

Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 113

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe

von

Fabian Bergk
Christoph Heidt
Wolfram Knörr

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
GmbH

Mario Keller

INFRAS AG
Bern

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 113

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 F1100.5110008:
Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe

Fachbetreuung
Conrad Piasecki

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

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 978-3-95606-237-7

Bergisch Gladbach, März 2016

Kurzfassung – Abstract

Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMOD“ (Transport Emission Model) bildet den motorisierten Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistungen, dem Energieverbrauch und den zugehörigen Luftschadstoffemissionen für den Zeitraum 1960 bis 2030 ab. TREMOD ist eng verknüpft mit dem als PC-Datenbank realisierten „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“, das europaweit abgestimmte repräsentative Emissionsdaten für den Straßenverkehr bereitstellt.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden aus heutiger Sicht relevante alternative Antriebe und Energieträger für den Straßenverkehr in das Emissionsrechenmodell „TREMOD“ implementiert. Dies soll es ermöglichen, Szenarien bis 2050 zu rechnen, um die Auswirkung der Einführung neuer Fahrzeugkonzepte auf den Energieverbrauch, die Klimagasemissionen und relevante Luftschadstoffemissionen abschätzen zu können.

Im vorliegenden Bericht werden die Eigenschaften der ausgewählten neuen Kraftstoffe und Antriebe, die verwendeten Kennzahlen sowie die Implementierung in das TREMOD-Modell ausführlich beschrieben. Schließlich wird beispielhaft ein Trendscenario unter Berücksichtigung von neuen Antrieben und Energieträgern bis 2050 entworfen und mit TREMOD berechnet.

Extension of the emission and calculation model TREMOD to future vehicle concepts and fuels

The availability of actual data of emissions and fuel consumption from the traffic sector is an essential basis for environmental reporting, the preparation of regulations and policy decisions. Due to the continuous development of environmental regulations, detailed information on the emissions of road users are increasingly required.

For this reason, the development of the emission calculation model TREMOD was initiated in the early 90's on behalf of the Federal Environment Agency in Germany, in order to query detailed information concerning emissions, fuel- and energy consumption for road-, rail-, air-, and waterway transport in Germany. The input database for the road traffic sector in TREMOD consists of real emission- and fuel consumption data of almost all current vehicle categories in terms of emission factors. The emission factors are collected within the Handbook of Emission Factors of road traffic (HBEFA), which is supplemented continuously by new vehicle concepts and technologies.

As a part of this project current alternative drive concepts and new energy sources were implemented into TREMOD in order to assess their impacts on the fuel- and energy consumption and the relevant emissions of road traffic in Germany within scenarios up to 2050. The features of the new concepts and technologies and their characteristic as well as the implementation of the related data base into TREMOD are described in detail within this report. Finally, an example of a trend scenario is carried out by means of modeling with TREMOD taking into account the newly introduced technologies

Inhalt

Abkürzungen	7	6 Fahrleistungen der Fahrzeugkonzepte	21
1 Vorbemerkung	9	6.1 Differenzierung der Fahrleistungen ...	21
2 Übersicht der Neuerungen Fahrzeuge/Energieträger	9	6.2 Ableitung der Fahrleistungen bis 2012	24
3 Modellierung in TREMOD	10	6.3 Fahrleistungen nach Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen ...	25
3.1 Fahrzeugbestand und Flottenzusammensetzung	12	6.4 Ableitung der Flottenzusammensetzung bis 2012	25
3.2 Gesamte Jahresfahrleistung	12	6.4.1 Pkw	26
3.3 Emissions- und Verbrauchsfaktoren ...	12	6.4.2 Übrige Fahrzeuge	27
4 Eigenschaften der Fahrzeugkonzepte	13	6.5 Ableitung der Flottenzusammensetzung unter Berücksichtigung der neuen Fahrzeugkonzepte	27
4.1 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ...	13	6.5.1 Pkw	27
4.1.1 Benzin-Fahrzeuge	13	6.5.2 Übrige Fahrzeuge	28
4.1.2 Flüssiggas-Fahrzeuge (LPG)	13	6.6 Fahrleistungsanteile nach Energieträger	28
4.1.3 Diesel-Fahrzeuge	14	6.6.1 Pkw und LNF	28
4.1.4 CNG-Fahrzeuge	14	6.6.2 Übrige Fahrzeuge	28
4.1.5 LNG-Fahrzeuge	15	7 Basisverbrauchs-faktoren und Effizienzentwicklung	29
4.2 Fahrzeuge mit Elektromotor	15	7.1 Entwicklung bis 2012	29
4.2.1 Batterieelektrische Fahrzeuge	16	7.1.1 Pkw	29
4.2.2 Fahrzeuge mit Brennstoffzelle	16	7.1.2 Leichte Nutzfahrzeuge	33
4.3 Hybrid-Konzepte	17	7.1.3 Schwere Nutzfahrzeuge	33
4.3.1 Voll-Hybride-Fahrzeugkonzepte (HEV)	17	7.2 Annahmen im Szenario bis 2050	36
4.3.2 Plug-in-Hybride-Fahrzeugkonzepte (PHEV)	17	7.2.1 Pkw	36
4.3.3 Range-Extender-Hybride-Fahrzeugkonzepte (REEV)	18	7.2.2 Leichte Nutzfahrzeuge	37
4.3.4 Fahrzeuge mit Oberleitung	18	7.2.3 Schwere Nutzfahrzeuge	37
5 Größeneinteilung der Fahrzeugkonzepte	18	8 Übrige Emissionsfaktoren	37
5.1 Neue Segmentierung Pkw	18	9 Bereitstellungspfade und Eigenschaften der Energieträger ...	38
5.1.1 Vorgehensweisen in anderen Studien	19	9.1 Eigenschaften der Endenergieträger ...	38
5.1.2 Zuordnung der Kaufsegmente des KBA in TREMOD	20	9.1.1 Fossile Endenergieträger	38
		9.1.2 Biogene Endenergieträger	39

9.1.3	Strombasierte Endenergieträger	39
9.1.4	Definition der Energieträger- eigenschaften in TREMOD.	40
9.2	Emissionen der Bereitstellung	40
9.3	Eigenschaften der Energieträger- aggregate	41
9.3.1	Benzinäquivalente Kraftstoffe (BEQ).	41
9.3.2	Dieseläquivalente Kraftstoffe (DEQ)	41
9.3.3	Methanbasierte Kraftstoffe (CMG)	41
9.3.4	Verflüssigte methanbasierte Kraftstoffe (LMG)	42
10	Szenario bis 2050	42
10.1	Szenariodesign.	42
10.2	Annahmen zur Verkehrsleistungs- entwicklung.	42
10.3	Annahmen zur Flotten- zusammensetzung	43
10.4	Ergebnisse	45
11	Weiterentwicklung Handbuch Emissionsfaktoren	46
11.1	Aktueller Erkenntnisstand neue Version HBEFA 3.2.	46
11.2	Alternative Konzepte in HBEFA 3.2	47
11.2.1	Indikative Emissionsfaktoren	47
11.2.2	Anpassung der Datenstrukturen.	48
11.3	Geplante Weiterentwicklung.	48
12	Literatur	49

Abkürzungen

AO	Außerorts	NMHC	Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe
BEQ	Benzinäquivalente Kraftstoffe	NPE	Nationale Entwicklungsplattform Elektromobilität
BEV	Battery Electric Vehicle		
BtL	Biomass-to-Liquid	PHEV	Plug-in Hybrid Vehicle
CD	Charge Depleting	PISI	Port Injection Spark Ignition
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	PSM	Permanenterregte Synchronmaschinen
CMG	Compressed Methan Gas	PtG	Power-to-Gas
CNG	Compressed Natural Gas	PtL	Power-to-Liquid
CS	Charge Sustaining	Rbus	Reisebus
DEQ	Dieseläquivalente Kraftstoffe	RED	Renewable Energy Directive
DISI	Direkteinspritzer-Verbrennungsmotor	REEV	Range-extended Electric Vehicle
EE	Erneuerbare Energien	SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
E-Kfz	Elektro-Kraftfahrzeuge	SNG	Synthetic Natural Gas
E-Motor	Elektromotor	SVZ	Straßenverkehrszählungen
ETA	Energieträgeraggregate	SZ	Sattelzug
FAME	Fettsäuremethylester	THG	Treibhausgase
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	TREMOD	Transport Emission Model
FT-Synthese	Fischer-Tropsch-Synthese	UeKfz	Übrige Kraftfahrzeuge
FzKat	Fahrzeugkategorien		
GKG	Größenklassengruppe		
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr		
HC	Kohlenwasserstoffe		
HEV	Hybrid Electric Vehicle		
HO-Lkw	Hybridoberleitung Lkw		
ICE	Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine)		
IO	Innerorts		
KKR	Kleinkrafträder		
KR	Krafträder		
Lbus	Linienbus		
LMG	Liquified Methan Gas		
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge		
LNG	Liquified Natural Gas		
LPG	Liquified Petroleum Gas		
LZ	Lastzug		
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus		

1 Vorbemerkung

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMODO“ (Transport Emission Model) bildet den motorisierten Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistungen, dem Energieverbrauch und den zugehörigen Luftschadstoffemissionen für den Zeitraum 1960 bis 2030 ab. TREMOD wird vom Umweltbundesamt, der Bundesanstalt für Straßenwesen und von verschiedenen Bundesministerien für die Umweltberichterstattung, für die Vorbereitung von Gesetzesvorlagen und politischen Entscheidungen verwendet. TREMOD ist eng verknüpft mit dem als PC-Datenbank realisierten „Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr“ (HBEFA), welches die komplexe Datenbasis der Emissionsmessungen aufbereitet [INFRAS, 2014]).

Das HBEFA wurde zunächst von den Ländern Deutschland und Schweiz getragen, gefolgt von Österreich und den Niederlanden. Mittlerweile sind zahlreiche europäische Länder hinzugekommen und die Datenbasis beruht auf europaweiten Messungen und Untersuchungen, z. B. auf dem ARTEMIS-Projekt [ARTEMIS, n. d.]. Seit 2009 ist das HBEFA eingebunden in die Aktivitäten der europäischen ERMES-Gruppe.¹

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden alternative Antriebe und Kraftstoffe für den Straßenverkehr in das Emissionsrechenmodell „TREMODO“ implementiert. Dies soll es ermöglichen, Szenarien bis 2050 zu rechnen, um die Auswirkung der Einführung neuer Fahrzeugkonzepte auf den Energieverbrauch, die Klimagasemissionen und relevante Luftschadstoffemissionen abschätzen zu können. Dabei wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Erweiterung der Fahrzeugschichten um alternative Antriebe,
- Erweiterung der Kraftstoffarten um alternative Kraftstoffe und deren Mischungen,
- Erweiterung der Fahrzeugbestandsdaten um Fahrzeugbestände mit alternativen Antrieben bzw. mit alternativen Kraftstoffen,
- Abschätzung der zukünftigen Entwicklung alternativer Antriebe und Kraftstoffe und Implementierung in TREMOD,

- Ermittlung der jährlichen Fahrleistung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben,
- Ermittlung/Abschätzung der Menge der getankten/genutzten alternativen Kraftstoffe/Energieformen,
- Ableitung der Emissionsfaktoren der direkten Emissionen von mit alternativen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen aus nationalen und internationalen Messungen und Untersuchungen bzw. als Abschätzung,
- Ermittlung der Emissionen der Vorketten zur Herstellung und Bereitstellung alternativer Kraftstoffe bzw. Energieformen und Ableitung der Emissionsfaktoren der indirekten Emissionen aus nationalen und internationalen Messungen und Untersuchungen bzw. als Abschätzung,
- Bereitstellung von Platzhaltern für Emissionsfaktoren alternativer Kraftstoffe der nächsten Generationen.

Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung mit der parallel betriebenen Weiterentwicklung des Handbuchs für Emissionsfaktoren durchgeführt. Damit ist gewährleistet, dass die Datenbasis beider Programme weiterhin eng aufeinander abgestimmt ist.

TREMODO enthält für die neuen Fahrzeugkonzepte z. T. vorläufige Daten, die von IFEU abgeschätzt wurden, aber noch nicht im größeren Rahmen, z. B. in der ERMES-Gruppe, abgestimmt und im Rahmen der HBEFA-Methodik entwickelt wurden. Dies ist weiteren Arbeiten vorbehalten.

Der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Ergebnisse der bisher erarbeiteten Punkte zusammen.

2 Übersicht der Neuerungen Fahrzeuge/Energieträger

Die Definition der grundlegenden technischen Eigenschaften alternativer Fahrzeugkonzepte und die Implementierung dieser in das Modell stehen im Fokus dieses Vorhabens. Der Einsatz alternativer Fahrzeugkonzepte bedingt zudem

- eine Änderung der Kriterien zur Einteilung der Größenklassen und
- die Verwendung alternativer Energieträger.

¹ <http://www.ermes-group.eu/web/>

Antriebstechnologie	Pkw	LNF	SNF	Lbus	Rbus	KR	KKR
ICE-Konzepte							
Benzin							
Diesel							
CNG							
CNG/Benzin (Bifuel)							
LNG							
LNG/Diesel (Dual-Fuel)							
LPG							
ICE/E-Motor-Hybrid-Konzepte							
Hybrid Benzin(-elektr.)							
Hybrid CNG(-elektr.)							
Hybrid Diesel(-elektr.)							
PHEV Benzin (-elektr.)							
PHEV CNG(-elektr.)							
PHEV Diesel(-elektr.)							
REEV Benzin(-elektr.)							
REEV Diesel(-elektr.)							
REEV CNG(-elektr.)							
Hybridüberleitung (HO) Diesel/elektr.							
E-Motor-Konzepte							
Batterie(-elektr.) (BEV)							
H ₂ -Brennstoffzelle (FCEV)							

Tab. 1: In TREMOD vorhandene (grüne Felder) und neu implementierte Antriebskonzepte (blaue Felder)

Durch die Verwendung alternativer Antriebe erhöht sich die Anzahl der in Fahrzeugen eingesetzten Energieträger, zudem vervielfältigen sich die Herkunfts- und Mischoptionen dieser. Um die Pfade vom Energieträger zur Verwendung im Fahrzeug darstellen zu können, wird die Ebene der Energieträgeraggregate (ETA) eingeführt. Diese sind gegenüber dem Fahrzeugkonzept über die relevanten physikalischen Kraftstoffeigenschaften definiert und können aus verschiedenen Endenergieträgern gemischt sein. In TREMOD wird in der aktuellen Version zwischen den in Tabelle 2 dargestellten ETA unterschieden, für die jahresfein ein beliebiger Mix an den infrage kommenden Endenergieträgern definiert werden kann.

Die aktuell im Modell berücksichtigten Bereitstellungsketten sind in Bild 1 zusammengefasst. Strom

Energieträgeraggregat	Pkw	LNF	SNF	Lbus	Rbus	KR	KKR
Benzinäquivalente Kraftstoffe (BEQ)							
Liquified Petroleum Gas (LPG)							
Dieseläquivalente Kraftstoffe (DEQ)							
Methanbasierte Kraftstoffe (Compressed Methan Gas = CMG)							
verflüssigte methanbasierte Kraftstoffe (Liquified Methan Gas= LMG)							
Strom							
Wasserstoff (H ₂)							

Tab. 2: In TREMOD vorhandene (grüne Felder) und neu implementierte (blaue Felder) Energieträgeraggregate nach Fahrzeugkategorie

und Wasserstoff haben in diesem Schema eine Sonderrolle, da sie neben der direkten Verwendung im Fahrzeug zugleich Ursprungsenergieträger für weitere Endenergieträger im Verkehr darstellen.

Eine ausführliche Beschreibung der Bereitstellungspfade erfolgt in Kapitel 9.

3 Modellierung in TREMOD

In TREMOD werden die Emissionen des Straßenverkehrs für jedes Bezugsjahr in folgenden Teilschritten berechnet:

- Aufbereitung des Fahrzeugbestands und dessen Fahrleistungsverteilung nach verbrauchs- und emissionsrelevanten Fahrzeugschichten und Fahrzeugalter für jede Fahrzeugkategorie.
- Aufteilung der Jahresfahrleistung auf die Straßenkategorien und Verkehrssituationen je Fahrzeugkategorie.
- Aufbereitung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für jede relevante Fahrzeugschicht und Verkehrssituation.

Für die Berechnung von TREMOD-Ergebnissen werden weitere Datensätze verwendet:

- Emissionsfaktoren für die Bereitstellung der Energieträger zur Berechnung der Well-to-Wheel-Emissionen,

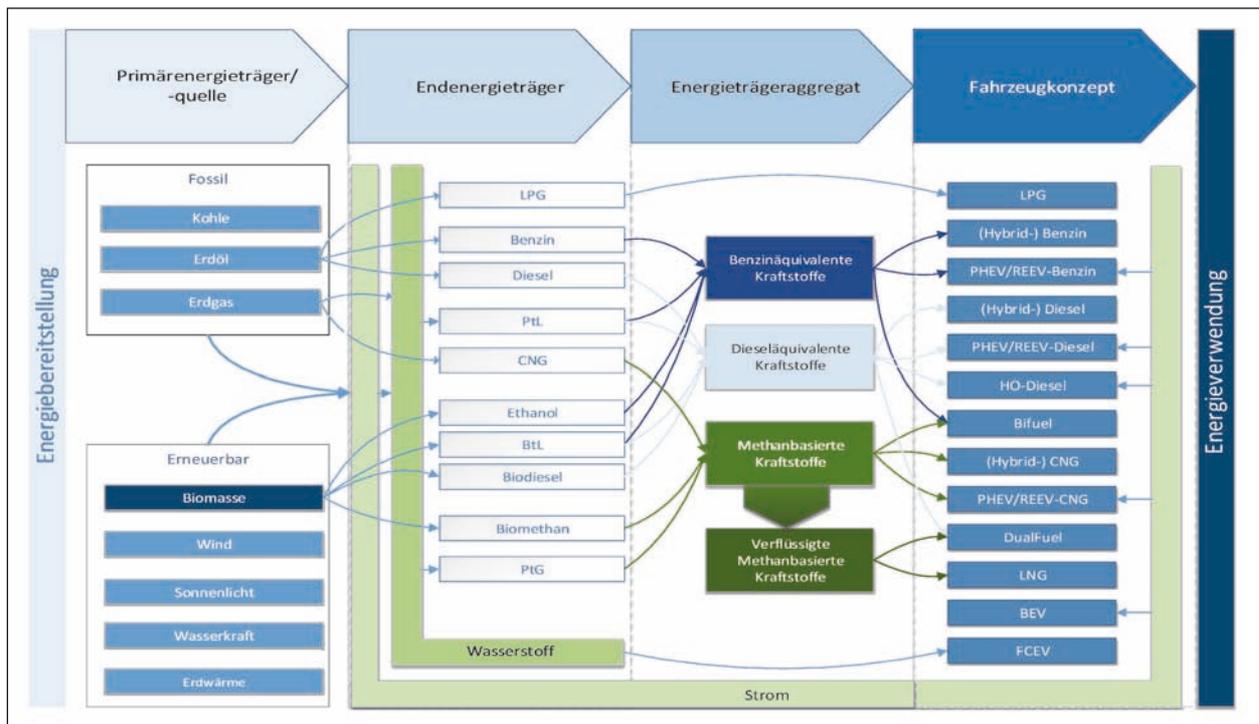


Bild 1: Berücksichtigte Energieträger und Fahrzeugtechnologien von der Energiebereitstellung bis zur Energieverwendung

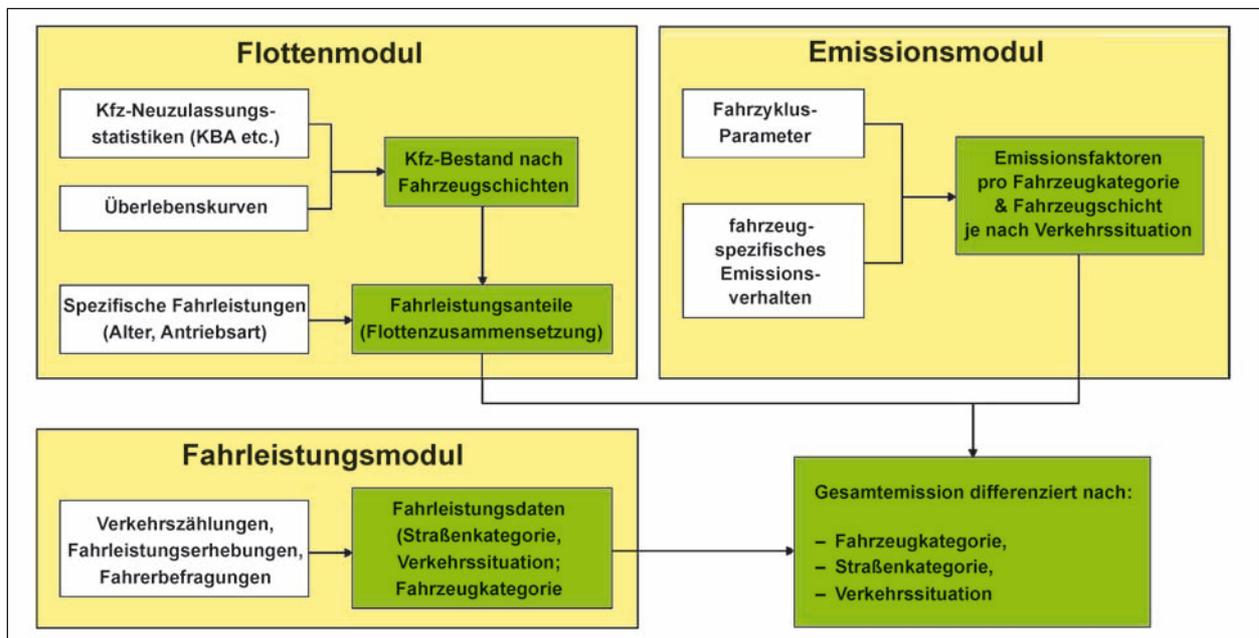


Bild 2: Berechnungsablauf Straßenverkehr in TREMOD

- Energiebilanz zum Abgleich der mit TREMOD berechneten Ergebnisse für den Inlandsverkehr, die mit der Energiebilanz abgestimmten Ergebnisse werden z. B. für den Nationalen Inventarbericht benötigt. In dieser Studie werden nur Inlandsergebnisse dargestellt.

Abschließend werden die Teilergebnisse verknüpft und der jährliche Energieverbrauch und die Emis-

sionen für den Straßenverkehr insgesamt sowie für alle gewünschten Aufteilungen und Aggregationen berechnet.

Bild 2 gibt einen Überblick über den Ablauf der Berechnung. Nachfolgend sind die wichtigsten Zwischenschritte sowie die zur Berechnung benötigten Eingangsdaten näher erläutert.

3.1 Fahrzeugbestand und Flottenzusammensetzung

Bei der Aufbereitung des Fahrzeugbestands wird zwischen zwei Modi unterschieden:

- **Realdaten:** Der statistisch erfasste Fahrzeugbestand wird direkt aus einer vom KBA bereitgestellten Datenbank in die TREMOD-Struktur überführt.
- **Szenarien:** Für die Szenarienrechnung wird der zukünftige Fahrzeugbestand in der TREMOD-Struktur auf Basis von Annahmen zur Anzahl der Neuzulassungen, jeweils unterteilt nach den relevanten Fahrzeugschichten, sowie geeigneten Überlebenskurven in einem Umschichtungsmodell berechnet.

Für die Szenarienrechnung werden folgende Informationen je Fahrzeugkategorie und Zulassungsjahr benötigt:

- Anzahl Neuzulassungen,
- Anteil der Fahrzeugsegmente (definiert durch die Antriebsart und Größenklasse) an den Neuzulassungen,
- Anteil der Emissionsstandards an den Neuzulassungen je Fahrzeugsegment,
- Überlebenskurve je Segment: Die Überlebenskurve gibt an, welcher Anteil der Neuzulassungen nach 1, 2, bis 30 Jahren noch im Bestand enthalten ist. Der Jahrgang 30 beinhaltet dabei auch alle älteren Fahrzeuge.

Für die TREMOD-Berechnung wird nicht der Absolutbestand verwendet, sondern die Bestandsverteilung nach Antrieb, Größenklasse, Emissionsstandard und Alter. Da für die Emissionen bzw. den Verbrauch nicht der Fahrzeugbestand, sondern dessen Fahrleistungen entscheidend sind, werden die differenzierten Bestandsanteile in Fahrleistungsanteile umgerechnet. Dabei werden verschiedene Gewichtungsfaktoren und -funktionen verwendet. Diese berücksichtigen, dass Fahrzeuge verschiedener Antriebsart, Größe und Alter unterschiedliche Jahresfahrleistungen sowohl insgesamt als auch auf verschiedenen Straßenkategorien haben. Die resultierende Fahrleistungsverteilung wird als Flottenzusammensetzung bezeichnet.

Bei Fahrzeugkonzepten mit mehreren Antriebssträngen müssen die Fahrleistungsanteile nach An-

triebsenergie angegeben werden, z. B. – bei den PHEV-Konzepten – der Fahrleistungsanteil im Benzin- und im Elektrobetrieb. Die Angabe erfolgt differenziert nach Straßenkategorien.

3.2 Gesamte Jahresfahrleistung

Die gesamte Jahresfahrleistung wird je Fahrzeugkategorie und Bezugsjahr in TREMOD vorgegeben. Zur Verknüpfung mit den Fahrleistungsanteilen (siehe voriges Kapitel) und den Verbrauchs- und Emissionsfaktoren (siehe nachfolgendes Kapitel) wird die Gesamtfahrleistung weiter aufgeteilt auf Straßenkategorien (Innerorts, Außerorts, Autobahn) und innerhalb jeder Straßenkategorie auf Verkehrssituationen (z. B. freier Verkehr, Stop-and-go) sowie Längsneigungsklassen. Dieser Berechnungsteil verwendet demnach je Fahrzeugkategorie und Bezugsjahr

- die Gesamtfahrleistung,
- die Anteile der Straßenkategorien an der Gesamtfahrleistung,
- die Anteile der Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen an der Fahrleistung je Straßenkategorie.

Die Gesamtfahrleistung je Fahrzeugkategorie ist im Modell unabhängig vom Fahrzeugbestand. Die Plausibilität der sich aus der Gesamtfahrleistung und dem Bestand ergebenden mittleren Jahresfahrleistung je Fahrzeugkategorie muss im Nachgang geprüft und ggf. korrigiert werden. Eine exakte Anpassung des Fahrzeugbestands bzw. der mittleren Fahrleistung an eine gewünschte Vorgabe ist dabei nicht erforderlich, da die Emissionsergebnisse allein von der Höhe der Gesamtfahrleistung abhängen.

3.3 Emissions- und Verbrauchsfaktoren

Die Emissions- und Verbrauchsfaktoren werden vom Handbuch Emissionsfaktoren [HBEFA] geliefert. Sie sind differenziert nach:

Fahrzeugkategorien

Die Emissionsfaktoren differenzieren i. d. R. nach Antrieb, Größenklasse und Emissionsstandard; bei einigen Fahrzeugschichten und Komponenten

ist der Emissionsfaktor zusätzlich abhängig von der Laufleistung. Einige Komponenten, beispielsweise CO_2 und SO_2 , sind nicht vom Fahrzeugkonzept abhängig, sondern vom Kohlenstoff- und Schwefelgehalt im Kraftstoff. Andere Komponenten sind zwar vom Fahrzeugkonzept abhängig, werden aber mit Hilfe von Anteilsfaktoren, bezogen auf eine Leitkomponente, berechnet, z. B. alle Bestandteile der Kohlenwasserstoffe sowie NO_2 .

Der Energieverbrauch wird differenziert nach Antriebsart, Größenklasse und Fahrzeugalter. Dazu wird für jedes Fahrzeugsegment ein Referenzfahrzeug eines bestimmten Zulassungsjahrs festgelegt. Die zeitliche Entwicklung wird über prozentuale Effizienzkurven abgebildet, die in den Szenarienrechnungen variiert werden können.

Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen

Alle Verbrauchs- und Emissionsfaktoren liegen für die relevanten Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen vor. Aufgrund des hohen Rechenaufwands werden die Emissions- und Verbrauchsfaktoren bereits im HBEFA vor der Übernahme in TREMOD zu Werten je Straßenkategorie zusammengefasst.

Neben den kilometerabhängigen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren werden bei Pkw die zusätzlichen Emissionen durch Kaltstart und Verdunstung berücksichtigt.

4 Eigenschaften der Fahrzeugkonzepte

Die Fahrzeugkonzepte lassen sich unterteilen in Fahrzeuge mit

- reinem Verbrennungsmotor (ICE),
- Fahrzeuge mit reinem Elektromotor (E-Kfz),
- Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor (Hybride).

Zusätzlich lassen sich die Fahrzeugkonzepte über die verwendbaren Energieträger und den Grad der Elektrifizierung bei Hybridfahrzeugen unterscheiden.

4.1 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Verbrennungsmotoren nutzen als Basis chemische Energieträger, deren Energie über einen Wärmekraftprozess in Vortrieb und Energie für die Nebenverbraucher umgewandelt wird. Für Pkw-Antriebe haben sich die Bauformen Otto- und Dieselmotor durchgesetzt. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser beiden Antriebe ist die Art der Zündung. Bei Dieselmotoren entzündet sich das Treibstoff-Luft-Gemisch im Brennraum selbständig durch eine entsprechend hohe Verdichtung. Bei Ottomotoren wird das Gemisch extern gezündet, da die maximale Klopfestigkeit des Energieträgers eine entsprechende Verdichtung verhindert. Sie weisen im Allgemeinen einen niedrigeren Wirkungsgrad als Dieselmotoren auf [vgl. BRAESS 2011 et al. S.158].

4.1.1 Benzin-Fahrzeuge

Benziner sind mit einem ICE ausgestattet, der auf die Verbrennung von flüssigen Ottokraftstoffen ausgelegt ist. Sie sind bereits am Markt etabliert und weisen insbesondere bei kleinen Fahrzeugen einen hohen Marktanteil auf. Bei den Krafträdern sind Benziner das einzige Fahrzeugkonzept, das in relevanten Stückzahlen in der Fahrzeugflotte vorhanden ist. Die Vorteile gegenüber dem Diesel sind dabei ein günstigerer Anschaffungspreis, ein niedrigeres Motorengewicht und eine weniger aufwendige Abgasnachbehandlung.

Aktuelle Entwicklungen bei Benzinmotoren zur Effizienzsteigerung sind die Einführung von Direkteinspritzung und das Downsizing, d. h. eine Reduzierung des Hubraums sowie teilweise der Zylinderzahl, während gleichzeitig über eine Aufladung die Leistung des Motors konstant gehalten wird.

4.1.2 Flüssiggas-Fahrzeuge (LPG)

Motoren, die auf den Betrieb mit LPG ausgelegt sind, entsprechen im Wesentlichen Benzinern. Unterschiede zwischen den Fahrzeugkonzepten liegen in dem notwendigen Drucktank und der Verdampfung des Kraftstoffs vor der Verbrennung.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Konzepte lassen sich die aktuellen Entwicklungen der Benzinmotoren auf die LPG-Motoren mit geringem Aufwand übertragen, aufgrund der geringeren Stückzahlen werden

technische Neuerungen bei diesen Motoren jedoch meist deutlich später als bei den Benzinern eingeführt. Dabei führt die Auslegung des Motors auf LPG nicht dazu, dass Benzin nicht weiter verwendet werden kann bzw. es für einige Situationen zwangsweise benötigt wird (z. B. Kaltstart).

Die Drucktanks für LPG sind in den meisten Fahrzeugen zusätzlich zum Benzintank eingebaut. Daher muss das Mehrgewicht in der Verbrauchsberechnung mit berücksichtigt werden.

Eine Besonderheit ist, dass LPG-Fahrzeuge oft nachträglich umgerüstete Benzinern sind. Motivation sind dabei die aktuell niedrigeren Kraftstoffkosten. LPG-Fahrzeuge stellen heute ein Nischenprodukt im Pkw/LNF-Markt dar, von einer breiteren Ausweitung wird aufgrund der Begrenztheit des als Nebenprodukt anfallenden LPGs und der geringen Dichte des Tankstellennetzes in Deutschland nicht ausgegangen.

4.1.3 Diesel-Fahrzeuge

Dieselmotoren weisen einen gegenüber Ottomotoren höheren Wirkungsgrad und damit den höchsten Wirkungsgrad aller in Fahrzeugen eingesetzten ICE auf. Zudem kann über die hohe Energiedichte des flüssigen Dieselmotorkraftstoffes eine sehr hohe Reichweite der Fahrzeuge, auch bei hohen Leistungsanforderungen, realisiert werden. Standard in Straßenfahrzeugen sind dabei direkt einspritzende Motoren, die zusätzlich mittels Turbolader aufgeladen sind. Problematisch sind beim Diesel die Emissionen von Luftschadstoffen, insbesondere von Stickoxiden und Partikeln. Zur Einhaltung der aktuellen Emissionsstandards sind daher aufwendige Abgasnachbehandlungssysteme zu installieren, die teilweise den Verbrauch erhöhen bzw. das Zusetzen eines Additives verlangen. Insbesondere die Abgasnachbehandlungssysteme führen dabei zu deutlich höheren Kosten von Diesel- gegenüber Benzinfahrzeugen.

Bei den SNF stellen Diesel-Fahrzeuge das derzeitige Standardfahrzeugkonzept dar. Auch bei den Pkw und LNF wird eine hohe Marktdurchdringung erreicht.

4.1.4 CNG-Fahrzeuge

Ebenso wie bei LPG, entsprechen Motoren, die auf den Betrieb mit CNG ausgelegt sind, im Wesentlichen Benzinern. Unterschiede zwischen den Fahr-

zeugkonzepten liegen in dem notwendigen Drucktank und der Auslegung des Motors auf die Eigenschaften des Erdgases, insbesondere die höhere Klopfestigkeit. Aufgrund der Kraftstoffeigenschaften, insbesondere des hohen Methangehalts, können CNG-Fahrzeuge theoretisch günstigere Werte in den Treibhausgasemissionen und bei den Luftschadstoffen als Benzinfahrzeuge erreichen. Inwieweit diese Potenziale realisiert werden, hängt dabei unter anderem von der Auslegung des Fahrzeugs und dem Entwicklungsstand des Motors ab.

Dabei wird in der Fahrzeugauslegung zwischen monovalenten CNG-Fahrzeugen und bifuel bzw. bivalenten CNG-Fahrzeugen unterschieden.

Monovalente Fahrzeuge sind rein auf den Betrieb mit CNG ausgelegt, die Verwendung von Benzin ist nur als Notbetrieb vorgesehen und führt zu einem deutlichen Mehrverbrauch. Entsprechend ist nur ein kleiner Tank für Benzin vorgesehen. Aufgrund dieser Auslegung sollte der nahezu komplette Betrieb mit gasförmigen Ottokraftstoffen erfolgen. Dies führt zu entsprechenden Anforderungen an die Verfügbarkeit von Tankmöglichkeiten für CNG-Fahrzeuge, die heute im Vergleich mit Benzin oder Diesel noch sehr eingeschränkt sind.

Bifuel-Fahrzeuge sind auf den Betrieb mit Benzin und Erdgas gleichermaßen ausgelegt, sie stellen somit von der Motorauslegung einen Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Anforderungen der Kraftstoffe dar. Dadurch erhöht sich der Verbrauch im Betrieb mit Erdgas während der Benzinverbrauch im Betrieb mit Benzin gegenüber einem monovalent auf CNG ausgelegten Fahrzeug sinkt. Zudem sind bivalente Fahrzeuge mit einem größeren Benzintank als reine CNG-Fahrzeuge ausgestattet. Die Motivation hinter einer bivalenten Auslegung liegt dabei in der Verknüpfung der Eigenschaften der CNG-Fahrzeuge mit der Verfügbarkeit des Benzins. Da die Vorteile der CNG-Fahrzeuge durch diese Auslegung deutlich reduziert werden, werden Bifuel-Fahrzeuge als Nischentechnologie eingeschätzt und in den Szenarien nicht weiter betrachtet.

Ein weiteres Hindernis für die Ausschöpfung der Vorteile der CNG-Fahrzeuge ist, dass die CNG-Motoren, ähnlich wie bei LPG, aufgrund der geringeren Stückzahlen nicht im Fokus der Motorenentwicklung stehen, so dass technische Neuerungen bei diesen Motoren meist deutlich später als bei Benzinern eingeführt werden. Dies ist aber auch ein wesentlicher Grund, warum für das technische

Einsparpotenzial der heute bekannten Techniken, im wesentlichen Direkteinspritzung und Downsizing, beim CNG-Motor eine etwas höhere Effizienzsteigerung als bei den Benzinern angenommen wird (aufbauend auf [JEC, 2013]).

Ein generelles Problem bei der Verwendung von Erdgas in Fahrzeugen ist die geringe Energiedichte des Energieträgers, welche durch die Verwendung von Drucktanks zumindest teilweise kompensiert werden soll. Trotzdem sind die maximal mitgeführten Energiemengen und damit die erreichbaren Reichweiten des Fahrzeugkonzepts kleiner als bei Benzin oder Diesel-Fahrzeugen. Kritische Nutzungseinschränkungen ergeben sich dabei insbesondere bei Fernverkehrs-SNF. Zudem ist das Mehrgewicht durch die Drucktanks des CNG-Fahrzeugs deutlich größer als die Gewichtsminderung durch den verkleinerten Benzin- bzw. Dieseltank. Durch den Einsatz von kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) zur Herstellung der Tanks wird jedoch ein großer Potenzial gesehen, dieses Mehrgewicht zu reduzieren.

Sowohl monovalente als auch bivalente Pkw wie SNF wurden in 2013 nur gering nachgefragt und kommen zusammen auf weniger als 1 % der Neuzulassungen in ihrer Fahrzeugkategorie. Den höchsten Anteil an den Neuzulassungen mit 2 % erreichen CNG-Fahrzeuge aktuell bei Bussen [KBA, n. d.].

4.1.5 LNG-Fahrzeuge

LNG-Fahrzeuge sind ein Zukunftskonzept, dessen Einsatz bei SNF diskutiert wird. In diesem Fahrzeugtyp wird verflüssigtes Methangas bei Temperaturen um -160 °C in Kryoanlagen gespeichert und über einen ICE zum Antrieb verwendet. Der Vorteil von LNG gegenüber CNG ist die höhere Energiedichte und damit eine höhere maximale Reichweite, was insbesondere für Langstrecken-SNF von Bedeutung ist. LNG-Fahrzeuge werden in Europa aktuell zumeist als Prototypen oder in kleineren Testflotten eingesetzt. Technisch gibt es zwei Umsetzungen für die Verwendung von LNG in Kraftfahrzeugen:

- Reine LNG-Fahrzeuge sind wie CNG-Fahrzeuge mit einem Ottomotor aufgebaut. Dabei wird der verflüssigte Kraftstoff vor dem Einspritzen in den Brennraum verdampft und das Gas-Luftgemisch extern entzündet. Vorteile sind die ausschließliche Verwendung des alternativen Kraft-

stoffs und verminderte Schadstoffemissionen. Wesentlicher Nachteil ist die geringere Effizienz von Otto- gegenüber Dieselmotoren.

- Bei Dual-Fuel-Fahrzeugen wird das LNG zusammen mit so viel Diesel in den Brennraum gespritzt, so dass noch eine kontrollierte Selbstzündung erfolgen kann. Somit kann der hohe Wirkungsgrad der Dieselmotoren mit der zumindest teilweisen Verwendung von LNG kombiniert werden. Da der Dieselanteil am genutzten Kraftstoff erhöht werden kann, ist das Fahrzeug zudem auch bei einem wenig ausgebauten LNG-Tankstellennetz flexibel einsetzbar. Die Schadstoffemissionen von Dual-Fuel-Motoren sind dabei wesentlich problematischer als bei reinen Gasmotoren. Bei dem derzeitigen Entwicklungsstand von Dual-Fuel-Motoren gibt es aktuell keine Lösung, die die neuesten (Euro VI) Schadstoffnormen erfüllt.

Im Vergleich zu alternativen Diesel-SNF ist der LNG-Tank technisch aufwendiger und schwerer. Damit steigen die Kosten und verringert sich die Nutzlast des SNFs. Inwiefern sich diese Nachteile durch die Vorteile der Verwendung des alternativen Energieträgers aufwiegen, ist beispielsweise in [Ifeu-LBST-DLR, 2014] untersucht.

4.2 Fahrzeuge mit Elektromotor

Der Elektromotor besitzt gegenüber dem Verbrennungsmotor folgende Vorteile:

- höherer Wirkungsgrad,
- emissionsfreier und geräuscharmer Betrieb,
- Energierückspeisung beim Bremsen möglich,
- geringer Wartungsaufwand,
- gleichmäßige Drehmoment- und Kraftverläufe [HERING et al., 2012].

Den Vorteilen steht die Problematik entgegen, elektrischen Strom in mobilen Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Lösungsansätze sind dazu die Verwendung von Batterien, die „on-board“-Erzeugung von Strom mittels Brennstoffzelle aus einem chemischen Energieträger und die Anbindung an das elektrische Versorgungsnetz über Oberleitungen.

In heutigen Elektroautos kommen hauptsächlich permanenterregte Synchronmaschinen (PSM) zum Einsatz. Deren Vorteile sind, etwa zu den als

Hersteller/Modell	Fahrzeugklasse	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite NEFZ [km]	Verbrauch NEFZ [kWh/100 km]
Smart fortwo electric drive	Mini	17,6	145	15,1
Peugeot iOn	Mini	14,5	150	12,6
Mitsubishi i-MiEV	Mini	16	150	13,5
VW e-up!	Mini	18,7	160	11,7
Nissan Leaf	Klein	24	199	15,0
BMW i3	Klein	18,8	190	12,9
Renault Zoe	Klein	22	210	14,6
Ford Focus Electric	Kompakt	23	162	15,4
VW e-Golf	Kompakt	24,2	190	12,7
Tesla Modell S	Luxus	85	500	17,7

Tab. 3: Daten zu ausgewählten, auf dem deutschen Markt verfügbaren BEV, Quellen: [VCD, 2013, ADAC, 2014]

Traktionsmaschinen bei der Eisenbahn oft eingesetzten Drehstrom-Asynchronmaschinen, ein höherer Wirkungsgrad (über 95 % gegenüber ca. 87 % [KASPER, SCHÜNEMANN, 2012]), sowie die höchste Leistungsdichte aller Elektromotorbauformen [DOPPELBAUER, 2013]. Nachteilig bei PSM ist deren Bedarf an teuren und knappen seltenen Erden [BURKERT, 2013]

4.2.1 Batterieelektrische Fahrzeuge

Im Batteriefahrzeug (BEV) wird der für den Betrieb der Traktionsmotoren benötigte elektrische Strom in Batterien gespeichert. Wesentliche Vorteile sind der hohe Wirkungsgrad des Antriebskonzeptes und der einfache und nahezu wartungsfreie Systemaufbau, welcher im wesentlichen aus den Komponenten Energiespeicher, Elektromotor und Steuergeräten besteht [vgl. WALLENTOWITZ et al. 2010, S. 59].

Im Vergleich zu chemischen Energieträgern besitzen Batterien nur eine sehr geringe Energiedichte und sind im Verhältnis zur mitgeführten Energie sehr teuer. Wesentlich für den Erfolg von BEV werden daher die Fortschritte in der Batterietechnologie, sowohl die Kosten, als auch die Energiedichte betreffend, sein. Daneben ist die Minimierung des Energieverbrauchs, sowohl durch die Minderung der Fahrwiderstände als auch durch effizientere Nebenverbraucher für den Erfolg der BEV relevant.

Stand der Technik sind dabei Li-Ionen Batterien mit etwa 25 kWh Kapazität, mit denen Reichweiten von etwa 100 km im realen Fahrbetrieb erreicht werden. Teilweise sind jedoch auch Fahrzeuge mit deutlich höherer Batteriekapazität (und Reichweite), bei ent-

sprechenden Mehrkosten und -gewicht, verfügbar, siehe Tabelle 3.

Zum 1. Januar 2014 waren in Deutschland 12.000 BEV zugelassen. Der Anteil an der gesamten Fahrzeugflotte von über 43 Millionen Pkw liegt damit noch bei 0,03 % [KBA, n. d.]. Demzufolge sind nur wenige Daten zu serienreifen Elektrofahrzeugen in Bezug auf Energieverbräuche, Reichweiten und Batteriekenndaten verfügbar. Für TREMOD wird daher auf Arbeiten im Rahmen des Flottenversuchs Elektromobilität [IFEU, 2013a] zurückgegriffen.

4.2.2 Fahrzeuge mit Brennstoffzelle

Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) werden ebenso wie BEV rein von Elektromotoren angetrieben. Die Energie wird dabei in Form von Wasserstoff in Drucktanks gespeichert, und mittels einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt. Neben der Brennstoffzelle werden zudem Batterien oder hochkapazitive Kondensatoren (Supercaps) zur Überbrückung von kurzfristigen Spitzenlastanforderungen und zur Aufnahme von Rekuperationsenergie eingesetzt.

Gegenüber einem reinen Batteriefahrzeug ergeben sich dadurch die Vorteile der deutlich höheren Energiedichte des komprimierten Wasserstoffs im Vergleich zur Li-Ionen-Batterie und des schnellen Tankvorgangs. Dadurch eignet sich das FCEV auch für Fahrzeugkategorien mit hohen Energieanforderungen wie SNF und Busse. Nachteilig sind der Effizienzverlust durch den zusätzlichen Umwandschritt der Energie, der komplexere Systemaufbau und die bisher nicht verfügbare Wasserstoff-Infrastruktur.

FCEV sind bisher nur als Prototypen vorhanden, bzw. werden bei Bussen in kleinen Stückzahlen im realen Betrieb eingesetzt. Demzufolge sind nur wenige Daten zu serienreifen Brennstoffzellenfahrzeugen vorhanden. Wesentlich für eine erfolgreiche Marktdurchdringung werden der Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur und die Preisentwicklung der Brennstoffzelle, insbesondere im Vergleich zu den Batteriekosten, sein.

4.3 Hybrid-Konzepte

Die Idee hinter Elektro-Hybriden ist die Vorteile von Verbrennungsmotorkonzepten und Konzepten mit Elektromotor zu verbinden. Hybridkonzepte im Pkw werden zudem als schrittweise Strategie hin zum reinen Elektrofahrzeug verstanden.

Ein Hybridfahrzeug besitzt per Definition mindestens zwei Energiespeicher und zwei Energiewandler. Dabei sind die Energiewandler der Verbrennungsmotor und der Elektromotor und die Energiespeicher der Tank und die Batterie. Unterschiede zwischen den Hybridkonzepten liegen dabei insbesondere in

- der Motorauslegung, insbes. dem Verhältnis der Leistung zwischen Verbrennungs- und E-Motor,
- der Anordnung der Antriebskomponenten,
- der rein elektrisch fahrbaren Reichweite (falls möglich) und
- der Möglichkeit extern elektrischen Strom zuzuführen.

Hybrid-Konzepte bauen damit jeweils auf einem Verbrennungsmotor-Konzept auf. Dabei werden derzeit Konzepte mit

- Benzin-,
- Diesel- und
- CNG-Motoren

verkauft bzw. diskutiert.

Am verbreitetsten sind dabei zurzeit Benzin-Hybride, aber auch Diesel-Hybride sind in kleinen Stückzahlen im Markt. Hybride mit CNG-Motoren existieren bisher nur als Studie (z. B. Toyota Camry CNG Hybrid-Concept²), da gasförmigen Ottokraftstoffe zukünftig an Bedeutung gewinnen könnten, werden CNG-Hybride für die Szenarienrechnung in das Modell implementiert.

Neben den unten diskutierten Hybrid-Konzepten werden auch Konzepte mit geringeren Elektrifizierungsgrad angeboten. Dieses sind:

- Mikro-Hybrid: Kein Hybrid im eigentlichen Sinne, da der Elektromotor nur zum Starten des Verbrennungsmotors (Start-Stopp-Automatik) und zur Rekuperation (Laden der Starterbatterie) eingesetzt wird.
- Mild-Hybrid: Entspricht konzeptionell dem Voll-Hybriden (siehe Kapitel 4.3.1), jedoch mit deutlich reduzierter Motorleistung und Batteriekapazität, so dass ein rein elektrischer Betrieb nicht (oder nur sehr eingeschränkt) möglich ist.

Mikro- und Mild-Hybride werden in TREMOD nicht als eigenständige Fahrzeugkonzepte, sondern als Effizienztechnologien für Verbrennungsmotorkonzepte betrachtet.

4.3.1 Voll-Hybride-Fahrzeugkonzepte (HEV)

Voll-Hybride-Fahrzeugkonzepte (HEV) zielen darauf ab, die Nachteile des Verbrennungsmotors im Teillastbetrieb zu kompensieren, der Verbrennungsmotor hat dabei eine deutlich höhere Spitzenleistung als der E-Motor. Beide Motoren sind mechanisch über das Getriebe mit den Rädern verbunden (Parallel-Hybrid), es ist dabei nicht vorgesehen, größere Strecken rein elektrisch zu fahren. Wesentliches Differenzierungsmerkmal zu den Hybridvarianten mit höheren Elektrifizierungsgrad (PHEV, REEV) ist, dass keine Möglichkeit besteht, externen Strom zu laden. HEV sind zurzeit die meistverkauften Hybride, prominentester Vertreter beim Pkw ist der Toyota Prius.

4.3.2 Plug-in-Hybride-Fahrzeugkonzepte (PHEV)

Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) können mit elektrischem Strom aus dem Netz betankt werden und erlauben eine gewisse Strecke im rein elektrischen Betrieb zurück zu legen. Dies wird neben einem leistungsfähigeren E-Motor insbesondere durch eine Batterie mit höherer Kapazität gegenüber den HEV erreicht. Ebenso wie HEV sind PHEV zumeist als Parallel-Hybride ausgelegt, ein eindeutiges Identifizierungsmerkmal ist dies jedoch nicht.

² <http://www.caranddriver.com/news/toyota-camry-cng-hybrid-concept-auto-shows> (abgerufen am 29.7.2014)

Die große Batterie und der komplexe Systemaufbau führen zu einem Mehrgewicht, dass die Effizienzvorteile durch die Kombination der Motorentypen teilweise kompensieren. Der Hauptvorteil der PHEV liegt daher in der Nutzung des rein elektrischen Betriebs.

Ein beispielhaftes heutiges PHEV im Pkw-Bereich ist der Toyota Prius HPV mit 25 km rein elektrischer Reichweite (Herstellerangabe).³ PHEV sind derzeit nur in sehr geringen Mengen in der deutschen Flotte zugelassen.

4.3.3 Range-Extender-Hybride-Fahrzeugkonzepte (REEV)

Range-Extender-elektrische-Fahrzeuge (REEV) lassen sich nicht durch ein eindeutiges Merkmal von den PHEV abgrenzen. Wesentlich für die Unterscheidung ist die deutlich höhere elektrische Reichweite als ein typisches PHEV. Das Fahrzeugkonzept sieht dabei die Verwendung des Verbrennungsmotors lediglich in Ausnahmefällen vor. Dies wird in TREMOD durch eine deutliche Erhöhung des elektrischen Fahranteils an der gesamten Fahrleistung der Fahrzeuge berücksichtigt. REEV werden nur bei Pkw und bei LNF in TREMOD berücksichtigt, ein Beispiel für ein aktuelles REEV ist der BMW i3 REX.

Im Gegensatz zu HEV und PHEV sind die derzeit am Markt erhältlichen REEV als Seriellhybride ausgelegt (auch wenn dieses kein eindeutiges Abgrenzungsmerkmal ist). Bei Seriellhybriden wird auf eine direkte mechanische Verbindung des Verbrennungsmotors mit den Rädern verzichtet. Stattdessen treibt dieser einen Generator zum Laden der Batterie an, der Antrieb des Fahrzeugs wird nur über den Elektromotor realisiert.

In der KBA Statistik werden REEV als Teilmenge der PHEV behandelt, so dass keine genaue Aussage zu den Zulassungen von REEV getroffen werden kann.

4.3.4 Fahrzeuge mit Oberleitung

Die Nutzung von Oberleitungssystemen zur direkten Versorgung von Fahrzeugen mit hohem Ener-

giebedarf, ohne die Notwendigkeit von Batterien, ist eine im Stadtverkehr bei Bussen erprobte Technologie und wird beispielsweise in Solingen seit den 1950er Jahren eingesetzt.

Diese Technologie könnte auf SNF im Fernverkehr übertragen werden. Im Fokus steht dabei die Autobahnfahrleistung von schweren Fernverkehrs-Nutzfahrzeugen, insbesondere Sattelzügen. Dazu sind infrastrukturseitig Oberleitungen, zumindest auf besonders stark von der Nutzergruppe frequentierten Autobahnabschnitten, und fahrzeugseitig Pantographen zu installieren.

Die Fahrzeuge sollen dabei, entsprechend der aktuellen Diskussion in ENUBA bzw. der MKS, als Diesel/elektrische Hybrid-Oberleitungsfahrzeuge (HO-Lkw) ausgeführt werden. Theoretisch ist auch die Kombination von Oberleitungsfahrzeugen mit Batterieversorgung für die nicht-elektrifizierten Strecken denkbar. Diese werden in [DELFT, 2013a] untersucht, aufgrund der Unsicherheit der generellen Einführung eines Oberleitungssystems auf Autobahnen wird jedoch auf eine weitere Differenzierung der Fahrzeugkonzepte in diesem Teilbereich verzichtet. HO-Lkw befinden sich momentan in der Entwicklungs- bzw. Forschungsphase, demzufolge sind nur Abschätzungen zu den technischen Eigenschaften, den Betriebsanteilen und Verbräuchen der Fahrzeuge vorhanden.

5 Größeneinteilung der Fahrzeugkonzepte

Jede Fahrzeugkategorie wird in TREMOD weiter unterteilt nach Größenklassen. Kriterien für die Aufteilung waren anfangs gesetzliche Bestimmungen. So war die Abgasgesetzgebung für Pkw früher an den Hubraumklassen orientiert; bei den leichten Nutzfahrzeugen sind es die Leergewichtsklassen. Bei den schweren Nutzfahrzeugen und Bussen wurde eine Aufteilung der Größenklassen nach zulässigem Gesamtgewicht festgelegt.

5.1 Neue Segmentierung Pkw

Die in TREMOD bisher verwendete Untergliederung der Pkw in Hubraumklassen ist nicht mehr sachgerecht, da die Hubraumklassen, anders als in der Vergangenheit, kein Kriterium in der aktuellen Abgasgesetzgebung mehr sind. Hinzu kommt, dass

³ <http://www.toyota.de/automobile/prius-plugin/> (abgerufen am 9.7.2014)

bei neuen Fahrzeugkonzepten (Hybrid, Plug-in-Hybrid, Elektrofahrzeug) der Verbrennungsmotor nur einen Teil des Antriebs übernimmt oder gar nicht mehr vorkommt, so dass das Merkmal „Größenklasse“ nicht mehr über den Hubraum abgebildet werden kann.

Ein Merkmal für die Größenklasse wird jedoch weiterhin, vor allem für die Abbildung des Kraftstoffverbrauchs, in TREMOD benötigt. Wie bereits in anderen Arbeiten geschehen, bietet sich als Alternative das Merkmal „Kaufsegmente“ zur Charakterisierung an. Hierdurch können die Pkw-Größenklassen in TREMOD besser repräsentiert und mit anderen Studien verglichen werden. Die neue Segmentzuordnung bewirkt lediglich eine Verschiebung und keine Änderung des Gesamtergebnisses für die Fahr- und Verkehrsleistungen, den Energieverbrauch und die Emissionen der Pkw in TREMOD.

Folgende Schritte wurden für die neue Segmentzuordnung vorgenommen:

- Vergleich der Segmentzuordnung anderer Studien mit potenziellen Synergien zu TREMOD,
- Zuordnung der Kaufsegmente des KBA zu TREMOD-Segmenten.

Die Zuordnung der Segmente wurde in TREMOD ab dem Jahr 2006 geändert. Eine vollständige rückwirkende Anpassung der Zeitreihe erwies sich als nicht praktikabel, da Fahrzeuge mit Baujahr vor 1990 nicht nach dem Kriterium Kaufsegment differenziert werden können. Für die Zeitreihe ab 2006 waren damit folgende Anpassungen notwendig:

- Anpassung der Pkw-Bestände und Neuzulassungen,
- Anpassung der Fahrleistungsgewichtung,
- Anpassung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs.

Die Anpassungen sind ausführlich im Bericht [IFEU, 2014] beschrieben.

5.1.1 Vorgehensweise in anderen Studien

Die Einteilung der Pkw in Größenklassen anhand von Kaufsegmenten wurde bereits in verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten angewendet. Neben einer Beschreibung

von technischen Parametern, sowie den spezifischen CO₂-Emissionen, werden die Segmente unter anderem auch für die Abbildung von Nutzungsprofilen und für Kostenanalysen genutzt. Solche Kriterien gewinnen insbesondere für Szenarienbetrachtungen mit dem Fokus auf alternative Antriebskonzepte zunehmend an Bedeutung. Eine Anlehnung der Fahrzeuggrößendifferenzierung in TREMOD an die Segmentstruktur ist aufgrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse und zur Nutzung von Synergien daher wünschenswert.

Im europäischen Raum richtet sich die Einteilung an den von der EU-Kommission vorgeschlagenen Pkw-Segmenten mit den Kürzeln A (mini cars) bis J (sport utility cars) [European Commission, 1999] aus. In Deutschland wird wiederum eine eigene Segmentierung verwendet, welche leicht von den Segmenten der EU-Kommission abweicht. Nach der Erläuterung des KBA wird „die Bildung der Klassifizierungsmerkmale und die Zuordnung ... in enger Abstimmung mit Vertretern der Automobilindustrie vorgenommen“ und erfolgt über „... optische, technische und marktorientierte Merkmale“ [KBA, 2013].

Prinzipiell lassen sich die Kaufsegmente einander für einen Großteil der Pkw wie in Tabelle 4 dargestellt zuordnen. Eine einheitliche Zuordnung ist jedoch nicht vorgeschrieben, daher können einzelne Modelle in Deutschland anders als in der EU zugeordnet werden (z. B. SEAT Cordoba: in der EU C-Segment, nach KBA ein Kleinwagen).

Wie erwähnt wird eine Zusammenfassung der Kaufsegmente in Größenklassen in verschiedenen

Kürzel	Segment EU	KBA-Segmente DE
A	mini cars	Mini
B	small cars	Kleinwagen
C	medium cars	Kompaktklasse, Utilities
D	large cars	Mittelklasse
E	executive cars	Obere Mittelklasse
F	luxury cars	Oberklasse
S	sport coupés	Sportwagen (inkl. Cabriolet)
M	multi purpose cars	Vans (Minivans, Großraumvans)
J	sport utility cars/offroad vehicles	SUVs, Geländewagen

Tab. 4: Pkw-Kaufsegmente der EU-Kommission im Vergleich mit der Einteilung in Deutschland

Kürzel	TRACCS	McKINSEY	TNO 2006	TNO 2011	NPE 2011	NPE 2013
A	S	S	S	S	S	S
B	S	S	S	S	S	S
C	LM	M	M	M	M	M
D	UM	M	M	L	L	M
E	E	n. a.	L	L	n. a.	L
F	o.	n. a.	L	L	n. a.	L
S	o.	n. a.	L	L	n. a.	o.
M	o.	n. a.	L	L	n. a.	M/L
J	o.	L	L	L	n. a.	M/L

S: small (klein),
M: medum (mittel),
L: arge (groß),
LM: lower medium (untere Mittelklasse),
UM: uppermedium (obere Mittelklasse);
E: Executive (Oberklasse)
o.: other (sonstige)

Tab. 5: Kaufsegmente nach Vorschlag der EU-Kommission und Beispiele für Zuordnung nach Größenklassen

Studien bereits durchgeführt. Folgende Arbeiten wurden verglichen:

- [PAPADIMITRIOU, NTZIACHRISTOS, 2013]: TRACCS (transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change). Eine europaweite Zusammenstellung von Verkehrsdaten im Auftrag der EU-Kommission,
- [McKINSEY, 2010]: Die sogenannte „coaliton study“ mit einer Fakten-Zusammenstellung zu alternativen Antriebskonzepten in Zusammenarbeit mit den europäischen Automobilherstellern,
- [TNO et al., 2006, 2011]: Untersuchung von Maßnahmen zur CO₂-Reduktion bei Pkw,
- [NPE, 2011; PLÖTZ et al., 2013]: Untersuchung von Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge in Deutschland im Rahmen der Nationale Entwicklungsplattform Elektromobilität (NPE).

Eine Übersicht zur jeweiligen Zuordnung gibt Tabelle 5. Hierbei zeigt sich eine teilweise unterschiedliche Segmentzuordnung:

- Das A- und B-Segment wird in allen Studien einheitlich den kleinen Pkw zugeordnet.

Größe	KBA-Segment	Ø Motorleistung in kW	Ø Leergewicht in kg	% Pkw-Bestand
S	Insgesamt	54	1.035	27 %
	Mini	46	928	6 %
	Kleinwagen	56	1.066	21 %
M	Insgesamt	79	1.285	33 %
	Kompaktklasse	78	1.270	28 %
	Mini-Vans	82	1.367	5 %
L	Insgesamt	111	1.609	40 %
	Sonstige	96	1.293	1 %
	Mittelklasse	103	1.464	18 %
	Sportwagen (inkl. Cabriolet)	167	1.490	2 %
	Großraum-Vans	96	1.636	5 %
	Obere Mittelklasse	134	1.671	5 %
	Utilities	79	1.704	4 %
	Geländewagen	133	1.879	3 %
	Oberklasse	212	1.934	1 %
	Wohnmobile	90	2.795	1 %

Tab. 6: Technische Merkmale und Bestandsanteile der Pkw nach KBA-Segmenten im Jahr 2013 (sortiert nach Leergewicht)

- Das D-Segment wird sehr unterschiedlich zugeordnet und findet sich sowohl bei den mittleren, den großen Pkw oder wie bei TRACCS in einer eigenen Klasse wieder. Dies könnte auch auf die irreführende Bezeichnung, im europäischen Raum „large car“ und in Deutschland „Mittelklasse“, zurückzuführen sein.
- Die Segmente F-G werden teilweise gar nicht oder einer Klasse „other“/„sonstige“ zugeordnet.

5.1.2 Zuordnung der Kaufsegmente des KBA in TREMOD

Aufgrund der uneinheitlichen Segmentzuordnung ist eine Anlehnung an andere Studien für TREMOD nur bedingt umsetzbar. Weiterhin bestehen für TREMOD eigene Anforderungen für die Zuordnung. Einerseits soll diese für alle Pkw anwendbar sein, da in TREMOD der gesamte Bestand erfasst wird. Andererseits sollen aufgrund der Komplexität und des Datenumfangs maximal drei Größenklassen unterschieden werden.

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der neuen Segmentzuordnung in TREMOD, zusätzlich wird für

den Pkw-Bestand im Jahr 2013 jeweils die mittlere Motorleistung, das mittlere Leergewicht und der Anteil der Fahrzeuge angegeben. Minis und Kleinwagen werden dabei den kleinen Pkw, die Kompaktklasse sowie Mini-Vans den mittleren Pkw zugeordnet. Die übrigen Kategorien werden (inklusive der Mittelklasse) zu den großen Pkw zusammengefasst.

Für eine internationale Vergleichbarkeit wird diese Zuordnung als repräsentativ angesehen, da der deutsche Pkw-Bestand zu einem überdurchschnittlichen Anteil aus großen Pkw besteht. Die drei häufigsten Segmente Kompaktklasse (28 %), Kleinwagen (21 %) und Mittelklasse (18 %) sind somit jeweils einer der drei Größenklasse zugeordnet, den geringsten Anteil am deutschen Pkw-Bestand haben kleine Pkw.

Die in TREMOD verwendeten Bestandsdaten des KBA verfügen erst ab dem Baujahr 1990 über das Merkmal Segment. In den letzten Jahren hat sich die Segmentierung mehrfach geändert, so dass derzeit in TREMOD insgesamt 15 Segmente zu unterscheiden sind. Ab 2013 kommen zusätzlich „SUV“ als weiteres Segment hinzu (Tabelle 7).

Da Pkw mit Baujahr < 1990 über keine Segmentzuordnung verfügen, werden diese in TREMOD wei-

Bezeichnung	Unterscheidung in der KBA-Auswertung
Mini	Seit 1990
Kleinwagen	Seit 1990
Untere Mittelklasse bzw. Kompaktklasse	Seit 1990
Mittelklasse	Seit 1990
Obere Mittelklasse	Seit 1990
Oberklasse	Seit 1990
Geländewagen	Seit 1990
Cabriolet	1990 bis 2006
Van	Seit 1990
Mini-Vans	Seit 2007
Großraum-Vans	Seit 2007
Utilities	Seit 2007
Wohnmobile	Seit 2006
Sportwagen	Seit 2007
SUVs	Seit 2013
Sonstige	Seit 1990

Tab. 7: Übersicht aller Kaufsegmente der KBA-Auswertung für TREMOD, Stand 2013

terhin über Hubraumklassen (< 1,4 l, 1,4-2 l, > 2 l) in kleine, mittlere und große Pkw aufgeteilt. Für frühere Bezugsjahre wird die Segmentzuordnung über die Kaufsegmente somit immer weniger repräsentativ. Eine Zuordnung der KBA-Daten in den Beständen für TREMOD wird daher vereinfachend erst ab dem Bezugsjahr 2006 umgesetzt, da ab diesem Jahr auch weitere Umstellungen der KBA-Statistik (neue Emissionsschlüsselnummern) stattfanden.

Durch die neue Zuordnung der Größenklassen verschiebt sich vor allem der Anteil der mittleren Pkw hin zu den großen Pkw. Besonders der Bestand an Diesel-Pkw ist hiervon betroffen.

6 Fahrleistungen der Fahrzeugkonzepte

6.1 Differenzierung der Fahrleistungen

In TREMOD wird zur Ableitung des Fahrleistungsgerüsts die Inlandsfahrleistung zugrunde gelegt. Die Fahrleistungen werden zur Emissionsberechnung differenziert nach:

- Straßenkategorien und Straßentypen,
- Fahrzeugkategorien,
- Fahrzeugschichten und -alter,
- Verkehrssituationen,
- Längsneigungsklassen.

Straßenkategorien

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 Fahrleistungen auf den Bundesautobahnen werden zusätzlich nach der Anzahl der Fahrstreifen unterschieden. Dazu werden die zwei Kategorien < = 5 und > = 6 Fahrstreifen gebildet.

Die sonstigen Außerortsstraßen werden nach Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen unterschieden. Die Innerortsstraßen werden nicht weiter unterteilt. Tabelle 8 fasst die verwendeten Kategorien zusammen.

Straßenkategorie		Straßentyp	
AB	Bundesautobahnen	A < = 5	< = 5 Fahrstreifen
		A > = 6	> = 6 Fahrstreifen
AO	Außerortstraßen	B	Bundesstraßen
		L	Landesstraßen
		K	Kreisstraßen
		G	Gemeindestraßen
IO	Innerortsstraßen	I	Innerortsstraßen

Tab. 8: Straßenkategorien und Straßentypen

Fahrzeugkategorien

Die Unterteilung nach Fahrzeugkategorien (FzKat) wird so gewählt, dass zum einen die statistische Datenbasis (Bestände, Fahrleistungen) zum anderen die Emissionsfaktoren-Datenbasis in ausreichender Differenzierung abgebildet werden.

Daher werden drei verschiedene Kategorien gewählt:

- KBA: Fahrzeugkategorien entsprechend der Bestandsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamtes,
- TREMOD: Fahrzeugkategorien entsprechend der Emissionsfaktoren-Datenbasis in TREMOD,
- SVZ: Fahrzeugkategorien entsprechend der Unterteilung in den Straßenverkehrszählungen (SVZ).

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Fahrzeugkategorien.

Die TREMOD-Aufteilung entspricht der KBA-Systematik, wobei einzelne Kategorien (Busse, Lkw, übrige Kfz) entsprechend den Anforderungen der Emissionsberechnung weiter untergliedert sind. Bei den alle fünf Jahre stattfindenden Straßenverkehrszählungen werden sechs Kategorien erfasst, an den automatischen Dauerzählstellen (jährliche Publikation) die Kategorien Leicht- und Schwerverkehr.

Fahrzeugschichten und -alter (Flottenzusammensetzung)

Aus den Fahrleistungsuntersuchungen ist bekannt, dass Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie je nach Merkmal (Antrieb, Größenklasse, Alter) unterschiedliche Jahresfahrleistungen und auch unterschiedliche Fahrleistungsanteile auf den verschie-

KBA	TREMODO		SVZ
n. a.	Kleinkrafträder	KKR	Kräder
Krafträder	Krafträder	KR	
Pkw/Kombi	Pkw/Kombi	Pkw	Pkw
Übrige Kfz	Ü. Kfz < 3,5 t	UeKfzs	
Busse	Linienbusse	LBus	Busse
	Reisebusse	RBus	
Lkw	Lkw < 3,5 t	Lkws	Lkw < 3,5 t
	Lkw Solo > 3,5 t	Lkws	Lkw ohne Anhänger
	Lastzüge	LZ	Lastzüge
Sattelzugmaschinen	Sattelzüge	SZ	
Übrige Kfz	Ü. Kfz > 3,5 t	UeKfzs	Lkw ohne Anhänger

Tab. 9: Definition und Zuordnung der Fahrzeugkategorien

denen Straßenkategorien haben. Diese Unterschiede werden in TREMOD und im HBEFA als sogenannte Flottenzusammensetzungen berücksichtigt. Sie ergeben sich im Modell aus der Zusammensetzung des Fahrzeugbestands, die mit Gewichtungsfaktoren verknüpft werden. Als Ergebnis erhält man für jede Fahrzeugkategorie und jedes Bezugsjahr die Flottenzusammensetzung je Straßenkategorie als Verteilung der Fahrleistung nach Antrieb, Größenklasse und Fahrzeugalter.

Verkehrssituationen

Die Emissionsfaktoren der verschiedenen Fahrzeugkategorien werden für einzelne Verkehrssituationen abgeleitet, die ein typisches Fahrverhalten beschreiben sollen. Für die praktische Anwendung interessiert, wo (auf welchen Straßenabschnitten bzw. -typen) welche Verkehrssituationen vorkommen. Es gilt also, die Verkehrssituationen den verschiedenen in der Realität vorkommenden Streckentypen zuzuordnen.

Das Schema der Verkehrssituationen wurde für das HBEFA 3.1 vollkommen überarbeitet und damit vereinheitlicht. Eine Verkehrssituation ist durch vier Parameter bestimmt: Gebiet, Straßentyp, Tempolimit und Verkehrszustand (siehe Tabelle 10).

Da die eindeutige Zuordnung der Verkehrssituationen zu drei Straßenkategorien im neuen Schema nicht mehr vorhanden ist, wurde für die Ableitung der flottengewichteten Emissionsfaktoren im HBEFA

Gebiete Land, ländlicher Raum (Rural) ; Agglomeration, Ballungsraum (Urban)	
Straßentypen	
Stadt-Autobahn	> = 2 x 2 Fahrstr., kreuzungsfrei; Magistrale/Ringstraße mit hoher Kapazität
Semi-Autobahn	variable Anzahl Fahrstr. (gebräuchlich z. B. in Schweden, ländlicher Raum)
Fern-, Bundesstraße	kreuzungsfrei, > = 2 x 1 Fahrstreifen, Tempolimit 80-100 km/h
Städt. Magistrale/ Ringstr.	> = 2 x 1 Fahrstreifen; kann kreuzungs- frei sein, aber keine Autobahn
Hauptverkehrs- straße	> = 2 x 1 oder > = 1 x 2 Fahrstreifen, mittlere Kapazität; Landesstrasse, mit überregionalem Verkehr
Hauptverkehrs- straße, kurvig	> = 2 x 1 oder > = 1 x 2 Fahrstreifen, mittlere Kapazität; Landesstrasse, mit überregionalem Verkehr; mit Kurven
Sammelstraße	Verbindungsstraße zwischen Ortschaften; < = 2 x 1 Fahrstreifen
Sammelstraße, kurvig	Verbindungsstraße zwischen Ortschaften, < = 2 x 1 Fahrstreifen; mit Kurven
Erschließungs- straße	städtische resp. Dörfliche Erschließungs- straßen, < = 2 x 1 Fahrstreifen

Tab. 10: Beschreibung der Merkmale der Verkehrssituationen ab HBEFA 3.1

Gebiete Land, ländlicher Raum (Rural) ; Agglomeration, Ballungsraum (Urban)	
Verkehrszustand	
flüssig	frei und stetig fließender Verkehr, Konstante, eher hohe Geschwindigkeit, Bandbreiten: 90 bis > 130 km/h auf Autobahnen, 45-60 km/h auf Straßen mit Tempolimit von 50 km/h. Verkehrs- qualität A-B gemäß HCM (Highway Capacity Manual).
Dicht	flüssiger Verkehrsfluss bei starkem Verkehrsvo- lumen, vergleichsweise konstante Geschwindig- keit, Bandbreiten: 70-90 km/h auf Autobahnen, 30-45 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufen C-D gemäß HCM.
Gesättigt	unstetiger Verkehrsfluss mit starken Geschwin- digkeitsschwankungen bei gesättigtem/gebunden- em Verkehrsfluss, erzwungene Zwischenstopps möglich, Bandbreiten: 30-70 km/h auf Autobah- nen, 15-30 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h. Verkehrsqualitätsstufe E gemäß HCM.
Stop+go	Stop+go, starke Stauerscheinungen bis Ver- kehrszusammenbruch, Geschwindigkeits- schwankungen bei allgemeinen tiefer Geschwin- digkeit. Bandbreiten: 5-30 km/h auf Autobahnen, 5-15 km/h auf Straßen mit Tempolimit 50 km/h.

Tab. 10: Fortsetzung

Gebiet	Straßentyp	Verkehrszustand	Tempo-Limit [km/h]														
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	>130			
ländlich geprägt	Autobahn	4 V'Zustände															
	Semi-Autobahn	4 V'Zustände															
	Fern-, Bundesstraße	4 V'Zustände															
	Hauptverkehrsstraße	4 V'Zustände															
	Hauptverkehrsstraße, kurvig	4 V'Zustände															
	Sammelstraße	4 V'Zustände															
	Sammelstraße, kurvig	4 V'Zustände															
	Erschließungsstraße	4 V'Zustände															
Agglo- meration	Autobahn	4 V'Zustände															
	Stadt-Autobahn	4 V'Zustände															
	Fern-, Bundesstraße	4 V'Zustände															
	Städt. Magistrale/Ringstr.	4 V'Zustände															
	Hauptverkehrsstraße	4 V'Zustände															
	Sammelstraße	4 V'Zustände															
	Erschließungsstraße	4 V'Zustände															

Zugeordneter Flottenmix-Typ:

- Autobahn
- Land
- Agglo

Zuordnung der Flottenzusammensetzungen:
Autobahn: Autobahn;
Land (= sonstige Außerortsstraßen): Verkehrssituationen in Agglomerationen mit Tempolimit > 70 km/h und
Verkehrssituationen in ländlichen Gebieten mit Tempolimit > 60 km/h;
Agglo (= innerorts): Verkehrssituationen in Agglomerationen mit Tempolimit < = 70 km/h und Verkehrssituationen
in ländlichen Gebieten mit Tempolimit < = 60 km/h

Tab. 11: Verkehrssituationen ab HBEFA 3.1 und Zuordnung von Flottenzusammensetzungen

eine neue Zuordnung der Flottenzusammensetzungen definiert, die sich für den Nicht-Autobahnverkehr im Wesentlichen an den Höchstgeschwindigkeitsklassen orientiert (siehe Tabelle 11).

In TREMOD werden dementsprechend jedem Straßentyp nur Verkehrssituationen zugeordnet, die der jeweiligen Klassifizierung nach Innerorts, Außerorts und Autobahn entsprechen.

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 entsprechende Fahrleistungsanteile ermittelt werden müssen. Die Unterteilung nach Längsneigungsklassen wird wie in Tabelle 12 dargestellt festgelegt.

6.2 Ableitung der Fahrleistungen bis 2012

Die gesamte inländische Jahresfahrleistung aller Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie ist die relevanteste Steuergröße der Verkehrsaktivität für die Emissionsberechnung. Diese wird weiter differenziert nach Straßenkategorien, Straßentypen und Verkehrssituationen.

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

Tab. 12: Definition der Längsneigungsklassen

Merkmale	Datenquellen und Vorgehen
Kleinkraft-räder	Übernahme der DIW-Eckwerte, Korrektur unplausibler Verläufe
Krafträder	Übernahme der DIW-Eckwerte
Pkw/Kombi Übrige Kfz < 3,5 t;	Übernahme der DIW-Eckwerte für Pkw; Korrektur unplausibler Verläufe; Bestimmung der Fahrleistung der Summe Pkw/Wohnmobile/übrige Kfz und Aufteilung aufgrund der Fahrleistungsuntersuchung 1993 und der Bestandsentwicklung
Linienbusse Reisebusse	Eckwert Inlandsfahrleistung Busse aus der FLU 1993 und FLE 2002; Zeitverlauf 1994-2009 auf Basis der Straßenverkehrszählungen und plausibler Werte für Innerortsfahrleistung; Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien durch Fortschreibung der Fahrleistungsuntersuchung und Bestandsstatistik
Lkw < 3,5 t	Eckwert Inlandsfahrleistung aus der FLU 1993 und FLE 2002; Zeitverlauf 1994-2009 auf Basis der Straßenverkehrszählungen und plausibler Werte für Innerortsfahrleistung sowie Abstimmung mit Bestandsentwicklung
Lkw Solo > 3,5 t Lastzüge Sattelzüge	Eckwert 1993 aus der FLU 1993; Eckwert 2002 aus FLE 2002 wird erhöht, sodass Innerortsfahrleistung und der berechnete Energieverbrauch eine plausible Größenordnung haben; Interpolation 1993-2010 aufgrund Bestandsentwicklung, Mautstatistik und Straßenverkehrszählungen
Übrige Kfz > 3,5 t	Fortschreibung der Fahrleistungsuntersuchung mithilfe der Bestandsstatistik; iterative Anpassung

Tab. 13: Ableitung der Fahrleistungen bis 2012 in TREMOD (Fahrzeugkategorien)

te Steuergröße der Verkehrsaktivität für die Emissionsberechnung. Diese wird weiter differenziert nach Straßenkategorien, Straßentypen und Verkehrssituationen.

Für die Ableitung der Fahrleistungen werden verschiedene Quellen herangezogen, die in einem aufwändigen Verfahren aufeinander abgestimmt werden. Die Tabellen 13 bis 15 geben einen Überblick über das generelle Vorgehen. Eine detaillierte Beschreibung ist in [IFEU, 2014] enthalten.

Jahr	Pkw	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonst.
2000	560,3	15,1	4,1	30,9	52,9	7,6
2001	571,3	15,4	4,2	32,7	53,4	7,5
2002	579,5	15,9	4,1	34,7	53,6	7,7
2003	574,5	16,0	4,0	35,3	53,7	7,7
2004	587,0	16,5	4,0	35,9	53,8	7,8
2005	574,8	16,8	3,9	36,3	51,5	8,0
2006	580,5	17,3	3,9	36,8	53,8	3,5
2007	584,1	14,9	3,8	37,8	55,5	3,5
2008	581,2	15,3	3,7	37,4	55,5	3,3
2009	591,6	15,8	3,8	37,4	51,6	3,4
2010	595,5	15,8	3,7	37,5	53,9	3,5
2011	605,2	16,2	3,6	37,5	55,6	3,5
2012	596,3	16,2	3,6	37,5	54,3	3,5

Tab. 14: Fahrleistungsentwicklung 2000-2012 nach Fahrzeugkategorien (in Mrd. km)

Merkmale	Datenquellen und Vorgehen
Autobahnen < = 5 und > = 6 Fahrstreifen	Fahrleistungen werden vollständig in den Straßenverkehrszählungen und an den automatischen Dauerzählstellen erfasst; Auswertung nach Fahrstreifen entsprechen der FLU 1993, SVZ 1995, SVZ 2000 und SVZ 2005
Bundesstraßen (außerorts)	Fahrleistungen werden in den Straßenverkehrszählungen und an den automatischen Dauerzählstellen erfasst
Landesstraßen (außerorts)	Fahrleistungen werden in den Straßenverkehrszählungen erfasst; Entwicklung zwischen den Zählungen wird anhand der automatischen Dauerzählstellen auf den Bundesstraßen interpoliert
Kreisstraßen (außerorts)	Fahrleistungen werden in den Straßenverkehrszählungen nur für die alten Bundesländer erfasst; die Fahrleistung für Deutschland insgesamt wird daraus geschätzt; Entwicklung zwischen den Zählungen wird linear interpoliert
Gemeindestraßen (außerorts) und alle Innerortsstraßen	Fahrleistungen als Differenz aus Eckwerten der Gesamtfahrleistung und den Fahrleistungen BAB+B+L+K; Aufteilung und entsprechend der Fahrleistungsuntersuchung 1993; Ausnahme: die Fahrleistung der schweren Nutzfahrzeuge wird 2002 erhöht, da Anteil Innerorts unplausibel

Tab. 15: Ableitung der Fahrleistungen bis 2012 in TREMOD (Straßenkategorien)

6.3 Fahrleistungen nach Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen

Die FLU 1993 sowie die Vorgängeruntersuchungen für 1990 und 1986 sind die einzigen vorliegenden Arbeiten, in denen eine Fahrleistungsabschätzung

Straßentyp/Verkehrssituation	FL-Ant. Pkw
Autobahn	
Land/Autobahn/TL130/flüssig	
Land/Autobahn/TL120/flüssig	
Land/Autobahn/TL100/flüssig	
Land/Autobahn/TL80/flüssig	
Land/Autobahn/TL80/flüssig	
Land/Autobahn/TL130/gesättigt	
Land/Autobahn/TL120/gesättigt	
Land/Autobahn/TL100/gesättigt	
Land/Autobahn/TL80/gesättigt	
Land/Autobahn/TL80/gesättigt	
Land/Autobahn/TL100/Stop+go	
Bundesstraßen außerorts	
Land/FernStrasse/TL110/flüssig	
Land/FernStrasse/TL100/flüssig	
Land/FernStrasse/TL100/dicht	
Land/FernStrasse/TL80/dicht	
Landesstraßen außerorts	
Land/Hauptverkehrsstr./TL80/flüssig	
Land/Hauptverkehrsstr./TL80/dicht	
Land/Hauptverkehrsstr.(kurvig)/TL80/dicht	
Kreis- u. Gemeindestraßen außerorts	
Land/Sammelstrasse/TL80/flüssig	
Land/Sammelstrasse/TL80/dicht	
Land/Sammelstrasse(kurig)/TL80/dicht	
Innerorts	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL70/flüssig	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL70/dicht	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL70/gesättigt	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/Stop+go	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/flüssig	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/dicht	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/gesättigt	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/Stop+go	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/dicht	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/gesättigt	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/Stop+go	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/gesättigt	
Agglo/Hauptverkehrsstr./TL50/Stop+go	
Agglo/Erschliessungsstr./TL50/gesättigt	
Agglo/Erschliessungsstr./TL50/dicht	

Tab. 16: Verkehrssituationen und Fahrleistungsanteil Pkw je Straßentyp

in der Differenzierung nach Verkehrssituationen und Längsneigung vorgenommen wurde. Sie werden daher weiterhin als Grundlage für die Ableitung der Fahrleistungsanteile der Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen verwendet.

Mit der Neugestaltung des Verkehrssituationschemas ab HBEFA 3.1 musste die bisherige Zuordnung angepasst werden. Hierzu wurden die bisherigen Verkehrssituationen durch geeignete Situationen aus dem neuen Schema ersetzt. Die Anteilswerte wurden nicht verändert.

6.4 Ableitung der Flottenzusammensetzung bis 2012

Die Flottenzusammensetzung beschreibt die Aufteilung der Fahrleistungen je Fahrzeugkategorie in die emissionsrelevanten Fahrzeugschichten. Die Flottenzusammensetzung wird zum Teil aus Informationen zu den mittleren Jahresfahrleistungen für bestimmte Fahrzeugmerkmale (Antriebsart, Größenklasse, Alter), zum Teil direkt aus Beobachtungen und Zählungen gewonnen.

Die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen der verschiedenen Fahrzeugschichten sind in der Regel sehr unterschiedlich. Aus verschiedenen Untersuchungen (v. a. [HEUSCH-BOESEFELDT, 1996; IVT, 1994; IVT, 2004; BAG, 2014]) ist z. B. bekannt, dass

- Diesel-Pkw eine höhere mittlere Jahresfahrleistung haben als Otto-Pkw,
- große Pkw eine höhere Fahrleistung haben als kleine Pkw,
- die Jahresfahrleistung aller Kraftfahrzeuge mit dem Alter abnimmt
- größere Fahrzeuge häufiger auf Autobahnen unterwegs sind als kleinere.

In TREMOD werden diese Effekte in Form von Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Die Gewichtungsfaktoren werden so aufbereitet, dass sie mit den Bestandsanteilen verknüpft für jede Fahrzeugkategorie die relative Fahrleistungsverteilung nach Fahrzeugschichten für jede der drei Straßenkategorien Innerorts, Außerorts und Autobahn ergibt.

6.4.1 Pkw

Eingang in die Ableitung des Fahrleistungsgerüsts finden:

- die Pkw-Fahrleistungsrelationen aus dem Jahr 1993 von Heusch-Boesefeld (differenziert nach Straßenkategorien und Fahrzeugsegmenten),
- die Pkw-Inländer-Fahrleistungen für das Jahr 2002 von IVT (differenziert nach Fahrzeugsegmenten),
- DIW Zeitreihe der Pkw-Fahrleistungen nach Otto- und Dieselantrieb [ViZ BMVI, n. d.]
- die Pkw-Bestandszahlen des KBA (differenziert nach Baujahren und Fahrzeugsegmenten).

Diese Eingangsdaten wurden für die Jahre 1993 bis 2002 so aufeinander abgestimmt, dass sich ein konsistentes Fahrleistungsgerüst nach Größenklasse, Antriebsart und Straßenkategorie ergab. Kern der Anpassungen ist die Verknüpfung der nach Straßenkategorien differenzierten Daten von HEUSCH-BOESEFELDT mit den nur nach Fahrzeugsegmenten differenzierten Fahrleistungen von IVT für das Jahr 2002. Ergebnis sind nach Straßenkategorien und Fahrzeugsegmenten differenzierte Fahrleistungsrelationen.

Die Fahrleistungsrelationen der Zeitreihe 1995-2001 sowie die Werte für die Jahre nach 2002 wurden anhand der Entwicklung der Fahrleistungen für Otto- und Diesel-Pkw nach [ViZ BMVBS, n. d.] und der Bestandsentwicklung nach KBA interpoliert.

Mit der Umstellung auf die aggregierten Kaufsegmente ab dem Jahr 2006 wurden die Fahrleistungsrelationen auf die neuen Klassen klein, mittel und groß angepasst.

Im Einzelnen ergeben sich die für das Jahr 2012 in Tabelle 17 exemplarisch dargestellten Fahrleistungsrelationen.

Grundlage für die weitere Differenzierung der Fahrleistung nach Fahrzeugalter bildet die Inländerfahrleistung 2002 [IVT 2004a]. Die dort enthaltenen Fahrleistungen sind nach Fahrzeugsegmenten und Fahrzeugalter, jedoch nicht nach Straßenkategorien differenziert. Die von [IVT 2004a] gebildeten Altersklassen werden aufgelöst und zu jahresfeinen Angaben erweitert. Für jedes Fahrzeugsegment werden Fahrleistungsrelationen nach Fahrzeugalter ermittelt. Ergebnis sind normierte Treppenfunktionen, die die Relation der Ge-

Pkw-Segment	Autobahn	Übrige Straßen
Otto klein	1,00	1,00
Otto mittel	1,63	0,99
Otto groß	2,87	0,86
Diesel klein	1,26	1,26
Diesel Mittel	3,10	1,98
Diesel groß	3,82	1,86

Anmerkungen: Fahrleistungsrelation der Segmente bezogen auf das Segment „Otto klein“

Tab. 17: Fahrleistungsrelationen der Pkw-Segmente nach Straßenkategorien im Jahr 2012, (Quellen: IVT 2004a, Abschätzungen des IFEU)

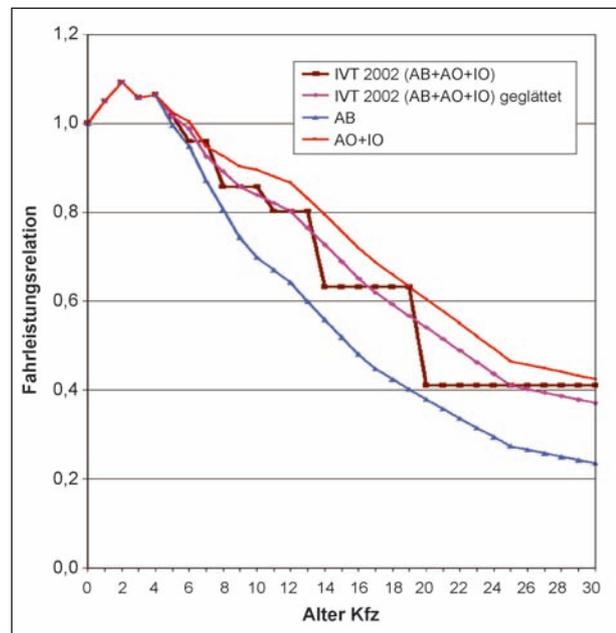


Bild 3: Fahrleistungsrelation nach Alter am Beispiel Otto-Pkw mittel nach [IVT 2004a]

samtfahrleistung eines Pkw-Segmentes bestimmten Alters gegenüber einem neu zugelassen Fahrzeug dieses Segmentes wiedergeben. Diese Treppenfunktionen werden anschließend geglättet, um Sprünge in den Fahrleistungen zu vermeiden (siehe Bild 3).

In einem weiteren Schritt werden die je Fahrzeugsegment gebildeten Fahrleistungsrelationen nach Alter für die verschiedenen Straßenkategorien angepasst. Grund dieser Anpassung ist, dass nach [HEUSCH-BOESEFELDT, 1996] die Relation der Pkw-Fahrleistung auf Autobahnen nach Alter steiler verläuft, als auf Außer- bzw. Innerortstraßen: Für die altersabhängigen Fahrleistungsrelationen im außerorts- bzw. innerorts-Verkehr wird angenommen, dass sie gleich verlaufen.

Für den Autobahnverkehr wird angenommen, dass die Fahrleistungsrelationen bis zu einem Alter von 4 Jahren mit denen des Gesamtverkehrs übereinstimmen. Ab einem Pkw-Alter von 5 Jahren wird angenommen, dass die Autobahn-Fahrleistung gegenüber dem mittleren Verlauf auf allen Straßenkategorien um durchschnittlich 2 %, ab einem Alter von 8 Jahren um 4 %, ab einem Alter von 11 Jahren um 2 % und über 18 Jahren um jeweils 1 % gegenüber dem Wert des Vorjahres abnimmt.

Aus den angenommenen altersabhängigen Fahrleistungsrelationen auf Autobahnen und denen für den Gesamtverkehr abgeleiteten ergeben sich rechnerisch die Fahrleistungsrelationen für den Außerorts- bzw. Innerortsverkehr (Bild 3).

Mittlere Jahresfahrleistungen bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

Für Fahrzeuge mit CNG und LPG-Antrieb liegen wenig Informationen über die durchschnittlichen Fahrleistungen vor, doch ist zu vermuten, dass Besitzer von Gasfahrzeugen eher höhere Jahresfahrleistungen realisieren als im Mittel. Wir setzen daher die mittlere Fahrleistung von CNG- und LPG-Pkw wie diejenigen der Diesel-Pkw an. Für Otto-Hybrid-Pkw werden die mittleren Fahrleistungen der Otto-Pkw angenommen.

Bei Linienbussen wird ebenso die Fahrleistung der Diesel-Busse auf die CNG-Busse übertragen.

Fahrleistungsanteile von Bifuel-Fahrzeugen nach Energieformen

Sowohl CNG, Bifuel als auch alle LPG-Fahrzeuge verbrauchen neben dem hauptsächlich verwendeten Endenergieträger zusätzlich geringe Mengen Benzin. Da der Anteil der Fahrzeuge derzeit noch gering ist und davon auszugehen ist, dass die Nutzer überwiegend CNG und LPG verwenden, wird der Benzin-Kraftstoffverbrauch dieser Fahrzeuge in TREMOD nicht extra ausgewiesen.

6.4.2 Übrige Fahrzeuge

Die Fahrleistungsgewichtung bei den übrigen Fahrzeugkategorien beruht auf dem gleichen Verfahren und den gleichen Quellen wie beim Pkw, wobei die Kennzahlen nicht zwingend nach allen Merkmalen unterschieden werden. So werden etwa die Fahrleistungsrelationen der leichten Nutzfahrzeuge, Lkw, Busse und Krafträder nicht nach Straßenkategorien unterschieden.

Segment	FL-Relation
LNF N1-I	1,0
LNF N1-II	1,15
LNF N1-III	1,47
Lkw <= 7,5 t	1,0
Lkw > 7,5-12 t	1,5
Lkw > 12-20 t	2,0
Lkw > 20-28 t	2,5
Lkw > 28	2,0
Lz <= 28 t	1,0
Lz > 28-34 t	3,0
Lz > 34 t	4,0
Sz > 28-34 t	1,0
Sz > 34 t	1,33
RBus <= 18 t	1,0
RBus > 15 t	1,3
LBus <= 15 t	1,0
LBus > 15-18 t	1,51
LBus > 18 t	1,45
MR <= 150 ccm	1,0
MR > 150 ccm	1,6
Anmerkungen: Fahrleistungsrelation der Segmente bezogen auf das kleinste Segment einer Fahrzeugkategorie	

Tab. 18: Fahrleistungsrelationen der übrigen Fahrzeugsegmente im Jahr 2012, (Quellen: IVT 2004a, Abschätzungen des IFEU)

6.5 Ableitung der Flottenzusammensetzung unter Berücksichtigung der neuen Fahrzeugkonzepte

Die mittlere Fahrleistung der neuen Fahrzeugkonzepte ist für die Szenarienrechnung relevant und beruht auf Annahmen, da empirische Werte noch nicht vorliegen. Analog zu den Annahmen für die bereits in der Zeitreihe bis 2012 berücksichtigten CNG- und LPG-Fahrzeuge werden Fahrleistungsrelationen auf Basis der vorhandenen Kennzahlen festgelegt.

6.5.1 Pkw

Bei den Pkw wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Batterieelektrische Fahrzeuge werden eher im Nahbereich eingesetzt. Aufgrund der hohen Fahrzeugkosten wird davon ausgegangen, dass

Konzept neu	Konzept Bezug	AB	AO	IO
BEV	Benziner	-30 %	+50 %	+100 %
HEV	ICE-Basiskonzept	gleich	gleich	gleich
PHEV/ REEV	ICE-Basiskonzept	gleich	gleich	gleich
FCEV				
- klein	Benziner klein	+50 %	+50 %	+50 %
- mittel	Benziner mittel	+50 %	+50 %	+50 %
- groß	Benziner groß	+15 %	+50 %	+50 %

Tab. 19: Anpassung der Fahrleistungsrelationen für neue Fahrzeugkonzepte bei Pkw

sie in Bereichen mit eher hoher Fahrzeugnutzung eingesetzt werden, so dass die mittlere Jahresfahrleistung insgesamt höher ist als bei Benzin-Pkw der gleichen Größenklasse.

- Für alle Hybridkonzepte wird das gleiche Nutzungsverhalten wie für die konventionellen Fahrzeuge der gleichen Antriebsart und Größenklasse angenommen. Entsprechend wird beispielsweise für den Benzin-HEV ein Nutzungsverhalten analog zum rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Benzinern angenommen.
- Für Fahrzeuge mit Brennstoffzelle wird eine Nutzung unterstellt, die zwischen dem der konventionellen Otto- und Dieselfahrzeuge liegt.

Die verwendeten Relationen, die diesen Annahmen entsprechen, sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

6.5.2 Übrige Fahrzeuge

Für die LNF und SNF wurden bisher keine eigenen Abschätzungen gemacht. Es werden daher für alle neuen Antriebsarten die gleichen Relationen wie für die entsprechenden Dieselsegmente verwendet.

6.6 Fahrleistungsanteile nach Energieträger

6.6.1 Pkw und LNF

PHEV-Fahrzeuge können sowohl im Elektro- als auch im Verbrennungsbetrieb gefahren werden. Zur Abschätzung des elektrischen Fahranteils werden Analysen von ISI-FHG verwendet [KLEY, 2011], die auch im Vorhaben [IFEU, 2013b] für die Pkw unterstellt wurden.

Konzept neu	Jahr	AB	AO	IO
PHEV	2010	70 %	75 %	95 %
REEV	2020	65 %	70 %	90 %
	2030	60 %	65 %	87 %
	2040	55 %	60 %	84 %
	2050	50 %	55 %	80 %

Tab. 20: Anteil Fahrleistung im Elektrobetrieb für neue Fahrzeugkonzepte bei Pkw und LNF

Es wird davon ausgegangen dass der elektrische Fahranteil hoch sein muss, damit die PHEV wirtschaftlich sind. Wegen der noch hohen Anschaffungskosten zu Beginn der Markteinführung werden nur solche Nutzer ein PHEV kaufen, die sehr günstige Fahrprofile und damit hohe elektrische Fahranteile realisieren können. Wenn die Anschaffungskosten später sinken, werden auch vermehrt Nutzer mit anderen Fahrprofilen dazu kommen. Es wird angenommen, dass die Nutzer der ersten Stunde besonders viele Strecken im elektrischen Betrieb zurücklegen. Nach einer verstärkten Marktdurchdringung ist davon auszugehen, dass sich die mittlere Fahrzeugnutzung dem Durchschnitt annähert. Dies bedeutet also, dass Anfangs der Anteil im Elektrobetrieb höher ist als in späteren Jahren. Damit wird angenommen, dass der mittlere Anteil der Fahrleistung im Elektrobetrieb anfangs bei 80 % liegt und bis 2050 später auf 60 % absinkt. Für die Modellierung in TREMOD werden diese Annahmen weiter nach Straßenkategorien aufgesplittet, dabei ist der Anteil auf Innerortsstraßen am höchsten, auf Autobahnen am niedrigsten. Diese Anteile werden für alle Größenklassen und Antriebsarten (d. h. PHEV Benzin und Diesel) angenommen.

6.6.2 Übrige Fahrzeuge

Bei den schweren Nutzfahrzeugen werden Annahmen für die PHEV-Fahrzeuge, den Oberleitungs-Lkw und die Lkw mit Mischbetrieb LNG/Diesel wie folgt festgelegt:

- Bei den PHEV-SNF orientiert sich der elektrische Anteil an dem der Pkw und LNF von 60 %. Es wird keine Änderung im Zeitverlauf angenommen.
- Der HO-Lkw fährt auf Autobahnen überwiegend elektrisch, auf allen anderen Straßen systembedingt rein mit Diesel.

Konzept neu	Jahr	AB	AO	IO
Anteil Elektrisch				
PHEV Diesel/el	Alle	50 %	55 %	80 %
HO-Elektrisch/Diesel	Alle	90 %	0 %	0 %
Anteil LNG				
Dual-Fuel	Alle	60 %	60 %	60 %

Tab. 21: Anteil Fahrleistung im Elektrobetrieb für neue Fahrzeugkonzepte bei SNF

- Die Anteil LNG bei Dual-Fuel-(LNG-/Diesel-)Fahrzeugen liegt bei 60 %.

7 Basisverbrauchsfasoren und Effizienzentwicklung

7.1 Entwicklung bis 2012

Die verwendeten Basisverbrauchsfasoren sollen den Verbrauch und die Emissionen im realen Fahrbetrieb, sowohl für einzelne Teilgruppen als auch für die gesamte Fahrzeugflotte, detailliert wiedergeben können. In TREMOD ist daher der Realverbrauch der Fahrzeuge nach

- Segment und
- Neuzulassungsjahr

differenziert. Es gibt dabei keine Datenquelle, die die Verbrauchsfasoren für alle in TREMOD enthaltenen Fahrzeugkategorien und -konzepte in der benötigten Differenzierung und Aktualität enthält.

Für die Abbildung des Realverbrauchs in TREMOD werden daher die Messungen des HBEFA mit weiteren Datenquellen ergänzt. Das Verfahren zur Abschätzung des Realverbrauchs lässt sich dabei in die folgenden Schritte unterteilen:

- Messungen/Simulationen zu Referenzfahrzeugen: Diese bilden den Realverbrauch je Fahrzeugtyp zu einem definierten Zulassungsjahr (Referenzjahr) ab.
- Messungen/Simulationen zur Verbrauchsentwicklung: Ausgehend vom Referenzjahr wird die jährliche Entwicklung des Realverbrauchs der Neuzulassungen abgeschätzt.

Die Implementierung in TREMOD über die Definition von Basisverbrauchsfasoren und einer darauf

aufbauenden Effizienzentwicklung erfolgt analog diesen Schritten.

Das Jahr 2012 ist dabei das aktuell jüngste Jahr, für das statistische Daten zur Verbrauchsentwicklung der konventionellen Antriebskonzepte vorliegen.

7.1.1 Pkw

Durch den Ursprung und die Qualität der Daten lassen sich drei Gruppen von Pkw -Antrieben unterscheiden:

- Direkt in HBEFA enthaltene Konzepte (Benziner, Diesel),
- Konzepte, für die eigenständige Studien zum Energieverbrauch vorliegen (BEV, FCEV),
- Konzepte, deren Energieverbrauch sich über die Kombination der Ergebnisse aus [JEC, 2013] und den HBEFA-Daten ableiten lässt (CNG, LPG-Fahrzeuge, Hybride).

Während für die direkt aus HBEFA übernommenen Fahrzeugkonzepte weiterhin das Bezugsjahr 2002 gilt, ist für alle anderen Konzepte das Jahr 2010 als neues Bezugsjahr festgelegt worden

Für den derzeitigen Datenstand der Pkw stellt [JEC, 2013] eine zentrale Quelle dar, da sowohl die Bestimmung der Basisverbrauchsfasoren der alternativen Konzepte, als auch die Verbrauchsentwicklung der Pkw im Szenario auf Basis der Ergebnisse dieser Studie basieren. Daher sollen an dieser Stelle die Ziele und die Vorgehensweise der Studie erläutert werden.

In [JEC, 2013] wird versucht für verschiedene, heutige und zukünftige Antriebs- und Effizienztechnologien eine vergleichende Aussage zu dem CO₂- und Verbrauchsminderungspotenzial zu berechnen. Dabei wird das Minderungspotenzial der Technologien über eine Simulation des Verbrauchs des gesamten Fahrzeugs in dem Simulationstool AVL Cruise errechnet. Um vergleichbare Werte zu ermitteln, werden dabei

- mit Ausnahme der untersuchten Technologien ein identisches Fahrzeug in der Simulation verwendet und
- identische Leistungsanforderungen simuliert.

Basis für das gewählte Fahrzeug ist dabei ein generischer Pkw der mittleren Größenklasse im Jahr 2010. Die Leistungsanforderungen ergeben

sich aus der simulierten Befahrung des NEFZ. Effekte auf den Verbrauch durch unterschiedliche Fahrzeuggrößen und durch verschiedene Fahrverhalten werden daher durch die Studie nicht abgedeckt.

Die zukünftigen Effizienztechnologien werden in der Studie zu Paketen gebündelt und mit den Antriebstechnologien kombiniert simuliert. Laut Expertenmeinungen decken dabei die simulierten Technologiepakete das Spektrum der heute bekannten Entwicklungsoptionen ab. In der Studie sind diese Zukunftsfahrzeuge mit der Bezeichnung „2020+“ versehen.

Benziner, Diesel

Der spezifische Energieverbrauch der Kraftfahrzeuge in TREMOD basiert auf den im HBEFA vorgegebenen Verbrauchsfaktoren der Fahrzeugschichten, die mit dem PHEM-Modell der TU Graz für die Verkehrssituationen im realen Fahrbetrieb ermittelt wurden [TU Graz 2009a]. Für die Pkw sind diese Werte allerdings nicht zuverlässig genug, da sich die bei der Messung verwendeten Fahrzeuge für eine Emissionsschicht aus Fahrzeugen mehrerer Baujahre zusammensetzen und die relativ geringe Anzahl an Fahrzeugen nicht repräsentativ für den Verbrauch sind. Aus diesem Grund erfolgt im HBEFA 3.1 eine länderspezifische Anpassung der Verbrauchswerte. Grundlage sind die im CO₂-Monitoring dokumentierten Verbrauchswerte der Fahrzeugflotten und deren länderspezifischen Unterschiede.

Es werden zwei Arten der Anpassung durchgeführt:

1. Basiskorrektur des im HBEFA zugrunde liegenden gemessenen Fahrzeugkollektivs (Grundlage: Verbrauchswerte von Euro-3-Fahrzeugen, angenommen als Zulassungsjahr: 2002)

- „Sample world“ (gemessene Fahrzeuge/Sample): Emissionsmodell (PHEM) berechnet den Kraftstoffverbrauch/CO₂-Emissionen für den NEFZ (genauso für alle anderen HBEFA-Zyklen + Kaltstart), Berechnung für 3 Größenklassen, jeweils Benzin/Diesel,
- „CO₂-Monitoring“: liefert NEFZ-Ergebnisse für verschiedene Länder,
- Basiskorrektur = Verhältnis zwischen Monitoring-Wert und PHEM-Ergebnis (pro Segment).

2. Korrektur über die Entwicklung im Zeitverlauf:

- Annahme: relative NEFZ-Entwicklung im Zeitverlauf repräsentiert die „real world“ Verbrauchs-Entwicklung,
- Szenario (bis 2050): nationale Annahmen.

Die beiden Korrekturfaktoren werden verwendet, um für alle Fahrzyklen/Verkehrssituationen aus den Verbrauchswerten des Basis-Samples die Verbrauchsdaten der verschiedenen Größenklassen und Jahrgänge zu berechnen.

In TREMOD wurde bisher die zeitliche Entwicklung der neuzugelassenen Pkw anhand der neuesten Monitoring-Ergebnisse, die in Deutschland vom KBA aufbereitet werden, jährlich aktualisiert. Dabei wurde nach den Antriebsarten und den drei Größenklassen (klein, mittel, groß) differenziert (siehe Bild 4).

Neuere Untersuchungen von [MOCK et al., 2013], aber auch die Verbrauchsmessungen des ADAC u. a. zeigen, dass der Realverbrauch in den vergangenen Jahren bei Neufahrzeugen deutlich weniger abgenommen hat als der Verbrauch im NEFZ. Daher wurde das Verfahren geändert.

Konkret wurde zur Ableitung der Verbrauchsentwicklung in TREMOD die nun folgende Annahme getroffen.

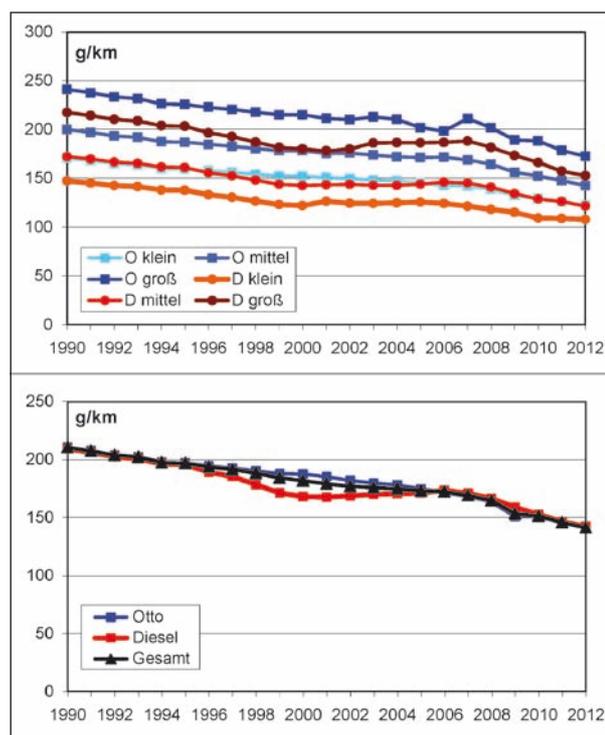


Bild 4: Entwicklung der CO₂-Emissionen der Pkw Neuzulassungen im NEFZ in Deutschland [KBA, n. d.]

Ab dem Zulassungsjahr 2008 nimmt der Verbrauch der Neuzulassungen im NEFZ deutlich stärker ab als in den Vorjahren, was nach den genannten Untersuchungen einhergeht mit zunehmenden Diskrepanzen zum Realverbrauch (siehe Bild 4). Um dies im Modell zu berücksichtigen, wird in TREMOD und im HBEFA der Realverbrauch der Neuzulassungen zwischen 2008 und 2012 nur um die Hälfte der NEFZ-Verbrauchsminde- rung abgesenkt.

Setzt man diese Annahmen um, ergibt sich eine gute Übereinstimmung der TREMOD-Ergebnisse für die mittlere Otto- und Diesel-Pkw-Flotte mit den DIW-Werten (siehe Tabelle 22).

BEV

Die Verbrauchswerte stammen aus Arbeiten im Rahmen des Flottenversuchs Elektromobilität [IFEU, 2013a]. Aus den im Forschungsvorhaben ermittelten Daten ist mittels eines Fahrzeugmodells (eLCAr⁴) der Realverbrauch von generischen Fahrzeugen in den verschiedenen Größenklassen und differenziert nach Straßenkategorie simuliert worden.

Die Ergebnisse der Simulation sind als Basisverbrauchs-faktoren für das Jahr 2010 in TREMOD übernommen (siehe Tabelle 23).

FCEV

Die Verbrauchswerte sind aus der Studie [IFEU et al., 2005] übernommen. Aus den Annahmen werden Basisverbrauchs-faktoren der FCEV für 2010 differenziert in zwei Größenklassen (mittel/klein und groß) abgeleitet.

Eine differenzierte Umsetzung in TREMOD analog der konventionellen Konzepte (3 Größenklassen, 6 Straßenkategorien) ist in der Struktur vorbereitet, erfolgt aufgrund der Datenlage derzeit aber nicht.

Das Vorgehen ist dabei aus dem Projekt „Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD“ [IFEU, 2013b] übernommen (siehe Tabelle 24).

Verbrauch (l/100 km)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
D	6,9	6,9	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7
B	8,3	8,2	8,1	8,0	7,9	7,9	7,8

Tab. 22: Mittlerer Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugflotte Pkw in den Jahren 2006-2012, Quelle: [ViZ BMVBS, n. d.]

GK	AB	AO	IO
klein	0,77	0,62	0,60
mittel	0,97	0,80	0,77
groß	1,18	0,98	0,96

Tab. 23: Basisverbrauch BEV in 2010 [MJ/km]

GK	AB	AO	IO
klein	0,84	0,84	0,84
mittel	0,84	0,84	0,84
groß	1,35	1,35	1,35

Tab. 24: Basisverbrauch FCEV in 2010 [MJ/km]

CNG- und LPG-Fahrzeuge

Der Realverbrauch der CNG- und LPG-Fahrzeuge wird aus dem Realverbrauch von HBEFA für Benzin-Fahrzeuge und den Ergebnissen von [JEC, 2013] abgeleitet.

Aus den Simulationen von [JEC, 2013] ergibt sich ein relativer Mehrverbrauch gegenüber einem Benzin-Fahrzeug. Dieser Faktor liegt, jeweils energiebezogen, bei:

- LPG-Fahrzeugen +2 %,
- CNG-Fahrzeugen +4 %.

Der Mehrverbrauch unterscheidet sich dabei signifikant, ob der Ottomotor als DISI oder PISI ausgelegt ist. Als Basis für die in TREMOD getroffenen Annahmen sind dabei die Simulationsergebnisse für die DISI gewählt, da diese insbesondere für die Szenarienrechnungen die erwartete Motorenentwicklung besser darstellen. Auf eine differenzierte Darstellung des Mehrverbrauchs für vergangene und für zukünftige Motoren wird aufgrund der bisher geringen Bedeutung der CNG- und LPG-Fahrzeuge in der Flotte verzichtet.

Der aus der Simulation ermittelte Mehrverbrauch wird als Faktor auf den in HBEFA ermittelten straßenkategoriefinen Realverbrauch des Benziners

⁴ eLCAr ist ein Simulationstool zur Verbrauchsberechnung von Elektro- und Hybridfahrzeugen, das u. a. im Rahmen der Arbeiten für [IFEU, 2011b, IFEU, 2013a] entwickelt worden ist (siehe auch Kapitel 7.1.1).

übertragen. Es wird somit angenommen, dass der konzeptbedingte, relative Mehrverbrauch im Norm- und im Realbetrieb vergleichbar ist.

Als Besonderheit können bzw. müssen (z. B. Kaltstart) LPG-Fahrzeuge auch mit Benzin betrieben werden. Aus ökonomischen Gründen wird dies weitestgehend vermieden, daher wird vereinfachend angenommen, dass der Verbrauch eines LPG-Fahrzeuges im Benzinbetrieb analog dem eines Benziners ist. Die Umsetzung der verschiedenen Betriebsanteile bei LPG-Fahrzeugen ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig in TREMOD implementiert.

Im letzten Rechenschritt wird angenommen, dass die Entwicklung des Realverbrauchs der CNG- und LPG-Fahrzeuge bis 2012 identisch mit der von den Benzinfahrzeugen ist. Als Basisverbrauchsfaktor der CNG- und LPG-Fahrzeuge ist dabei 2010 gewählt.

Hybrid-Fahrzeuge

Wie in Kapitel 4.3 ausgeführt, werden in TREMOD drei verschiedene Hybridisierungskonzepte (HEV, PHEV und REEV) unterschieden, die jeweils mit drei verschiedenen Verbrennungsmotorkonzepten (Benzin, Diesel, CNG) kombiniert werden. Die konzeptionelle Umsetzung der Hybridisierung ist dabei identisch für jedes der Verbrennungsmotorkonzepte.

Bei den HEV sind die konzeptuellen Änderungen zum Ursprungskonzept am geringsten, da kein zusätzlicher Energieträger integriert werden muss. Die Umsetzung erfolgt über geänderte Basisenergieverbrauchsfaktoren, in die ein Hybridisierungsfaktor eingerechnet wird. Dieser wurde für die Straßenkategorien Innerorts (IO), Außerorts (AO) und Autobahn (AB) differenziert mit dem Fahrzeugmodell eLCAr in der Version 6.5 simuliert.

Neben der Anpassung der Basisverbrauchsfaktoren durch die Hybridisierung erfolgt zudem eine Korrektur für die Effizienzentwicklung zwischen

	AB	AO	IO
CNG-HEV	0 %	-2 %	-29 %
Benzin-HEV	0 %	-2 %	-29 %
Diesel-HEV	0 %	-2 %	-26 %

Tab. 25: Änderung des Energieverbrauchs von HEV gegenüber dem Verbrenner-Basiskonzept differenziert nach Straßenkategorie

dem Referenzjahr des jeweiligen (Verbrenner-)Basiskonzeptes und dem Referenzjahr für die neu eingefügten Konzepte (2010).

Bei den PHEV und REEV muss zusätzlich zum Basisverbrauchsfaktor für den Verbrennungsmotor noch ein Basisverbrauchsfaktor für Strom in TREMOD integriert werden. Der Gesamtverbrauch der Konzepte richtet sich dabei nach

- dem Anteil der Betriebsmodi und
- dem Verbrauch je Energieträger je Betriebsmodi.

Der Anteil der Betriebsmodi je Straßenkategorie ist in Kapitel 6.4.1 beschrieben. Für die Verbrauchsfaktoren ist dabei die Festlegung entscheidend, dass in TREMOD nur die Betriebsmodi Charge Depleting (CD; also reiner Elektrobetrieb = Verbrauch von extern geladenen Strom) und Charge Sustaining (CS; also reiner Verbrennerbetrieb = Verbrauch des mitgeführten chemischen Energieträgers) definiert sind. Mischformen (z. B. 80 % der Leistung wird aus Benzin mittels des ICE und 20 % der Leistung wird aus extern geladenen Batteriestrom erzeugt) zwischen diesen Betriebsstrategien sind lediglich implizit über die Anteile der Betriebsmodi je Straßenkategorie integriert.

Die Umsetzung der Unterschiede zwischen den Hybridisierungskonzepten PHEV und REEV erfolgt in TREMOD zurzeit über verschiedene Anteile der Betriebsmodi, die Basisverbrauchsfaktoren der Konzepte werden nicht differenziert.

Im reinen Elektrobetrieb sind die Basisverbrauchsfaktoren gleichgesetzt mit den Verbräuchen der BEV (differenziert nach Größenskategorie und Straßenkategorie). Im CS-Modus sind Hybridisierungsfaktoren analog den HEV abgeleitet. Die Faktoren basieren dabei auf Arbeiten im Rahmen von [IFEU, 2013b] (siehe Tabelle 27).

Es ist dabei zu beachten, dass die Verbrauchsminderung der PHEV/REEV durch die Hybridisierung geringer als bei den HEV ausfällt, da der Hauptver-

	AB	AO	IO
CNG	+5 %	+0 %	-10 %
Benzin	+5 %	+0 %	-10 %
Diesel	+5 %	+0 %	-10 %

Tab. 26: Änderung des Energieverbrauchs von PHEV/REEV im CS-Modus gegenüber dem Verbrenner-Basiskonzept differenziert nach Straßenkategorie

brauchsvorteil durch die Nutzung des rein elektrischen Betriebs (CD-Modus) entsteht.

Analog den HEV erfolgt die Anpassung der Basisverbrauchs-faktoren an die unterschiedlichen Referenzjahre der (Verbrenner-)Referenzfahrzeuge und der hybridisierten Varianten.

7.1.2 Leichte Nutzfahrzeuge

Die LNF sind mit den gleichen Antriebskonzepten definiert wie die Pkw. Die Verbrauchswerte für die konventionellen Benzin- und Dieselfahrzeuge nach Größenklassen liegen aus dem HBEFA vor und werden übernommen.

Für die nicht im HBEFA vorliegenden Antriebskonzepte werden die Verbräuche auf Basis der beim Pkw getroffenen Annahmen abgeleitet. Bei den LNF sind dies folgende Konzepte:

- BEV,
- FCEV,
- CNG,
- LPG,
- PHEV-Benzin,
- PHEV-Diesel,
- PHEV-CNG,
- REEV-Benzin,
- REEV-Diesel,
- REEV-CNG.

Die nach Größenklassen differenzierte Zuordnung der Verbräuche von den Pkw auf die LNF ist in Tabelle 27 dargestellt.

Für die Konzepte BEV und FCEV werden dabei die Basisfaktoren der Pkw direkt übernommen.

Für CNG- und LPG-LNF wird der relative Mehrverbrauch zwischen den CNG- und LPG-Pkw gegenüber dem Benziner-Pkw (4 bzw. 2 %) übertragen. Der Verbrauch der CNG- und LPG-LNF ergibt sich

Pkw	LNF
Klein	M+N1-I
Mittel	N1-II
Groß	N1-III

Tab. 27: Zuordnung der Basisverbrauchs-faktoren zwischen Pkw und LNF nach Größenklassen

somit aus dem Verbrauch des Benzin-LNF und dem Mehrverbrauchs-faktor.

Für Hybride werden die relativen Änderungen im Verbrauch des chemischen Energieträgers gegenüber dem Verbrenner-Basiskonzept der Pkw für die LNF übernommen.

Im reinen Elektrobetrieb sind die Basisverbrauchs-faktoren der PHEV und REEV gleichgesetzt mit den Verbräuchen der BEV (differenziert nach Größenklasse und Straßenkategorie).

7.1.3 Schwere Nutzfahrzeuge

Bisher ist für die Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) nur das Antriebskonzept Diesel in TREMOD implementiert gewesen. Die Daten dazu stammen direkt aus HBEFA. Die Annahmen zu den neuen Konzepten ergeben sich aus diesen Daten in Kombination mit Ergebnissen aus aktuellen Untersuchungen.

Für die Ableitung des Verbrauchs der alternativen Antriebe sind die Größenklassen der SNF in drei Gruppen zusammengefasst. Der Vorteil liegt dabei in dem Erhalten von sich stärker unterscheidenden Klassen, sowie dem Vermeiden von Scheingenauigkeit durch das Übertragen von groben Annahmen auf eine äußerst differenzierte Datenstruktur.

Die SNF sind dabei in die Größenklassengruppen (GKG) N2, N3-leicht (N3-I) und N3-schwer (N3-s) eingeteilt. Die Einordnung der TREMOD-Größenklassen ist in Tabelle 28 dargestellt.

GKG	GK-TREMOD
N2	RT ≤ 7,5 t
	RT > 7,5-12 t
N3-I	RT > 12-14 t
	RT > 14-20 t
	RT > 20-26 t
	RT > 26-28 t
	RT > 28-32 t
N3-s	TT/AT ≤ 28 t
	TT/AT > 28-34 t
	TT/AT > 34-40 t
	TT/AT > 40-50 t
	TT/AT > 50-60 t

Tab. 28: Zuordnung der Größenklassengruppen (GKG) zu den differenzierten Größenklassen (GK) der Diesel-SNF in TREMOD

Für die Annahmen zu den Basisverbrauchsfaktoren ist eine genauere Definition der technischen Eigenschaften der GKG notwendig. Diese sind, mit Ausnahme der minimalen Reichweite, an die Studie [KLOESS et al., 2011] angelehnt. Die Annahmen zum Gewicht stimmen dabei gut mit den bestandsgewichteten Mittelwerten der Größenklassengruppe in TREMOD überein.

Die Annahmen zur minimalen Reichweite von N3-s (vornehmlich im Fernverkehr eingesetzte Sattelzüge) und N2-Fahrzeugen (vornehmlich im Verteilverkehr eingesetzte SNF) sind aus der Studie [DELFT, 2013b] entnommen. Die minimale Reichweite für die Gruppe der N3-I-Fahrzeuge ist aus dem Mittelwert der N3-s und N2-Gruppe abgeleitet (siehe Tabelle 29).

Die Annahmen zur minimalen Reichweite dienen dabei der Identifikation von technisch nicht sinnvollen Antriebs-Größenklassen-Kombinationen. Diese werden ergänzt mit den Betrachtungen in [DELFT, 2013b] und eigenen Annahmen basierend auf Informationen aus der Industrie. Dabei ist bereits die Realisierung der technischen Potenziale des Antriebskonzeptes bis 2050 mit berücksichtigt.

Die Einschränkungen im Einzelnen sind dabei:

- N3-s und PHEV-D: Dieser Kombination werden geringe Marktchancen zugesprochen:
 - a) um eine für PHEV typische elektrische Reichweite zu erhalten, die Batterie recht schwer sein müsste und
 - b) aufgrund des bevorzugten Einsatzes im Fernverkehr der N3-s der Elektrofahranteil gering wäre (durchschnittliche Fahrlänge >> Elektroreichweite).
- N3-s und CNG: Es ist auf der Zugmaschine nicht genug Platz um genügend Tanks zu installieren, so dass die für die SNF-Klasse benötigte minimale Reichweite erreicht wird. Lösungen mit Zusatztanks auf dem Anhänger

Klasse	Gewicht [t]	Leistung [kW]	Min. Reichweite [km]
N2	9	150	200
N3-I	21	250	500
N3-s	35	300	800

Tab. 29: Technische Eigenschaften der Größenklassengruppen bei SNF

existieren, bedeuten aber kritische Einschränkungen in der Flexibilität. Daher werden der Kombination keine relevanten Marktchancen zugesprochen.

- N2 und HO-D: Diese Kombination hat den Nachteil, dass der Pantograph unverhältnismäßig teuer und groß im Verhältnis zu dem Rest des Fahrzeuges ist.
- N2 und LNG/Dual-Fuel: Der Einsatz von LNG ist nur dann sinnvoller als CNG, wenn der Energiebedarf durch CNG nicht mehr gedeckt werden kann (siehe Einschränkung N3-s und CNG). N2-Nutzfahrzeuge haben einen im Vergleich zu N3-Fahrzeugen geringeren Energiebedarf, damit ist die im Verhältnis zu konventionellen Energieträgern geringere Energiedichte des CNGs unproblematisch.
- N3-I/N3-s und BEV: Aufgrund des Energiebedarfs der Größenklassen wäre eine Batterie unverhältnismäßig schwer und teuer.

Die damit getroffene Auswahl von Kombinationen für die Implementierung ist in Tabelle 30 dargestellt. Dies bedeutet nicht, dass diesen Konzepten unmittelbare Marktchancen zugesprochen wird, nur dass ihrem Einsatz (falls die Randbedingungen diesen Vorteilhaft erscheinen lassen) keine grundlegenden technischen Hindernisse im Weg stehen.

Die zentralen Studien für die Festlegung der Effizienzentwicklung aller SNF und den Basisverbräuchen der alternativen Fahrzeugkonzepte sind dabei die bereits erwähnten [KLOESS et al., 2011] und [DELFT, 2013b].

[KLOESS et al., 2011] der TU Wien hat den Fokus auf verschiedene Effizienztechnologien und auf alternative, insbesondere verbrennungsmotorische,

Antriebskonzept	N2	N3-I	N3-s
Diesel			
FCEV			
PHEV-D			
CNG			
HO-D			
LNG			
Dual-Fuel			
BEV			

Tab. 30: Zuordnung der Antriebskonzepte zu den GKG. Sinnvolle Kombinationen entsprechen blauen Feldern

Konzepte gelegt. Die Verbräuche werden dabei mittels eines Simulationstools für die verschiedenen Fahrzeugtypen mittels des ARTEMIS-Fahrzyklus ermittelt. Neben einer Analyse der Verbräuche ist in der Studie auch eine ökonomische Betrachtung enthalten. Zusätzlich zu den heutigen Fahrzeugen sind mit dem „Potenzial 2010“ und dem „Potenzial 2050“ zwei effizientere Varianten definiert und mit Verbräuchen und Kosten belegt.

[DELFT, 2013b] untersucht mögliche SNF-Antriebskonzepte ohne direkte Emissionen mit Zeithorizont 2050. Im Gegensatz zu [KLOESS et al., 2011] stehen Effizienztechnologien nicht im Fokus der Betrachtung. Neben der Analyse der technischen Eigenschaften der alternativen Antriebstechnologien ist zudem eine ökonomische Analyse der Fahrzeuge enthalten. Datenbasis der Ergebnisse sind Literaturanalysen und Expertenbefragungen.

Die Daten der alternativen Antriebskonzepte sind dabei grundsätzlich als Faktoren zu den Dieselfahrzeugen festgelegt. Dies bedeutet, dass die in einer Quelle genannten Verbrauchsunterschiede zwischen dem alternativen Antriebskonzept und dem Dieselfahrzeug immer als relative Differenzen in TREMOD übernommen werden.

Für die Diesel-SNF werden die derzeitigen TREMOD-Werte, differenziert nach Größenklassen und Euro-Stufen weiter verwendet.

Für LNG-, CNG- und Dual-Fuel-Fahrzeuge basieren die Verbräuche auf Arbeiten im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, abgeleitet aus Informationen der Industrie. Die Differenz der Verbräuche zwischen den Gruppen N3-s und N3-I sind entsprechend der relativen Verbrauchsänderung zwischen Diesel-N3-s und N3-I-Fahrzeugen angenommen.

Bei N2-Fahrzeugen sind nur CNG-SNF relevant. Der Verbrauchsfaktor gegenüber Diesel wird aus der Studie [KLOESS et al., 2011] entnommen.

Die Verbrauchsfaktoren gegenüber Diesel für die rein elektrisch angetriebenen Konzepte (BEV, FCEV- und HO-D-SNF im Elektrobetrieb) sind aus [DELFT, 2013b] entnommen. Basis sind zum einen ein typischer Verteiler-Lkw und ein 40-Tonner im Jahr 2012. Die Differenz der Verbräuche zwischen den Gruppen N3-s und N3-I sind entsprechend der relativen Verbrauchsänderung zwischen Diesel-N3-s und N3-I-Fahrzeugen.

Für die PHEV-D im Dieselmotorbetrieb sind für alle Größenklassen die Verbräuche der Dieselfahrzeuge übernommen.

Im Elektrobetrieb ist das Vorgehen nach Größenklasse differenziert:

- Für N2 werden die Werte der BEV aus [DELFT, 2013b] angenommen.
- Autobahnverbräuche N3-I und N3-s: Es werden die Verbräuche der HO-Lkw aus [DELFT, 2013b] übernommen.
- Inner- und Außerortsverbräuche N3-I und N3-s: Es wird ein Faktor aus den relativen Mehrverbräuchen der Diesel N3-I bzw. N3-s gegenüber dem Diesel-N2 gebildet und mit dem Basisverbrauch der N2-BEV multipliziert.

Die getroffenen Annahmen führen zu den in Tabelle 31 bis Tabelle 33 dargestellten spezifischen Verbräuchen in 2013 für die verschiedenen Antriebskonzepte.

Antrieb	AB	IO	AO
Diesel	10,6	14,1	10,8
CNG	14,4	19,2	14,7
LNG	15,5	20,6	15,8
Dual Fuel	10,6	14,1	10,8
HO-Lkw Elektrisch	6,3	0,0	0,0
HO-Lkw Diesel	10,6	14,1	10,8
FCEV	8,9	11,9	9,1
PHEV-D Diesel	10,6	14,1	10,8
PHEV-D Elektrisch	6,3	7,1	6,7

Tab. 31: Spezifische Verbräuche für N3-s SNF in 2013 (EURO 6 falls Diesel) [MJ/km]

Antrieb	AB	IO	AO
Diesel	8,89	11,07	8,94
CNG	12,09	15,06	12,16
LNG	12,96	16,14	13,03
Dual Fuel	8,89	11,07	8,94
HO-Lkw Elektrisch	5,30	0,00	0,00
HO-Lkw Diesel	8,89	11,07	8,94
FCEV	7,46	9,29	7,50
PHEV-D Diesel	8,89	11,07	8,94
PHEV-D Elektrisch	5,30	5,54	5,54

Tab. 32: Spezifische Verbräuche für N3-I SNF in 2013 (EURO 6 falls Diesel) [MJ/km]

Antrieb	AB	IO	AO
Diesel	5,25	4,77	4,68
CNG	7,13	6,48	6,36
FCEV	4,29	3,89	3,82
BEV	2,94	2,67	2,62
PHEV-D Diesel	5,25	4,77	4,68
PHEV-D Elektrisch	2,94	2,67	2,62

Tab. 33: Spezifische Verbräuche für N2 SNF in 2013 für EURO IV (falls ICE-Konzept) [MJ/km]

7.2 Annahmen im Szenario bis 2050

7.2.1 Pkw

Die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs je Antriebskonzept orientiert sich an dem in [JEC, 2013] abgeleiteten Potenzial, siehe dazu Kapitel 7.1.1.

Dabei werden in der Studie heutige Fahrzeuge (differenziert nach Antriebskonzept) mit zukünftigen, also inklusive der aus heutiger Sicht denkbaren Effizienztechnologien, verglichen. Diese Fahrzeuggruppen werden mit „2010“ und „2020+“ bezeichnet.

Für das aktuelle Basisszenario wird die in [JEC, 2013] zwischen den Fahrzeuggruppen „2010“ und „2020+“ berechnete Minderung in den Szenarien wie in Tabelle 34 dargestellt umgesetzt

Dies ergibt die in Bild 5 beispielhaft für einige Antriebskonzepte dargestellten Minderungsverläufe.

Über die in [JEC, 2013] betrachteten technischen Minderungspotenziale hinausgehende Verbrauchsminderungen werden nicht angenommen. Gründe hierfür sind:

- [JEC, 2013] bildet die bekannten Effizienztechnologien gut ab. Insbesondere bei den neuen Antriebskomponenten und deren Zusammenspiel basieren die berechneten Werte für die zukünftigen Fahrzeuge auf „best-engineering estimates“ der Studierersteller.
- Unbekannte Technologien sind nicht quantifizierbar, es soll aber auch kein „autonomer technologischer Fortschritt“ angenommen werden, insbesondere vor dem Hintergrund, dass mit zunehmendem Wirkungsgrad weitere Effizienzgewinne immer schwieriger werden.

Weitere Unsicherheiten entstehen dadurch, dass in [JEC, 2013] bei der Effizienzentwicklung nicht zwi-

Jahr	2020	2030	2040	2050
Realisiertes Minderungspotenzial	33 %	67 %	89 %	100 %

Tab. 34: Angenommene Realisierung des in [JEC, 2013a] abgeleiteten technischen Minderungspotenzials für Pkw

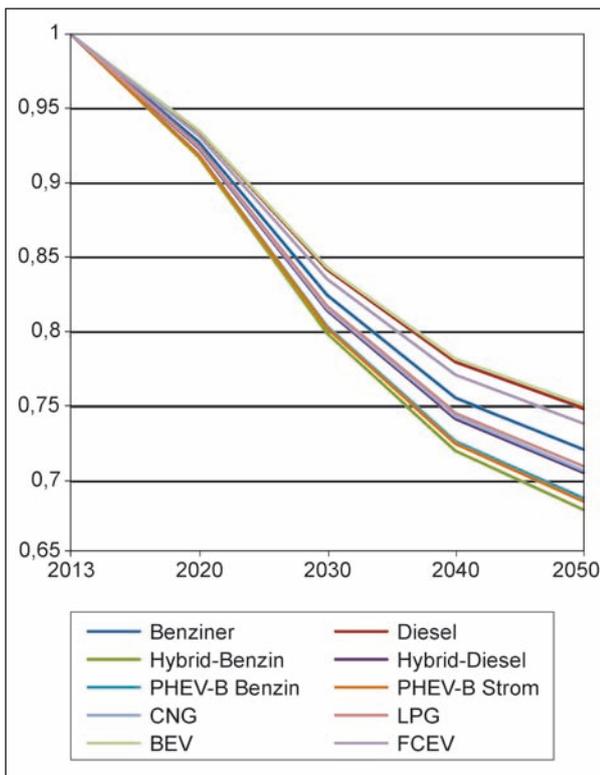


Bild 5: Im Szenario angenommene Minderungsverläufe für ausgewählte Antriebskonzepte

schen Größenklassen unterschieden wird. Zudem wird die Entwicklung nach NEFZ auf den Realverbrauch übertragen.

Bei den reinen Verbrennungsmotor-Konzepten sind für die Berechnung der Verbrauchsentwicklung jeweils die Direkteinspritzer-Varianten (DISI-ICE) der heutigen und zukünftigen Fahrzeugkonzepte verwendet worden.

Bei der Effizienzentwicklung der Hybrid-Konzepte wird nach dem Verwendeten Energieträger differenziert. Veränderungen im Anteil der Betriebsmodi werden über die Entwicklung der Fahrleistung abgebildet

Für die elektrischen Konzepte ergeben sich etwas geringere Steigerungsraten in der Effizienz, durch den bereits in 2010 deutlich höheren Wirkungsgrad als die ICE-Konzepte.

7.2.2 Leichte Nutzfahrzeuge

Die Effizienzentwicklung der leichten Nutzfahrzeuge, differenziert nach Antriebskonzept, entspricht der Entwicklung bei den Pkw. Annahmen und Quellen sind in Kapitel 7.2.1 zu finden.

7.2.3 Schwere Nutzfahrzeuge

Die Effizienzentwicklung für SNF orientiert sich an den in [KLOESS et al., 2011] und [DELFT, 2013b] ermittelten Potenzial. Dabei wird die in [KLOESS et al., 2011] angenommene Effizienzentwicklung folgendermaßen auf das Szenario übertragen:

- „Potenzial 2010“ entspricht den neu zugelassenen SNF im Jahr 2030.
- „Potenzial 2050“ entspricht den neu zugelassenen SNF im Jahr 2050.

Dabei wird, analog zu den Pkw, angenommen, dass das in der Studie quantifizierte Effizienzpotenzial bis 2050 komplett ausgeschöpft wird. In [KLOESS et al., 2011] werden die Maßnahmen als von Experten „...in weiterer Zukunft mit der bis 2050 erwarteten Technologieentwicklung als realistisch angesehen“ [KLOESS et al., 2011, S. 39]. Die in der Studie betrachteten Effizienztechnologien sind in Tabelle 35 dargestellt.

Mit den Annahmen zu den Jahren, in denen die Technologiepotenziale realisiert werden (2030 bzw. 2050), kann für die in [KLOESS et al., 2011] enthaltenen Fahrzeuge die Effizienzentwicklung direkt entnommen werden.

Für den in der Studie nicht enthaltenen CNG-N3-I sind folgende Analogieschlüsse getroffen:

- die nicht-motorische Effizienzsteigerung entspricht der von Diesel-N3-I und
- die motorische Effizienzsteigerung (ICE-Paket) entspricht der Steigerung von CNG-N2-Fahrzeugen.

Für die aus der Studie [DELFT, 2013b] entnommenen elektrischen Antriebskonzepte sind bis 2030 die dort angegebenen Effizienzsteigerungen angenommen. Dabei ist für die in beiden Studien ([DELFT, 2013b und KLOESS et al., 2011]) enthaltenen Diesel-SNF bis 2030 eine ähnliche Entwicklung angenommen.

Für den Zeitraum von 2030 bis 2050 sind in [DELFT, 2013b] keine Angaben enthalten. Hier sind

Technologie	2030	2050
Steigerung Getriebewirkungsgrad		
Steigerung ICE-Wirkungsgrad		
Downsizing (Verkleinerung von Hubraum)		
Downspeeding (Verlängerung der Endübersetzung)		
Rekuperation/Boost		
Elektrifizierung Nebenverbraucher		
Waste Heat Recovery (Wiedernutzung eines Teils der Abwärme z. B. über einen Dampfkraftprozess)		
Reduktion Fahrwiderstände		

Tab. 35: Im Szenario berücksichtigte SNF-Effizienztechnologien bis 2050 (blau)

die Potenziale der Studie [KLOESS et al., 2011] für die Wirkungsgradsteigerung E-Motor und für die Verringerung der Fahrwiderstände auf die elektrischen Antriebskonzepte übertragen worden.

8 Übrige Emissionsfaktoren

Die Emissionskennzahlen des Straßenverkehrs stammen im Wesentlichen aus dem HBEFA 3.2. Entsprechend der Systematik im HBEFA werden in TREMOD die folgenden Arten an Emissionsfaktoren unterschieden:

- Emissionsfaktoren im warmen Betriebszustand [in g/Fahrzeug-km]: Diese Faktoren für Motoren im warmen Betriebszustand hängen ab vom Fahrverhalten bzw. der Verkehrssituation.
- Startzuschläge [in g/Startvorgang]: Diese Emissionszuschläge nach dem Start der Motoren hängen von der Umgebungstemperatur beim Startvorgang, der Standzeit vor dem Start (als Näherung für die Motortemperatur beim Starten) und der Fahrlänge anschließend an den Startvorgang ab. Diese Parameter werden in HBEFA zu „Umgebungsmuster“ zusammengefasst.
- Verdampfungsemissionen (relevant für HC, NMHC, Benzol). HBEFA unterscheidet nach:
 - Verdampfung nach Motorabstellen (= Heiß- bzw. Warm-Abstellen) [in g/Abstellvorgang],
 - Verdampfung infolge Tankatmung (gelegentlich auch als „Verdunstungsemissionen“ bezeichnet) [in g/Tag und Fahrzeug],

- Running Losses (in g/Fahrzeug-km): Emissionen während der Fahrt, die keine Auspuffemissionen sind.

Emissionsfaktoren liegen bisher vor allem für die konventionellen Antriebsarten mit Benzin- und Dieselantrieb vor. Für mehrere alternative Antriebskonzepte gibt es im HBEFA 3.2 Werte, die auf bisher wenigen Messwerten beruhen (siehe Kapitel 11.2.1). für die meisten hier betrachteten neuen Antriebskonzepte mussten daher Annahmen getroffen werden. Dabei wird grundsätzlich unterstellt, dass neue Antriebskonzepte wie PHEV im Verbrennungsbetrieb das gleiche Emissionsverhalten aufweisen wie die konventionellen Fahrzeuge mit gleichem Emissionsstandard.

Die Emissionsstandards sind bis zur Stufe Euro-6c berücksichtigt. Eine weitergehende spezifische Minderung der Emissionen nach 2018 wurde bisher nicht angenommen.

9 Bereitstellungspfade und Eigenschaften der Energieträger

Wichtige Kennwerte der Energieträger für die Klimagas-, Energie- und Schadstoffbilanzierung in TREMOD sind:

- Energiegehalt (bei Kraftstoffen: Heizwert),
- Dichte,
- Kohlenstoffgehalt und die daraus abgeleiteten CO₂-Emissionsfaktoren,
- Schwefelgehalt und die daraus abgeleiteten SO₂-Emissionsfaktoren,
- Bleigehalt (bis 1996),
- Emissionen der Energiebereitstellung.

Weitere Komponenten, die einen Einfluss auf die in TREMOD enthaltenen Emissionsfaktoren haben, sind der Aromatengehalt (Benzol, Toluol, Xylol). Dieser hat einen direkten Einfluss auf die Verdunstungsemissionen.

Die Emissionen der Energiebereitstellung werden in TREMOD berücksichtigt, um einen wesentlichen Teil der verkehrlich verursachten Emissionen zu erfassen, die außerhalb des Sektors Verkehr entstehen und so eine Vergleichbarkeit der Umweltwirkungen verschiedener Antriebskonzepte zu ermöglichen.

In TREMOD erfolgt die Bilanzierung der kraftstoffabhängigen Emissionen und der Emissionen für die Energiebereitstellung grundsätzlich auf Basis des Energieinhaltes (meist in MJ). Die Darstellung in kg oder Liter dient v. a. der Vergleichbarkeit.

Die CO₂-Emissionen werden unter Annahme der vollständigen Oxidation des Kohlenstoffs im Kraftstoff berechnet. Für die direkten CO₂-Emissionen werden kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes, bezogen auf den Energieinhalt der Kraftstoffe, verwendet. Die direkten CO₂-Emissionen der Biokraftstoffe werden ebenfalls mit ihrem Kohlenstoffgehalt berechnet. Die verminderte Klimawirksamkeit der Biokraftstoffe durch Aufnahme von atmosphärisches CO₂ während der Wachstumsphase des biogenen Grundstoffes wird über „negative“ Bereitstellungsemissionen abgebildet.

Datengrundlage für die Kennzahlen für Kraftstoffe waren bisher v. a. nationale Angaben der AG Energiebilanzen und die vom Umweltbundesamt im nationalen Inventarreport [UBA, 2013] verwendeten Werte, insbesondere für die direkten CO₂-Emissionen. Mit der RED (Renewable Energy Directive) wurden Kennzahlen für die wichtigsten konventionellen und erneuerbaren Kraftstoffe abgeleitet. Diese Arbeiten beinhalten auch Kennzahlen zu klimawirksamen Gasen aus der Kraftstoffbereitstellung, sowie die energetischen Verluste der Bereitstellungskette, jedoch keine Emissionskennzahlen für die übrigen Schadstoffkomponenten.

9.1 Eigenschaften der Endenergieträger

Endenergieträger lassen sich durch die Eigenschaft der Primärenergiequelle in die Gruppen

- fossil,
- biogen und
- strombasiert

einteilen.

9.1.1 Fossile Endenergieträger

Die fossilen Endenergieträger werden dabei entweder über die Erdölraffination gewonnen, oder aus fossilen Gasen über verschiedene Reinigungsstufen hergestellt. Wesentliche Produkte der Erdöl-

raffination für den Verkehr sind dabei Benzin (zur Verwendung in Ottomotoren), Diesel (Dieselmotoren) und Kerosin (Flugzeugturbinen).

Nebenprodukt der Raffination ist die als Flüssiggas (LPG) verkaufte Mischung aus verflüssigten Propan und Butan. Das Gemisch lässt sich dabei bereits bei relativ geringem Druck und bei Außentemperatur verflüssigen, so dass mit einfachem Aufwand mit konventionellen Kraftstoffen vergleichbare Energiedichten erreicht werden können. Neben der Produktion in der Raffinerie fällt LPG zudem als Begleitgas bei der Förderung von Erdöl und -gas an.

Erdgas, als weitere fossile Energiequelle, wird im Verkehr als Compressed Natural Gas (CNG) verwendet. Zur Erhöhung der Energiedichte kann dieses zudem in einem weiteren Umwandlungsschritt verflüssigt werden (Liquified Natural Gas = LNG). Die Verflüssigung erfordert dabei Temperaturen von kleiner als -160°C .

9.1.2 Biogene Endenergieträger

Biogene Endenergieträger werden entweder aus der Vergärung von biogenen Abfällen oder aus speziell für die energetische Verwendung angebaute Biomasse hergestellt. Der C-Anteil des erstellten Endenergieträgers wurde dabei beim Wachstum der Biomasse aus der Luft entnommen. Für die Klimabewertung sind aber zudem Faktoren wie fossiler Energieeinsatz, Lachgas- und Methanemission der Herstellung, sowie direkte und indirekte Landnutzungsänderungen entscheidend.

(Bio-)Ethanol kann in Ottomotoren eingesetzt werden und wird aus fermentierbaren Zucker bzw. Stärke erzeugt. Typische Pflanzen zur Ethanolproduktion sind Mais, Weizen, Zuckerrohr und -rübe.

Biodiesel (Fettsäuremethylester = FAME) wird in Dieselmotoren eingesetzt und wird aus stark ölhaltigen Pflanzen durch Umesterung der Ursprungöle gewonnen (das als Grundstoff eingesetzte Pflanzenöl wird in geringen Mengen auch direkt als Kraftstoff eingesetzt). Eingesetzt werden hierzu derzeit zumeist Soja, Raps und Ölpalmen. Geringen Anteil hat auch die Herstellung von FAME aus pflanzlichem oder tierischem Abfallöl.

Biomethan wird aus aufbereiteten Biogas oder als Synthesegas (Synthetic Natural Gas = SNG) produziert. Biogas entsteht beim Zersetzen von biogenen Material unter Sauerstoffabschluss. Neben

Energiepflanzen werden biogene Abfälle und Gülle als Basismaterial der Fermentierung eingesetzt. Die Möglichkeit Biomethan über Synthesegas zu produzieren befindet sich derzeit noch in der Erprobungsphase. Dabei soll insbesondere auf Holz oder Stroh als Rohstoffe zurückgegriffen werden, welche über den Prozess der Biomassevergasung und anschließender Reinigung zu Biomethan umgewandelt werden soll.

Technisch verwandt mit der Produktion von Biomethan aus Synthesegas, und in einem ähnlichen Entwicklungsstadium, ist die Herstellung von Biomass-to-Liquid-(BtL-)Kraftstoffen. Für die Produktion dieser Kraftstoffe wird das Synthesegas zusätzlich über Fischer-Tropsch-(FT-)Synthese in einen flüssigen Energieträger umgewandelt. Über die Steuerung der Prozessparameter der FT-Synthese können die Eigenschaften des produzierten Kraftstoffs so gewählt werden, dass er sowohl Kerosin, Benzin als auch Diesel-Kraftstoffe substituieren kann.

9.1.3 Strombasierte Endenergieträger

Strombasierte Endenergieträger sind, neben Strom selber, aus mit Strom als hauptsächliche Energiequelle hergestellte chemische Energieträger. Dabei kann praktisch jede Primärenergiequelle, unabhängig ob erneuerbar oder fossil, zur Stromherstellung verwendet werden. Je nach verwendeten Strommix unterscheidet sich dabei die Klimawirkung der Kraftstoffe extrem, siehe dazu beispielsweise [IFEU, 2011a].

Wasserstoff (H_2) kann in Brennstoffzellen sehr effizient zu Strom umgewandelt werden. Es wird bei etwa 700 bar in Drucktanks im Fahrzeug gespeichert und erlaubt damit eine mit konventionellen Kraftstoffen vergleichbare bereitgestellte Energiemenge an den Rädern. Die Herstellung von H_2 mittels Elektrolyse wird derzeit im Rahmen von Klimaschutzstudien diskutiert, da sie mittels der Verwendung von EE-Strom einen nahezu THG-neutralen Betrieb von Fahrzeugen erlaubt. Derzeit wird dieser Erzeugungspfad nicht in größeren Maßstab umgesetzt. Für die heutige H_2 -Produktion (v. a. zur Versorgung der chemischen Industrie) wird das H_2 direkt aus Erdgas oder als Nebenprodukt der Erdölraffination erzeugt (als dann fossilen Endenergieträger).

Power-to-Gas (PtG) bedeutet die Produktion von Methan mittels über Elektrolyse erzeugten Wasserstoffes und CO_2 . Das Methan kann danach als

Substitut für CNG bzw. LNG eingesetzt werden. Das CO₂ kann dabei aus einer dedizierten CO₂-Quelle stammen, etwa einem Kraftwerk, oder, mit schlechterem Wirkungsgrad, direkt aus der Luft entnommen werden. Interessant ist dabei auch die Kombination von Methanisierung und Hochtemperatur-elektrolyse in einem Prozess, da die Abwärme der Methanisierung zur Wasserstoffgewinnung eingesetzt werden kann. Durch den zusätzlichen Prozessschritt gegenüber der H₂-Herstellung ist der Wirkungsgrad zwischen produzierter Menge Endenergieträger und Stromeinsatz aber immer geringer als bei der Produktion von H₂. PtG wird derzeit nur in Versuchsanlagen produziert. Ebenso wie bei H₂ hängen die THG-Emissionen der Energiebereitstellung von dem verwendeten Strommix ab, durch den schlechteren Wirkungsgrad sind die Emissionsfaktoren jedoch tendenziell schlechter als bei Wasserstoff. Mit der Verwendung von EE-Strom in Kombination einer biogenen CO₂-Quelle kann aber auch PtG nahezu klimaneutral sein.

Für Power-to-Liquid (PtL) wird PtG über die FT-Synthese in einen flüssigen Energieträger umgewandelt. Über die Steuerung der Prozessparameter der FT-Synthese können die Eigenschaften des produzierten Kraftstoffs so gewählt werden, dass er sowohl Kerosin, Benzin als auch Diesel-Kraftstoffe substituieren kann.

9.1.4 Definition der Energieträgereigenschaften in TREMOD

Für die konventionellen Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Kerosin), für Flüssiggas und zum Teil für die Biokraftstoffe werden die Umrechnungsfaktoren der AG Energiebilanzen verwendet. Bei Erdgas werden die in [JEC, 2013] festgelegten Konventionen verwendet.

Die wichtigsten verwendeten Energiekennzahlen sind in Tabelle 36 dargestellt.

9.2 Emissionen der Bereitstellung

Die Emissionsfaktoren für die Bereitstellung der Energieträger beinhalten alle Aufwendungen der Kraftstoffherstellung bzw. Stromerzeugung inklusive Förderung, Aufbereitung und Transport der Primärenergieträger. Dieser Prozessabschnitt wird heutzutage auch als „Well-to-Tank“ (WtT) bezeichnet und ergibt, zusammen mit den als „Tank-to-Wheel“ (TtW) bezeichneten direkten Emissions-

faktoren am Fahrzeug die als „Well-to-Wheel“ (WtW) bezeichneten Gesamtemissionen.

In der Vergangenheit wurden die Emissionen der Energiebereitstellung vor allem dann einbezogen, wenn kraftstoff-basierte mit strombetriebenen Verkehrsmittel verglichen wurden. Inzwischen hat das Thema durch die Einführung von Biokraftstoffen und die politische Festlegung von Minderungszielen, Quoten und Qualitätsstandards eine neue Bedeutung gewonnen. So wurden mit der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) [JEC, 2013] auch die Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe und deren Herstellungspfade untersucht und repräsentative Kennzahlen für alle gängigen Energieträger mit verschiedenen Herkunftsorten ermittelt, die Grundlage der Überprüfung der RED sind.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Transparenz mit den RED-Vorgabewerten wurden die Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung in TREMOD weitgehend auf RED-kompatible Werte umgestellt. Einer direkten Übernahme stehen allerdings mehrere Hemmnisse entgegen:

- Die nationale Emissionsberichterstattung verwendet z. T. bisher eigene Kennzahlen, die in TREMOD berücksichtigt werden müssen.
- Die Vorgabewerte der RED machen nur Angaben zu den energetischen Verlusten und den

	Heizwert MJ/kg	Dichte kg/l	CO ₂ kg/TJ
Benzin	45,543	0,742	72.000
Diesel	42,960	0,832	74.000
Kerosin	42,800	0,800	73.600
Ethanol	26,658	0,790	72.000
Biodiesel	37,242	0,879	70.800
Pflanzenöl	37,242	0,920	70.800
CNG	45,100	0,716	56.000
Biomethan	45,100	0,716	56.000
LNG	50		56.000
LPG	45,969	0,600	65.000
H ₂	120,100		

Anmerkungen:
 Heizwert Diesel bis 1992: 42.704 MJ/kg; Kerosin bis 2003: 43 MJ/kg; CO₂-Werte Ethanol wie Benzin, Pflanzenöl wie Biodiesel
 (Quellen: AG Energiebilanzen, BAFA; LNG/H₂/CNG-Heizwert: [JEC2013], CNG-Dichte: HBEFA3.1, CNG-CO₂: Umweltbundesamt; Biomethan wie CNG)

Tab. 36: Heizwert, Dichte und CO₂-Faktoren für verschiedene Kraftstoffe

Klimagasemissionen und nicht zu den übrigen Schadstoffemissionen.

Aus diesem Grund wurden und werden derzeit Studien durchgeführt, mit dem Ziel, die übrigen Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung in Übereinstimmung mit den Werten der RED abzuleiten. Hierzu liegt z. B. eine Kurzstudie des IFEU für einige relevante Biokraftstoffe vor [IFEU, 2013c]. Diese werden in der aktuellen TREMOD-version verwendet. Eine Aktualisierung und Erweiterung wird derzeit im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet

Andere aktuelle Arbeiten wurden dazu im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) durchgeführt [MKS, 2013]. Kennzahlen für einige Kraftstoffe wurden inzwischen veröffentlicht. Eine umfassende abgestimmte Datenbasis ist jedoch bisher nicht öffentlich verfügbar.

In TREMOD werden daher für alle übrigen Kraftstoffe Kennzahlen aus den Arbeiten von LBST verwendet. LBST war an den WtW-Studien zur RED und den Arbeiten der MKS beteiligt. Somit ist gewährleistet, dass die Kennzahlen untereinander konsistent und kompatibel mit den WtW-Daten zur RED sind.

9.3 Eigenschaften der Energieträgeraggregate

Energieträgeraggregate (ETA) sind über die gegenüber dem Fahrzeugkonzept relevanten physikalischen Kraftstoffeigenschaften definiert und können aus verschiedenen Endenergieträgern gemischt sein. In TREMOD kann jahresfein für die infrage kommenden Endenergieträger ein beliebiger Mix definiert werden. Relevante Eigenschaften der chemischen ETA sind dabei:

- Verwendbarkeit für Otto-/Dieselmotoren, Brennstoffzelle,
- Klopfestigkeit (Oktanzahl/Methanzahl),
- Zündwilligkeit (Cetanzahl),
- Aggregatzustand bei Speicherung im Fahrzeug,
- Temperatur und Druck bei Speicherung im Fahrzeug.

9.3.1 Benzinäquivalente Kraftstoffe (BEQ)

Benzinäquivalente Kraftstoffe (BEQ) werden in Ottomotoren verwendet. Üblicherweise haben

heute angebotene BEQ mindestens eine Oktanzahl (= Maß der Klopfestigkeit) von ROZ 91 (Normal-Benzin). BEQ werden flüssig unter Normaldruck und bei Außentemperatur im Fahrzeugtank gespeichert. Der Heizwert variiert mit den verwendeten Endenergieträgern und beträgt je nach Mischungsverhältnis zwischen 26 (reines Ethanol) und 46 (reines Benzin) MJ/kg. Die Dichte des Kraftstoffs liegt bei etwa 0,75 kg/l.

BEQ lassen sich aus den Endenergieträgern

- Benzin,
- Ethanol,
- BtL und
- PtL

mischen.

9.3.2 Dieselläquivalente Kraftstoffe (DEQ)

Dieselläquivalente Kraftstoffe (DEQ) werden in Dieselmotoren verwendet, dabei wird der Kraftstoff so weit verdichtet, bis dieser von selbst zündet. Wesentliches Qualitätsmerkmal ist dabei die Zündwilligkeit des Kraftstoffs, die heute mindestens bei einem Cetanwert von 51 liegt [van BASSHUYSEN et al. (2007)]. DEQ werden flüssig unter Normaldruck und bei Außentemperatur im Fahrzeugtank gespeichert. Der Heizwert variiert mit den verwendeten Endenergieträgern und beträgt je nach Mischungsverhältnis zwischen 37 (Biodiesel) und knapp 43 (fossiler Diesel) MJ/kg. Die Dichte des Kraftstoffs liegt zwischen 0,83 und 0,92 kg/l.

DEQ lassen sich aus den Endenergieträgern

- Diesel,
- Biodiesel (FAME),
- BtL und
- PtL

mischen.

9.3.3 Methanbasierte Kraftstoffe (CMG)

Methanbasierte Kraftstoffe (CMG) bestehen zum Hauptteil aus Methan. In geringen Mengen können weitere gasförmige Kohlenwasserstoffe oder reiner Wasserstoff in dem Gasgemisch vorkommen. Insbesondere für CNG stellt der Methananteil im Gas ein entscheidendes Qualitätskriterium dar. CMG

sind im Vergleich zu BEQ klopffester und können daher höher verdichtet werden. Sie erreichen im Allgemeinen Oktanzahlen zwischen 120 und 130. CMG werden gasförmig unter Druck (etwa 200 bar) im Fahrzeug mitgeführt.

CMG lassen sich aus den Endenergieträgern

- CNG,
- Biomethan und
- PtG

mischen.

9.3.4 Verflüssigte methanbasierte Kraftstoffe (LMG)

Verflüssigte methanbasierte Kraftstoffe (LMG) sind CMG, die auf extrem niedrige Temperaturen gekühlt werden (um -160 °C) und dann bei annähernd Normaldruck in Kytanks im Fahrzeug gespeichert. Der Vorteil von LMG gegenüber CMG ist dabei die höhere Energiedichte. Da LMG lediglich verflüssigtes CMG ist, lassen sich dieselben Endenergieträger zur Herstellung des Kraftstoffs nutzen.

10 Szenario bis 2050

10.1 Szenariendesign

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein Szenario modelliert, das einen Teil der hier beschriebenen Technologien und Antriebsarten berücksichtigt. Es baut auf dem TREMOD-Trendszenario auf. Daraus ergeben sich folgende prinzipiellen Annahmen:

- Die Verkehrsleistungsentwicklung lehnt sich bis 2030 an die Verkehrsprognose 2030 des BMVI an [BVU et al., 2014].
- Das Szenario wird bis 2050 fortgeschrieben, indem die relativen Verkehrsleistungszunahmen aus dem Referenzszenario des Energiekonzepts der Bundesregierung ab 2030 [EWI et al., 2010] verwendet werden.
- Bis 2030 kommen die Konzepte und Antriebsenergien in den Verkehr, die bereits heute etabliert sind (v. a. BEV, PHEV).
- Weitere Konzepte werden erst nach 2030 eingeführt.

10.2 Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung

Die Verkehrsprognose 2030 geht beim motorisierten Individualverkehr zwischen 2010 und 2030 von einer Zunahme von knapp 10 % aus. Bis 2030 geht die Verkehrsleistung aufgrund des angenommenen Bevölkerungsrückgangs im Energiekonzept um rund 6 % zurück.

Beim Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (Busse, kommunaler Schienenverkehr) sind die Tendenzen ähnlich, doch ist der Anstieg bis 2030 geringer und der nachfolgende Rückgang bis 2050 höher als beim MIV.

Der Straßengüterverkehr wächst dagegen bis 2030 noch deutlich um fast 40 % gegenüber 2010 an und steigt auch danach weiter, wenn auch mit einer um gut die Hälfte reduzierten prozentualen Wachstumsrate. Die Eckdaten sind in Tabelle 37 dargestellt.

	MIV (Mrd. Pkm)	ÖSPV (Mrd. Pkm)	GV (Mrd. tkm)
2010	902,4	78,1	437,3
2030	991,8	82,8	607,4
2050	931,7	75,8	720,7
Veränderungen			
2010-2030	+9,9 %	+6,0 %	+38,9 %
2030-2050	-6,1 %	-8,5 %	+18,7

Tab. 37: Entwicklung der Verkehrsleistungen 2010-2030 (Quellen: Verkehrsprognose 2030; Energiekonzept der Bundesregierung 2010)

Bezugs-jahr	Ge-samt	Pkw	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2010	710	596	16	3,7	38	54	3,5
2011	722	605	16	3,6	38	56	3,5
2012	723	607	16	3,6	39	54	3,5
2013	730	613	16	3,6	39	55	3,5
2030	797	658	16	3,8	50	67	4,7
2050	764	617	16	3,8	50	74	4,7
Anmerkungen: Bis 2030 Entwicklung entsprechend der Verkehrsprognose 2030; danach Änderungsraten entsprechend dem Referenzszenario im Energiekonzept der Bundesregierung							

Tab. 38: Entwicklung der Fahrleistungen von 2010 bis 2050 (in Mrd. Fz-km)

Aus den Verkehrsleistungen wird für TREMOD eine Fahrleistungsentwicklung abgeschätzt. Beim Pkw-Verkehr folgt die Fahrleistungsentwicklung weitgehend der Verkehrsleistung.

Die Fahrleistung der leichten Nutzfahrzeuge steigt, dem Trend der letzten Jahre folgend, weiterhin deutlich an und liegt im Jahr 2030 um 32 % über dem Wert von 2010. Bis 2050 wird kein weiterer Anstieg angenommen.

Beim Güterverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen wird die zusätzliche Verkehrsleistung überwiegend mit großen Fahrzeugen erbracht. Außerdem wird angenommen, dass die Beladung pro Fahrzeug weiterhin zunimmt. Insgesamt steigt die Fahrleistung der schweren Nutzfahrzeuge gegenüber 2010 bis 2030 um 24 % und von 2030 bis 2050 nochmal um 11 % an.

10.3 Annahmen zur Flottenzusammensetzung

Entscheidend für die zukünftige Flottenzusammensetzung und Marktdurchdringung mit neuen Antriebskonzepten ist die Anzahl und Zusammensetzung der jährlichen Neuzulassungen. Im Trendszenario wurde hierbei v. a. das Ziel der Bundesregierung berücksichtigt, mehr Elektrofahrzeuge in den Markt zu bringen. Das ursprüngliche Ziel, im Jahr 2020 eine Million Fahrzeuge im Bestand zu haben und im Jahr 2030 sechs Millionen Fahrzeuge, erscheint aus aktueller Sicht wenig realistisch. Mit dem Umweltbundesamt wurde daher festgelegt, dass im TREMOD-Trendszenario im Jahr 2020 etwa 500.000 Elektrofahrzeuge und im Jahr 2030 etwa drei Millionen Elektrofahrzeuge im Bestand sein sollen. Dies wird umgesetzt, indem ab 2013 ein jährlich stark zunehmender Anteil an Elektrofahrzeugen (batterie-elektrische und Plug-in-

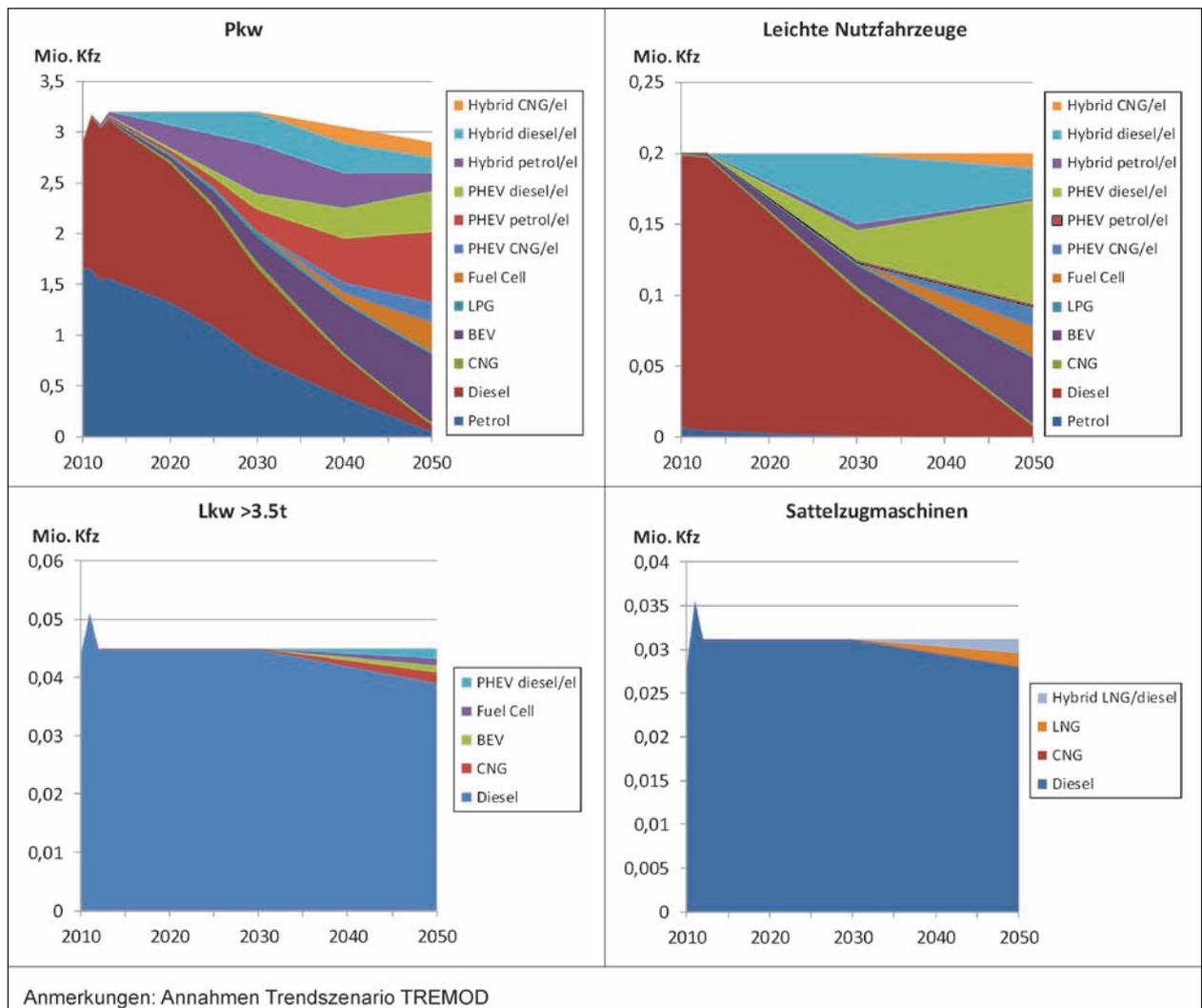


Bild 6: Annahmen zur Entwicklung der Neuzulassungen nach Antriebskonzepten 2010-2050

Hybrid-Fahrzeuge) bei den neuzugelassenen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen angenommen wird.

Bei den Pkw werden so im Jahr 2020 knapp 95.000 (3 % Anteil) und im Jahr 2030 600.000 (19 % Anteil) Elektrofahrzeuge zugelassen (2013: 6.000 Fahrzeuge). Bei den leichten Nutzfahrzeugen wird eine lineare Zunahme der Neuzulassungen auf 42.000 Fahrzeuge im Jahr 2030 angenommen. Bei den übrigen Fahrzeugkategorien werden bis 2030 keine neuen Antriebskonzepte eingeführt.

Ein möglicher Trend zur Einführung bestimmter neuer Fahrzeugkonzepte nach 2030 ist derzeit nicht erkennbar. Es wird daher vor allem von einer weiteren Elektrifizierung der leichteren Fahrzeuge ausgegangen. Außerdem gelangen Brennstoffzellenfahrzeuge bei den leichteren Fahrzeugen sowie Konzepte mit LNG bei den schweren Nutzfahrzeugen mit moderaten Anteilen in den Markt.

Aus den Annahmen zur Entwicklung der Neuzulassungen ergeben sich die in Bild 7 dargestellten Fahrzeugbestände bis 2050.

Bei den Pkw und LNF erreichen die Elektrofahrzeuge einen Anteil von 46 % bzw. 47 % am Bestand. Die Brennstoffzellenfahrzeuge erreichen 5 % bzw. 6 %.

Bei den schweren Nutzfahrzeugen dominieren weiterhin die Dieselfahrzeuge: Im Jahr 2050 liegt der Anteil der Elektrofahrzeuge bei 2,9 %, für Fahrzeuge mit LNG-Konzepten bei 2,5 % und für Fahrzeuge mit Brennstoffzelle bei 1,1 %.

Damit lässt das Szenario nach 2030 offen, welche Konzepte sich jenseits der Elektromobilität etablieren könnten. Brennstoffzellen- und LNG-Fahrzeuge nehmen hier eher die Funktion eines Platzhalters ein, die mit geringen Bestandsanteilen kaum Anteil an den Gesamtemissionen haben.

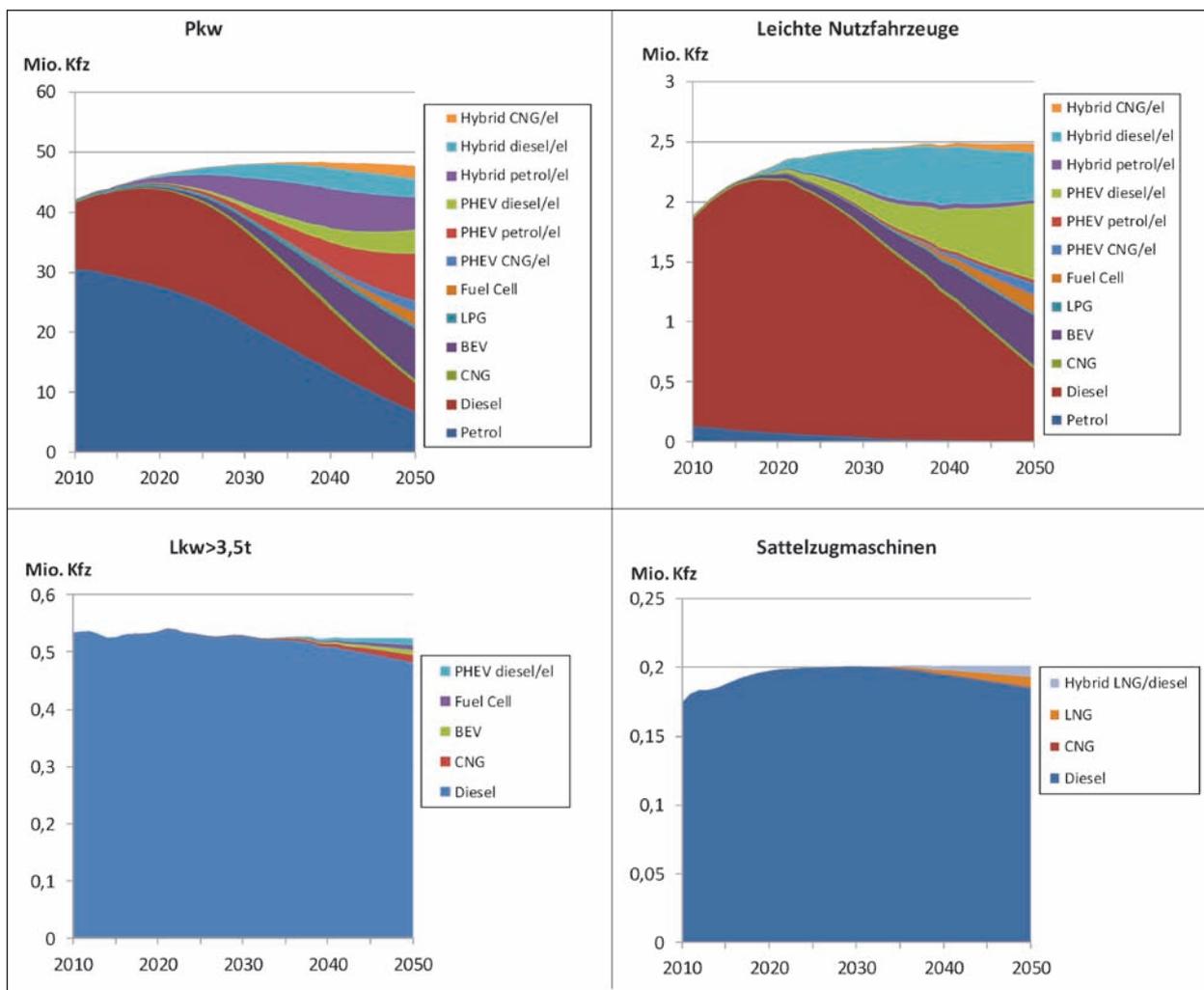


Bild 7: Entwicklung der Fahrzeugbestände nach Antriebskonzepten 2010-2050 im Szenario (Quelle: Ergebnisse Szenarienrechnung TREMOD)

10.4 Ergebnisse

Die mit TREMOD berechneten Energieverbräuche und Schadstoffemissionen sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Gezeigt werden die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Fahrzeugkategorien und Energieträgern (Bild 8), in gleicher Untergliederung die Entwicklung der Kohlendioxidemissionen aus der direkten Verbrennung im Fahrzeug (Bild 9) sowie die Entwicklung der direkten Stickstoffoxid- und Partikelemissionen nach Fahrzeugkategorien.

Für den direkten Energieverbrauch am Fahrzeug ergeben sich die folgenden Änderungen zwischen 2010 und 2050:

- Beim Pkw-Verkehr ist der Rückgang mit -49 % am höchsten. Neben den Effizienzverbesserungen am Fahrzeug wirken sich hier vor allem die Umstellung auf Elektrofahrzeuge und der Rückgang der Verkehrsleistungen nach 2030 aus.

- Bei den schweren Nutzfahrzeugen werden die Effizienzverbesserungen durch die steigende Verkehrsleistung kompensiert. Der Energieverbrauch liegt damit 2050 etwas höher als 2010.
- Insgesamt nimmt der Energieverbrauch zwischen 2010 und 2050 um 35 % ab.
- Der Anteil des Stroms am Endenergieverbrauch liegt im Jahr 2050 bei 10 %. Wasserstoff hat einen Anteil von 2 %.

Für die Entwicklung der direkten Kohlendioxidemissionen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Aufgrund des teilweisen Übergangs von Kraftstoffen auf Strom nehmen die Kohlendioxidemissionen bis 2050 mit -44 % stärker ab als der Endenergieverbrauch.
- Der höchste Rückgang wird beim Pkw mit -61 % beobachtet.

Nicht berücksichtigt in der Berechnung sind die Vorketten der Energieträger. Hier ergibt sich zukünftig

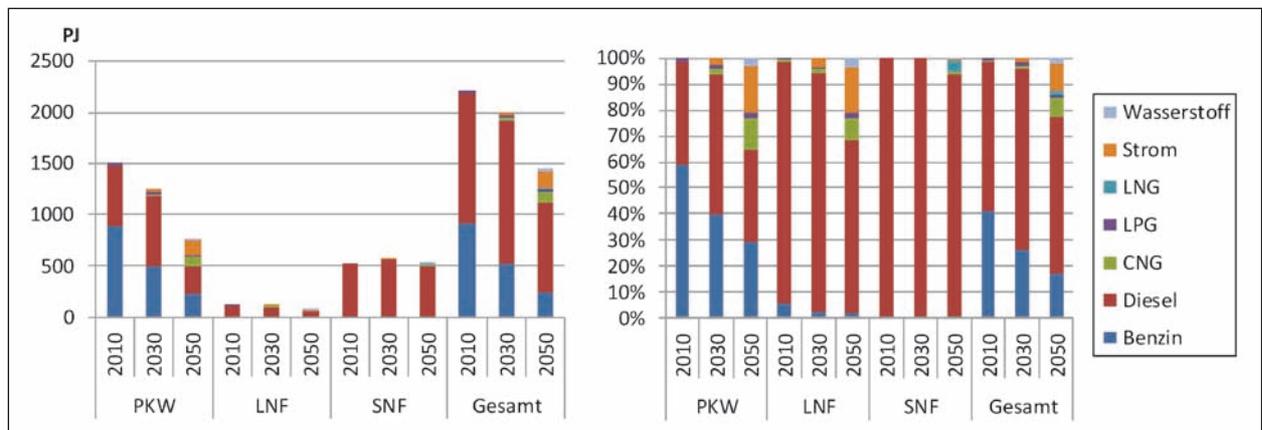


Bild 8: Entwicklung des Energieverbrauchs des Straßenverkehrs im Trendszenario 2010-2050 (Quelle: Ergebnisse Szenarienrechnung TREMOD)

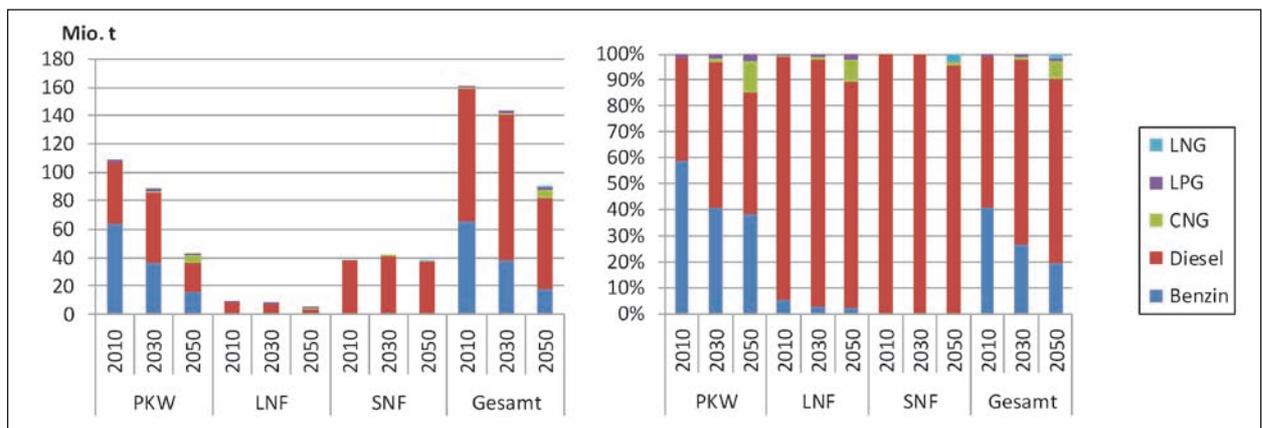


Bild 9: Entwicklung der Kohlendioxidemissionen des Straßenverkehrs im Trendszenario 2010-2050 (Quelle: Ergebnisse Szenarienrechnung TREMOD)

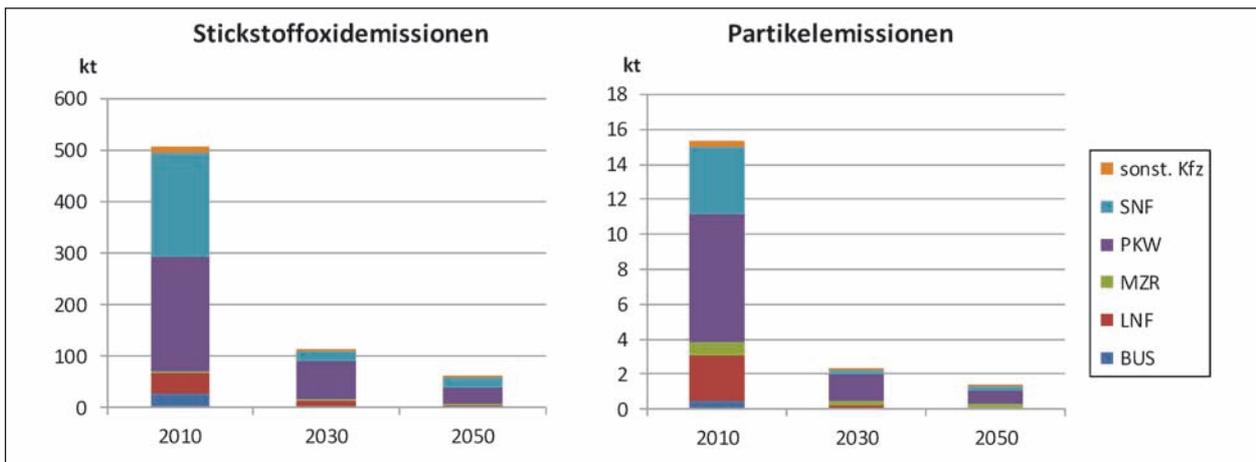


Bild 10: Entwicklung der Stickstoffoxid- und Partikelemissionen des Straßenverkehrs im Trendszenario 2010-2050 (Quelle: Ergebnisse Szenarienrechnung TREMOD)

eine hohe mögliche Bandbreite von fossilen Quellen über Biokraftstoffe bis zu regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Strom und der Option, mit strombasierten Kraftstoffen (via PtG oder PtL) weiterhin Verbrennungsmotoren zu betreiben. Diese Pfade können bei zukünftigen Szenarienrechnungen in TREMOD berücksichtigt werden.

Bei den Stickstoffoxid- und Partikelemissionen aus der direkten Verbrennung im Fahrzeug ergeben sich folgende Tendenzen:

- Von 2010 bis 2030 gehen die Emissionen deutlich zurück: um 77 % bei Stickstoffoxid bzw. 85 % bei den Abgaspartikeln. Dieser Rückgang ist Folge der Abgasgesetzgebung (Euro 6, Euro 6c und Euro VI).
- Bis zum Jahr 2050 halbieren sich die Emissionen nochmal gegenüber 2030. Wesentlicher Effekt ist auch in diesem Zeitraum die weitere Flottendurchdringung mit neuen Fahrzeugen und das Ausscheiden der Fahrzeuge mit älteren Abgasstufen. Der Übergang auf Elektrofahrzeuge trägt demgegenüber zu einem geringeren Teil bei.
- Zukünftige Abgasgrenzwerte sind in dieser Rechnung nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Szenarienrechnung machen deutlich, dass Effizienzverbesserungen am Fahrzeug und die Elektrifizierung der Pkw und kleineren Nutzfahrzeuge allein nicht ausreicht, um politische Ziele (z. B. -40 % Minderung des Endenergieverbrauchs, -80 % Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050) im Verkehrssektor zu erreichen.

Mit dem aktuellen TREMOD-Modell ist es möglich, weitere Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz,

Fahrzeugtechnik, Energieträgermix und nicht zuletzt Erhöhung der Transporteffizienz (z. B. Fahrzeugauslastung), Verkehrsvermeidung und Verlagerung zu modellieren und die Effekte auf Energieverbrauch und Emissionen abzuschätzen.

Um dies auch zukünftig zu gewährleisten ist es erforderlich, die verwendeten Daten und Erkenntnisse auf dem aktuellen Stand zu halten und kontinuierlich fortzuentwickeln. Ein wichtiger Baustein bleibt dabei die Abstimmung mit dem Handbuch Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 11).

11 Weiterentwicklung Handbuch Emissionsfaktoren

11.1 Aktueller Erkenntnisstand neue Version HBEFA 3.2

Am 17. Juli 2014 wurde die Version HBEFA 3.2 veröffentlicht [INFRAS, 2014]. HBEFA 3.2 versteht sich nicht als grundlegend neue Version gegenüber HBEFA 3.1 (2010), sondern als eine Aktualisierung. Die Konzepte und Modellansätze wurden weitestgehend aus HBEFA 3.1 übernommen. Die wichtigsten Neuerungen gegenüber 3.1 betreffen folgende Punkte:

- Emissionsfaktoren

Die sog. „warmen“ Emissionsfaktoren (EF) bis Euro 4/IV wurden praktisch unverändert belassen. Der Fokus lag auf der Aktualisierung der Emissionsfaktoren Euro 5/V und 6/VI von Pkw, LNF und schweren Motorwagen (schwere Nutzfahrzeuge, Linien- und Reisebusse). Für die

EF von Euro 5/V lagen genügende Messwerte vor, um belastbare Aussagen machen zu können. Für Euro 6/VI können nur indikative Angaben gemacht werden, die sich an einzelnen Messergebnissen orientieren.

- **Zusätzliche Emissionsstufe Euro 6c**

Für Pkw und LNF wurde zusätzlich zur Emissionsstufe Euro 6, welche als Euro 6a/b zu interpretieren ist, eine weitere Stufe Euro 6c eingeführt. Diese beginnt etwas später als Euro 6 (um ca. 3 Jahre verzögert) und geht von einem nennenswerten weiteren Reduktionspotenzial (bei NO_x von Diesel-Fahrzeugen) aus. In der Folge sind alle Flottenzusammensetzungen neu ermittelt worden.

- **Kaltstart Emissionsfaktoren**

Der Ansatz bleibt unverändert gegenüber HBEFA 3.1. Allerdings wurde der Einfluss der Parkierdauer verändert: während in HBEFA 3.1 von einem linear steigenden Einfluss von „Kühl“ zu „Kaltstart“ ausgegangen wurde, geht HBEFA 3.2 von einer nichtlinearen Steigerung aus. Dadurch werden den Kühlstarts geringere Emissionen zugeschrieben, die EF der eigentlichen Kaltstarts bleiben unverändert. In der Summe führt dies zu tieferen (gewichteten) Kaltstart-Emissionsfaktoren.

- **Flottenzusammensetzungen**

Namentlich die Einführung eines zusätzlichen Konzepts bei den Pkw/LNF (Euro 6c) hat es nötig gemacht, die Flottenzusammensetzungen zu aktualisieren. Gleichzeitig wurden weitere Anpassungen bezüglich der Annahmen zur Verbrauchsentwicklung gemacht (vgl. Kapitel 7.1.1 und 7.2).

- **Verkehrssituationen**

Das zugrundeliegende Verkehrssituationsschema ist in HBEFA 3.2 unverändert gegenüber der Vorversion. Hingegen wurden bei einzelnen Verkehrssituationen die zugrundeliegenden Fahrzyklen angepasst. Das gilt für die beiden Verkehrssituationenbündel „Agglo/HVS/Tempolimit 50“ resp. „Agglo/Sammelstraße/Tempolimit 50“ bei Pkw und LNF.

11.2 Alternative Konzepte in HBEFA 3.2

11.2.1 Indikative Emissionsfaktoren

Die in HBEFA aufgeführten Emissionsfaktoren basieren in der Regel auf Emissionsmessungen von Fahrzeugen, die in „Real-world“-Zyklen auf Laborprüfständen gefahren und gemessen werden. Aus den modal (sekündlich) gemessenen Werten werden Motorenkennfelder gebildet, die ihrerseits einen maßgeblichen Input liefern für Emissionsfaktor-Modelle wie etwa PHEM der TU Graz (Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model, [TU Graz, 2013a, TU Graz, 2013b]). Mit diesen Modellen lassen sich Emissionsfaktoren für weitere Fahrzyklen ermitteln, welche den verschiedenen Verkehrssituationen des HBEFA zugrunde liegen (vgl. Kapitel 6.3).

In HBEFA 3.2 sind Emissionsfaktoren der gleichen alternativen Konzepte wie in HBEFA 3.1 verfügbar, d. h. bei den Pkw für mit CNG, LPG und FlexFuel [E85] betriebene Fahrzeuge, bei den Linienbussen sind es E-Faktoren für CNG-Busse. Für die alternativen Antriebskonzepte in HBEFA 3.2 liegt aber wie schon für HBEFA 3.1 nur eine beschränkte Anzahl an Messwerten vor. Tabelle 39 zeigt die Anzahl Fahrzeuge, die in einzelnen Emissionsmessprogrammen ausgemessen wurden. Deren Ergebnisse sind in der sog. ERMES-Datenbank⁵ verfügbar. Diese Fahrzeuge verteilen sich allerdings auf verschiedene Emissionsstufen (bei LPG etwa sind es Fahrzeuge der Stufen Euro-2 und -3, bei CNG und E85 sind es mehrheitlich Euro-3 und Euro-4-Fahr-

Antriebskonzept	Anz. Fzg.
CNG	31
LPG	13
Flex-Fuel (E85)	27
Hybrid (Benzin)	12
Plug-In-Hybrid	1

Tab. 39: Anzahl von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten, deren Emissionsmessergebnisse in der sog. ERMES-Datenbank verfügbar sind

⁵ Diese ERMES-Datenbank enthält die Ergebnisse von Emissionsmessprogrammen von Pkw und LNF aller maßgebenden europäischen Labors. Die Datenbank wurde im Rahmen des ARTEMIS-Projekts vor ca. 10 Jahren gestartet und wird seither im Kontext der Aktualisierungen von HBEFA laufend nachgeführt (INFRAS 2014).

zeuge). Zudem wurden diese Fahrzeuge teilweise nur in Typenprüfzyklen gefahren, so dass keine eigenen Motorenkennfelder abgeleitet werden konnten.

Hybrid-Fahrzeuge werden in HBEFA 3.2 nicht als eigene Fahrzeuggruppe behandelt und ausgewiesen. Zum einen gelten für diese Fahrzeuge die gleichen gesetzlichen Bestimmungen wie für deren entsprechenden Modelle mit Verbrennungsmotoren, zum andern ist die Datenbasis zu beschränkt um daraus eigene Emissionsfaktoren ableiten zu können. Letzteres gilt namentlich auch für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge, für die noch kaum Messungen verfügbar sind und die deshalb in HBEFA 3.2 noch nicht als eigenes Segment erscheinen.

Die in HBEFA 3.2 aufgeführten Emissionsfaktoren wurden deshalb wie schon in HBEFA 3.1 aufgrund von pauschalen Verhältnisfaktoren abgeleitet (z. B. CNG im Vergleich zu entsprechenden Benzin-Pkw) und verstehen sich als „indikative“ Werte.

11.2.2 Anpassung der Datenstrukturen

Auch wenn die Zahl der Emissionsmessungen noch beschränkt ist, wurden die Datenstrukturen in HBEFA 3.2 bereits auf die in Kapitel 2 beschriebene neue „Logik“ der Segmentierung der Fahrzeuge nach Antriebskonzepten in Kombination mit Energieträgern bzw. Energieträger-Aggregaten angepasst. Diese neue Segmentierung ist allerdings erst im Hintergrund vollzogen und wird für die Benutzer noch nicht unmittelbar sichtbar, denn der Version HBEFA 3.2 liegt bezüglich Energieträger-Aggregaten ein (einziges) Basis-Szenario zugrunde. Bild 11 zeigt die im Basisszenario unterstellte zeitliche Entwicklung der energiebezogenen Beimischung von Ethanol zu Benzin bzw. von Biodiesel zu Diesel.

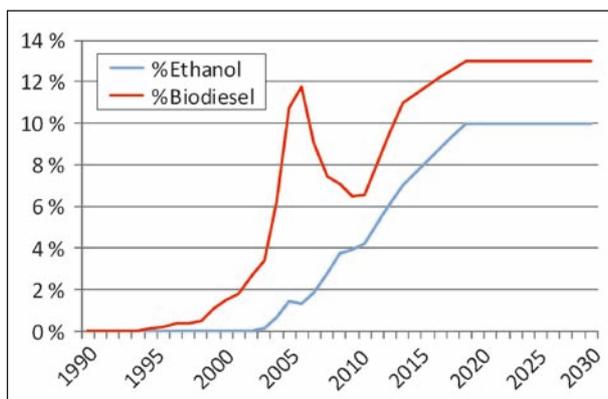


Bild 11: Anteile von Ethanol im Benzin bzw. Biodiesel im Diesel im Basis-Szenario von HBEFA 3.2 (INFRAS 2014)

11.3 Geplante Weiterentwicklung

Grundsätzlich soll HBEFA weiterhin periodisch aktualisiert werden, wobei aufgrund des internationalen Charakters von HBEFA den teilweise unterschiedlich gelagerten Prioritäten in angemessener Weise Rechnung zu tragen ist. In den bisherigen Diskussionen hat sich herausgestellt, dass ein Schwerpunkt weiterhin bei den „konventionellen“ Antriebskonzepten liegen soll. Namentlich sind die Emissionsfaktoren von Euro-5 und insbesondere Euro-6-Konzepten zu konsolidieren. Für letztere liegen derzeit noch kaum Messungen vor, insbesondere für Fahrzeuge, welche unter den absehbaren neuen Rahmenbedingungen bezüglich RDE (Real-world-Driving Emissions) homologiert sein werden. Weitere Vertiefungen sind allenfalls zu unternehmen bezüglich der Altersabhängigkeit älterer Fahrzeuge, da der Einfluss dieses Parameters noch auf einer Untersuchung aus dem Jahr 2004 basiert [LAT, 2004]. Auch wird das Verkehrssituationsschema überprüft werden müssen, zumal sich hierzu mit neuartig erhobenen „Floating car data“ neue Möglichkeiten der Analyse und Konsolidierung ergeben.

Ein weiterer Schwerpunkt wird bei den alternativen Antriebskonzepten liegen, da diese in ihrer Bedeutung zunehmen dürften. Dabei wird es wesentlich sein, die Ergebnisse laufender nationaler und internationaler Messprogramme zusammenzutragen und zu analysieren und ggf. neue Messprogramme zu initialisieren und international abzustimmen. Neuland betritt man vor allem mit „neuen“ alternativen Konzepten, die derzeit im öffentlich zugänglichen HBEFA noch nicht integriert sind, wie die Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge, CNG-Hybride und LNG-Fahrzeuge. Namentlich mit dem Einbezug der Elektromobilität stellen sich zwangsläufig neue methodische Fragen: Zum einen stellen sich Fragen nach der Art des Einsatzes (wie groß ist der Anteil der Fahrleistung, der „elektrisch“ zurückgelegt wird), zum andern geht es um Fragen der Systemgrenzen: Bisher hat HBEFA den Fokus auf die Betriebsmissionen gelegt, also eine Tank-to-Wheel-Betrachtung gemacht. Mit der Elektromobilität verlagert sich der Schwerpunkt von den Betriebsemissionen hin zu den Emissionen in der Vorkette, d. h. Emissionen der Stromproduktion, welche je nach Produktionsart – und damit regional und länderspezifisch – stark variieren können. Konsequenterweise sind dann auch die entsprechenden Emissionen der andern Energieträger einzubeziehen, um einheitliche Systemgrenzen zu gewährleisten. Es

wird zu erörtern sein, wie weit diese Aspekte in HBEFA zu integrieren sein werden, bzw. auf welche Datenquellen man sich dabei stützen soll, zumal es sich dabei nicht mehr um allein verkehrsspezifische Fragestellungen handelt.

12 Literatur

- ADAC (2014): Auto Test e-golf. <http://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5134> (abgerufen 8.7.2014)
- ARTEMIS (n. d.): Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems. <<http://www.trl.co.uk/artemis/introduction.htm>>
- BAG (2014): Marktbeobachtung Güterverkehr – Jahresbericht 2013
- BURKERT, A. (2013): Seltenerdmetalle: Aufputzmittel für das Elektroauto. In: Redaktion Springer für Professionals
- BVU/Intraplan/IVV/Planco (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. 11. Juni 2014
- DELFT, C. E. (2013a): Zero emissions trucks an overview of state-of-the-art technologies and their potential
- DELFT, C. E. (2013b): Zero emissions trucks an overview of state-of-the-art technologies and their potential
- DOPPELBAUER, M. (2013): Elektrische Traktionsantriebe heute und in Zukunft. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- EWI et al. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studienprojekt Nr. 12/10 im Auftrag des BMWi, EWI Köln, Prognos Basel, GWS Osnabrück, 2010
- HERING, E.; MARTIN, R.; GUTEKUNST, J.; KEMPKES, J. (2012): Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer – Kap. Elektrische Maschinen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- HEUSCH-BOESEFELDT (1996): Ermittlung der Pkw- und Nfz-Jahresfahrleistungen 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen
- IFEU (2011a): UMBRELA Grundlagenbericht
- IFEU (2011b): Umbrella: Umweltbilanzen Elektromobilität – Grundlagenbericht. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. HELMS, H.; JÖHRENS, J.; HANUSCH, J.; HÖPFNER, U.; LAMBRECHT, U.; PEHNT, M. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg. <http://www.emobil-umwelt.de/> (last accessed: 08/02/2013)
- IFEU (2013a): Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität – Endbericht. HELMS, H.; LAMBRECHT, U.; JÖHRENS, J.; PEHNT, M.; LIEBICH, A.; WEIß, U.; KÄMPER, C. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg
- IFEU (2013b): Überleitung der Ergebnisse aus Germany in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD
- IFEU (2013c): Ermittlung von Vorkettenemissionen und -energieverbräuchen für Biokraftstoffe auf der Basis von vorhandenen Studien. Kurzgutachten im Auftrag des RWTÜV für die BAST
- IFEU (2014): Aktualisierung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2015 (Berichtsperiode 1990-2013) Projekt-Nr. 40625
- IFEU/WI/DLR Stuttgart (2005): Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Arbeitsgemeinschaft Wuppertal Institut, DLR Stuttgart und IFEU Heidelberg. Forschungsvorhaben im Rahmen des UFOPLAN des Umweltbundesamtes (FKZ 203 45 118)
- ifeu-LBST-DLR (2014): LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen
- INFRAS (2014): HBEFA Version 3.2, Juli 2014 (verfügbar unter www.hbefa.net)

- 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
- JEC (2013): Tank-to-Wheels Report, Version 4.0. EC WELL-TO-WHEELS Analysis. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context
- KASPER, R.; SCHÜNEMANN, M. (2012): Elektrische Fahrtriebe – Topologien und Wirkungsgrad. In: Motortechnische Zeitschrift. Nr. 10, S. 802-807
- KBA (n. d.): Datenbankauswertung der Fahrzeugbestände und Neuzulassungen für TREMOD. Kraftfahrt-Bundesamt. Im Auftrag der BAST, jährliche Aktualisierung
- KLEY, F. (2011): Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge
- KLOESS, M.; PRENNINGER, P.; HUSS, A. (2011): Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050
- LAT (2004): Investigation of the emission degradation of gasoline vehicles, Artemis Subtask 3123, Laboratory of Applied Thermodynamics, Mechanical Engineering Department, Aristotle University, Thessaloniki, Report No: 0415
- MKS (2013): CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs
- MOCK et al. (2013): From laboratory to road – A comparison of official and “real world” fuel consumption and CO₂ values for cars in Europe and the United States
- TU Graz (2013a): User Guide for the Model PHEM, Version 11.2. LUZ, R. et al., Graz
- TU Graz (2013b): Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 Passenger Cars for the HBEFA Version 3.2; Technical University of Graz, Report No. I-31/2013/ Rex EM-I 2011/20/679, 06.12.2013 (verfügbar unter www.hbefa.net)
- UBA (2013): National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2011. UBA im Auftrag des Umweltbundesamt, Dessau
- VCD (2013): VCD Auto-Umweltliste 2013/2014. <http://www.vcd.org/auto-umweltliste-2013.html>
- ViZ BMVBS (n. d.): Verkehr in Zahlen. Bearbeitet von DIW. Erscheinungsweise jährlich, Bonn, Berlin
- ViZ BMVI (n. d.): Verkehr in Zahlen. Bearbeitet von DIW. Erscheinungsweise jährlich, Bonn, Berlin
- van BASSHUYSEN et al. (2007): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, Vieweg, 2007

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2008

- F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50
- F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw
Weber € 20,00
- F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00
- F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00
- F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

2009

- F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild
Bartels, Sander € 13,50
- F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th / 6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50
- F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern
Seiniger, Winner € 16,50

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 eines 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 in Vorbereitung

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 in Vorbereitung

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

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.