstreifen unterschieden. Dazu werden die zwei Kategorien ≤ 5 und ≥ 6 Fahrstreifen unterschieden.

Die sonstigen Außerortsstraßen werden nach Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen unterschieden. Die Innerortsstraßen werden nicht weiter unterteilt.

Um den Fahrleistungen die Emissionsfaktoren aus dem HBEFA zuordnen zu können, erfolgt weiterhin eine Aufteilung der Fahrleistungen nach Verkehrssituationen pro Straßentyp. Die Verkehrssituationen entsprechen hierbei der Systematik für die Emissionsfaktoren im HBEFA und beschreiben Fahrprofile für verschiedene Straßenkategorien, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Verkehrszustände (siehe Tabelle 12 in Kapitel 3.2.2).

Tabelle 4 fasst die verwendeten Kategorien zusammen.

Längsneigungsklassen

Ein weiteres emissionsrelevantes Merkmal ist die Längsneigung. Hierzu werden verschiedene Längsneigungsklassen definiert, für die die entsprechenden Emissionsfaktoren im HBEFA abgeleitet werden und für die entsprechenden Fahrleistungsanteile ermittelt werden müssen. Die Unterteilung nach Längsneigungsklassen wird in Tabelle 5 festgelegt.

Straßenkategorie		Straßentyp		Verkehrssituationen nach HBEFA
AB	Bundesautobahnen	$A \leq 5$	≤ 5 Fahrstreifen	Land/AB/100
		$A \geq 6$	≥ 6 Fahrstreifen	Land/AB/120 Land/AB/130 Land/AB/80
AO	sonstige Außerortsstraßen (freie Strecken)	B	Bundesstraßen	Land/FernStr/110 Land/FernStr/100 Land/FernStr/80
		L	Landesstraßen	Land/HVS/80 Land/HVS-kurv/80
		K	Kreisstraßen	Land/Sammel/80 Land/Sammel-kurv/80
		G	Gemeindestraßen	Land/Sammel/80 Land/Sammel-kurv/80
IO	Innerortsstraßen (inkl. Ortsdurchfahrtenn)	I	Innerortsstraßen	Agglo/HVS/50 Agglo/HVS/70 Agglo/Erschliess/50

Tab. 4: Straßenkategorien und Verkehrssituationen

Ebene	Steigung	Gefälle
-1 % bis +1 %	1 % bis 3 %	-1 % bis -3 %
	3 % bis 5 %	-3 % bis -5 %
	> 5 %	< -5 %

Tab. 5: Längsneigungskategorien in TREMOD

2.4 Datengrundlagen

Nachfolgend werden die in TREMOD verwendeten Datengrundlagen und deren Verwendung zur Emissionsberichtserstattung beschrieben.

2.4.1 Flottenzusammensetzung

Der Fahrzeugbestand der LNF in TREMOD beruht ab dem Bezugsjahr 2001 auf einer Sonderauswertung der KBA-Datenbank im Auftrag der BAST. Da für die Flottenzusammensetzung eines Jahres der Bestand zur Jahresmitte verwendet wird, wird aus jeweils zwei KBA-Datensätzen zum 1.1. eines Jahres der Mittelwerte berechnet (Bsp.: Der Bestand zum 1.1.2014 und 1.1.2013 der KBA-Statistik ergibt den TREMOD Bestand in 2013). Im Rahmen der TREMOD-Aktualisierung erfolgten seit 2001 auch bei der KBA-Statistik verschiedene Umstellungen, darunter zum Beispiel der Ausschluss der vorübergehend stillgelegten Kfz ab 2008 oder die Ausweitung der Kraftstoffart in differenzierterer Form ab 2012.

Die Daten liegen in ausreichender Differenzierung vor, um das Emissionsverhalten der LNF nach Fahrzeugschicht (vgl. Kapitel 2.3.2) detailliert abbilden zu können. Eine Vielzahl der Datensätze in der Originalauswertung ist jedoch aufgrund ihrer geringen Anzahl wenig relevant für das Gesamtergebnis. Zum Beispiel werden Fahrzeuge mit der Antriebsart Vielstoff oder Unbekannt vereinfacht als Dieselfahrzeuge betrachtet. Die Unterscheidung der Antriebsarten CNG und LPG ab dem Jahr 2006 in TREMOD erforderte wiederum eine rückwirkende Anpassung ausgehend von den Bestandsanteilen dieser Antriebsarten nach Baujahren im Jahr 2012 (siehe Erläuterung in [IFEU, 2012]).

Einige Originaldatensätze können im Einzelfall zu unplausiblen Ergebnissen führen, z. B. Diesel-LNF Euro 2 mit Baujahr 1959¹. Um möglichst plausible und für die Emissionsberechnung relevante Fahrzeugschichten zu berücksichtigen, erfolgt in TRE-

MOD eine Zuordnung der Emissionsstufen aus einer Kombination der Einstufung nach KBA-Emissions-Gruppen und dem Fahrzeugbaujahr (siehe Tabelle 6). Das im Beispiel genannte Diesel-Fahrzeug, Baujahr 1959, würde demnach in TREMOD die Emissionsstufe „vor 86“ erhalten. Da Gasfahrzeug (CNG und LPG) verstärkt in den letzten zehn Jahren auf den Markt kamen, wird diesen Fahrzeugen vereinfacht mindestens Euro 4 zugeordnet.

Für die Bezugsjahre vor 2001 gibt es nur sehr wenige Informationen über die LNF aus der offiziellen KBA-Statistik. Die Altersverteilung der LNF wurde daher entsprechend der Altersverteilung der Lkw nach Nutzlastklassen abgeleitet. Eine Aufteilung nach den Größenklassen M1 und N1-I bis N1-III

¹ Die Einführung von Euro 2 für Pkw und LNF erfolgte erst im Jahr 2000.

KBA-Gruppen	1-3	4	5	6	7	8	9
Zuordnung LNF-Otto							
Vor 81	< 1981	< 1981	< 1981	< 1981	< 1981	< 1981	< 1981
> 81	-1994	-1990	-1990	-1990	-1990	-1990	-1990
Euro 1	-1996	-1996	-1995	-1995	-1995	-1995	-1995
Euro 2	-2001	-2001	-2002	-2000	-2000	-2000	-2000
Euro 3	-2006	-2006	-2006	-2008	-2002	-2002	-2002
Euro 4	-2012	-2012	-2012	-2012	-2012	-2006	-2006
Euro 5	-2015	-2015	-2015	-2015	-2015	-2016	-2008
Euro 6	> 2015	> 2015	> 2015	> 2015	> 2015	> 2016	> 2008
Zuordnung LNF-Diesel							
Vor 86	< 1986	< 1986	< 1986	< 1986	< 1986	< 1986	< 1986
Anl. XIII	-1994	-1990	-1990	-1990	-1990	-1990	-1990
Euro 1	-2002	-2002	1995	-1995	-1995	-1995	-1995
Euro 2	-2007	-2007	-2007	-2000	-2000	-2000	-2000
Euro 3	-2009	-2009	-2009	-2009	-2002	-2002	-2002
Euro 4	-2012	-2012	-2012	-2012	-2012	-2006	-2006
Euro 5	-2015	-2015	-2015	-2015	-2015	-2016	-2008
Euro 6	> 2015	> 2015	> 2015	> 2015	> 2015	> 2016	> 2008
Zuordnung LNF-LPG, CNG und CNG-Bi-Fuel							
Euro 4	< 2012	< 2012	< 2012	< 2012	< 2012	< 2006	< 2006
Euro 5	-2015	-2015	-2015	-2015	-2015	-2016	-2008
Euro 6	> 2015	> 2015	> 2015	> 2015	> 2015	> 2016	> 2008
Die Zellen enthalten jeweils das letzte Jahr des Zeitintervalls; die Zeitintervalle starten jeweils mit dem Folgejahr der darüber liegenden Zelle.							
Die unterlegten Felder markieren die für die jeweilige Emissionsstufe typischen Baujahre.							

Tab. 6: Zuordnung der Baujahre zu Emissionsstufen für LNF in TREMOD (Quelle: IFEU)

sowie nach Emissionsstufen liegt nicht vor und musste daher geschätzt werden.

Für die Jahre 1994-2000 wurde hierfür die Aufteilung der Bestände nach Größenklassen, Emissionsstufen und Baujahr aus dem differenzierten Datensatz im Jahr 2001 genommen und auf jedes Baujahr die entsprechende Struktur nach Größenklasse und Emissionsstufe übertragen. Für die Jahre vor 1994 wurde das Verfahren wegen der zunehmenden Ungenauigkeit nicht angewandt. Vielmehr wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass die Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht ≤ 2.000 kg der Gewichtsklasse M+N1-I und mit 2.001-3.500 kg der Gewichtsklasse N1-II angehören. Die Gewichtsklasse N1-III bleibt in den Jahren vor 1994 unbesetzt.

2.4.2 Fahrleistung

Für die Ableitung der Fahrleistungen nach den in Kapitel 2.3.3 genannten Kriterien müssen verschiedene Informationsquellen herangezogen werden. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick:

- Im Auftrag der BASt wurden kontinuierlich Zählungen von automatischen Dauerzählstellen an Bundesfernstraßen durchgeführt und jährlich veröffentlicht, z. B. in [BASt, 2013]. Hierbei können nur die Kategorien Leichtverkehr und Schwerverkehr differenziert werden, wobei die LNF zur ersten Kategorie gehören.
- In der Regel findet außerdem alle fünf Jahre eine Straßenverkehrszählung (SVZ) statt, bei der die Fahrleistungen nach sechs Fahrzeugkategorien, inklusive der LNF, differenziert und für Bundesautobahnen sowie für die freien Strecken der Bundes- und Landesstraßen ermittelt werden (Vergleiche BASt, 2013, BASt, 2007; LENSING, 1997, 2003). Diese Erhebungen bilden somit nicht die Gesamtfahrleistung auf allen Straßen ab.
- Fahrleistungserhebungen wurden in den Jahren 1990, 1993 und 2002 durchgeführt [IVT, 1993, 1994, 2004]. Ergebnisse aus der Fahrleistungserhebung 2014 sind in der aktuellen TREMOD-Version (noch) nicht berücksichtigt. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Auswertungen von Befragungen zu Inländerfahrleistungen. Auf die Inlandsfahrleistung wird aus den Inländerfahrleistungen und Erhebungen zum grenzüberschreitenden Verkehr geschlossen.
- Für die Bezugsjahre 1986, 1990 und 1993 wurden in den Fahrleistungsuntersuchungen die Fahrleistungen nach differenzierten Merkmalen bzgl. Straßen- als auch Fahrzeugkategorien in Deutschland ermittelt [HEUSCH/BOESEFELDT, 1994a; 1994b, 1996].
- Traditionell eine wichtige Quelle zu den Inländerfahrleistungen in Deutschland für verschiedene Fahrzeugkategorien ist die Fahrleistungs- und Verbrauchsrechnung des DIW [DIW, 2005; ViZ BMVBS, n. d.].

Gesamtfahrleistung nach Straßenkategorien

Für TREMOD werden die Inlandsfahrleistungen der LNF differenziert nach Straßenkategorien benötigt. Da die Straßenverkehrszählungen nicht die gesamte Inlandsfahrleistung in Deutschland enthalten, müssen die Fahrleistungsdaten mit geeigneten Annahmen oder durch weitergehende Untersuchungen ergänzt werden.

Zur Ableitung der Gesamtfahrleistungen für die LNF werden sowohl die Inlands- als auch die Inländerfahrleistung der Fahrleistungserhebung 2002 bzw. Daten der Straßenverkehrszählungen und der automatischen Dauerzählstellen aus den Jahren 1995 bis 2002 sowie die Fahrleistungsuntersuchung aus dem Jahre 1993 verwendet.

Für das Jahr 1993 liegt mit der Fahrleistungserhebung (FLE) die Inlandsfahrleistung für jede Straßenkategorie direkt vor. Die FLE 2002 liefert die Inländerfahrleistung. Die aus der Inländerfahrleistung und der Untersuchung zum grenzüberschreitenden Verkehr abgeleitete Inlandsfahrleistung unterscheidet die Fahrzeugkategorien Lkw $\leq 3,5$ t (LNF), die SNF (Lkw $> 3,5$ t und Lastzüge inkl. Sattelzüge) sowie übrige Kfz. Bei den LNF stimmen Inländer- und Inlandsfahrleistung im Jahr 2002 gut überein, wie Tabelle 7 verdeutlicht.

Kategorie	Inländer-Fahrleistung	Saldo	Inlands-Fahrleistung
LNF	34,5	0,1	34,7
SNF	42,3	4,4	46,7
Übrige Kfz*	3,5*	0,0	3,5*
Gesamt	80,4	4,5	84,9
* ohne Wohnmobile			

Tab. 7: Aufteilung der Inländer- und Inlandsfahrleistung für das Jahr 2002, in Mrd. km (Quelle: IVT, 2004)

Für die Aufteilung der Fahrleistungen nach Straßenkategorien werden die Straßenverkehrszählungen verwendet. Die Straßenverkehrszählung für das Jahr 2000 enthält die Fahrleistungen jeweils für die Straßenkategorien Autobahn, Bundes-, und Landesstraße. Für die Kreisstraßen liegen Fahrleistungen für das Jahr 2000 vor, allerdings nicht für alle Bundesländer. Aufgrund der vollständigen Angaben für die alten Bundesländer (Lkw $\leq 3,5$ t: 1,14 Mrd. km) werden etwas höhere Fahrleistungen für Deutschland insgesamt (+15 % gegenüber den alten Bundesländern) abgeschätzt.

Schließlich werden die Ergebnisse für 2000 bis 2002 anhand der Ergebnisse der Zählungen an den automatischen Dauerzählstellen und weiterer Annahmen fortgeschrieben. Tabelle 8 stellt die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung und der Straßenverkehrszählung sowie die Relation zwischen beiden Erhebungen dar.

In der Gegenüberstellung der Ergebnisse der Straßenverkehrszählung mit der Inlandsfahrleistung aus der Fahrleistungserhebung erreicht die Fahrleistung der LNF in der Straßenverkehrszählung 50 % der gesamten Inlandsfahrleistung. Diese Differenz wäre logischerweise dem Innerortsverkehr (inkl. außerörtliche Gemeindestraßen) zuzuordnen. Gegenüber der Fahrleistungsuntersuchung 1993 wäre die Differenz jedoch somit von 35 % auf 50 % gestiegen. Die Gründe für eine solche starke Änderung innerhalb der Zeitreihe konnten dabei bisher im Rahmen von TREMOD nicht weiter untersucht werden.

Tabelle 9 stellt das Ergebnis der Annahmen für die LNF im Jahr 2002 dar. Die Fahrleistung innerorts und auf Gemeindestraßen ergibt sich aus der Diffe-

FLE	SVZ*					Relation
Eckwert	AB	B	L	K	Alle	SVZ/FLE
34,7	9,1	3,8	3,1	1,4	17,5	50 %

* SVZ: Straßenverkehrszählung 2000, Annahmen zur Fortschreibung bis 2002 aufgrund der Ergebnisse für die automatischen Dauerzählstellen 2002

Tab. 8: Inlandsfahrleistung (Fahrleistungserhebung) und Straßenverkehrszählungen der LNF für das Jahr 2002, in Mrd. km

AB	B	L	K	G	I	Gesamt
9,1	3,8	3,1	1,4	2,0	15,2	34,7

Tab. 9: Inlandsfahrleistung der LNF nach Straßenkategorien im Jahr 2002 in TREMOD, in Mrd. km (Quelle: FLE 2002 und IFEU-Annahmen)

renz zwischen der Fahrleistungssumme (FLE) und der Straßenverkehrszählung (SVZ). Die weitere Aufteilung in die Innerorts und Gemeindestraßen erfolgt basierend auf dem Ergebnis der Fahrleistungsuntersuchung 1993.

Die Fahrleistungen in der Zeitreihe werden ausgehend von den Eckwerten 1993 und 2002 aufgrund der Bestandsentwicklung, der Straßenverkehrszählungen und im Abgleich mit der Energiebilanz plausibel abgeleitet.

Fahrleistung nach Verkehrssituationen und Längsneigung

Für die Aufteilung der Fahrleistungen der LNF pro Straßenkategorie nach Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen existiert bisher nur die Abschätzung der Fahrleistungsuntersuchung 1993 [HEUSCH/BOESEFELDT, 1996]. Die Aufteilung der Fahrleistung nach Verkehrssituation entsprechend HBEFA je Straßenkategorie zeigt Tabelle 12 in Kapitel 3.2.2.

Fahrleistung nach Fahrzeugmerkmalen

Eine wesentliche Grundlage für die Fahrleistung der LNF nach Fahrzeugmerkmalen in TREMOD ist Fahrleistungsuntersuchung 1993 [HEUSCH/BOESEFELDT, 1996] und die Inländerfahrleistungserhebung 2002 [IVT, 2004]. Die Fahrleistungsrelationen nach Größenklassen wurden aus der Fahrleistungsuntersuchung 1993 abgeleitet (siehe Tabelle 10).

Die altersabhängige Fahrleistungsrelation der LNF wird basierend auf der Fahrleistungserhebung 2002 [IVT, 2004] ermittelt. Aufgrund der zu geringen Datengrundlage wird für die LNF dieselbe Fahrleistungsrelation nach Alter wie für alle Lkw (ohne Sattelzüge), angenommen. Auch erfolgt in TREMOD, anders als bei den Pkw, bisher keine Unterscheidung der Fahrleistungsrelation nach Straßenkategorien.

Segment	Fahrleistungsrelation	Mittlere Jahresfahrleistung je Fahrzeug (km/a)*
LNF N1-I	1,0	14.948
LNF N1-II	1,15	17.191
LNF N1-III	1,47	21.974

* Mittlere Jahresfahrleistung: Inlandsfahrleistung bezogen auf den inländischen Bestand

Tab. 10: Fahrleistungsrelation der LNF-Segmente im Jahr 2010 (Quellen: IVT 2004a, Abschätzungen des IFEU)

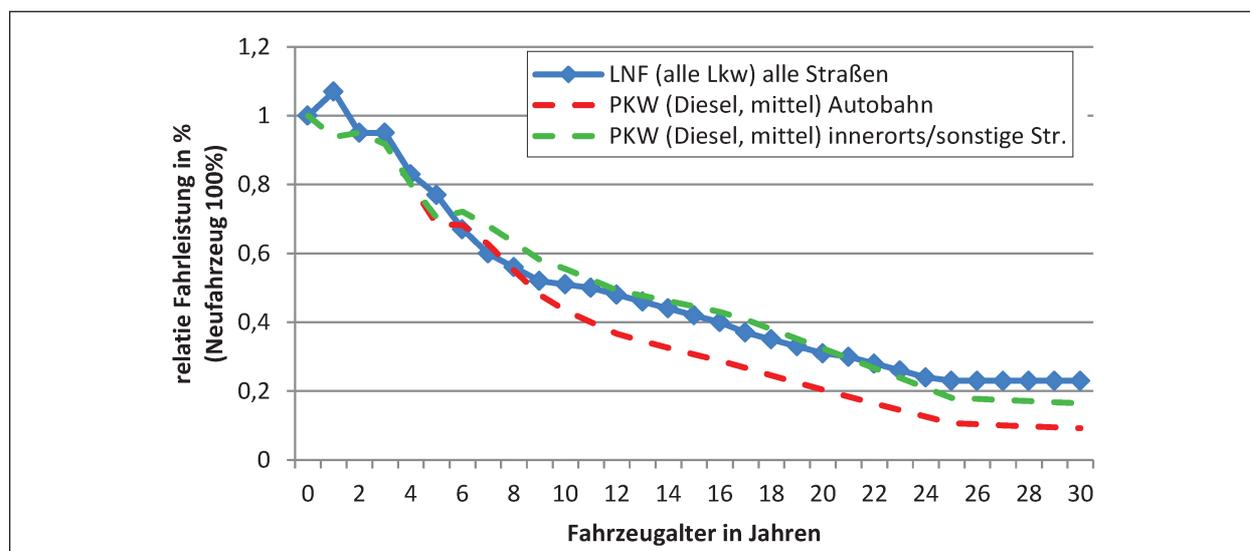


Bild 3: Fahrleistungsrelation der LNF (und Lkw) nach Alter im Vergleich zu Diesel-Pkw (Quelle: IVT 2004a und eigene Berechnungen)

Die angenommene Fahrleistungsrelation der LNF im Vergleich zu Pkw verdeutlicht Bild 3. Die Fahrleistungsrelation der LNF ähnelt derjenigen für mittlere Diesel-Pkw, welche mit ca. 22.000 km/a für Neufahrzeuge eine vergleichbare mittlere Jahresfahrleistung haben. Jedoch nimmt die Fahrleistung bei Pkw auf Autobahnen stärker ab als auf den sonstigen Straßen und als bei den LNF, bei denen bisher keine Unterscheidung nach Straßenkategorien erfolgt.

sigen, auf gemeinsamer Methodik aufbauenden und regelmäßig aktualisierten Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr.

HBEFA in der Public Version ist kostenpflichtig und öffentlich zugänglich. Die Public Version enthält im Wesentlichen die Emissionsfaktorendatenbank. Die Expertenversion von HBEFA wird ausschließlich an ausgewählte Experten abgegeben, die an der Weiterentwicklung von HBEFA beteiligt sind und ist daher nicht öffentlich. Die Expertenversion beinhaltet zusätzliche Module und Funktionalitäten (siehe auch Kapitel 3.2).

3 Modellierung in HBEFA

3.1 Einleitung und Überblick

3.1.1 Geschichte und Entwicklung

Die Entwicklung des „Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA) geht zurück in die frühen 1990er Jahre. Die erste Version von HBEFA (Version 1.1) wurde im Jahr 1995 veröffentlicht, damals im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland und der Schweiz, bald darauf – ab 1997 – beteiligte sich auch Österreich an der Entwicklung von HBEFA. Aktualisierungen und damit neue Versionen von HBEFA erfolgten in ca. 4-5-Jahresabschnitten: Die Version 1.2. folgte 1999, Version 2.1 2004, Version 3.1 neu mit zusätzlich schwedischer und norwegischer Beteiligung im Jahre 2009 und die letzte Version 3.2 (neu mit Frankreich) im Jahre 2014. Übergeordnete Motivation und Zielsetzung von HBEFA seit Beginn der Arbeiten war die Aufbereitung und Veröffentlichung von zuverlässigen,

3.1.2 Finanzierung

Seit seinen Anfängen wird HBEFA über Beiträge der Umweltbundesämter von Deutschland², Österreich³ und der Schweiz⁴ finanziert. Seit der Version 3.1 unterstützen auch das Schwedische Zentralamt für Verkehrswesen (Trafikverket), das Norwegische Umweltbundesamt, die Französische Umwelt- und Energiemanagementagentur (ADEME) und das Forschungszentrum der Europäischen Kommission JRC⁵ die Weiterentwicklung von HBEFA. Nebst die-

2 Umweltbundesamt Deutschland (UBA) in Dessau/Berlin.

3 Umweltbundesamt GmbH (zu 100 % im Eigentum des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) in Wien.

4 Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Bern.

5 Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Sustainable Transport Unit in Ispra (IT).

sen Basisfinanzierungen wird HBEFA auch regelmäßig in Form von projektspezifischen Erweiterungen finanziert, nicht zuletzt durch die Deutsche Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und weiteren Institutionen.

3.1.3 Anwendungsbereiche

Die öffentliche Version von HBEFA umfasst die Datenbank, welche die nach verschiedenen Aspekten (siehe nächstes Kapitel) gewichteten Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr der beteiligten Länder beinhaltet. Typische Anwendungen umfassen Emissionsinventare, Emissionsprognosen und -szenarienberechnung, Maßnahmenbewertungen, Eingangsdaten für Immissionsmodelle, sowie die Bearbeitung von wissenschaftlichen Fragestellungen. Die Emissionsfaktoren aus HBEFA werden für Berechnungen auf unterschiedlichen Aggregationsstufen eingesetzt, lokal/regional wie auch auf nationaler Ebene (z. B. in der Nationalen Klimaberichterstattung).

3.2 Definitionen und Abgrenzungen

3.2.1 Überblick

Die Expertenversion (Vollversion) von HBEFA besteht aus folgenden drei Submodulen (siehe auch Bild 4):

- Das HBEFA-Flottenmodell produziert – ähnlich wie in den TREMOD-Flotten- und Fahrleistungsmodulen (siehe Kapitel 2.3) – die fahrleistungsgewichtete Flottenzusammensetzung für die im Modell enthaltenen Fahrzeugkategorien. Dabei werden Daten zum Fahrzeugbestand (Anzahl Fahrzeuge, Fahrzeugalter, Neuregistrierungen) und den spezifischen Fahrleistungen pro Größen- und Altersklassen der Fahrzeuge kombiniert.
- Die Emissionsfaktorendatenbank beinhaltet die Emissionsfaktoren der in HBEFA enthaltenen Luftschadstoffe, Treibhausgase sowie dem Treibstoffverbrauch im größtmöglichen Detaillierungsgrad von HBEFA, nämlich nach Fahrzeugkategorien, Größenklassen, Emissionsstufen; Verkehrssituationen und Steigungsklassen, sowie nach Emissionsarten (warme, Kaltstart- und Verdunstungsemissionen).
- Das Emissionsmodell In diesem Submodul werden die Verkehrsaktivitätsdaten (z. B. aus einem Verkehrsmodell) mit den Emissionsfaktoren verknüpft und damit die Emissionen (= Resultat) für ausgewählte Schadstoffe und Treibhausgase, Fahrzeugkategorien und Jahre berechnet.

Die öffentliche Version von HBEFA beinhaltet ausschließlich die Emissionsfaktorendatenbank mit den nach vorgegebenen Aggregationsstufen (z. B.

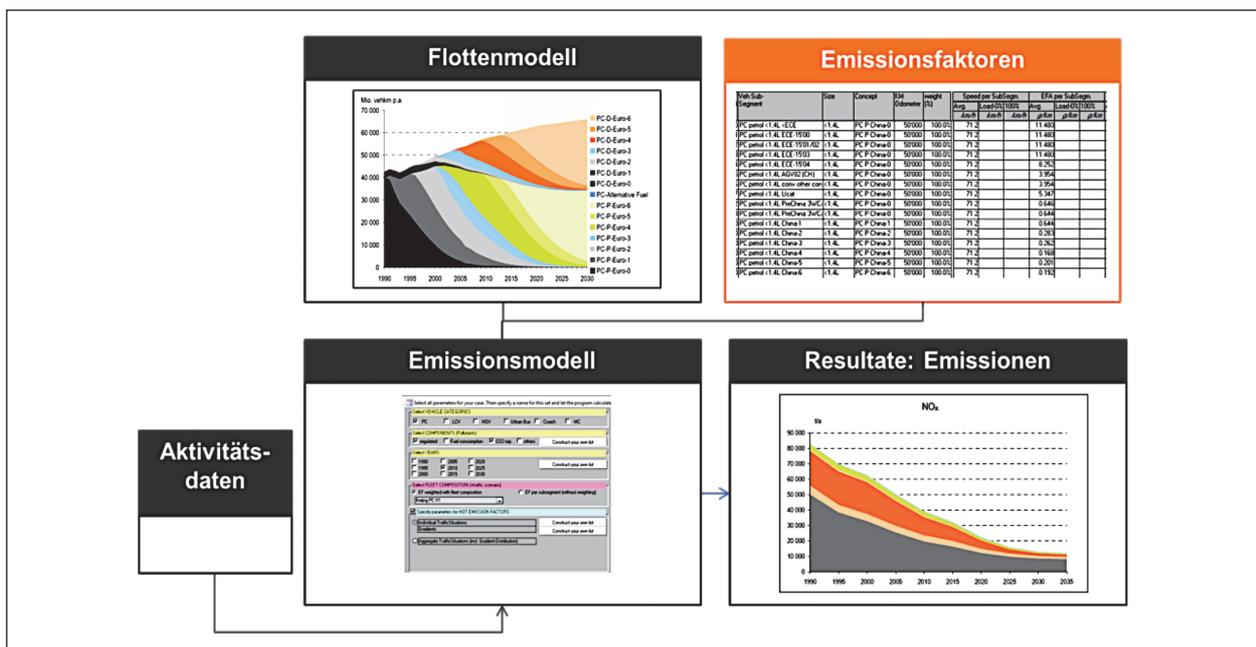


Bild 4: Übersicht über die Module von HBEFA (Quelle INFRAS)

Autobahnen, inner-/außerorts etc.) gewichteten Emissionsfaktoren.

Im Rahmen der vorliegenden Studie liegt der Schwerpunkt seitens HBEFA auf den Emissionsfaktoren der leichten Nutzfahrzeuge und deren Herleitung. Flottengewichtungen und Emissionsmodellierung werden durch TREMOD abgedeckt (siehe Kapitel 2.3). Die nachfolgenden Beschreibungen beschäftigen sich daher ausschließlich mit dem Emissionsfaktoren-Modul von HBEFA.

3.2.2 Systemabgrenzung und Definitionen

Komponenten (Schadstoffe, Treibhausgase, Kraftstoffverbrauch)

HBEFA beinhaltet Emissionsfaktoren für sämtliche regulierte Luftschadstoffe, die wichtigsten nicht-regulierten Schadstoffe, Treibhausgase und den Treibstoffverbrauch (siehe Tabelle 11).

Emissionsarten

HBEFA beinhaltet Daten zu Emissionen, die beim Betrieb der Fahrzeuge bzw. unmittelbar in dessen Zusammenhang entstehen. Emissionen, die bei der Herstellung der Treibstoffe oder Betriebsenergie, die bei der Herstellung und der Entsorgung der Fahrzeuge entstehen, d. h. die sog. Down- und Upstream oder Well-to-tank-Emissionen sind nicht in HBEFA enthalten.

Folgende Emissionsarten werden in HBEFA unterschieden:

- **Warme Emissionen**
Emissionen, die beim betriebswarmen Zustand des Motors eines Fahrzeugs entstehen. Diese Emissionen werden in Gramm/Fahrleistungseinheit (Fahrzeugkilometer; Fzkm) angegeben und sind abhängig von der Art und Weise wie das

Fahrzeug gefahren wird (d. h. der sog. Verkehrssituation; siehe auch Kapitel 3.3), der Steigung, der Fahrzeugtechnologie und der Emissionsstufe respektive dem Alter des Fahrzeugs.

- **Kaltstart-Zusatzemissionen**
Im Allgemeinen ist bei einem Fahrzeug mit kaltem Motor – d. h. nachdem es mehrere Stunden außer Betrieb gestanden hat – das Emissionsniveau höher als im betriebswarmen Zustand. In HBEFA wird diesem Umstand Rechnung getragen, indem diese Kaltstartzuschläge (in Gramm/Kaltstart) berücksichtigt werden. Die Kaltstart-Emissionen sind abhängig von der Umgebungstemperatur, der Standdauer vor dem Start, der Fahrdistanz (die Kaltstart-Zuschläge nähern sich gegen Null nach einer gewissen Fahrdistanz), sowie – analog der warmen Emissionen – der Fahrzeugtechnologie und der Emissionsstufe des Fahrzeugs.
- **Die Verdunstungsemissionen**
bestehend aus flüchtigen Kohlenwasserstoffemissionen, werden in HBEFA angegeben für benzinbetriebene Fahrzeuge (Personenkraftwagen, leichte Nutzfahrzeuge und Motorräder). Verdunstungsemissionen von Diesel werden auf Grund der niedrigen Flüchtigkeit des Kraftstoffs vernachlässigt. Bei den Verdunstungsemissionen werden folgende Typen unterschieden:
 - Tankatmung diese Emissionen entstehen infolge der Auswirkungen von Temperaturwechseln (Ausdehnung/Kontraktion des Treibstoffs) auf ein stehendes Fahrzeug. Sie werden in Gramm je Fahrzeug und Tag angegeben und sind primär abhängig vom Tagesverlauf der Umgebungstemperatur.
 - Abstellmissionen treten auf, wenn ein betriebswarmes Fahrzeug abgestellt wird und der Motor sich kurzzeitig weiter aufheizt, da

Kategorie	Komponenten
Regulierte Luftschadstoffe	Total Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO _x), Auspuff-Partikelmasse (PM10)
Weitere Luftschadstoffe und Schwermetalle	Partikel-Anzahl (PN), Stickstoffdioxid (NO ₂), Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC), Blei (Pb), Schwefeldioxid (SO ₂), Ammoniak (NH ₃), Benzol Zudem in der Expertenversion: Nicht-Auspuff-Partikelmasse, Toluol, Xylol, Dioxin, Zink (Auspuff und nicht-Auspuff), Cadmium (Auspuff und nicht-Auspuff).
Treibhausgase	Kohlendioxid (CO ₂) Total, Kohlendioxid (CO ₂) fossil, Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O)
Weitere	Kraftstoffverbrauch (Masse), Kraftstoffverbrauch (Energie)

Tab. 11: Durch HBEFA abgedeckte Komponenten (Quelle: INFRAS)

die Windkühlung wegfällt. Sie werden in Gramm/Abstellvorgang angegeben und sind abhängig von der Umgebungstemperatur und der Fahrzeugcharakteristik.

- Running losses bezeichnet Verdunstungsemissionen, die während des Betriebs aufgrund der Temperaturveränderungen im Treibstoffsystem auftreten.

Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung zum Revisionsbedarf der Emissionsmodellierung der leichten Nutzfahrzeuge liegt auf den warmen Betriebsemissionen. Trotzdem soll in Kapitel 3.3 der Vollständigkeit halber auch kurz auf die Methodik der übrigen Emissionsarten eingegangen werden.

Verkehrssituationen

Das Konzept der Verkehrssituationen wurde im Rahmen von HBEFA, Version 2.1 aufgebaut und im Forschungsprojekt ARTEMIS, sowie den weiteren Versionen von HBEFA weiterentwickelt (siehe INFRAS 2004, INFRAS 2007, INFRAS 2010, KNÖRR et al. 2011, FVT et al. 2013).

Das in der Realität komplexe und vielfältige Verhalten der Fahrzeuge respektive ihrer Fahrer im Stra-

ßenverkehr wird in HBEFA mithilfe der sogenannten Verkehrssituationen modelliert. Eine Verkehrssituation fasst eine Gruppe von Fahrverhaltensmustern zusammen, die ein gleichartiges Emissionsverhalten aufweisen. Die Verkehrssituationen in HBEFA folgen demnach einem diskreten, nicht-stetigen Ansatz, dies im Unterschied zu Methoden, wie sie in anderen Emissionsmodellen zum Einsatz kommen (z. B. dem Durchschnittsgeschwindigkeits-Ansatz).

Tabelle 12 zeigt das Verkehrssituationen-Schema von TREMOD und HBEFA. Eine Verkehrssituation ist charakterisiert durch:

- den Gebietstyp: ländlich geprägt/Agglomeration (d. h. funktional oder morphologisch zusammenhängende Raumeinheiten; Ballungsraum),
- den Straßentyp entlang der funktionalen Hierarchie der Straße (Autobahn, Stadt-Autobahn, Semi-Autobahn, Fern-/Bundesstraße, Hauptverkehrsstraße, Sammelstraße, Erschließungsstraße),
- die geltenden Tempo-Limits (Geschwindigkeitsbegrenzung in 10 km/h Schritten von 30 km/h bis > 130 km/h) und

	flüssig [%]	dicht [%]	gesättigt [%]	stop+go [%]	Summe [%]
Autobahn	25.2	0.0	2.9	0.5	28.6
Land/AB/100	4.0	0.0	0.8	0.5	5.3
Land/AB/120	2.8	0.0	0.4	0.0	3.1
Land/AB/130	17.2	0.0	1.5	0.0	18.8
Land/AB/80	1.2	0.0	0.2	0.0	1.4
Außerorts	22.4	3.6	0.0	0.0	26.0
Land/FernStr/80	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3
Land/FernStr/100	8.3	0.8	0.0	0.0	9.1
Land/FernStr/110	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8
Land/HVS/80	6.1	0.6	0.0	0.0	6.7
Land/HVS-kurv./80	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2
Land/Sammel/80	7.1	1.1	0.0	0.0	8.3
Land/Sammel-kurv./80	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5
Innerorts	4.0	25.9	14.8	0.7	45.4
Agglo/HVS/50	0.8	20.5	10.1	0.7	32.1
Agglo/HVS/70	3.2	2.3	1.5	0.0	7.1
Agglo/Erschliessung/50	0.0	3.1	3.1	0.0	6.2
Summe	51.6	29.5	17.7	1.2	100.0

Tab. 12: Anteile der Verkehrssituationen an der Gesamtfahrleistung von LNF in HBEFA (Quelle: HEUSCH/BOESEFELDT 1996, eigene Annahmen (IFEU))

- durch vier Verkehrsqualitätszustände (den sogenannten levels-of-service). Dabei wird zwischen frei fließendem, dichtem, gesättigtem und Stop+Go-Verkehr unterschieden.

In HBEFA sind die Verkehrssituationen pro Fahrzeugkategorie definiert. So ergeben sich pro Fahrzeugkategorie (z. B. die leichten Nutzfahrzeuge) insgesamt 276 Verkehrssituationen.

Für jede dieser Verkehrssituationen ist in HBEFA ein typisches Fahrmuster (Fahrzyklus) in Form eines Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufs hinterlegt. Mithilfe dieser Fahrzyklen können für die betreffende Verkehrssituation die Emissionen modelliert werden (siehe Kapitel 3.3.1). Bild 5 zeigt ein Beispiel für diese Fahrmuster für die Verkehrssituation „ländlich, Autobahn, 120 km/h“ und die vier Verkehrsqualitätsstufen.

Die in HBEFA verwendeten Fahrzyklen stammen aus real gemessenen Fahrverhaltensdatensätzen aus unterschiedlicher Quelle: Fahrverhaltensdaten aus Messungen von im realen Verkehr fahrenden M1- und N1-Fahrzeugen in der Schweiz (vorwiegend Pkw, einzelne LNF; insgesamt rund 18.000 gefahrene Kilometer), Deutschland (Aachen), Österreich (Graz) und Frankreich. Es wurden ausschließlich Messungen verwendet, für die Zusatzinformationen zum Fahrzeugtyp und den Merkmalen des HBEFA-Verkehrssituationsschemas (Gebietstyp, Straßentyp, Tempolimit und die Verkehrsqualität bzw. die Verkehrsstärke) bekannt

waren. Die Zuweisung der gemessenen Fahrmuster wurde aufgrund von Experteneinschätzungen vorgenommen, wobei für die LNF in HBEFA dieselben Fahrzyklen wie für die Personenkraftwagen verwendet werden. Diese Zuweisung erfolgte erstmals im Rahmen der Entwicklung zu HBEFA, Version 3.1 und wurde in der Folge mit zusätzlichen Daten (z. B. weiteren Fahrverhaltensdaten von Taxis in der Schweiz, Daten aus der WLTP in-use-Fahrverhaltensdatenbank⁶) validiert und überarbeitet [KNÖRR et al. 2011; FVT et al. 2013]. Diese Arbeiten kamen u. a. zum Schluss, dass sich eine weitere Differenzierung des Fahrverhaltens der Lieferwagen rein aufgrund ihrer technischen Eigenschaften (Gewicht, Leistung, Leistungsge-
wicht etc.) nicht aufdrängt; weitere Einflussgrößen wie Einsatzzweck, Halter etc. wurden dagegen dort nicht untersucht.

Die Geschwindigkeits-Zeit-Kurven der Fahrzyklen lassen sich durch eine Reihe von Parametern charakterisieren, welche Lage, Verlauf und Dynamik der Kurven beschreiben (siehe Anhang 4). In der Emissionsfaktorenmodellierung mithilfe des PHEM (siehe Kapitel 3.3) können mit den Parametern

⁶ Die WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test procedures) -Datenbank enthält Fahrverhaltensdaten aus weltweiten Messungen; für Europa sind Daten aus den Ländern Belgien, Frankreich, Deutschland, Italien, Polen, Slowenien, Spanien, Schweden, Schweiz und Vereinigtes Königreich enthalten.

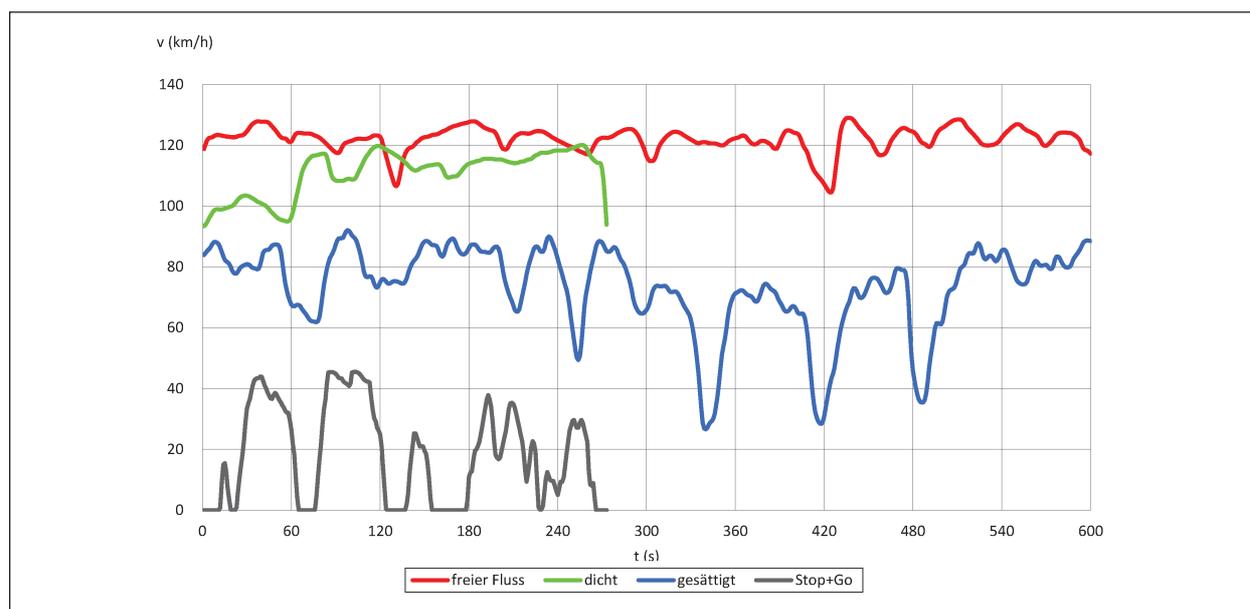


Bild 5: HBEFA-Fahrzyklen für leichte Nutzfahrzeuge für die Verkehrssituation „ländlich, Autobahn, 120 km/h“, nach den Verkehrsqualitätsstufen freier Fluss, dicht, gesättigt, Stop+Go (Quelle: INFRAS)

Durchschnittsgeschwindigkeit (in km/h), Stop-Dauer-Anteil (in %) und relative positiven Beschleunigung⁷ (in m/s^2) der größte Teil der Varianz der CO_2 - und NO_x -Emissionsfaktoren erklärt werden. Zur Interpretation von RPA: gleichmäßig verlaufende, wenig dynamische Fahrzyklen weisen typischerweise RPA-Werte um 0.03 m/s^2 auf, sehr dynamische Zyklen (Stop+Go) zeigen RPA-Werte von $> 0.15 \text{ m/s}^2$.

Nebst den Einzel-Verkehrssituationen sind in HBEFA auch sogenannte „aggregierte“ Verkehrssituationen festgelegt. Diese aggregierten Verkehrssituationen sind für den Durchschnitt Autobahnen, innerorts und außerorts spezifiziert und entsprechen einer gewichteten Kombination von Einzel-Verkehrssituationen, gekreuzt mit den Längsneigungsklassen (siehe Kapitel 3.3). Die Gewichte dieser aggregierten Verkehrssituationen stützen sich in HBEFA auf TREMOD-Auswertungen, für die entsprechenden Details sei daher auf Kapitel 2.3.3 verwiesen.

3.3 Methodik Emissionsfaktoren leichte Nutzfahrzeuge

3.3.1 Warme Emissionen

Methodik

In HBEFA sind für alle Kombinationen von Komponenten (Luftschadstoffe, Treibhausgase, Kraftstoffverbrauch), Fahrzeugschichten, Verkehrssituationen und Steigungsklassen die entsprechenden Emissionsfaktoren abgelegt. Für die Fahrzeugkategorie der leichten Nutzfahrzeuge ergeben sich so für ein Referenzjahr pro Komponente rund 180.000 Datensätze (Emissionsfaktoren).

Bild 6 fasst das methodische Vorgehen für die Herleitung der Emissionsfaktoren schematisch zusammen. Kernelement ist dabei das Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model (PHEM), das von der Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (FVT⁸) in

Graz, Österreich entwickelt wurde (siehe HAUSBERGER et al. 2009; REXEIS et al. 2013). PHEM wurde u. a. entwickelt, da die große Anzahl an Emissionsfaktoren, die in HBEFA benötigt werden, nur mit sehr großem Aufwand alle mit Prüfstandsmessungen abgedeckt werden kann. Daher ist PHEM darauf ausgelegt, auf der Basis von Fahrzyklen (in der Form von Geschwindigkeits-Zeit-Daten in 1Hz-Auflösung) Emissionsfaktoren für die in HBEFA definierten Fahrzeugschichten zu simulieren. Für die Kalibrierung der in PHEM hinterlegten Motorenkennfelder (funktionale Beziehung zwischen Leistung, Drehzahl und Verbrauch bzw. Emissionen eines Motors) werden Rollenprüfstandsmessungen (bzw. Motorenprüfstandsmessungen für schwere Nutzfahrzeuge) verwendet, wobei auch diese Messdaten sekundlich aufgelöst sein müssen. Durchführung und Auswertung von Prüfstandsmessungen sind verhältnismäßig aufwendig, weshalb zurzeit untersucht wird, inwiefern on-board-Messungen (z. B. mit PEMS) für die Validierung und Kalibrierung von PHEM eingesetzt werden können. Weitere Details zur Emissionsmodellierung in PHEM sind in Anhang 3 zu finden.

Die Basis-Emissionsfaktoren aus PHEM werden in HBEFA integriert. Bild 7 zeigt illustrativ für einen Diesel-EURO-4-LNF die in HBEFA abgelegten Emissionsfaktoren, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit der modellierten Fahrzyklen (bzw. Verkehrssituationen). Die Darstellung zeigt, dass innerhalb eines ähnlichen Geschwindigkeitsbereichs die NO_x -Emissionsfaktoren beträchtlich streuen können. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von 50 km/h können beispielsweise – je nach Verkehrssituation – die NO_x -Emissionen zwischen $0,5 \text{ g/km}$ und $0,9 \text{ g/km}$ liegen.

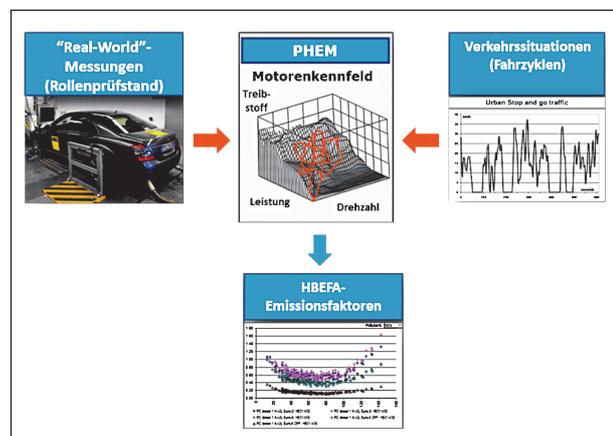


Bild 6: Methodik Herleitung Emissionsfaktoren für warme Emissionen in HBEFA/PHEM (Quelle: INFRAS)

⁷ Die relative positive Beschleunigung (RPA) beschreibt die Dynamik eines Fahrzyklus. Dabei werden die positiven, sekundlichen Beschleunigungswerte mit der momentanen Geschwindigkeit multipliziert, aufsummiert und durch die gefahrene Distanz geteilt.

⁸ FVT ist ein spin-off-Unternehmen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik IVT an der Technischen Universität Graz (TU Graz) in Österreich.

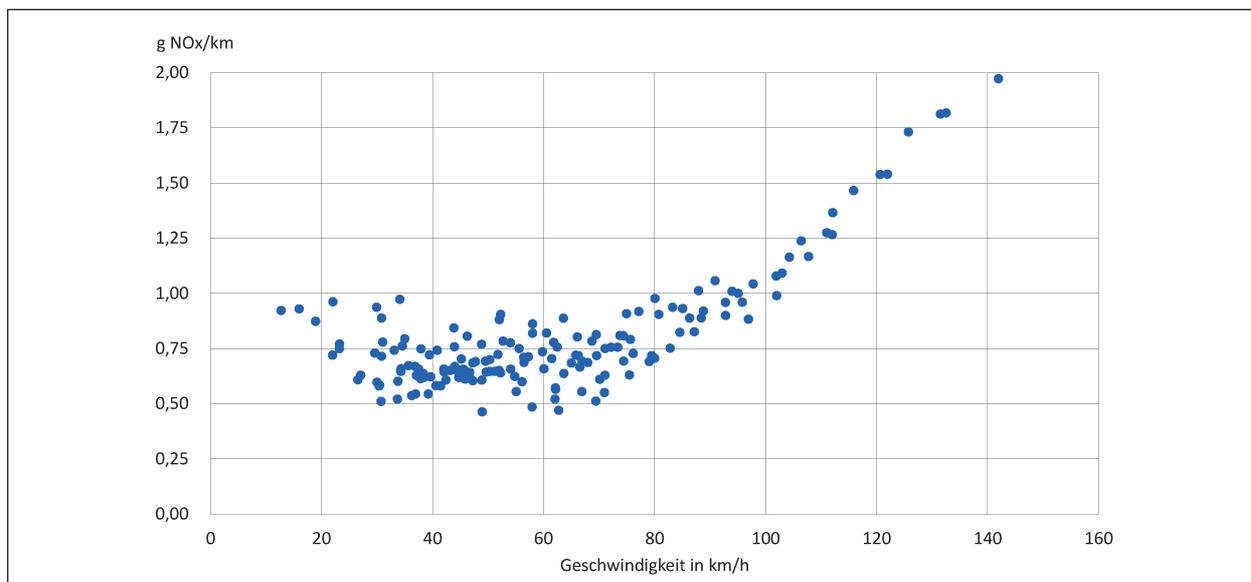


Bild 7: Warme NO_x -Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichtes Nutzfahrzeug, Diesel, N1-III, EURO 4, bei 0 % Steigung, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation (Quelle: INFRAS)

Einflussfaktoren Emissionen

Verschiedene Einflussgrößen bestimmen das Niveau der Emissionsfaktoren in HBEFA maßgeblich. Im Folgenden sollen auf die wichtigsten Einflüsse der LNF-Emissionsfaktoren (Längsneigung, Abgasstandard, Größenklasse und Partikelfilter/Klimaanlage) illustrativ eingegangen werden.

Längsneigung

Das Emissionsniveau der leichten Nutzfahrzeuge ist direkt von der Längsneigung des befahrenen Straßenabschnitts abhängig, dargestellt in Bild 8 für ein LNF EURO-4-Diesel der Größenklasse N1-III. Auf stark geneigten Straßen sind bei dieser Fahrzeugschicht die mittleren NO_x -Emissionen rund 40 % höher als auf flacher Strecke.

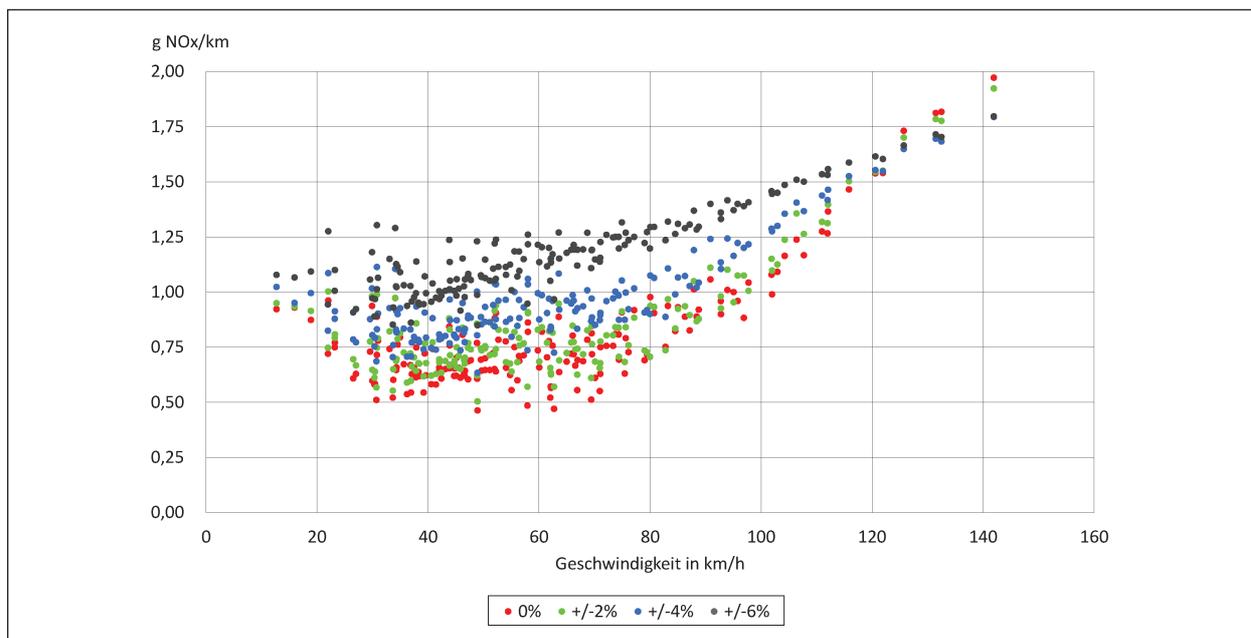


Bild 8: Warme NO_x -Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichtes Nutzfahrzeug, Diesel, N1-III, EURO 4, nach Steigungsklassen, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation (Quelle: INFRAS)

Abgasstandard

Werden die Emissionsfaktoren über die Abgasstandards einander gegenübergestellt (Bild 9 vergleicht die NO_x -Emissionen von verschiedenen Abgasstandards bei Diesel-LNF der Größenklasse N1-III bei flacher Strecke) so zeigen sich die Wirkungen der Stickoxid-Grenzwertverschärfungen deutlich. Die Unterschiede sind jedoch nicht in allen Geschwindigkeitsbereichen gleich ausgeprägt. Generell ist die Spannweite der Werte größer bei höheren Geschwindigkeiten als bei tieferen. Ebenfalls gut erkennbar ist, dass der Einfluss der Verkehrssituationen innerhalb derselben mittleren Geschwindigkeit abnimmt, je jünger die Fahrzeuge werden: Bei EURO-5 und EURO-6-Lieferwagen ist der Einfluss der Verkehrssituation (d. h. der Brems- und Beschleunigungsdynamik bzw. der Stopp-Anteile) deutlich geringer als bei älteren Abgasstandards. Diese Verhältnisse unterscheiden sich jedoch stark, je nachdem welcher Schadstoff betrachtet wird.

Antriebstechnologie/Größenklasse

Benzinbetriebene Lieferwagen weisen deutlich niedrigere spezifische NO_x -Emissionen auf als Diesel-Lieferwagen (Bild 10). Ebenfalls augenfällig sind die unterschiedlichen Emissionsniveaus in Ab-

hängigkeit von der Größenklasse: Im Mittel sind die NO_x -Emissionen großer Lieferwagen (N1-III) rund 30 % höher als bei den kleinen Fahrzeugen (M+N1-I).

Weitere Einflussfaktoren (Partikelfilter, Lebensalter, Klimaanlage)

HBEFA berücksichtigt weitere Einflussfaktoren auf die Emissionen. Bild 11 zeigt die Unterschiede in den spezifischen PM_{10} -Emissionen eines leichten Nutzfahrzeugs mit EURO-3 (neuere Fahrzeuge müssen zwangsläufig mit einem Partikelfiltersystem ausgestattet sein, um die neueren Abgasstandards erfüllen zu können). Der Einfluss von Partikelfiltern wird in HBEFA mittels Korrekturfaktoren berücksichtigt.

Weitere Einflussfaktoren sind die Verschlechterung des Emissionsverhaltens mit steigendem Fahrzeugalter bzw. der Gesamtfahrleistung des Fahrzeugs (Korrekturfaktoren gemäß LAT, 2004) und die Berücksichtigung des Einflusses der Klimaanlage. Diese Korrekturen betreffen in HBEFA jedoch entweder die LNF nicht bzw. noch nicht (Klimaanlagen) oder beschränken sich auf einzelne Schadstoffe, weshalb hier nur am Rande darauf eingegangen wird.

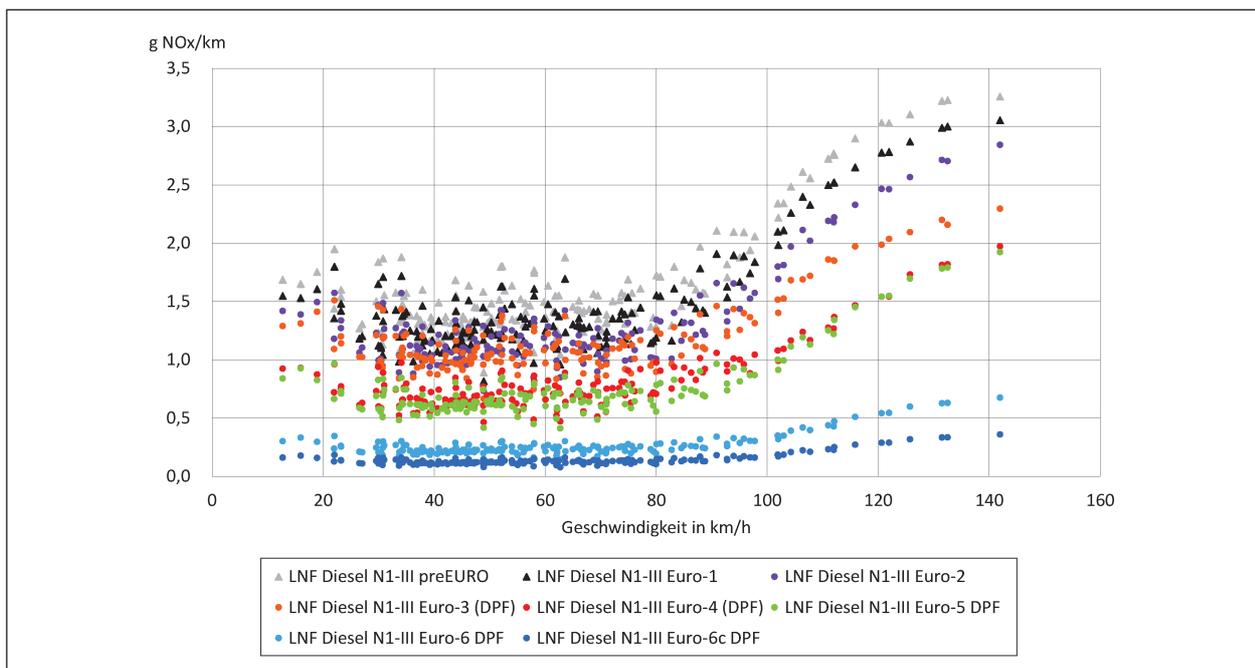


Bild 9: Warme NO_x -Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichte Nutzfahrzeuge, Diesel, N1-III, 0 % Steigung, nach Abgasstandards, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation (Quelle: INFRAS)

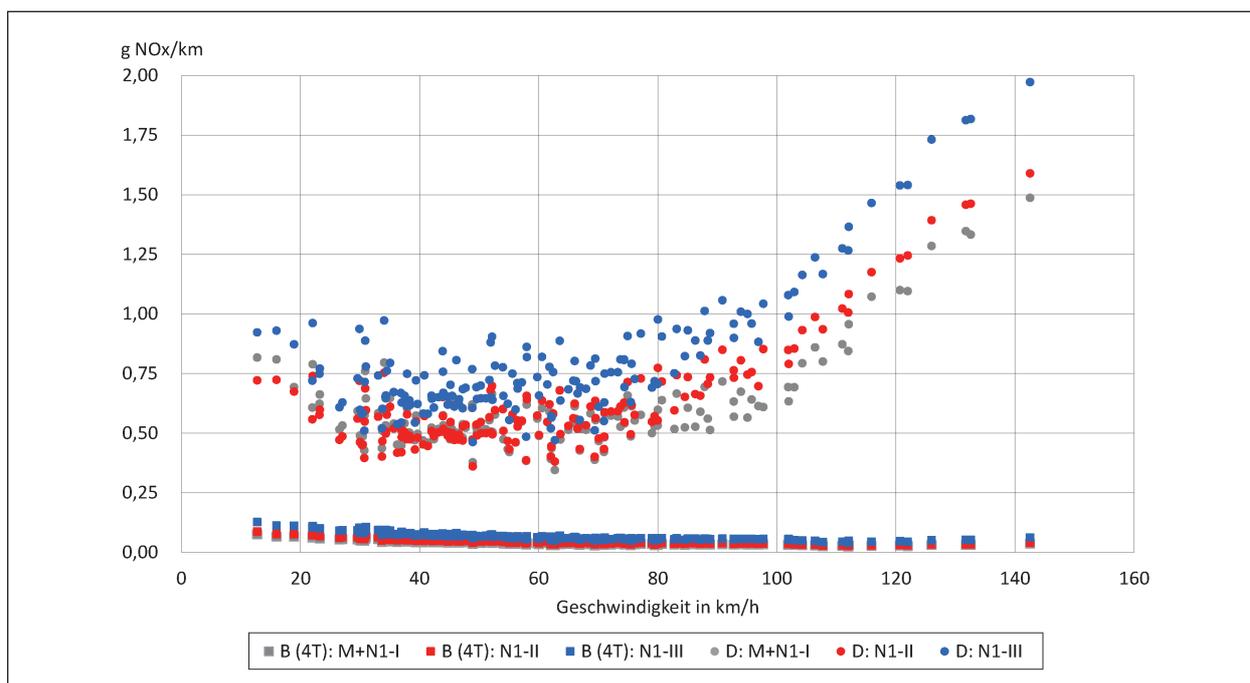


Bild 10: Warme NO_x-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichte Nutzfahrzeuge, Diesel, EURO-4, 0 % Steigung, nach Antriebstechnologie/Größenklasse, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation (Quelle: INFRAS)

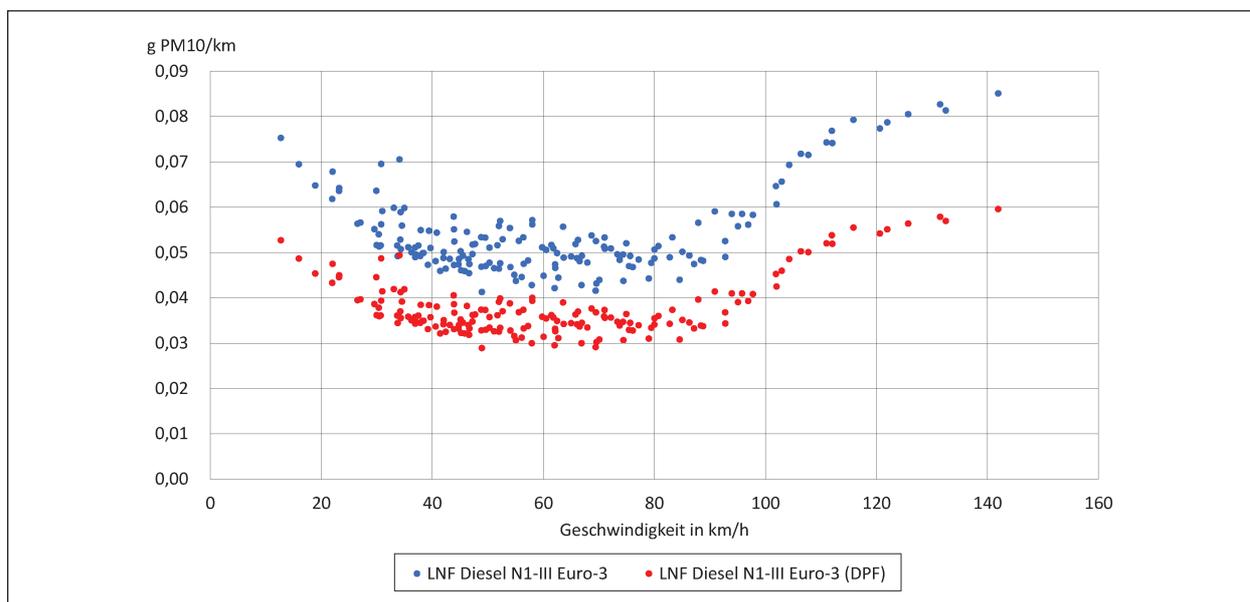


Bild 11: Warme PM10-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichte Nutzfahrzeuge, Diesel, N1-III, EURO-3, 0 % Steigung, mit und ohne Partikelfilter, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation (Quelle: INFRAS)

3.3.2 Kaltstart-Zuschläge

Die Kaltstart-Zuschlagsemissionen interessieren im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur sekundär. Je nach betrachteter Schadstoffkomponente und Flottenzusammensetzung ist der Beitrag der Kaltstart-Zuschläge an den Gesamtemissionen (warme, Kaltstart- und Verdunstungsemissionen) mehr oder weniger bedeutend: Bei den CO_2 -Emissionen der LNF machen die Kaltstartemissionen typischerweise rund 2-3 % der Gesamtemissionen aus, bei NO_x sind sie vernachlässigbar, während bei den HC-Emissionen die Kaltstart-Zuschlagsemissionen den Hauptanteil der Gesamtemissionen ausmachen. Auf die Methodik der Kaltstart-Zuschläge in HBEFA wird an dieser Stelle lediglich kurz eingegangen.

Die erhöhten Emissionen beim Starten eines Fahrzeugs im kalten Zustand werden in HBEFA mit einem Ansatz der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt EMPA modelliert. Bild 12 illustriert die Methodik der Kaltstartzuschläge, welche in HBEFA in Gramm/Startvorgang angegeben werden. Dieser Zuschlag ist abhängig von der Umgebungstemperatur (T), der zurückgelegten Fahrstrecke nach dem Startvorgang (d) und der Standzeit des Fahrzeugs vor dem Start (t) (als Indikator für die Motorentemperatur vor dem Start). Der Zuschlag nimmt kontinuierlich ab während sich der Motor auf die Temperatur der warmen Emissionsphase erhöht.

Für die Modellierung der Kaltstartemissionen nach diesem Ansatz sind Angaben zu den sogenannten Umgebungsmustern (ambient conditions) notwendig, aus denen die Eingangsgrößen in die Berechnungsfunktion der Kaltstartzuschläge abgeleitet werden können. In HBEFA werden darunter folgende Angaben verstanden: (

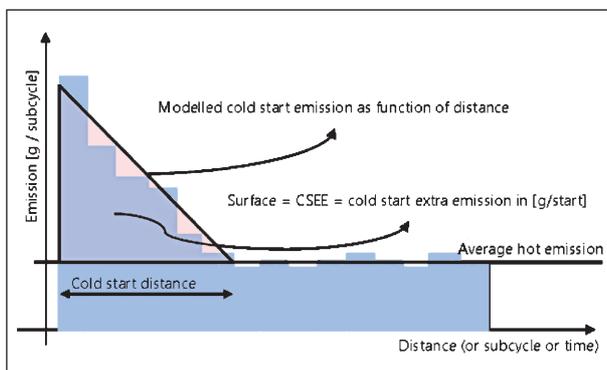


Bild 12: Methodik der Modellierung der Kaltstart-Zuschläge (Quelle: INFRAS/EMPA (unveröffentlicht))

- Tageszeitlicher Temperaturverlauf (für Deutschland basierend auf den Daten des Deutschen Wetterdienstes in RWTÜV 1993a).
- Tageszeitliche Fahrlängenverteilung zur Ermittlung der mittleren Standzeiten der Fahrzeuge (in 1-km-Schritten, d. h. 0-1 km, 1-2 km, ..., > 20 km), ausgewertet aus HEUSCH/BOESE-FELDT (1993).
- Tageszeitliche Verteilung der Abstellzeiten (in 30-Min. Schritten, d. h. 0-30 Min, 30-60 Min, ..., > 12 Stunden); basierend auf FRIEDRICH (1999).
- Tageszeitliche Verteilung des Verkehrs (Tagesganglinie TGW2 gemäß FGSV 2009).

3.3.3 Verdunstungsemissionen

Die Verdunstungsemissionen in HBEFA werden mit dem für das Emissionsmodell COPERT entwickelten Ansatz modelliert. Details zur Methodik sind in MELLIOS, G. et al. (2012) zu finden. Die Verdunstungs-Emissionsfaktoren in HBEFA werden in Gramm je Fahrzeug und Tag bzw. in Gramm/Fahrzeugkilometer (für die running losses) angegeben und werden in HBEFA ausschließlich für die HC-Emissionen bei Benzinfahrzeugen angegeben.

Für die Berechnung der Verdunstungsemissionen sind – wie für die Kaltstartzuschläge – Angaben zu den Umgebungsbedingungen notwendig, siehe Kapitel 3.3.2. Außerdem sind Angaben zur Volatilität der Kraftstoffe zu hinterlegen. Diese wird über den Kennwert RVP (Reid vapour pressure), in kPa charakterisiert, die Werte werden als Jahresmittel angegeben (ggf. differenziert nach verschiedenen Jahreszeiten).

4 Marktsegmentierung LNF

In diesem Kapitel wird das Fahrzeugsegment der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) beleuchtet. Dabei werden die Entwicklung der Fahrzeuge und die Art der Haltung von LNF an verschiedenen Kennwerten analysiert. Zur Ermittlung dieser Kennwerte wurden verschiedene Datenquellen ausgewertet (näheres zu den Datenquellen in Kapitel 4.2).

In einem ersten Unterkapitel werden die statistische Erfassung und die rechtlichen Rahmenbedingun-

gen der LNF beschrieben. In weiteren Unterkapiteln folgen eine Beschreibung der Datenquellen, Analysen zur Entwicklung des Fahrzeugbestands und die Art der Haltung von LNF. In Kapitel 4.5 folgt schließlich eine erste Synthese zur Marktsegmentierung von LNF.

4.1 Statistische Abgrenzung und rechtliche Rahmenbedingungen von leichten Nutzfahrzeugen

In verschiedenen Quellen werden unterschiedliche Abgrenzungen der Kraftfahrzeuge (Kfz) in Fahrzeugarten verwendet. Lastkraftwagen (Lkw) lassen sich in schwere und leichte Nutzfahrzeuge unterteilen, wobei entsprechend der EG-Fahrzeugklassifizierung (Richtlinie 2007/46/EG) die zulässige Gesamtmasse (zGM)⁹ der Fahrzeuge das relevante Kriterium darstellt. In einigen Quellen wird die Kategorisierung teilweise auch nach Nutzlast-Klassen vorgenommen (siehe Kapitel 4.2).

In dieser Studie werden die leichten Nutzfahrzeuge nach Möglichkeit nach zulässiger Gesamtmasse abgegrenzt, wie es auch in TREMOD und HBEFA zum Tragen kommt. Die Gesamtheit der LNF bilden die als Lkw zugelassenen Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht kleiner 3,5 Tonnen (N1).

Bezüglich der gesetzlichen Regulierungen können verschiedene Ebenen unterschieden werden. Die Fahrzeugart, teilweise aber auch die Zulassung eines Fahrzeugs (als Lkw oder Pkw), entscheidet über Emissionsvorschriften, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Sicherheitsvorschriften, Fahrer-Ausbildung, Lenk- und Ruhezeiten, Maut, Motorfahrzeugsteuer und die Höhe der Versicherungsbeiträge. Wer nach dem 1. Januar 1999 seinen Führerschein erworben hat, braucht den Euro-Führerschein Klasse C um ein Fahrzeug mit über 3,5 t zGM zu lenken. Davor konnten Fahrzeuge bis 7,5 t mit dem normalen Führerschein, heute Klasse B, gelenkt werden.

Die Zulassung eines Fahrzeuges wird in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) geregelt. Seit Mai 2015 entscheidet nicht mehr das Leergewicht über die Art der Zulassung, sondern die

Beurteilung von Bauart und Einrichtung. Als Lkw zugelassen werden dürfen nur Fahrzeuge, bei denen die Ladefläche größer ist als die Fläche zur Personenbeförderung.

Die Art der Zulassung, als Lkw oder Pkw, hat oft einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Kraftfahrzeug-Steuer. Grund dafür ist die Bemessungsgrundlage, welche bei Lkw nach zulässiger Gesamtmasse und bei Pkw nach Hubraum erfolgt. Die Zulassung als Lkw ist deshalb steuertechnisch oft günstiger, auch wenn die Versicherungsbeiträge für Lkw meist höher sind.

Für Lastkraftwagen und Busse über 3,5 t gelten andere Emissionsgrenzwerte und Messzyklen als für Fahrzeuge bis 3,5 t. Die europäischen CO₂-Flottengrenzwerte gelten wiederum bisher nur für Pkw und LNF und nicht für schwere Nutzfahrzeuge. Verschiedene Regulierungen im Straßengüterverkehr gelten hingegen mehrheitlich nur für schwere Lkw. So gelten für Lkw > 3,5 t außerorts und auf Autobahnen besondere Geschwindigkeitsbegrenzungen, die nicht für LNF gelten. Auch bezüglich der Lenk- und Ruhezeiten werden in der Fahrpersonalverordnung (FPersV) nur Fahrzeuge ab 2,8 t zGM erfasst.

Insgesamt existieren somit bei den gesetzlichen Bestimmungen, insbesondere für Fahrzeugnutzer, verschiedene Vorteile für leichte gegenüber schweren Lkw. Diese Vorteile sind sicherlich auch mit ein Grund, weshalb der Bestand an leichten Nutzfahrzeugen in den letzten Jahren sehr stark angewachsen ist, während die Anzahl zugelassenen schweren Lkw tendenziell abnimmt (vgl. Bild 13).

4.2 Datenquellen zur Marktsegmentierung

Basis aller Auswertungen bezüglich LNF-Bestände bilden die Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes (KBA). Die statistischen Auswertungen von Fahrzeugdaten umfassen alle nach der Fahrzeug-Zulassungsverordnung in Deutschland zugelassenen beziehungsweise angemeldeten Fahrzeuge, denen ein Kennzeichen zugeteilt wurde. Die Daten werden im Zentralen Fahrzeugregister (ZFZR) beim Kraftfahrtbundesamt gespeichert. Standardisierte Auswertungen zu den Fahrzeugzulassungen (FZ) werden jährlich veröffentlicht und sind frei zugänglich. Darüber hinaus können Sonderauswertungen am ZFZR im Rahmen von öffentlichen Forschungsaufträgen kostenfrei beantragt werden.

⁹ Alternativ wird auch der Begriff zulässiges Gesamtgewicht (zGG) verwendet.

Bis 2001 wurden die Fahrzeugbestände zum Stichtag 1. Juli veröffentlicht. Ab 2001 gibt es einen Bruch in der Datenreihe, da in diesem Jahr der Stichtag auf den 1. Januar umgestellt wurde. In TREMOD wird eine kontinuierliche Zeitreihe berechnet, indem ab 2001 die Bestandsdaten auf Basis des Mittelwertes zweier Jahre in das Modell einfließen. In diesem Kapitel beziehen sich die Bestandsanalysen jeweils auf den 1. Januar eines Jahres.

Zu einem weiteren signifikanten Bruch in der Bestandsdatenstatistik kam zwischen 2007/2008. Das KBA meldete fortan die Bestandszahlen ohne vorübergehende Stilllegungen. Dies führte dazu, dass im Jahr 2008 fast 300 Tsd. Lkw (-11 %) weniger im Deutschen Fahrzeugbestand ausgewiesen wurden als im Jahr 2007.

Beim KBA werden die Daten kontinuierlich fortgeschrieben und jährlich veröffentlicht. Dies stellt gegenüber anderen Erhebungen wie Kraftverkehr in Deutschland (KiD), Mobilität in Deutschland (MiD) oder auch der Fahrleistungserhebung (FLE), welche in unregelmäßigen Abständen durchgeführt werden, einen klaren Vorteil dar.

Spätestens bei Analysen zur Fahrzeugnutzung und der Fahrleistung, werden die oben genannten Erhebungen relevant. Da die Erhebung KiD auf eine umfassende Stichprobe zurückgreifen kann, wurden die Daten für einen Vergleich der Halterstruktur bezüglich der Wirtschaftszweige herangezogen.

Daten der Fahrleistungserhebung (IVT, 1992, 1993 und 2004) wurden bei der Marktsegmentierung nicht analysiert. Diese Datenquelle, insbesondere dann auch die Ergebnisse der neuen Fahrleistungserhebung 2014, wird bei der Analyse der LNF-Fahrleistungen relevant.

4.3 Fahrzeugseitige Entwicklung von leichten Nutzfahrzeugen

Die Modellvielfalt bei den leichten Nutzfahrzeugen hat in den letzten Jahren zugenommen. Dies begründet sich unter anderem mit der vielfältigeren Nutzung von LNF. In diesem Kapitel wird untersucht, welche Eigenschaften die leichten Nutzfahrzeuge im Fahrzeugbestand besitzen und wie sich diese in den letzten Jahren entwickelt hat.

4.3.1 Hersteller und Fahrzeugmodelle

In den Veröffentlichungen des KBA wird der Lkw-Bestand (nicht LNF) nach Herstellern, differenziert publiziert. Dabei werden über 100 verschiedene Lkw-Hersteller unterschieden. Die mit Abstand größten Anteile am Lkw-Bestand 2014 haben jedoch Daimler mit über 670 Tsd. Lkw gefolgt von Volkswagen mit knapp 620 Tsd. Lkw (KBA 2014, FZ 2). Auch relevante Anteile, mit jeweils über 100.000 Lkw, besitzen Renault, Fiat, MAN Nutzfahrzeuge und Opel. Zusammen haben die 7 (bezogen auf die im Fahrzeugbestand gemeldeten Fahrzeuge) größten Hersteller einen Fahrzeugbestand von insgesamt über 2 Mio. Lkw im Jahr 2014, was einem Marktanteil von 75 % entspricht.

Eine Auswertung nach den einzelnen Fahrzeugmodellen der LNF ist mit den vom KBA veröffentlichten Statistiken nach Lkw-Hersteller nicht möglich. Eine Auswertung einer internen Datenbasis, in Kombination mit den Herstellerangaben, lassen jedoch die in Deutschland meist verwendeten LNF-Modelle identifizieren. Tabelle 13 zeigt die beliebtesten LNF-Hersteller in Deutschland mit den meistverkauften Fahrzeugmodellen:

Die meisten Hersteller von LNF fertigen mehrere Fahrzeugmodelle in verschiedenen Größenklassen und unterschiedlichen Aufbauarten. Innerhalb der Fahrzeugmodelle gibt es jeweils mehrere Modellvarianten. Der Ford Transit Custom beispielsweise ist als Kastenwagen, Doppelkabine oder als Kombi-Van verfügbar. Aber auch das Fahrzeugmodell innerhalb der Modellreihe kann individuell konfiguriert werden (Start-Stopp-Automatik, Radstand usw.). Diese Individualisierung beim Fahrzeugkauf erhöht die Komplexität bei der Analyse der Emissionen dieses Fahrzeugsegments.

Hersteller	Fahrzeugmodellname
Daimler	Mercedes Sprinter, Vito
VW	Transporter, Crafter
Ford	Transit Custom, Tourneo Custom
Renault	Master, Kangoo, Clio Can
Fiat	Ducato, Doblo
Opel	Vivaro, Movano
Citroen	Berlingo, Jumper
Iveco	Daily

Tab. 13: Meist verwendete LNF in Deutschland

4.3.2 Größenklassen (zGG, zGM)

Eine Analyse der Lkw nach Größenklassen zeigt, dass sich die Lkw-Fahrzeuggrößen, bezüglich der zulässigen Gesamtmasse, sehr unterschiedlich entwickelt haben. Seit 2008 (erstes Jahr, bei dem der KBA-Bestand ohne stillgelegte Fahrzeuge berichtet wird – siehe Kapitel 4.2) hat der LNF-Bestand bis zum Jahr 2014 insgesamt um knapp 335 Tsd. Fahrzeuge zugenommen. Die Entwicklung des Lkw-Bestands nach Größenklassen wird in Bild 13 dargestellt.

Die Entwicklung des Lkw-Bestands hat bis 2002 in Deutschland kontinuierlich zugenommen. Dabei erfolgte die Zunahme in allen Lkw-Größenklassen relativ gleichmäßig, wobei die Fahrzeuge mit einem zGM zwischen 2 und 2,8 t die größten Bestandsanteile besitzen (39 % im Jahr 2002). Ab dem Jahr

2002 kam es zu einer Stagnation bzw. sogar einem kleinen Rückgang beim Lkw-Bestand. Betrachtet man jedoch nur die LNF, so hat der Bestand bis 2007 weiter leicht zugenommen. Zum Jahr 2008 kam es zu einem statistischen Bruch (siehe Kapitel 4.2).

Lkw mit einem Gesamtgewicht von über 3,5 t fallen in die Kategorie schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Diese hatten im Jahr 2014 einen Anteil von 20 % an den insgesamt zugelassenen Lkw und damit haben die SNF seit 1990 (Anteil von 55 % am Lkw-Bestand) kontinuierlich Anteile an LNF abgegeben. Gegenüber 2008 sind im Jahr 2014 rund 29 Tsd. Fahrzeuge (- 5 %) weniger SNF gemeldet. Betrachtet man die Lkw in der Größenklasse zwischen 3,5 und 7 Tonnen, sind es sogar fast 40 Tsd. Lkw weniger, was einem Rückgang von 13 % entspricht.

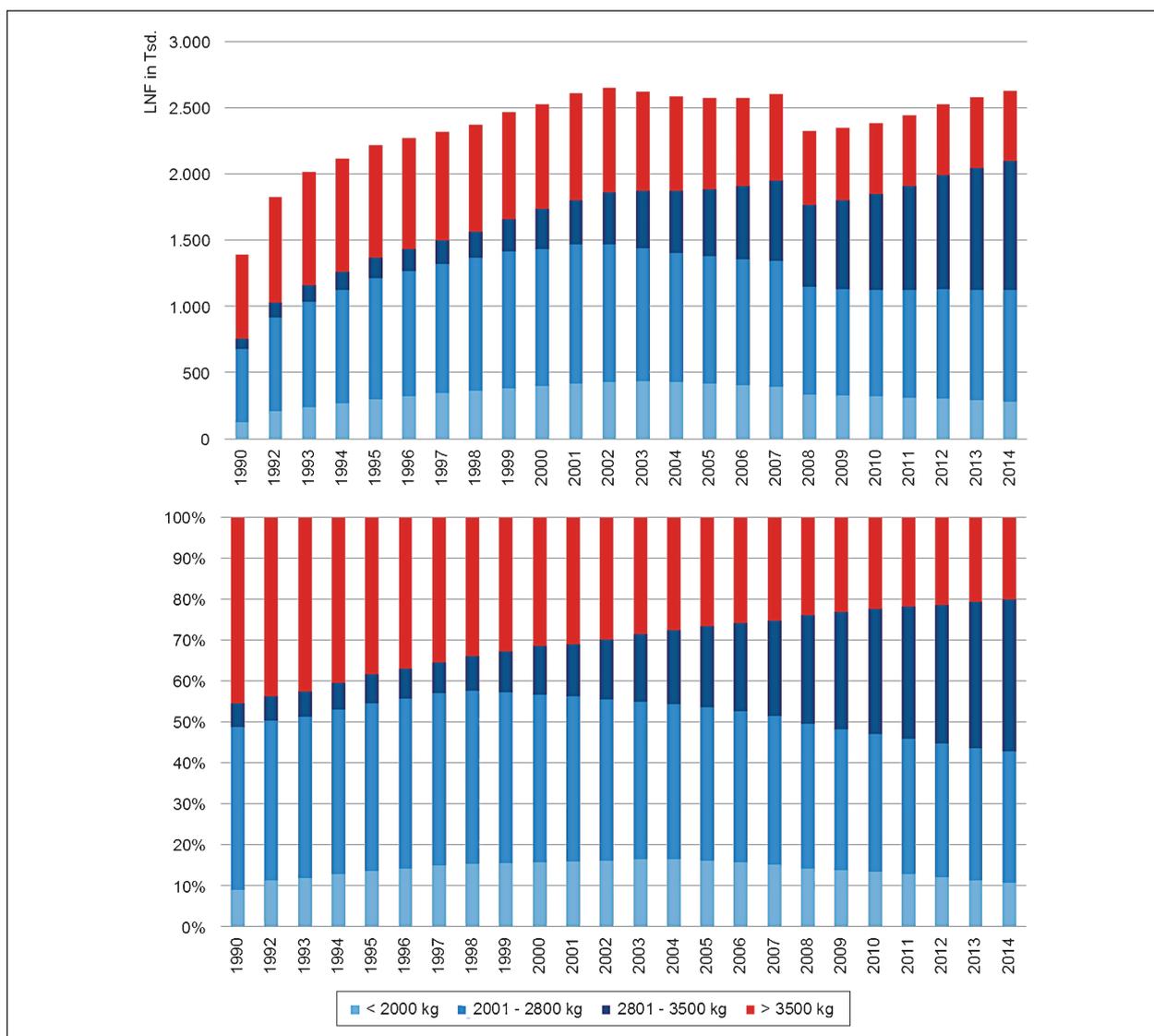


Bild 13: Lkw-Bestand nach Größenklassen (zGM); 1990 bis 2014 (Quelle: KBA FZ 25, Tabelle 11, mehrere Jahre)

Die Analyse nach Lkw-Größenklassen zeigt, dass der Bestand an LNF insgesamt steigt und gleichzeitig weniger SNF gehalten werden. Der stärkste Zuwachs verzeichnete das schwerste LNF-Segment (2,8-3,5 t). Dieses Segment verzeichnete einen Zuwachs von über 360 Tsd. Fahrzeugen innerhalb von 6 Jahren (+ 58 % 2014 gegenüber 2008). Das Segment der Fahrzeuge zwischen 2 und 2,8 t hat im gleichen Zeitraum auch leicht zugelegt (+23 Tsd. Fzg.), dafür waren im Jahr 2014 rund 50 Tsd. weniger LNF in der leichtesten Subkategorie unter 2 t zugelassen.

Diese Entwicklung zeigt, dass es innerhalb der LNF zu einer Verschiebung hin zu schwereren Fahrzeugen gab und gleichzeitig innerhalb der Lkw eine Verschiebung hin zu LNF. Für letzteres könnten die in Kapitel 4.1 beschriebenen Regulierungen verantwortlich sein.

Aufgrund der stärkeren Motorisierung sowie strengerer Umweltauflagen und sich daraus ergebenden komplexeren Abgasnachbehandlungssystemen ist tendenziell auch das Gewicht der Fahrzeuge gestiegen. Dies stellt eine Erklärung dar, weshalb innerhalb der LNF hauptsächlich die schwereren Fahrzeuge zugelegt haben.

4.3.3 Aufbauarten

Bezüglich der Aufbauarten werden beim KBA zehn Kategorien unterschieden. Ab 1. Januar 2012 kam es jedoch zu grundlegenden Veränderungen bei den Angaben zu den Fahrzeugaufbauarten bei Nutzfahrzeugen. Bis 2012 wurde nach Normal- und Spezialaufbau, sowie den jeweiligen Unterkategorien (offener/geschlossener Kasten, Plattform, Kipper usw.) unterschieden. Ab 2012 wird nur noch in einer Kategorienebene berichtet und dabei nach den folgenden Kategorien unterschieden:

- Geschlossener Kasten,
- Offener Kasten,
- Plattform,
- Mit Isolierwänden,
- Seitenplanen/Curtainsider,
- ATL/Container,
- Hakenlift/Ladegerät,
- Kipper,
- Tankfahrzeug,
- Sonstige.

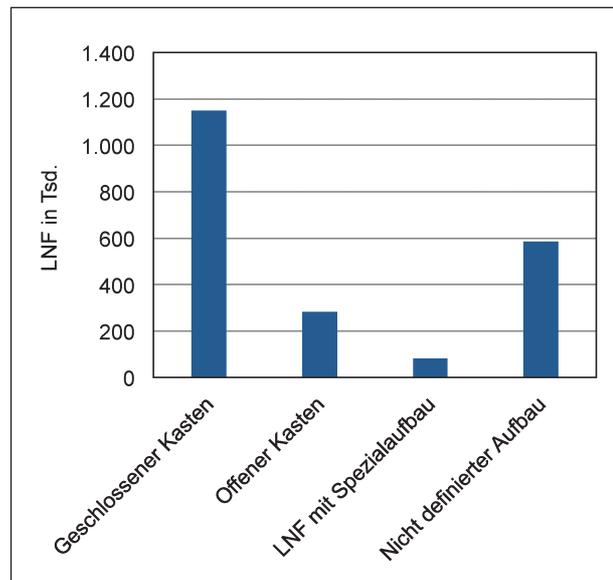


Bild 14: Bestand an LNF 2014 nach Aufbau (Quelle: KBA FZ 25, Tabelle 11 (nach Aufbauarten), 2015)

Für leichte Nutzfahrzeuge gibt es jedoch nur zwei Aufbauarten, welche relevante Anteile haben. Bei den restlichen Aufbauarten handelt es sich um Aufbauarten, welche mehrheitlich bei Lkw größer 3,5 t zGG zum Einsatz kommen.

Die Aufbauart geschlossener Kasten ist bei LNF eindeutig die gängigste Aufbauart. Über die Hälfte (55 %) aller in Deutschland gemeldeten LNF fallen in diese Kategorie. Bei etwas über 280.000 LNF handelt es sich um offener Kasten – sogenannte Pritschen. Die Kategorie Sonstige wird bezüglich der Aufbauart bei LNF gemäß KBA bei fast 600.000 Fahrzeugen angegeben. Diese Kategorie hat seit 2012 (Jahr des Methodenwechsels) sprunghaft von rund 245.000 auf über 628.000 (+156 %) im Jahr 2014 zugenommen. Bei den anderen Aufbauarten kam es im gleichen Zeitraum zu keinen signifikanten Veränderungen.

Aus der vom KBA berichteten Aufbau-Systematik lässt sich nicht ermitteln, ob es sich um Fahrzeuge mit Hochdach handelt. Aufgrund des erhöhten Luftwiderstandes, kommt es bei diesem Aufbau tendenziell zu einem höheren Energieverbrauch und somit auch zu höheren Emissionen. Über das Kriterium Fahrzeughöhe, welches grundsätzlich beim KBA (über Sonderauswertungen) verfügbar ist, könnte abgeschätzt werden, wie viele LNF mit Hochdach zugelassen sind. Im Rahmen dieser Untersuchung ist jedoch eine Sonderauswertung beim KBA nicht vorgesehen.

4.4 Nachfrage nach leichten Nutzfahrzeugen

4.4.1 Haltergruppen

LNf machen im Jahr 2014 rund 80 % der in Deutschland gemeldeten Lkw aus. Davon sind 39 % durch Privatpersonen zugelassen und die restlichen 61 % werden gewerblich gehalten. Aufgrund der Fahrzeugnutzung ist der Anteil privater Haltung bei schweren Nutzfahrzeugen viel geringer (15 %).

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, kann es ökonomisch Sinn machen ein Fahrzeug als Lkw zuzulassen, auch wenn das Fahrzeug privat – und nicht gewerblich – gehalten wird. Die Art der Haltung muss jedoch nicht mit der Art der Nutzung übereinstimmen. Die Art der Nutzung wird in Kraftverkehr in Deutschland (KiD) abgefragt. Gemäß KiD fallen 84,6 % aller Fahrten von privat gehaltenen Lkw < 3,5 t Nutzlast (NL) in die Nutzungsart dienstlich/geschäftlich. Bei gewerblichen Haltern beträgt der Anteil knapp 97,6 % (WVI 2012, S. 373). Dies bedeutet, dass gemäß der in KiD 2010 ausgewerteten Fahrten 85 % gewerblicher Natur sind auch wenn die Fahrzeuge privat gehalten werden.

4.4.2 Wirtschaftszweige

Sowohl in den Bestandsdaten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) als auch in den vorliegenden Fahrleistungserhebungen [IVT 2004; KID 2010] werden private und gewerbliche Halter und Haltergruppen nach Wirtschaftszweigen unterschieden. Beim KBA werden die Lkw-Bestandsdaten nach Wirtschaftszweigen und zulässiger Gesamtmasse gekreuzt publiziert. Insgesamt werden 20 Wirtschaftszweige,

private Halter (kategorisiert als Arbeitnehmer und Nichterwerbspersonen) und Unbekannte unterschieden.

In den sieben zulassungsstärksten Wirtschaftszweigen befinden sich im Jahr 2014 insgesamt über 1,9 Mio. LNf und somit rund 92 % des LNf-Bestands. Zur besseren Einordnung der Wirtschaftszweige siehe Kapitel 4.4.3 Berufsklassen, dabei wird die Unterstruktur in den für die LNf wichtigsten Wirtschaftszweige untersucht. Eine detaillierte Beschreibung der Wirtschaftszweige findet sich in (DESTATIS 2008).

Bild 16 stellt den LNf-Bestand im Jahr 2014 für die relevanten Wirtschaftszweige dar.

Nach den privaten Haltern (39 %), werden beim KBA die meisten LNf in der Kategorie Erbringung von sonstigen Dienstleistungen geführt. Diese Kategorie versteht sich als Sammelbegriff für jegliche Art von Dienstleistungsgewerbe. Auch bei Betrachtung der Unterkategorien (Berufssegmente, siehe nächstes Kapitel) zum Wirtschaftszweig Erbringung von sonstigen Dienstleistungen können keine konkreten Rückschlüsse auf die Nutzungsart der Fahrzeuge gewonnen werden. Da immerhin 21 % (zusammen mit der Kategorie Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen sind es sogar 25 %) der Fahrzeuge in diese Halterkategorie fallen, besteht hier ein erhebliches Informationsdefizit.

Gemäß KBA werden im Jahr 2014 rund 218.000 (10,4 %) LNf in der Kategorie Baugewerbe/Bau gemeldet. Im Gegensatz zur Kategorie Erbringung von sonstigen Dienstleistungen ist die Kategorie Baugewerbe einiges spezifischer. Die restlichen Wirtschaftszweige repräsentieren bezogen auf den

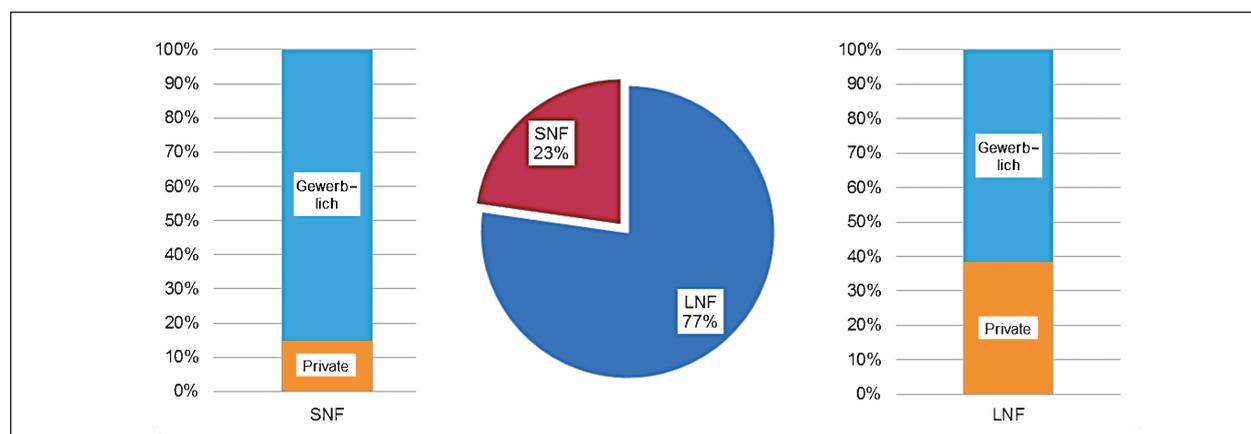


Bild 15: Lkw nach LNF und SNF sowie nach privater und gewerblicher Haltung, 2014 (Quelle: KBA, FZ 13, Tabelle 18)

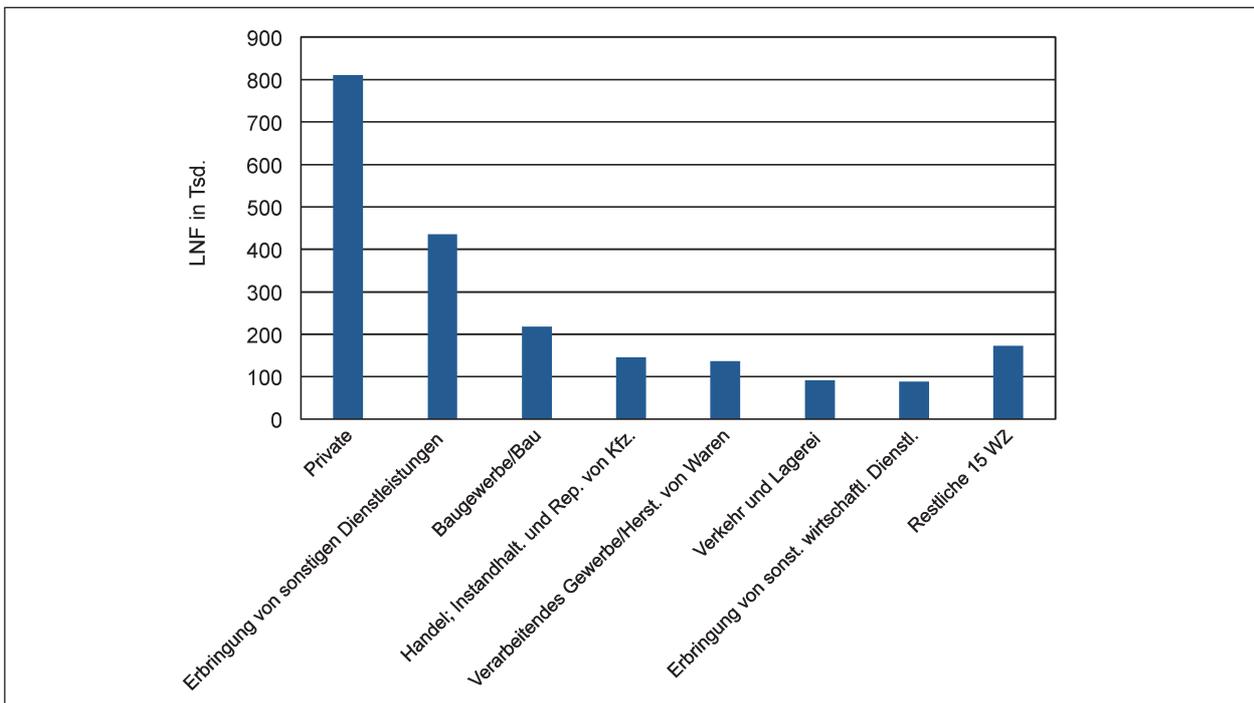


Bild 16: Bestand an LNF 2014 nach relevanten Wirtschaftszweigen (Quelle: KBA, FZ13, Tabelle 18)

LNF-Bestand im Jahr 2014 unter 10 % und können aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu einem Wirtschaftszweig nicht treffend in ihrer Nutzungscharakteristik beschrieben werden.

In Bild 17 wird die Verteilung der LNF-Größenklasse (gemäß TREMOD/HBEFA) innerhalb der Wirtschaftszweige dargestellt.

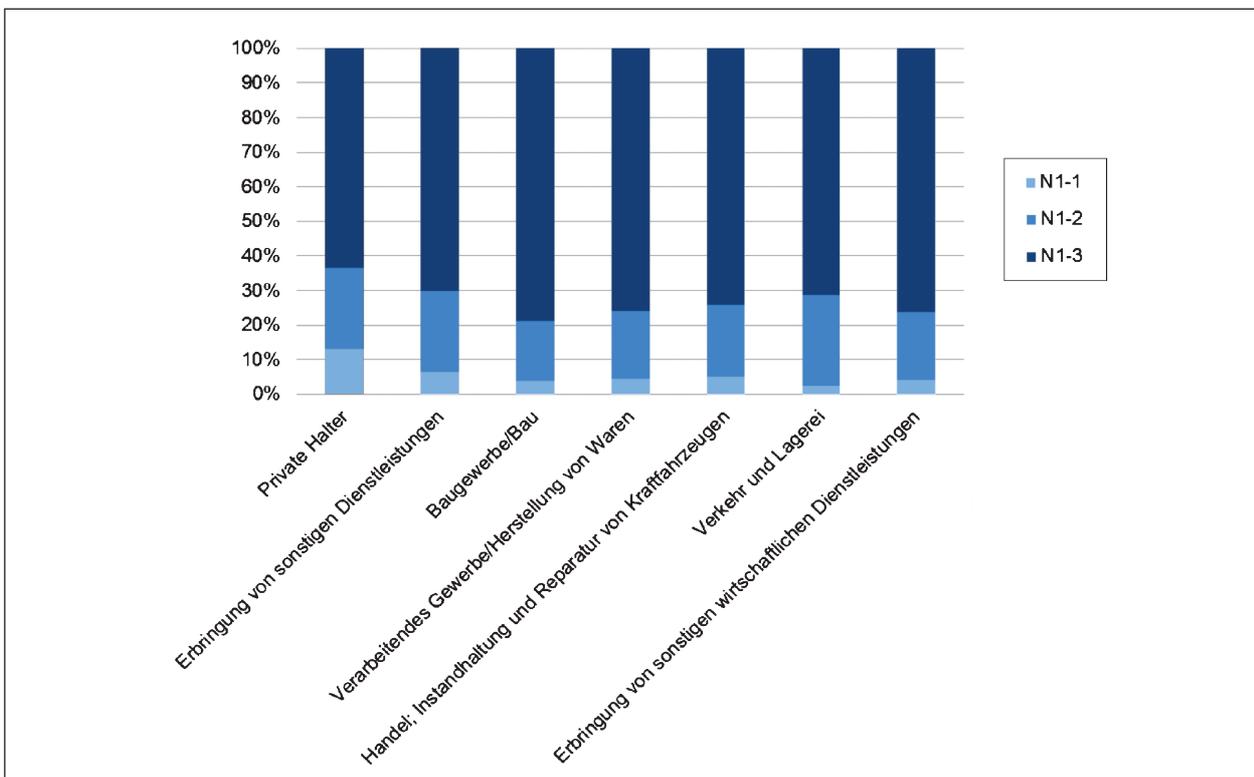


Bild 17: Aufteilung der LNF-Größenklassen innerhalb der relevanten Wirtschaftszweige; Auswertung an TREMOD-Bestandsdaten für das Bezugsjahr 2014 (Quelle: Datenauszug TREMOD)

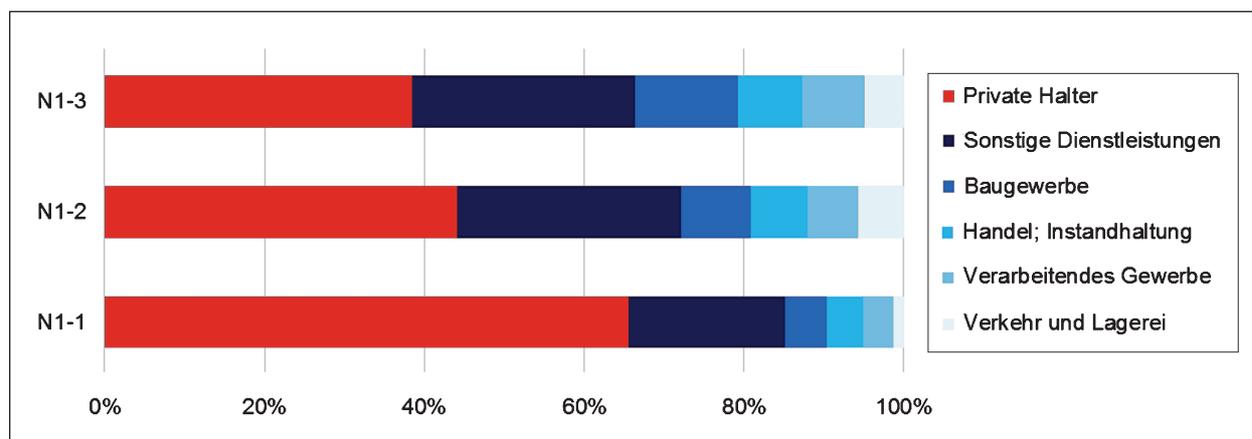


Bild 18: Aufteilung der Wirtschaftszweige innerhalb der LNF-Segmente; Auswertung an TREMOD-Bestandsdaten für das Bezugsjahr 2014 (Quelle: Datenauszug TREMOD)

Bei dieser Betrachtung ist festzustellen, dass private Halter tendenzielle kleinere Fahrzeuge nutzen als gewerbliche. Der Anteil der N1-1 Fahrzeuge liegt bei Privaten Haltern bei 13 %, während diese Größenkategorie beim Wirtschaftszweig Verkehr und Lagerei (hier wird in Großteil der Kurier-Express und Paketdienst-(KEP-)Fahrzeuge vermutet – siehe Kapitel Berufsklassen) nur 2 % beträgt. Verkehr und Lagerei hat dafür den größten Anteil unter den N1-2 Fahrzeugen (26 %). Beim Baugewerbe entfallen fast 80 % der LNF in die größte Kategorie (N1-3). Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass die Schwankungen der Größenklassen-Verteilung innerhalb der Wirtschaftszweige moderat sind.

Bild 18 zeigt die Aufteilung der Wirtschaftszweige innerhalb der LNF-Segmente.

In allen drei LNF-Segmenten werden die meisten Fahrzeuge durch private Halter zugelassen. Die kleinen LNF (N1-1) sind von der Anzahl her mit knapp über 163 Tsd. Fahrzeugen das kleinste Segment, davon werden 75 % privat gehalten. In absoluten Zahlen halten private jedoch mehr LNF in den Segmenten N1-2 und N1-3. Bei den gewerblichen Haltern steigt der Anteil mit der Fahrzeuggröße.

4.4.3 Berufsklassen

Innerhalb der Wirtschaftszweige werden die Fahrzeuge beim KBA zusätzlich 43 Berufsklassen zugeordnet. In Tabelle 14 werden die Berufsklassen nach den entsprechenden Wirtschaftszweigen aufgelistet, wobei nur ein für die LNF relevanter Teil der Wirtschaftszweige dargestellt wird.

Wirtschaftszweig	Berufsklasse
Baugewerbe/Bau	Bauhauptgewerbe, Ausbaugewerbe, Vermietung von Baumaschinen und -geräten mit Bedienungspersonal
Erbringung von sonstigen Dienstleistungen	Wirtschafts- und Arbeitgeberverbände, Berufsorganisationen, Gewerkschaften, Kirchliche und sonstige religiöse Vereinigungen usw.
Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen	Grundstücks- und Wohnungswesen, Datenverarbeitung, Forschung und Entwicklung, Vermietung beweglicher Sachen (ohne Kraftfahrzeuge), usw. Vermietung von Kraftfahrzeugen ohne Gestellung eines Fahrers.
Verkehr und Lagerei	Betriebe zum Arzneimitteltransport, Deutsche Bahn AG, Deutsche Post AG, Sonstige Anbieter öffentlicher Eisenbahnen, Schifffahrt, Luftfahrt, Seehafenbetriebe, Flughafenbetriebe, Sonstige Anbieter von Postdienstleistungen, Spedition und Lagerei, sonstige Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr (ohne Parkhäuser und Parkplätze) Verkehrsvermittlung

Tab. 14: Klassifizierung der Berufsklassen zu Wirtschaftszweigen gemäß KBA (Quelle: KBA-Klassifizierung; Sonderauswertung durch TREMOD)

Wie die Liste der Berufsklassen verdeutlicht, enthalten gerade die vom Bestand her größten „sonstigen“ Kategorien eine geringe Anzahl an Berufsklassen, welche zudem relativ unspezifische formuliert sind. Über die Berufsklassen können somit kaum zusätzliche Informationen zu den Wirtschaftszweigen erhalten werden. Auf weitergehende Analysen bezüglich der Berufsklassen wurde deshalb verzichtet.

4.4.4 Segmentierung nach Querschnittsgruppen

Eine weitere Differenzierung der LNF ist dann zielführend, wenn dabei eine höhere Genauigkeit bei der Emissionsmodellierung dieses Fahrzeugsegments erreicht wird. Eine erste Bestands-Analyse der LNF nach Wirtschaftszweigen hat jedoch gezeigt, dass die beim KBA verwendete Klassifizierung, und damit die offizielle Struktur der Haltergruppen, bei einem Großteil der Fahrzeuge in keiner beschreibenden Kategorie zugelassen sind.

In diesem Unterkapitel soll deshalb ermittelt werden, ob Querschnittsgruppen nach LNF-spezifischen Einsatzzwecken gebildet werden können. Solche Querschnittsgruppen könnten folgende sein: KEP-Einsatz, Handwerker-Verkehr, Baustellen-Verkehr und privater Nutzung von LNF.

Problem bei der Segmentierung nach Querschnittsgruppen ist, dass die Mengengerüste fehlen. In einzelnen Studien werden Gruppenelemente untersucht und teilweise auch Mengengerüste abgeschätzt. So wird zum Beispiel in [MRU, 2009, S. 55] ermittelt, dass mindestens 211.000 Kfz mehrheitlich für Firmen aus der KEP-Branche unterwegs sind. Bei dieser Angabe werden jedoch alle Fahrzeugarten (inkl. (Lasten-)Fahrräder) mitgezählt.

Da beim KBA im Zentralen Fahrzeugregister (ZFZR) kein fahrzeugspezifisches (Einsatz-)Merkmal geführt wird, kann die Anzahl der Fahrzeuge nicht leicht nach entsprechenden Querschnittsgruppen ermittelt werden. Im Rahmen der Erhebung KiD 2010 wird zumindest der KEP-Markt fokussiert behandelt. Hierzu wurde explizit im Fragebogen die Frage „Wird das Fahrzeug auch im Kurier-, Express-, Post- und/oder Paketdienst (gelegentlich oder häufig) eingesetzt?“ mit den beiden Antwortmöglichkeiten „ja“ oder „nein“ aufgenommen. Auf der Grundlage der Antworten und ihrer Hochrechnung auf die Grundgesamtheit wurden insgesamt rund 385.900 Fahrzeuge im KEP-Bereich ermittelt. Die Hochrechnung für leichte Nutzfahrzeuge (Abgrenzung 3,5 t NL) beträgt rund 152 Tsd. Fahrzeuge (6,5 % der Lkw < 3,5 t NL). Davon werden rund 25 % privat gehalten [WVI, 2012, S. 426].

Über die LNF, welche unter dem Wirtschaftszweig Baugewerbe/Bau geführt werden, könnten die Baustellen-Verkehre abgeschätzt werden. Fahrzeug-spezifische Charakteristika können übers KBA er-

mittelt werden und über eine Auswertung von KiD sowie der FLE können die Nutzungsarten sowie die Fahrleistung der Baustellen-Verkehre abgeschätzt werden.

Unter der Querschnittsgruppe Handwerker-Verkehr werden Sanitäter, Elektriker aber auch zum Beispiel Landschaftspfleger oder Krankenpfleger, welche direkt beim Kunden ihre Dienste anbieten und deshalb auf mobile Werkstätten zurückgreifen, zusammengefasst. Leider gibt es auch für diese Berufsgruppe keine Kategorie bei den beim KBA geführten Berufsklassen.

Eine Segmentierung in LNF-spezifische Einsatzzwecke müsste über Annahmen abgeschätzt werden und erscheint somit erstmals nicht sinnvoll. Trotzdem ist es wichtig, die verfügbaren Informationen zu diesen Querschnittssegmenten zu sammeln um später bei der Aufteilung der Fahrleistung auf die Straßenkategorien und das Einsatzgebiet eine Vorstellung zu haben, welche Haltergruppen LNF halten und welche Fahrzeugnutzung damit verbunden ist.

In Kapitel 5.3.2 folgt ein Vergleich der durchschnittlichen Fahrleistungen nach Wirtschaftszweigen und in Kapitel 5.3.3 wird die KEP-Fahrleistung abgeschätzt. Für die anderen Querschnittssegmente wurde im Rahmen dieser Vorstudie keine Fahrleistungsabschätzung geleistet.

4.5 Synthese der Marktsegmentierung

Bei der Marktsegmentierung wurden die Entwicklungen bezüglich der Fahrzeugeigenschaften und der Art der Haltung bei leichten Nutzfahrzeugen untersucht. Folgende Erkenntnisse ergeben sich daraus:

- Lkw über 3,5 t (SNF) unterliegen stärkeren Regulierungen (Geschwindigkeitsbegrenzungen, Fahrverbote usw.), dies könnte ein Grund sein, weshalb seit längerem weniger SNF dafür mehr LNF zugelassen werden.
- Die Anzahl an Fahrzeugherstellern mit relevanten Zulassungszahlen im Bestand können anhand KBA-Daten identifiziert werden. Auch die häufigsten zugelassenen LNF-Modelle werden identifiziert. Innerhalb der Fahrzeugmodelle kommt es jedoch zu einer nicht zu vernachlässigbaren Variation bezüglich dem Fahrzeugaufbau, der Fahrzeugtechnologie usw.

- Das mittlere zulässige Gesamtgewicht innerhalb der LNF ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Gleichzeitig hat die Anzahl der SNF, vor allem im Bereich 3,5-7,5 t stark abgenommen.
- Die Aufbauarten werden für Lkw beim KBA in zehn Kategorien geführt. Knapp 70 % des LNF-Bestandes fällt jedoch in die beiden Kategorien offener bzw. geschlossener Kasten. Weitere 28 % entfallen auf die Kategorie Sonstige und können deshalb nicht genauer charakterisiert werden. Die Aufbauart Hochdach wird beim KBA nicht speziell geführt.
- Eine Differenzierung der Fahrzeuge nach Wirtschaftszweigen entsprechend der KBA-Systematik führt nur bedingt zu einem Erkenntniszugewinn. Ein Großteil der Fahrzeuge wird in den Kategorien „Erbringung von sonstigen (wirtschaftlichen) Dienstleistungen“ zugeordnet. Auch eine zusätzliche Differenzierung nach Berufsklassen innerhalb der Wirtschaftszweige hilft hier nicht weiter.
- Eine Differenzierung nach LNF-spezifischen Querschnittsgruppen, z. B. KEP-, Handwerker-, Baustellen-Verkehre und private Nutzung könnte dann Sinn machen, wenn die Fahrzeuge innerhalb dieser Gruppen homogene Nutzungsmustern (durchschnittliche Jahresfahrleistung, Straßenkategorienutzung usw.) aufweisen. Leider ist eine Zuordnung des LNF-Bestandes in diese Kategorien anhand der verfügbaren Daten nicht unmittelbar möglich.

Die Analysen in diesem Kapitel haben gezeigt, dass sich die Fahrzeugstruktur innerhalb der Lkw und speziell auch innerhalb der LNF in den letzten Jahren stark verändert hat. Die LNF wurden schwerer während gleichzeitig der Bestand an schweren Lkw (SNF) abgenommen hat. Auch auffallend ist der hohe Anteil privater Halter bei den LNF. Die Analyse der Halter nach Wirtschaftszweigen führt leider nicht den gewünschten Informationsgehalt. Die sonstigen, nicht genauer spezifizierten Wirtschaftszweige führen einen Großteil der LNF.

5 Detailanalysen zu Fahrleistungen

In diesem Kapitel folgen Analysen zum Einsatz und der Nutzung von LNF. Ein Überblick über die verfügbaren Quellen mit Informationen zur Fahrleistung von LNF in Deutschland folgt im ersten Unterkapitel. Ein Vergleich zwischen TREMOD und anderen Fahrleistungsinformationen folgt im zweiten Unterkapitel.

Zur Fahrleistungsanalyse wurde der Datensatz Kraftverkehr in Deutschland (KiD 2010) im Detail ausgewertet, da dieser bisher in TREMOD noch nicht berücksichtigt wird. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3 dokumentiert. Schließlich folgt eine Synthese der Fahrleistungsanalyse.

5.1 Überblick zu LNF-Fahrleistungsinformationen

Tabelle 15 listet die relevanten Fahrleistungsquellen in Deutschland und charakterisiert die Quellen nach den relevanten Kriterien.

BAST – Straßenverkehrszählung (SVZ)

Auf Basis von manuellen und automatischen Verkehrszählungen veröffentlicht die BAST alle 5 Jahre Hochrechnungen zur Inlandsfahrleistung nach Fahrzeug- und Straßenkategorien. Bei der Hochrechnung fehlt jedoch die Fahrleistung innerorts und auf Gemeindestraßen komplett, für Land- und Kreisstraßen ist die Information nur lückenhaft.

In TREMOD werden die Inlandsfahrleistungen für die Fahrzeugarten und die verfügbaren Straßenkategorien und Jahre (alle 5 Jahre) direkt von der SVZ übernommen. Die Entwicklung der Fahrleistungen nach Straßenkategorien sowie ein Vergleich zwischen TREMOD und der SVZ folgen in Kapitel 5.2.

BAST – Fahrleistungserhebung (FLE)

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Schlussberichts stammt die letzte veröffentlichte Fahrleistungserhebung der BAST aus dem Jahr 2002. Ergebnisse der FLE 2014 sind in einem internen Bericht, welcher dem Forschungskonsortium vorliegt, bezüglich der Inlandsfahrleistung verfügbar und werden in Kapitel 5.2.3 diskutiert; definitive Ergebnis-

Quellen zu Fahrleistungen in Deutschland	Datenqualität	Jahre	Differenzierung Fzg-kategorie	Differenzierung Fzg-eigenschaften	Differenzierung Halter	Differenzierung Straßenkategorie
BASSt-Fahrleistungserhebung	Erhebung	1993, 2002, (2014 folgt)	Alle Fzg-Arten	nach Fzg-Alter, nach Distanzklassen	Gewerblich, Privat, Wirtschaftszweige	keine
BASSt-Straßenverkehrszählung	Zählung	2005, 2010 (2015 folgt)	Alle Fzg-Arten	zGG, Achsen	keine	BAB, B, L, (K); ohne iO, G
KBA-Verkehr in Kilometern	Vollerhebung	2013, 2014, jährlich	Alle Fzg-Arten	Alter, Kraftstoff	keine	keine
KBA-Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge	Erhebung	jährlich	Nur Lkw > 3,5 t Nutzlast	zGG, Nutzlast, Aufbau und Schadstoffklassen	Wirtschaftszweige	keine
Kraftverkehr in Deutschland (KiD) – Erhebung	Erhebung	2002, 2010	Alle Differenzierungen (Fokus GV)	Antrieb, Nutzlast, zGG, ...	Gewerblich, Privat, Wirtschaftszweige, Berufsklassen	keine
Heusch/Boesefeldt – Jahresfahrleistung in der BRD	Studie	1993, 1996	Alle Differenzierungen	Nutzlast, Antrieb	Gewerblich, Privat, Wirtschaftszweige, Berufsklassen	Alle Straßenkategorien (differenziert)
DIW-Verkehrsmodell	Modellrechnung	jährlich bis 2012	Alle; Lkw nur insgesamt ohne Differenzierungen	Kraftstoff (Benzin und Diesel)	keine	keine

Tab. 15: Quellen mit Informationen zu Fahrleistungen (Quelle: Prognos: eigene Zusammenstellung)

se sind jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht verfügbar.

Die Ergebnisse der FLE basieren auf einer Erhebung. Die FLE gibt Hinweise zur Inländerfahrleistung nach Fahrzeug-, Halter- und Fahrprofileigenschaften differenziert. Für TREMOD ist aktuell die FLE 2002 auch eine wichtige Quelle zur Aufteilung der Fahrleistung nach Größenklassen und Fahrzeugalter (vgl. Tabelle 9 und Bild 3). Zur Aufteilung der Fahrleistung nach Verkehrssituationen enthält die FLE jedoch keine weiteren Hinweise.

Eine Abschätzung der Fahrleistung von ausländischen Kfz in Deutschland sowie der deutschen Kfz-Fahrleistung im Ausland erfolgte durch IVT im Jahr 2004. Somit gibt es eine Abschätzung der Inlandsfahrleistung nach Fahrzeugkategorien für das Jahr 2002, basierend auf der Fahrleistungserhebung. Die Inlandsfahrleistung bildet den Eckwert für die Gesamtfahrleistung der LNF nach Straßenkategorien für TREMOD.

KBA-Verkehr in Kilometern

Für das Jahr 2013 berechnete das KBA erstmals ein differenziertes Fahrleistungsgerüst nach Fahrzeug- und Kraftstoffarten sowie nach Fahrzeugalter (KBA, 2015a). Diese Berechnungen basieren auf den festgestellten Kilometerständen aller im Rahmen der Hauptuntersuchung vorgeführten Fahrzeuge. Für das Jahr 2013 umfasst die Stichprobe

26,5 Millionen Fahrzeuge. Damit stellt diese Fahrleistungsquelle bezüglich der Inländerfahrleistung nach Fahrzeugkategorie die umfangreichste Erhebung dar.

Die Fahrzeugkategorie Lkw wird in der Veröffentlichung Verkehr in Kilometer nach zulässiger Gesamtmasse und Kraftstoffarten abgegrenzt. Damit sind die Inländerfahrleistungen der LNF nach Altersklassen für die Jahre 2013 und 2014 verfügbar. Bisher wurden diese Informationen noch nicht in TREMOD verwendet. Ein Vergleich der TREMOD-Fahrleistungen mit der neuen KBA-Fahrleistungsuntersuchung folgt daher in Kapitel 5.2.

HEUSCH/BOESEFELD

Die letzte detaillierte Fahrleistungsuntersuchung bezüglich Straßentypen, Verkehrssituationen, Geschwindigkeiten, Längsneigungen usw. sind von 1996. In den Forschungsprojekten „Nutzfahrzeug-Jahresfahrleistungen 1990 auf den Straßen der Bundesrepublik Deutschland“ (FE-Nr. 90343/91: REGNIET, SCHMIDT 1994) wurden detaillierte Fahrleistungsuntersuchungen auch für LNF durchgeführt. Die Arbeiten wurden für das Jahr 1993 aktualisiert und für alle Bundesländer gerechnet [HEUSCH/BOESEFELDT 1996].

Dabei wurden die Fahrleistungen differenziert nach Straßenklassen (Autobahnen, Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen), Ortslage (innerorts,

außerorts), Fahrzeugtyp, Antriebsart, zul. Gesamtgewicht, Alter, Streckencharakteristik (Längsneigung, Geschwindigkeit), Verkehrszustand sowie nach Beladungsgrad. Diese Arbeiten bilden bis heute die Grundlage zur Aufteilung der Fahrleistung nach Verkehrssituationen, wie sie in TREMOD abgebildet werden.

KiD 2010

Die Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD) stellt eine umfassende Datenbasis über Einsatz und Nutzung in Deutschland zugelassener Kraftfahrzeuge dar. Der Schwerpunkt der Erhebung liegt auf der Erfassung des Wirtschaftsverkehrs mit kleinen Wirtschaftsfahrzeugen (Pkw gewerblicher Halter und Lkw bis 3,5 t Nutzlast). Die Ergebnisse aus KiD wurden bisher noch nicht für TREMOD verwendet.

Mit einer Nettostichprobe von 50.000 Kraftfahrzeugen und dem Fokus auf leichte Lkw ist diese Datenbasis relevant zur Einordnung der LNF-Nutzung. Außerdem wird die KEP-Nutzung beim Fahrzeugeneinsatz speziell abgefragt. Die Datenbasis wird im Rahmen dieser Vorstudie gezielt für LNF (ab 3,5 t zGM) nach Fahrzeugsegmenten (N1-I bis N1-III) ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung folgen in Kapitel 5.3.

Weitere Fahrleistungsquellen

Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) ermittelt Fahrleistungen für alle Fahrzeug-

arten auf der Grundlage eines Verkehrsmodells über Fahrzeugbestand und durchschnittlichen Jahresfahrleistungen. Die modellierten DIW-Fahrleistungen für Lkw werden weder nach Gewichtsklassen noch nach Haltereigenschaft differenziert. Im Rahmen dieser LNF-Untersuchung bieten die DIW-Fahrleistungsinformationen deshalb wenig Informationsgehalt.

Die Güterkraftverkehrs-Erhebung (GKV) des KBA berichten zu den Fahr- und Verkehrsleistungen deutscher Lkw im In- und Ausland. Die Fahrleistungsinformationen sind auf Fahrzeuge mit einer Nutzlast ab 3,5 Tonnen begrenzt. Damit können für LNF keine relevanten Fahrleistungsinformationen aus der GKV-Erhebung gewonnen werden.

5.2 Vergleich der Fahrleistungen in TREMOD zu anderen Fahrleistungsquellen

In diesem Abschnitt werden die in TREMOD modellierten Fahrleistungen von leichten Nutzfahrzeugen mit anderen verfügbaren Fahrleistungsquellen in Deutschland verglichen.

5.2.1 Vergleich TREMOD zu KBA-Verkehr in Kilometern

Wie im obenstehenden Kapitel beschrieben, liegen Fahrleistungsinformationen vom KBA nach Fahrzeugart, Alter und Kraftstoff erstmals für das Jahr

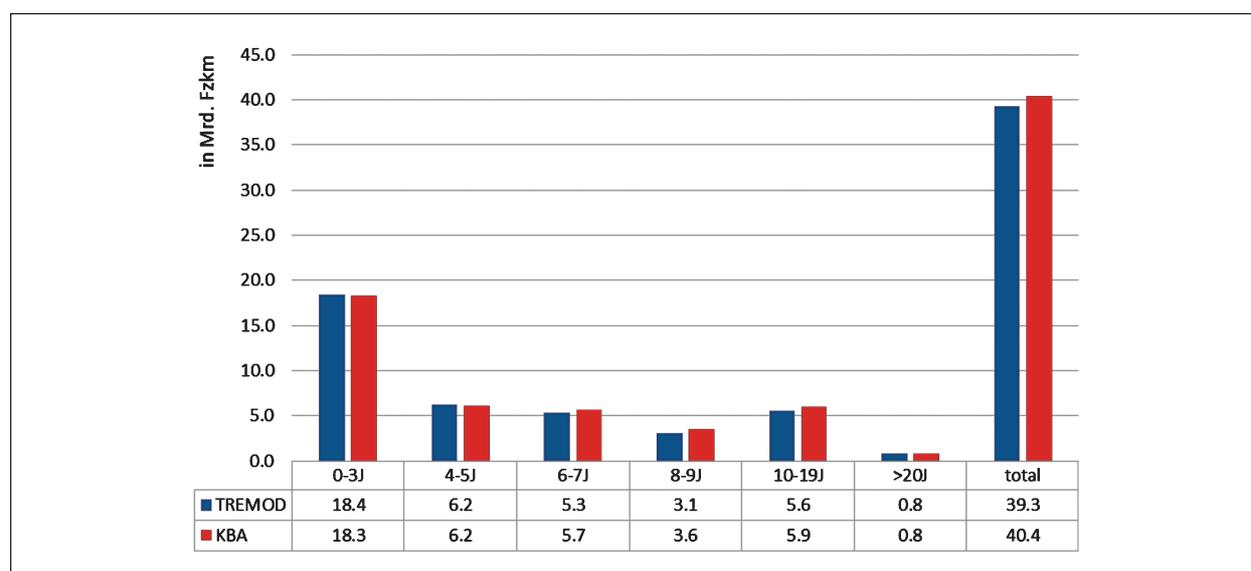


Bild 19: Vergleich der Fahrleistung von LNF nach Alter zwischen KBA und TREMOD für das Jahr 2014 (Quelle: KBA, 2015b; Sonderauswertung durch TREMOD)

2013 vor (KBA, 2015). Zukünftig wird das eine wichtige Quelle sein, um die Inländerfahrleistung des Flottenmodells (Fahrleistung nach Fahrzeugalter) zu eichen.

Nach aktuellen Berechnungen des KBA leisten die in Deutschland gemeldeten LNF (Inländer) eine Fahrleistung von 40,4 Mrd. Kilometer im Jahr 2014. Gemäß TREMOD sind es nur 2,7 % weniger. Auch ein Vergleich nach den beim KBA ausgewiesenen Altersklassen zeigt, dass die auf Basis der FLE 2002 abgeleiteten Fahrleistungsinformationen in TREMOD sehr gut zu den vom KBA ermittelten Fahrleistungen passen.

Knapp die Hälfte (45,2 %) der LNF-Fahrleistung erfolgt durch Fahrzeuge mit einem Alter von bis zu 3 Jahren. In dieser Altersklasse beträgt die Abweichung zwischen TREMOD und KBA gerademal 0,7 %. Mit dem Alter steigen tendenziell auch die Abweichungen zwischen KBA und TREMOD. Insgesamt kann jedoch festgehalten werden, dass das Flottenmodell bei TREMOD bezüglich der Fahrleistung nach Alter recht gut kalibriert ist.

Zum Vergleich: Bei den Pkw wird „nur“ 35,4 % und bei schweren Lkw (größer 6 t) 44,2 % der Fahrleistung von Fahrzeugen bis zu 3 Jahren geleistet. Gegenüber Pkw ist die Nutzung bei LNF somit stärker von jüngeren Fahrzeugen geprägt gemäß KBA Auswertung.

5.2.2 Vergleich TREMOD zu BASt nach Straßenkategorien

Die Verteilung der Fahrleistung auf die Straßenkategorien erfolgt in TREMOD für die gesamte Inlandsfahrleistung. Die Fahrleistungsentwicklung für Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landstraßen (außerorts) für den Zeitraum 2000 bis 2014 wird in Bild 20 dargestellt.

BASt (2003, 2007, 2013); Auswertung von TREMOD

Mit diesem Vergleich wird deutlich, dass die Inlandsfahrleistung der LNF nicht auf allen Straßenkategorien gleich stark angestiegen ist. Gemäß BASt hat die Fahrleistung von LNF auf Autobahnen um 40 % zugenommen zwischen 2000 und 2010. Auch auf Bundesstraßen wurde eine leichte Zunahme verzeichnet, während die Fahrleistung auf Landstraßen zwischen 2000 und 2005 um 17 % zurückgegangen ist.

Für das Jahr 2010 ist in der SVZ 2010 leider keine vollständige Information zur Fahrleistung auf Landstraßen verfügbar, da einige Länder diese nicht meldeten. Die fehlende Information kann jedoch abgeschätzt werden und somit ergibt sich eine stabilisierende Fahrleistungsentwicklung auf Landstraßen für das Jahr 2014 (gemäß TREMOD).

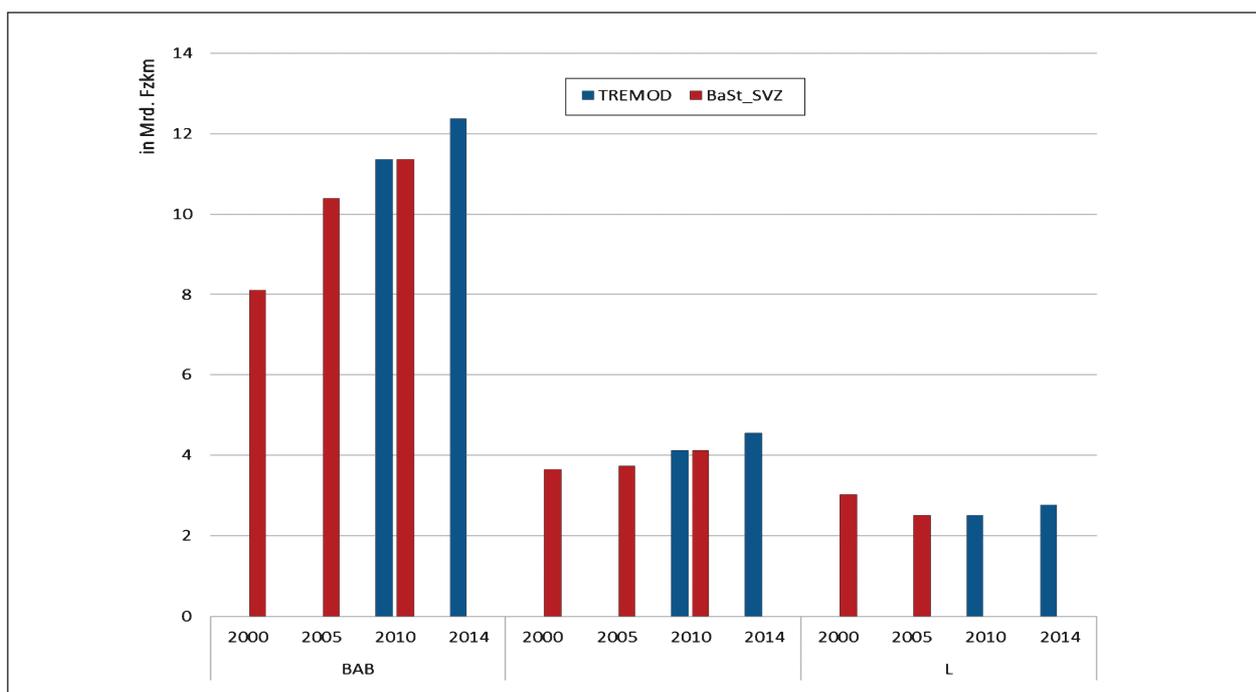


Bild 20: Vergleich der LNF-Fahrleistung nach Straßenkategorien (nur außerorts und ohne Gemeindestraßen) zwischen TREMOD und der Straßenverkehrszählung der BASt, 2000 bis 2014

Zwischen 2010 und 2014 wird in TREMOD eine steigende Fahrleistung auf allen Straßenkategorien angenommen. Genauere Erkenntnisse wird die SVZ 2015 bzw. die FLE 2014 bringen. Naturgemäß passt die Inlandsfahrleistung aus TREMOD zu den SVZ-Daten der BAST, da TREMOD auf die SVZ geeicht wird. Die Fahrleistungen Innerorts und auf Gemeindestraßen fehlen bei der BAST-Veröffentlichung. Die Fahrleistungsinformation für alle Straßenkategorien für das Jahr 2010 sind in Tabelle 9 dargestellt.

5.2.3 Vergleich TREMOD zur Fahrleistungserhebung der BAST

Die Fahrleistungserhebung der BAST gliedert sich in zwei separate Untersuchungen: die Inländerfahrleistung und die Inlandsfahrleistung.

Aus der Inländerfahrleistungserhebung 2002 wurden für TREMOD im Wesentlichen die Fahrleistungsrelationen nach Fahrzeugsegment und Alter abgeleitet. Auf Basis der Inlandsfahrleistung der Fahrleistungserhebung 2002 wurde wiederum die gesamte Fahrleistung der LNF pro Straßenkategorie übernommen und zwischen 2002 und 2014 fortgeschrieben (siehe Erläuterungen in Kapitel 2.4.2).

Die aktuelle Fahrleistungserhebung 2014 lag zum Zeitpunkt dieses Berichtes noch nicht in veröffentlichter Form vor, daher können an dieser Stelle nur vorläufige Erkenntnisse wiedergeben werden. Die Struktur der Inländerfahrleistung 2014 soll für die Lkw (inkl. LNF) im Wesentlichen die Struktur der FLE 2002 beibehalten¹⁰. Grundlage sind die Merkmale des KBA im Zentralen Fahrzeugregister. Demnach werden für die LNF die folgenden Merkmale unterschieden.

- Fahrzeugart,
- Fahrzeugalter,
- zul. Gesamtgewicht,
- Wirtschaftszweig.

Mit den Merkmalen lassen sich somit prinzipiell die Inländerfahrleistungen in derselben Struktur wie die Bestandsdaten abbilden. Somit könnten theoretisch die Wirtschaftszweige als zusätzliches Merkmal für

TREMOD aufgenommen werden, welche jedoch nach den aktuellen Erkenntnissen keine für die Emissionsberechnung relevanten Nutzungsprofile charakterisieren (siehe Kapitel 4.4.2)

Vorläufige Eckwerte zur Inländerfahrleistung lagen derzeit nur nach Fahrzeugart und damit nicht für die LNF vor. Dies liegt daran, dass die LNF wie bereits in der Inländerfahrleistung 2002 in den Kategorien Lkw gewerblicher Halter und Lkw privater Halter enthalten sind. Zur Unterscheidung muss daher das Merkmal zulässiges Gesamtgewicht mit berücksichtigt werden.

In der Inlandsfahrleistungserhebung wird hingegen ein Gesamtwert für Lieferwagen angegeben. Eine Gegenüberstellung zum Wert der FLE 2002 und dem aktuellen Stand für TREMOD zeigt Tabelle 16.

Nach den vorläufigen Erkenntnissen hat die Inlandsfahrleistung der LNF im Jahr 2014 (51,6 Mrd. km) gegenüber 2002 stark zugenommen und läge deutlich höher als momentan in TREMOD angenommen (39,3 Mrd. km). Es fällt auf, dass die Fahrleistung im Inland der deutschen Halter mit 48,5 Mrd. km sehr hoch ist und über der Inländerfahrleistung nach KBA (siehe Kapitel 5.2.1) liegt, welche auch die Fahrleistungen der Inländer im Ausland abbildet und somit erwartungsgemäß tiefer liegen müsste.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann noch nicht geklärt werden, inwiefern die dargestellten Werte miteinander vergleichbar sind, welche Unsicherheiten zu beachten und welche Änderungen zu erwarten sind. Auch die für TREMOD wichtige Aufteilung der Inlandsfahrleistung nach Straßenkategorien und Ortslage konnte aus den vorläufigen Daten nicht ausgewertet werden. Der daraus abgeleitete Revisions- und Forschungsbedarf wird in Kapitel 7 definiert.

Quelle	Abgrenzung	2002	2014
Inlandsfahrleistung FLE	Alle LNF im Inland	34,7	51,8
	Davon LNF deutscher Halter	34,1	48,8
Inländerfahrleistung FLE	LNF deutscher Halter im In- und Ausland	34,5	n. b.
Inländerfahrleistung KBA	LNF deutscher Halter im In- und Ausland	n. b.	40,3
TREMOD 5.6	Gesamt	34,7	39,3

Tab. 16: Vorläufige Eckdaten der Fahrleistungserhebung 2014 (Quelle: Interne Daten zur FLE 2014, Stand 16.6.2016, und KBA 2015b)

¹⁰ DLR/IVT: Methodenstudie zur Fahrleistungserhebung, Berlin/Mannheim, 28.02.2013.

5.2.4 Vergleich TREMOD zu KiD 2010 nach Fahrzeugsegment

Die Daten in KiD wurden nach Fahrzeugart (LNF) und Fahrzeugsegment (N1-I bis N1-III) ausgewertet. Damit lassen sich die durchschnittlichen Fahrleistungen der LNF nach Fahrzeugsegment mit TREMOD vergleichen (Bild 21).

Bei den kleinen LNF (N1-I und N1-II) sind die in TREMOD angesetzten Fahrleistungen etwas höher als bei KiD. Bei den N1-I-LNF liegt TREMOD um 7,3 % und bei den N1-II um 2,7 % über der KiD-Erhebung, betreffend der durchschnittlichen Jahresfahrleistung im Jahr 2010.

Die großen N1-III-LNF sind mit einem Bestandsanteil von 63 % im Jahr 2010 und den höheren mittleren Fahrleistungen das relevante Fahrzeugsegment. In diesem Fahrzeugsegment liegt KiD 14,2 % höher bei den durchschnittlichen Jahresfahrleistungen. Dies kann teilweise damit begründet werden, dass die KiD-Stichprobe überproportional viele gewerbliche Halter enthält, welche gegenüber privaten Haltern höhere Jahresfahrleistungen aufweisen (vgl. Bild 21). Damit ergeben sich auch höhere mittlere Jahresfahrleistungen beim Vergleich über alle LNF.

Gemäß diesem Vergleich, müssten die durchschnittlichen Fahrleistungen der N1-III-LNF leicht erhöht und die kleinen etwas abgesenkt werden, sodass sich insgesamt eine größere Spreizung der Jahresfahrleistung zwischen den Fahrzeugsegmenten ergibt. Damit würden auch insgesamt die

Emissionen ansteigen, da größere Fahrzeuge naturgemäß höhere spezifische Emissionen aufweisen.

5.3 Auswertung von KiD 2010

Zum besseren Verständnis wie LNF in Deutschland eingesetzt werden, wurde im Rahmen dieser Vorstudie der Datensatz KiD 2010 ausgewertet. Die Ergebnisse folgen in den nachfolgenden Unterkapiteln.

5.3.1 Datensatzbeschreibung

Im Rahmen der KiD-Erhebung wurden vier Datensätze gebildet:

- die Fahrzeug-Datei mit kfz- und halterbezogenen Daten,
- die Fahrten-Datei mit den (einzel-)fahrtbezogenen Daten,
- die Fahrketten-Datei mit fahrkettenbezogenen Daten,
- den Geodatensatz mit den Daten zum raumbezogenen Fahrtenbild.

Bei dieser Untersuchung wurden nur die ersten beiden Datensätze ausgewertet, wobei alle Angaben zu Jahresfahrleistungen aus der Fahrzeug-Datei berechnet werden können.

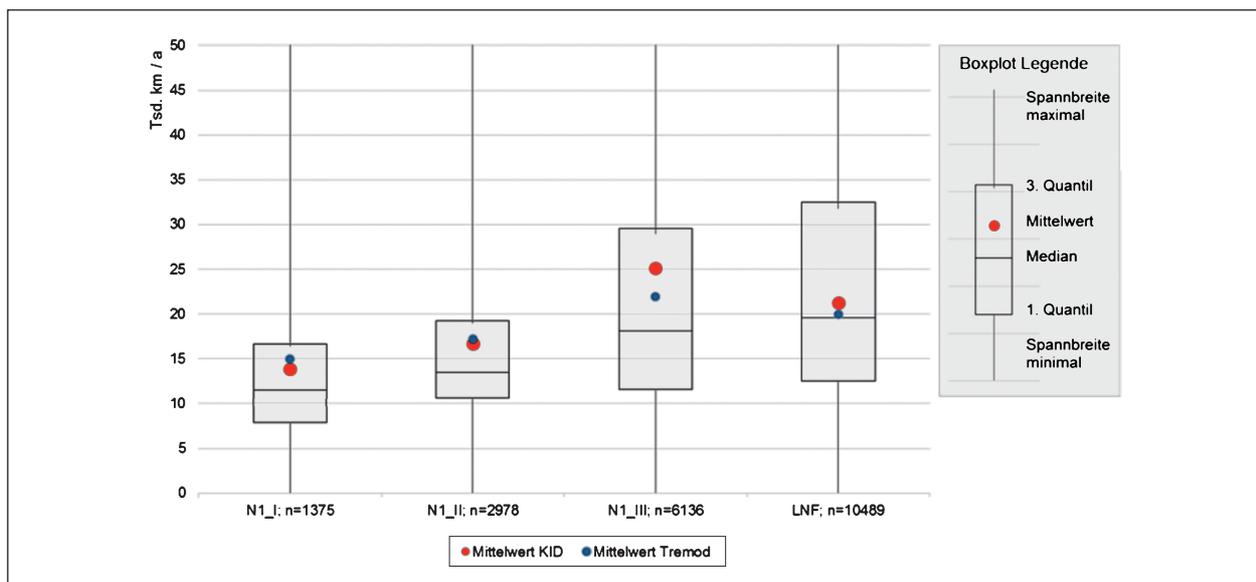


Bild 21: Durchschnittliche Jahresfahrleistung von LNF-Fahrzeugsegmenten; Vergleich KiD 2010 und TREMOD (Erklärung der boxplot-Analyse siehe Kasten in Kapitel 5.3.2) (Quelle: Datenauswertung KiD2010 durch Prognos; Auswertung von TREMOD)

Die Fahrzeug-Datei umfasst insgesamt 70.249 Kfz. Wobei fast alle Kfz einer Fahrzeugart zugewiesen werden können. Die insgesamt auswertbare Datenbasis beträgt 70.124 Kfz. Tabelle 17 stellt die Verteilung nach Fahrzeugart und Halter gemäß KiD dar.

Bei KiD liegt der Fokus auf dem Wirtschaftsverkehr. Die gewerblichen Anteile, speziell bei Pkw und bei LNF, sind deshalb bei der Stichprobe deutlich höher als in der Grundgesamtheit (gemeldet bei KBA). Diese Verzerrung muss bei Fahrleistungsanalysen mitgedacht werden.

Damit liegt die Stichprobe bei den LNF bei 26.485 Fahrzeugen. Da für mehr als die Hälfte der LNF keine Angaben zum Tachostand vorhanden sind, kann die durchschnittliche Jahresfahrleistung (= Tachostand/Fahrzeugalter in Jahren) für diese Fahrzeuge nicht berechnet werden. Der fehlende Wert bezüglich des Tachostands ist für den Großteil der Fahrzeuge damit zu begründen, dass am Befragungstichtag keine Fahrten durchgeführt wurden¹¹. Für die restlichen Fahrzeuge wurde im Fragebogen keine Angabe zum Tachostand gemacht. Damit liegt die Stichprobe der LNF mit gültigen Fahrleistungsinformationen bei 10.487 Fahrzeugen (siehe Tabelle 18).

Fahrzeugart	gewerblicher Halter	privater Halter oder unbekannt	Anteil gewerbliche Halter	
			KiD 2010	KBA (2010)
Pkw	23.737	4.482	84 %	10 %
LNF	20.361	6.124	77 %	60 %
SNF	9.412	1.223	89 %	82 %
restl. Fzg.	3.328	1.457	70 %	n. a.
Insgesamt	56.838	13.286	81 %	n. a.

Tab. 17: Stichprobe mit gültiger Fahrleistungsinformation bei KiD 2010 nach Fahrzeugart und Halter (Quelle: Datenauswertung KiD 2010 durch Prognos)

Tachostand vor Antritt der ersten Fahrt am Befragungstichtag ?		
keine Fahrten durchgeführt	13.453	51 %
keine Angabe im Fragebogen	2.545	10 %
Tachostand in km	10.487	40 %
Summe LNF	26.485	100 %

Tab. 18: Angaben zum Tachostand bei LNF in KiD 2010 (Quelle: Datenauswertung KiD 2010 durch Prognos)

5.3.2 Vergleich der mittleren Jahresfahrleistungen

Zur Analyse der mittleren Jahresfahrleistungen in KiD 2010 werden die Werte in boxplot-Diagrammen dargestellt. Mit dieser Darstellungsform können Verteilungen vereinfacht dargestellt werden. Weitere Erläuterungen sind im folgenden Kasten zu finden:

Ein boxplot-Diagramm wird zur grafischen Darstellung der Verteilung eines mindestens ordinalskalierten Merkmals verwendet. Dabei werden verschiedene Streuungs- und Lagemaße in einer Darstellung zusammengefasst. Ein boxplot soll schnell einen Eindruck darüber vermitteln, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich über diesen Bereich verteilen. Dargestellt werden die Extremwerte (min- und max-Werte), die zwei Quartile (erstes und drittes) sowie der Median (zweites Quartil). Als weitere Information kann auch der Mittelwert zusätzlich dargestellt werden. Anhand eines boxplot-Diagramms lässt sich auch die Schiefe einer Verteilung darstellen und erkennen. Ist der Median im unteren Teil der Box, so ist die Verteilung rechtsschief, und umgekehrt. Bei Fahrleistungsinformationen handelt es sich typischerweise um rechtsschiefe Verteilungen.

Vergleich zwischen Fahrzeugarten

Die LNF-Fahrleistungen werden zum einen mit anderen Fahrzeugarten (Pkw und SNF) verglichen und zum anderen wird der Einfluss von Haltereigenschaften (privat, gewerblich) auf die Fahrleistung untersucht. In Bild 22 ist die Verteilung der Fahrleistung nach Fahrzeugart und Halter dargestellt.

Bei gewerblichen Haltern ist die Fahrzeugnutzung intensiver und somit liegen auch die mittleren Fahrleistungen höher als bei privaten Haltern. Bei den Pkw ergeben sich deutlich unterschiedliche Fahrleistungsverteilungen zwischen privaten und gewerblichen Haltern. Aufgrund von steuerlichen Verzerrungen (vgl. Beschreibung in den Kapiteln 4.1 und 4.4.1) kann bei den LNF nicht so einfach von der Art der Zulassung (privat, gewerblich) auf die Art der Nutzung geschlossen werden. Dies bestätigt sich bei der Analyse der Fahrleistungsverteilung von LNF zwischen privaten und gewerblichen Haltern, welche viel weniger streut als bei den Pkw.

Im Vergleich zwischen den Fahrzeugarten kann jedoch festgehalten werden, dass LNF bezüglich

¹¹ Bei KiD wird der Tachostand vor Antritt der ersten Fahrt am Befragungstichtag abgefragt.

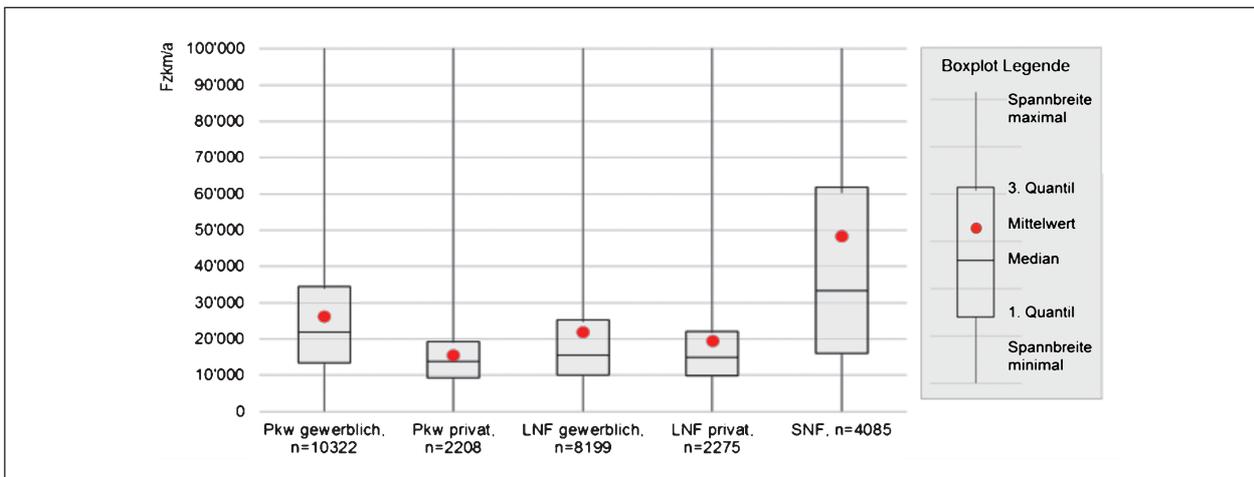


Bild 22: Durchschnittliche Jahresfahrleistung nach Fahrzeug- und Halterart aus KiD2010 (Quelle: Datenauswertung KiD 2010 durch Prognos)

der mittleren Jahresfahrleistung eher wie Pkw genutzt werden als wie schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen von SNF sind deutlich höher mit einer breiteren Verteilung. Da bei SNF der Anteil privater Halter gering ist, wurde auf diese Differenzierung bei den SNF verzichtet.

Vergleich zwischen Wirtschaftszweigen

Die Wirtschaftszweige werden in den Bestandsdaten vom KBA mitgeführt, damit wäre diese Differenzierung im Flottenmodell in TREMOD theoretisch

umsetzbar. Eine weitere Segmentierung hätte aber weitergehende Implikationen bezüglich der Emissionsfaktoren: neue Fahrmuster, neues Konzept der Verkehrszustände, die heute pro Fahrzeugkategorie (und nicht weiter differenziert) definiert sind (vergleiche Kapitel 6). Wie sich die Fahrleistungen in den für LNF relevanten Wirtschaftszweigen unterscheiden ist in Bild 23 dargestellt:

In KiD können die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen auf Basis von Tachoständen und Fahrzeugalter nach Wirtschaftszweigen für die Stichprobe ermittelt werden. Eine boxplot-Analyse zeigt, die

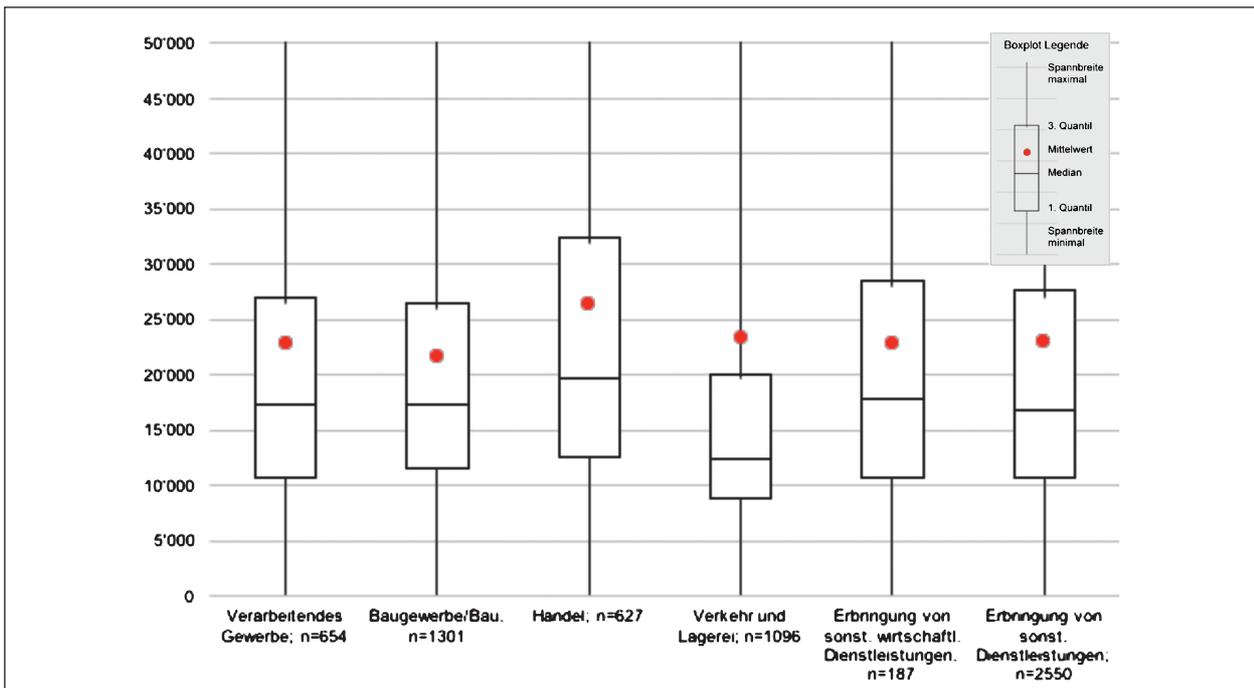


Bild 23: Boxplot der durchschnittlichen Jahresfahrleistung nach Wirtschaftszweigen (nur WZ mit relevanten LNF-Anteil, ohne Private); Auswertung KiD2010 (Quelle: Datenauswertung KiD 2010 durch Prognos)

für Fahrleistungsdaten typisch rechtsschiefe Verteilung der durchschnittlichen Jahresfahrleistung der Fahrzeuge. Der Median liegt immer tiefer als der Mittelwert. Die Streuung bei den Mittelwerten der durchschnittlichen Fahrleistungen ist relativ gering. Das Baugewerbe hat die geringste mittlere Jahresfahrleistung mit 21.555 km/a und liegt damit (nur) 18 % unter der mittleren Jahresfahrleistung beim Handel mit 26.319 km/a.

Die mittlere Jahresfahrleistung zeigt keine signifikante Abhängigkeit vom (eingetragenen) Wirtschaftszweig, gemäß KiD 2010. Die Werte zwischen dem ersten und dem dritten Quartil (box) überlagern sich in bei allen Wirtschaftszweigen. Eine Differenzierung nach Wirtschaftszweigen ist deshalb nicht nur betreffend der Einordnung zu Nutzercharakteristika schwierig (siehe Kapitel 4.4.2), zusätzlich ergeben sich keine signifikanten Fahrleistungsdifferenzen, sodass gemäß dieser Analyse der Aufwand zur Differenzierung in die beim KBA geführten Wirtschaftszweige nicht zweckmäßig erscheint.

5.3.3 Abschätzung der KEP-Fahrleistung

In Kapitel 4.4.4 wird die Segmentierung in sogenannte Querschnittssegmente diskutiert. Die KEP-Branche ist eines dieser Segmente, von der vermutet wird, dass sie ein segmentspezifisches Verkehrsverhalten aufweist. In einer Sensitivitätsrechnung wird deshalb der Einfluss dieser Fahrzeuge auf die Emissionen abgeschätzt (siehe Kapitel 6.1.2).

Bei der Erhebung KiD 2010 wird speziell nach der KEP Nutzung beim Fahrzeugeinsatz gefragt. Somit lassen sich die KEP-Anteile in der LNF-Stichprobe sowie die Anteile innerhalb der gemeldeten Wirtschaftszweige feststellen. Bei der Stichprobe werden rund 13 % der LNF mehrheitlich in der KEP-Nutzung eingesetzt, die Berechnung über die Wirtschaftszweig-Anteile kommt auf dieselbe Größenordnung. Da es sich bei KiD um eine Erhebung mit Fokus Wirtschaftsverkehr handelt, gehen wir in dieser Variantenrechnung von einem leicht tieferen Bestandsanteil von 10 % aus.

Wie sich die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen bei KEP-Fahrzeugen vom mittleren LNF unterscheiden wird aus Bild 24 ersichtlich.

KEP-LNF weisen im Mittel eine deutlich höhere Jahresfahrleistung auf. Auffallend ist jedoch auch,

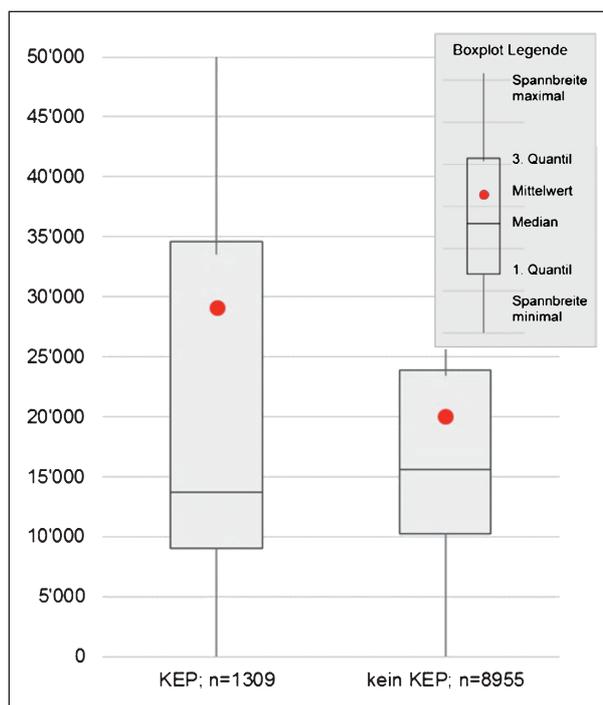


Bild 24: Boxplot der durchschnittlichen Jahresfahrleistung nach 24KEP- und kein KEP-LNF aus KiD2010 (Quelle: Datenauswertung KiD 2010 durch Prognos)

dass das erste Quartil und der Median bei KEP-Fahrzeugen etwas tiefer liegen. Dies bedeutet, dass ein Großteil der Fahrzeuge unterdurchschnittliche Fahrleistungen aufweisen, es jedoch auch bedeutende Anteile gibt mit sehr hohen Jahresfahrleistungen. Die Verteilung ist damit deutlich rechtsschief und im Mittel ergeben sich um 37 % höhere Jahresfahrleistungen bei KEP-LNF als beim Mittel über alle LNF. Übertragen auf die TREMOD-Fahrleistungen ergibt sich damit mittlere Jahresfahrleistungen von rund 26.000 km/a bei KEP-Fahrzeugen. Anhand dieser Analyse wird die KEP-Fahrleistung deutschlandweit auf 5.659 Mrd. km/a geschätzt. Die möglichen Auswirkungen auf die Emissionen werden in einer Sensitivitätsrechnung in Kapitel 6.1.2 untersucht.

5.4 Synthese der Fahrleistungsanalyse

Im Unterschied zum Fahrzeugbestand, wird die Kfz-Fahrleistung in keiner amtlichen Statistik geführt. Vielmehr handelt es sich bei den Fahrleistungen um modellgestützte Abschätzungen, die auf Basis von Erhebungen und Zählstellinformationen durchgeführt werden.

Für das Jahr 2013 veröffentlichte das KBA erstmals Inländerfahrleistungen nach Fahrzeugkategorie und Fahrzeugalter, basierend auf Echtdaten (Tachostandinformationen) (KBA, 2015). Die Inländerfahrleistung der LNF kann damit nach Altersklassen mit den KBA-Daten verglichen werden. Der Vergleich für das Jahr 2014 zeigt, dass die Fahrleistungsinformation der Inländer nach Alter in TREMOD gut modelliert ist. Insgesamt liegt TREMOD „nur“ 2,7 % unter dem Wert vom KBA. Zukünftig wird empfohlen auf die KBA-Inländerfahrleistungen zu eichen, da diese eine umfangreiche Erhebungsgrundlage bietet und jährlich aktualisiert wird.

Den Übergang von der Inländerfahrleistung zur Inlandsfahrleistung (territorial) basiert auf der Fahrleistungserhebung 2002. Damals wurde festgestellt, dass Inländer etwa gleich viel Fahrleistung im Ausland erbringen, wie Ausländer im Inland. Dementsprechend wurden die Inländer- und Inlandsfahrleistung gleichgesetzt. In der SVZ wird die Inlandsfahrleistung auf gewissen Straßenkategorien, auf Basis von Zählstellinformationen ermittelt. Die nicht ausgewiesenen Straßenkategorien werden über die Differenz zur Inländerfahrleistung berechnet. Dabei ist diese Differenz von 35 % auf 50 % zwischen 2002 und 2010 angestiegen. Die Gründe dafür sind bislang unerforscht. Auswertungen der aktuellen FLE2014 werden zeigen, ob für LNF noch immer gilt, dass die Inländer- und Inlandsfahrleistung gleich hoch ist. Zu beachten ist jedoch auch, dass die Inlandsfahrleistung des Straßenverkehrs auf den Kraftstoffabsatz gemäß Energiebilanz passen soll.

Zusammenfassend hat die Inländerfahrleistung der LNF viel stärker zugenommen als der durch die SVZ erfasste Anteil der Inlandsfahrleistung. Weil gemäß FLE 2002 Inländer- gleich Inlandsfahrleistung gesetzt wurde, haben die Fahrleistungen innerorts sowie auf Gemeindestraßen stark zugenommen.

Die mittlere Jahresfahrleistung nach den LNF-Segmenten (N1-I bis N1-III) wurden mit den KiD 2010 Daten verglichen. Bei KiD ist die Spreizung der durchschnittlichen Jahresfahrleistung zwischen den Segmenten höher, bzw. weisen die großen LNF (N1-III) deutlich höhere Jahresfahrleistung auf. Zu beachten gilt, dass bei KiD die Jahresfahrleistungen – aufgrund des überproportionalen gewerblichen Anteils in der Stichprobe – generell höher liegen. Trotzdem steht fest, dass gemäß KiD 2010

die Spreizung in der mittleren Jahresfahrleistung zwischen den LNF-Segmenten größer ist als bei TREMOD.

Die Fahrleistungsdaten in der Stichprobe von KiD 2010 zeigen für LNF keine signifikanten Unterschiede betreffend den Wirtschaftszweigen. Zwar zeigen sich Abweichungen in den Mittelwerten, diese sind jedoch nicht systematisch und damit über die Fahrleistungsverteilung nicht erklärbar.

Bei der Fahrleistungsverteilung der KEP-LNF zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Obwohl viele LNF unterdurchschnittliche Fahrleistungen aufweisen, legt das durchschnittliche KEP-LNF deutlich mehr Kilometer pro Jahr zurück gemäß KiD 2010. Die Auswirkungen der überdurchschnittlichen Fahrleistung von KEP-LNF werden in Kapitel 6.1.2 ermittelt und beschrieben.

6 Detailanalysen zu Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren in HBEFA und TREMOD werden differenziert nach Verkehrssituationen (siehe Kapitel 3.2.2). Jeder der in HBEFA unterschiedenen Verkehrssituationen ist ein typisches Fahrmuster hinterlegt (Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf). Auf der Basis dieser Fahrmuster werden mit dem Emissionssimulationsmodell PHEM die Basis-Emissionsfaktoren für HBEFA und TREMOD ermittelt (siehe Kapitel 3.3.1). Im vorliegenden Kapitel werden daher hinsichtlich der Emissionsfaktoren für LNF in HBEFA/TREMOD folgende Fragestellungen untersucht:

- Bilden die den HBEFA-Verkehrssituationen hinterlegten Fahrmuster das Fahrverhalten der LNF adäquat ab (Kapitel 6.1)?
- Sind weitere Emissionsmessungen (Rollenprüfstandsmessungen etc.) von LNF für die Kalibrierung von PHEM notwendig (Kapitel 6.2)?

6.1 Fahrmuster

6.1.1 LNF-Fahrmuster in HBEFA/TREMOD: Verlauf und Emissionen

Für die Herleitung der in HBEFA den LNF zugrunde gelegten Fahrmustern wurde bislang nicht nach Pkw und LNF unterschieden, da entsprechende

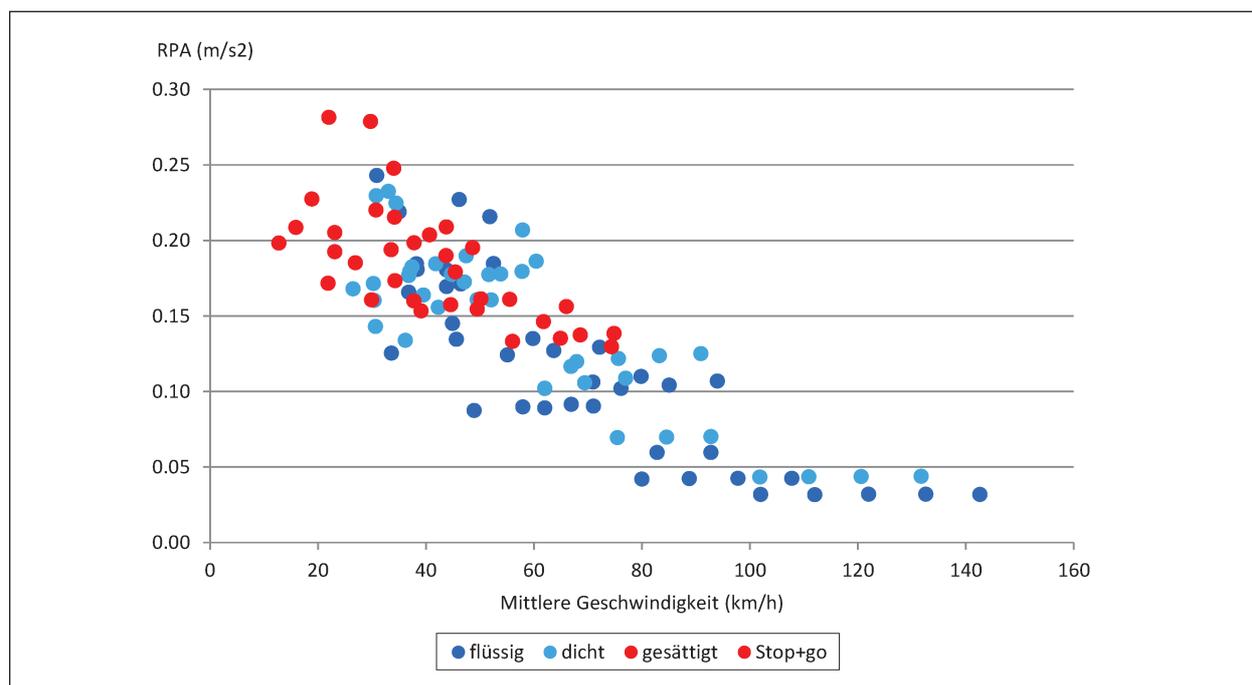


Bild 25: Kennwerte der LNF-Fahrmuster in HBEFA nach Durchschnittsgeschwindigkeit und RPA (relative positive Beschleunigung), sowie Verkehrsqualitätsstufen (Quelle: INFRAS/HBEFA)

Analysen keine Unterschiede des Fahrverhaltens rein aufgrund der technischen Eigenschaften der Fahrzeuge ergaben (siehe Kapitel 3.2.2). So liegen in den HBEFA-Verkehrssituationen für Pkw und LNF jeweils dieselben Fahrzyklen zu Grunde.

Die Kennwerte der in HBEFA für die LNF (und Pkw) zugrunde gelegten Fahrmuster sind in untenstehenden Abbildungen dargestellt. Dabei werden die Fahrmuster aufgetragen einmal nach der Durchschnittsgeschwindigkeit und der relativen positiven Beschleunigung (RPA in Bild 25) und anschließend nach ihrem Anteil an Stoppzeit (Bild 26). RPA ist eine Größe, welche die Dynamik eines Zyklus beschreibt. Grundsätzlich weisen die den Verkehrsqualitätsstufen Stop+Go und gesättigt zugewiesenen Fahrmuster die höchsten RPA-Werte ($> 0.15 \text{ m/s}^2$) auf, bei tiefen mittleren Geschwindigkeiten. Die Wertebereiche der vier Verkehrsqualitätsstufen überschneiden sich dabei. So treten auch bei flüssig Fahrmuster mit hohen RPA-Werten auf, primär für Verkehrssituationen mit tieferen Tempolimits (z. B. Agglomeration-Erschließungsstraße-30 km/h).

Bild 26 zeigt die Stoppzeitenanteile für die LNF-Fahrmuster in HBEFA. Die Fahrmuster der Stop+Go-Verkehrssituationen weisen Stoppanteile von über 25 % auf, während für die Verkehrsqualitätsstufe flüssig die Stoppanteile bei Straßen mit

Geschwindigkeitsbeschränkungen ab ca. 60 km/h nahe bei null liegen.

Die detaillierten Fahrzyklen-Diagramme und die entsprechenden Kennwerte (Durchschnittsgeschwindigkeit, RPA, Stopp-Anteil) für ausgewählte Verkehrssituationen sind in Bild 27 bis Bild 29 dargestellt. Die Auswahl beschränkt sich dabei auf die innerorts auftretenden Verkehrssituationen (siehe Tabelle 12 in Kapitel 3.2.2), unter denen rund 45 % der LNF-Fahrleistungen in Deutschland anfallen. Diese Auswahl liegt darin begründet, dass mögliche Unterschiede im Fahrverhalten bei verschiedenen LNF-Nutzungsgruppen primär innerorts relevant werden dürften, außerorts und auf Autobahnen werden geringere Unterschiede hinsichtlich der Nutzung bzw. Fahrzeugkategorie (Pkw und LNF) erwartet.

Die Kennwerte für Erschließungs- und Hauptverkehrsstraßen (HVS) sind insgesamt relativ ähnlich. Bei höheren Geschwindigkeitsbegrenzungen (70 km/h) sind die mittleren Geschwindigkeiten der Fahrmuster entsprechend höher. Die Beschleunigungsdynamik (ausgedrückt durch die RPA) ist bei den ausgewählten innerorts-Verkehrssituationen verhältnismäßig hoch, da auch im flüssigen Verkehrszustand Standzeiten von 3-5 % unterstellt werden. In der Abfolge von flüssig zu dicht, gesättigt und Stop+Go-Verkehr nehmen die Durchschnittsgeschwindigkeiten ab und die Anteile

der Stopp-Zeiten zu. Die Kennzahl RPA unterliegt dagegen in den dargestellten Fällen nicht dieser Abfolge: Auf Erschließungsstraßen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h weist das Fahrmuster bei Stufe dicht das höchste RPA

auf, bei den HVS, 50 km/h, zeigt die Stufe gesättigt die höchste Beschleunigungsdynamik. Maßgebend sind dabei nebst der Anzahl der Beschleunigungsvorgänge eines Musters auch die absoluten Geschwindigkeitsdifferenzen, die

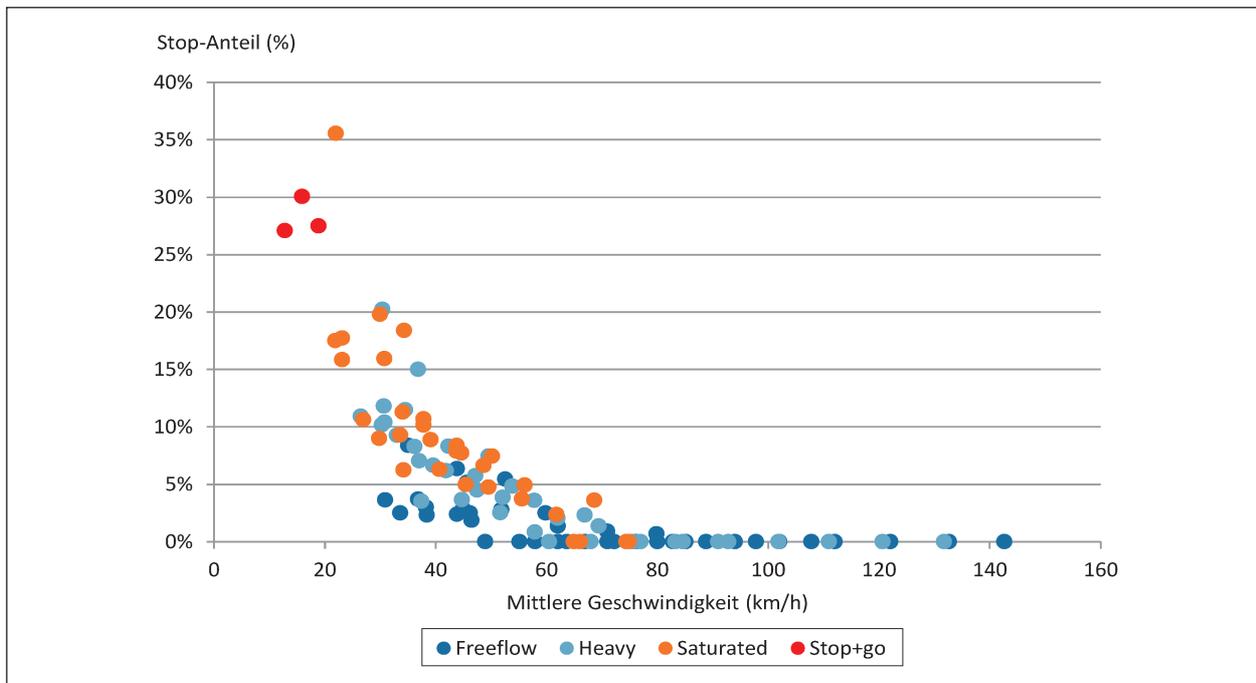


Bild 26: Kennwerte der LNF-Fahrmuster in HBEFA nach Durchschnittsgeschwindigkeit und Stop-Anteil, sowie Verkehrsqualitätsstufen (Quelle: INFRAS/HBEFA)

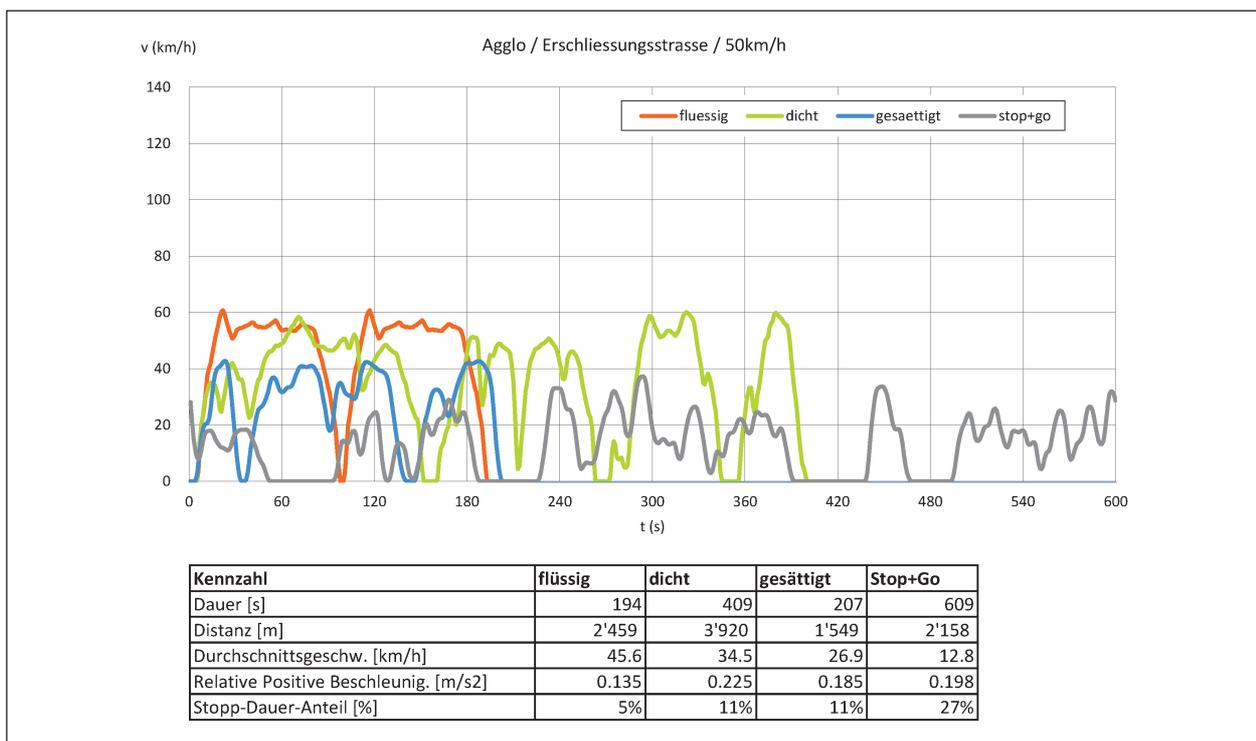


Bild 27: HBEFA-Fahrzyklen und Kennwerte für LNF für die Verkehrssituation „Agglo, Erschließungsstraße, 50 km/h“ (flüssig, dicht, gesättigt, Stop+Go). Anmerkung: Dargestellt sind die ersten 600 Sekunden des Fahrmusters (Quelle: INFRAS/HBEFA)

bei den Beschleunigungsvorgängen überwunden werden; so kann bei dichtem Verkehr die Dynamik des entsprechenden Fahrmusters durch-

aus höher sein, als im Stop+Go-Verkehr desselben Straßentyps (z. B. bei Erschließungsstraße, 50 km/h).

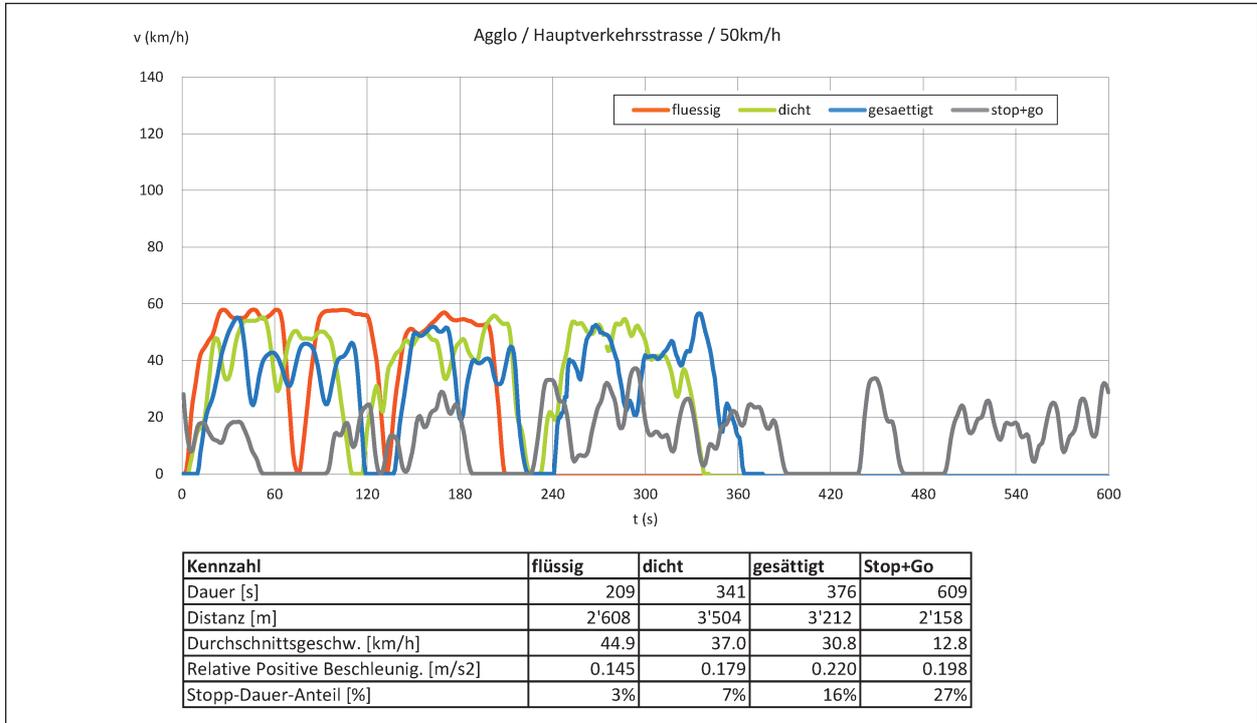


Bild 28: HBEFA-Fahrzyklen und Kennwerte für LNF für die Verkehrssituation „Agglo, Hauptverkehrsstraße, 50 km/h“ (flüssig, dicht, gesättigt, Stop+Go). Anmerkung: Dargestellt sind die ersten 600 Sekunden des Fahrmusters (Quelle: INFRAS/HBEFA)

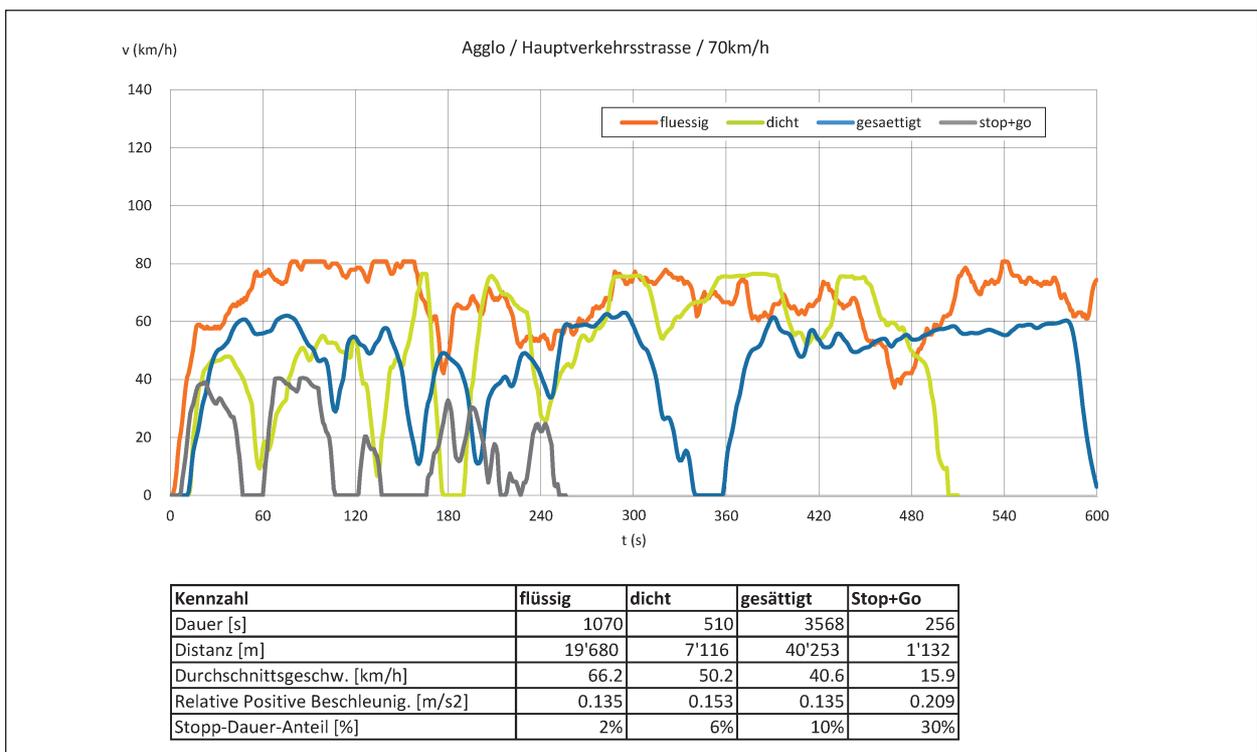


Bild 29: HBEFA-Fahrzyklen und Kennwerte für LNF für die Verkehrssituation „Agglo, Hauptverkehrsstraße, 70 km/h“ (flüssig, dicht, gesättigt, Stop+Go). Anmerkung: Dargestellt sind die ersten 600 Sekunden des Fahrmusters (Quelle: INFRAS/HBEFA)

Schließlich zeigen Bild 30 und Bild 31 den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die Luftschadstoffemissionen (NO_x und PM10) von EURO-5-LNF ver-

schiedener Größenklassen für die oben dargestellten Fahrmuster.

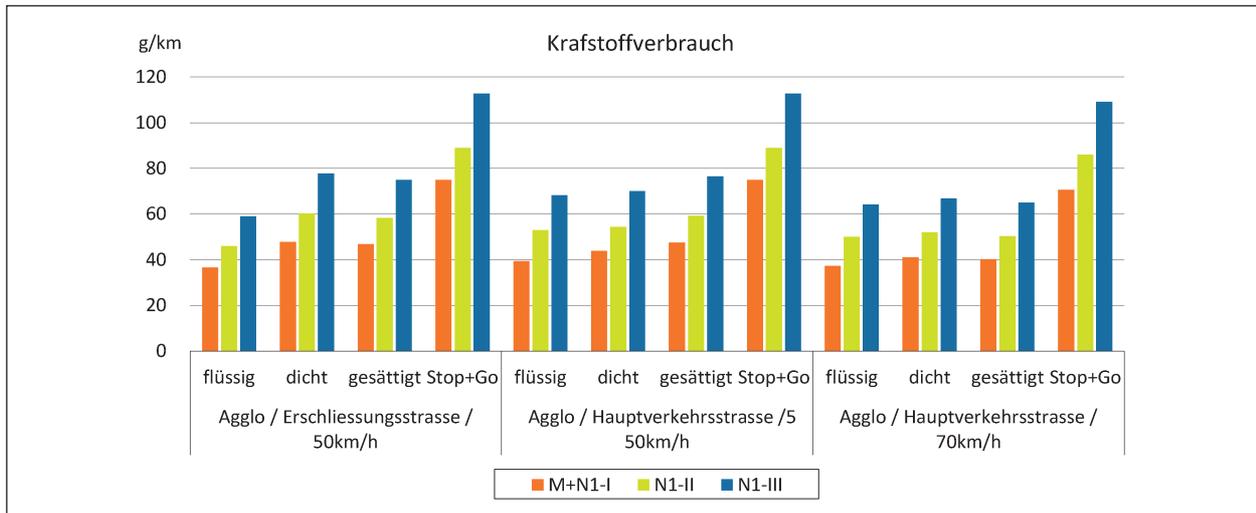


Bild 30: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (warm) von EURO-5-Diesel-LNF für die innerorts-Verkehrssituationen Erschließungsstraße 50 km/h und HVS 50 km/h bzw. 70 km/h, nach Größenklasse (Quelle: INFRAS/HBEFA)

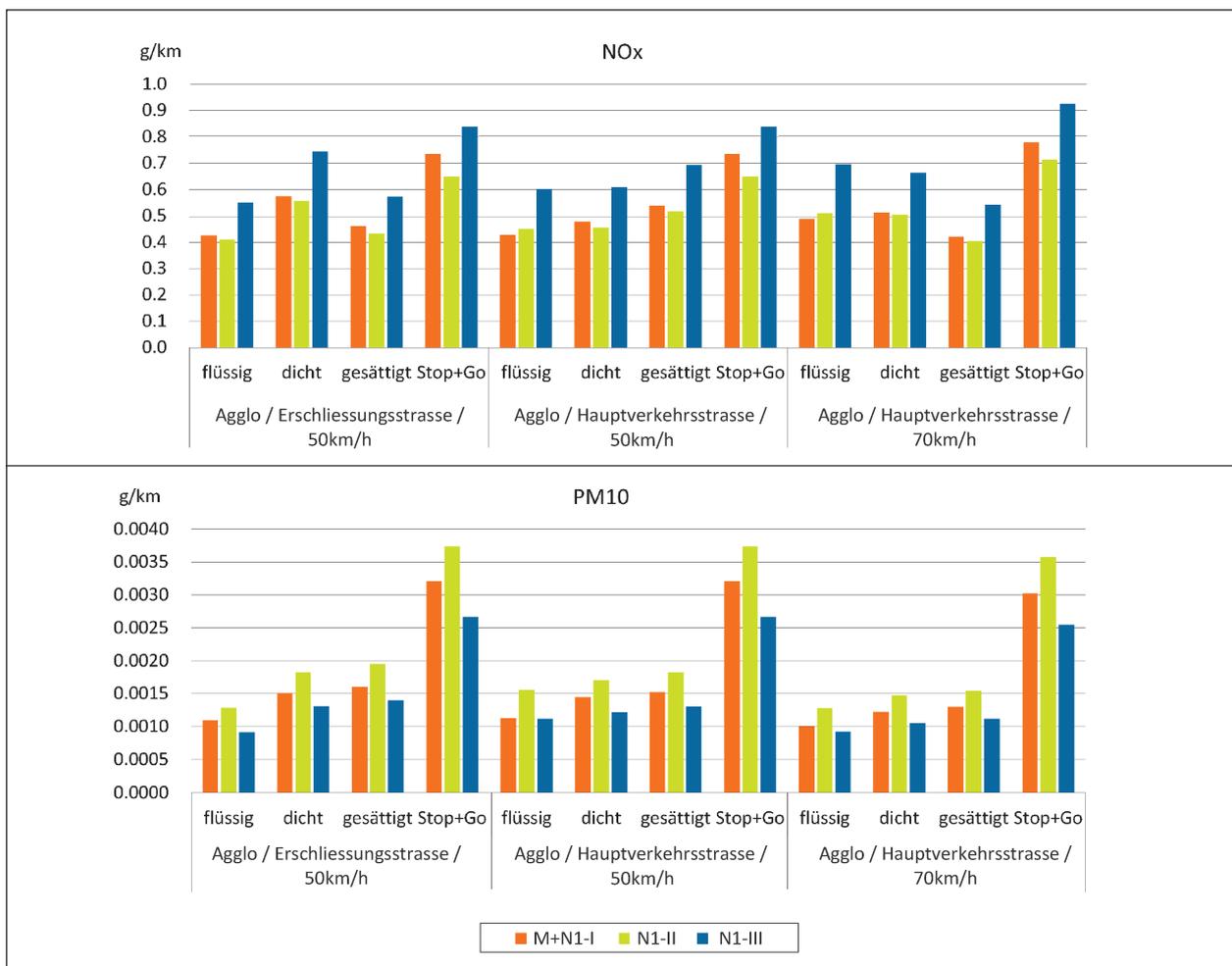


Bild 31: Spezifische Luftschadstoffemissionen (warm) von EURO-5-Diesel-LNF (NO_x, oben und PM10, unten) für die innerorts-Verkehrssituationen Erschließungsstraße 50 km/h und HVS 50 km/h bzw. 70 km/h, nach Größenklasse (Quelle: INFRAS/HBEFA)

Der Kraftstoffverbrauch (Bild 30) für die ausgewählten Verkehrssituationen/Fahrmuster zeigt jeweils die höchsten Werte im Stop+Go-Verkehr. Bei dieser Verkehrsqualitätsstufe sind die spezifischen Verbräuche der Diesel-N1-III-Fahrzeuge rund 70-90 % höher als bei flüssigem Verkehr. Auf Erschließungsstraßen liegen die Verbräuche bei dichtem und gesättigtem Verkehr rund 30 % höher als bei flüssigem Verkehr. Auf Hauptverkehrsstraßen (50 km/h und 70 km/h) sind dagegen die Unterschiede zwischen flüssigem, dichtem und gesättigtem Verkehr deutlich geringer.

Die Luftschadstoffemissionsfaktoren (Bild 31) von EURO-5-Diesel-LNF, insbesondere bei NO_x , sind abhängig von Motorenteknologie und Nachbehandlungs- bzw. Filtersystemen bei der Schadstoffreduktion. Die verschiedenen Technologien weisen in Abhängigkeit der Motorenlast unterschiedliche Effizienz bei der Schadstoffreduktion auf. Grundsätzlich sind die NO_x - und PM-Emissionen in Stop+Go-Situationen am höchsten. Auf Erschließungsstraßen weist das Fahrmuster der Qualitätsstufe „dicht“ aber ebenfalls verhältnismäßig hohe spezifische NO_x -Emissionen auf. Auf den Hauptverkehrsstraßen mit Tempolimit 70 km/h ist der Emissionsfaktor bei gesättigten Bedingungen am tiefsten, er liegt ca. 15-25 % unter demjenigen bei flüssigen Verkehrsbedingungen. Auffallend ist weiterhin, dass die kleinsten LNF (M+N1-I) insbesondere bei NO_x verhältnismäßig hohe Emissionswerte in den verschiedenen Verkehrssituationen aufweisen. Allerdings ist bei der Interpretation dieser Ergebnisse Vorsicht angebracht, da die LNF-Emissionsfaktoren in HBEFA 3.2 auf Pkw-Motorenkennfeldern basieren (siehe Kapitel 6.2). Diese sind – mangels LNF-spezifischer Messdaten – auf für Pkw typische Kennfeldbereiche (Drehzahl/Leistung) kalibriert. Mit diesen Kennfeldern werden auf der Basis der angepassten Fahrzeuggewichte und Fahrwiderständen die Emissionsfaktoren für LNF ermittelt. Dabei werden teilweise andere Bereiche der Kennfelder abgefahren, sodass für die daraus abgeleiteten, fahrzyklusspezifischen Emissionsfaktoren gewisse Unsicherheiten bestehen. Abhilfe können einzig vermehrte, zeitlich hoch aufgelöste Messungen von LNF (auf Prüfständen oder mittels PEMS) schaffen, siehe auch entsprechende Ausführungen im nächsten Kapitel.

Diese Betrachtungen belegen, dass die Auswahl der Fahrmuster einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionsfaktoren haben – das gilt sowohl für den Kraftstoffverbrauch als auch für die Luftschadstoffe.

6.1.2 Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des KEP-Verkehrs auf die Emissionen

Wie die vorigen Analysen verdeutlichen, haben KEP-Verkehre mit geschätzten 5.659 Mrd. km einen relevanten Fahrleistungsanteil (rund 12 %) am LNF-Verkehr. Ein möglicher Einfluss dieser Verkehre auf die Emissionen der LNF soll anhand eines Extrembeispiels aufgezeigt werden: hierfür wird unterstellt, dass die KEP-Fahrleistung ausschließlich innerorts und im Stop+Go-Verkehr erbracht wird (da die KEP-Fahrmuster am ehesten diesem Fahrmuster gleichen dürfte).

Anhand der durchschnittlichen Emissionsfaktoren der LNF-Flotte im Jahr 2013 zeigt sich, dass die Emissionsfaktoren pro km im Stop+Go für NO_x ca. 35 % höher und bei PM beinahe doppelt so hoch sind wie im dichten Verkehr, welcher bisher in TREMOD den größten Fahrleistungsanteil ausmacht.

Unter der Annahme, dass der KEP-Verkehr durchgehend in Stop+Go-ähnlichen Fahrmustern erfolgt, würde sich der Stop+Go-Anteil der LNF innerorts von 1,6 % auf 34 %, und insgesamt von 0,7 % auf 15 % erhöhen.

Für die Berechnung der Emissionen wird die Flottenzusammensetzung der LNF insgesamt unverändert belassen, d. h. den KEP-Fahrleistungen werden dieselben Größenklassen- und EURO-Stufenanteile unterstellt wie den übrigen LNF-Fahrleistungen. Die Auswirkungen auf das Ergebnis der NO_x - und PM-Emissionen verdeutlicht Bild 32. So würden die Emissionen Innerorts durch LNF bei NO_x um 10 % und bei PM um 23 % höher liegen als mit den bisherigen Annahmen in TREMOD. Für die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs ist die Erhöhung deutlich geringer, da die Innerortsemissionen der LNF hierbei nur einen geringen Anteil haben.

Für das nationale Emissionsinventar hat der KEP-Verkehr somit potenziell einen geringen Beitrag. Im Innerortsverkehr, sowie für einzelne Straßenabschnitte, können KEP-Emissionen hingegen

Verkehrssituation	NO_x	PM
Agglo/HVS50/dicht	0,695 g/km	0,037 g/km
Agglo/HVS50/Stop+Go	0,949 g/km	0,066 g/km
Ø Innerorts DE	0,725 g/km	0,038 g/km

Tab. 19: Emissionsfaktoren LNF N1-III Diesel Euro 4 nach HBEFA 3.2 im warmen Zustand (Quelle: TREMOD/HBEFA)

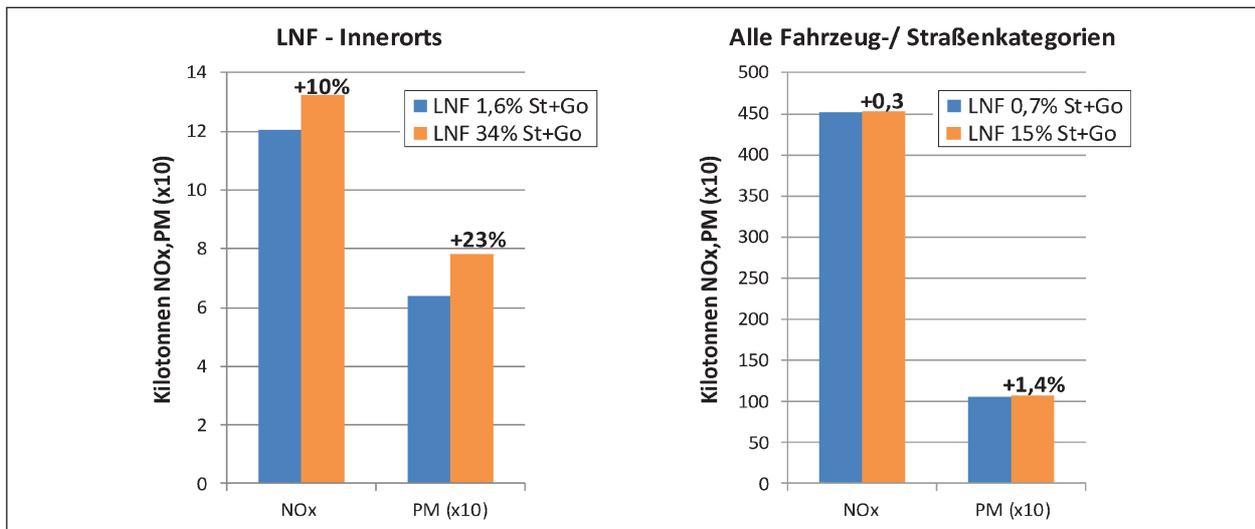


Bild 32: Einfluss der Erhöhung des Stop+Go-Anteils durch KEP-Verkehre auf die Emissionen (Jahr 2013 – Anmerkung: die Sensitivitätsrechnung wurde mit TREMOD 5.53 durchgeführt, wobei 2013 das letzte Realjahr darstellt)

einen relevanten Anteil haben. Die in der Sensitivitätsanalyse getroffenen Annahmen gehen jedoch davon aus, dass sich die gesamte KEP-Fahrleistung innerorts unter Stop+Go-Fahrmustern abwickelt. Die daraus errechneten Veränderungen der Emissionen dürften daher die Obergrenze darstellen.

6.1.3 Datenquellen für LNF-Fahrmuster, Auswertungen WLTP-Datenbank

Die im Rahmen dieses Projekts getroffenen Abklärungen haben ergeben, dass neben der WLTP-in-use-Fahrverhaltens-Datenbank (siehe auch Kapitel 3.3.1) kaum systematische Sammlungen von Fahrmusterdaten zugänglich sind, insbesondere nicht für LNF. Die nachfolgenden Ergebnisse für LNF-Fahrmuster beruhen daher auf Auswertungen aus der WLTP-in-use-Datenbank (WLTP-DB), die dankenswerterweise für die vorliegende Studie in Auszügen von deren Betreiber Heinz Steven zur Verfügung gestellt wurde.

In der WLTP-Datenbank sind die Fahrverhaltensdaten von 20 LNF enthalten, 8 davon sind M1+N1-I-Fahrzeuge. Die übrigen Daten stammen von N1-II- und N1-III-Diesel-LNF (Euro-4) aus einer Erhebung in Großbritannien (UK). Weitere Metadaten zum Einsatzzweck der Fahrzeuge sind in der WLTP-DB

nicht abgelegt. Gemäß Betreiber der Datenbank (H. STEVEN) dürften die Fahrzeuge aus Großbritannien aber vorwiegend im Postverteilverkehr (KEP) eingesetzt worden sein.

In die nachfolgenden Betrachtungen zu den LNF-Fahrmustern wurden ausschließlich die Daten der 12 N1-III und N1-II-Fahrzeuge einbezogen. Für Vergleichszwecke wurden diese Auswertungen den ebenfalls in der WLTP-DB enthaltenen Daten der Pkw gegenübergestellt.

In der WLTP-DB sind die Fahrmusterdaten nach sog. short-trips und Stopp-Phasen abgelegt. Ein short-trip bezeichnet den Teil eines Fahrzyklus von Stopp zu Stopp (Geschwindigkeit = 0 km/h), unabhängig von der Länge der Stopp-Phase. Die Stopp-Phasen sind dementsprechend die Abschnitte der Fahrzyklen zwischen den short-trips. Für die Aufbereitung von Fahrzyklen (wie z. B. für HBEFA) werden die short-trips und Stopp-Phasen wieder zu Abfolgen zusammengefügt. Für die LNF stehen aber solche aufbereiteten Fahrzyklen nicht zur Verfügung, sodass die Auswertungen auf der Basis der short-trips und Stopp-Phasen erfolgt.

Die Fahrverhaltensdaten der LNF umfassen insgesamt rund 8.600 short-trips von insgesamt rund 300 Stunden Dauer und 14.000 km Fahrdistanz (siehe Tabelle 20). Zudem sind für die LNF Angaben zu

Fahrzeug-kat.	Anz. Trips	Dauer (h)	Dist. (km)	Ø Dauer (s/trip)	Ø Dist. (m/trip)	Ø v (km/h)	Ø RPA (m/s ²)
Pkw	162.752	6.863	383.161	152	2.354	56	0,15
LNF (N1-III/II; UK)	8.642	282	13.890	117	1.607	49	0,14

Tab. 20: Kennwerte ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

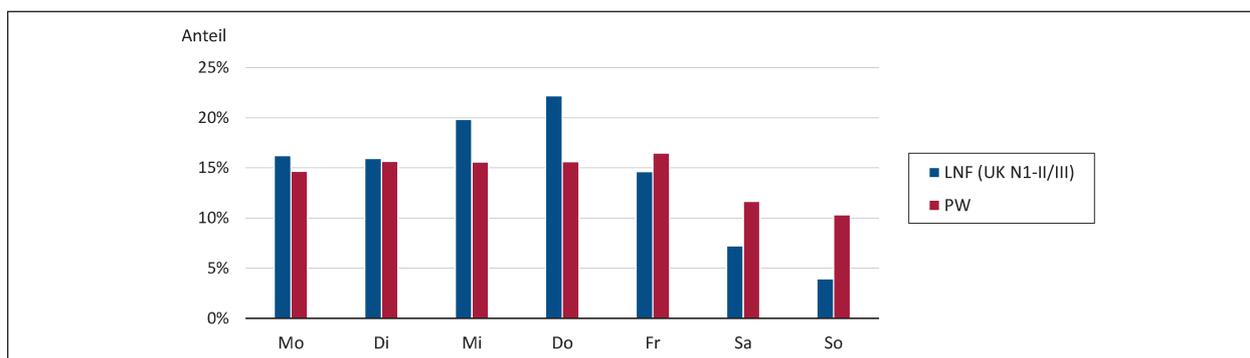


Bild 33: Anteile ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank, Dauer nach Wochentagen (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

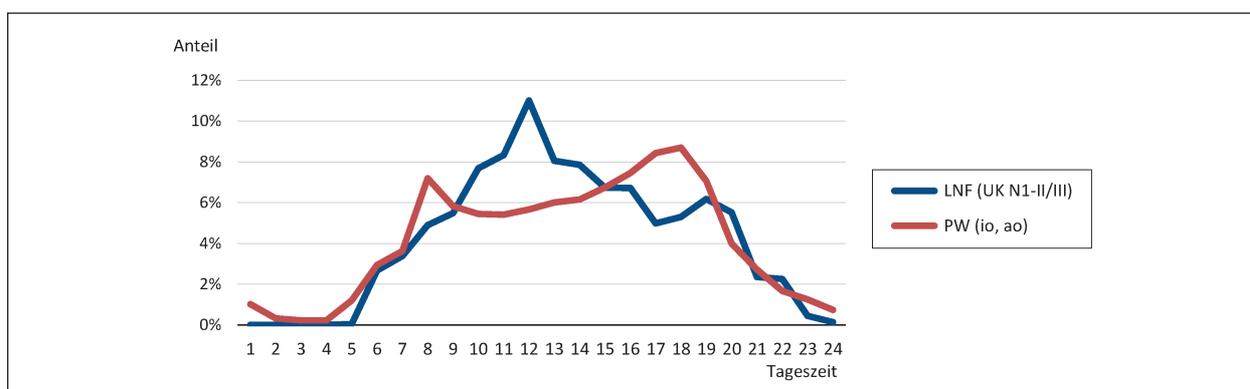


Bild 34: Anteile ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank, Dauer nach Tageszeit (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

Fahrzeug-kat.	Anz. Stops	Dauer (h)	Ø Dauer (s/stop)
Pkw	250.885	1.176	17
LNF (N1-II/III; UK)	10.861	107	35

Tab. 21: Kennwerte ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (Stopp-Phasen) in der WLTP-Datenbank (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

rund 11.000 Stopp-Phasen von insgesamt rund 107 Stunden Dauer in der WLTP-Datenbank verfügbar (Tabelle 21).

Bild 33 zeigt die Verteilung der ausgewerteten Fahrverhaltensdaten der LNF in der WLTP-Datenbank nach Wochentagen und Raumtypen. Rund 90 % der Daten wurden werktags (MO-FR) erfasst. Diese Aufteilung nach Wochentagen deutet auf den beruflichen Einsatz der LNF hin und unterscheidet sich dementsprechend von demjenigen der Pkw, die geringere Werktagessanteile aufweisen. Ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Pkw und den LNF zeigen sich bei der Verteilung nach Tagesstunden. Während die short-trips der Pkw ausgeprägte Morgen- und Abendspitzen zeigen (Bild 34 und Bild 35) findet der überwiegende Anteil der LNF-short-

trips verteilt auf die Arbeitszeiten (9-20 Uhr) statt, mit einer ausgeprägten Mittagsspitze.

Die Bilder 35 bis 37 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der short-trips hinsichtlich ihrer Dauer, mittleren Geschwindigkeit und der RPA. Diese Auswertungen zeigen allerdings lediglich wenig ausgeprägte Unterschiede zwischen den short-trips der LNF und der Pkw (siehe auch Kennwerte in Tabelle 20): Die mittlere Dauer der LNF-trips ist etwas kürzer (117 gegenüber 152 Sekunden bei den Pkw) und die mittlere Geschwindigkeit tiefer (49 km/h gegenüber 56 km/h). Die RPA-Verteilung zeigt dagegen kaum Unterschiede. Aufgrund der fehlenden Zusatzinformationen zu Einsatzgebiet, Fahrzweck, Verkehrsbelastung zum Zeitpunkt der Fahrt, befahrene Straßentypen etc. ist die Vergleichbarkeit der beiden Datensätze allerdings eingeschränkt und die Unterschiede vorsichtig zu interpretieren.

Etwas größer sind die Unterschiede bei den Stopp-Phasen. Diese dauern bei LNF im Mittel 35 Sekunden, bei den Pkw lediglich 17 Sekunden. Die Verteilungen (Bild 38) gleichen sich dennoch stark und decken insgesamt einen sehr ähnlichen Wertebereich ab.

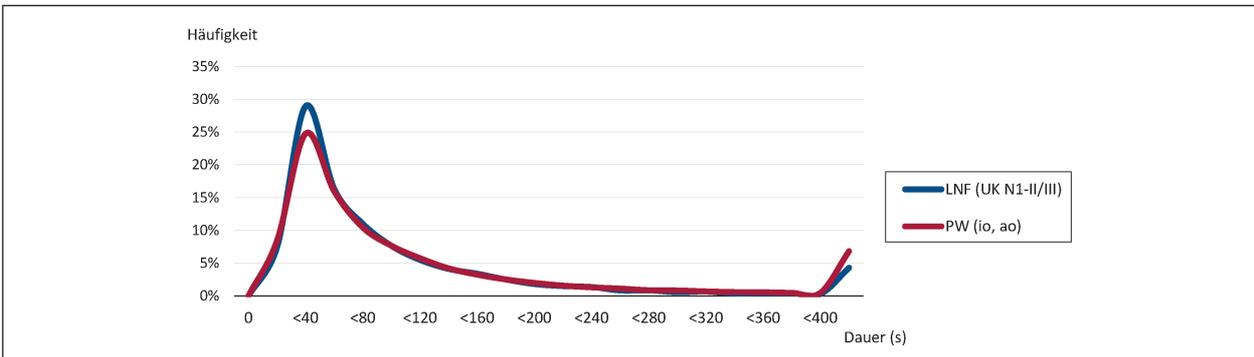


Bild 35: Häufigkeitsverteilung der Dauer ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

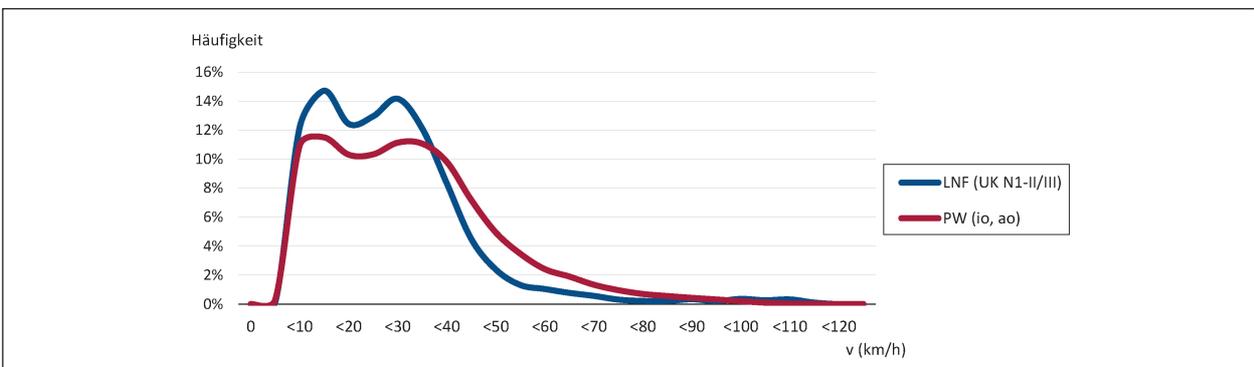


Bild 36: Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

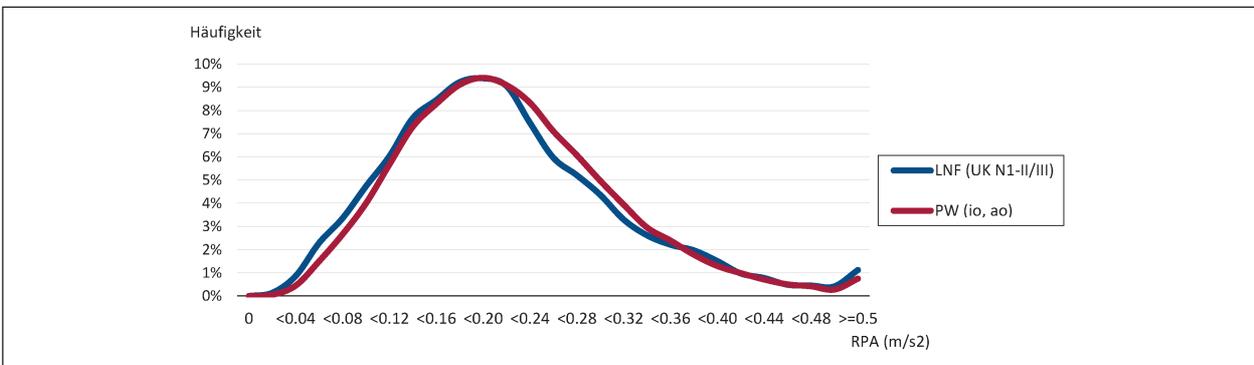


Bild 37: Häufigkeitsverteilung der RPA ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

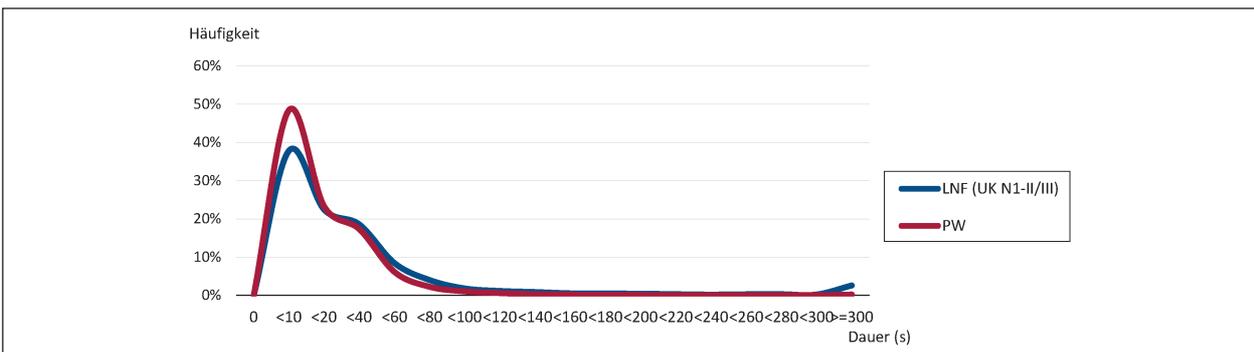


Bild 38: Häufigkeitsverteilung der Stopp-Dauer ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (Stopp-Phasen) in der WLTP-Datenbank (Quelle: WLTP-in-use-Datenbank (H. STEVEN))

6.1.4 Folgerungen

Die Unterschiede zwischen den LNF und Pkw-Fahrmustern, wie sie in der WLTP-DB abgelegt sind, sind insgesamt gering. Es können daraus keine eigenständigen LNF-Fahrzyklen abgeleitet werden. Aufgrund der Unsicherheiten und mangelnden Zusatzangaben zu Einsatzzweck und -gebiet, Verkehrsstärke zum Zeitpunkt der Fahrten, Straßentypen etc. lassen sich daraus allerdings keine endgültigen Schlüsse ziehen. Sollten die Fahrmuster der LNF weiter differenziert werden, sind zusätzliche Daten nötig. Dabei müssten neben der Erfassung von zeitlich hoch aufgelöster Ortslage und Geschwindigkeit auch zusätzliche Angaben zu Einsatzzweck und Verkehrsstärke erfasst bzw. im Nachgang zugespielt werden können.

Da solche Datenerhebungen verhältnismäßig aufwendig sind, könnten zwecks weiterer Validierung der LNF-Fahrzyklen in HBEFA auch Daten in geringerer zeitlicher Auflösung z. B. in Form von mittleren Geschwindigkeiten von explizit einem bestimmten Einsatzzweck zugewiesenen LNF-Fahrten dienen. KEP-Dienstleister könnten gegebenenfalls über solche Auswertungen verfügen und diese für Validierungen der HBEFA-Fahrzyklen für LNF zur Verfügung stellen.

6.2 Emissionsmessungen

6.2.1 LNF-Emissionsmessungen für HBEFA 3.2

Für die Modellierung der Basis-Emissionsfaktoren (warm) in HBEFA kommt das Simulationsmodell „Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model PHEM“ der FVT-TU Graz zur Anwendung (siehe Kapitel 3.3.1). Für die Herleitung der Motorenkennfelder in PHEM werden die Ergebnisse von Rollenprüfstandsmessungen verwendet. Diese Messungen müssen in einer Auflösung von 1 Hz (1 Messwert pro Sekunde; modal) mit zeitlich gut abgeglichenen Signalen von Fahrzeuggeschwindigkeit und Emissionen vorliegen. Außerdem müssen detaillierte Angaben zu den gemessenen Fahrzeugen¹² und den durchgeführten

Tests (Testzyklus, Massenträgheitsgewicht, Fahrwiderstandsparameter) verfügbar sein. Neben den zeitlich hochaufgelösten 1-Hz-Messdaten, können Gesamtemissionswerte der auf dem Prüfstand nachgefahrenen Zyklen (sogenannte bag-Daten) für die Kalibration der Gesamtemissionsniveaus verwendet werden.

Tabelle 22 fasst die verfügbaren Emissionsmessungen von LNF für die Herleitung der Basisemissionsfaktoren in der aktuellen HBEFA-Version (3.2) zusammen. Insgesamt lagen nur wenige zeitlich hoch aufgelöste Emissionsmessungen von LNF zur Verfügung (2 EURO-4 und 3 EURO-5-Dieselfahrzeuge).

In der Vorgängerversion von HBEFA 3.2 (Version 3.1) wurden – mangels detaillierter Prüfstandsmessungen von LNF – die Emissionsfaktoren auf der Basis der Pkw-Kennfelder modelliert, indem die relevanten Fahrzeugparameter (Gewicht, Fahrwiderstände) auf LNF-spezifische Kennwerte eingestellt und mit den verfügbaren Gesamtzyklus-Emissionsmesswerten (bag-Messungen) abgeglichen wurden (HAUSBERGER et al. 2009).

Für HBEFA 3.2 wurden auf der Basis der neu verfügbaren Messungen (2 EURO-4 und 3 EURO-5-Dieselfahrzeuge in 1Hz-Auflösung) versuchsweise LNF-spezifische Kennfelder hergeleitet und damit Emissionsfaktoren ermittelt. Für einzelne Schadstoffe lieferten diese Kennfelder bedeutende Abweichungen zu den bisherigen Emissionsfaktoren (z. B. NO_x). Aufgrund der

Emissions-Stufe	Benzin		Diesel	
	Gesamtzyklus (bag)	1-Hz (modal)	Gesamtzyklus (bag)	1-Hz (modal)
pre EURO	19	0	7	0
EURO-1	14	0	7	0
EURO-2	5	0	9	0
EURO-3	0	0	2	0
EURO-4	0	0	15	2
EURO-5	0	0	3	3
EURO-6	0	0	0	0
Total	38	0	43	5

Tab. 22: Übersicht der für HBEFA 3.2 verfügbaren LNF-Emissionsmessungen; Anzahl Messungen (Quelle: REXEIS et al. (2013); ERMES-Datenbank Emissionsmessungen)

¹² Marke/Modell, Grössenklasse, Technologie (Benzin, Diesel, Gas etc.), EURO-Stufe, Hubraum, Nennleistung, Nenn Drehzahl, Kilometerstand, Schaltung, Anzahl Gänge, Partikelfilter, Katalysator, SCR/EGR/andere Nachbehandlungssysteme, Erstregistrationsjahr.

immer noch geringen Anzahl Messfahrzeuge wurden die Emissionsfaktoren auf die bisherigen Werte abgeglichen. Faktisch basieren somit die in HBEFA 3.2 enthaltenen LNF-Emissionsfaktoren also nach wie vor auf den Pkw-Motorenkennfeldern, die auf der Basis von LNF-spezifischen Kennwerten (Gewicht und Fahrwiderstände) adaptiert wurden.

6.2.2 Neu verfügbare LNF-Emissionsmessungen

Seit der Veröffentlichung von HBEFA 3.2 im Jahr 2014 wurden weitere Rollenprüfstandsmessungen mit LNF durchgeführt (siehe Tabelle 23). Diese umfassen 16 neu gemessene Diesel-LNF (EURO-5) und sechs CNG-Fahrzeuge (EURO-4, EURO-5). Die Messungen wurden durch die Schweizer EMPA (6 Diesel-, 6 CNG-LNF) und TNO in den Niederlanden (10 Diesel-LNF) durchgeführt. Die Messungen der EMPA beziehen sich auf Rollenprüfstandsmessungen verschiedener Zyklen (NEFZ, CADC), während die Messungen der TNO vorwiegend mit portablen Emissionsmesssystemen (PEMS bzw. dem TNO-System SEMS) durchgeführt wurden¹³; allerdings wurden damit lediglich die NO_x- und CO₂-Emissionen erfasst.

Die für die Messungen gewählte Beladung der LNF unterscheidet sich voneinander: Die bei der EMPA gemessenen Diesel-LNF wurden bei 30 % Beladung gefahren. Die Messungen der TNO wurden jeweils bei 28 % und 100 % Beladung durchgeführt.

Die Resultate dieser Messungen von EURO-5-LNF (KADIJK et al. 2015, EMPA 2013, BÜTLER 2014) zeigen teilweise Emissionswerte, die deutlich über

Emissionsstufe	Größenklasse	Benzin	Diesel	andere
EURO-4	M1	-	-	2 (CNG)
EURO-5	N1-III	-	7/9	-
	N1-II	-	1	-
	M1	-	-	4 (CNG)
EURO-6b	-	-	-	-
Total	-	-	7/10	6

Tab. 23: Neu (nach Publikation von HBEFA 3.2) verfügbare LNF-Emissionsmessungen in 1-Hz-Auflösung (Rollenprüfstandsmessungen in fett, PEMS -Messungen in kursiv); Anzahl Messungen (Quelle: INFRAS, EMPA (EMPA 2013, BÜTLER 2014), TNO (KADIJK et al. 2015), FVT/TUG, ERMES)

den zulässigen Grenzwerten liegen. Für NO_x, das im Zuge der Untersuchungen zu Grenzwertüberschreitungen von Diesel-Pkw besonders in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt ist (siehe Info-Box), zeigen die Ergebnisse bereits unter dem für die Zulassung maßgebenden NEFZ-Zyklus Emissionswerte, die die entsprechenden Grenzwerte¹⁴ für LNF überschreiten. Unter realen Fahrbedingungen liegen die NO_x-Emissionswerte im Bereich von 1.2-2 g NO_x/km, wobei das Emissionsniveau stark von den Messbedingungen (heiß/kalt, Beladung etc.) abhängt.

Für andere Luftschadstoffe (CO, PM, HC) sind die Grenzwertüberschreitungen unter NEFZ-Bedingungen weniger eklatant; die Grenzwerte werden hier mehrheitlich eingehalten.

In KADIJK et al. (2015) wurden auch die CO₂-Emissionen unter realen Fahrbedingungen mit den entsprechenden Typenprüfwerten (NEFZ) verglichen und Differenzen von +7 % bis +52 % festgestellt. Diese Abweichungen zwischen NEFZ- und real-world-Verbrauch bewegen sich demnach ungefähr in derselben Größenordnung wie bei den Pkw (siehe z. B. ICCT 2015).

Im Gegensatz zu den EURO-4- und EURO-5-LNF liegen zu EURO-6-LNF noch keine Messungen vor. Dementsprechend sind die EURO-6-Emissionsfaktoren mit entsprechend größeren Unsicherheiten behaftet, insbesondere aus folgenden Gründen:

- Bei neueren EURO-6b-Pkw haben die Messungen gezeigt, dass möglicherweise die bestehenden NO_x-Emissionsfaktoren in HBEFA zu tief sind, ähnliche Effekte müssen bei den LNF erwartet werden.
- Wie bei den Pkw (siehe Info-Box) ist auch bei den LNF zu erwarten, dass EURO-6-Fahrzeuge verschiedener Generationen unterschiedliches Emissionsverhalten (in Abhängigkeit der Emissionskontrollsysteme und der Fahrbedingungen) zeigen.

¹³ Zu Vergleichszwecken wurde ein Fahrzeug (Diesel-EURO-5 N1-III) auf dem Rollenprüfstand vermessen (Zyklen: NEFZ, CADC, WLTP).

¹⁴ Grenzwerte für EURO-5-Diesel LNF: N1-I: 0,180 g NO_x/km, N1-II: 0,235 g NO_x/km, N1-III: 0,280 g NO_x/km

Info-Box Emissionen von Diesel-Pkw

Die Veröffentlichungen zum Versagen von Emissionskontrollsystemen bei Diesel-Pkw in den USA und der EU haben u. a. Fragen aufgeworfen zur Zuverlässigkeit der in offiziellen Emissionsmodellen (HBEFA, TREMOD, COPERT, VERSIT+ etc.) enthaltenen Pkw-Emissionsfaktoren. Die vorläufigen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden (siehe auch ERMES 2015):

- EURO-5-Diesel-Pkw**
 Die Emissionsfaktoren für diese Fahrzeuge basieren auf Rollenprüfstandsmessungen mit real-world-nahen Fahrzyklen und Fahrwiderstandskennwerten, die auf tatsächlichen Ausrolltests der Fahrzeuge beruhen. Im Gegensatz zu den Typenprüfzyklen (NEFZ) werden damit die Emissionen realitätsnaher abgebildet und liegen damit für NO_x um das 4-5-fache höher als der Grenzwert (0,18 g/km). PEMS-Messungen von EURO-5-Diesel-Pkw (LIGTERINK et al. 2012, FONTARAS et al. 2014) kommen auf ähnliche Größenordnungen.
- EURO-6-Diesel-Pkw**
 Für die Emissionsfaktoren von EURO-6b-Pkw standen zum Zeitpunkt der Erstellung des letzten HBEFA erst wenige Messungen zur Verfügung. Deren real-world-Emissionen übersteigen den Grenzwert (0,08 g/km) um das rund 4-fache, wobei die Abweichungen je nach Hersteller und Modell stark variieren. Seither sind Fahrzeuge mit neueren NO_x-Kontrollsystemen ausgestattete Fahrzeuge auf dem Markt, deren Emissionsverhalten größere Variabilität zeigen (in Abhängigkeit des NO_x-Kontrollsystems unter unterschiedlichen Fahr- und Umgebungsbedingungen). In Zukunft wird davon ausgegangen, dass mit der Einführung der RDE-Gesetzgebung – welche bei der Zulassung von Pkw die Einhaltung der Grenzwerte auch unter realen Bedingungen einfordert – die Emissionen kontinuierlich sinken werden. Aufgrund der Unsicherheiten sind hier aber weitere Testmessungen um diese vorläufigen Erkenntnisse weiter zu vertiefen erforderlich.
- Kraftstoffverbrauch/CO₂-Emissionen von Pkw**
 Ähnlich wie bei den Luftschadstoffen wird in HBEFA auch mit höheren Kraftstoffverbräuchen und CO₂-Emissionsfaktoren gerechnet, als die Flottengrenzwerten (auf der Basis von NEFZ) vorschreiben. Die mittleren CO₂-Emissionsfaktoren (flotten- und verkehrssituationengewichtet) von Pkw für das Jahr 2015 in HBEFA liegen rund 25-30 % über dem Flottengrenzwert von 130 CO₂ g/km und liegen somit im Bereich der beobachteten Abweichungen zwischen Typenprüfungs- und realem Verbrauch, wie z. B. in ICCT 2015 beschrieben.

6.2.3 Bedarf weitere LNF-Messungen

Für die hinsichtlich der Fahrleistungen zurzeit relevanteste LNF-Fahrzeugschicht (N1-III-Diesel-EURO-5) liegen also insgesamt zehn zeitlich hochaufgelöste (1-Hz) Emissionsmessungen auf Rollenprüfständen vor. Drei davon lagen bereits für die bestehende Version von HBEFA 3.2 vor, wurden aber faktisch nicht verwendet. Diese Messungen können direkt zur Kalibration von PHEM verwendet werden. Erfahrungsgemäß sollten pro Fahrzeugschicht (Größenklasse und EURO-Stufe) rund zehn

Emissions-Stufe	Größen-Klasse	Benzin	Diesel	Bemerkung
EURO-5	N1-III	min. 1	-	
	N1-II	min. 1	min. 3	
	M+N1-I	min. 1	min. 1	Wahl eines bereits als M1 vermessenen Fahrzeugs
EURO-6	N1-III	min. 1	min. 6	Ideal: 10 Fahrzeuge
	N1-II	min. 1	min. 4	Ideal: 10 Fahrzeuge
	M+N1-I	min. 1	min. 1	Wahl eines bereits als M1 vermessenen Fahrzeugs

Tab. 24: Bedarf Emissionsmessungen LNF; Anzahl Messungen (Fahrzeuge) (Quelle: INFRAS, FVT/TUG)

Messungen zur Verfügung stehen, damit zuverlässige Kennfelder für PHEM hergeleitet werden können.¹⁵ Damit lässt sich der in Tabelle 24 dargestellte Bedarf an zusätzlichen Emissionsmessungen für LNF zusammenstellen. Schwerpunkt liegt dabei auf den EURO-6-Diesel-LNF der Größenklassen N1-II und N1-III. Bei den EURO-5-LNF sind zusätzliche Messungen der bislang noch unzureichend abgedeckten Größenklasse N1-II notwendig. Aufgrund der tieferen Fahrleistungsanteile dieser Kategorie sind 3 zusätzliche Messungen jedoch ausreichend.

Für die Klasse der N1-III-Diesel-LNF EURO-5 liegen bereits ausreichend Messungen vor. Die Modellierung der M+N1-I Klasse basiert in PHEM auf den Pkw-Messungen, deren Daten für die Herleitung der Kennfelder herangezogen werden. Gegebenenfalls sollten diese Emissionsfaktoren durch die Messungen einzelner N1-I-Fahrzeuge überprüft werden.

6.2.4 Nutzung von PEMS-Messungen für die Modellierung

Bislang beruhen die Emissionsfaktoren in PHEM und HBEFA also primär auf Rollenprüfstandsmessungen. In den letzten Jahren ist allerdings die Zahl der Messdaten von mobilen Emissionsmessanlagen (Portable Emission Measurement Systems PEMS) stark angestiegen. In Zukunft werden im großen Stil PEMS-Daten aus spezifischen Messprogrammen und aus der Fahrzeugprüfung (in-use Tests für die Grenzwerteinhaltung) erhoben.

¹⁵ Mitteilung Martin REXEIS, FVT Graz, Österreich.

Bei den schweren Nutzfahrzeugen SNF sind mit dem Inkrafttreten der Bestimmungen zu EURO VI (verpflichtend ab 2013 für neue Typen, ab 2014 für neue Straßenzulassungen) auch Emissionsmessungen im realen Verkehr mit PEMS Teil der gesetzlich vorgeschriebenen Messprozeduren. Die Hersteller müssen im so genannten ISC (In Service Conformity Testing) unter definierten Randbedingungen (Geschwindigkeitsverteilung und Umgebungsbedingungen) nachweisen, dass die Emissionen unter diesen Bedingungen nicht mehr als 50 % über dem Grenzwert für den Typprüfzyklus am Motorprüfstand liegen. Für Pkw wird eine ähnliche Bestimmung ab 2017¹⁶ eingeführt, wobei die Umsetzungsdetails (insbesondere die Konformitätsfaktoren) zurzeit noch in Diskussion sind. Feldüberwachungen auf der Basis der ISC-Verfahren sind vorgesehen, um Emissionsdaten im realen Fahrbetrieb zu erhalten und die Einhaltung der Grenzwerte im realen Fahrbetrieb zu überprüfen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie künftig PEMS-Messungen für die Emissionsmodellierung genutzt werden können. Deshalb laufen derzeit entsprechende Forschungsvorhaben, welche dieser Frage nachgehen. Folgende Ausführungen beruhen auf Zwischenergebnissen dieser Studien (WELLER et al. 2016):

Die Vorteile von PEMS-Messungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es werden weitere Einflussgrößen erfasst, die das Emissionsverhalten der Fahrzeuge beeinflussen (z. B. Umgebungstemperaturen), die auf Rollenprüfständen nicht oder nur begrenzt berücksichtigt werden können.
- Das Spektrum der Fahrbedingungen (Geschwindigkeiten, Fahrzyklen) ist – im Idealfall – größer als bei den standardisierten Zyklen für Rollenprüfstände.
- Die Motor- und Fahrzeugsteuerung wird im Normalmodus betrieben, was auf Rollenprüfständen z. B. durch die notwendige Deaktivierung der ABS/ESP Systeme nicht der Fall ist.

Um die PEMS-Messungen für die Modellierung von Emissionsfaktoren (aber auch für ISC-Anwendungen) verwenden zu können, sind weitere Aspekte

zu berücksichtigen. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

Erfassung der aktuellen Motorenleistung

Für die Herleitung von Motorenkennfeldern, die in PHEM verwendet werden können, ist die sekundliche Erfassung der Motorenleistung entscheidend. Sie kann in der Regel bei modernen Fahrzeugen (EURO-6) über entsprechende Signale der On-board Diagnostik (OBD) abgegriffen werden. Die direkte Messung des Motormoments ist sehr aufwendig und kommt daher im Rahmen von Feldüberwachungen nicht in Frage. Für Fälle bei denen die Motorenleistung per OBD nicht zur Verfügung steht, wurden entsprechende Verfahren zur Herleitung der aktuellen Motorenleistung entwickelt. Dabei wird mithilfe von standardisierten Motorenkennfeldern für den Kraftstoffverbrauch – welche u. a. im Rahmen der Messprogramme zu HBEFA entwickelt wurden – aus der CO₂-Messung von PEMS, auf deren Basis der Kraftstoffverbrauch genau ermittelt werden kann, die Motorenleistung interpoliert. Aus PEMS werden dabei die Signale für den aktuellen (1 Hz) CO₂-Ausstoß und die Motordrehzahl benötigt. Damit kann die Motorenleistung ermittelt und mit weiteren Messwerten aus PEMS (z. B. NO_x, CO und HC) die für PHEM standardisierten Kennfelder hergeleitet werden. Voraussetzung für diese Methode ist, dass in der jeweiligen PEMS-Messung die entsprechenden Parameter (CO₂ und Drehzahl für die Herleitung der Motorenleistung und die weiteren Schadstoffe) erfasst werden.

Einfluss der Umgebungstemperatur/Luftdruck

Bei modernen Diesel-Fahrzeugen üben die Umgebungsbedingungen (Temperatur und Luftdruck) einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten aus, wobei der Einfluss je nach NO_x-Reduktionstechnologie sehr unterschiedlich sein kann: Bei niedrigen Temperaturen werden beispielsweise die Reduktionsraten bei der Abgasrückführung (AGR) gedrosselt um Kondensationen zu vermeiden. Die NO_x-Emissionen sind also direkt abhängig von der Abgasrückführungsrate und der Leistung von Nachbehandlungssystemen. Beides ist abhängig von den während der Messung herrschenden Umgebungsbedingungen. PEMS-Messungen, die bei verschiedenen Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden, sind daher nicht miteinander vergleichbar. Sollen die Messungen auf verschiedene, vorgegebene Standardbedingungen normiert wer-

¹⁶ Ab September 2017 für neu zugelassene Fahrzeugtypen, ab September 2018 für alle Neufahrzeuge

den können (wie es für die Verwendung in HBEFA notwendig ist), so müssen die Messungen bei verschiedenen, vordefinierten Umgebungsbedingungen (z. B. morgens, mittags) durchgeführt werden. Der daraus abgeleitete Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Emissionsniveau muss dann anschließend in den Emissionsmodellen wie HBEFA abgebildet werden. Diese Weiterentwicklung von PHEM und HBEFA ist zurzeit Gegenstand von weiteren Abklärungen.

Nicht erfasste Emissionskomponenten (Partikelmasse PM, Partikelanzahl PN)

Diese Komponenten können mit den heute verfügbaren mobilen Messsystemen nicht erfasst werden. Über die Rußmessung kann zurzeit lediglich die Funktionsfähigkeit des eingebauten Partikelfilters überprüft werden. Die Ermittlung von PM und PN ist aber mit PEMS nicht möglich. Für die Herleitung entsprechender Kennfelder in PHEM sind daher weiterhin Rollenprüfstandsmessungen notwendig.

PEMS-Messungen – unter den oben beschriebenen Voraussetzungen – sind also eine vielversprechende Alternative um künftig Rollenprüfstands-

messungen zumindest teilweise zu ersetzen bzw. zu ergänzen. Sofern in Zukunft auch für LNF umfangreiche Feldüberwachungen durchgeführt werden und diese Messdaten für Emissionsdatenbanken zur Verfügung gestellt werden, so werden die dabei erzeugten Messdaten zu einer deutlichen Steigerung der Zuverlässigkeit der real-world Emissionsfaktoren führen, wie sie z. B. in HBEFA abgelegt werden.

7 Anforderungen an die Emissionsmodellierung und weiterer Forschungsbedarf

Anforderungen an die Segmentierung

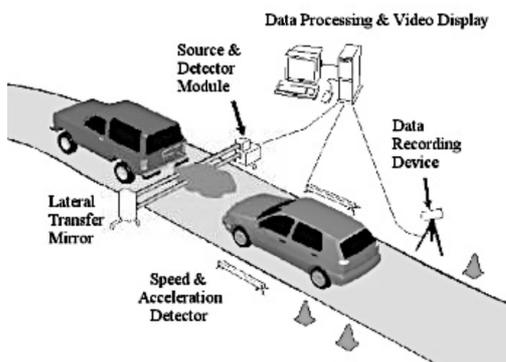
Die Bestands- und Fahrleistungsmodellierung für LNF wurde im Kapitel 2: Modellierung in TREMOD dezidiert dargelegt. Die Struktur der Fahrleistungsmodellierung setzt auf dem Datengerüst der Bestandsmodellierung auf, was im Umkehrschluss bedeutet, dass eine weitere Differenzierung der Fahrleistungen auch eine Anpassung der Flottenstruktur bedingt.

Info-Box Emissionsmessungen mittels „remote sensing“ (RS)

Eine weitere Datenquelle für die Erfassung von real-world-Emissionen sind die mittels berührungslosen Messsensoren am Straßenrand erfassten Emissionen vorbeifahrender Fahrzeuge (remote sensing, kurz RS). Dabei wird (siehe Schema unten) der Abgasausstoß mittels optischer Sensoren gemessen und mithilfe entsprechender Auswertungsalgorithmen mit den Emissionen des Fahrzeugs in Verbindung gebracht. Gleichzeitig werden die Nummernschilder der Fahrzeuge erfasst und damit aus den Fahrzeugregisterdaten weitere Charakteristiken (Fahrzeugtyp, -alter, EURO-Stufe, Gewicht etc.) verknüpft.

Mit diesem Verfahren kann – im Unterschied zu Einzelfahrzeugmessungen – eine große Anzahl von Fahrzeugen erfasst werden und damit Aussagen über die Fahrzeugflotte abgeleitet werden. Die Daten aus RS-Kampagnen eignen sich für verschiedene Fragestellungen (BORKEN-KLEEFELD 2013):

- Monitoring von Flottenemissionen, Alterungseffekte,
- Monitoring des Betriebszustands von Fahrzeugen (Unterhalt),
- Identifikation von Hochemissionsfahrzeugen (mit mutmaßlichen Störungen in den Emissionskontrollsystemen).



Quelle: Envirotest Systems in BORKEN-KLEEFELD 2013

Bild 39: Emissionsmessungen mittels „remote sensing“ (RS)

Die Modellierung der LNF-Flotte ist in TREMOD detailliert nach verschiedenen technischen Fahrzeugkriterien abgebildet. Anhand einer jährlichen Sonderauswertung beim KBA wird die Bestandsflotte in allen Differenzierungen aktualisiert. Aufgrund der robusten statistischen Datenlage beim Fahrzeugbestand, wird für die Bestandmodellierung in der aktuellen Differenzierung kein weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

Im Weiteren wurde untersucht, ob zusätzliche Kriterien die Genauigkeit bei der Emissionsmodellierung erhöhen können. Als zusätzliche Segmentierungskriterien wurden Wirtschaftszweige bzw. Berufsklassen, Querschnittsgruppen und Aufbauarten geprüft:

- Eine Differenzierung der LNF nach Wirtschaftszweigen entsprechend der KBA-Systematik führt nicht zum erhofften Ergebnis, da ein Großteil der Fahrzeuge in den Kategorien Erbringung von sonstigen (wirtschaftlichen) Dienstleistungen zugeordnet ist. Außerdem hat die Analyse am KiD-Datensatz gezeigt, dass die Unterschiede in den mittleren Jahresfahrleistungen bei den Wirtschaftszweigen keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Eine Differenzierung nach Wirtschaftszweigen oder Berufsklassen beim Fahrzeugsegment LNF wird deshalb nicht empfohlen.
- Unabhängig von der offiziellen Bestandsstatistik könnten LNF in Querschnittsgruppen (z. B. KEP-, Handwerker-, Baustellen-Verkehre und private Nutzung) eingeordnet werden. Diese Einordnung wäre sinnvoll, sofern Unterschiede in den Verkehrssituationen bei den LNF nachgewiesen werden könnten, welche einen signifikanten Einfluss auf die Schadstoff- und Klimaemissionen haben. Der Einfluss der KEP-Verkehre auf die Schadstoffemissionen wurde anhand einer Sensitivitätsanalyse abgeschätzt, indem die KEP-Fahrleistung in Gänze auf die Verkehrssituation Stop+Go gesetzt wird. Dazu wurden Daten des HBEFA 3.2 hinterlegt; die Analyse berücksichtigt somit nur eine Änderung der Fahrleistungsverteilung im Innerortsverkehr und keine potenziellen Unsicherheiten in den bestehenden Fahrmustern und Emissionsfaktoren. Im Ergebnis bei dieser Sensitivitätsrechnung liegen innerorts die NO_x -Emissionen um 10 % und die PM-Emissionen um 23 % höher. In Relation zu den Gesamtemissionen des Straßenverkehrs wirkt sich dieser Effekt entsprechend geringer aus.

- Die Zuordnung der LNF-Flotte zu den Querschnittsgruppen kann nicht unmittelbar aus statistischen Daten abgeleitet werden und zudem sind die Aktivitätsdaten (Fahrleistungen, Verkehrssituationen usw.) für die Querschnittsgruppen in der aktuell zur Verfügung stehenden Datenlage nicht abzuleiten und müssten modellgestützt ermittelt werden. Nach aktueller Einschätzung ist der Aufwand zur Differenzierung der LNF-Flotte in die Querschnittsegmente zu hoch gegenüber dem zu erwartenden Einfluss auf die Emissionen. Deshalb wird vorerst keine Differenzierung in Querschnittsgruppen für TREMOD und HBEFA empfohlen.
- Bei den Aufbauarten der LNF wurde geprüft, inwiefern Aufbaukriterien bei den LNF relevant sind für die Emissionsmodellierung. Eine Differenzierung nach den beim KBA geführten Aufbauarten wird nicht empfohlen. Zu prüfen bleibt der Einfluss von LNF mit Hochdach auf die Emissionsmodellierung. Der Einfluss der zusätzlichen Stirnfläche (höherer Luftwiderstand) auf die Schadstoffemissionen müsste in weitergehenden Untersuchungen abgeschätzt werden. Die Fahrzeughöhe ist beim KBA als Kriterium verfügbar.

Anforderungen an das Fahrleistungsgerüst

In dieser Vorstudie wurde auch untersucht, inwiefern das bestehende Fahrleistungsmengengerüst in TREMOD mit anderen LNF-Fahrleistungsinformationen in Deutschland vergleichbar ist. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieses Vergleichs sowie Empfehlungen an den Forschungsbedarf wiedergegeben:

- Die Inländerfahrleistungen der LNF nach Fahrzeugalter lässt sich gut mit der Fahrleistungsstatistik vom KBA vergleichen. Insgesamt ist die LNF-Fahrleistung im Jahr 2014 in TREMOD knapp 3 % geringer als bei Verkehr in Kilometern vom KBA. Nach aktueller Einschätzung wird empfohlen, die KBA-Inländerfahrleistungen nach Fahrzeugsegment und Alter sowie insgesamt in zukünftige TREMOD-Aktualisierungen einzubeziehen, da diese eine umfangreiche Erhebungsgrundlage bietet und jährlich aktualisiert wird. Mögliche Diskrepanzen zur aktuellen Fahrleistungserhebung 2014 sollten analysiert und berücksichtigt werden.
- Die Gesamtfahrleistungen der LNF nach Straßenkategorien in TREMOD wurden zuletzt

auf die Inlandsfahrleistung der Fahrleistungserhebung 2002 geeicht. Der Unterschied zur Inländerfahrleistung 2002 war hierbei minimal. Die Fortschreibung erfolgte seither aufgrund von Zählraten der SVZ für freie Strecken und zusätzlichen Annahmen (z. B. Bestandsentwicklung, Anteil auf Innerortsstraßen). Für die Fahrleistungserhebung 2014 lagen die Eckwerte noch nicht (bzw. nur in vorläufiger Form) vor. Daher muss geprüft werden, ob das bisherige Vorgehen beibehalten werden kann. Bei größeren Abweichungen wird empfohlen, die TREMOD-Zeitreihe auch ex-post anzupassen.

- Die LNF-Inlandsfahrleistung nach Straßenkategorien hat sich sehr unterschiedlich entwickelt. Auf Basis von Zählstellinformationen werden von der BAST alle 5 Jahre Fahrleistungen auf den freien Strecken (keine Ortsdurchfahrten) ermittelt, welche in TREMOD übernommen werden. Im Vergleich zu den BAST-Inlandsfahrleistungen haben die Inländerfahrleistungen im Zeitraum von 2002 bis heute stärker zugenommen, sodass die Inlandsfahrleistungen auf den Straßenkategorien, welche bei der BAST nicht erfasst werden (Fahrleistung innerorts und auf Gemeindestraßen), stark angewachsen ist. Wie plausibel die aktuelle Aufteilung der Fahrleistung auf die Straßenkategorien ist, werden Erkenntnisse der Fahrleistungserhebung 2014 zeigen.

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen nur vorläufige Ergebnisse der FLE 2014 für die Inländerfahrleistung vor. Sobald beide Berichtsteile (Inländer- und Inlandsfahrleistung) vorliegen, stehen für TREMOD folgende Arbeiten an:

- Analyse der Erfassung und Abgrenzung der LNF in der FLE 2014,
- Vergleich der Inlandsfahrleistung der LNF in der FLE 2014 mit der FLE 2002,
- Vergleich der Inlandsfahrleistung 2014 nach Straßenkategorie und Ortslage zur FLE 2002, sowie den Straßenverkehrszählungen der BAST (auf Außerortsstraßen),
- Vergleich der Ergebnisse der Inlandsfahrleistung 2014 zur Inländerfahrleistung 2014 sowie zur KBA-Erhebung Verkehr in Kilometern.

Anforderungen an die Fahrprofile

Die Emissionsfaktoren werden in HBEFA nach Verkehrssituationen differenziert. Je Verkehrssituation wird ein Fahrmuster (Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf) hinterlegt. Aktuell wird das Fahrmuster für LNF aus Pkw-Fahrzyklen abgeleitet. Im Rahmen dieser Vorstudie wurde deshalb auf der Basis einzelner LNF-Messdaten (aus der WLTP-in-use-Datenbank) geprüft, ob die hinterlegten Fahrmuster das Fahrverhalten der LNF adäquat abbilden:

- Die Unterschiede zwischen den LNF- und den Pkw-Fahrmustern bezüglich der Geschwindigkeit und der Wegedauer zeigen leichte Abweichungen in der Form, dass LNF innerorts tendenziell öfter mit geringeren Geschwindigkeiten und kürzeren Wegedauern unterwegs sind als Pkw. Die Unterschiede sind jedoch durchwegs gering. Auf der Basis der ausgewerteten Daten erscheint eine Ableitung von LNF-spezifischen Fahrzyklen nicht begründbar. Allerdings ist die Datenlage spärlich: In der WLTP-Datenbank werden aktuell nur 12 LNF geführt.
- Deutlichere Unterschiede zeigen sich bei den Wochen- und Tagesganglinien zwischen LNF und Pkw. LNF werden häufiger als Pkw zu Berufszwecken eingesetzt, ihr Fahrleistungsanteil an Wochentagen liegt bei nur knapp 10 %, während Pkw zu rund 23 % an Wochenenden eingesetzt werden (vgl. Bild 33). Auch die Verteilung der Fahrleistung auf die Tageszeiten (Tagesganglinie) zeigt deutliche Unterschiede bei Pkw und LNF. LNF weisen eine ausgeprägte Mittagspitze aus, während bei Pkw die Morgen- und Abendspitze dominiert (vgl. Bild 34). Damit verkehren LNF tendenziell in weniger belasteten Verkehrszuständen. Bei einer allfälligen Überarbeitung der Aufteilung der Fahrleistungen auf die Verkehrssituationen (siehe auch nächster Punkt) sollte diesem Umstand Rechnung getragen werden.
- Die Aufteilung der LNF-Fahrleistungen auf die HBEFA-Verkehrssituationen ist je Straßentyp definiert. Diese Differenzierung der Verkehrssituationen wurde in HEUSCH/BOESEFELDT (1996) fundiert untersucht und wird bis heute für HBEFA und TREMOD verwendet. Mit den verfügbaren Informationen und den Möglichkeiten im Rahmen dieser Vorstudie lässt sich diese Aufteilung nicht validieren. Eine Untersuchung der Verkehrszustände bedingt eine

systematische Auswertung von entsprechenden Datenquellen (z. B. Zählstellendaten) – wie es im Rahmen der HEUSCH/BOESEFELDT-Untersuchung gemacht wurde. Da die Arbeiten von HEUSCH/BOESEFELDT über einen längeren Zeitraum nicht mehr aktualisiert wurden, scheint vor allem hier Handlungsbedarf gegeben. Von einer Aktualisierung wäre allerdings nicht nur die Kategorie der LNF betroffen, sondern auch die übrigen Fahrzeugkategorien.

Anforderungen an die Emissionsmessung

Die Emissionsfaktoren in HBEFA werden über das Simulationsmodell PHEM der FVT-TU Graz generiert. Für die aktuelle Version von HBEFA 3.2 waren für LNF insgesamt 81 bag- (je etwa zur Hälfte für Benzin- und Diesel-LNF) und 5 zeitlich hochaufgelöste modal-Messungen verfügbar. Aufgrund der spärlichen Datenlage konnten daher bisher für PHEM keine LNF-spezifischen Emissionskennfelder verwendet werden, d. h. es wurden modifizierte Pkw-Kennfelder für die Modellierung der Emissionsfaktoren verwendet.

Mittlerweile (seit der Veröffentlichung von HBEFA 3.2 im Jahr 2014) stehen weitere LNF-Messungen für die Herleitung von Emissionskennfeldern zur Verfügung. Für die hinsichtlich der heutigen Fahrleistungen relevanten LNF-Fahrzeugschicht (N1-III-Diesel-Euro-5) liegen aktuell zehn zeitlich hochaufgelöste Emissionsmessungen vor. Erfahrungsgemäß sind rund zehn Emissionsmessungen pro Fahrzeugschicht ausreichend um damit zuverlässige Kennfelder für PHEM herzuleiten. Insbesondere für große (N1-III) und mittelgroße (N1-II) Diesel-LNF müssen weitere Fahrzeuge vermessen werden um die Zuverlässigkeit der Basisemissionsfaktoren zu erhöhen.

Die Anzahl an Messungen mit mobilen Emissionsmessaanlagen (PEMS) ist in den letzten Jahren stark angestiegen und könnte eine wertvolle Alternative zu Rollenprüfstandsmessungen darstellen. Daher laufen aktuell Forschungsvorhaben, inwieweit PEMS-Messdatensätze für die Emissionsmodellierung herangezogen werden können.

8 Literatur

- BAG (2012): Mautstatistik Jahrestabellen 2011. Bundesamt für Güterverkehr, Köln
- BASt (2003): Straßenverkehrszählung 2000. Ergebnisse. Einzelergebnisse nach Bundesländern. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 101
- BASt (2007): Straßenverkehrszählung 2005. Ergebnisse. Bundesanstalt für Straßenwesen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 164
- BASt (2013): Straßenverkehrszählung 2010 – Tabellenband
- BVU (2007): Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025, München/Freiburg
- BORKEN-KLEEFELD, J. (2013): Guidance note about on-road vehicle emissions remote sensing, im Auftrag von ICCT, Wien 2013
- BORKEN-KLEEFELD, J. (2014): Comparing unit emissions from on-road remote sensing with HBEFA, IIASA, 2014
- BÜTLER, T. (2014): Aktivitäten im Bereich Emissionsfaktoren – EF-Infogruppensitzung vom 15.5.2014, EMPA Dübendorf, Abteilung Verbrennungsmotoren
- DESTATIS (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterung, Ausgabe 2008 (WZ 2008), Statistisches Bundesamt (DESTATIS)
- DIW (2005): Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und für die Verkehrsleistungen im Personenverkehr (MIV). Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin
- EMPA (2013): Factsheet – 5214004257/LD5-2013 – Emissions of Euro 5 light duty diesel vehicles. Swiss emission inventory project, measurement program 2013. By orders of the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN)
- ERMES (2015): Information Paper – Diesel light duty vehicle NO_x-emission factors, www.ermes-group.eu/web/; veröffentlicht am 9.10.2015

- FRIEDRICH, U. (1999): Ermittlung von emissionsrelevanten Verkehrsdaten aus Haushalts- und Straßenverkehrsbefragungen, Landesumweltamt Brandenburg 1999
- FONTARAS, G. et al. (2014): Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles, *Science of the Total Environment* 468-469, 1034-1042
- FGSV (2009): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- HAUSBERGER, S. et al. (2009): Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3.1. Graz: Report Nr. I-20/2009 haus-Em 33/08/679
- HEUSCH/BOESEFELDT (1993): TÜV Rheinland: Untersuchungen des repräsentativen Fahrverhaltens von Pkw auf Stadt- und Landstraßen; im Auftrag des Umweltbundesamtes, Köln
- HEUSCH/BOESEFELDT (1994a): Nutzfahrzeug-Jahresfahrleistungen 1990 (1986) auf den Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen
- HEUSCH/BOESEFELDT (1994b): Ermittlung der Pkw-Jahresfahrleistungen 1990 und 1986 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen
- HEUSCH/BOESEFELDT (1994c): Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 1998 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Erschienen in der Schriftenreihe Verkehrstechnik, Heft V 73 der BASt, Bergisch Gladbach
- HEUSCH/BOESEFELDT; PALM, I.; REGNIET, G.; SCHMIDT, G. (1996): Ermittlung der Pkw- und Nfz-Jahresfahrleistung 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Studie von HEUSCH/BOESEFELDT im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen
- ICCT (2015): From laboratory to road – a 2015 update of official and “real-world” fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe, September
- IFEU (2012): TREMOD 5 – Version 5.3. Anhang – Materialien und Erläuterungen
- INFRAS (2004): Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 2.1 (CD-Rom und Grundlagenbericht); im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft Bern, des Umweltbundesamts Berlin, des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie und des Umweltbundesamts Österreich, Bern/Berlin/Wien
- INFRAS (2007): ARTEMIS Road Emission Model – Road Model Description, im Auftrag der Europäischen Kommission (DG TREN), Workpackage 1100, Model Version 0.4d, Deliverable 13, Bern
- INFRAS (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.1 (Programm und Grundlagenbericht, www.hbefa.net); im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt Bern; des Umweltbundesamtes Berlin, des Umweltbundesamts Österreich, der schwedischen Road Administration, dem norwegischen Umweltbundesamt sowie ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Paris)
- INFRAS (2014): Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.2 (Programm, www.hbefa.net); im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt Bern; des Umweltbundesamtes Berlin, des Umweltbundesamts Österreich, der schwedischen Road Administration, dem norwegischen Umweltbundesamt sowie ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Paris)
- Intraplan (2012): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2011/12. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. FE-Nr. 96.0927/2009, München
- IVT (1992): Fahrleistungserhebung 1990, Ziele, Datengrundlagen und erste Ergebnisse, Bergisch Gladbach

- IVT (1993): Fahrleistungserhebung 1990, Inlandsfahrleistungen und Kfz-Unfallrisiko in der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer). IVT, Bergisch Gladbach
- IVT (1994): Fahrleistung und Unfallrisiko von Kraftfahrzeugen; Schlussbericht zur Fahrleistungserhebung 1993. In: 1994. Im Auftrag der BAST, Bergisch Gladbach
- IVT (2004): Fahrleistungserhebung 2002, Band 2: Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heilbronn, Mannheim
- KBA, FZ 23 (o. J.): Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen, mehrere Jahre
- KBA, FZ 25 (o. J.): Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten, mehrere Jahre
- KBA (2015a): Verkehr in Kilometern 2013, Pressemitteilung Nr. 15/2015
- KBA (2015b): Verkehr in Kilometern 2014; Insgesamt legten deutsche Kraftfahrzeuge wieder mehr Kilometer zurück
- KNÖRR W. et al. (2011): Weiterentwicklung der Emissionsfaktoren für das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) – Endbericht, im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 370 952 142
- KADIJK, G. et al. 2015: On-road NO_x and CO₂ investigations of Euro 5 light commercial vehicles. TNO report 2015 R10192, Delft, the Netherlands
- LAT; SAMARAS, Z.; GEIVANIDIS, S. (2004): Investigation of the emission degradation of gasoline vehicles, ARTEMIS WP 3123, Report No 0415, Laboratory of Applied Thermodynamics, Thessaloniki
- LENSING (1997): Straßenverkehrszählung 1995 – Jahresfahrleistungen und mittlere DTV-Werte. Büro für angewandte Statistik, Aachen. Erschienen in der Schriftenreihe Verkehrstechnik, Heft V 41 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- LENSING (2003): Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse. Büro für angewandte Statistik, Aachen. Heft V 101 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- LIGTERINK, N. E. et al. (2012): Determination of Dutch NO_x emission factors for Euro-5 diesel passenger cars, TNO report 2012 R11099, Delft, Niederlande
- MELLIOS, G. et al. (2012): EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated July 2012, chapter 1.A.3.b.v Gasoline evaporation, Thessaloniki
- MRU (2009): Primärerhebung auf den Märkten für Kurier-, Express- und Paketdienste
- Rapp Trans/Interface; RUESCH, M. et al. (2013): Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklung und Massnahmen. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3, Basel
- REXEIS, M. et al. (2013): Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2. Graz: Report No. I-31/2013/Rex EM-I 2011/20/679
- RWTÜV (1993a): Verdampfungs- und Verdunstungsemissionen. Rheinisch-Westfälischer TÜV. Im Auftrag des BUWAL. In der Reihe: Luftschadstoffemissionen des Straßenverkehrs in der Schweiz 1990-2010, Arbeitsunterlage 13, Bern
- RWTÜV (1993b): Ermittlung des Abgasemissionsverhaltens von Nutzfahrzeugen mit Dieselmotor über 3,5 t zul. Gesamtgewicht im Bezugsjahr 1986. Im Auftrag des TÜV Rheinland
- TU Graz; KÜHLWEIN et al. (2013): Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 Passenger Cars for the HBEFA Version 3.2. Final Report. Im Auftrag von JRC, Graz
- TÜV Rheinland (1994): Abgas-Emissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland – Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Bericht 8/94, Berlin
- TÜV Rheinland (1995) Abgas-Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland – Abgasemissionsfaktoren von

Dieselmotoren bis Baujahr 1990. Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UBA (2013): National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2011. UBA im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau

ViZ BMVBS (n. d.): Verkehr in Zahlen. Bearbeitet von DIW. Erscheinungsweise jährlich. Bonn, Berlin

WELLER, K.; REXEIS M. (2016): Erstellung der Emissionsfaktoren für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) für das HBEFA Version 4, Modul 1. Erstellt im Auftrag der Umweltbundeamt GmbH. Bericht FVT-02/16 Wel Em 15/29-1/6790 vom 18.01.2016

Bilder

- Bild 1: Übersicht Arbeitspakete
- Bild 2: Berechnungsschema Straßenverkehr TREMOD
- Bild 3: Fahrleistungsrelation der LNF (und Lkw) nach Alter im Vergleich zu Diesel-Pkw
- Bild 4: Übersicht über die Module von HBEFA
- Bild 5: HBEFA-Fahrzyklen für leichte Nutzfahrzeuge für die Verkehrssituation „ländlich, Autobahn, 120 km/h“, nach Verkehrsqualitätsstufen (freier Fluss, dicht, gesättigt, Stop+Go)
- Bild 6: Methodik Herleitung Emissionsfaktoren für warme Emissionen in HBEFA/PHEM
- Bild 7: Warme NO_x-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichtes Nutzfahrzeug, Diesel, N1-III, EURO 4, bei 0 % Steigung, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation
- Bild 8: Warme NO_x-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichtes Nutzfahrzeug, Diesel, N1-III, EURO 4, nach Steigungsklassen, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation
- Bild 9: Warme NO_x-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichte Nutzfahrzeuge, Diesel, N1-III, 0 % Steigung, nach Abgasstandards, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation
- Bild 10: Warme NO_x-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichte Nutzfahrzeuge, Diesel, EURO-4, 0 % Steigung, nach Antriebstechnologie/Größenklasse, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation
- Bild 11: Warme PM₁₀-Emissionsfaktoren für die HBEFA-Verkehrssituationen, leichte Nutzfahrzeuge, Diesel, N1-III, EURO-3, 0 % Steigung, mit und ohne Partikelfilter, in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit pro Verkehrssituation
- Bild 12: Methodik der Modellierung der Kaltstart-Zuschläge
- Bild 13: Lkw-Bestand nach Größenklassen (zGG); 1990 bis 2014
- Bild 14: Bestand an LNF 2014 nach Aufbau
- Bild 15: Lkw nach LNF und SNF sowie nach privater und gewerblicher Haltung, 2014
- Bild 16: Bestand an LNF 2014 nach relevanten Wirtschaftszweigen
- Bild 17: Aufteilung der LNF-Größenklassen innerhalb der relevanten Wirtschaftszweige; Auswertung an TREMOD-Bestandsdaten für das Bezugsjahr 2014
- Bild 18: Aufteilung der Wirtschaftszweige innerhalb der LNF-Segmente; Auswertung an TREMOD-Bestandsdaten für das Bezugsjahr 2014
- Bild 19: Vergleich der Fahrleistung von LNF nach Alter zwischen KBA und TREMOD für das Jahr 2014
- Bild 20: Vergleich der LNF-Fahrleistung nach Straßenkategorien (nur außerorts und ohne Gemeindestraßen) zwischen TREMOD und der Straßenverkehrszählung der BAST, 2000 bis 2014
- Bild 21: Durchschnittliche Jahresfahrleistung von LNF-Fahrzeugsegmenten; Vergleich KiD 2010 und TREMOD
- Bild 22: Durchschnittliche Jahresfahrleistung nach Fahrzeug- und Halterart aus KiD2010
- Bild 23: Boxplot der durchschnittlichen Jahresfahrleistung nach Wirtschaftszweigen (nur WZ mit relevanten LNF-Anteil, ohne Private); Auswertung KiD2010
- Bild 24: Boxplot der durchschnittlichen Jahresfahrleistung nach KEP- und kein KEP-LNF aus KiD2010
- Bild 25: Kennwerte der LNF-Fahrmuster in HBEFA nach Durchschnittsgeschwindigkeit und RPA (relative positive Beschleunigung), sowie Verkehrsqualitätsstufen

- Bild 26: Kennwerte der LNF-Fahrmuster in HBEFA nach Durchschnittsgeschwindigkeit und Stop-Anteil, sowie Verkehrsqualitätsstufen
- Bild 27: HBEFA-Fahrzyklen und Kennwerte für LNF für die Verkehrssituation „Agglo, Erschließungsstraße, 50 km/h“ (flüssig, dicht, gesättigt, Stop+Go)
- Bild 28: HBEFA-Fahrzyklen und Kennwerte für LNF für die Verkehrssituation „Agglo, Hauptverkehrsstraße, 50 km/h“ (flüssig, dicht, gesättigt, Stop+Go)
- Bild 29: HBEFA-Fahrzyklen und Kennwerte für LNF für die Verkehrssituation „Agglo, Hauptverkehrsstraße, 70 km/h“ (flüssig, dicht, gesättigt, Stop+Go)
- Bild 30: Spezifischer Kraftstoffverbrauch (warm) von EURO-5-Diesel-LNF für die innerorts-Verkehrssituationen Erschließungsstraße 50 km/h und HVS 50 km/h bzw. 70 km/h, nach Größenklasse
- Bild 31: Spezifische Luftschadstoffemissionen (warm) von EURO-5-Diesel-LNF (NO_x, oben und PM₁₀, unten) für die innerorts-Verkehrssituationen Erschließungsstraße 50 km/h und HVS 50 km/h bzw. 70 km/h, nach Größenklasse
- Bild 32: Einfluss der Erhöhung des Stop+Go-Anteils durch KEP-Verkehre auf die Emissionen (Jahr 2013*)
- Bild 33: Anteile ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank, Dauer nach Wochentagen
- Bild 34: Anteile ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank, Dauer nach Tageszeit
- Bild 35: Häufigkeitsverteilung der Dauer ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank
- Bild 36: Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank
- Bild 37: Häufigkeitsverteilung der RPA ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank
- Bild 38: Häufigkeitsverteilung der Stopp-Dauer ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (Stopp-Phasen) in der WLTP-Datenbank
- Bild 39: Emissionsmessungen mittels „remote sensing“ (RS)

Tabellen

- | | |
|--|---|
| <p>Tab. 1: Übersicht Kraftstoffarten in TREMOD nach Bezugsjahr</p> <p>Tab. 2: Größenklassen der LNF in TREMOD Leergewicht (kg)</p> <p>Tab. 3: Emissionsstufen der LNF in TREMOD</p> <p>Tab. 4: Straßenkategorien und Verkehrssituationen</p> <p>Tab. 5: Längsneigungskategorien in TREMOD</p> <p>Tab. 6: Zuordnung der Baujahre zu Emissionsstufen für LNF in TREMOD</p> <p>Tab. 7: Aufteilung der Inländer- und Inlandsfahrleistung für das Jahr 2002, in Mrd. km</p> <p>Tab. 8: Inlandsfahrleistung (Fahrleistungserhebung) und Straßenverkehrszählungen der LNF für das Jahr 2002, in Mrd. km</p> <p>Tab. 9: Inlandsfahrleistung der LNF nach Straßenkategorien im Jahr 2002 in TREMOD, in Mrd. km</p> <p>Tab. 10: Fahrleistungsrelation der LNF-Segmente im Jahr 2010</p> <p>Tab. 11: Durch HBEFA abgedeckte Komponenten</p> <p>Tab. 12: Anteile der Verkehrssituationen an der Gesamtfahrleistung von LNF in HBEFA</p> <p>Tab. 13: Meistverwendete LNF in Deutschland</p> <p>Tab. 14: Klassifizierung der Berufsklassen zu Wirtschaftszweigen gemäß KBA</p> <p>Tab. 15: Quellen mit Informationen zu Fahrleistungen</p> <p>Tab. 16: Vorläufige Eckdaten der Fahrleistungserhebung 2014</p> <p>Tab. 17: Stichprobe mit gültiger Fahrleistungsinformation bei KiD 2010 nach Fahrzeugart und Halter</p> <p>Tab. 18: Angaben zum Tachostand bei LNF in KiD 2010</p> | <p>Tab. 19: Emissionsfaktoren LNF N1-III Diesel Euro 4 nach HBEFA 3.2 im warmen Zustand</p> <p>Tab. 20: Kennwerte ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (short-trips) in der WLTP-Datenbank</p> <p>Tab. 21: Kennwerte ausgewählter LNF- und Pkw-Fahrverhaltensdaten (Stopp-Phasen) in der WLTP-Datenbank</p> <p>Tab. 22: Übersicht der für HBEFA 3.2 verfügbaren LNF-Emissionsmessungen; Anzahl Messungen</p> <p>Tab. 23: Neu (nach Publikation von HBEFA 3.2) verfügbare LNF-Emissionsmessungen in 1-Hz-Auflösung (Rollenprüfstandsmessungen in fett, PEMS -Messungen in kursiv); Anzahl Messungen</p> <p>Tab. 24: Bedarf Emissionsmessungen LNF; Anzahl Messungen (Fahrzeuge)</p> |
|--|---|

Anhang

Anhang 1

Erläuterungen zur Klassierung der leichten Motorwagen

Klassierung der leichten Motorwagen gemäß FAV 1 (vor 1996)¹

Gruppe I

- a) Fahrzeuge zum Personentransport mit höchstens neun Sitzplätzen einschließlich Führer und einer Nutzlast von höchstens 760 kg;
- b) Fahrzeuge zum Sachentransport mit einer Nutzlast von höchstens 760 kg;
- c) Fahrzeuge nach den Buchstaben a und b, die sowohl zum Personen- und Sachentransport dienen.

Gruppe II

- a) Fahrzeuge zum Personentransport mit einer Nutzlast von mehr als 760 kg sowie diejenigen mit mehr als neun Sitzplätzen einschließlich Führer;
- b) Fahrzeuge zum Sachentransport mit einer Nutzlast von mehr als 760 kg;
- c) Fahrzeuge zum Personentransport mit höchstens neun Sitzplätzen einschließlich Führer und einer Nutzlast von höchstens 760 kg, die nachweisbar von einem Fahrzeug nach den Buchstaben a oder b abgeleitet sind;

Klassierung der Leichten Motorwagen gemäß TAFV 1 (ab Euro-2)²

Klasse M: Zur Personenbeförderung bestimmte Motorfahrzeuge mit mindestens vier Rädern:

- Klasse 1: Fahrzeuge mit höchstens neun Sitzplätzen einschließlich Führer;
- Klasse 2: Fahrzeuge mit mehr als neun Sitzplätzen einschließlich Führer und mit
- einem Garantiegewicht von höchstens 5 t;
- Klasse 3: Fahrzeuge mit mehr als neun Sitzplätzen einschließlich Führer und mit einem Garantiegewicht von über 5 t.

Klasse N: Zur Güterbeförderung bestimmte Motorfahrzeuge mit mindestens vier Rädern:

¹ Verordnung vom 22. Oktober 1986 über die Abgasemissionen Leichter Motorwagen, Art. 1.3..

² Verordnung vom 19. Juni 1995 über technische Anforderungen an Transportmotorwagen und deren Anhänger.

- Klasse 1: Fahrzeuge mit einem Garantiegewicht von höchstens 3,5 t;
- Klasse 2: Fahrzeuge mit einem Garantiegewicht von über 3,5 t bis höchstens 12 t;
- Klasse 3: Fahrzeuge mit einem Garantiegewicht von über 12 t.

Klasse O: Anhänger (einschließlich Sattelanhänger und Zentralachsanhänger)

Klassierung der LNF (M bzw. N1): gemäß Richtlinien 1994/12/EG (Euro-1/2) und 1998/68/EG (Euro-3)

Klasse «M»: LNF mit Zweck Personentransport und Gesamtgewicht $\leq 2.5t$ und Sitzplätze ≤ 6

Klasse «N1»: LNF mit Gesamtgewicht $> 2.5 t$ oder Sitzplätze > 6 . Diese werden weiter unterteilt nach 3 Leergewichtsklassen (definiert als Fahrzeug + voller Tank + 75 kg für den Fahrer):

- bei Euro-1/2: Leergewicht N1-I < 1250 kg, N1-II 1250–1700 kg, N1-III > 1700 kg
- ab Euro-3: Leergewicht N1-I < 1305 kg, N1-II 1305–1760 kg, N1-III > 1760 kg

Anhang 2

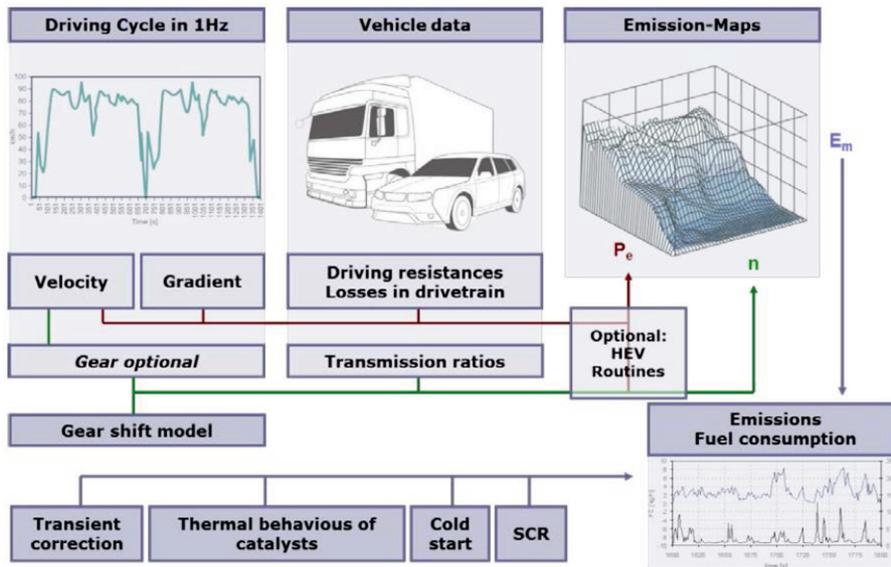
Erläuterungen zu den Verkehrssituationen: Verkehrszustände in HBEFA

- Flüssig: frei und stetig fließender Verkehr, Konstante, eher hohe Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsbandbreiten: 90 bis >130 km/h auf Autobahnen, 45-60 km/h auf Straßen mit Tempolimit von 50 km/h. Verkehrsqualität A-B gemäß HCM (US Highway Capacity Manual).
- Dicht: flüssiger Verkehrsfluss bei starkem Verkehrsvolumen, vergleichsweise konstante Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsbandbreiten: 70-90 km/h auf Autobahnen, 30-45 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufen C-D gemäß HCM (US Highway Capacity Manual).
- Gesättigt: unstetiger Verkehrsfluss mit starken Geschwindigkeitsschwankungen bei gesättigtem / gebundenem Verkehrsfluss, erzwungene Zwischenstopps möglich, Geschwindigkeitsbandbreiten: 30-70 km/h auf Autobahnen, 15-30 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufe E gemäß HCM (US Highway Capacity Manual).
- Stop+Go: starke Stauerscheinungen bis Verkehrszusammenbruch, Geschwindigkeitsschwankungen bei allgemeinen tiefer Geschwindigkeit. Geschwindigkeitsbandbreiten: 5-30 km/h auf Autobahnen, 5-15 km/h auf Strassen mit Tempolimit 50 km/h.

Anhang 3

Überblick über die Methodik von PHEM (Passenger car and Heavy Duty vehicle Emission Model der FVT, TU Graz):

Das folgende Bild gibt einen Überblick über die in PHEM für die Simulation von Emissionsfaktoren verwendete Methodik.



Für einen vorgegebenen Fahrzyklus („driving cycle“), definiert über sekundliche Angaben zur Fahrgeschwindigkeit und Längsneigung der Straße, berechnet PHEM die notwendige Motorleistung (ebenfalls in sekundlicher Auflösung), unter Berücksichtigung von Fahrwiderständen und Antriebsstrangverlusten. Die tatsächliche Motordrehzahl wird simuliert über die Getriebeübersetzung und ein Gangschaltungsmodell („gear shift model“), welches das Schaltverhalten des Fahrers simuliert. Das Emissionsniveau wird mit Hilfe von Motorenkennfeldern („emission map“) interpoliert. Übergangseffekte werden mit entsprechenden Korrekturfunktionen („transient correction“) ausgeglichen.

Für die Kalibrierung von PHEM sind Rollen- bzw. Motorenprüfstandsmessungen notwendig. Für HBEFA, Version 3.2. standen die Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessungen von insgesamt 80 leichten Nutzfahrzeugen, verteilt auf Benzin/Diesel-Fahrzeuge

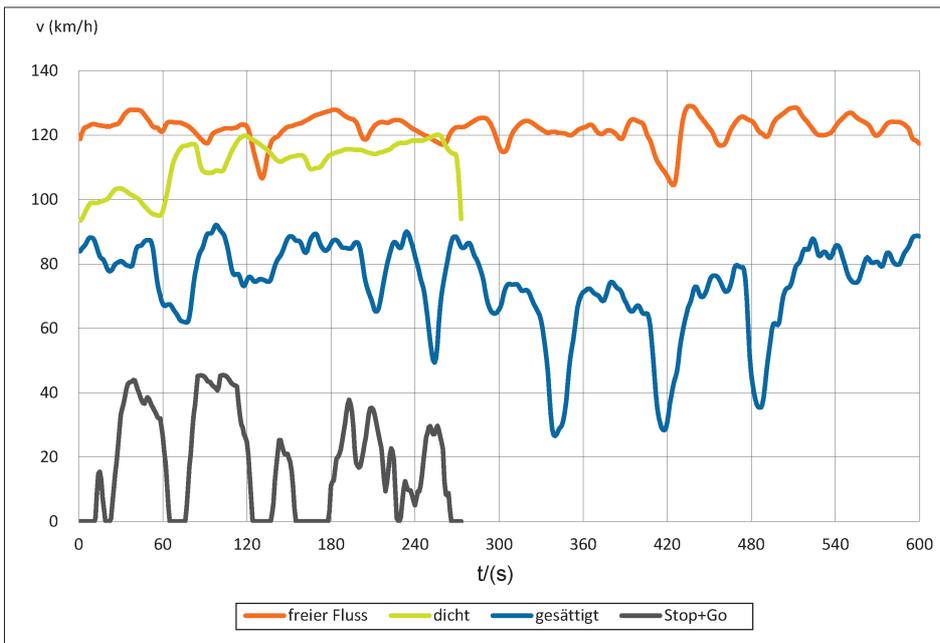
Emissionsmessungen an Lieferwagen aus verschiedenen nationalen Messprogrammen (für die Kalibration von PHEM)

Emissionsstandard	Benzin	Diesel
EURO 0	19	7
EURO 1	14	7
EURO 2	5	9
EURO 3	-	2
EURO 4	-	13
EURO 5	-	4
EURO 6b	-	
EURO 6c		
Total	38	42

Quelle INFRAS

Anhang 4

Parameter der Fahrzyklen für die Verkehrssituation „ländlich, Autobahn, 120 km/h“, nach Verkehrsqualitätsstufen (freier Fluss, dicht, gesättigt, Stop+Go)



	freier Fluss	dicht	gesättigt	Stop+Go
Dauer [s]	1577	273	654	269
Stopp-Dauer [s]	0	0	0	74
Distanz [m]	53457	8415	13516	1410
$v * a$ [m2/s2]	118.8	93.4	83.9	0.0
Minimalgeschw. [km/h]	104.5	93.4	26.6	0.0
Durchschnittsgeschw. [km/h]	122.0	111.0	74.4	18.9
Maximalgeschw. [km/h]	130.2	120.1	92.1	45.5
Standardabw. der Geschw. [km/h]	3.86	7.37	13.66	15.91
10%-Quantil der Geschw. [km/h]	117.2	98.9	58.9	0.0
90%-Quantil der Geschw. [km/h]	126.9	118.3	87.2	42.6
Minimalbeschleunig. [m/s2]	-0.52	-2.20	-2.55	-2.72
Maximalbeschleunig. [m/s2]	1.15	0.63	1.70	2.22
Durschnittl. positive Beschleunig. [m/s2]	0.20	0.24	0.41	0.84
10%-Quantil der Beschleunig. [m/s2]	-0.15	-0.14	-0.42	-1.00
90%-Quantil der Beschleunig. [m/s2]	0.14	0.18	0.50	1.07
Relative Positive Beschleunig. [m/s2]	0.03	0.04	0.13	0.23
Anzahl Stopps	0	0	0	7
Anzahl Stopps pro km	0.00	0.00	0.00	4.97
Stopp-Dauer-Anteil [%]	0%	0%	0%	28%

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2010

- F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50
- F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

2011

- F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50
- F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50
- F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen
Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50
- F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und IST-Architekturen im Straßenverkehr
Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00
- F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands
Eichinger € 15,00
- F 81: Potential aktiver Fahrwerke für die Fahrsicherheit von Motorrädern
Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50
- F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011
Lotz, Luks € 17,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

2012

- F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50
- F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00
- F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013

- F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50
- F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes
Gehring, Zander € 14,00
- F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50
- F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90
- F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik
Kroen € 17,00
- F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung
Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

2014

- F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren
Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50
- F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen
Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50
- F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung
Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50
- F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw
Schönemann, Henze € 15,50
- F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr
Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic
Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung
Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50
- F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires
Hofmann, Dülsen € 16,50

2015

- F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver
Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50
- F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit
Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen

Süßmann, Lienkamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eine Testverfahrens

Schreck, Seiniger

€ 14,50

F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung

Schmidt, Georges

€ 14,50

F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity

Schmidt, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalysatoren

Schmidt, Johannsen

€ 13,50

F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters

Schmidt, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen

Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl

€ 16,50

F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung

von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth,

Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking,

Kannenberg

€ 17,50

F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems

Schröder, Steickert, Walther, Ranftl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen

Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen,

Schulze, Schlag

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen

Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach,

Frey, Gail, Lotz-Keens

€ 17,50

F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks

Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe

Bergk, Heidt, Knörr, Keller

€ 15,50

F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen

Oehme, Berberich, Maier, Böhm

€ 17,50

F 115: Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit

Frey

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

F 116: Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt

Süßmann, Förg, Wenzelis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 117: 7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 118: Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen

Voß, Schwalm

€ 16,50

F 119: Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw

Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeiler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 120: Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen

Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 121: Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO₂-Emissionen von neuen Pkw

Pellmann, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie

Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de