

# Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 103

**bast**

# Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen

von

Alexander Süßmann  
Markus Lienkamp

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 103

**bast**

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

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

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

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

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

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

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0500/2009:**  
Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von LKW und Bussen

**Fachbetreuung:**  
Mechthild Lorig

**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](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9307  
ISBN 978-3-95606-159-2

Bergisch Gladbach, Mai 2015

## Kurzfassung – Abstract

### Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen

Diese Studie befasst sich mit CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzialen von schweren Nutzfahrzeugen. In einer Literaturrecherche wurden zunächst Sattelzüge, Verteiler-Lkw, Busse im Stadtverkehr sowie Reisebusse betrachtet. Ziel war es, technische Möglichkeiten zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen für die ausgewählten Fahrzeugkategorien zu ermitteln und deren Einsparpotentiale über die jeweiligen Einsatzarten aufzuschlüsseln. Dabei zeigten sich weitestgehend ungenutzte Einsparmöglichkeiten, beispielsweise durch Fahrwiderstandsoptimierung bei Sattelzügen, durch Rekuperation von Bremsenergie bei Stadtbussen und Verteiler-Lkw, oder auch durch bedarfsgerechte Ansteuerung von Nebenverbrauchern bei Stadt- und Reisebussen.

Nähere Betrachtung fanden Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei Sattelzügen. So wurde an einem Euro-V-EEV-Sattelzugprototyp in Fahrwiderstandsmessungen die Verbesserung des Luftwiderstands durch aerodynamische Anbauteile für Auflieger quantifiziert. Deren Verbrauchseinsparpotenziale wurden anschließend in validierten Verbrauchssimulationen, welche einen etablierten Verbrauchstest (VerkehrsRundschau-Test) virtuell abbilden, quantifiziert. Ferner zeigte eine Kosten-Nutzen-Rechnung die Effektivität der untersuchten Maßnahmen auf. Der Prototyp wurde anschließend dem realen VerkehrsRundschau-Test einmal in Ausgangskonfiguration und einmal mit einem zuvor bereits im Rahmen der Fahrwiderstandsmessungen untersuchten aerodynamischen Maßnahmenpaket, bestehend aus Seitenverkleidung und Heckeinzugsklappen, unterzogen. Hierbei zeigte sich eine mögliche CO<sub>2</sub>-Reduktion von 4,8 %. Die gemessene Einsparung lag damit oberhalb der zuvor im Rahmen der Verbrauchssimulation prognostizierten.

### Technical options for the reduction of carbon dioxide emissions of heavy-duty vehicles

This study is concerned with carbon-dioxide reduction potentials of heavy-duty vehicles. In a literature research semi-trailer trucks, delivery trucks, city busses, and coaches were addressed. The study aims at identifying technical measures for the reduction of carbon-dioxide emissions for these selected vehicles. The reduction potentials of these measures were broken down by the vehicles' mode of application. Thereby untapped potentials were revealed, e. g. by means of driving resistance optimizations on semi-trailer trucks, by means of recuperation of braking energy on city busses and delivery trucks, and by means of demand-actuated auxiliary units in city busses and coaches.

Low-carbon measures for semi-trailer trucks were extensively considered. For this purpose driving resistance measurements were conducted on a Euro V semi-trailer truck in order to quantify the drag reduction resulting from aerodynamic add-on parts for semi-trailers. Their fuel saving potentials were subsequently quantified by deploying a validated fuel-consumption model simulating an established fuel-consumption test (VerkehrsRundschau-Test). Moreover, a cost-benefit-calculation reveals the effectiveness of the analyzed measures. Subsequently, the prototype was tested in the real world fuel-consumption test, both in the baseline configuration as well as with a bundle of aerodynamic add-on parts consisting of side panels and boat-tail flaps. Here, a possible carbon-dioxide reduction of 4.8% was demonstrated. The measured savings exceeded the predicted savings by means of the fuel consumption modelling.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7	3.4	Differenzierte Betrachtung von CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzialen im Bereich Antriebsstrang .....	30
1.1	Aufgabenstellung .....	7	3.4.1	Motor und dessen Nebenverbraucher .....	30
1.2	Methodisches Vorgehen .....	7	3.4.2	Weitere Nebenverbraucher .....	31
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	8	3.4.3	Rekuperation von Bremsenergie .....	31
2.1	Fahrzeugtypen und Einsatzprofile .....	8	3.4.4	Abgaswärmenutzung .....	33
2.1.1	Sattelzug .....	9	3.5	Zusammenfassung der Literaturrecherche .....	33
2.1.2	Verteiler-Lkw .....	11	<b>4</b>	<b>Fahrwiderstandsmessungen</b> .....	36
2.1.3	Stadtbus .....	11	4.1	Beschreibung des Messverfahrens .....	36
2.1.4	Reisebus .....	12	4.2	Betrachtete Maßnahmen und Kombinationen .....	38
2.2	Messgrößen der Transporteffizienz .....	13	4.3	Ergebnisse .....	39
2.3	Systematisierung von Maßnahmen .....	13	4.3.1	Wiederholbarkeit der Versuchs- durchführung .....	39
<b>3</b>	<b>Literaturrecherche</b> .....	15	4.3.2	Reduktion des Luftwiderstandes durch untersuchte Maßnahmen .....	40
3.1	Wissenschaftliche Studien und Veröffentlichungen .....	15	<b>5</b>	<b>Verbrauchssimulation für Sattelzüge</b> .....	41
3.1.1	Studien der Europäischen Kommission: Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from HDV .....	15	5.1	Aufbau des Programms .....	41
3.1.2	FAT-Literaturrecherche – Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen .....	15	5.2	Parametrierung .....	43
3.2	Ermittlung grundsätzlicher CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenziale .....	16	5.2.1	Fahrwiderstände .....	43
3.2.1	Sattelzug .....	16	5.2.2	Antriebsstrang .....	44
3.2.2	Verteiler-Lkw .....	18	5.3	Fahrzyklen .....	44
3.2.3	Stadtbus .....	18	5.4	Validierung .....	45
3.2.4	Reisebus .....	19	5.4.1	Quervergleich mit der Verbrauchssimulation von MAN .....	45
3.2.5	Zusammenfassung .....	19	5.4.2	Validierung mit Realfahrt .....	46
3.3	Differenzierte Betrachtung von CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzialen im Bereich Fahrwiderstand .....	20	5.5	Ergebnisse .....	47
3.3.1	Leichtbau .....	20	5.5.1	Verbrauchsgradienten .....	47
3.3.2	Aerodynamik .....	21	5.5.2	Simulierte Maßnahmen im VR-Test .....	49
3.3.3	Rollwiderstand .....	28	5.6	CO <sub>2</sub> -Rechner .....	51

<b>6</b>	<b>Kosten-Nutzen-Analyse . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>Maßnahmenpaket im Praxistest . . . . .</b>	<b>54</b>
7.1	Beschreibung des Testverfahren . . . . .	54
7.2	Durchführung und Ergebnisse . . . . .	54
<b>8</b>	<b>Handlungsempfehlungen. . . . .</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung. . . . .</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>11</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>63</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Diese Studie befasst sich mit CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzialen von schweren Nutzfahrzeugen. Hierbei sollen Lkw im Fernverkehr, Verteiler-Lkw, Busse im Stadtverkehr sowie Reisebusse betrachtet werden. Ziel ist es, Technologien zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs für die ausgewählten Fahrzeugkategorien zu ermitteln und deren Einsparpotenziale über die jeweiligen Einsatzarten aufzuschlüsseln. Hierbei sollen auch Maßnahmen<sup>1</sup> mit betrachtet werden, welche derzeitigen Zulassungsrichtlinien möglicherweise entgegenstehen. Dadurch können Aussagen getroffen werden, welche Zulassungsrichtlinien gegebenenfalls anzupassen sind, um weitere Einsparpotenziale zu ermöglichen.

Nähere Betrachtung sollen Einsparmaßnahmen bei Sattelzügen im Fernverkehr finden. Deren CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale sind durch Verbrauchssimulationen und Fahrwiderstandsmessungen näher zu quantifizieren. Die untersuchten Maßnahmen werden anschließend einer Kosten-Nutzen-Rechnung unterzogen. In einem Praxistest sind die durch Simulation errechneten Einsparpotenziale eines Maßnahmenpakets zu überprüfen.

Die Ergebnisse aus der Simulationsstudie für Sattelzüge werden in einen CO<sub>2</sub>-Rechner überführt.

<sup>1</sup> Der Begriff „Maßnahme“ bezieht sich in dieser Studie generell auf Technologien und Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

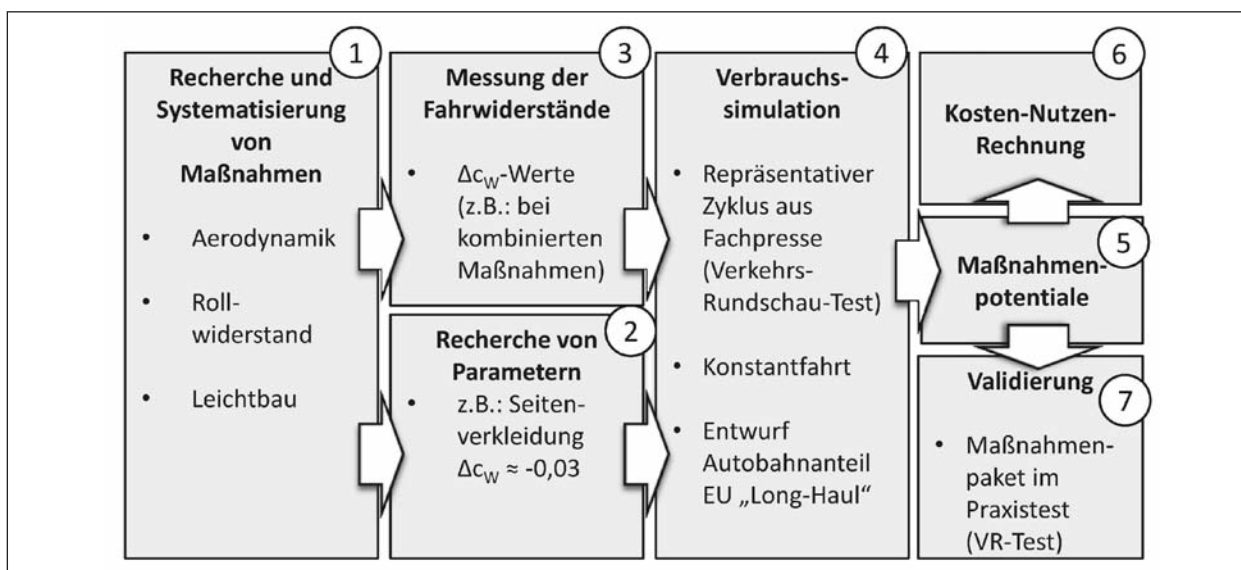
Der CO<sub>2</sub>-Rechner soll hierbei eine schnelle Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale von aktuellen und zukünftigen Maßnahmen ermöglichen.

## 1.2 Methodisches Vorgehen

Zu Beginn werden in einem Grundlagenkapitel und einer Literaturrecherche CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale zu den betrachteten Fahrzeugkategorien ermittelt. Hierzu werden die Fahrzeugtypen definiert und deren übliche Einsatzarten bzw. Fahrzyklen eruiert. Anschließend wird eine Systematik zur Kategorisierung von Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingeführt sowie relevante Studien zu dieser Thematik benannt (Bild 1, ①).

Eine Simulationsstudie greift die in der Literaturrecherche ermittelten Maßnahmen für Sattelzüge im Fernverkehr auf (Bild 1, ①) und quantifiziert deren Einsparpotenziale über verschiedene Fahrzyklen. Einen wesentlichen Fahrzyklus bildet hierbei die virtuelle Umsetzung des sogenannten VerkehrsRundschau-Tests (VR-Test), der ein etabliertes Test-szenario zur Messung des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen im Fernverkehr darstellt. In die Simulationsstudie finden sowohl recherchierte Parameter zu einzelnen Maßnahmen (Bild 1, ②) als auch über eigene Fahrwiderstandsmessungen an einem Prototyp ermittelte Werte zu aerodynamischen Maßnahmen (Bild 1, ③) Eingang.

In einer Kosten-Nutzen-Analyse werden anhand der errechneten Einsparpotenziale Aussagen über die Rentabilität der betrachteten Maßnahmen getroffen (Bild 1, ⑥).



**Bild 1:** Methodisches Vorgehen bei der Quantifizierung von Einsparpotenzialen, exemplarisch bei Sattelzügen



Im letzten Schritt wird ein Maßnahmenpaket mit einem in der Simulationsstudie quantifiziertem Einsparpotenzial einem realen Verbrauchstest, dem VR-Test, unterzogen (Bild 1, ⑦). Die Maßnahmen werden hierzu prototypisch an einem Sattelzug, der bereits für die Fahrwiderstandsmessungen zum Einsatz kam, umgesetzt. Zu Vergleichszwecken wird der VR-Test sowohl in Ausgangszustand als auch in optimiertem Zustand durchgeführt.






Das letzte Kapitel befasst sich mit Handlungsempfehlungen, welche aus den Ergebnissen der Studie abgeleitet werden können.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Fahrzeugtypen und Einsatzprofile

Auf europäischer Ebene werden Nutzfahrzeuge zur Güterbeförderung nach ihrer zulässigen Gesamtmasse und Nutzfahrzeuge zur Personenbeförderung zusätzlich nach Sitzplätzen kategorisiert (Richtlinie 2007/46/EG); beispielsweise:

- N1 – Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 3,5 t,
- N2 – Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 12 t,
- N3 – Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse mehr als 12 t,

		Zulässige Gesamtmasse	Typisches Einsatzgebiet
	Leichte Nutzfahrzeuge (N1)	bis 3,5 t	Dienstleistung und Lieferfahrzeug
	Leichte Lkw (N1)	3,5...7,5 t	Auslieferung Nahverkehr
	Schwere, nicht mautpflichtige Lkw (N2)	7,5...12 t	Auslieferung im Regionalverkehr
	Schwere Lkw (N3)	ab 12 t	Als Motorwagen eines Gliederzuges, im Güterfernverkehr, Baustellenverkehre
	Sattelzugmaschinen (i. d. R. N3)	i. d. R. bis 40 t	Güterfernverkehr
Quelle: nach (SHELL 2010)			

Tab. 1: Übersicht der Fahrzeugklassen

- M3 – Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als 8 Sitzplätze und einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 t,
- O4 – Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 10 t.

In der StVZO werden Güterkraftfahrzeuge zusätzlich nach Gewichtsklassen (zulässiges Gesamtgewicht, zGG) unterschieden, welche mit weiteren Rechtsvorschriften für den Fahrzeugbetrieb wie etwa Führerscheinklasse oder Mautpflicht verknüpft sind.

Nähere Betrachtung finden schwere, nicht mautpflichtige Lkw der Klasse N2, welche aufgrund ihres Einsatzprofils im Folgenden als Verteiler-Lkw bezeichnet werden, und Sattelzüge.<sup>2</sup> Die dritte und vierte betrachtete Fahrzeugkategorie bilden Busse im Stadtverkehr sowie Reisebusse, welche der Klasse M3 zuzuordnen sind.

Den betrachteten Fahrzeugen werden jeweils typische Einsatzszenarien bzw. Fahrzyklen zugeordnet, welche in Verbindung mit Verfahren zur Kraftstoffverbrauchsanalyse stehen. Leider stehen mit Ausnahme der Busse im Stadtverkehr bislang keine standardisierten Fahrzyklen bzw. Verfahren zur Verbrauchsanalyse zur Verfügung. Die geplante CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge wird hier zu einer Vereinheitlichung führen (European Commission 2012). Diese basiert jedoch auf einer wesentlich komplexeren Zuordnung von voraussichtlich 24 Fahrzeugkategorien und 10 Einsatzprofilen. Auf diese komplexe Zuordnung kann im Rahmen dieser Studie nicht zurückgegriffen werden. Die im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Zertifizierung angewendeten Einsatzprofile sind bisher noch nicht klar definiert.

Grenzen für Massen und Achslasten sowie Abmessungen sind als Umsetzung der Richtlinie 96/53/EG in § 32 bzw. § 34 der StVZO festgehalten. In § 32 der StVZO werden Toleranzen auf Höhe, Breite sowie Länge ausdrücklich ausgeschlossen. Dies gewinnt bei der Betrachtung von Maßnahmen insbesondere Bedeutung, dass einige Fahrzeuge maximale Abmessungen standardmäßig bereits voll ausreizen, was beispielsweise der Montage von verbrauchsreduzierenden Anbauteilen gegebenenfalls entgegensteht. Ausgenommen von Längenbegren-

<sup>2</sup> Sattelzugmaschine N3, mit Sattelaufleger der Klasse O4

zungen sind jedoch beispielsweise Hebebühnen, äußere Sonnenblenden, Stoßfängergummipuffer oder auch Sichthilfen. In der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 wurden jedoch kürzlich Ausnahmen für „einklappbare Einrichtungen und Vorrichtungen zur Verringerung des Luftwiderstands“ definiert. Diese dürfen am Heck des Fahrzeugs 500 mm und 50 mm jeweils zur Seite hinausragen. Sie müssen so konstruiert sein, dass sie bei stehendem Fahrzeug und eingeklapptem Zustand die höchstzulässige Länge und Breite nicht überschreiten und die Fahrzeuge im intermodalen Verkehr nicht beeinträchtigen.

Auf die jeweils geltenden zulässigen Massen und Abmessungen wird in den folgenden Unterpunkten eingegangen.

### 2.1.1 Sattelzug

Sattelzüge werden vorwiegend im Güterfernverkehr eingesetzt, welcher auf europäischer Ebene für 57 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßengüterverkehr verantwortlich ist (European Commission 2012, S. 175). Mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Anhänger bilden Sattelzüge mit 35 % über Jahre hinweg konstant den größten Anteil am Schwerverkehr in Deutschland (GLAESER et al. 2006, S. 19-21). Die Studie fokussiert sich hierbei auf Auflieger mit Seitenplane und auf Koffer- und Kühlaufleger, die 2009 mit 37 %, 11 % und 15 % knapp zwei Drittel aller Aufliegerneuzulassungen in den EU-27 stellten (European Commission 2011, S. 64).

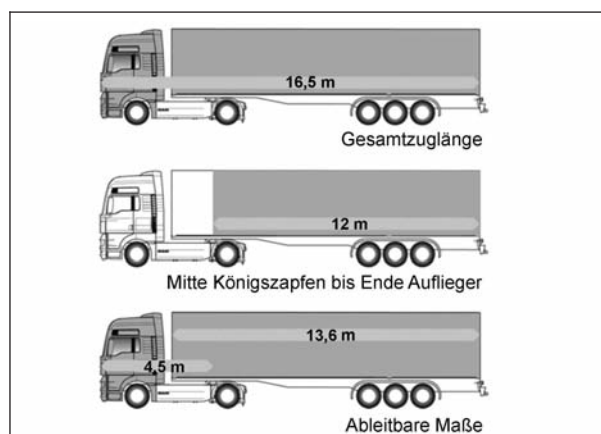
Bei üblichen Leermassen um 7,8 t einer Sattelzugmaschine und 6,2 t eines Aufliegers mit Seitenplane sind Nutzlasten bis 26 t möglich. Angetrieben werden die Sattelzugmaschinen beinahe ausschließlich von Dieselmotoren in den Leistungsklassen von 300...400 kW. Die Leistungsübertragung wird vorwiegend über automatisierte Handschaltgetriebe mit 12 oder 16 Gängen realisiert.

Um ein maximales Ladevolumen zu erlangen werden bei Sattelzügen Fahrzeugabmessungen im Rahmen der Zulassungsrichtlinien voll ausgeschöpft. Die Systemlänge von 16,5 m gliedert sich in Längen entsprechend Tabelle 2 (oben) auf. Je nach Aufsattelhöhe sind so Nutzvolumen von 90 m<sup>3</sup> (Standard) bis 100 m<sup>3</sup> (Volumen, Mega) üblich. Volumenaufleger finden vorzugsweise in der Automobilzulieferindustrie Einsatz. Diese ermöglichen beispielsweise bei einer Innenhöhe von 3 m eine

dreischichtige Verladung von 1 m hohen Gitterboxen (VDA 2008, S. 27).

Der Güterfernverkehr wird im Allgemeinen mit Entfernungsbereichen von über 150 km definiert, wodurch sehr hohe Jahresfahrleistungen bei den Fahrzeugen erreicht werden. Diese werden beispielsweise in der Fahrleistungserhebung in (BAST 2002, S. 72) bei Sattelzugmaschinen mit rund 110.000 km pro Jahr angegeben.<sup>3</sup> Studien im Umfeld der künftigen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge setzen im Fernverkehr eine Jahresfahrleistung von 135.000 km an (European Commission 2012, S. 170). Der Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung sowie das Fachmagazin VerkehrsRundschau legen bei Kostenrechnungen im Fernverkehr eine Jahresfahrleistung von 130.000 km zugrunde (GRÜNIG 2012; BGL 2013).

<sup>3</sup> Aktuelle Fahrleistungserhebungen finden im Jahr 2014 statt, deren Ergebnisse voraussichtlich Ende 2015 veröffentlicht werden, BAST (2014).



Quelle: (MAN Nutzfahrzeuge Gruppe 2008)

Jahresfahrleistung	110.000...135.000 km/Jahr
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	30...35 l/100 km
Zulässige Gesamtmasse	40 t
Leermasse	SZM: 7,8 t Auflieger: 6,2 t
Maximale Nutzlast	ca. 26 t
Motorleistung/Kraftstoffart	300...400 kW/Diesel
Getriebe	automatisiertes Handschaltgetriebe, 12 oder 16 Gang, Handschaltgetriebe 16 Gang
Fahrzeuglänge/-breite/-höhe	16.500 mm/2.550 mm/4.000 mm

Tab. 2: Technische Daten von Sattelzügen

Für Güterfahrzeuge im Fernverkehr stehen noch keine standardisierten Verfahren zur Verbrauchsanalyse zu Verfügung. aufgrund hoher Autobahnanteile im Fernverkehr werden oft Kraftstoffverbräuche bei konstanten Geschwindigkeiten wie 80, 85 oder 89 km/h sowie bei unterschiedlichen Beladungszuständen, meist bei maximaler Nutzlast, gemessen. Die von Nutzfahrzeugherstellern angewandten Verfahren zur Messung des Kraftstoffverbrauchs bzw. Fahrzyklen sind im Allgemeinen nicht veröffentlicht. Ausnahme bildet ein von der Iveco Magirus AG angewandtes und von der TÜV Süd AG zertifiziertes Verfahren zur Messung von relativen Verbrauchseinsparungen, welches auf Autobahnfahrten mit konstanter Geschwindigkeit beruht (EGGER 2010).

Vergleichbarkeit hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs bieten von der Fachpresse durchgeführte Messungen. Strecken und Zuladung werden hierbei möglichst realitätsnah gewählt. Ziel ist, dass sich ein Großteil der Flottenbetreiber mit Zuladung und den erzielten Niveaus der Kraftstoffverbräuche identifizieren kann. Im Rahmen der Simulationsstudie und des Realversuchs wird auf das Testszenario der VerkehrsRundschau-Redaktion zurückgegriffen. Das Verfahren ist zur Messung von Kraftstoffverbräuchen von Sattelzugmaschinen konzipiert, kann jedoch auch zur Bewertung des Einsparpotenzials bestimmter Maßnahmen am gesamten Sattelzug herangezogen werden.

Der sogenannte VR-Test besteht aus zwei Teilen. Den ersten Teil stellt eine große gemischte Route mit einem Autobahnanteil von 86 % und Landstraßenanteil von 14 % dar, welche auf einer Länge von 360 km mit knapp 40 t Gesamtmasse abgefahren wird. Der zweite Teil besteht aus einer kleinen ge-

mischten Route mit 65 km, welche sowohl teilbeladen als auch als Leerfahrt jeweils einmal abgefahren wird. Somit werden 70 % der Gesamtdistanz vollbeladen und jeweils 15 % teilbeladen bzw. leer absolviert.

Als Zielgeschwindigkeit auf Autobahnen ist 85 km/h vorgegeben, auf Landstraßen 60 km/h.

Der erste Teil ist aufgeteilt in 5 Etappen. Die Etappen bilden jeweils unterschiedliche Autobahntopografien sowie einen Landstraßenanteil ab (Tabelle 3). Die

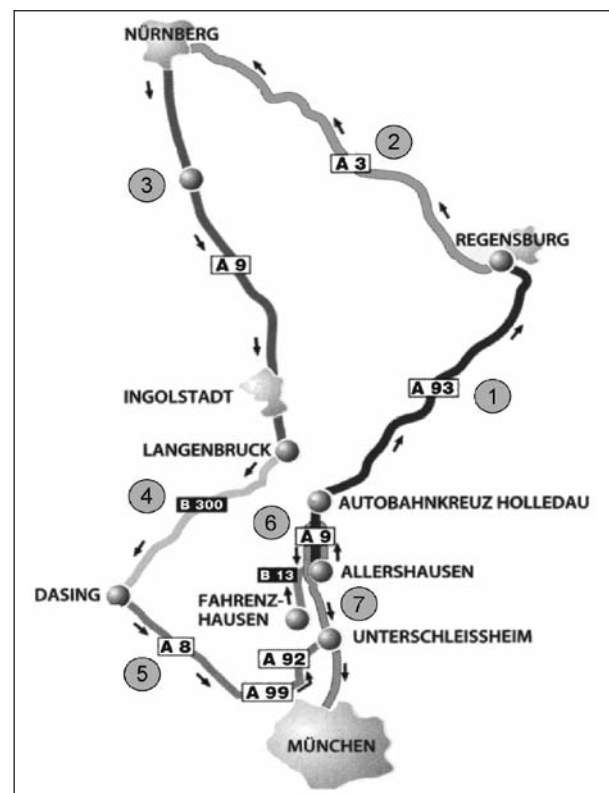


Bild 2: Etappen des VR-Tests, Quelle: (GRÜNIG 2012)

Etappe (Route)		Gesamtmasse (ca.)	Distanz
Teil 1	1. Autobahn medium (A 9 Allershausen – A 93 Regensburg)	40 t	73 km
	2. Autobahn hügelig (A 3 Regensburg – Nürnberg)	40 t	82 km
	3. Autobahn Rolletappe (A 9 Nürnberg – Langenbruck)	40 t	100 km
	4. Landstraße (B 300 Langenbruck – Dasing)	40 t	50 km
	5. Autobahn leicht (A 8 Dasing – A 92/99 Unterschleißheim)	40 t	53 km
Teil 2	6. Landstraße Teilbeladen (B 13 Unterschleißheim – Allershausen)	25 t	20 km
	7. Autobahn Teilbeladen (A 9 Allershausen – Pfaffenhofen – München)	25 t	45 km
	8. Landstraße leer (B 13 Unterschleißheim – Allershausen)	15 t	20 km
	9. Autobahn leer (A 9 Allershausen – Pfaffenhofen – München)	15 t	45 km
			Gesamt: 488 km

Tab. 3: Etappen des VR-Tests, vgl. Bild 2

unterschiedlichen Autobahntopografien spiegeln sich auch im Kraftstoffverbrauch wider. Der zweite Teil, welcher in Teilbeladung und als Leerfahrt absolviert wird, setzt sich aus zwei Etappen zusammen, einer Landstraßen- und einer Autobahnetappe.

Eine ausführliche Beschreibung des Testverfahrens findet sich in Kapitel 7 in der Umsetzung eines Maßnahmenpakets im Realversuch.

### 2.1.2 Verteiler-Lkw

Verteiler-Lkw werden vorwiegend im städtischen und regionalen Güterverkehr eingesetzt. Ihre zulässigen Gesamtmassen betragen 7,5 t bis 12 t. Die Beschränkung auf 7,5 t ist historisch auf eine veraltete Führerscheinklasse zurückzuführen und nimmt zunehmend eine untergeordnete Rolle ein. Tabelle 4 gibt einen Überblick über wesentliche technische Daten.

Studien im Umfeld der künftigen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge setzen Jahresfahrleistungen von Verteiler-Lkw im städtischen und regionalen Güterverkehr mit 40.000 bzw. 60.000 km an (European Commission 2012, S. 170). Der Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung legt im Nah- und Regionalbereich bei Kostenrechnungen eine Jahresfahrleistung von 40.000 bzw. 80.000 km zugrunde (BGL 2013).

Die Fahrzeuge verfügen üblicherweise über einen Standard-Antriebsstrang mit Dieselmotoren in den Leistungsklassen von 110...180 kW und teilweise automatisierter Handschaltung mit 6, 9 oder 12 Gängen. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch kann mit etwa 17 l/100 km angesetzt werden (European Commission 2012, S. 171).

Jahresfahrleistung	40.000...80.000 km/Jahr
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	ca. 17 l/100 km (Diesel)
Zulässige Gesamtmasse	7,5...12 t
Leermasse	ca. 6,5 t
Maximale Nutzlast	ca. 5,5 t
Motorleistung	110...180 kW
Getriebe	6, 9 oder 12 Gang, Handschaltung, automatisierte Handschaltung
Fahrzeuglänge   -breite   -höhe	bis 12.000 mm   bis 2.550 mm   bis 4.000 mm

Tab. 4: Technische Daten von Verteiler-Lkw

Im Rahmen der geplanten CO<sub>2</sub>-Zertifizierung werden Verteiler-Lkw zukünftig sowohl dem Einsatzprofil „Urban Delivery“ als auch „Regional Delivery“ zugeschrieben. Diese sind bisher jedoch noch nicht näher spezifiziert (European Commission 2012). So stehen bislang noch keine gesetzlichen oder etablierten Standards zur Messung des Kraftstoffverbrauchs für Verteiler-Lkw zur Verfügung. In Veröffentlichungen werden deshalb zur Quantifizierung von Einsparpotenzialen jeweils unterschiedliche, oftmals eigene Fahrzyklen angewandt. In (BOOT und CONSANO 2009) wird beispielsweise das Potenzial eines hybriden Antriebsstrangs über einen Iveco-internen Stadt-Fahrzyklus bewertet. Unterschiedliche Fahrzyklen für Stadt- und Vorortverkehr erschweren einen Vergleich von Potenzialbewertungen.

### 2.1.3 Stadtbus

Niederflurbusse werden hauptsächlich im innerstädtischen Linienverkehr eingesetzt und verfügen typischerweise über drei oder zwei Türen. Angetrieben werden sie über im Heck befindliche Diesel- oder Erdgasmotoren in den Leistungsklassen von 180...240 kW. Die Leistungsübertragung findet über ein Automatikgetriebe statt. Tabelle 5 gibt einen Überblick über weitere wesentliche technische Daten. Die üblichen Kraftstoffverbräuche liegen zwischen 39...50 l/100 km bei Dieselantrieb (UITP 2010, S. 12) auf einem sehr hohen Niveau und sind in nachfolgend beschriebenen Fahrzyklen mit hohen Beschleunigungs- und Verzögerungsanteilen sowie Gesamtmassen bis zu 18 t zu begründen.

Studien im Umfeld der künftigen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge setzen Jahresfahrleistungen von Stadtbussen von 60.000 km an. Die Fahrleistungserhebung in (BAST 2002, S. 43)

Jahresfahrleistung	48.000...60.000 km/Jahr
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	39...50 l/100 km
Zulässige Gesamtmasse	18 t
Leermasse	ca. 12 t
Maximale Nutzlast   Sitzplätze	ca. 6 t   ca. 27...36 Sitzplätze
Motorleistung   Kraftstoffart	180...240 kW/Diesel, CNG
Getriebe	4 oder 6 Gang Automatik
Fahrzeuglänge   -breite   -höhe	12.000 mm   2.550 mm   2.900 mm

Tab. 5: Technische Daten von Stadtbussen



bezieht die Jahresfahrleistung von Stadtbussen auf rund 48.000 km.

Als repräsentative Einsatzprofile für Busse im Stadtverkehr werden die SORT-Zyklen (Standardised On-Road Test Cycles) (UITP 2010) sowie der sogenannte Braunschweig-Zyklus herangezogen (DREYER 1975).

Die SORT-Zyklen wurden von der UITP (Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen) für Stadtbusse entwickelt. Ziel war die Definition von praxisnahen Geschwindigkeitsprofilen sowie eines reproduzierbaren Verfahrens für Verbrauchsmessungen. So wurden von der UITP drei Zyklen definiert:

- SORT 1: Schwerer Stadtzyklus,
- SORT 2: Leichter Stadtzyklus,
- SORT 3: Leichter Vorortzyklus.

Die Zyklen bestehen jeweils aus drei trapezförmigen Geschwindigkeits-Zeit-Verläufen ohne Straßensteigungsprofil. SORT 1 bildet mit einer Standzeit von 40 %, 6 Stopps je Kilometer und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 13 km/h stockenden Verkehr in Stadtzentren ab. SORT 2 zeichnet sich durch eine Standzeit von 35 %, 3 Stopps je Kilometer und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 19 km/h aus. Damit repräsentiert SORT 2 leichteren Stadtverkehr. SORT 3 stellt die Verkehrssituation von kleineren Orten oder Vorortgebieten dar. Charakteristische Werte sind eine Standzeit von 20 %, 2 Stopps je Kilometer und eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 26 km/h.

Der sogenannte Braunschweig-Zyklus („Stochastischer Fahrzyklus für Stadt-Linienomnibusse“) stellt einen weiteren etablierten Fahrzyklus dar, der zu Messungen des Kraftstoffverbrauchs von Bussen im Stadtverkehr herangezogen wird. Er wurde an der TU Braunschweig unter der Annahme, dass Busse im Stadtverkehr „mitschwimmen“ von einem Stadtfahrzyklus für Pkw (FTP 75) durch Hinzufügen von Haltestellen abgeleitet (DREYER 1975; BMUB 2012). Der Braunschweig-Zyklus zeichnet sich auch durch eine geringe mittlere Geschwindigkeit von 23,4 km/h aus und ist durch viele Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen charakterisiert.

## 2.1.4 Reisebus

Reisebusse kommen in Deutschland im Personentransport bei Reisedistanzen von durchschnittlich 400 km zum Einsatz (European Commission 2011, S. 55). Dadurch werden Jahresfahrleistungen im Bereich von 60.000...80.000 km erreicht (BASt 2002, S. 43; European Commission 2012, S. 170).

Die vorherrschenden Fahrzeugvarianten verfügen bei einer zulässigen Gesamtmasse von 18 t (2 Achsen) bzw. 24 t (3 Achsen) üblicherweise über 40...60 Sitzplätze. Die zulässige Gesamtlänge beträgt in Deutschland anders als bei Güterfahrzeugen 13,5 m (2 Achsen) bzw. 15 m (3 Achsen). In (European Commission 2011, S. 173) wird der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch mit ca. 28 l/100 km angegeben. Weitere wesentliche technische Daten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Für Reisebusse stehen weder etablierte, noch standardisierte Fahrzyklen zur Messung des Kraftstoffverbrauchs zur Verfügung. Es kann aufgrund der hohen Tagesreisedistanzen und Höchstgeschwindigkeiten von 100 km/h jedoch von hohen Autobahn- und Landstraßenanteilen ausgegangen werden. In (KAISER et al. 2013) wurden zum Beispiel zur Quantifizierung von Verbrauchseinsparpotenzialen durch effizientere Klimatisierung auf zwei eigens entworfene Testszenarien zurückgegriffen. Beim ersten Testszenario handelt es sich um eine viermalige Wiederholung des European Transient Cycle, eines Testzyklus für die Emissionsmessung von Dieselmotoren. Beim zweiten Testszenario handelt es sich um eine eigene aufgezeichnete Fahrt auf der Strecke Berlin-Braunschweig-Berlin.

Jahresfahrleistung	60.000...80.000 km/Jahr
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	ca. 28 l/100 km
Zulässige Gesamtmasse	18 t bzw. 24 t
Leermasse	12...18 t
Maximale Nutzlast   Sitzplätze	ca. 6 t   40...60 Sitzplätze
Motorleistung   Kraftstoffart	220...350 kW   Diesel
Getriebe	6,8 oder 12 Gang Handschaltung, automatisierte Handschaltung
Fahrzeuglänge   -breite   -höhe	13.500 mm bzw. 15.000 mm   2.550 mm   ca. 3.700 mm

Tab. 6: Technische Daten von Reisebussen

## 2.2 Messgrößen der Transporteffizienz

Zur Berechnung der Transporteffizienz werden der Kraftstoffverbrauch bzw. der CO<sub>2</sub>-Ausstoß ins Verhältnis zur Transportaufgabe gesetzt. Die Transporteffizienz kann sich hierbei in unterschiedlichen Messgrößen ausdrücken. Im Rahmen der geplanten CO<sub>2</sub>-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge wurden hierzu Messgrößen entsprechend Tabelle 7 diskutiert (European Commission 2012, S. 35).

Der Kraftstoffverbrauch in l/100 km oder auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen in g/km können ins Verhältnis zu durchschnittlicher oder maximaler Nutzlast, oder auch maximalem Nutzvolumen gesetzt werden. Bei der Personenbeförderung ist die Anzahl der Passagiere relevant.

Die Angabe von Verbrauchseinsparungen wird oft in der Einheit l/100 km beziffert. Dies ist sinnvoll, wenn sich durch die Maßnahme Nutzlast oder Nutzvolumen nicht wesentlich ändern. Darüber hinaus werden Einsparpotenziale auch in Prozent zu einem Referenzverbrauch angegeben.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich aus dem Kraftstoffverbrauch direkt über Umrechnungsfaktoren berechnen. So verbrennt ein Liter Dieseldieselkraftstoff nach Norm EN 16258 zu 2,49 kg CO<sub>2</sub> (Tank-to-Wheel Emission). Unter Berücksichtigung der Vorkette zur Erzeugung des Dieseldieselkraftstoffs wird ein Liter Dieseldieselkraftstoff mit 3,15 kg CO<sub>2</sub> umgerechnet (Well-to-Wheel Emission) (DSLVL 2013).

CO <sub>2</sub> -Emissionen	Kraftstoffverbrauch		
	g/(t * km)	l/(100t * km)	Durchschnittliche Nutzlast
g/(t <sub>max</sub> * km)	l/(100 t <sub>max</sub> * km)		Maximale Nutzlast – auf Basis dieser Messgröße werden Leichtbaumaßnahmen am besten bewertet
g/(m <sup>3</sup> * km)	l/(100 m <sup>3</sup> * km)		Maximales Volumen bei standardisierter Dichte der Güter
g/km	l/100 km		Streckenverbrauch – relevant für Leerfahrten
g/(Pass. * km)	l/(100 Pass. * km)		Anzahl Passagiere mit standardisierter Masse

Tab. 7: Messgrößen für die Transporteffizienz von Nutzfahrzeugen

## 2.3 Systematisierung von Maßnahmen

Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs können seitens der Energiebereitstellung bzw. -wandlung im Antriebsstrang oder seitens des Energieverbrauchs bei den Fahrwiderständen wirken.

Unter Fahrwiderstand versteht man alle äußeren am Fahrzeug wirkenden Kräfte, welche der Fahrzeugbewegung entgegengerichtet sind. Der Gesamtfahrwiderstand  $F_{res}$  ergibt sich zu

$$F_{res} = F_{roll} + F_{air} + F_{acc} + F_{grd}$$

wobei

$F_{roll}$  Rollwiderstand [N]

$F_{air}$  Luftwiderstand [N]

$F_{acc}$  Beschleunigungswiderstand [N]

$F_{grd}$  Steigungswiderstand [N]

Der Rollwiderstand bezeichnet eigentlich den Radwiderstand, der auch Schwall- und Lagerwiderstand sowie Widerstände, welche aus der Fahrwerksgeometrie resultieren, beinhaltet. Diese Studie umfasst nur Maßnahmen aus dem Bereich Rollwiderstand, da die anderen erwähnten Anteile des Radwiderstandes außer bei gravierenden Fahrwerksfehlstellungen, beispielsweise bei Aufliegern, vernachlässigbar sind.

Für die einzelnen Fahrwiderstände gilt

$$F_{roll} = (m_{veh} + m_{load}) * g * f_R * \cos(\alpha)$$

$$F_{air} = A_{St} * c_w * \frac{\rho}{2} * v^2$$

$$F_{acc} = \left( m_{veh} + m_{load} + \frac{J_{red}}{r_{dyn}^2} \right) * a$$

$$F_{grd} = (m_{veh} + m_{load}) * g * \sin(\alpha)$$

wobei

$m_{veh}$  Leermasse Fahrzeugkombination [kg]

$m_{load}$  Nutzlast [kg]

$g$  Erdbeschleunigung, 9,81 m/s<sup>2</sup>

$f_R$  Rollwiderstandsbeiwert [-]

$\alpha$  Steigungswinkel [°]

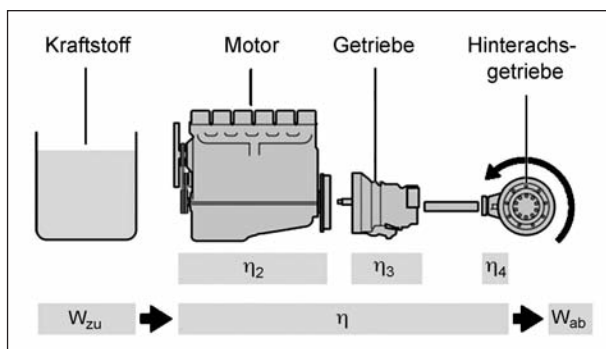
$A_{St}$	Stirnfläche des Fahrzeuges [m <sup>2</sup> ]
$c_W$	Luftwiderstandsbeiwert, $c_W$ -Wert [-]
$\rho_{ref}$	Dichte der Luft [kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Geschwindigkeit [m/s]
$J_{red}$	auf die Antriebsachse umgerechnete Rotationsträgheitsmoment des Antriebstrangs [kg * m <sup>2</sup> ]
$r_{dyn}$	dynamischer Radius des Antriebsrades
$a$	Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ].

Roll- und Luftwiderstand sind dissipativ. Beschleunigungs- und Steigungswiderstand sind bedingt rekuperierbar, da sie in Form von potenzieller und kinetischer Energie gespeichert und je nach Geschwindigkeits- und Steigungsprofil wieder genutzt werden können oder aber dissipativ „verbremsst“ werden müssen. Eine verringerte Fahrzeugmasse wirkt sowohl auf den Rollwiderstand, als auch auf Beschleunigungs- und Steigungswiderstand.

Nachfolgend recherchierte Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich Fahrwiderstand können somit kategorisiert werden in:

- Aerodynamik: Verbesserung des Luftwiderstandsbeiwerts oder Verkleinerung der Stirnfläche,
- Rollwiderstand: Reduktion des Rollwiderstandsbeiwerts,
- Leichtbau: Reduktion der Fahrzeugmasse.

Die im Rahmen dieser Studie betrachteten Fahrzeuge weisen klassische Antriebstränge mit Verbrennungsmotor und einer Antriebsachse auf (Bild 3). Bei der Energiewandlung im Antriebstrang sind die Wirkungsgrade von Verbrennungsmotor ( $\eta_2$ ),

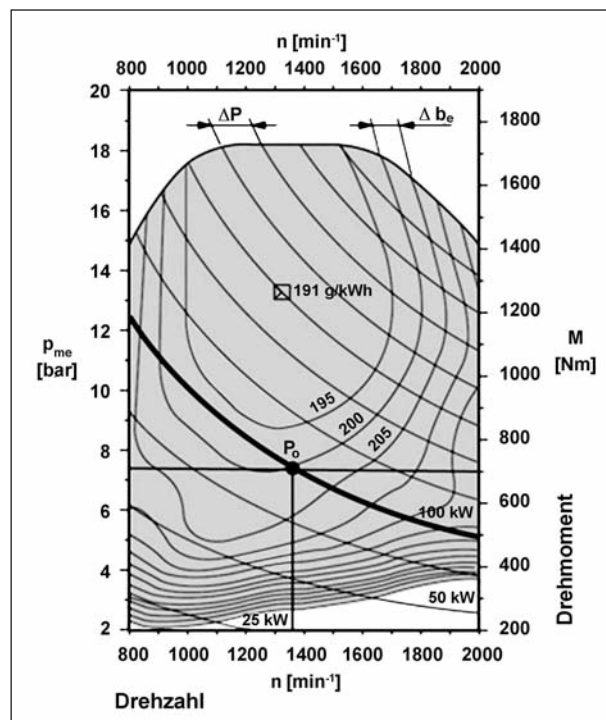


**Bild 3:** Antriebstrang und Wirkungsgrade, Quelle: (MAN Nutzfahrzeuge Gruppe 2008)

Getriebe (Bild 3,  $\eta_3$  und  $\eta_4$ ) sowie Nebenverbraucher ausschlaggebend (MAN Nutzfahrzeuge Gruppe 2008, S. 15).

Die Motoreffizienz drückt sich in dessen Verbrauchskennfeld aus, das den spezifischen Kraftstoffverbrauch über Drehzahl und Drehmoment bzw. effektivem Mitteldruck wiedergibt (Bild 4). Im Verbrauchskennfeld genannte spezifische Verbräuche beziehen üblicherweise für den Motorbetrieb notwendige Nebenverbraucher wie Kühlmittel-, Öl- und Einspritzpumpe mit ein. Der Wirkungsgrad von Nutzfahrzeugdieselmotoren liegt in relevanten Betriebspunkten bei etwa 46 % (Bild 3,  $\eta_2$ ). Der größte Anteil der ungenutzten Energie verlässt das Fahrzeug in Form von Abwärme durch den Abgasstrom (DOLD 2013). Maßnahmen, welche auf der Nutzung dieser Energie beruhen, werden im Folgenden unter Abgaswärmenutzung zusammengefasst. Systeme zur Reduktion des Leerlaufverbrauchs (Start-Stopp-Automatik) werden ebenfalls unter der Kategorie Motor geführt. Weitere Nebenverbraucher außerhalb des Verbrauchskennfeldes bilden Lenkhilfepumpe, Lichtmaschine, Lüfter und Luftkompressor. Bei Fahrzeugen mit hoher Klimatisierungsleistung (Busse), sind Klimaanlage mit zu berücksichtigen.

Maßnahmen wie Hybridantriebe, welche die Bremsenergie bei Verzögerungsvorgängen oder



**Bild 4:** Verbrauchskennfeld (Beispiel), Quelle: (MAN Nutzfahrzeuge Gruppe 2008)

aufgrund von Steigungen aufnehmen und dem Antrieb wieder zur Verfügung stellen, werden im Folgenden unter Rekuperation von Bremsenergie zusammengefasst.

Nachfolgend recherchierte Maßnahmen im Bereich Antriebsstrang können somit kategorisiert werden in:

- Motor und dessen Nebenverbraucher,
- weitere Nebenverbraucher,
- mechanische Wirkungsgrade Getriebe,
- Rekuperation von Bremsenergie,
- Abgaswärmenutzung.

### 3 Literaturrecherche

#### 3.1 Wissenschaftliche Studien und Veröffentlichungen

Im Folgenden werden relevante Studien aufgeführt, welche im Umfeld zur Aufgabenstellung stehen.

##### 3.1.1 Studien der Europäischen Kommission: Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from HDV

###### Lot 1: Strategy

Siehe (European Commission 2011). Für die geplante EU-weite CO<sub>2</sub>-Emissionsregulierung für schwere Nutzfahrzeuge entstand eine Studie, welche eine Strategieentwicklung zur Reduktion von Treibhausgasen relevanter Fahrzeuge unterstützen sollte („Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy“). Im Rahmen der Studie wurde im Kapitel „Technology“ der aktuelle Stand der Technik relevanter Fahrzeuge ermittelt und unter anderem ein Überblick über Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs gegeben. Darüber hinaus wurden zu den Technologien stichpunktartig mögliche Hindernisse für deren Umsetzung recherchiert. Die recherchierten Maßnahmen fußen auf der Studie (RICARDO 2010). Leider bleiben beide Studien genaue Quellen zu den jeweiligen Technologien und Einsparpotenzialen schuldig. Auf die jeweilig genannten Einsparpotenziale wird im Rahmen der folgenden Literaturrecherche teilweise eingegangen.

###### Lot 2: Development and testing of a certification procedure for CO<sub>2</sub> emissions and fuel consumptions of HDV

Siehe (European Commission 2012). Im Rahmen dieser Studie wurde der erste Entwurf eines Verfahrens zur Messung des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen für die geplante EU-weite CO<sub>2</sub>-Emissionsregulierung entworfen. Aufgrund der hohen Variantenvielfalt von schweren Nutzfahrzeugen soll die Zertifizierung auf Basis von Verbrauchssimulationen erfolgen. Schwerpunkt der Studie bildet unter anderem ein Verfahren zur Messung der Fahrwiderstände, welche als wesentliche Eingangsparameter für die Verbrauchssimulation gelten. In einem ersten Entwurf wurde anhand der Verbrauchssimulation eine Parametervariation über Luft-, Rollwiderstand, Nebenverbraucherleistung und Rotationsträgheitsmomente durchgeführt. Die Parametervariation erfolgte für die Fahrzeuge aus den Kategorien Verteiler-Lkw, Stadtbus sowie Sattelzug in Fahrzyklen aus den Kategorien „city“, „regional“ und „highway“.

##### 3.1.2 FAT-Literaturrecherche – Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen

In „Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen – Stand des Wissens“ wurden im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche Maßnahmen zur Reduktion des Luftwiderstands bei Sattelzugmaschinen ermittelt, zusammengefasst und deren Umsetzbarkeit teilweise diskutiert. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass durch aerodynamische Optimierungen eine Reduktion des Luftwiderstands um 20 % realistisch sei. Modellversuche zeigten darüber hinaus eine mögliche Verringerung des Luftwiderstandes um 30 %. Aus der Fülle der möglichen Maßnahmen müsse eine sinnvolle Auswahl getroffen werden, welche auch etwaige Nutzlasteinbußen durch höhere Leermassen, mögliche Probleme bei der Instandhaltung und ein sinnvolles Kosten-Nutzen-Verhältnis mit berücksichtigt. Um die aerodynamischen Maßnahmen in Serienfahrzeugen zu verwirklichen, müssten Fahrzeug- und Aufliegerhersteller enger zusammenarbeiten, um ganzheitliche Optimierungen zu ermöglichen. Auch geltende Richtlinien zu Abmessungen und Fahrzeugmassen seien dahingehend zu verändern, dass entsprechende aerodynamische Maßnahmen umsetzbar sind (FRANK 2012).



### 3.2 Ermittlung grundsätzlicher CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale

Bei der Identifikation von starken Hebeln zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen kann auf Verteilungen von Verlustleistungen im Fahrzeugbetrieb zurückgegriffen werden. Hohe Anteile beispielsweise im Luftwiderstand deuten auf ein hohes Einsparpotenzial durch die Verbesserung der Aerodynamik hin.

Mögliche Einsparpotenziale lassen sich in Verbrauchsgradienten ausdrücken. Beispielsweise geht bei Sattelzügen im Fernverkehr eine Reduktion des Luftwiderstandes um 10 % mit einer Verbrauchsreduktion von rund 3 % einher, wie nachfolgende Analysen zeigen. Diese Gradienten können anhand von Verbrauchssimulationen durch Parametervariation oder durch Energiebetrachtungen ermittelt werden.

#### 3.2.1 Sattelzug

Bild 5 zeigt die Verteilung der abgegebenen Motorleistung bzw. -energie eines 40-t-Sattelzuges bei einer konstanten Geschwindigkeit von 85 km/h in der Ebene (KOPP et al., S. 154). Mit 40 % bzw. 45 % bilden Luft- und Rollwiderstand die größten Verbrauchsanteile. Im Anteil Nebenverbraucher, der mit 8 % zu Buche schlägt, sind Lichtmaschine, Lenkhilfpumpe, Lüfter und Luftpresser zusammengefasst. Die Konstantfahrt vernachlässigt jedoch Einflüsse von Strecken- und Geschwindigkeitsprofilen.

Bild 6 zeigt die Aufteilung der Energieverluste eines Sattelzugs auf der Fernverkehrsrouten Stuttgart-Hamburg-Stuttgart (HOLLOH 2008). Dieser energetischen Betrachtung liegen sowohl ein Geschwindigkeits- als auch ein Steigungsprofil zugrunde. Ausgangspunkt (100 %) bildet hier die Brennergie des verbrauchten Dieselmotors, von der aufgrund des Wirkungsgrades des Motors (vgl. Bild 3,  $\eta_2$ ) noch 44,2 % an der Kurbelwelle zur Verfügung stehen. Wasser- und Öl- und Einspritzpumpe werden energetisch dem Motor zugeschrieben. Einen großen Anteil an der Verlustenergie im Motor macht die Wärmeentwicklung aus. Diese kann über Wärmerekuperation in Form von mechanischer oder elektrischer Energie nutzbar gemacht werden.

Um mit der vorausgegangenen Energiebetrachtung in Bild 5 vergleichbar zu sein, muss die mechani-

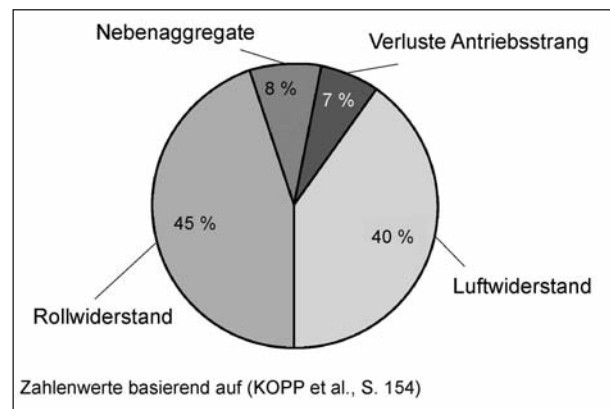


Bild 5: Energieverteilung eines 40-t-Sattelzuges bei einer konstanten Geschwindigkeit von 85 km/h in der Ebene

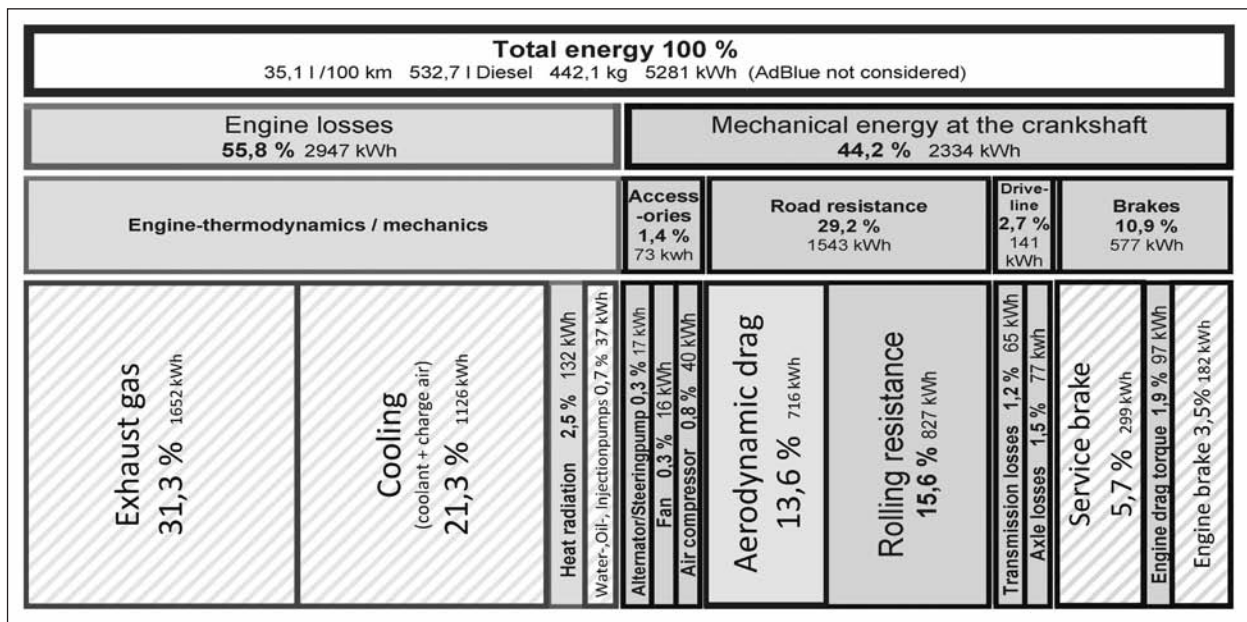


Bild 6: Energieverteilung eines Sattelzugs im Fernverkehr, Quelle: (HOLLOH 2008)

sche Energie an der Kurbelwelle wiederum als Ausgangspunkt (100 %) angenommen werden. So entfallen auf den Luftwiderstand 31 % und auf den Rollwiderstand 35 % der aufgewandten mechanischen Energie. Betriebs- und Motorbremse sowie Motorschleppmoment tragen zusammen mit 25 %, Nebenverbraucher (mittlere Leistung ca. 4 kW) mit 3 % und Antriebstrangverluste mit 6 % zum Kraftstoffverbrauch bei.

Betriebs- und Motorbremsenergie belaufen sich auf 481 kWh. Hieraus lässt sich das Grenzpotenzial durch Rekuperation abschätzen. Dabei seien ein mittlerer Wirkungsgrad von elektrischen Maschinen im motorischen und generativen Betrieb von 70 % sowie ein gleichwertiger Wirkungsgrad für das Be- und Entladen von elektrischen Speichern angenommen. Daraus ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad für die Aufnahme und Abgabe von gespeicherter Energie am Rad von ca. 50 % (HOFMANN 2009, S. 85). Folglich ließen sich etwa 240 kWh der am Rad abgegebenen Arbeit von 2120 kWh (Fahrwiderstands- und Bremsenergie) rekuperieren. Die Energiemenge entspricht einer Verbrauchsreduktion von 11 %.

Bild 7 zeigt die große Differenz maximaler und mittlerer Leistung von Nebenverbrauchern bei einem Sattelzug in einem Autobahnfahrzyklus (DURELLI 2007). Die mittlere Nebenverbraucherleistung liegt im Gegensatz zu vorausgehender Betrachtung (siehe Bild 6) (HOLLOH 2008) mit ca. 8 kW (10,8 PS) um den Faktor 2 höher. Jedoch wurden auch Nebenverbraucher des Motors mit berücksichtigt. Das Beispiel unterstreicht die Notwendigkeit bedarfsgerechter Ansteuerung der Nebenverbraucher des Motors wie Kühlmittelpumpe oder

Motorölpumpe, aber auch weiterer Nebenverbraucher wie Lüfter, Druckluftkompressor oder Lenkhilfepumpe. Zur bedarfsgerechten Ansteuerung können diese abschaltbar oder in ihrer Leistung variabel ausgestaltet werden.

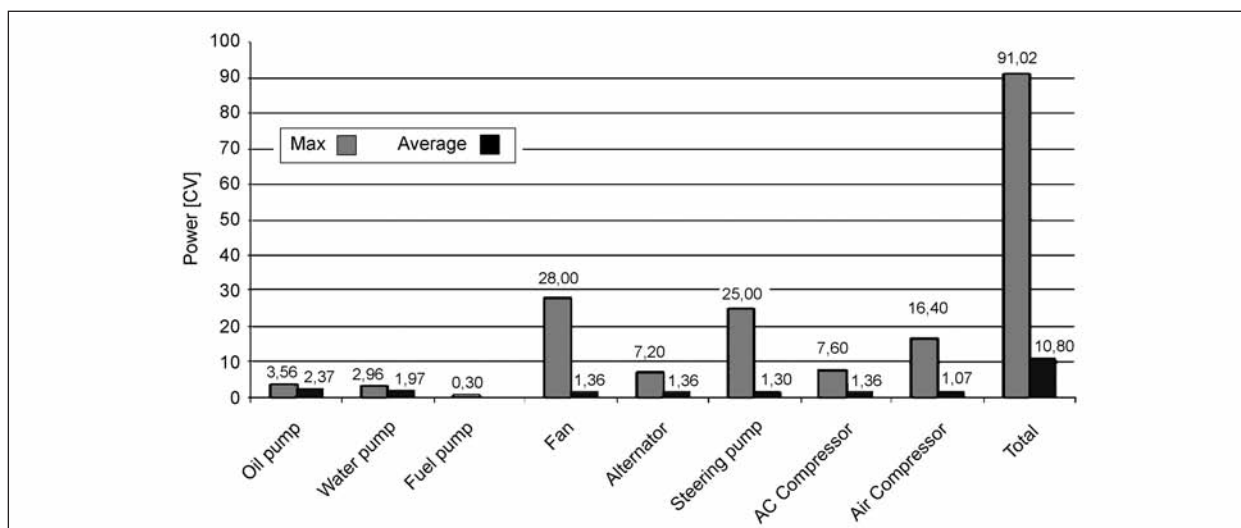
In (European Commission 2012, S. 93) wurden simulativ Parametervariationen an generischen Fahrzeugen (Sattelzug, Verteiler-Lkw und Stadtbus) über verschiedene Fahrzyklen der Kategorien Autobahn, Vorortverkehr und Stadtverkehr durchgeführt. Für einen vollbeladenen Sattelzug im Autobahnfahrzyklus konnten folgende Verbrauchsgradienten ermittelt werden:

- Luftwiderstand -20 % → Verbrauch -6,7 %,
- Rollwiderstand -20 % → Verbrauch -8,2 %,
- durchschnittliche Leistung der Nebenverbraucher -40 % → Verbrauch -1,5 %.

In (DEVESA u. INDINGER 2011) wird eine Verringerung des Luftwiderstandes um 20 % in eine Verbrauchseinsparung von 5,7 % umgerechnet.

Bezüglich des Rollwiderstands zeigen Messungen in (DENIMAL et al. 2012) eine Verbrauchseinsparung von 2 l/100 km bzw. 6 % bei Minderung des Gesamtrollwiderstandbeiwertes um 20 %.

Der Verbrauchgradient durch Leichtbau wird in (HELMS u. LAMBRECHT 2007) mit 0,3...0,6 l/100 km je eingesparter Tonne angegeben. Messungen in (DENIMAL et al. 2012) bestätigen den Wert von rund 0,6 l/100 km und Tonne, der bei einem Referenzverbrauch von 35 l/100 km einer Verbrauchsreduktion von 1,7 % entspricht.



**Bild 7:** Mittlere und maximale Leistung von Nebenverbrauchern, Quelle: (DURELLI 2007)

Referenzverbrauch: 35 l/100 km, 40 t zGG, Nutzlast 26 t		
Optimierung	Wirkung/Einsparpotenzial	
Luftwiderstand -10 % ( $c_{w}$ , $A_{st}$ )	-1,0 l/100 km	(-3,0 %)
Rollwiderstand -10 %	-1,0 l/100 km	(-3,0 %)
Leichtbau -1.000 kg (bzw. -2,5 % bei 40 t)	-0,6 l/100 km	(-1,7 %)

**Tab. 8:** Sattelzug im Fernverkehr – angewandte Verbrauchsgradienten abgeleitet aus der Literaturrecherche

Im Rahmen dieser Literaturstudie können daher für Sattelzüge im Fernverkehr überschlagsmäßige Verbrauchsgradienten entsprechend Tabelle 8 angewendet werden. Als Referenzverbrauch werden 35 l/100 km angesetzt. Um eine einheitliche Basis für die anschließende Literaturrecherche zu schaffen, werden recherchierte Parameter zu Luft- oder Rollwiderstandsbeiwerten über diese Gradienten bzw. den Referenzverbrauch in Verbrauchseinsparungen umgerechnet.

Aus vorangegangenen Betrachtungen können für die Literaturstudie für Sattelzüge folgende Schwerpunkte abgeleitet werden:

### 3.2.2 Verteiler-Lkw

Bei der Definition der Fahrzeuge wurde bereits die Unschärfe bei den relevanten Fahrzyklen deutlich. Für Verteiler-Lkw mit einer Gesamtmasse von 12 t konnten in (European Commission 2012) bei Vollbeladung in einem Stadtfahrzyklus folgende Gradienten ermittelt werden:

- Luftwiderstand -20 % → Verbrauch -1,0 %,
- Rollwiderstand -20 % → Verbrauch -3,1 %,
- durchschnittliche Leistung der Nebenverbraucher -50 % → Verbrauch -3,1 %.

In einem Fahrzyklus, welcher Regionalverkehr abbildet fallen die Verbrauchgradienten hingegen wie folgt aus:

- Luftwiderstand -20 % → Verbrauch -4,8 %,
- Rollwiderstand -20 % → Verbrauch -5,1 %,
- durchschnittliche Leistung der Nebenverbraucher -40 % → Verbrauch -2,5 %.

Im Regionalfahrzyklus fallen die Einsparpotenziale durch verbesserte Aerodynamik wesentlich höher aus als im Stadtfahrzyklus.

Das Einsparpotenzial durch Leichtbau oder Rekuperation von Bremsenergie kann aufgrund fehlender Literatur leider nicht beziffert werden. aufgrund der Fahrzyklus-Charakteristik von Stadtfahrzyklen, kann jedoch von einem erheblichen Einsparpotenzial durch die Rekuperation von Bremsenergie ausgegangen werden.

Aus vorangegangenen Betrachtungen können für die Literaturstudie für Verteiler-Lkw daher folgende Schwerpunkte abgeleitet werden:

- Aerodynamik,
- Rekuperation von Bremsenergie,
- Rollwiderstand,
- Nebenverbraucher.

### 3.2.3 Stadtbus

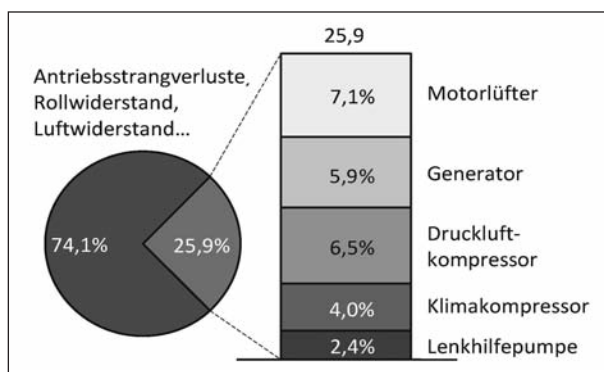
Für Stadtbusse konnten in (European Commission 2012, S. 93) bei Teilbeladung in einem Stadtzyklus simulativ folgende Gradienten ermittelt werden:

- Luftwiderstand -20 % → Verbrauch -0,7 %,
- Rollwiderstand -20 % → Verbrauch -2,4 %,
- durchschnittliche Leistung der Nebenverbraucher -50 % → Verbrauch -16,3 %.

In zugehöriger Energieverteilung entfallen entsprechend auf die Nebenverbraucher 43 %, auf den Rollwiderstand 16 % und den Luftwiderstand 4 % der vom Motor abgegebenen mechanischen Leistung. Motor- und Betriebsbremse tragen 21 % zum Kraftstoffverbrauch bei, Antriebsstrangverluste etwa zu 16 %.

In (European Commission 2012, S. 121) abgebildeter Energieverteilung entfallen auf die Nebenverbraucher hingegen 26 %, aufgeschlüsselt entsprechend Bild 8. Neben den klassischen Nebenverbrauchern in Nutzfahrzeugen wird auch die Klimaanlage mit bilanziert, die in diesem Beispiel mit 4 % zum Kraftstoffverbrauch beiträgt.

In (BIERMANN u. HARTMANN 2009) wurden simulativ Einsparpotenziale bei Stadtbussen untersucht. Die Analyse erfolgte über einen typischen Stadtbuszyklus mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 26 km/h und einer Standzeit von 16 %. Die Reduktion des Luft- und Rollwiderstandsbeiwertes um jeweils 10 % ergab eine Verbrauchssenkung um 0,1 % bzw. 1,5 %. Der Gradient über den Luftwiderstandsbeiwert fällt in der



**Bild 8:** Energieverteilung Stadtbus, Werte nach (European Commission 2012, S. 121)

Veröffentlichung geringer aus, als in (European Commission 2012, S. 93). Darüber hinaus wurde das Potenzial durch Start-Stopp-Automatik, also das Abschalten des Verbrennungsmotors während des Stillstandes, und Rekuperation von Bremsenergie über einen mittleren Rad-Speicher-Rad-Wirkungsgrad von 50 % abgeschätzt. Die möglichen Verbrauchssenkungen durch Rekuperation werden mit 20 % angegeben, die der Start-Stopp-Automatik mit 6 %. In wie weit Nebenverbraucher in der Simulation berücksichtigt werden, geht aus der Veröffentlichung nicht hervor.

Leider geht keine der eben genannten Studien auf Einsparpotenziale durch Verringerung der Fahrzeugmasse ein. Die UITP, verantwortlich für die Definition der SORT-Zyklen, nennt jedoch Richtwerte in den einzelnen Zyklen (UITP 2010): Diese werden mit folgenden Zahlen angegeben:

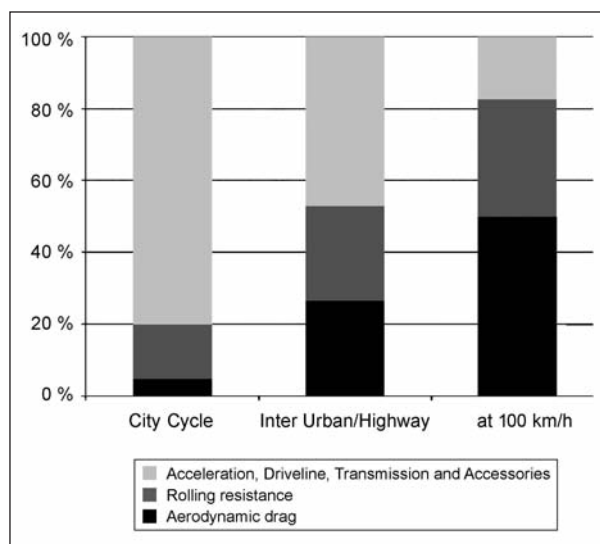
- -1,9 l/100 km je Tonne (SORT 1),
- -1,7 l/100 km je Tonne (SORT 2),
- -1,5 l/100 km je Tonne (SORT 3).

Aus diesen Betrachtungen können für die Literaturstudie für Stadtbusse folgende Schwerpunkte abgeleitet werden:

- Rekuperation von Bremsenergie,
- Nebenverbraucher,
- Leichtbau,
- Motor und dessen Nebenverbraucher,
- Rollwiderstand.

### 3.2.4 Reisebus

Für Reisebusse wurden in (European Commission 2012) keine Parametervariationen durchgeführt.



**Bild 9:** Energieverteilung Reisebus, Quelle: (FISCHER u. BLANKE 2013)

Allgemein finden sich in aktueller, einschlägiger Literatur deutlich weniger Studien zu Reisebussen, als im Vergleich zu Sattelzügen oder Stadtbussen. Aus (FISCHER u. BLANKE 2013) (Bild 9) können jedoch Verbrauchsgradienten aus Energieverteilungen abgeleitet werden.

Gemischter Fahrzyklus (Bild 9, Mitte):

- Luftwiderstand -10 % → Verbrauch -2,7 %,
- Rollwiderstand -10 % → Verbrauch -2,7 %.

Konstante Fahrt mit 100 km/h:

- Luftwiderstand -10 % → Verbrauch -5,0 %,
- Rollwiderstand -10 % → Verbrauch -3,3 %.

So bilden bei beiden relevanten Fahrzyklen Roll- und Luftwiderstand einen dominanten Anteil am Gesamtverbrauch.

Aus diesen Betrachtungen können für die Literaturstudie für Reisebusse folgende Schwerpunkte abgeleitet werden:

- Aerodynamik,
- Rollwiderstand.

### 3.2.5 Zusammenfassung

Die Schwerpunkte für die anschließende Literaturrecherche sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Dargestellt sind die ermittelten Maßnahmenkategorien, in denen die größten Einsparpotenziale für die jeweiligen Fahrzeugkategorien zu erwarten sind.



Bisherige Studien befassen sich schwerpunktmäßig mit Einsparpotenzialen bei Sattelzügen und Stadtbussen.

Mögliche Einsparungen durch Leichtbau konnten so nur bei Sattelzügen und Stadtbussen quantifiziert werden. Es ist jedoch auch mit Verbrauchsminde- rungspotenzialen in gleichwertigen Größenordnungen bei Verteiler-Lkw und Reisebussen zu rechnen.

Standardisierte oder etablierte Fahrzyklen stehen derzeit nur bei Sattelzügen und Stadtbussen zur Verfügung. Besonders bei Verteiler-Lkw, welche sowohl Stadt- als auch Regionalfahrzyklen zuzu- ordnen sind, führt dies möglicherweise zu Unschär- fen in Potenzialangaben, wenn das Einsatzgebiet nicht genau spezifiziert ist.

	Sattel- zug	Verteiler- Lkw	Stadt- bus	Reise- bus
Leichtbau	x		x	
Aerodynamik	x	x		x
Rollwiderstand	x	x	x	x
Motor und dessen Nebenverbraucher	x			
Nebenverbraucher	x	x	x	
Rekuperation von Bremsenergie	x	x	x	
Abgaswärmenutzung	x			

**Tab. 9:** Recherchierte Schwerpunkte für die Literaturrecherche von konkreten Maßnahmen

### 3.3 Differenzierte Betrachtung von CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzialen im Bereich Fahrwiderstand

Im Folgenden werden zu den in Tabelle 9 zusam- mengefassten Schwerpunkten Leichtbau, Aero- dynamik und Rollwiderstand konkrete Maßnahmen recherchiert, um Aussagen über mögliche Einspar- potenziale in den jeweiligen Kategorien zu quanti- fizieren.

#### 3.3.1 Leichtbau

Das Leichtbaupotenzial von Sattelzügen wurde in der Literaturrecherche mit 0,3...0,6 l/100 km je ein- gesparter Tonne quantifiziert. Bei Stadtbussen wird das Potenzial mit 1,5...1,9 l/100 km je Tonne ange- geben. Konkrete Maßnahmen zur Massenreduktion sind mannigfaltig. Nachfolgend sei jedoch das Beispiel Leichtbauaufleger, welche von Aufleger- herstellern im Produktprogramm geführt werden, diskutiert.

Die Leermasse von Sattelauflegern kann durch be- lastungsgerechte Chassisstrukturen und Mate- rialauswahl verringert werden. Leichtbauaufleger können gegenüber herkömmlichen (ca. 6.200 kg) einen Leermassenvorteil von rund einer Tonne auf- weisen. Tabelle 10 verdeutlicht dies und gibt einen Überblick über die Leermassen verschiedener Standard- und Volumen-Aufleger mit Schiebe- plane. Sonderausstattungen wie Palettenstau-

Hersteller	Trailer	Ausführung	Achslast	Leermasse [kg]
Fahrzeugwerk Bernard Krone GmbH	Profi Liner	Standard	3 x 9 t	6.250
	Profi Liner Ultra	Standard	3 x 9 t	5.650
	Light Liner	Standard	3 x 9 t	5.200
	MEGA Liner	Volumen	3 x 9 t	6.900
Kögel Trailer GmbH & Co. KG	Cargo	Standard	3 x 9 t	6.000
	Light	Standard	3 x 9 t	5.200
	Mega	Volumen	3 x 9 t	5.500
Schmitz Cargobull AG	S.CS UNIVERSAL	Standard	3 x 9 t	6.285
	S.CS UNIVERSAL-X-Light	Standard	3x 9 t	5.410
	S.CS MEGA	Volumen	3 x 9 t	6.870
	S.CS MEGA-X-Light	Volumen	3x 9 t	6.060
	S.CS ECOCARGO	Standard	2 x 10 t	5.230
Berger Fahrzeugtechnik Ges.m.b.H.	24 LTn	Standard	3 x 9 t	4.700
	24LTnV	Volumen	3 x 9 t	5.100

**Tab. 10:** Herstellerangaben zu Leermassen von Auflegern mit Schiebeplane

kästen, Werkzeugkästen oder Ersatzräder bleiben im Beispiel unberücksichtigt.

- Mögliche Einschränkungen

Leichtbauaufleger weisen durch ihre belastungsgerechte Auslegung gegebenenfalls eine geringere Robustheit gegenüber im Speditionsalltag teilweise auftretenden Missbrauchslastfällen auf bzw. verfügen gegebenenfalls über eine verminderte Lebensdauer.

- Verfügbarkeit

Serienreife Produkte befinden sich auf dem Markt.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion ist abhängig von der Topografie. Der Leermassenvorteil wird bei massenseitiger Auslastung der Auflieger gegebenenfalls durch erhöhte Nutzlast kompensiert. Bei Nutzlastkompensation bleibt der absolute Kraftstoffverbrauch unverändert. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion stellt sich direkt auf Basis erhöhter Transporteffizienz ein (siehe Messgrößen in Kapitel 2.2).

Die Verbrauchsminderung ohne Nutzlastkompensation kann mit 0,3...0,6 l/100 km bzw. etwa 1...2 % Kraftstoffverbrauch angegeben werden (HELMS u. LAMBRECHT 2007).

### 3.3.2 Aerodynamik

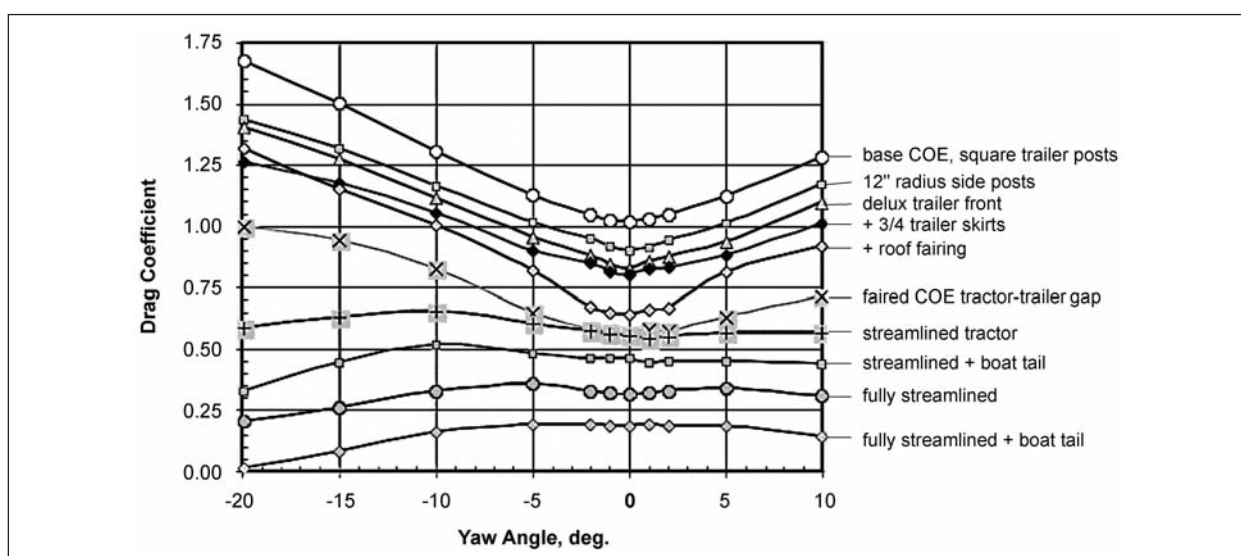
Die Luftwiderstandsbeiwerte von Sattelzügen liegen in einem Bereich von 0,50...0,70, bei Verteiler-

Lkw zwischen 0,45...0,62, bei Reisebussen hingegen bei 0,35...0,50 (SCHÜTZ 2013, S. 660). Der geringere Luftwiderstandsbeiwert von Reisebussen wird unter anderem durch größere Radien an der Außenkontur, Unterbodenverkleidungen und Einzüge im Heckbereich erreicht.

Bei Sattelzügen und Verteiler-Lkw werden derzeit nicht alle aerodynamischen Möglichkeiten voll ausgeschöpft. Die Maximierung des Ladevolumens und der Komfort im Fahrerhaus wirken hier als wesentliche Restriktionen. Bei Verteiler-Lkw können Luftleitkörper auf dem Fahrerhausdach als Standardausstattung gesehen werden. Bei Sattelzügen können Spoiler auf dem Fahrerhausdach in Kombination mit Endkantenklappen (Verkleidung seitlich zwischen Fahrerhaus und Auflieger) sowie Fahrgestellverkleidungen an der Sattelzugmaschine als Standardausstattung angesehen werden (Tabelle 2). Weiteres Potenzial zur aerodynamischen Optimierung bilden beim Sattelzug folgende Bereiche (SCHÜTZ 2013, S. 695):

- Stirnseite des Fahrerhauses,
- Freiraum zwischen Fahrerhaus und Auflieger,
- Seitenzone des Auflieger,
- Heckbereich des Aufliegers.

Im Folgenden werden schwerpunktmäßig aerodynamische Maßnahmen bei Sattelzügen recherchiert. Die recherchierten Maßnahmen zielen meist auf eine der oben genannten Zonen ab, üben jedoch möglicherweise Wechselwirkungen gegen-



**Bild 10:** Luftwiderstandsbeiwert (Drag Coefficient) als Funktion des Schräganströmwinkels (Yaw Angle) bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen, Quelle: (McCALLEN et al. 2004, S. 17)

seitig aufeinander aus. Einsparpotenziale durch aerodynamische Maßnahmen können daher im Allgemeinen nicht addiert werden. Maßnahmenkombinationen sind folglich eigens zu untersuchen.

Im Realeinsatz spielen neben dem  $c_W$ -Wert (Frontalanströmung des Fahrzeugs) auch Luftwiderstandsbeiwerte bei Schräganströmung eine Rolle. Der Luftwiderstandsbeiwert steigt im Allgemeinen bei Schräganströmung an. Auch der Freiraum zwischen Fahrerhauskabine und Auflieger ist für den Anstieg verantwortlich. Dies sind in Bild 10 verdeutlicht (McCALLEEN et al. 2004, S. 17). Bestimmte Maßnahmen, wie nachfolgend diskutierte Seitenverkleidungen bei Sattelzügen wirken besonders bei Schräganströmung der Fahrzeuge.

### Seitenverkleidung am Auflieger

Seitenverkleidungen bestehen aus einer dünnen Platte, die im unteren, seitlichen Bereich von Aufliegern angebracht ist. So schirmen sie den Rahmen und das Fahrwerk des Aufliegers weitestgehend von Luftdurchströmungen ab und verringern so Wirbelbildung (Bild 11). Dies hat einen verminderten Luftwiderstand zur Folge.

Der Effekt von Seitenverkleidungen wurde in verschiedenen Experimenten nachgewiesen. Dabei ist vor allem anzumerken, dass die Wirksamkeit von Seitenverkleidungen mit zunehmender Schräganströmung ansteigt (FRANK 2012). Bei Frontalanströmung ermittelte geringere  $c_W$ -Werte mit Seitenverkleidungen können somit als Mindestverbesserungspotenziale betrachtet werden.

Positive Nebeneffekte stellen sich durch einen verbesserten Unterfahrerschutz sowie durch geringere Geräusch- und Spritzwasserbildung ein (HOEPKE et al. 2010).

- Mögliche Einschränkungen

Seitenverkleidungen sind beschädigungsanfällig und könnten bei seitlicher Beladung durch Gabel-



Bild 11: Seitenverkleidung mit vertikalem Flügelprofil

stapler sowie beim Heranfahren an Laderampen Schaden nehmen.

Die Masse von Seitenverkleidungen liegt bei etwa 200 kg.

- Verfügbarkeit

Serienreife Produkte werden von Auflieger- und Anbauteileherstellern angeboten und können auch bei bestehenden Aufliegern nach gerüstet werden.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In (van RAEMDONCK 2012) wurde der Kraftstoffverbrauch bei Konstantfahrt mit 85 km/h in einem Testoval gemessen, um die CO<sub>2</sub>-Reduktion von verschiedenen aerodynamischen Anbauteilen zu beziffern. Der Test wurde von einem Hersteller aerodynamischer Anbauteile (Ephicas SideWing) durchgeführt. Dabei ergaben sich folgende Einsparpotenziale:

Bei einer Standard-Seitenverkleidung sank der Kraftstoffverbrauch um 0,5 l/100 km. EphicasSideWing, eine Seitenverkleidung welche über ein spezielles vertikales Flügelprofil am vorderen Ende der Seitenverkleidung verfügt (Bild 11), ergab eine Einsparung von 1,5 l/100 km. Dies entspräche bei einem Referenzverbrauch von 35 l/100 km (Tabelle 8) einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 1,4...4,3 %.

In (WEINBERGER 2012) liegen CFD-Analysen der MAN Truck & Bus AG zugrunde. Hierbei wird die CO<sub>2</sub>-Reduktion von Seitenverkleidungen mit 0,5 l/100 km bei Frontalanströmung, bzw. 1,0 l/100 km bei einem Schräganströmwinkel von 5° angegeben. Dies entspräche bei einem Referenzverbrauch von 35 l/100 km einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 1,5...3 %.

In (HOEPKE et al. 2010) wird die Verbrauchseinsparung von Seitenverkleidungen ohne Referenzverbrauch mit 3 % angegeben.

In (FRANK 2012) werden die Ergebnisse einer umfangreichen Literaturrecherche zu Aerodynamik bei Nutzfahrzeugen zusammengefasst. Die Studie kommt zum Schluss, dass für Seitenverkleidungen eine Verbesserung des  $c_W$ -Wertes von 0,03 angesetzt werden kann.

Eine Literaturrecherche in (MIRA 2001) kommt zum gleichen Schluss wie (FRANK 2012).

In (HAUSBERGER et al. 2012) wurden unterschiedliche Verfahren zur Fahrwiderstandsmes-

sung getestet. Hierfür standen Auflieger mit und ohne Seitenverkleidung zur Verfügung. Der mit einer Seitenverkleidung und einer optimal gespannten Plane ausgestattete Auflieger wies in den Tests einen um 0,03 geringeren  $c_W$ -Wert auf. Das Ergebnis konnte durch weitere Tests, in denen die Aerodynamik der Sattelzugmaschine künstlich verschlechtert wurde, wiederholt werden. Die Messungen bestätigen damit den schon in (MIRA 2001) und (FRANK 2012) angegebenen Wert und deuten darauf hin, dass der Wert auch bei Sattelzugkombinationen aus Zugmaschine und Auflieger unterschiedlicher Hersteller seine Gültigkeit beibehält.

- Kosten

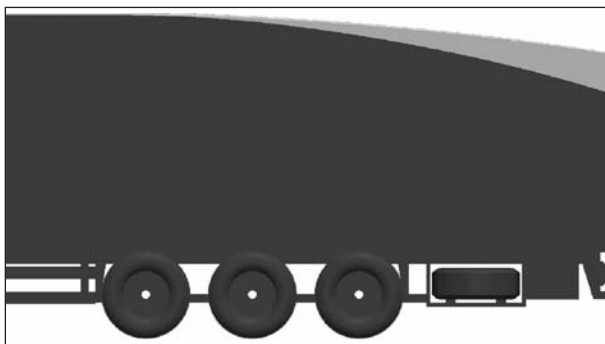
Die Zusatzkosten herkömmlicher Seitenverkleidung werden mit 5.000 Euro veranschlagt (WITTENBRINK 2011).

#### Dacheinzug am Aufliegerheck „Delphinbuckel“

Eine Möglichkeit, die Sogwirkung am Heck zu verringern, besteht in der Absenkung der Dachstruktur wie in Bild 12 zu sehen. Dadurch wird erreicht, dass der Unterdruck am Heck auf eine kleinere Fläche wirkt (DEVESA u. INDINGER 2011).

- Mögliche Einschränkungen

Eine verminderte Portalhöhe erschwert die Beladung durch das Heck. Die volle Innenhöhe kann nur bei seitlicher Beladung genutzt werden. Alternativ kann bei Aufliegern mit Seitenplane, wenn verfügbar, das sogenannte Edscha-Verdeck zurückgeschoben werden, um eine volle Durchladehöhe am Heckportal zu gewährleisten. Bei Kofferaufliegern ist dies nicht möglich. Absenkevorrichtungen in diesem Marktsegment sind aufwändiger einzuschätzen.



**Bild 12:** Dacheinzüge auf 3.500 mm bzw. 3.000 mm Fahrzeughöhe am Heck, Quelle: (DEVESA u. INDINGER 2011)

- Verfügbarkeit

Auflieger mit Dacheinzug sind bisher nicht serienmäßig verfügbar. Ausgeschriebene Studienarbeiten an der TU Braunschweig, Institut für mobile Arbeitsmaschinen und Nutzfahrzeuge, deuten auf erste Vorentwicklungen im Bereich automatischer Dachabsenkungen hin (TU Braunschweig 2012).

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In (DEVESA u. INDINGER 2011) wurden an einer repräsentativen Referenzgeometrie CFD-Analysen und Windkanaluntersuchungen für die Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) durchgeführt. Ziel war die Untersuchung von aerodynamischen Potenzialen alternativer Front- und Heckgestaltungen an Sattelaufliegern. Dabei wurden auch zwei Varianten von Dacheinzügen untersucht, welche in einer Fahrzeughöhe von 3.500 mm bzw. 3.000 mm resultierten. Dabei zeigten sich um 7 % bzw. 10 % verringerte  $c_W$ -Werte, was Verbrauchseinsparungen von rund 2 % bzw. 3 % entspräche.

In (STADLER et al. 2012) wurde in CFD-Analysen an einer repräsentativen Referenzgeometrie ein Dacheinzug auf 3.500 mm Fahrzeughöhe untersucht. Die Maßnahme ging hier jedoch mit einer Verringerung des  $c_W$ -Wertes um 15 % einher, was eine Verbrauchseinsparung von 4,5 % ergeben würde.

Beide Studien quantifizieren die Verbesserung des Luftwiderstandsbeiwertes unterschiedlich, zeigen jedoch ein mögliches Potenzial dieser Maßnahme auf.

- Kosten

Die einmalige Absenkung der Dachstruktur durch ein niedrigeres Heckportal und modifizierte Seitenplane stellt für Aufliegerhersteller keinen großen Aufwand dar. Zusatzkosten für Seitenplanenaufleger mit abgesenkter Dachkontur ohne Absenkevorrichtung sind daher als kostenneutral einzuschätzen.

#### Dach- und Heckeinzug

Die Sogwirkung am Fahrzeugheck kann neben Dacheinzügen (vertikal) auch durch horizontale Einzüge verringert werden.

Bild 13 zeigt die Strömungssimulation eines kombinierten Dach- und Heckeinzugs, wobei der Dacheinzug (vertikal) in der Seitenansicht links und der Heckeinzug (horizontal) in der Draufsicht rechts zu



erkennen sind (HOEPKE et al. 2010). Einzüge können entweder über Geometrieänderungen am Aufliegerheck selbst oder über sogenannte Heckeinzugsklappen („Boat-Tails“, „Flaps“) realisiert werden. Geometrisch besteht der Hauptunterschied im geschlossenen bzw. offenen Endabschluss.

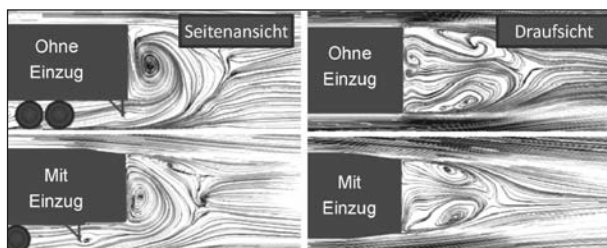
- Mögliche Einschränkungen

Die zusätzliche Anbringung von Heckeinzugsklappen an Aufliegern mit der üblichen Länge von 13,6 m steht der Längenbegrenzung nach § 32 der StVZO entgegen. Wie einleitend bereits erwähnt, ist jedoch nach der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 nun eine Anbringung von bei Fahrzeugstillstand einklappbaren, aerodynamischen Anbauteilen mit einer Länge von bis zu 500 mm zulässig. Die Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 sieht vor, dass die zusätzliche Länge von 500 mm bzw. Breite von 50 mm nur in ausgeklappten Zustand zur Verfügung steht. Für den eingeklappten Zustand werden keinerlei zusätzliche Längen bzw. Breiten gewährt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass nachrüstbare Heckeinzugsklappen außen an Heckportale montiert werden und daher selbst in eingeklappten Zustand ca. 50 mm zusätzliche Länge in Anspruch nehmen. Dieser Umstand könnte einen möglichen Hinderungsgrund für die nachträgliche Installation von Heckeinzugsklappen darstellen.

Wie bei Seitenverkleidungen besteht auch eine erhöhte Beschädigungsanfälligkeit, welche die Akzeptanz von Heckeinzugsklappen schmälern könnte.

- Verfügbarkeit

In (van RAEMDONCK 2012) wurde ein Funktionsprototyp von Dach- und Heckeinzugsklappen getestet. Es handelt sich dabei um die Anpassung einer auf dem US-Markt erhältlichen Lösung mit einer Länge von 1.200 mm im ausgeklappten Zustand. In eingeklappten Zustand wird die Beladung durch das Heckportal nicht eingeschränkt. Auch Heck-



**Bild 13:** Heck- und Dacheinzug mit 7° über eine Länge von 1.600 mm, Quelle: (HOEPKE et al. 2010)

einzugsklappen mit einer Länge von 500 mm und entsprechend der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 konform, sind verfügbar. Heckeinzugsklappen sind für eine Vielzahl an Heckportalen nachrüstbar. Es gilt jedoch die oben erwähnte Einschränkung des zusätzlichen Längenbedarfs in eingeklappten Zustand.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In CFD- und Windkanalanalysen der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) (DEVESA u. INDINGER 2011) wurden unterschiedliche Ausführungen von Dach- und Heckeinzugsklappen untersucht.

- Dach- und Heckeinzugsklappen 400 mm, Verringerung des Luftwiderstandsbeiwertes um 6,0...6,5 % bzw. ca. 2,0 % Kraftstoffverbrauchsminde rung (Bild 14, links),
- Dach- und Heckeinzugsklappen 1.200 mm, Verringerung des Luftwiderstandsbeiwertes um 5,6...6,0 % bzw. ca. 1,8 % Kraftstoffverbrauchsminde rung (Bild 14, rechts).

In dieser Studie wurde somit ein minimal geringeres Potenzial durch längere Heckeinzugsklappen ermittelt.

In (van RAEMDONCK 2012) wurde, wie schon für Seitenverkleidungen, der Kraftstoffverbrauch bei Konstantfahrt mit 85 km/h in einem Testoval gemessen, um die CO<sub>2</sub>-Reduktion von verschiedenen aerodynamischen Anbauteilen zu beziffern. Der Versuch wurde von einem Hersteller von aerodynamischen Anbauteilen (Ephicas SideWing) durchgeführt. Die getesteten Dach- und Heckeinzugsklappen (Adaption einer US-amerikanischen Lösung, 1.200 mm Länge) wiesen eine Verbrauchsreduktion von 1,12 l/100 km auf, bei einer konstanten Geschwindigkeit von 85 km/h. Bei einer konstanten



**Bild 14:** Heck- und Dacheinzugsklappen mit 400 mm bzw. 1.200 mm Länge, Quelle: (DEVESA u. INDINGER 2011)

Geschwindigkeit von 85 km/h auf einer öffentlichen Straße ergab sich eine Einsparung von 1,65 l/100 km. Wodurch sich der Unterschied zwischen beiden Ergebnissen ergibt, geht aus der Veröffentlichung nicht hervor.

In (HOEPKE et al. 2010) wird, basierend auf CFD-Analysen, das Potenzial eines Dach- und Heckeinzugs mit 7° über eine Länge von 1.600 mm angegeben (Bild 13). Dach und Seiten sind um 200 mm eingezogen. Die Änderung im  $c_W$ -Wert wird mit 11 % angegeben, die Verbrauchsreduktion mit 1,5 l/100 km.

In (STADLER et al. 2012) wurde der oben erwähnte vertikale Dacheinzug auf 3.500 mm Fahrzeughöhe noch mit einem Heckeinzug von 250 mm je Seite kombiniert. Die Maßnahme ging einher mit einer Verringerung des  $c_W$ -Wertes um 23 %. Dies entspräche einer Verbrauchsreduktion von 6,9 %.

In (DENIMAL et al. 2012) wurde ein abgerundeter Heckeinzug mit einer Länge von 1.200 mm an einem bereits durch Seitenverkleidungen optimierten Fahrzeug anhand von Verbrauchstests auf öffentlichen Straßen getestet. Durch den Heckeinzug konnte der Verbrauch um weitere 2,3 % gesenkt werden (Bild 15).

- Kosten

Zusatzkosten für nachrüstbare Dach- und Heckeinzugsklappen können entsprechend Herstellerangaben (Advanced Transit Dynamics, Inc. 2012) mit 3.000 US \$ bzw. 2.300 € angesetzt werden.



**Bild 15:** Abgerundeter Heckeinzug mit einer Länge von 1.200 mm

### Diffusor am Auflieger

Diffusoren werden am oberen Ende des Hecks von Aufliegern angebracht und leiten am Aufliegerdach strömende Luft in das Unterdruckgebiet um (Bild 16). Dadurch wird wie bei anderen Systemen die Sogwirkung am Fahrzeugheck und somit der Luftwiderstand verringert.

- Mögliche Einschränkungen

Diffusoren weisen eine Höhe von etwa 70 mm auf. Wie bereits erwähnt, reizen herkömmliche Sattelaufleger, insbesondere Volumenfahrzeuge, die Höhenlimitierung teilweise bereits voll aus. Eine Montage könnte somit hinsichtlich des Höhenlimits kritisch sein.

- Verfügbarkeit

Auf dem Markt befindet sich nur ein patentiertes Anbauteil der Firma Systems Drag Reduction S.L. (SDR-Diffusor) (SDR 2012). Auflieger können im Allgemeinen mit diesen Diffusoren nachgerüstet werden.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Laut Herstellerangabe ist eine Verbrauchsminde- rung von 1,5 l/100 km möglich, was einer CO<sub>2</sub>-Re- duktion von 4,3 % entspräche (SDR 2012).

Ein Aufliegerhersteller, der den SDR-Diffusor mit in seinem Produktprogramm führt, gibt dessen Einspa- rung mit 2 % an (NORDHOFF u. BARLAGE 2011).

In (van RAEMDONCK 2012) wurde, wie schon für Seitenverkleidungen, der Kraftstoffverbrauch bei Konstantfahrt mit 85 km/h in einem Testoval ge- messen, um die CO<sub>2</sub>-Reduktion von verschiedenen aerodynamischen Anbauteilen zu beziffern. Der Versuch wurde von einem Hersteller von aerodyna- mischen Anbauteilen (Ephicas SideWing) durchge- führt. Der Verbrauchstest ergab eine Verbrauchs- reduktion 0,23 l/100 km, was einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 0,6 % entspräche.



**Bild 16:** SDR-Diffusor mit einer Höhe von 70 mm

- Kosten

Die Zusatzkosten können mit 700 € mit veranschlagt werden.

### Luftleitkörper an Aufliegerstirnwand

Eine Möglichkeit die obere Umströmung des Sattelzugs zwischen Zugmaschine und Auflieger zu optimieren, stellen Anbauteile am Auflieger dar wie in Bild 17 gezeigt (GROßART 2011). Derartige Luftleitkörper an der Aufliegerstirnwand verhindern zusammen mit dem Dachspoiler der Zugmaschine den Abriss der Strömung an der vorderen Oberkante des Aufliegers.

- Mögliche Einschränkungen

Es sind keine technischen oder sicherheitskritischen Einschränkungen bekannt, die gegen den Einsatz von Luftleitkörpern an der Aufliegerstirnwand sprechen.

- Verfügbarkeit

Der Luftleitkörper ist als Anbauteil der Firma Kuda Aero Spoiler GmbH verfügbar.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Kraftstoffverbrauchsmessungen in Flottenversuchen zeigten bei (GROßART 2011) durch die Luftleitkörper eine Verbrauchsminderung von 0,5 l/100 km auf. Dies entspräche einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 1,4 %.



**Bild 17:** Luftleitkörper an Aufliegerstirnwand, Quelle: (GROßART 2011)

- Kosten

Die Kosten Luftleitkörper für können mit 400 Euro angesetzt werden.

### Alternative Fahrerhausgestaltung

Der aerodynamische Bereich der Stirnseite von Fahrzeugen kann mit alternativen Fahrerhausgestaltungen verbessert werden. Diese waren bei Sattelzügen in (WELFERS et al. 2011; DEVESA u. INDINGER 2011) und (STADLER et al. 2012) Gegenstand von Untersuchungen. In (DEVESA u. INDINGER 2011) wurden in CFD-Analysen und Windkanalmessungen um 500 mm verlängerte Fahrerhäuser mit größeren Radien und auch eine „Kurzhauber“-Variante untersucht. In (STADLER et al. 2012) wurde in einer CFD-Studie mit Fahrzeuggeometrie-Prinzipkörpern eine Vielzahl an alternativen Fahrerhäusern untersucht. Eine um 800 mm verlängerte Fahrerhausgeometrie wurde in (WELFERS et al. 2011) auf verbesserte Aerodynamik und Crash-Verhalten untersucht.

- Mögliche Einschränkungen

Alle untersuchten alternativen Fahrerhausgestaltungen führen bei Nutzung von Standard-Aufliegern mit 13,6 m zu einer Verletzung der maximalen Zuggesamtlänge von 16,5 m. Eine etwaige Umsetzung der Aerodynamikentwürfe setzt jeweils eine komplette Fahrerhausneugestaltung voraus.

- Verfügbarkeit

Bei allen untersuchten Fahrzeugen handelt es sich um virtuelle Modelle oder Windkanalmodelle.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

(DEVESA u. INDINGER 2011) kommen zum Schluss, dass der Luftwiderstandsbeiwert von Sattelzügen durch alternative Fahrerhausgestaltungen um maximal 4 % reduziert werden könnte. Die maximale CO<sub>2</sub>-Reduktion kann mit 1,3 % angegeben werden.

In (STADLER et al. 2012) durchgeführte Geometriestudien weisen hingegen nur auf eine marginale Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes hin.

In (WELFERS et al. 2011) konnte der Luftwiderstandsbeiwert durch das alternative Fahrerhauskonzept um 12 % reduziert werden. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion kann somit mit 3,6 % beziffert werden.

### Vollverkleidung am Auflieger

Alle bisher vorgestellten aerodynamischen Verbesserungen stellen Einzelmaßnahmen dar. Aerodynamische Maßnahmen können jedoch auch gemeinsam in integralen Konzepten umgesetzt werden. Bei Aufliegern spricht man bei Kombination von Maßnahmen an der Seite und gegebenenfalls auch Unterboden sowie im Heckbereich von Vollverkleidung.

- Mögliche Einschränkungen

Wie bei Seitenverkleidungen und Heckeinzügen besteht im Vergleich zu herkömmlichen Sattelaufliegern auch eine erhöhte Beschädigungsanfälligkeit.

- Verfügbarkeit

Auflieger mit Vollverkleidung wurden bisher nur prototypisch umgesetzt.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Ein von Daimler entwickeltes Aufliegerkonzept („Mercedes-Benz Aerodynamics Trailer“), das eine kombinierte Seiten- und Unterbodenverkleidung mit kurzen Heckeinzugsklappen verbindet, verringert den Luftwiderstand um 18 % (SCHÜTZ 2013, S. 702) (Bild 18). Dies entspräche einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 5,4 %.

In (COLOMBANO u. CONSANO 2008) wurde eine Vollverkleidung umgesetzt, die über eine Seiten- und Unterbodenverkleidung verfügt und mit einem aufblasbaren Heckeinzug kombiniert ist. Der Auflieger weist durch die aerodynamische Optimierung einen um 14 % verringerten Luftwiderstandsbeiwert auf, was einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 4,2 % entspricht. Der Auflieger selbst ist jedoch zudem um 1,5 m verlängert, um eine Vergrößerung des Lade-



**Bild 18:** Vollverkleidung am Auflieger, Quelle: (DAIMLER AG 2012)

volumens zu realisieren. Der Einfluss dieser Verlängerung auf den Luftwiderstandsbeiwert ist nicht genau beziffert, kann jedoch als gering eingeschätzt werden.

Ebenfalls eine Aufliegervollverkleidung wird von einem Aufliegerhersteller in (BAUMBERGER 2012) vorgestellt. Deren CO<sub>2</sub>-Reduktion ist mit 7 % und 1,5 l/100 km angegeben. Der zugrunde liegende Referenzverbrauch lässt sich aus diesen Angaben mit rund 21 l/100 km beziffern. Es ist daher anzunehmen, dass die Einsparung von 7 % sich auf eine Konstantfahrt oder eine Fahrt mit Teilbeladung bezieht. Bei einem realistisch angesetzten Referenzverbrauch von 35 l/100 km entspräche die CO<sub>2</sub>-Reduktion etwa 4,3 %.

### Aerodynamische Sattelzüge (Gesamtkonzept)

Neben vollverkleideten Aufliegern befassen sich einige Studien auch mit aerodynamisch gesamtheitlich optimierten Sattelzügen. Diese bestehen aus einer Kombination oben genannter Maßnahmen an Sattelzugmaschine und Auflieger.

- Mögliche Einschränkungen

Die im Folgenden beschriebenen Gesamtkonzepte sind durch verschiedene Überlängen gekennzeichnet. Darüber hinaus gelten für die jeweilig umgesetzten Maßnahmen oben beschriebene Einschränkungen.

- Verfügbarkeit

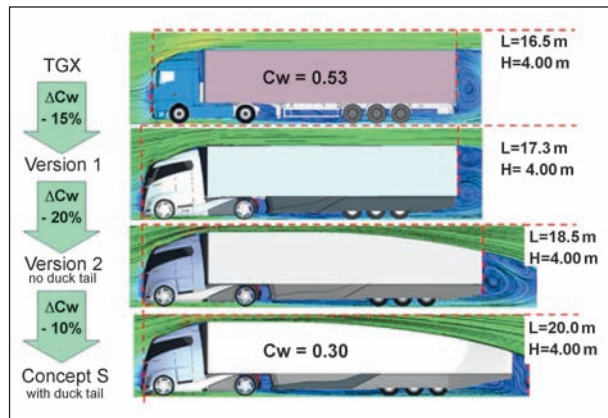
Bei den beschriebenen Gesamtkonzepten handelt es sich um Studien (MAN Concept S) bzw. Versuchsfahrzeuge (Iveco Transport Solution Concept).

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Eine Studie der MAN Truck & Bus AG kombiniert eine um 0,8 m verlängerte, aerodynamisch optimierte Sattelzugmaschine mit einem um 1,2 m verlängerten, vollverkleideten Auflieger, der über eine Heckabsenkung auf 3 m Höhe verfügt (Bild 19, Version 2) (SCHÜTZ 2013, S. 702). Damit weist das Fahrzeug eine Überlänge von 2 m auf. In dieser Version reduziert sich der Luftwiderstandsbeiwert um 35 %, was einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 10,5 % bzw. 3,7 l/100 km entspricht.

Durch eine weitere Heckabsenkung und einen horizontalen Heckeinzug sowie eine Verlängerung des Aufliegers um insgesamt 2,7 m reduziert sich der





**Bild 19:** Aerodynamisch gesamtheitlich optimierter Sattelzug (MAN Concept S), Quelle: (SCHÜTZ 2013, S. 702)

Luftwiderstandsbeiwert um weitere 10%-Punkte auf insgesamt 45 % gegenüber der Ausgangskonfiguration. Die aerodynamische Optimierung ging einher mit einer Verbrauchsreduktion von etwa 13,5 % bzw. 4,7 l/100 km.

Das Potenzial der Sattelzugmaschine alleine (Bild 19, Version 1) lässt sich nicht beziffern, da die Reduktion im Luftwiderstandsbeiwert auch durch die Verkleidung am Auflieger reduziert wird.

In (COLOMBANO u. CONSANO 2008) wurde der bereits vorgestellte vollverkleidete, um 1,5 m verlängerte Auflieger mit einer aerodynamisch optimierten Sattelzugmaschine kombiniert. Zusammen erzielte die Kombination einen um 22 % reduzierten Luftwiderstandsbeiwert, was einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 6,6 % bzw. 2,3 l/100 km entspricht.

### Vollverkleideter Verteiler-Lkw

Einzelne aerodynamische Maßnahmen bei Verteiler-Lkw finden in Veröffentlichungen keine Erwähnung. Ein von Daimler entwickelter Verteiler-Lkw, welcher jedoch eine zulässige Gesamtmasse von 18 t aufweist, zeigt aerodynamische Potenziale durch eine gesamtheitliche aerodynamische Optimierung auf. Diese besteht aus Kantenverrundungen am Aufbau, einer Unterbodenverkleidung in Verbindung mit einem Diffusor am Unterboden sowie Heckenzugklappen (DAIMLER AG 2012).

- Mögliche Einschränkungen

Die Heckenzugklappen müssen so ausgestaltet sein, dass sie die Beladung des Fahrzeugs über das Fahrzeugheck nicht erschweren. Wie bei allen Heckenzügen besteht auch eine erhöhte Beschädigungsanfälligkeit.

- Verfügbarkeit

Bei dem vorgestellten Fahrzeug handelt es sich bisher nur um einen Prototypen.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Die Reduktion des Luftwiderstandsbeiwerts wird mit 12 % angegeben, was mit einer Verbrauchsreduktion von 3 % einhergeht (DAIMLER AG 2012).

### 3.3.3 Rollwiderstand

Die Rollwiderstandsbeiwerte moderner Nutzfahrzeugreifen für den Fernverkehr liegen im Bereich von 5 kg/t (bzw. 0,005 nach Verordnung (EU) Nr. 1222/2009) mit leichten Unterschieden je Achse (Bild 20) (MICHELIN 2008).

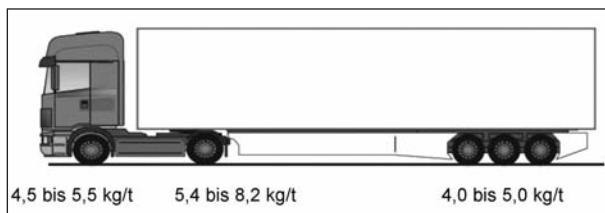
Kosten-Nutzen-Analysen sind bei Reifen nur auf Basis von Lebenszykluskosten möglich. Die Lebensdauer hängt hierbei stark von der Nutzung und Art der Achse ab.

#### Rollwiderstandsoptimierte Reifen

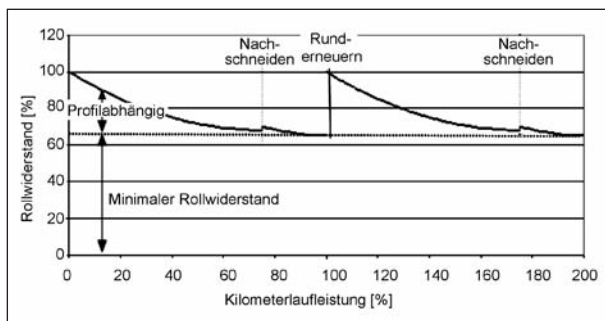
Reifenhersteller arbeiten an der Verringerung des Rollwiderstandes beispielsweise durch neue Gummimischungen, um Hystereseverluste zu minimieren, oder auch durch neue Strukturen, um die Verformung bei jeder Radumdrehung zu reduzieren. Neue Reifengenerationen sollen hierbei über die Lebensdauer hinweg durchschnittlich um 10 % geringere Rollwiderstandsbeiwerte aufweisen, ohne Verschlechterung weiterer Eigenschaften wie Lebensdauer und Traktion.

- Mögliche Einschränkungen

Der Rollwiderstandsbeiwert von Reifen verringert sich über die Lebensdauer mit abnehmender Profiltiefe. Die Reifennutzung kann durch Nachschneiden und Runderneuerung verlängert werden, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Rollwiderstand (Bild 21) (MICHELIN 2013). Messungen in (BODE et al. 2011) zeigen beispielsweise, dass der auf einer Stahltrommel gemessene Rollwiderstandsbeiwert eines Trailerreifen über die Lebensdauer bei einer Verringerung der Profiltiefe von 16 mm auf 4 mm um 27 % abnimmt. Durch Nachschneiden kann der Reifen über einen längeren Nutzungszeitraum in einem Zustand niedrigeren Rollwiderstandsbeiwerts gehalten werden.



**Bild 20:** Rollwiderstandsbeiwerte bei Sattelzügen, Quelle: (MICHELIN 2008)



**Bild 21:** Entwicklung des Rollwiderstandes über die Kilometerlaufleistung, Quelle: (MICHELIN 2013)

Genauere Rollwiderstandsbeiwerte von Nutzfahrzeugreifen sind meist unveröffentlicht. Jedoch sind Reifenhersteller durch die Verordnung (EU) Nr. 1222/2009 dazu verpflichtet, Reifen in ihrem Ausgangszustand (volles Profil) in ein Effizienzlabel einzuordnen. Dem Reifenlabel sind entsprechende Wertebereiche des Rollwiderstandsbeiwerts zugeordnet. Der Rollwiderstand wird anhand von standardisierten Trommelprüfstandsmessungen ermittelt. Bei schweren Nutzfahrzeugen sind die Energieeffizienzklassen wie folgt gestaffelt (Reifen der Klasse C3):

$$A: f_R \leq 4,0 \frac{kg}{t}$$

$$B: 4,1 \frac{kg}{t} \leq f_R \leq 5,0 \frac{kg}{t}$$

$$C: 5,1 \frac{kg}{t} \leq f_R \leq 6,0 \frac{kg}{t}$$

$$D: 6,1 \frac{kg}{t} \leq f_R \leq 7,0 \frac{kg}{t}$$

$$E: 7,1 \frac{kg}{t} \leq f_R \leq 8,0 \frac{kg}{t}$$

Reifen mit einer anfänglichen Energieeffizienzklasse C durchlaufen folglich über ihre Lebensdauer eine theoretische B-Kennzeichnung bis teilweise hin zu einem finalen Rollwiderstandsbeiwert unter 4,0 kg/t. Die Kennzeichnung könnte möglicherweise dazu missbraucht werden, Reifen mit einer kürzeren Lebensdauer zu produzieren, um bei der Zertifizierung gegebenenfalls noch eine bessere Energieeffizienzklasse zu erreichen.

- Verfügbarkeit

Die Energieeffizienzklassen von Reifen unterschiedlicher Hersteller und Qualitätssegmente unterscheiden sich deutlich. Für Sattelauflieger, sowohl Standard, als auch Volumen, sind bereits Reifen der Energieeffizienzklasse A verfügbar. Auf Antriebs- und Lenkachse sind derzeit nur Reifen bis zur Energieeffizienzklasse B verfügbar.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Eine Studie für das Britische Department for Transportation nennt für Sattelzüge mit rollwiderstandsreduzierten Reifen pauschal eine Einsparung von 5 % im Kraftstoffverbrauch (RICARDO 2010).

Messungen in (DENIMAL et al. 2012) zeigen eine Verbrauchseinsparung von 2 l/100 km bzw. 6 % bei Minderung des Gesamrollwiderstandsbeiwertes um 20 %.

In (HAUSBERGER et al. 2012) wurden Fahrwiderstandsmessungen und Verbrauchssimulationen durchgeführt. Eine Reduktion des Rollwiderstandsbeiwerts um 18 % wurde in Verbrauchssimulationen in eine Kraftstoffeinsparung von 1,6 l/100 km bzw. 4,5 % umgerechnet.

### Superbreitreifen

Superbreitreifen (engl.: super wide tires, super single tires) finden bei Sattelzügen und Stadtbussen auf der Antriebsachse als Ersatz von Zwillingbereifung Anwendung. Beim Abrollen müssen so nur zwei statt vier Reifenschultern beansprucht werden, sodass sich daraus sogar gegenüber rollwiderstandsoptimierten Reifen ein weiterer Vorteil im Rollwiderstandsbeiwert von 12 % ergeben soll. Gegenüber einer Doppelbereifung ist zudem ein Leermassenvorteil von 120 kg möglich (MICHELIN 2008). Der Einsatz ist bei Stadtbussen darüber hinaus durch einen geringeren Platzbedarf im Radhaus, d. h. breiter Flure im Fahrzeug, motiviert.

- Mögliche Einschränkungen

Superbreitreifen weisen eine schlechtere Haftung als eine Doppelbereifung auf, was vor allem bei schlechter Witterung zu Traktionsproblemen führen kann. Die Laufleistung von Superbreitreifen ist etwa 20 % geringer als bei Doppelbereifung.

- Verfügbarkeit

Superbreitreifen sind derzeit nur bis zu einer Energieeffizienzklasse C erhältlich.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Ältere Quellen geben an, dass bei Austausch von herkömmlichen Zwillingsbereifungen durch Superbreitreifen bei Sattelzügen im Fernverkehr mit einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 2 % zu rechnen ist (VDA 2008). Der Vergleich wird jedoch mit alten Reifengenerationen gezogen.

### 3.4 Differenzierte Betrachtung von CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzialen im Bereich Antriebsstrang

#### 3.4.1 Motor und dessen Nebenverbraucher

##### Start-Stopp-Automatik

Der Leerlaufverbrauch bei Dieselmotoren kann bei schweren Nutzfahrzeugen bis zu 2 Liter pro Stunde betragen. Während Stillstandsphasen kann durch automatisches Abschalten des Motors Kraftstoff eingespart werden. Technische Umsetzung finden Start-Stopp-Automatiken (auch Micro-Hybrid genannt) in leistungsfähigen Anlassern und elektrischen Generatoren zur Spannungsversorgung. Voraussetzung für die Nutzung des Einsparpotenzials ist, dass Nebenverbraucher, wie zum Beispiel pneumatisch aktuierte Verbraucher oder die Servopumpe zur Lenkunterstützung, ausreichend mit Energie versorgt werden.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In den SORT-Zyklen für Stadtbusse werden die Standzeitanteile mit 37,9 %, 33,4 % und 20,1 % angegeben. Zusätzlich sind Zyklusdauer, Zyklusstrecke und der Kraftstoffverbrauch in l/100 km bekannt (UITP 2010). Unter der Annahme eines Leerlaufverbrauchs von 2 Liter pro Stunde lassen sich hieraus für Stadtbusse folgende Anteile des Leerlaufverbrauchs berechnen:

$$\frac{\text{Leerlaufverbrauch}}{\text{Gesamtverbrauch}}$$

$$= \frac{\text{Zyklusdauer} * \text{Standzeitanteil} * \text{Leerlaufverbr.}}{\text{Kraftstoffverbr.} * \text{Zyklusdistanz}}$$

Die Anteile des Leerlaufverbrauchs am Gesamtverbrauch betragen demnach:

- SORT 1 – 13 %,
- SORT 2 – 9 %,
- SORT 3 – 4 %.

Diese Anteile stellen ein überschlägiges Grenzpotenzial dar, welches durch Start-Stopp-Automatiken in den jeweiligen Fahrzyklen erreicht werden kann, wenn in Stillstandsphasen jeweils der Verbrennungsmotor abgeschaltet wird.

In (BIERMANN u. HARTMANN 2009) beträgt der Anteil der Standzeit im betrachteten Stadtbuszyklus 16 %. Das Einsparpotenzial durch eine Start-Stopp-Automatik wurde simulativ auf 6 % beziffert.

In (European Commission 2011, S. 126) wird die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Reduktion bei Stadtbussen mit 4 % angegeben.

Bei Sattelzügen im Fernverkehr sind aufgrund hoher Autobahnanteile und geringer fahrbereiter Standzeiten mögliche Einsparpotenziale durch Start-Stopp-Automatik stark begrenzt. In (European Commission 2011, S. 126) wird die CO<sub>2</sub>-Reduktion mit 0...3 % angegeben. Für Reisebusse und Verteiler-Lkw wird hingegen ein Einsparpotenzial von 3 % und 4 % ausgewiesen (European Commission 2011, S. 126).

##### Geregelte Motorölpumpe

Motorölpumpen werden für geringe Motordrehzahlen ausgelegt und sind daher für höhere Motordrehzahlen tendenziell überdimensioniert. Variable und geregelte Ölpumpen drosseln ihre Leistung bei höheren Drehzahlen. Die Drosselung kann hierbei beispielsweise durch elektrische Ölpumpen oder durch Ölpumpen mit variabler Geometrie erfolgen (RICARDO 2010, S. 57).

- Mögliche Einschränkungen

Die Pumpen müssen erhöhten Lebensdauern Anforderungen von Nutzfahrzeugen standhalten, da ein Defekt zur Zerstörung des Motors führen kann.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In (RICARDO 2010, S. 57) wird das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial allgemein mit 1...3 % angegeben.

##### Geregelte Kühlmittelpumpe

Ähnlich wie Motorölpumpen sind auch Kühlmittelpumpen bei hohen Drehzahlen tendenziell überdimensioniert, da sie nach dem „Worst-Case-Szenario“ ausgelegt sind. Mögliche Einsparungen können über elektrische Pumpen, auskuppelbare Pumpen oder Pumpen mit variabler Geometrie erzielt werden (RICARDO 2010, S. 58).

- Mögliche Einschränkungen

Die Pumpen müssen erhöhten Lebensdauerausforderungen von Nutzfahrzeugen standhalten, da ein Defekt zur Zerstörung des Motors führen kann.

- Verfügbarkeit

Geregelte Kühlmittelpumpen bilden eine serienreife Technologie mit zunehmender Verbreitung.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In (RICARDO 2010) wird das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial allgemein mit 0,7 % für Pumpen mit variabler Geometrie und 1...4 % für elektrische Kühlmittelpumpen angegeben.

In (LUNANOVA 2009, S. 261) wird das Potenzial von bedarfsgerecht angesteuerten Pumpen im Nutzfahrzeugsektor mit 0,5 %...1,0 % angegeben.

### 3.4.2 Weitere Nebenverbraucher

#### Druckluftkompressoren

Geregelte Druckluftkompressoren schalten bei ausreichendem Druckluftniveau im Vorratsspeicher ab, bzw. kuppeln aus. Mit einer Verbrauchsreduktion ist vor allem bei Fahrzyklen zu rechnen, die einen geringen Anteil von Bremsengriffen durch die Betriebsbremse aufweisen. Bei Sattelzügen im Fernverkehr können so durchschnittlich 1,5 kW eingespart werden (KNECHT 2009). Bei Stadtbussen ist jedoch eine annähernd permanente Druckluftversorgung notwendig, da neben häufigen Bremsengriffen die Türbetätigungen und Fahrniveauregulierung pneumatisch aktuiert sind.

- Verfügbarkeit

Kompressoren mit Abschaltkupplung bilden eine serienreife Technologie mit zunehmender Verbreitung im Fernverkehrssektor. Sie können leicht in bestehende Systeme integriert werden.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

In (RICARDO 2010) wird das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial im Fernverkehr mit 1,5 % angegeben.

In (KNECHT 2009) wird das Einsparpotenzial im Fernverkehr mit 0,5 l/100 km beziffert. Dies entspricht bei dem dieser Literaturrecherche zugrunde liegenden Referenzverbrauch von 35 l/100 km (Tabelle 8) einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 1,5 %.

In (European Commission 2011, S. 122) wird ein Einsparpotenzial von 1...4 % für Sattelzüge im Fernverkehr genannt. Durchschnittlich seien etwa 3,5 % möglich. Für Reisebusse wird ein Bereich von 1...2 % bzw. durchschnittlich 1,5 % angegeben.

#### Klimaanlage

Bei der Recherche grundsätzlicher Einsparpotenziale konnte in Kapitel 3.2.3 die Fahrzeugklimatisierung bei Stadtbussen als ein möglicher Ansatzpunkt zur CO<sub>2</sub>-Reduktion identifiziert werden. Leider finden sich für Stadtbusse keine weiteren Untersuchungen. In (KAISER et al. 2013) wurde jedoch das Einsparpotenzial durch optimierte Klimatisierung von Reisebussen untersucht. Dabei wurden zwei Maßnahmen zur Reduktion der Leistungsaufnahme des Kältemittelverdichters bei Teillast bewertet. Die erste Maßnahme bestand in einer Zylinderbankabschaltung, die zweite in einer drehzahloptimierten Ansteuerung durch ein zweistufiges Getriebe. Die Maßnahmen wurden anhand von Gesamtfahrzeugsimulationen untersucht. Als Fahrzyklus dienten, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, die viermalige Wiederholung des ETC sowie ein eigens entworfener Fahrzyklus auf der Autobahnroute Braunschweig-Berlin-Braunschweig.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Durch die beiden Maßnahmen konnte die Leistungsaufnahme der Klimaanlage um 23 % (4 x ETC) bzw. 43 % (Fahrzyklus Braunschweig-Berlin-Braunschweig) reduziert werden, was in beiden Fällen einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von etwa 7 % entsprach.

### 3.4.3 Rekuperation von Bremsenergie

Zur Rekuperation von Bremsenergie werden bei schweren Nutzfahrzeugen im Allgemeinen hybride Antriebsstränge eingesetzt. Diese sind technisch meist als parallele oder serielle Hybride ausgeführt (HOFMANN 2009, S. 340).

Serielle Hybride bestehen im Gegensatz zu klassischen Antriebssträngen (Bild 3) im Wesentlichen aus einem Verbrennungsmotor, der mechanisch an einen Generator gekoppelt ist (Ladegruppe) sowie einer oder zwei Elektromaschinen, welche die Antriebskraft zur Verfügung stellen. Die Energie der Ladegruppe kann zum Aufladen der Batterie genutzt oder direkt in die Elektromaschinen eingespeist werden. Durch die Entkopplung des Ver-



brennungsmotors vom Fahrtrieb kann dieser stationär in einem optimalen Punkt hinsichtlich Verbrauch und Emissionen betrieben werden. Ein Nachteil von seriellen Hybriden ist die mehrmalige Energieumwandlung, welche durch den Vorteil des optimalen Betriebspunktes des Verbrennungsmotors oftmals nicht kompensiert werden kann. Die zusätzliche Masse der Hybridkomponenten kann durch Wegfall des Getriebes und „Downsizing“ des Verbrennungsmotors teilweise kompensiert werden (HOFMANN 2009, S. 18).

Bei parallelen Hybriden besteht im Gegensatz zu seriellen Hybriden weiterhin ein direkter mechanischer Durchtrieb von Verbrennungsmotor und Radantrieb. Dabei befindet sich eine Elektromaschine, welche sowohl als Generator als auch als Elektrofahrmotor dient, zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe. Der Verbrennungsmotor ist auskuppelbar, um rein elektrisches Fahren zu ermöglichen. Weiterhin lässt sich über die Elektromaschine durch Laden der Batterie oder unterstützendes Anreiben der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors beeinflussen, um diesen in einem optimalen Bereich zu betreiben. Durch die Unterstützung der Elektromaschine wird in einigen Fällen auch ein „Downsizing“ des Verbrennungsmotors ermöglicht. Nachteilig wirken sich bei parallelen Hybriden höhere Leermassen durch die zusätzlichen Komponenten aus (HOFMANN 2009, S. 21).

Hybride Antriebsstränge sind neben der Topologie (parallel, seriell) auch durch ihren Funktionsumfang gekennzeichnet. Neben Start-Stopp-Automatik und Rekuperation ist bei Mild-Hybriden elektrisches Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten möglich. Bei Voll-Hybriden ist rein elektrisches Fahren auf kurzen Reichweiten möglich. Plug-In-Hybride ermöglichen neben rein elektrischem Fahren bei mittleren Reichweiten auch eine externe Aufladung der Batterie (HOFMANN 2009, S. 19).

Beim Betrieb der hybriden Antriebsstränge entstehen durch oben genannte zusätzliche Funktionen sowie im Speziellen bei seriellen Hybriden durch die Entkopplung von Radantrieb und Verbrennungsmotor alternative Möglichkeiten der Betriebsstrategie. Diese kann als weiterer entscheidender Faktor für die Schöpfung von Verbrauchsreduktionspotenzialen angesehen werden.

- Mögliche Einschränkungen

Bei hybriden Antriebssträngen stellt neben den erhöhten Kosten der Verlust an maximaler Nutzlast

aufgrund höherer Leermassen durch erforderliche Komponenten eine mögliche Einschränkung dar.

- Verfügbarkeit

Im Fahrzeugsegment der Stadtbusse sind serienreife Produkte auf dem Markt. Bei Verteiler-Lkw und Sattelzügen wurde die Technologie bisher nur prototypisch umgesetzt und im Realeinsatz getestet.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion durch hybride Antriebsstränge ist in allen Fahrzeugkategorien sehr stark vom Fahrzyklus abhängig. Bei Fahrzyklen mit einem hohen Anteil an Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen ist mit größeren Einsparpotenzialen zu rechnen. Bei Fahrzyklen mit hohen Autobahnanteilen sind die Straßentopografie und die Gesamtmasse des Fahrzeugs entscheidend.

Für Stadtbusse wird in (European Commission 2011) allgemein ein Einsparpotenzial von 20...40 %, bzw. durchschnittlich 30 % genannt. In (BIERMANN u. HARTMANN 2009) wurde simulativ ein Einsparpotenzial von ca. 20 % ermittelt.

Im Rahmen eines begleitenden Prüfprogramms im Fördervorhaben „Hybridbusse für einen umweltfreundlichen ÖPNV“ wurden vergleichende Verbrauchsmessungen an Stadtbussen mit herkömmlichen und hybriden Antriebssträngen durchgeführt. Neben oben beschriebenen Stadtbussen mit 18 t zulässiger Gesamtmasse kamen auch längere Gelenkbusse mit 24 t zulässiger Gesamtmasse zum Einsatz. Die Verbrauchsmessungen wurden unter kontrollierten Bedingungen auf einem Rollenprüfstand durchgeführt. In den standardisierten Fahrzyklen erreichten die Hybridfahrzeuge folgende CO<sub>2</sub>-Reduktionen:

- Braunschweig-Zyklus: 21...32 %,
- SORT 1: 26...29 %,
- SORT 2: 23...24 %,
- SORT 3: 17...22 %.

Die unter Laborbedingungen gemessenen Kraftstoffeinsparungen konnten jedoch nicht bei allen im Feldversuch fahrenden Stadtbussen erzielt werden. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion zeigte eine große Streubreite bis hin zu vereinzelt Mehrverbräuchen (BMUB 2012).

Bei Sattelzügen im Fernverkehr konnte in Kapitel 3.2.1 überschlägig ein Grenzpotenzial in der CO<sub>2</sub>-

Reduktion von 11 % ermittelt werden. In (European Commission 2011, S. 131) wird die CO<sub>2</sub>-Reduktion im Bereich 4...10 %, durchschnittlich jedoch mit 7 % angegeben. Laut Hersteller sind Einsparpotenziale durch parallele Hybride je nach Hybridisierungsgrad und Einsatz im Bereich 2...6 % zu erwarten (HOLLOH 2008; HAUPT 2012; DOLD 2013). Zu einem möglichen Nutzlastverlust durch die Komponenten sind leider keine Zahlen veröffentlicht.

Bei Verteiler-Lkw werden in (European Commission 2011, S. 131) Einsparpotenziale durch Hybridisierung im Bereich von 15...30 % genannt. In diesem Fahrzeugsegment werden im Allgemeinen parallele Hybride favorisiert. In Herstellerangaben bei (HOLLOH 2008) werden bei Verteiler-Lkw mit 7,5...12 t zulässiger Gesamtmasse CO<sub>2</sub>-Reduktionen von bis zu 20 % angegeben, in (HAUPT 2012) von 5...15 %. Dies deckt sich beispielsweise mit Angaben in (BOOT u. CONSANO 2009). Dort wurde im Rahmen von Rollenprüfstandsversuchen über verschiedene Stadt- und Vorortfahrzyklen bei einem 7,5-t-Verteiler-Lkw eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 21 % gemessen.

Bei Reisebussen wird das Einsparpotenzial durch hybride Antriebsstränge in (HOLLOH 2008) mit bis zu 6 % angegeben. Für Reisebusse sind im Gegensatz zu Stadtbussen und Verteiler-Lkw bislang noch keine eingehenderen Untersuchungen veröffentlicht.

#### 3.4.4 Abgaswärmenutzung

Ein Großteil der am Dieselmotor anfallenden Verlustenergien verlässt das Fahrzeug, wie in Kapitel 3.2.1 bereits dargestellt, in Form von Wärme im Abgas. Diese Energie kann mit Hilfe von sogenannten Abgaswärmenutzungssystemen zurückgewonnen werden. Diese Systeme nutzen den Clausius-Rankine-Kreisprozess, um die thermische Energie des Abgases in mechanische Energie umzuwandeln. Die mechanische Energie kann dem Antriebsstrang direkt zugeführt oder in elektrische Energie umgewandelt werden. Letztere Möglichkeit bildet einen Synergieeffekt mit hybriden Antriebssträngen. Der Vorteil der direkten mechanischen Umwandlung besteht in höheren Wirkungsgraden. Bei elektrischer Nutzung der Energie kann diese in der Batterie des hybriden Antriebsstrangs gespeichert werden (DOLD 2013).

Abgaswärmenutzung wird derzeit ausschließlich für Fernverkehrsfahrzeuge diskutiert.

- Verfügbarkeit

Die Systeme wurden bisher nur in Versuchsträgern umgesetzt.

- CO<sub>2</sub>-Reduktion

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion wird für Sattelzüge im Fernverkehr in (BERNATH et al. 2012) mit 3,3 % (Nutzung der Abgasenergie nach dem Abgasschalldämpfer) bzw. 4,3 % (Nutzung der Abgasrückführungsenergie) beziffert.

In (DOLD 2013) wird das Potenzial der Abgaswärmenutzung bei Sattelzügen mit 5 % angegeben. Bei Kombination mit hybriden Antriebssystemen (elektrische Umwandlung) seien 10 % möglich.

### 3.5 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Wesentliche Ergebnisse der Literaturrecherche sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

#### Sattelzüge

Bei Sattelzügen sind vor allem aerodynamische Potenziale am Auflieger ungenutzt. Insbesondere Heckenzüge (Heckenzugsklappen), welche kürzlich durch die Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 bis zu einer zusätzlichen Länge von 500 mm ermöglicht wurden, bilden eine effektive Maßnahme. Längere Heckenzugsklappen mit 1.200 mm zeigten in einer Messung ein größeres Einsparpotenzial (van RAEMDONCK 2012). Widersprüchlich hierzu sind jedoch Windkanal- und CFD-Untersuchungen in (DEVESA u. INDINGER 2011). Die Frage, ob durch eine zusätzliche Länge von mehr als den in der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 vorgesehenen 500 mm weitere Einsparpotenziale ermöglicht werden, bleibt somit offen. Heckenzugsklappen können mit weiteren Maßnahmen wie Seitenverkleidungen kombiniert werden. Aerodynamische Anbauteile bieten insbesondere den Vorteil, dass sie bei einer Vielzahl an Aufliegern theoretisch nachgerüstet werden können. Bei der Auswahl von aerodynamischen Anbauteilen sind hinsichtlich Beschädigungsanfälligkeit gegebenenfalls die Beladungsweisen zu berücksichtigen. Bei seitlicher Beladung von Aufliegern zeigen Seitenverkleidungen ein hohes Beschädigungsrisiko. Heckenzugsklappen werden jedoch eher unwahrscheinlich beschädigt. Bei Beladung durch das Heckportal und an Laderampen zeigen sich Heckenzugsklappen hingegen

	Sattelzug	Verteiler-Lkw	Stadtbus	Reisebus
<b>Aerodynamik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ungenutzte Potenziale am Auflieger (ca. 5 %)</li> <li>• Heckanzüge durch Ausnahmeregelung ermöglicht</li> <li>• Nachrüstbarkeit aerodynamischer Anbauteile an Aufliegern</li> <li>• weiteres Potenzial durch längere Fahrerhäuser (ca. 3,5 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aerodynamisches Potenzial abhängig von Fahrzyklus (Stadt-/Vorort)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringes Potenzial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenziale weitgehend ausgeschöpft</li> </ul>
<b>Rollwiderstand</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rollwiderstandsreduzierte Reifen (ca. 5 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenzial unbekannt</li> <li>• weitere Studien werden empfohlen</li> </ul>		
<b>Leichtbau</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichtbau wird teilweise mit höherer Nutzlasten kompensiert</li> <li>• <math>\Delta m -1 t \rightarrow -0,6 l/100 km</math></li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta m -1 t \rightarrow 1,5...1,9 l/100 km</math></li> </ul>	
<b>Motor und dessen Nebenverbraucher</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bedarfsgerechte Ansteuerung von Nebenverbrauchern wird zunehmend umgesetzt</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Start-Stopp-Automatik (4...6 %)</li> </ul>	
<b>Weitere Nebenverbraucher</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bedarfsgerechte Ansteuerung wird zunehmend umgesetzt</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Anteil an Gesamtverbrauch</li> <li>• weitere Studien werden empfohlen</li> </ul>	
<b>Mechanische Wirkungsgrade Getriebe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringes Potenzial</li> </ul>			
<b>Rekuperation von Bremsenergie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• parallele Hybride (3...10 %)</li> <li>• Potenzial stark abhängig von Topografie und Nutzlast</li> <li>• Nutzlastverlust</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• großes Potenzial durch parallele Hybride (5...30 %)</li> <li>• Nutzlastverlust</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• größtes Potenzial durch hybride Antriebsstränge (17...40 %)</li> <li>• serienreife Technologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• parallele Hybride (ca. 6 %)</li> <li>• Potenzial stark abhängig von Topografie</li> </ul>
<b>Abgaswärmenutzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenzial im Bereich 3..5 %</li> <li>• in Kombination mit Hybrid möglich (10 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz Technologie wird derzeit für diese Fahrzeugkategorien nicht erwägt.</li> </ul>		

Prozentangaben beziffern CO<sub>2</sub>-Reduktion in Bezug auf recherchierte Referenzverbräuche (vgl. Kapitel 2.1).  
Leere Felder kennzeichnen Bereiche, zu denen im Rahmen der Recherche keine Literatur auffindig gemacht werden konnte.

Tab. 11: Zusammenfassung der Literaturrecherche

beschädigungsanfälliger als Seitenverkleidungen. Ein maximales Einsparpotenzial von ca. 5 % bei vollem Ladevolumen zeigen vollverkleidete Auflieger. Heckabsenkungen konnten sich vermutlich aufgrund des Verlusts an Nutzvolumen trotz eines CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials von bis zu 4 % bislang nicht durchsetzen.

Im aerodynamischen Sinne verlängerte Fahrerhäuser von Sattelzügen zeigen auch ein Potenzial von 3,5 % auf, sind jedoch aufgrund von Längenbegrenzungen bisher nur in Studien untersucht worden. Bei Produktlebenszyklen von über 10 Jahren würde eine gesetzliche Freigabe im Gegensatz zu aerodynamischen Anbauteilen erst verzögert umgesetzt werden können.

Durch zusätzlich freigegebene Längen von 500...800 mm am Fahrerhaus sowie 500...

1.300 mm am Auflieger könnten Konzepte wie beispielsweise das vorgestellte MAN Concept S zulassungsfähig werden. Ob die zusätzlich zur Verfügung gestellten Längen, wenn sie nicht zweckgebunden freigegeben werden, jedoch für aerodynamische Optimierung oder Laderaumvergrößerung genutzt wird, bleibt genauso offen wie die Frage, was letztendlich jeweils die wirtschaftlichere Lösung sein wird. Die bereits mehrfach erwähnte Ausnahme für aerodynamische Anbauteile in Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 steht beispielhaft für eine zweckgebundene Freigabe von zusätzlichen Längen.

Durch die Reduktion des Rollwiderstands durch neue Reifengenerationen ist bei Sattelzügen, insbesondere bei hohen Nutzlasten, ein wesentliches Einsparpotenzial von ca. 5 % zu verzeichnen.

Die bedarfsgerechte Ansteuerung von Nebenverbrauchern wird derzeit sukzessive in neuen Fahrzeuggenerationen umgesetzt.

Leichtbaupotenziale werden bei Sattelzügen derzeit vor allem zur Erhöhung der maximalen Nutzlast eingesetzt. Der Gradient von 0,6 l/100 km je eingesparter Tonne Eigenmasse kann jedoch auch als hinreichend für die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes angesehen werden. Beispielhaft hierfür stehen Leichtbauaufleger mit einem Leermassenvorteil von rund 1 t.

Parallele Hybride bilden einen weiteren effektiven Stellhebel bei Sattelzügen. Das Potenzial von 3...10 % ist jedoch stark von der Topografie und der Nutzlast abhängig. Nachteilig wirkt sich auch hier die erhöhte Leermasse durch zusätzliche Komponenten aus, welche zu einem Verlust an maximaler Nutzlast führt. Ausnahmeregelungen für Sattelzüge mit hybridem Antriebsstrang hinsichtlich der zulässigen Gesamtmasse könnten gegebenenfalls einer Etablierung hybrider Antriebsstränge förderlich sein.

Durch die Nutzung der Abgaswärme kann der Kraftstoffverbrauch von Sattelzügen um 3...5 % gesenkt werden.

### **Verteiler-Lkw**

Bei Verteiler-Lkw unterscheiden sich die relevanten Fahrzyklen (Stadt-/Vorortfahrzyklus) hinsichtlich ihres aerodynamischen Einsparpotenzials. Die größten CO<sub>2</sub>-Reduktionen sind bei Verteiler-Lkw mit 5...30 % bei hybriden Antriebssträngen zu verzeichnen, die jedoch auch den Nachteil einer geringeren maximalen Nutzlast nach sich ziehen.

Durch Verringerung des Rollwiderstandes bei Verteiler-Lkw, aber auch bei Stadt- und Reisebussen ist ein spürbares Einsparpotenzial möglich. Es ist aufgrund geringerer Gesamtmassen anzunehmen, dass die CO<sub>2</sub>-Reduktionen kleiner als bei Sattelzügen ausfallen werden. Weitere Studien hierzu wären wünschenswert.

Der Einsatz von Systemen zur Rückgewinnung von der Energie in der Abgaswärme wird derzeit für das Fahrzeugsegment der Verteiler-Lkw nicht in Betracht gezogen.

### **Stadtbusse**

Bei Stadtbusen konnten bei der Recherche von grundsätzlichen Einsparpotenzialen hohe Anteile

der Nebenverbraucher am Gesamtverbrauch identifiziert werden. Jedoch stehen hierzu bislang keine weiteren Studien zur Verfügung.

Das größte Einsparpotenzial bei Stadtbusen kann über die Rekuperation von Bremsenergie (17...40 %) bzw. Start-Stopp-Automatiken (4...6 %) erreicht werden. Die hybriden Antriebstränge können bisher aber noch nicht auf allen Routen im Realeinsatz ihr Potenzial entfalten. Ein möglicher Lösungsansatz liegt hier im Energiemanagement der Fahrzeuge.

Aerodynamische Optimierungen an Stadtbusen stellen hingegen einen schwachen Hebel zur CO<sub>2</sub>-Reduktion dar.

### **Reisebusse**

Bei Reisebussen hat die Aerodynamik einen starken Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Wesentliche Potenziale sind jedoch bereits weitestgehend ausgeschöpft. Dies zeigt sich in geringen Luftwiderstandsbeiwerten von ca. 0,30. Am Beispiel von optimierten Klimaanlage konnte die CO<sub>2</sub>-Reduktion durch bedarfsgerechte Ansteuerung von Nebenverbrauchern exemplarisch aufgezeigt werden. Auch bei Reisebussen können hybride Antriebstränge zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs eingesetzt werden (ca. 6 %). Dieses Einsparpotenzial ist jedoch wie bei Sattelzügen bei Autobahnfahrten von der Topografie abhängig.

### **Allgemein**

Welche der diskutierten Maßnahmen sich letztendlich durchsetzen werden, wird neben betriebswirtschaftlichen Kriterien auch maßgeblich von den Fahrzyklen der EU-weiten CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung abhängen. So wird beispielsweise die Topografie des kommenden Fernverkehrszyklus mitentscheiden, ob sich hybride Antriebstränge bei Sattelzügen durchsetzen werden, da das Potenzial und somit die Wirtschaftlichkeit vom Fahrzyklus abhängen. Ähnliches ist für die Stadt- und Regionalverkehrszyklen im Hinblick auf Aerodynamik, Leichtbau und Hybridisierung von Verteiler-Lkw zu erwarten. Darüber hinaus werden einheitliche Fahrzyklen zu einer verbesserten Vergleichbarkeit von Maßnahmen führen.

Die CO<sub>2</sub>-Zertifizierung bei Sattelzügen ist zunächst nur für die Zugmaschinen geplant. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, werden diese mit defi-



nierten Norm-Aufliegern kombiniert. Da bei Sattelzügen jedoch große CO<sub>2</sub>-Reduktionen durch Optimierungen am Auflieger ermöglicht werden, sollten diese ebenfalls in einer zukünftigen CO<sub>2</sub>-Zertifizierung mit berücksichtigt werden.

## 4 Fahrwiderstandsmessungen

Aerodynamische Verbesserungen drücken sich unmittelbar in verringerten Luftwiderstandsbeiwerten aus. Zu deren Bestimmung kann neben Windkanal- und CFD-Untersuchungen auch auf Fahrwiderstandsmessungen anhand realer Prototypen zurückgegriffen werden. Im Rahmen dieser Studie wurden daher Fahrwiderstandsmessungen an einem Sattelzug (Bild 22) durchgeführt, um die Verringerungen des Luftwiderstandes infolge aerodynamischer Maßnahmen am Auflieger zu beziffern. Der Prototyp besteht aus einem MAN 18.440 Euro V EEV EfficientLine kombiniert mit einem KÖGEL Cargo Sattelaufliieger. Um einen möglichst repräsentativen Prototyp darzustellen, wurden für beide Fahrzeugkomponenten jeweils weitverbreitete Standardausstattungen gewählt.

Die gemessenen Luftwiderstandsbeiwerte finden Eingang in die Verbrauchssimulation, um die Kraftstoffersparung infolge verbesserter Aerodynamik über verschiedene Fahrzyklen hinweg zu beziffern.

Zur Bestimmung von Luft- und Rollwiderstand bei schweren Nutzfahrzeugen stehen auf europäischer Ebene noch keine einheitlichen Teststandards zur Verfügung. Jedoch arbeitet die Europäische Kommission, wie bereits beschrieben, derzeit an einem Gesetzesentwurf zur Regulierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge (European Commission 2011). Bestandteil dieser Regulierung ist auch ein Testverfahren zur Bestimmung der Fahrwiderstände. Im Rahmen von hierzu



**Bild 22:** Sattelzug für prototypische Umsetzung aerodynamischer Maßnahmen

laufenden Forschungsprojekten gesammelte Erkenntnisse sind in (European Commission 2012) und (HAUSBERGER et al. 2012) veröffentlicht.

Für die Messung der Fahrwiderstände wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus (European Commission 2012) und (HAUSBERGER et al. 2012), Berücksichtigung der Richtlinien in (EPA 2011) sowie unter Bezugnahme der zur Verfügung stehenden Teststrecken Ausrollversuche gewählt. Einzelheiten zum angewandten Testverfahren sind nachfolgend beschrieben.

Als Messgeräte stehen ein Inertialmesssystem zur Bestimmung von Fahrzeugposition und Geschwindigkeit sowie ein stationäres Ultraschall-Windmessgerät zur Verfügung.

### 4.1 Beschreibung des Messverfahrens

Als Teststrecken standen das Rollfeld des ehemaligen Fliegerhorsts in Neubiberg und teilweise auch das Rollfeld des ehemaligen Fliegerhorsts in Leipzig zur Verfügung. Neubiberg verfügt über eine rund 1,4 km lange Gerade auf der ausgerollt werden kann. Der Untergrund besteht aus eben und bündig verlegten Betonplatten. Die Fahrwiderstandsmessungen erfolgen ohne Beladung des Prototyps.

Als Standardsequenz für die Ausrolltests wurde folgende gewählt.

1. Fahrzeug warmfahren (85 km/h, ca. 45 Minuten),
2. 10 x ausrollen (85 km/h → 60 km/h, 5 x Richtung Westen, 5 x Richtung Osten),
3. Fahrzeug warmfahren (85 km/h, ca. 20 Minuten),
4. Wiederholung der Punkte 2. und 3.,
5. 10 x ausrollen (65 km/h → 40 km/h, 5 x Richtung Westen, 5 x Richtung Osten),
6. Fahrzeug warmfahren (85 km/h, ca. 20 Minuten),
7. 10 x ausrollen (65 km/h → 40 km/h, 5 x Richtung Westen, 5 x Richtung Osten).

Für die Auswertungen stehen somit je Geschwindigkeitsbereich 20 Ausrollfahrten zur Verfügung.

Diese werden in 6 gleiche Intervalle von 81 km/h bis 41 km/h aufgeteilt (je Geschwindigkeitsbereich 3 Intervalle).

Während des Ausrollens gilt für die Summe der Fahrwiderstandskräfte (Gangstellung Neutral, Kupplung offen):

$$F_{roll} + F_{air} + F_{acc} + F_{grd} = 0$$

bzw.

$$F_{acc} + F_{grd} = -(F_{roll} + F_{air})$$

wobei

$F_{acc}$  Beschleunigungswiderstand [N]

$F_{roll}$  Rollwiderstand [N]

$F_{air}$  Luftwiderstand [N]

$F_{grd}$  Steigungswiderstand [N]

Berücksichtigt man die Schleppverluste des Hinterachsgetriebes, diese können rund 1,5 kW betragen, wird obige Gleichung erweitert zu:

$$F_{acc} + F_{grd} + F_{axle} = -(F_{roll} + F_{air})$$

wobei

$F_{axle}$  Widerstandskraft infolge des Schleppmoments des Hinterachsgetriebes [N]

Der Beschleunigungswiderstand ergibt sich in jedem Intervall zu:

$$F_{acc} = (m_{veh} + m_{rot}) * \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

wobei

$m_{veh}$  Gesamtmasse des Fahrzeugs inklusive Fahrer, Kraftstoff und etwaiger Zuladung [kg]

$m_{rot}$  äquivalente Masse von rotierenden Komponenten. Hier werden entsprechend (European Commission 2012) bzw. (EPA 2011) 56,7 kg je Rad mit Bodenkontakt angesetzt. [kg]

$v$  Geschwindigkeit des Fahrzeugs [m/s]

$T$  Zeit [s]

Der Steigungswiderstand errechnet sich für geringe Steigungen zu:

$$F_{grd} = m_{veh} * g * \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

wobei

$h$  (relative) Höhe [m]

$s$  zurückgelegte Strecke [m]

Für die Teststrecken in Neubiberg und Leipheim stehen genaue Höhenprofile zur Verfügung, die mithilfe eines geometrischen Nivellements ermittelt wurden (Bild 23).

Der Widerstand, der sich aus dem Schleppmoment der Hinterachse ergibt, wird durch ein hinterlegtes Kennfeld, das von der MAN Truck & Bus AG zur Verfügung gestellt wurde, ermittelt.

Die Bestimmung von Roll- und Luftwiderstand erfolgt unter der Annahme, dass der Rollwiderstand unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit ist (European Commission 2012; HAUSBERGER et al. 2012). Es gilt somit:

$$F_{roll} + F_{air} = F_0 + F_2 v^2$$

Der Luftwiderstand hängt von der Dichte der Luft ab. Diese ist wiederum im Wesentlichen abhängig von Luftdruck und Temperatur. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit kann vernachlässigt werden. Jedoch darf bei den Messungen kein Nebel vorherrschen. Da Lufttemperatur und -druck variieren, muss für eine Vergleichbarkeit der Testergebnisse über verschiedene Umgebungsbedingungen hinweg der Faktor  $F_2$  auf Normbedingungen (20 °C, 1 bar) umgerechnet werden (European Commission 2012). Es gilt:

$$F_{2,norm} = F_2 * K_{air} = F_2 * \left( \frac{1000 * T_{amb}}{p_{amb} * 293,15} \right)$$

wobei

$K_{air}$  Korrekturfaktor für den Luftwiderstand [-]

$T_{amb}$  Lufttemperatur [K]

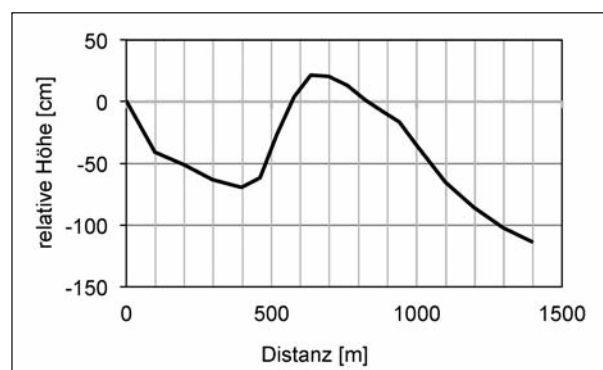


Bild 23: Höhenprofil der Teststrecke in Neubiberg

$P_{amb}$  Luftdruck [mbar]

Der Faktor  $F_0$  (Rollwiderstand) wird basierend auf empirischen Daten entsprechend korrigiert (European Commission 2012):

$$F_{0,norm} = F_0 * K_{roll} = F_2 * (1 + k (T_{amb} - 293,15))$$

wobei

$K_{roll}$  Korrekturfaktor für den Rollwiderstand [-]

$k$  Korrekturkoeffizient für den Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Rollwiderstand, 0,006 [1/K]

Die Gültigkeit des Korrekturfaktors ist jedoch nur in einem begrenzten Temperaturbereich gegeben. Daher wurde für Messungen eine Mindestumgebungstemperatur von 10 °C definiert.

Die Faktoren  $F_{0,norm}$  und  $F_{2,norm}$  werden über eine lineare Regression über das Quadrat der Geschwindigkeit ermittelt. Um frontale Windeinflüsse zu kompensieren, erfolgt die Regression über  $v_{res}^2$ , der resultierenden Geschwindigkeit aus mittlerer Fahrzeuggeschwindigkeit im Intervall und der mittleren frontalen Windanströmung der Ausrollfahrt.

$$\min \sum_{i=1}^n \left[ (F_{roll,i} + F_{air,i}) - F_{2,norm} \frac{1}{K_{air,i}} v_{res}^2 - F_{0,norm} \frac{1}{K_{roll,i}} \right]^2$$

wobei

$n$  Anzahl der Intervalle aus allen Ausrollfahrten

$v_{res}$  resultierende Geschwindigkeit aus mittlerer Fahrzeuggeschwindigkeit des Intervalls und mittlerer frontaler Windgeschwindigkeit, gemessen an einem stationären Punkt in der Mitte der Teststrecke

$F_{0,norm}$  normierter Faktor für den Rollwiderstandsbeiwert, Entspricht der Rollwiderstandskraft bei 0 km/h [N]

$F_{2,norm}$  normierter Faktor für den Luftwiderstandsbeiwert [ $Ns^2/m^2$ ]

Der Rollwiderstandsbeiwert und der  $c_W$ -Wert werden anschließend ermittelt über:

$$c_W = 2 \frac{F_{2,norm}}{\rho_{ref} * A_{St}}; f_R = \frac{F_{0,norm}}{m_{veh} * g}$$

wobei

$f_R$  Rollwiderstandsbeiwert [-]

$\rho_{ref}$  Dichte der Luft bei Normbedingungen, 1,188 kg/m<sup>3</sup>

$A_{St}$  Stirnfläche des Fahrzeuges [m<sup>2</sup>]

$g$  Erdbeschleunigung, 9,81 m/s<sup>2</sup>

Seitliche Windeinflüsse haben ebenfalls einen Einfluss auf den gemessenen Luftwiderstandsbeiwert. Dieser Tatsache wird dadurch begegnet, dass Messungen möglichst bei geringen Seitenwindeinflüssen durchzuführen sind.

## 4.2 Betrachtete Maßnahmen und Kombinationen

Für Fahrwiderstandsmessungen am Auflieger des Prototyps (Bild 22) standen ein SDR-Diffusor (Bild 16) und eine Seitenverkleidung mit vertikalem Flügelprofil der Firma Ephicas (siehe Kapitel 3.3.2, Bild 11) zur Verfügung. Darüber hinaus wurden auf Basis von CFD- und Windkanaluntersuchungen in (DEVESA u. INDINGER 2011) Heck-einzugsklappen mit einer Länge von 500 mm entworfen und prototypisch umgesetzt. Die Heck-einzugsklappen bilden hierbei nur die aerodynamischen Eigenschaften ab und sind nicht klapp- oder zusammenfaltbar ausgeführt. Wesentliche geometrische Merkmale der Heck-einzugsklappen bilden ein horizontaler wie vertikaler Einzugswinkel von 13° sowie Kantenverrundungen mit einem Radius von 25 mm (Bild 24).

Da der Diffusor und die Heck-einzugsklappen alternative Möglichkeiten zur Erhöhung des Drucks im Heckbereich darstellen, wurden folgende Kombinationen untersucht:



Bild 24: Prototypische Umsetzung von Heck-einzugsklappen

- SDR-Diffusor,
- SDR-Diffusor + Seitenverkleidung,
- Seitenverkleidung,
- Seitenverkleidung + Heckeinzugsklappen,
- Heckeinzugsklappen.

## 4.3 Ergebnisse

### 4.3.1 Wiederholbarkeit der Versuchsdurchführung

Zunächst wurde der Luftwiderstandsbeiwert der Ausgangskonfiguration ohne aerodynamische Maßnahmen ermittelt und durch wiederholte Fahrwiderstandsmessungen die Wiederholbarkeit der Versuchsdurchführung untersucht.

Die Wiederholbarkeit wurde auf den Teststrecken in Leipzig und Neubiberg untersucht. In Leipzig unterschied sich der Versuchsaufbau lediglich in den Geschwindigkeitsintervallen. Die 6 Intervalle waren statt von 81 km/h auf 41 km/h (Neubiberg) von 81 km/h auf 31 km/h definiert.

Für die Untersuchung der Wiederholbarkeit stehen insgesamt 7 Ausrolltests zur Verfügung, welche mit dem Prototyp in Ausgangskonfiguration durchgeführt wurden. 4 Versuche wurden hierbei auf der Teststrecke in Leipzig, 3 in Neubiberg mit dem oben näher erläuterten Versuchsaufbau durchgeführt. Bei linearer Regression zeigen sich auf beiden Teststrecken starke Streuungen bzw. Stan-

dardabweichungen in den Roll- und Luftwiderstandsbeiwerten (Tabelle 12, linke Seite). Der errechnete Rollwiderstand in Leipzig liegt beispielsweise zwischen  $6,0 \cdot 10^{-3}$  und  $6,8 \cdot 10^{-3}$ , der Luftwiderstandsbeiwert zugleich zwischen 0,60 und 0,55. Die Tatsache, dass hohe Rollwiderstandsbeiwerte mit niedrigen Luftwiderstandsbeiwerten korrelieren, deutet darauf hin, dass aufgrund der geringen Geschwindigkeitsspanne (81 km/h bis 41 km/h bzw. 31 km/h) in der Regression die Differenzierung zwischen den Faktoren  $F_{0,norm}$  und  $F_{2,norm}$ , also zwischen Roll- und Luftwiderstandsbeiwert, sensitiv ist. Diese Problematik, welche auch bei Konstantfahrtversuchen auftritt, führte zum Vorschlag, eine Stützstelle bei 0 km/h einzufügen. Diese entspricht einem bekannten Rollwiderstandsbeiwert, sodass dadurch über die Regression nur noch der Faktor  $F_{2,norm}$  (Luftwiderstand) ermittelt werden muss. Die Auswirkung eines Messfehlers im Rollwiderstandsbeiwert auf den  $c_W$ -Wert ist gering. Beispielsweise verursacht ein Messfehler von 10 % im Rollwiderstandsbeiwert im Luftwiderstandsbeiwert einen Fehler von etwa 3 % (HAUSBERGER et al. 2012). Dieser Ansatz wird im Rahmen dieser Studie in allen folgenden Auswertungen verfolgt. So wird in Leipzig der Rollwiderstandsbeiwert von  $6,4 \cdot 10^{-3}$  (Mittelwert der zunächst errechneten Werte) in der linearen Regression vorgegeben (Tabelle 12, rechte Seite). Das Ziel der Fahrwiderstandsmessungen ist ein Vergleich von Luftwiderstandsbeiwerten. Eine Ungenauigkeit im Rollwiderstandsbeiwert hat somit nur geringe Auswirkung auf den Luftwiderstandsbeiwert. Bei Messung der Maßnahmen und Vergleich

Teststrecke	Datum	Messung					$f_R$ in linearer Regression vorgegeben			
			$f_{0,norm}$	$f_{2,norm}$	$f_R [10^{-3}]$	$c_W$	$f_{0,norm}$	$f_{2,norm}$	$f_R [10^{-3}]$	$c_W$
Leipzig	04.09.2012	I	884	3,48	6,6	0,569	857	3,55	6,4	0,580
	05.09.2012	II	830	3,66	6,1	0,598	866	3,54	6,4	0,579
	26.09.2012	III	905	3,39	6,8	0,554	859	3,54	6,4	0,579
	18.10.2012	IV	804	3,68	6,0	0,602	855	3,52	6,4	0,575
				Std.abw.	0,3	0,020				
				Mittelwert	6,4	0,586				
Neubiberg	23.04.2013	V	813	3,54	6,1	0,578	808	3,55	6,1	0,581
	08.05.2013	VI	769	3,63	5,9	0,594	802	3,55	6,1	0,580
	14.05.2013	VII	776	3,60	5,9	0,588	799	3,52	6,1	0,576
				Std.abw.		0,006				
				Mittelwert		0,586				

Tab. 12: Wiederholbarkeit der Ausrolltests



zur Ausgangskonfiguration wird der durch einen möglicherweise ungenauen Rollwiderstand gemachte systematische Fehler zudem gegenseitig aufgehoben. Durch den in der linearen Regression zugrunde gelegten Rollwiderstandsbeiwert verringert sich die Streuung im Luftwiderstand drastisch (Tabelle 12, rechte Seite). Dieser liegt in Leipzig im Mittel bei 0,58 mit einer Standardabweichung von nunmehr nur noch 0,002. Das gleiche Vorgehen wurde auch bei den Messungen in Neubiberg angewendet, wodurch bei einem Rollwiderstandsbeiwert von  $6,1 \cdot 10^{-3}$  sich ein Luftwiderstandsbeiwert von 0,58 ergibt, ebenfalls mit einer Standardabweichung von 0,002. Die Differenz im Rollwiderstandsbeiwert bei beiden Teststrecken ist vermutlich auf unterschiedliche Fahrbahnoberflächen zurückzuführen. Hinsichtlich der Genauigkeit des Versuchsaufbaus ist es sinnvoll, den  $c_W$ -Wert auf 2 Stellen hinter dem Komma zu runden.

Bild 25 zeigt beispielhaft Ergebnisse eines Ausrollversuchs des Prototyps in Ausgangskonfiguration, durchgeführt in Neubiberg (Tabelle 12, Messung V). Die Rauten zeigen die gemessenen, nicht normierten Fahrwiderstandskräfte (Roll- und Luftwiderstand) in den 6 Geschwindigkeitsintervallen. Sie sind aufgetragen über die Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Kreise zeigen die Windkompensation auf. Sie wurden um die frontale Windanströmungsgeschwindigkeit entlang der Abszisse verschoben. Die beiden Kurven zeigen die Fahrwiderstände entsprechend der ermittelten Werte mit Normkorrektur für Roll- und Luftwiderstand. Darüber hinaus zeigt die Darstellung die Aufteilung in den konstanten Anteil

des Rollwiderstands und den quadratischen Anteil des Luftwiderstandes.

Die weiteren Fahrwiderstandsmessungen, die der Ermittlung des  $c_W$ -Wertes bei umgesetzten aerodynamischen Maßnahmen dienten, wurden ebenfalls in Neubiberg durchgeführt.

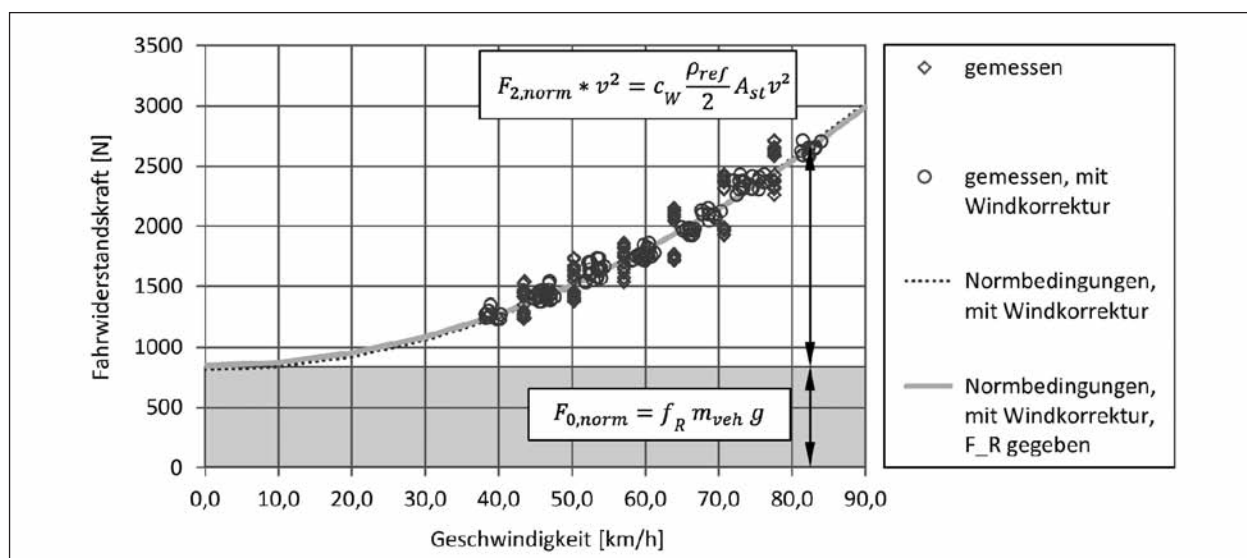
#### 4.3.2 Reduktion des Luftwiderstandes durch untersuchte Maßnahmen

Während der Fahrwiderstandsmessungen mit oben genannten Maßnahmen herrschten Umgebungstemperaturen zwischen 12 °C und 20 °C, wodurch die Gültigkeit der Korrekturfaktoren gewährleistet wurde. Bei allen Messungen herrschte vergleichbar schwacher Seitenwind von durchschnittlich 2...3 km/h mit Spitzen von 4 km/h.

Durch die Anbringung eines SDR-Diffusors über dem Heckportal des Auflegers konnte eine Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes von absolut 0,02 bzw. relativ 3,4 %, bezogen auf den Ausgangszustand, erzielt werden (Tabelle 13, Messung VIII).

Die Maßnahme wurde anschließend mit der oben beschriebenen Seitenverkleidung am Aufleger kombiniert, wodurch sich der Luftwiderstandsbeiwert im Vergleich zur Ausgangskonfiguration ohne Maßnahmen um 0,05 bzw. 8,6 % verbesserte (Tabelle 13, Messung IX).

Bei Messung des Luftwiderstandes allein mit der Seitenverkleidung zeigte sich jedoch ebenfalls eine



**Bild 25:** Gemessene Fahrwiderstände und durch lineare Regression ermittelte Fahrwiderstandskurve des Prototyps in Ausgangskonfiguration

Teststrecke	Datum	Messung	Konfiguration	$f_{0,norm}$	$f_{2,norm}$	$f_R$ [10 <sup>-3</sup> ]	$c_W$	$\Delta c_W$
Neubiberg		V, VI, VII	Ausgangskonfiguration	siehe Tab. 12		6,1	0,58	Referenz
	28.05.2013	VIII	SDR-Diffusor	797	3,41	6,1	0,56	-0,02 (-3,4 %)
	02.07.2013	IX	SDR-Diffusor + Seitenverkleidung	821	3,23	6,1	0,53	-0,05 (-8,6 %)
	16.07.2013	X	Seitenverkleidung	813	3,26	6,1	0,53	-0,05 (-8,6 %)
	16.08.2013	XI	Heckeinzugsklappen + Seitenverkleidung	811	3,05	6,1	0,50	-0,08 (13,8 %)
	19.09.2013	XII	Heckeinzugsklappen	813	3,38	6,1	0,55	-0,03 (-5,2 %)

Tab. 13: Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes durch aerodynamische Maßnahmen am Auflieger

Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes um 0,05 bzw. 8,6 % (Tabelle 13, Messung X). Dies lässt den Schluss zu, dass sich beide Maßnahmen, der SDR-Diffusor und die Seitenverkleidung gegenseitig beeinflussen. Der SDR-Diffusor wirkt wie bereits beschrieben auf das Unterdruckgebiet hinter dem Auflieger und erzielt seine Wirkung durch Teilung des Heckwirbels. Offenbar beeinflusst die Seitenverkleidung die Heckwirbelbildung so ungünstig, dass die Funktionsweise des SDR-Diffusors nicht mehr gegeben ist.

In einer weiteren Messung wurde die Seitenverkleidung mit den Heckeinzugsklappen kombiniert. Dadurch ergab sich eine Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes um weitere 0,03 auf insgesamt 0,08 bzw. 13,8 % (Tabelle 13, Messung XI).

In der letzten Konfiguration wurden die Heckeinzugsklappen allein vermessen (Bild 24). Die Minderung im Luftwiderstandsbeiwert beläuft sich auf 0,03 bzw. 5,2 % (Tabelle 13, Messung XII). Im Gegensatz zum SDR-Diffusor beeinflussen sich Heckeinzugsklappen und Seitenverkleidung nicht gegenseitig in ungünstiger Art und Weise. Das aerodynamische Einsparpotenzial beider Maßnahmen kann in diesem Fall addiert werden.

Die Heckeinzugsklappen wurden, wie bereits erwähnt, nach Entwürfen von CFD-Analysen und Windkanalversuchen in (DEVESA u. INDINGER 2011) konstruiert. Die Reduktion des Luftwiderstands betrug dort bei 400 mm langen Klappen 6,0 %, bei einer Länge von 1.200 mm 5,6 %. Die Größenordnung der gemessenen Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes stellt sich somit plausibel dar.

## 5 Verbrauchssimulation für Sattelzüge

Ziel der Verbrauchssimulation ist die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs unterschiedlicher Fahrzeugkonfigurationen in verschiedenen Fahrzyklen und Beladungszuständen. Durch Parametervariationen lassen sich Verbrauchseinsparpotenziale von verschiedenen Maßnahmen quantifizieren.

### 5.1 Aufbau des Programms

Die Verbrauchssimulation entspricht einer sogenannten Vorwärtssimulation, in der in einem geschlossenen Regelkreis ein Fahrermodell (Regler) über die Stellgrößen Gas- und Bremspedalstellung einem vorgegebenen Soll-Geschwindigkeitsprofil, dem Fahrzyklus, (Führungsgröße) folgt. Das Fahrzeug bildet hierbei die Regelstrecke ab. Die Fahrwiderstände sind den Störgrößen zuzuordnen (GRAAF 2002, S. 58).

Als Simulationsumgebung für die Realisierung der Verbrauchssimulation wurde MATLAB Simulink gewählt (MATHWORKS 2014). Bild 26 zeigt den Aufbau des Programms mit Blockschaltbildern in der höchsten Ebene. Im Blockschaltbild des Zyklus ① ist der Fahrzyklus mit einem Zielgeschwindigkeits- und Steigungsprofil, beide jeweils abhängig vom Ort, hinterlegt. Beide Signale finden im Fahrerregler ② Eingang. Dieser ist durch einen PI-Regler mit einer Vorsteuerung und Integratorreset bei Nulldurchgang der Reglerabweichung realisiert. Der Fahrerregler betätigt Gas- und Bremspedal. Das Gaspedal findet Eingang im Blockschaltbild des Motors ③. In ihm befinden sich ein stationäres Verbrauchskennfeld sowie weitere Charakteristika wie beispielsweise die Kurve des maximalen Drehmoments oder das dynamische Ansprechverhalten. Eine weitere Eingangsgröße des Motors bildet die

aktuelle Motordrehzahl. Aus dem Drehmoment, welches aus der Gaspedalstellung errechnet wird, und der Drehzahl wird über das Verbrauchskennfeld der aktuelle spezifische Verbrauch ermittelt und über Zeitschritte zum Gesamtverbrauch integriert. Das vom Motor abgegebene Drehmoment wird über die Kupplung ④ an das Getriebe ⑤ weitergegeben und entsprechend der Gangstufen übersetzt. Die Wahl der Gangstufe hat einen entscheidenden Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, da sie über den Betriebspunkt im Verbrauchskennfeld entscheidet. Um ein realistisches Schaltverhalten zu simulieren, wurde die Schaltlogik aus (REXEIS et al. 2005, S. 48) in der Verbrauchssimulation implementiert. Das Drehmoment wird anschließend über das Achsgetriebe ⑥ und die Räder ⑦ in eine

Vortriebskraft übersetzt. Zur Simulation der Getriebeverluste sind zu den einzelnen Gangstufen mittlere Wirkungsgrade hinterlegt. Aus der gefahrenen Geschwindigkeit leitet sich wiederum die Drehzahl der Räder ab. Die Drehzahl der Räder wird über das Hinterachsgetriebe, das Getriebe und die Kupplung zur Berechnung des aktuellen Kraftstoffverbrauchs in das Blockschaltbild des Motors überführt und jeweils entsprechend übersetzt. Im Blockschaltbild des Fahrzeugs ⑧ werden die Fahrwiderstände und die Fahrzeugposition als Punktmasse entlang der zu fahrenden Strecke simuliert. Die aktuelle Position des Fahrzeugs findet Eingang im Blockschaltbild des Fahrzyklus. Die aktuelle Geschwindigkeit wird zur Berechnung der Reglerabweichung in den Fahrerregler geführt. Eine weitere

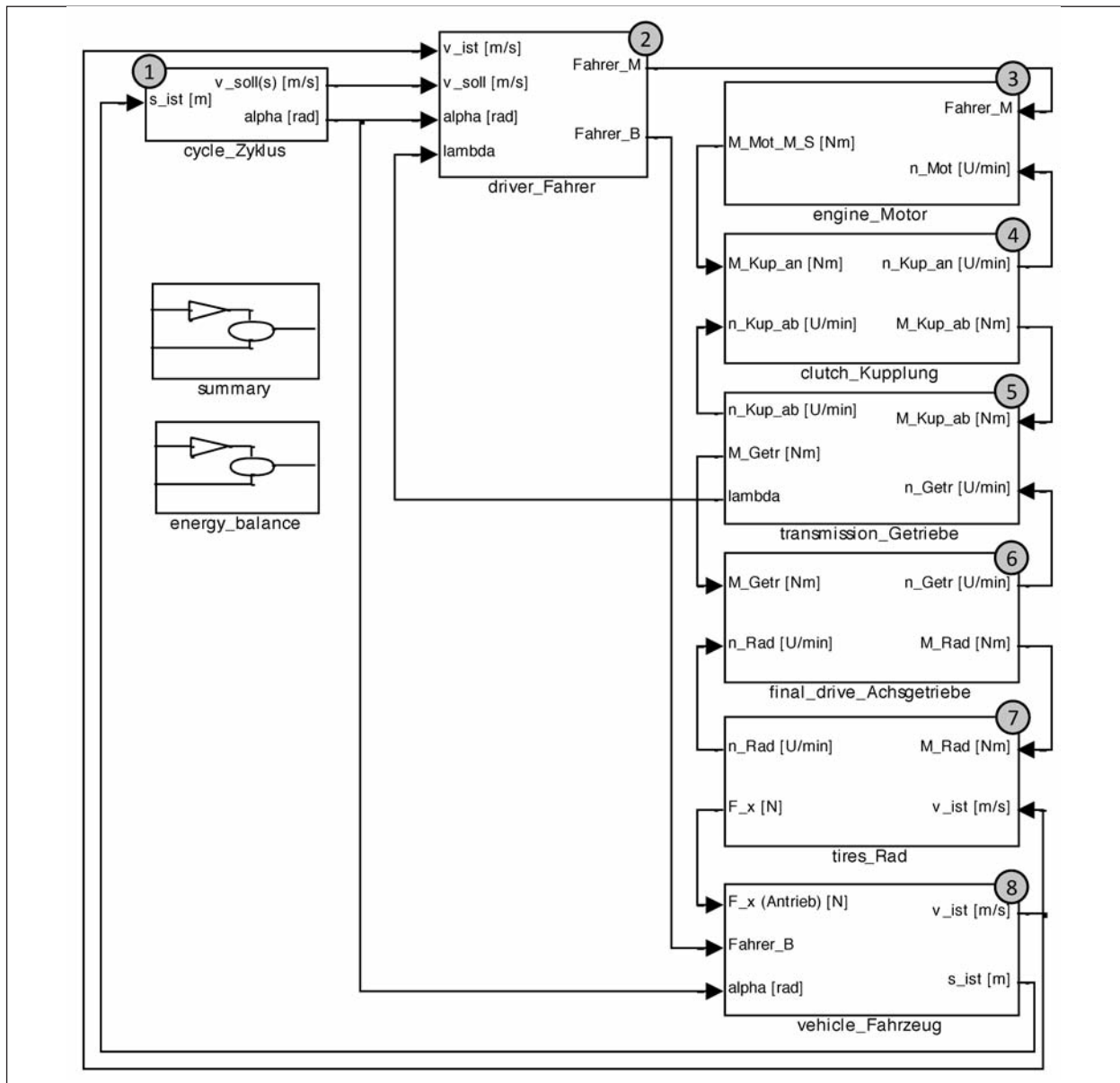


Bild 26: Aufbau der Verbrauchssimulation in MATLAB Simulink

Eingangsgröße im Blockschaltbild des Fahrzeugs bildet die Bremspedalstellung, welche in eine Verzögerungskraft am Rad übersetzt wird.

Nebenverbraucher werden über eine mittlere Nebenverbraucherleistung im Motor berücksichtigt. Eine detaillierte Betrachtung von Nebenverbrauchern wie Lüfter, Druckluftkompressor oder auch Lenkhilfepumpe würde die Komplexität der gesamten Simulation sowie den Aufwand für die Parametrierung sehr stark erhöhen. Eine Abbildung der Nebenverbraucher ist bei Sattelzügen über eine mittlere Nebenverbraucherleistung zweckmäßig, da deren Beitrag zum Kraftstoffverbrauch relativ gering ist und deren Leistung über verschiedene Fernverkehrsfahrzyklen keinen großen Schwankungen unterliegt (DELORME et al. 2009).

Mit dem gewählten Detaillierungsgrad lassen sich somit durch Variation von Eingangsparametern unter anderem die Kraftstoffeinsparpotenziale folgender Maßnahmen quantifizieren:

- aerodynamische Maßnahmen durch Variation des Luftwiderstandsbeiwerts,
- Verringerung des Rollwiderstandes durch Variation der Rollwiderstandsbeiwerte,
- Verringerung der Leermasse durch Variation der Fahrzeugmasse,
- Optimierung von Nebenverbrauchern, wenn die Reduktion der mittleren Leistung einer Maßnahme bekannt ist.

## 5.2 Parametrierung

Als typischer Vertreter eines Sattelzugs wurde in der Verbrauchssimulation der vorhandene Prototyp (Bild 22) umgesetzt. Dementsprechend erfolgte die Parametrierung anhand von Daten dieses Fahrzeugs, eines MAN 18.440 Euro V EEV EfficientLine kombiniert mit einem KÖGEL-Cargo-Sattelaufleger mit Seitenplane. Nachfolgend wird auf wesentliche Parameter eingegangen.

### 5.2.1 Fahrwiderstände

Wesentliche Parameter für die Fahrwiderstände bilden der Luftwiderstandsbeiwert, die Stirnfläche, die Fahrzeugmasse und Achslastverteilung sowie die Rollwiderstandsbeiwerte der Bereifung. Als Luftwiderstandsbeiwerte werden die in den Ausrollversuchen ermittelten herangezogen. Der Wert der Stirn-

fläche des Fahrzeuges von 10,3 m<sup>2</sup> basiert auf Herstellerangaben sowie eigenen Plausibilisierungen. Die Fahrzeugmassen und die Achslastverteilung bei unterschiedlichen Beladungszuständen wurden über eine geeichte Fahrzeugwaage ermittelt.

Der Sattelzug verfügt über eine werksseitig standardmäßige Bereifung.

- Frontachse: 315/70 R 22.5 MICHELIN X Energy SAVERGREEN XF,
- Antriebsachse: 315/70 R 22.5 MICHELIN X Energy SAVERGREEN XD ,
- Aufliegerachsen: 385/65 R 22.5 Continental HTR2.

Diese weisen entsprechend Verordnung (EU) Nr. 1222/2009 alle ein Effizienzlabel C auf. Die Effizienzlabel geben jedoch lediglich einen Bereich an in dem der jeweilige Rollwiderstandsbeiwert liegt. Die genauen Rollwiderstandsbeiwerte wurden daher vom Kooperationspartner Michelin anhand von baugleichen Reifen entsprechend ISO 28580 in Trommelprüfstandsmessungen ermittelt. Der Einfluss der Achslast auf den Rollwiderstandsbeiwert wird über einen Korrekturfaktor berücksichtigt (VINCKEN 2005; LANGE et al. 2013):

$$f_R = f_{R,iso} * \left( \frac{F_Z}{F_{Z,iso}} \right)^{0,9}$$

wobei

$f_R$  Rollwiderstandsbeiwert [-]

$f_{R,iso}$  Rollwiderstandsbeiwert entsprechend ISO 28580

$F_Z$  Radaufstandskraft [N]

$F_{Z,iso}$  Radaufstandskraft nach ISO 28580 (85 % der maximalen Radaufstandskraft entsprechend Lastindex) [N]

Weitere Einflüsse wie die Fahrbahnoberfläche oder Asphalttemperatur können im Rahmen der Verbrauchssimulation nicht betrachtet werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass rollwiderstandsoptimierte Reifen, welche im Rahmen dieser Simulationsstudie betrachtet werden, dem gleichen Einfluss unterliegen wie die Standardbereifung. Etwaige Ungenauigkeiten gleichen sich bei einem paarweisen Vergleich wiederum gegenseitig aus. Des Weiteren wird von einem optimalem Reifendruck sowie stationären Verhalten („Warmfahren“) ausgegangen.



### 5.2.2 Antriebsstrang

Das im Blockschaltbild Motor (Bild 26, ©) hinterlegte stationäre Verbrauchkennfeld entspricht dem des im Prototypen verbauten Motors, eines MAN D2066, mit einer Nennleistung von 324 kW bei 1.600...1.900 U/min bzw. einem maximalen Drehmoment von 2.100 Nm bei 1.000...1.400 U/min. Der Motor entspricht der Abgasnorm Euro V EEV. Die Daten wie beispielsweise das Verbrauchskennfeld wurden vom Kooperationspartner MAN Truck & BUS AG zur Verfügung gestellt und durch eigene Messungen auf einem Rollenprüfstand ergänzt.

Die Übersetzungsverhältnisse und mittleren Wirkungsgrade im Antriebsstrang wurden ebenfalls vom Kooperationspartner MAN Truck & Bus AG zur Verfügung gestellt und durch weitere Herstellerangaben beispielsweise bei den Getriebeübersetzungen ergänzt (ZF Friedrichshafen AG 2013).

### 5.3 Fahrzyklen

Die im Rahmen dieser Simulationsstudie betrachteten Maßnahmen am Sattelzug werden anhand des VR-Tests, dessen Durchführung in Kapitel 7.1 näher beschrieben wird, bewertet. Zur Virtualisierung des VR-Tests wurde das Geschwindigkeits- und Steigungsprofil bei einer Basisfahrt mit dem Prototyp mithilfe eines Inertialmesssystems aufgezeichnet (Bild 27).

Bei den Fahrzyklen wird ein Zielgeschwindigkeitsansatz verfolgt, da Sattelzüge mit ca. 8...10 kW je Tonne Gesamtmasse tendenziell untermotorisiert sind. Ein Sattelzug, der aufgrund der Untermotorisierung bei Steigungen seine Zielgeschwindigkeit nicht mehr erreicht, wird durch Verringerung der Fahrwiderstände eine höhere Geschwindigkeit erzielen, möglicherweise jedoch keinen Kraftstoff einsparen. Beispielhaft zu nennen sind Zielgeschwin-

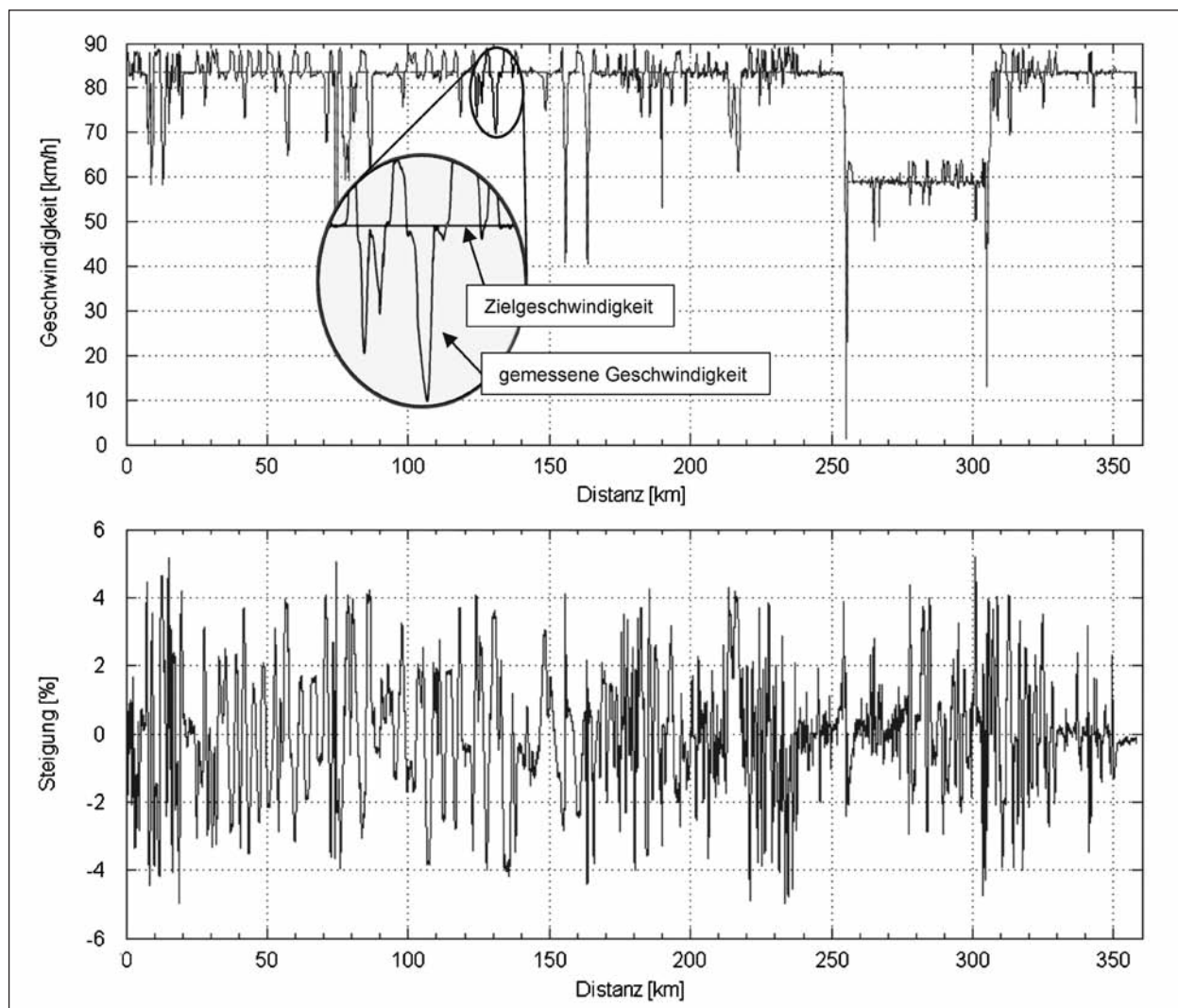


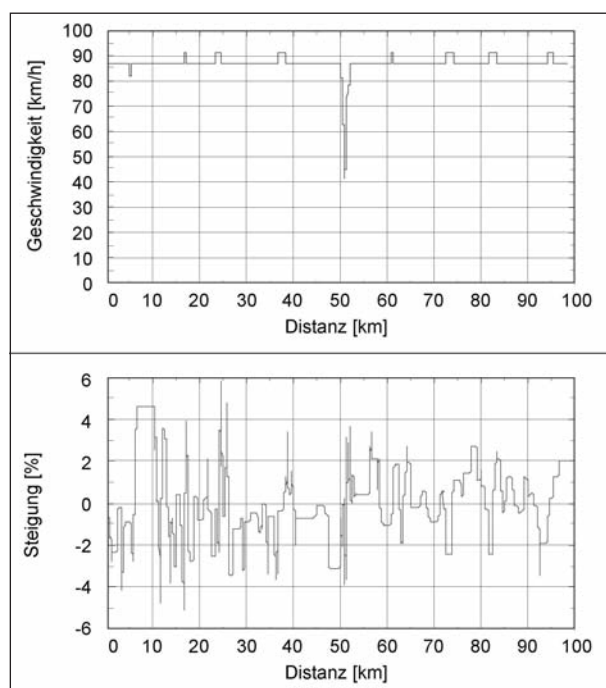
Bild 27: Geschwindigkeits- und Steigungsprofil des VR-Test (erster Teil)



digkeiten auf der Autobahn von 85 km/h bei einer Steigung von 5 %. Daher muss aus den gemessenen Geschwindigkeiten die Zielgeschwindigkeit ermittelt werden. Dies ist im Rahmen des VR-Tests einfach möglich, da abgesehen von Abfahrten sowie bei Ortsdurchfahrten stets der Tempomat aktiviert ist. So wurde dem aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofil bei allen Tempomatphasen eine Zielgeschwindigkeit aufgeprägt (Bild 27, siehe ovale Vergrößerung). Der Fahrerregler in der Verbrauchssimulation wirkt in diesen Phasen entsprechend wie ein Nutzfahrzeugtempomat, der bestrebt ist der Zielgeschwindigkeit zu folgen, das Fahrzeug jedoch ab einer um 5 km/h überhöhten Geschwindigkeit, beispielsweise in Gefällen, einbremst.

Der Zielgeschwindigkeitsansatz ermöglicht auch eine Adaption des VR-Tests auf unterschiedliche Autobahn- und Landstraßengeschwindigkeiten. Diese lassen sich unabhängig voneinander auf übliche Werte von 80 km/h, 85 km/h oder 90 km/h auf Autobahnen und 60 km/h, 65 km/h oder 70 km/h auf Landstraßen skalieren. Dies ermöglicht eine Quantifizierung von Kraftstoffeinsparungen infolge verringerter Geschwindigkeiten.

Als weiterer Fahrzyklus für schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr stand eine Entwurfs-Version des „ACEA long-haul“ zur Verfügung (Bild 28). Auch dieser Fahrzyklus verfolgt den Zielgeschwindigkeitsansatz. Er bildet eine reine Autobahnfahrt mit ca.



**Bild 28:** Geschwindigkeits- und Steigungsprofil einer Entwurfs-Version des „ACEA long-haul“

87 km/h ab. Das Steigungsprofil bildet für Bundesautobahnen übliche Steigungen von +/- 3 % bzw. in Ausnahmefällen von +/- 5 % ab. Dieser Fahrzyklus wurde zur Validierung der in dieser Studie angewendeten Simulation herangezogen. Hierzu wurden die Ergebnisse einer Parameterstudie mit jenen der Verbrauchssimulation des Kooperationspartners MAN Truck & Bus AG verglichen.

Neben den vorgestellten Fahrzyklen können in der Verbrauchssimulation auch Konstantfahrten des Sattelzugs bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der Ebene dargestellt werden.

## 5.4 Validierung

Die Verbrauchssimulation wurde auf zwei Arten validiert. Erstens erfolgte eine Validierung anhand der oben erwähnten Verbrauchssimulation des Kooperationspartners MAN Truck & Bus AG. Diese ist mit zahlreichen Fahrversuchen abgeglichen und kann als valide angesehen werden. Zweitens wurde die Verbrauchssimulation anhand von zwei Realfahrten mit dem Prototyp im VR-Test validiert.

### 5.4.1 Quervergleich mit der Verbrauchssimulation von MAN

Im Rahmen der ersten Validierung wurde im „ACEA long-haul“-Zyklus (Bild 28) eine Parameterstudie durchgeführt und die Ergebnisse beider Verbrauchssimulationen verglichen. Der Fokus wurde hierbei auf sich ergebende Verbrauchsgradienten gelegt, um Aussagen über die relative Genauigkeit der hiesigen Verbrauchssimulation treffen zu können. Die relative Genauigkeit ist bei der Quantifizierung von Verbrauchseinsparpotenzialen von großer Bedeutung, da sich Maßnahmen in variierten Eingangsparametern ausdrücken. So wurden hierzu in einem teilfaktoriellen Versuchsaufbau folgende Parameter in beiden Verbrauchssimulationen variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen:

- Luftwiderstandsbeiwert:  
[0,47; 0,49; 0,51; 0,53; 0,55],
- Rollwiderstandsbeiwert:  
[0,0045; 0,0050; 0,0055],
- Gesamtmasse:  
[40 t; 39 t; 38 t].

Tabelle 14 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie. In den Zeilen sind die variierten Parameter aufgetragen, wobei jeweils

ein Wert im Rahmen der Variation als Referenzparameter definiert wurde (Ref.). Ausgehend von diesen Referenzparametern wird der Verbrauchsunterschied absolut (Differenz zu Ref.) sowie relativ zum Kraftstoffverbrauch (relativer Unterschied) angegeben. So verändert sich der Kraftstoffverbrauch bei einer Reduktion des Luftwiderstandsbeiwerts von 0,53 auf 0,47 bei beiden Simulationen um -0,97 l/100 km, was einem relativen Unterschied von -2,8 % bzw. -2,7 % entspricht. Der absolute Verbrauch beider unterscheidet sich lediglich um über die Parametervariation konstante 0,2 l/100 km (Differenz TUM vs. MAN). Im direkten Vergleich der relativen Unterschiede im Kraftstoffverbrauch infolge veränderter Eingangsparameter treten maximale Abweichungen

von 0,2%-Punkten auf (Differenz der relativen Unterschiede).

Die Parameterstudie zeigt auch konstante Gradienten, bzw. jeweils einen linearen Zusammenhang zwischen den variierten Parametern und dem Kraftstoffverbrauch. Bild 29 bildet beispielsweise den Gradienten der Parameterstudie über den Luftwiderstandsbeiwert ab. Gleiche lineare Zusammenhänge zeigen sich auch bei der Variation über den Gesamtwiderstand sowie über die Fahrzeuggesamtmasse.

Dies deutet darauf hin, dass für die Quantifizierung von Einsparpotenzialen die absolute Genauigkeit gegenüber der relativen Genauigkeit bei Variation von Eingangsparametern eine untergeordnete Rolle spielt. Dies steht beispielsweise in Zusammenhang mit den Fahrwiderstandsmessungen aus Kapitel 4. Sollte aufgrund einer Ungenauigkeit im Rollwiderstandsbeiwert der Luftwiderstand zu hoch oder zu niedrig angesetzt sein, hätte dies bei der Potenzialbewertung in der Verbrauchssimulation keine Auswirkung. Dies ist darin begründet, dass in die Potenzialbewertung Luftwiderstandsänderungen ( $\Delta c_W$ ) einfließen. Selbiges gilt für Rollwiderstandsbeiwerte welche nicht auf unterschiedliche Fahrbahnoberflächen korrigiert werden.

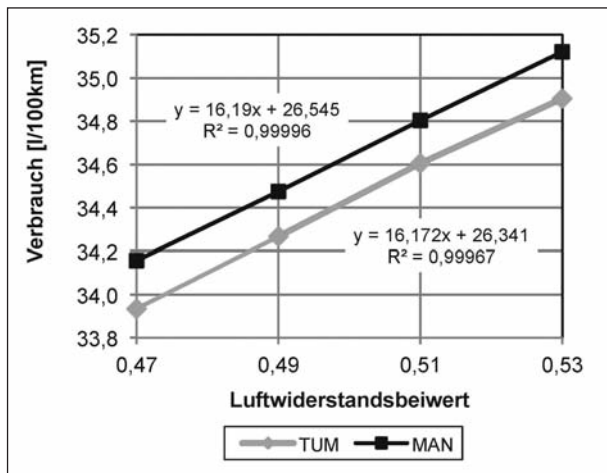


Bild 29: Linearer Zusammenhang zwischen variiertem Luftwiderstand und Kraftstoffverbrauch

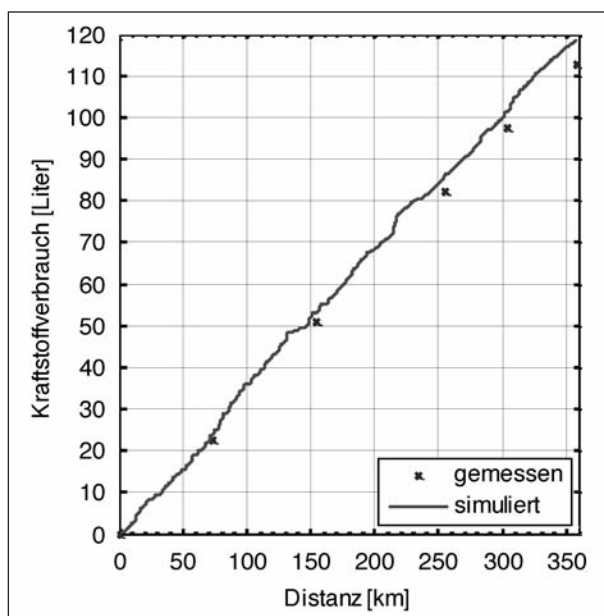
### 5.4.2 Validierung mit Realfahrt

Die zweite Validierung der Verbrauchssimulation wurde anhand zweier Realfahrten des Prototyps

		TUM			MAN			Vergleich TUM vs. MAN	
		Verbrauch [l/100 km]	Differenz zu Ref. [l/100 km]	Relativer Unterschied (Differenz/Verbrauch)	Verbrauch [l/100 km]	Differenz zu Ref. [l/100 km]	Relativer Unterschied (Differenz/Verbrauch)	Differenz TUM vs. MAN [l/100 km]	Differenz der relativen Unterschiede
$c_W$	0,55	35,23	0,33	0,9 %	35,45	0,33	0,9 %	-0,219	0,00 %
	0,53	34,90	Ref.	Ref.	35,12	Ref.	Ref.	-0,217	
	0,51	34,60	-0,30	-0,9 %	34,80	-0,32	-0,9 %	-0,198	0,05 %
	0,49	34,27	-0,64	-1,8 %	34,47	-0,65	-1,8 %	-0,207	0,02 %
	0,47	33,94	-0,97	-2,8 %	34,16	-0,97	-2,7 %	-0,222	-0,03 %
$f_R$	0,0055	35,95	1,04	3,0 %	36,09	0,97	2,8 %	-0,144	0,23 %
	0,0050	34,90	Ref.	Ref.	35,12	Ref.	Ref.	-0,217	
	0,0045	33,93	-0,98	-2,8 %	34,17	-0,95	-2,7 %	-0,243	-0,09 %
m [t]	40	34,90	Ref.	Ref.	35,12	Ref.	Ref.	-0,217	
	39	34,37	-0,54	-1,5 %	34,58	-0,54	-1,5 %	-0,219	-0,01 %
	38	33,82	-1,08	-3,1 %	34,05	-1,08	-3,1 %	-0,220	-0,03 %

(aus Datenschutzgründen wurde im Rahmen dieser Parameterstudie auf ein alternatives, ähnliches Motorkennfeld zurückgegriffen)

Tab. 14: Parametervariation und Validierung der Simulation anhand der Verbrauchssimulation von MAN Truck & Bus AG



**Bild 30:** Gemessener und simulierter Kraftstoffverbrauch im VR-Test (erster Teil) bei einer Nutzlast von 25,5 t

durchgeführt. Hierzu wurde jeweils der gemessene Kraftstoffverbrauch dem über die Verbrauchssimulation berechneten gegenübergestellt. Bei den Messfahrten handelt es sich um Basisfahrten des in Kapitel 7.1 näher beschriebenen VR-Tests.

- Distanz von 360 km mit einer Nutzlast von 25,5 t (erster Teil des VR-Tests, Vollbeladung),
- Distanz von 65 km mit einer Nutzlast von 12 t (zweiter Teil des VR-Tests, Teilbeladung).

Der Kraftstoffverbrauch wurde in beiden Fällen über Durchflussmessgeräte gemessen. In a) wurde der gemessene Kraftstoffverbrauch zusätzlich über eine Kontrollbetankung mit Temperaturkompensation abgeglichen. Die Abweichung betrug hier lediglich 0,4 %. Bei Gegenüberstellung der gemessenen mit den simulierten Verbräuchen zeigen sich Abweichungen auf dem ersten Teil des VR-Tests mit einer Nutzlast von 25,5 t von 5,6 % (Bild 30, Tabelle 15). Auf der zweiten Runde mit einer Nutzlast von 12 t zeigt die Verbrauchssimulation eine Abweichung von ca. 5 % (Tabelle 16).

Die Abweichungen lassen sich beispielsweise durch unterschiedliche Wetterbedingungen oder auch systematische Messfehler wie unterschiedliche Schaltstrategien oder auch Einfluss der Fahrbahnoberfläche auf den Rollwiderstandsbeiwert zurückführen. Die im Rahmen dieser Validierung nachgewiesenen Genauigkeiten bezüglich des absoluten Kraftstoffverbrauchs und des relativen

Distanz [km]	73	155	255	304	358
Gemessener Verbrauch [l]	22,38	50,61	81,92	97,10	112,08
Simulierter Verbrauch [l]	23,90	53,15	85,89	101,32	118,41
Abweichung	+6,8 %	+5,0 %	+4,8 %	+4,3 %	+5,6 %

**Tab. 15:** Gemessener und simulierter Kraftstoffverbrauch im VR-Test (erster Teil) bei einer Nutzlast von 25,5 t

Distanz [km]	20	65
Gemessener Verbrauch [l]	5,33	17,25
Simulierter Verbrauch [l]	5,43	18,09
Abweichung	+1,8 %	+4,8 %

**Tab. 16:** Gemessener und simulierter Kraftstoffverbrauch im VR-Test (zweiter Teil) bei einer Nutzlast von 12 t

Kraftstoffverbrauchs infolge variiertes Parameter (Gradienten) können jedoch als ausreichend erachtet werden, um Einsparpotenziale im Folgenden untersuchter Maßnahmen zu quantifizieren.

## 5.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden mit dem simulierten Sattelzug in den vorgestellten Fahrzyklen Verbrauchgradienten abgeleitet und miteinander verglichen. Dadurch werden die unterschiedlichen Effektstärken von Maßnahmenkategorien wie Aerodynamik, Rollwiderstandsreduktion und Leichtbau in den jeweiligen Fahrzyklen deutlich. Anschließend werden bereits diskutierte und teilweise auch in den Fahrwiderstandsmessungen untersuchte Maßnahmen in der Simulation behandelt.

### 5.5.1 Verbrauchsgradienten

Ausgangspunkt für die Verbrauchsgradienten bildet die Parametrierung der Verbrauchssimulation mit dem vorgestellten Sattelzugprototyp. Analog zur Literaturrecherche wurden die Gradienten über folgende Schrittweiten ermittelt.

- Reduktion des Luftwiderstandes um 10 %,
- Reduktion des Gesamtwiderstandes um 10 %,
- Reduktion der Fahrzeugmasse um 1 t,
- Reduktion der mittleren Nebenverbraucherleistung um 1 kW.

		VR-Test (Strecken- und Beladungsmix) BAB 85 km/h LS 60 km/h	VR-Test (Strecken- und Beladungsmix) BAB 89 km/h LS 70 km/h	ACEA long-haul (25,5 t Nutzlast) ca. 87 km/h	Konstantfahrt in der Ebene (25,5 t Nutzlast)			
					60 km/h	70 km/h	80 km/h	89 km/h
Referenzverbrauch [l/100 km]		30,37	31,97	35,75	23,93	25,11	27,25	29,76
Einsparung [l/100 km]	$\Delta c_{w} = -10\%$	-0,86 (-2,8 %)	-0,94 (-2,9 %)	-1,05 (-2,9 %)	-0,64 (-2,7 %)	-0,84 (-3,3 %)	-1,08 (-3,9 %)	-1,34 (-4,5 %)
	$\Delta f_{R} = -10\%$	-0,88 (-2,9 %)	-0,87 (-2,7 %)	-1,08 (-3,0 %)	-1,34 (-5,6 %)	-1,29 (-5,1 %)	-1,23 (-4,5 %)	-1,24 (-4,2 %)
	$\Delta m_{veh} = -1\text{ t}$	-0,59 (-1,9 %)	-0,59 (-1,9 %)	-0,57 (-1,8 %)	-0,31 (-1,3 %)	-0,30 (-1,2 %)	-0,28 (-1,0 %)	-0,29 (-1,0 %)
	$\Delta P_{Aux} = -1\text{ kW}$	-0,23 (-0,7 %)	-0,22 (-0,7 %)	-0,21 (-0,6 %)	-0,21 (-0,9 %)	-0,20 (-0,8 %)	-0,24 (-0,9 %)	-0,23 (-0,8 %)

Tab. 17: Verbrauchsdifferenzen in unterschiedlichen Fahrzyklen

Tabelle 17 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Der erste Fahrzyklus bildet den VR-Test mit den ursprünglichen Geschwindigkeiten von 60 km/h (Landstraße) und 85 km/h (Autobahn) ab. Der zweite bildet ebenfalls den VR-Test ab, jedoch mit hochskalierten Landstraßen- und Autobahngeschwindigkeiten von 89 km/h und 70 km/h. Bei dem dritten Fahrzyklus handelt es sich um den bereits vorgestellten „ACEA long-haul“-Entwurf. Darüber hinaus zeigt Tabelle 17 auch eine Auswertung über verschiedene Konstantfahrten mit Geschwindigkeiten von 60 km/h bis 89 km/h. Die Konstantfahrten werden alle ohne Schaltvorgänge im 12. Gang gefahren und beinhalten keine Anfahrvorgänge. Bei den VR-Tests wird jeweils das gemischte Beladungsszenario angewandt. Bei allen weiteren Fahrzyklen wird eine Nutzlast von 25,5 t angesetzt.

Das Einsparpotenzial durch Aerodynamik korreliert erwartungsgemäß mit der Geschwindigkeit und variiert in den unterschiedlichen Fahrzyklen von -0,64 l/100 km bei der Konstantfahrt in der Ebene mit 60 km/h bis hin zu -1,34 l/100 km bei der Konstantfahrt in der Ebene mit 89 km/h. Im VR-Test, der eine höhere Alltagsrelevanz als die Konstantfahrten aufweist, beträgt der Gradient -0,86 l/100 km bzw. -2,8 % bei Verringerung des  $\Delta c_w$ -Wertes um 10 %. Dies deckt sich mit dem in (DEVESA u. INDINGER 2011) angewandten Gradienten von -2,85 %. Der in (European Commission 2012, S. 93) berechnete Gradient von -3,35 % fällt hingegen größer aus.

Bei Reduktion des Gesamtrollwiderstandes um 10 % korrelieren die Verbrauchsreduktionen mit der Gesamtmasse des Fahrzeugs. Im Beladungs-

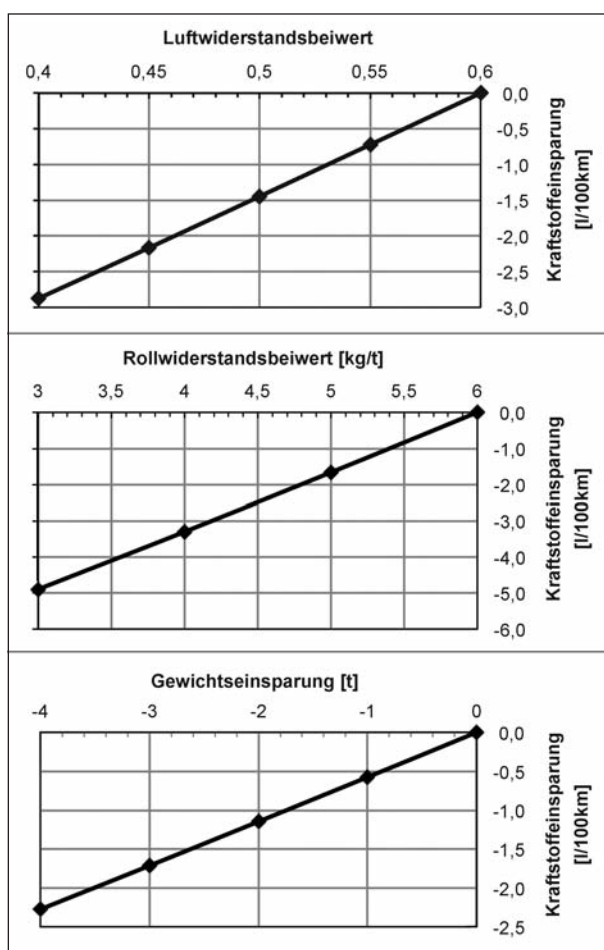
mix des VR-Tests, welcher auch eine Teilbeladung sowie eine Leerfahrt enthält, liegt die Einsparung bei rund -0,9 l/100 km. Im „ACEA long-haul“ kann eine Einsparung von 1,08 l/100 km verzeichnet werden. Die ermittelten Werte decken sich mit in (DENIMAL et al. 2012) gemessenen Gradienten von rund -2 l/100 km bei Reduktion des Rollwiderstandes um 20 % bei 38 t Gesamtmasse. Bei Konstantfahrt fällt die Verbrauchseinsparung mit 1,2 l/100 km etwas höher aus. Bei Konstantfahrten zeichnet sich durch die Rollwiderstandsreduktion bei 60 km/h eine leicht höhere absolute Verbrauchseinsparung ab (-1,34 l/100 km) als bei 80 km/h (-1,23 l/100 km). Der Unterschied ist auf einen Motorbetriebspunkt mit etwas schlechterem Wirkungsgrad bei 60 km/h zurückzuführen.

Die Verringerung der Fahrzeugmasse wirkt sich bei allen Fahrzyklen, die ein Steigungsprofil aufweisen, stärker aus (ca. -0,6 l/100 km) als bei den Konstantfahrten (-0,3 l/100 km). Damit bestätigt die Simulationsstudie die bereits in der Literaturrecherche gefundenen Werte in (HELMS u. LAMBRECHT 2007) oder auch (DENIMAL et al. 2012).

Die Reduktion der mittleren Nebenverbraucherleistung um 1 kW ergibt unabhängig vom Fahrzyklus eine Einsparung von ca. -0,2 l/100 km.

Die in der Literaturrecherche zugrunde gelegten Werte, zusammengefasst in Tabelle 8, bildeten somit bereits eine gute Annäherung an die Werte des VR-Tests. Der Durchschnittsverbrauch des VR-Tests ist mit ca. 30 l/100 km jedoch etwas niedriger. Der Durchschnittsverbrauch des ersten Teils beträgt ca. 33 l/100 km. Es tragen jedoch die ge-





**Bild 31:** Linearer Verlauf des Kraftstoffverbrauchs über variierte Parameter des Gesamtfahrwiderstandes

ringeren Durchschnittsverbräuche der Teilbeladung sowie die Leerfahrt mit zum Gesamtdurchschnittsverbrauch des VR-Tests bei.

Die Gradienten wurden bisher über einen Arbeitspunkt abgeleitet (Luftwiderstandsbeiwert, Rollwiderstand und Gesamtmasse bei Vollbeladung des Prototyps). Im Folgenden sind die Parameter Gesamrollwiderstandsbeiwert, Luftwiderstandsbeiwert und Fahrzeugmasse über einen breiteren Wertebereich im VR-Test variiert. Bild 31 zeigt den linearen Verlauf der Kraftstoffeinsparung über die variierten Parameter in den erweiterten Wertebereichen im VR-Test. Die ermittelten Gradienten besitzen somit auch hier nicht nur in einem Arbeitspunkt Gültigkeit. Dies zeigt, dass es beispielsweise unerheblich ist, ob ein Rollwiderstandsbeiwert von 6 auf 5 kg/t oder von 5 auf 4 kg/t gesenkt wird. Die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bleibt in beiden Fällen konstant. Der gleiche lineare Zusammenhang gilt auch für den Luftwiderstandsbeiwert sowie für die Fahrzeugmasse.

## 5.5.2 Simulierte Maßnahmen im VR-Test

Im Folgenden werden die in den Fahrwiderstandsmessungen untersuchten aerodynamischen Maßnahmen anhand der Verbrauchssimulation mit dem virtuellen VR-Test als Fahrzyklus (Kapitel 4.3) bewertet. Darüber hinaus werden beispielhaft weitere mögliche Maßnahmen simulativ bewertet. Zur Demonstration einer Rollwiderstandsreduktion werden die Aufliegerreifen, welche werksseitig ein C-Label aufweisen, durch bereits auf dem Markt erhältliche rollwiderstandsoptimierte Aufliegerreifen mit einem A-Label ersetzt. Darüber hinaus wird ein Maßnahmenpaket aus Luftwiderstandsreduktion (Seitenverkleidung und Heckeinzugsklappen), der Rollwiderstandsreduktion durch optimierte Aufliegerreifen und Leichtbau simuliert.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie sind in Tabelle 18 in der Maßeinheit l/100 km zusammengefasst. Entsprechende Werte für die Maßeinheit g(CO<sub>2</sub>)/km können der Tabelle 21 im Anhang entnommen werden.

Die erste grau hinterlegte Spalte bildet den Ausgangszustand des Prototyps ab. In den darauf folgenden Spalten werden die jeweiligen Maßnahmen betrachtet. Die hierzu variierten Parameter wie  $c_W$ -Wert, Rollwiderstandsbeiwert oder Fahrzeugmasse finden sich in Klammern hinter der Bezeichnung der Maßnahme. So wirkt sich beispielsweise die Seitenverkleidung nicht nur im durch Fahrwiderstandsmessungen gemessenen  $\Delta c_W$  aus, sondern auch in ihrer zusätzlichen Masse von rund 200 kg, was wiederum die CO<sub>2</sub>-Reduktion der verbesserten Aerodynamik teilweise konterkariert.

Die Tabelle schlüsselt die Kraftstoffverbräuche über die jeweiligen Etappen und Beladungszustände (siehe erste Spalte) des VR-Tests auf. Bei Vergleich der Einsparpotenziale durch verbesserte Aerodynamik über verschiedene Etappen hinweg fällt auf, dass diese sich über unterschiedliche Autobahntopografien und Beladungszustände nur geringfügig unterscheiden. Im Vergleich zwischen den Autobahnetappen und den Landstraßenetappen sinkt unabhängig vom Beladungszustand die Verbrauchsreduktion in absoluten Zahlen um den Faktor 2. Dies zeigt sich beispielsweise an den Heckeinzugsklappen, die auf den Autobahnetappen zu einer Einsparung von ca. 0,5 l/100 km und auf den Landstraßenetappen von 0,2...0,3 l/100 km führen.



Seitenverkleidung + Heckeinzugsklappen + Aufliegerreifen + Leichtbau trailer ( $\Delta c_w = -0,08$ , $\Delta m = -0,8$ t, $\Delta f_r \approx -0,8$ kg/t)								
Leichtbauauflieger ( $\Delta m = -1,0$ t)								
Aufliegerreifen C-Label $\rightarrow$ A-Label ( $\Delta f_r \approx -0,8$ kg/t)								
Seitenverkleidung + Heckeinzugsklappen ( $\Delta c_w = -0,08$ , $\Delta m = +0,2$ t)								
Heckeinzugsklappen ( $\Delta c_w = -0,03$ )								
Seitenverkleidung ( $\Delta c_w = -0,05$ , $\Delta m = +0,2$ t)								
SDR-Diffusor ( $\Delta c_w = -0,02$ )								
Ausgangszustand								
Nutz- Etappe last [t]	$\emptyset$ - Verbrauch [l/100km]	Diff. [l/100km]	Diff. [l/100km]	Diff. [l/100km]	Diff. [l/100km]	Diff. [l/100km]	Diff. [l/100km]	Diff. [l/100km]
25,5 Etappe 1 Autobahn medium	32,56	-0,28 (-0,9 %)	-0,58 (-1,8 %)	-0,42 (-1,3 %)	-0,97 (-3,0 %)	-1,37 (-4,2 %)	-0,55 (-1,7 %)	-2,88 (-8,8 %)
Etappe 2 Autobahn hügelig	36,01	-0,30 (-0,8 %)	-0,62 (-1,7 %)	-0,46 (-1,3 %)	-1,06 (-2,9 %)	-1,51 (-4,2 %)	-0,63 (-1,7 %)	-3,16 (-8,8 %)
Etappe 3 Autobahn Rolletappe	32,75	-0,33 (-1,0 %)	-0,72 (-2,2 %)	-0,50 (-1,5 %)	-1,20 (-3,7 %)	-1,59 (-4,8 %)	-0,50 (-1,5 %)	-3,26 (-9,9 %)
Etappe 4 Landstraße	31,10	-0,18 (-0,6 %)	-0,35 (-1,1 %)	-0,28 (-0,9 %)	-0,61 (-2,0 %)	-1,70 (-5,5 %)	-0,54 (-1,7 %)	-2,83 (-9,1 %)
Etappe 5 Autobahn leicht	31,87	-0,35 (-1,1, %)	-0,79 (-2,5 %)	-0,53 (-1,7 %)	-1,30 (-4,1 %)	-1,69 (-5,3 %)	-0,43 (-1,4 %)	-3,40 (-10,7 %)
<b>Gesamt: erster Teil</b>	<b>33,09</b>	<b>-0,29 (-0,9 %)</b>	<b>-0,63 (-1,9 %)</b>	<b>-0,45 (-1,4 %)</b>	<b>-1,05 (-3,2 %)</b>	<b>-1,55 (-4,7 %)</b>	<b>-0,54 (-1,6 %)</b>	<b>-3,12 (-9,4 %)</b>
12 Landstraße	26,84	-0,14 (-0,5 %)	-0,21 (-0,8 %)	-0,21 (-0,8 %)	-0,38 (-1,4 %)	-0,76 (-2,8 %)	-0,72 (-2,7 %)	-1,87 (-7,0 %)
Autobahn	28,02	-0,34 (-1,2 %)	-0,76 (-2,7 %)	-0,52 (-1,8 %)	-1,24 (-4,4 %)	-0,90 (-3,2 %)	-0,53 (-1,9 %)	-2,65 (-9,5 %)
<b>Gesamt: zweiter Teil Teilbeladung</b>	<b>27,65</b>	<b>-0,30 (-1,1 %)</b>	<b>-0,59 (-2,1 %)</b>	<b>-0,42 (-1,5 %)</b>	<b>-0,98 (-3,5 %)</b>	<b>-0,86 (-3,1 %)</b>	<b>-0,59 (-2,1 %)</b>	<b>-2,41 (-8,7 %)</b>
0 Landstraße (Leer- fahrt)	17,97	-0,14 (-0,8 %)	-0,22 (-1,2 %)	-0,21 (-1,2 %)	-0,41 (-2,3 %)	-0,40 (-2,2 %)	-0,75 (-4,2 %)	-1,53 (-8,6 %)
Autobahn	21,74	-0,38 (-1,7 %)	-0,88 (-4,0 %)	-0,58 (-2,7 %)	-1,42 (-6,5 %)	-0,49 (-2,2 %)	-0,51 (-2,3 %)	-2,40 (-11,1 %)
<b>Gesamt: zweiter Teil Leerfahrt</b>	<b>20,56</b>	<b>-0,30 (-1,5 %)</b>	<b>-0,67 (-3,3 %)</b>	<b>-0,46 (-2,3 %)</b>	<b>-1,11 (-5,4 %)</b>	<b>-0,46 (-2,2 %)</b>	<b>-0,58 (-2,8 %)</b>	<b>-2,13 (-10,4 %)</b>
<b>VR-Test gesamt</b>	<b>30,37</b>	<b>-0,30 (-1,0 %)</b>	<b>-0,63 (-2,0 %)</b>	<b>-0,45 (-1,5 %)</b>	<b>-1,05 (-3,4 %)</b>	<b>-1,30 (-4,3 %)</b>	<b>-0,55 (-1,8 %)</b>	<b>-2,89 (-9,4 %)</b>

Tab. 18 : Simulierte Maßnahmen im VR-Test, ausgedrückt in der Maßeinheit l/100 km

Die Aufschlüsselung der Potenziale zeigt auch, dass relative Angaben, ausgedrückt in Prozent, direkt vom Referenzverbrauch abhängen, absolute Einsparpotenziale jedoch relativ konstant und unabhängig vom Referenzverbrauch sind. Absolute Verbrauchsangaben sind daher relativ vorzuziehen, sofern kein Referenzverbrauch mit genannt wird.

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion des SDR-Diffusors liegt mit 0,3 l/100 km bzw. 1,0 % sowohl unterhalb der Angaben des Aufliegerherstellers, der diesen im Ausstattungsprogramm führt (2,0 %) (NORDHOFF u. BARLAGE 2011), als auch der Herstellerangaben (1,5 l/100 km) (SDR 2012), jedoch oberhalb der in (van RAEMDONCK 2012) bei 85 km/h Konstantfahrt gemessenen 0,23 l/100 km.

Die Seitenverkleidung mit vertikalem Flügelprofil zeigt mit 0,6 l/100 km eine geringere Verbrauchseinsparung als in (van RAEMDONCK 2012) bei Konstantfahrt von 85 km/h gemessen wurde (1,5 l/100 km). Das maximale Potenzial entfaltet die Seitenverkleidung auf der leichten Autobahn in Etappe 5 sowie bei den Autobahnetappen in Teilbeladung und Leerfahrt (0,8 l/100 km).

Die gemessene Verringerung des Luftwiderstandsbeiwertes der Heckeinzugsklappen konnte bereits anhand von Literaturstellen plausibilisiert werden. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion von 0,5 l/100 km bzw. 1,5 % im VR-Test liegt jedoch unterhalb von vergleichbaren, aber längeren (1.200 mm) Heckeinzugsklappen in (van RAEMDONCK 2012), bei denen in Konstant-

fahrten in der Ebene und auf Autobahnen 1,1 l/100 km und 1,65 l/100 km ermittelt wurden. Für längere Heckeinzugsklappen (1.200 mm anstatt 400 mm) konnte in (DEVESA u. INDINGER 2011) allerdings kein höheres Einsparpotenzial verzeichnet werden.

Die Maßnahmenkombination aus Heckeinzug und Seitenverkleidung zeigte in den Fahrwiderstandsmessungen das größte Einsparpotenzial, welches durch den virtuellen VR-Test mit 1,1 l/100 km bzw. 3,4 % beziffert werden kann.

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion durch die verbesserten Aufliegerreifen steigert sich in absoluten Zahlen von der Leerfahrt (0,5 l/100 km bzw. 2,2 %) bis hin zur Vollbeladung (1,6 l/100 km bzw. 4,7 %) um den Faktor 3. Im Vergleich von Voll- zu Teilbeladung beträgt der Faktor 2. Durch den Austausch der Aufliegerreifen wird der Gesamtrollwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs um ca. 0,8 kg/t bzw. 16 % reduziert.

Das Potenzial des Leichtbauaufliegers steigt geringfügig (Faktor ca. 1,4) in den Landstraßenetappen gegenüber den anderen Etappen (0,4...0,6 l/100 km).

Die Maßnahmenkombination aus optimierter Aerodynamik, verbesserten Aufliegerreifen und Leichtbauauflieger (Tabelle 18, letzte Spalte) führt zur einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 2,9 l/100 km bzw. 9,4 %. Die Kombination demonstriert damit ein beträchtliches Einsparpotenzial, welches mit Maßnahmen allein am Auflieger und zur Verfügung stehender Technologie bereits heute möglich ist.

## 5.6 CO<sub>2</sub>-Rechner

Der CO<sub>2</sub>-Rechner ermöglicht eine einfache Bewertung heutiger und zukünftiger Technologien aus den Bereichen Aerodynamik, Rollwiderstand, Leichtbau und Nebenverbraucher. Hierzu wurde die Verbrauchssimulation auf ihrem aktuellen Stand mit der Parametrierung des Sattelzugs über die Parameter Fahrzeugmasse, Rollwiderstandsbeiwert und Luftwiderstandsbeiwert sowie mittlere Nebenverbraucherleistung in Verbrauchstabellen überführt. Die Verbrauchstabellen entstanden durch eine vollfaktorielle Simulationsauswertung oben genannter Parameter. Diese wurden in folgenden Schritten und Bereichen variiert:

- $c_W$ -Wert [0,3; 0,35; ... ; 0,6] \*  $A_{St}$ ,
- $f_R$  [3,0; 3,5; ... ; 7,0] kg/t,

- $m_{ges}$  [10; 11; ... ; 40] t,
- $m_{Aux}$  [1; 3.500; 5.000] W.

Die vollfaktorielle Simulationsauswertung wurde im VR-Test für folgende Zielgeschwindigkeiten durchgeführt:

- Autobahn [80; 85; 89] km/h,
- Landstraßen [60; 65; 70] km/h.

Weitere vollfaktorielle Verbrauchstabellen wurden für die oben genannten Zielgeschwindigkeiten für Konstantfahrten und für die feste Zielgeschwindigkeit des ACEA „long-haul“-Zyklus (Bild 28) erzeugt.

Werte zwischen den Stützstellen der vollfaktoriellen Simulationsauswertung können über Interpolation ermittelt werden. Hierfür wurden die Verbrauchstabellen in MS-Excel hinterlegt.

Da der VR-Test unterschiedliche Beladungszustände berücksichtigt und der Rollwiderstandsbeiwert von der Zuladung abhängig ist (siehe Kapitel 5.2.1), können zur Berechnung des Rollwiderstandsbeiwerts die Norm-Rollwiderstandsbeiwerte und Traglasten von Fahrzeugreifen auf den einzelnen Achsen in einer Maske angegeben werden (Bild 32).

Über eine zweite Maske können die Fahrzeugparameter (vgl. Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes in Tabelle 13) zweier Fahrzeuge, eines Referenzfahrzeugs und eines optimierten Fahrzeugs, eingegeben werden (Bild 33). Zu beiden Fahrzeugen können jeweils eigene Zielgeschwindigkeiten angenommen werden, um Effekte reduzierter oder erhöhter Geschwindigkeit sichtbar zu machen.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt aufgeschlüsselt über alle Etappen des VR-Tests sowie oben genannte Konstantfahrten und den ACEA „long-haul“ Zyklus (ErgebnisAusgabemaske siehe Bild 35 im Anhang).

Neben den Kraftstoffverbrauchswerten in l/100 km sind die Ergebnisse in absoluten wie relativen Zahlen auch in folgenden Messgrößen dargestellt:

- Gramm CO<sub>2</sub> je Kilometer [g(CO<sub>2</sub>)/km],
- gravimetrische Transporteffizienz: Liter Diesel je Tonne und 100 Kilometer [l/100 tkm],
- gravimetrische Transporteffizienz: Gramm CO<sub>2</sub> je Tonne und Kilometer [g(CO<sub>2</sub>)/tkm],

Berechnung des Gesamtrollwiderstands bei Nutzlast							
Einheit		Referenzzustand (REF)			Optimiert (OPT)		
Achse		VA	HA	Aufl.	VA	HA	Aufl.
f_R_iso	[kg/t]	5,11	5,21	5,35	5,11	5,21	5,35
Traglast F_N_max	[kg]	3.750	4.000	4.500	3.750	4.000	4.500
F_N_iso	[kg]	3.188	3.400	3.825	3.188	3.400	3.825
Achslastverteilung		16,7 %	29,0 %	54,4 %	16,7 %	29,0 %	54,4 %
Achslast	[t] je Achse	6,5	11,3	7,1	6,5	11,3	7,1
F_N	[kg] je Rad	3.255	2.833	3.543	3.255	2.833	3.543
f_R	[kg/t]	5,10	5,31	5,39	5,10	5,31	5,39
f_R_ges	[kg/t]	5,32			5,32		

Bild 32: Eingabemaske der Reifenparameter im CO<sub>2</sub>-Rechner

Eingabe der Fahrzeugparameter	Einheit	Standard	Referenzzustand (REF)	Optimiert (OPT)	delta	
					absolut	relativ
Stirnfläche	[m <sup>2</sup> ]	10,3	10,3	10,3	0	0 %
c <sub>w</sub> -Wert	[-]	0,58	0,58	0,56	-0,02	-3 %
Nutzvolumen	[m <sup>3</sup> ]	90	90	90	0	0 %
Masse Sattelzugmaschine	[t]	7,4	7,4	7,4	0	0 %
Masse Auflieger	[t]	6,2	6,2	6,2	0	0 %
Nutzlast (außerhalb VR-Test)	[t]	25,5	25,5	25,5	0	0 %
Gesamtmasse	[t]	39,1	39,1	39,1	0	0 %
Gesamtrollwiderstand (f_R_ges)	[kg/t]	5	5,32	5,32	-0,83	-16 %
Mittlere Nebenverbraucherleistung	[W]	3.500	3.500	3.500	0	0 %
Zielgeschwindigkeit Autobahn	[km/h]	85	85	85	0	0 %
Zielgeschwindigkeit Landstraße	[km/h]	60	60	60	0	0 %

Bild 33: Eingabemaske der Fahrzeugparameter im CO<sub>2</sub>-Rechner

- volumetrische Transporteffizienz: Liter Diesel je Kubikmeter und 100 Kilometer [l/100m<sup>3</sup>km],
- volumetrische Transporteffizienz: Gramm CO<sub>2</sub> je Kubikmeter und Kilometer [gCO<sub>2</sub>]/m<sup>3</sup>km].

## 6 Kosten-Nutzen-Analyse

Im Rahmen der Simulationsstudien konnten Kraftstoffeinsparungen im VR-Test berechnet werden. Die Maßnahmen werden nun unter Annahme von Initial- bzw. Mehrkosten einer Kosten-Nutzen-Analyse unterzogen.

Für schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr können relativ hohe Jahresfahrleistungen von rund

130.000 km angesetzt werden (siehe Kapitel 2.1.1). Dies begünstigt die Rentabilität von Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Diese Annahme gilt zunächst nur für die ziehenden Einheiten. Die Jahresfahrleistung von Aufliegern ist möglicherweise geringer bei Verhältnissen der Anzahlen von Sattelzugmaschine zu Auflieger kleiner Eins. Neue Sattelzugmaschinen sind in der Regel 3,5 Jahre im Einsatz, bevor sie in den zweiten Markt gehen. Auflieger sind hingegen 7...10 Jahre im ersten Einsatz, so dass vermeintlich geringere Jahresfahrleistungen über eine längere Einsatzdauer wiederum kompensiert werden könnten.

Die folgende Kosten-Nutzen-Betrachtung berechnet für die in der Simulationsstudie untersuchten Maßnahmen neben der Amortisationszeit daher

	Initialkosten bzw. Mehrkosten	Einsparung im VR-Test [l/100 km]	Jährliche Einsparung bei 130.000 km/Jahr			Amortisationszeit bei 135.000 km/Jahr	Amortisations- distanz „rentabel ab x Kilometer“
<b>SDR-Diffusor</b>	700 €	0,3	571 €	390 l Diesel	971 kg CO <sub>2</sub> *	1,2 Jahre	165.000 km
<b>Seitenverkleidung</b>	5.000 €	0,6	1.142 €	780 l Diesel	1.942 kg CO <sub>2</sub> *	4,4 Jahre	591.000 km
<b>Heckeinzugsklappen</b>	2.300 €	0,5	952 €	650 l Diesel	1.619 kg CO <sub>2</sub> *	2,4 Jahre	326.000 km
<b>Leichtbauaufleger</b>	3.000 €	0,6	1.142 €	780 l Diesel	1.942 kg CO <sub>2</sub> *	2,6 Jahre	335.000 km
<b>A- anstatt C-Label Auflegerreifen</b>	1.000 €	1,3	2.475 €	1.690 l Diesel	4.208 kg CO <sub>2</sub> *	0,4 Jahre (< Lebensdauer?)	55.000 km (< Lebensdauer?)

\* CO<sub>2</sub>-Emissionen Tank-to-Wheel, 2,49 kg CO<sub>2</sub> je Liter Dieseldieselkraftstoff nach Norm EN 16258 (DSLIV 2013)

Tab. 19: Kosten-Nutzen-Rechnung der in Verbrauchersimulationen untersuchten Maßnahmen

auch die Amortisationsdistanz, also jenen Kilometer, ab der die Kraftstoffeinsparungen die Initial- bzw. Mehrkosten übersteigen. Die Kosten-Nutzen-Betrachtung wird als statische Amortisationsrechnung durchgeführt. Den folgenden Rechnungen liegt ein mittlerer Kraftstoffpreis von 1,41 Euro je Liter Diesel zugrunde (KOCHHAN et al. 2014).

Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Betrachtung. Die kürzeste Amortisationszeit weisen mit etwa 0,4 Jahren die optimierten Aufliegerreifen auf. Der Kosten-Nutzen-Rechnung liegt die Annahme zugrunde, dass die optimierten Reifen über ihre Lebensdauer hinweg einen geringeren Rollwiderstandsbeiwert aufweisen. Die Amortisationsdistanz für den höheren Preis beträgt somit 55.000 km. Die Lebensdauer ist besonders bei Aufliegerreifen stark von der Position des Reifens sowie von der Streckencharakteristik (Kurven, Rangieren) abhängig. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer vor dem ersten Nachschneiden des Profils in der Regel 55.000 km übersteigt. Damit kann die Maßnahme als rentabel betrachtet werden.

Die zweitkürzeste Amortisationszeit weist der SDR-Diffusor auf. Dieser bildet zwar die Maßnahme mit dem geringsten Einsparpotenzial. Jedoch sind die Initialkosten mit rund 700 € äußerst gering. Der SDR-Diffusor kommt auf eine Amortisationsdistanz von rund 165.000 km bzw. 1,2 Jahre.

Die Mehrkosten des Leichtbauauflegers wurden mit ca. 3.000 € veranschlagt. Dieser Berechnung liegt wiederum die Annahme zugrunde, dass geringere Eigenmassen des Fahrzeugs nicht durch höhere Nutzlasten kompensiert werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Sattelzug volumetrisch ausgelastet ist. Unter dieser Annahme kommt der Leichtbauaufleger auf eine Amortisationszeit von 2,6 Jahren bzw. eine Amortisationsdistanz von

335.000 km. Bei Lebensdauern von 7..10 Jahren kann diese Maßnahme unter den getroffenen Annahmen ebenfalls als rentabel betrachtet werden.

Die Heckeinzugsklappen weisen eine Amortisationszeit von 2,4 Jahren auf und bilden bei Kosten von 2.300 € somit auch eine rentable Maßnahme. Bei Seitenverkleidungen hebt der hohe Initialpreis die Amortisationszeit auf 4,4 Jahre. Damit bildet die Maßnahme eine längerfristige Investition unter dem Vorbehalt, dass während der Lebensdauer keine Beschädigungen auftreten.

Alle hier untersuchten Maßnahmen können somit für sich betrachtet generell als rentabel angesehen werden. Bei der Kombination von Maßnahmen ist jedoch zu beachten, dass sich diese möglicherweise beeinflussen bzw. sogar gegenseitig aufheben können.

Das Streckenprofil des für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu Grunde gelegten VR-Tests steht, wie bereits erwähnt, repräsentativ für die Einsatzprofile eines Großteils der Flottenbetreiber in Deutschland. Im Rahmen der künftigen CO<sub>2</sub>-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen werden voraussichtlich hiervon abweichende Fahrzyklen definiert werden, die wiederum einen Einfluss auf die Bewertung von Reduktionspotenzialen haben können. Kundenspezifische Fahrzyklen würden einsetzindividuelle Bewertungen von Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und somit präzisere Kosten-Nutzen-Rechnungen ermöglichen (SÜßMANN et al. 2013). Die Möglichkeit, Kraftstoff- und Kosteneinsparungen vor dem Kauf einer Maßnahme vorherzusagen, wird als wesentlicher Anreiz zur Investition in höhere Kraftstoffeffizienz angesehen (GOODYEAR 2012, S. 12).

Neben dem rein monetären Nutzen muss jedoch auch der Nutzen für die Allgemeinheit – durch die



Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen – betrachtet werden. Unter den genannten Voraussetzungen ergeben sich für die einzelnen Maßnahmen jährliche Einsparungen entsprechend Tabelle 19 (Mitte).

## 7 Maßnahmenpaket im Praxistest

### 7.1 Beschreibung des Testverfahren

Im Rahmen der Simulationsstudie in Kapitel 5 wurde das Einsparpotenzial von Heckenzugklappen kombiniert mit einer Seitenverkleidung im ersten Teil des virtuellen VR-Tests und gesamt mit 1,1 l/100 km bzw. 3,2 % beziffert (Tabelle 18, Gesamt: erster Teil, Seitenverkleidung und Heckenzugklappen). Dieses Maßnahmenpaket wurde einem realen VR-Test unterzogen. Im Folgenden sei daher das Testverfahren näher beschrieben und anschließend die Durchführung sowie die erzielten Ergebnisse diskutiert.

Der VR-Test besteht aus den im Kapitel 2.1.1 beschriebenen Etappen (Bild 2, Tabelle 3) und kann in einen ersten und einen zweiten Teil untergliedert werden, wobei der erste Teil mit Vollbeladung und der zweite Teil jeweils einmal mit Teilbeladung und als Leerfahrt absolviert werden. Um Umwelteinflüssen in Kompensationsrechnungen zu begegnen, werden die zu testenden Fahrzeuge stets von einem weiteren Sattelzug mit gleicher Beladung begleitet. Dieses Fahrzeug dient als Referenzfahrzeug. Das Referenzfahrzeug absolviert alle Begleitfahrten unverändert und in gleichbleibender Fahrweise. Die gleichbleibende Fahrweise wird durch einen durchgängigen Einsatz des Tempomats erreicht. Ein abstandsgeregelter Tempomat kommt nicht zum Einsatz. Des Weiteren wird das Referenzfahrzeug stets vom gleichen Fahrer bedient, der auf definierte Ausroll-, Abbrems- und Beschleunigungspunkte geschult ist. Reproduzierbare Beschleunigungsvorgänge, beispielweise an Autobahnauffahrten, werden durch den Einsatz des Tempomats auch in diesen Phasen sichergestellt. Im Rahmen dieser Studie wurde auch das zu testende Fahrzeug, der Prototyp, bei allen Fahrten in der gleichen Fahrweise bedient.

Der Kraftstoffverbrauch wird bei beiden Fahrzeugen über ein Durchflussmessgerät gemessen. Die Durchflussmessgeräte sind mit einer Genauigkeit von über 99 % spezifiziert (A. I.C. SYSTEMS 2013).

Die Kraftstoffverbräuche werden über den gesamten Test an definierten Messpunkten, beispielsweise Kilometersteinen, in der Regel alle 5 km, zusammen mit der Zeit protokolliert, um Unregelmäßigkeiten im Testverlauf transparent zu machen. Störungen im Testverlauf werden protokolliert. Kleinste Störungen, beispielsweise ein kurzes Bremsmanöver aufgrund eines auf die Autobahn einfahrenden Fahrzeugs, zeigen sich auch in unterschiedlichen Zeiten zwischen zwei Messpunkten. Weicht der Kraftstoffverbrauch bei einer derartigen Störung zwischen zwei Messpunkten ab, erfolgt im Einzelfall eine Korrektur auf Basis von empirischen Werten. Größere Unregelmäßigkeiten, wie längere Staus oder stockender Verkehr, entziehen sich jedoch dieser Form von Korrekturrechnung.

### 7.2 Durchführung und Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurde die Ausgangskonfiguration des Prototyps dem ersten Teil des VR-Tests unterzogen. Die Fahrt wurde als Basismessung definiert, auf die sich darauffolgende VR-Tests beziehen. Entsprechend wurde die Begleitfahrt durch das Referenzfahrzeugs als Basismessung definiert.

Der Kraftstoffverbrauch des zu testenden Fahrzeugs wird in allen weiteren Messungen über den Kraftstoffverbrauch des Referenzfahrzeugs skaliert, um Umwelteinflüsse zu kompensieren. Ein höherer oder niedrigerer Durchschnittsverbrauch des unveränderten Referenzfahrzeugs wird anteilig dem zu testenden Fahrzeug aufgeschlagen. Verbraucht das Referenzfahrzeug auf einer Etappe beispielsweise 1 % mehr als bei der Basismessung, wird der Kraftstoffverbrauch des zu testenden Fahrzeugs auf dieser Etappe um 1 % reduziert.

In einer zweiten Messung wurde der Prototyp in einer Vergleichsmessung unverändert abermals dem ersten Teil des VR-Tests unterzogen, um eine Aussage über die Wiederholbarkeit des VR-Tests treffen zu können. Mit der oben beschriebenen Korrektur über das Referenzfahrzeug gilt:

$$\delta = 1 - \frac{V_{Basis} * V_{REF,Vergleich}}{V_{Vergleich} * V_{REF,Basis}}$$

wobei

$V_{Basis}$  Kraftstoffverbrauch des Prototyps bei der Basismessung [l/100 km]



$V_{Vergleich}$	Kraftstoffverbrauch des Prototyps bei der Vergleichsmessung [l/100 km]
$V_{REF,Basis}$	Kraftstoffverbrauch des Referenzfahrzeugs bei der Basismessung [l/100 km]
$V_{REF,Vergleich}$	Kraftstoffverbrauch des Referenzfahrzeugs bei der Vergleichsmessung [l/100 km]
$\delta$	Messabweichung

Die Messabweichung  $\delta$  betrug über den Kraftstoffverbrauch im ersten Teil des VR-Tests 0,2 l/100 km bzw. 0,6 %, wobei der niedrigere Kraftstoffverbrauch bei der Basismessung ermittelt wurde. Bei etappenweiser Auswertung betrug die maximal auftretende Messabweichung 2,9 %. Bei etappenweiser Auswertung wirken sich jedoch bereits kleinste Messungenauigkeiten aufgrund der geringen Distanzen wesentlich stärker aus. Die Messabweichung des gesamten Tests wird jedoch über die Distanz aller Etappen verringert. Die Sensitivität des Tests kann somit als ausreichend erachtet werden, um vorausberechnete Verbrauchseinsparungen von 1,1 l/100 km bzw. 3,2 % transparent zu machen.

Im dritten Schritt wurde der Prototyp mit der aerodynamischen Optimierung ausgestattet (Seitenverkleidungen und Heckenzugklappen) und auch dem ersten Teil des VR-Tests unterzogen. Die Verbrauchseinsparung wird definiert mit:

$$\Delta V = V_{Basis} - V_{opt} \frac{V_{REF,Basis}}{V_{REF,opt}}$$

In Tabelle 20 sind die Verbrauchswerte des Prototyps in Ausgangskonfiguration (Basismessung) sowie mit aerodynamischer Optimierung aufgeschlüsselt nach den einzelnen Etappen und insgesamt dargestellt. Der Prototyp erzielte in Ausgangskonfiguration einen Durchschnittsverbrauch von 31,3 l/100 km. Mit aerodynamischer Optimierung erzielte der Prototyp einen Durchschnittsverbrauch von 29,8 l/100 km. Im Vergleich zur Basismessung erreicht er damit eine Verbrauchseinsparung von 1,5 l/100 km bzw. 4,8 %. Damit liegt die gemessene Verbrauchseinsparung über der im Rahmen der Verbrauchssimulation prognostizierten von 1,1 l/100 km.

Bei allen Messungen herrschten entlang der Route Windverhältnisse von 5...15 km/h, welche zu Schräganströmung der Fahrzeuge führen. Der im

	Ausgangskonfiguration		Optimiert	
	Simulation	Real	Simulation	Real
	[l/100 km]	[l/100 km]	[l/100 km]	[l/100 km]
Etappe 1 Autobahn medium	32,6	30,5	31,6	29,0
Etappe 2 Autobahn hügelig	36,0	34,7	34,9	33,0
Etappe 3 Autobahn Rolletappe	32,8	31,3	31,6	29,8
Etappe 4 Landstraße	31,1	30,3	30,5	29,0
Etappe 5 Autobahn leicht	31,9	28,2	30,6	27,1
<b>Gesamt: erster Teil</b>	<b>33,1</b>	<b>31,3</b>	<b>32,0</b>	<b>29,8</b>

Tab. 20: Simulierte und gemessene durchschnittliche Kraftstoffverbräuche des Prototyps in Ausgangskonfiguration sowie optimiert – aufgeschlüsselt über Etappen

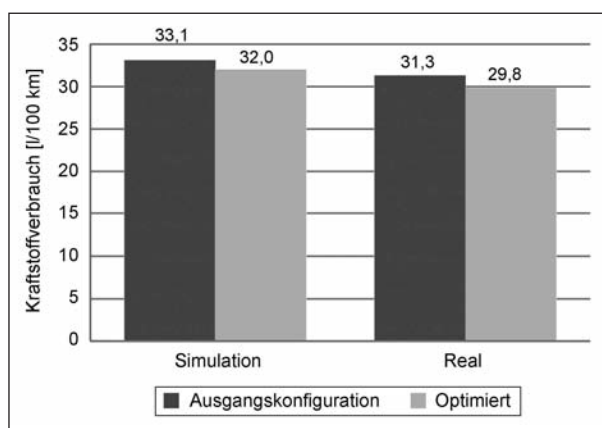


Bild 34 : Simulierte und gemessene durchschnittliche Kraftstoffverbräuche des Prototyps in Ausgangskonfiguration sowie optimiert

Rahmen der Fahrwiderstandsmessungen ermittelte Luftwiderstandsbeiwert bezieht sich auf eine annähernd frontale Anströmung. Die höher ausfallende Verbrauchsreduktion von 1,5 l/100 km könnte daher neben etwaigen Messungenauigkeiten auch im höheren Einsparpotenzial der Seitenverkleidung bei Schräganströmung zu begründen sein.

## 8 Handlungsempfehlungen

Aus den im Rahmen dieser Studie gewonnenen Erkenntnissen lassen sich mit Blick auf die Weiterentwicklung von Vorschriften, Bildung von Anreizsystemen und die Identifizierung weiteren Forschungsbedarfs die folgenden Empfehlungen ableiten.

## Aerodynamik

- Im Bereich der Aerodynamik wurden vor allem ungenutzte Potenziale an Aufliegern von Sattelzügen identifiziert. Diese könnten über nachrüstbare aerodynamische Anbauteile größtenteils relativ kurzfristig ohne Fahrzeugneuschaffungen umgesetzt werden.
- Die Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 sieht zusätzliche Längen und Breiten für aerodynamische Anbauten nur in ausgeklappten Zustand vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass nachrüstbare Heckeinzugsklappen außen an Heckportale montiert werden und daher selbst in eingeklappten Zustand beispielsweise ca. 50 mm zusätzliche Länge in Anspruch nehmen. Um Nachrüstlösungen nicht zu benachteiligen, sollten auch zusätzliche Längen in eingeklappten Zustand zur Verfügung stehen.
- Die Frage, ob durch Heckeinzugsklappen, welche länger als 500 mm sind, noch höhere Einsparpotenziale ermöglicht würden, bleibt offen. Weitere Studien hierzu sind zu empfehlen.

## Hybride Antriebe

- Bei Stadtbussen und Verteiler-Lkw ermöglichen hybride Antriebsstränge die größten CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale. Diese scheinen derzeit jedoch nur bei Stadtbussen wirtschaftlich darstellbar zu sein. Anreizsysteme könnten eine weitere Verbreitung der Technologie unterstützen.
- Höhere Leermassen bzw. reduzierte maximale Nutzlasten durch hybride Antriebsstränge schmälern bei Verteiler-Lkw und Sattelzügen die Marktakzeptanz. Eine erhöhte zulässige Gesamtmasse von Fahrzeugen mit hybridem Antriebsstrang könnte diesem Nachteil möglicherweise entgegenwirken. Dies wird zurzeit auf europäischer Ebene diskutiert.

## Rollwiderstand

- Bei Sattelzügen mit hohen Gesamtmassen bilden rollwiderstandsoptimierte Reifen einen starken Stellhebel zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Das Reduktionspotenzial in den anderen Fahrzeugkategorien konnte nicht genau quantifiziert werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich auch bei geringeren Massen relevante Einsparpotenziale umsetzen lassen. Weitere Studien in diesem Bereich wären wünschenswert.

- Reifen werden bei der Zertifizierung nach Verordnung (EU) Nr. 1222/2009 nur zu Beginn ihrer Lebensdauer hinsichtlich ihres Rollwiderstandsbeiwertes getestet. Hier stellt sich die Frage, ob möglicherweise weitere Prüfungen, beispielsweise bezüglich der Laufzeit der Reifen, empfehlenswert sind.

## Nebenverbraucher

- Energiebetrachtungen weisen vor allem bei Stadtbussen hohe Anteile von 26 % bis 43 % der Nebenverbraucher am Gesamtkraftstoffverbrauch aus. Im Rahmen der Literaturrecherche konnte jedoch nicht ermittelt werden, durch welche konkreten Maßnahmen auf Komponentenebene mögliche Einsparpotenziale gehoben werden könnten. Weitere Studien auf diesem Gebiet wären daher zu begrüßen.

## Allgemein

- Um ungenutzte Optimierungspotenziale an Aufliegern aufzuzeigen und weiter zu fördern, wird ausdrücklich empfohlen, auch Auflieger in eine künftige CO<sub>2</sub>-Zertifizierung mit einzubeziehen.

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurde untersucht, welche technischen Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen derzeit bestehen und wie diese unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzszenarien zu quantifizieren und zu bewerten sind.

Ausgehend von den Fahrzeugkategorien Sattelzug, Verteiler-Lkw, Stadt- und Reisebus wurde zu Beginn der Studie eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei erschwerten fehlende Standards zur Messung und Bezifferung des Kraftstoffverbrauchs die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Literaturangaben. Durch Energiebetrachtungen konnten jedoch zunächst grundsätzliche Einsparpotenziale zur CO<sub>2</sub>-Reduktion je Fahrzeugkategorie ermittelt werden. Dabei zeigten sich beispielsweise weitestgehend ungenutzte Einsparmöglichkeiten durch Fahrwiderstandsoptimierung von Sattelzügen, durch Rekuperation von Bremsenergie bei Stadtbussen und Verteiler-Lkw, oder auch durch bedarfsgerechte Ansteuerung von Nebenverbrauchern bei Stadt- und Reisebussen. Die-

sen grundsätzlichen Einsparmöglichkeiten wurden anschließend exemplarisch Einzelmaßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zugeordnet und deren Potenziale ermittelt.

Aufgrund der hohen Fahrleistungen verursachen Sattelzüge absolut betrachtet den größten Anteil an den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßengüterverkehr. Daher stand diese Fahrzeugkategorie im Fokus der weiteren Untersuchungen. Hierfür wurden zunächst Fahrwiderstandsmessungen anhand eines Euro V EEV Sattelzugprototyps durchgeführt, um den Einfluss verschiedener aerodynamischer Anbauteile auf den Luftwiderstandsbeiwert quantifizieren zu können. Die aerodynamischen Veränderungen beschränkten sich dabei auf den Auflieger, da Ergebnisse aus der Literaturrecherche darauf hindeuteten, dass hier möglicherweise ein größeres Potenzial auszuschöpfen ist als bei der Zugmaschine. Alle untersuchten Maßnahmen reduzierten den Luftwiderstand. Die Kombination aus einer Seitenverkleidung und Heckeinzugsklappen der Länge 500 mm zeigte hierbei mit einer Reduktion des Luftwiderstands um 14 % das größte Einsparpotenzial. Bei der Kombination von einem Heckdiffusor und einer Seitenverkleidung zeigte sich hingegen eine gegenseitige aerodynamische Beeinflussung, so dass das Einsparpotenzial der Kombination jenes der Seitenverkleidung alleine nicht überstieg.

Die Reduktionen des Luftwiderstandes durch aerodynamische Maßnahmen an Sattelzügen wurden anschließend durch Verbrauchssimulationen in Kraftstoff- bzw. CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale umgerechnet. Als repräsentativer Fahrzyklus diente hierbei die virtuelle Umsetzung des VR-Tests (Verkehrsrundschau-Tests), eines etablierten Testverfahrens für Sattelzüge im Fernverkehr (Vollbeladung 358 km, Teilbeladung 65 km, Leerfahrt 65 km, jeweils Autobahn- und Landstraßenanteile).

Die Verbrauchseinsparung des in den Fahrwiderstandsmessungen untersuchten Maßnahmenpakets aus Seitenverkleidung und Heckeinzugsklappen betrug im VR-Test bei Vollbeladung sowie gesamt 1,1 l/100 km. In der Simulationsstudie wurde ferner die Abhängigkeit des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials von Rollwiderstand, Masse und Fahrzykluscharakteristika, wie Geschwindigkeit und Topografie, transparent dargestellt. Aerodynamische Anbauteile und rollwiderstandsoptimierte Reifen erwiesen sich hierbei generell als geeignete Möglichkeiten, den Kraftstoffverbrauch von Sattelzügen zu senken. Positiv anzumerken ist in diesem

Zusammenhang, dass diese Maßnahmen auch kurzfristig durch Nachrüstung bei bestehenden Fahrzeugen umgesetzt werden können.

Eine anschließende Kosten-Nutzen-Analyse bewertete ausgewählte Maßnahmen vor dem Hintergrund der durch die Verbrauchssimulation ermittelten Einsparpotenziale im virtuellen VR-Test. Alle untersuchten Einzelmaßnahmen können als rentabel betrachtet werden.

Abschließend wurde der Sattelzugprototyp realen Verbrauchsmessungen unterzogen. Als Praxistest diente dabei der erste Teil des bereits im Rahmen der Verbrauchssimulation virtuell hinterlegten VR-Tests. Die Teststrecke wurde zunächst in Standardkonfiguration abgefahren. Anschließend wurde der Sattelzug mit dem Aerodynamikpaket aus Seitenverkleidung und Heckeinzugsklappen versehen, welches bei den Fahrwiderstandsmessungen bereits zum Einsatz gekommen war. Die aerodynamischen Verbesserungen führten auf der VR-Teststrecke mit Vollbeladung zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 1,5 l/100 km. Die gemessene Kraftstoffeinsparung lag damit oberhalb der zuvor im Rahmen der Verbrauchssimulation prognostizierten.

## 10 Literatur

- A. I. C. Systems: AIC 6004 Swisline Uniflowmaster series (700HP) | AIC Systems. 2013. Abrufbar unter: <http://www.flowmeter-aic.com/2/products/aic-6004-swisline-uniflowmaster-series-700hp/> (letzter Abruf: 27.11.2013)
- Advanced Transit Dynamics, Inc.: ATDynamics – Fuel Efficiency Aerodynamic Technology for Tractor Trailers saving over 10% with TrailerTail and Side Skirts. 2012. Abrufbar unter: <http://www.atdynamics.com/> (letzter Abruf: 07.11.2012)
- BAST Bundesanstalt für Straßenwesen: Fahrleistungserhebung 2002. Inländerfahrleistung. Bergisch Gladbach, 2002. Abrufbar unter: [http://www.BAST.de/nn\\_42640/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2006-2004/v120.html](http://www.BAST.de/nn_42640/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2006-2004/v120.html)
- BAST Bundesanstalt für Straßenwesen: Fahrleistungserhebung 2014 (Informationsseite). 2014. Abrufbar unter: <http://www.BAST.de/DE/FB-U/Fachthemen/u2-fahrleistung-2014/u2-fahrleistung-2014.html>

- BAUMBERGER, E.: Erfolgsfaktoren für die Produktpositionierung im harten Wettbewerbsumfeld. Trends in der Nutzfahrzeugindustrie 2012. München, 2012
- BERNATH, M.; SWOBODA, J.; KARL, C.; STERZENBACH, M. u. WACHTMEISTER, G.: Energetische Analyse im schweren Nutzfahrzeug im Hinblick auf thermische Rekuperationsmaßnahmen. In: STEINBERG, P., Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VIII: Energiemanagement; mit 45 Tabellen. Fachbuch/Haus der Technik. 125. (expert-Verl) Renningen, 2012
- BGL Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung e. V.: Zusatzinformationen zum Kostenentwicklungsrechner des BGL. 2013. Abrufbar unter: [http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten\\_kalkulator\\_infos.htm](http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten_kalkulator_infos.htm)
- BIERMANN, J.-W. u. HARTMANN, B.: Linienbusse mit Hybridantrieb. 2009. Abrufbar unter: [http://www.autocluster.nrw.de/fileadmin/images/PDF/Innovationsforum\\_Vortrag\\_IKA.pdf](http://www.autocluster.nrw.de/fileadmin/images/PDF/Innovationsforum_Vortrag_IKA.pdf)
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Begleitendes Prüfprogramm im Rahmen der „Effizienz- und Kostenanalyse für den Linienbetrieb von Hybridbussen“, 2012. Abrufbar unter: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/hybridbusse/abschlussbericht-begleitprogramm-public.pdf>
- BODE, M.; BODE, O.; GLAESER, K.-P.; NEUBAUER, J. u. PFLUG, H.-C.: Der Reifenrollwiderstand von Nutzfahrzeugen. Wie korrelieren die Werte bei unterschiedlichen Messverfahren? VDI Wissensforum – Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, 2011
- BOOT, M. A. u. CONSANO, L.: Benefits of a parallel hybrid electric architecture on medium commercial vehicles. VDI Wissensforum – Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Neu-Ulm, 2009
- COLOMBANO, M. u. CONSANO, L.: Optimiertes Transportkonzept für Sattelzüge. In: Automobiltechnische Zeitschrift, Heft 2, 2008
- Daimler AG: Mercedes-Benz Aerodynamics Truck & Trailer. Kraftstoff sparen, Umwelt schonen Fahrzeugstudien. 2012. Abrufbar unter: <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-657321-49-1535377-1-0-0-0-0-0-11694-614240-0-1-0-0-0-0-0.html>
- DELORME, A.; KARBOWSKA, D. u. SHARER, P.: Evaluation of Fuel Consumption Potenzial of Medium and Heavy Duty Vehicles through Modeling and Simulation. Report to National Academy of Sciences. 2009. Abrufbar unter: <http://www.autonomie.net/docs/6%20-%20Papers/DOE-5897%20TO%2023%20CPARS%20assess%2010-01-09.pdf>
- DENIMAL, P.; SCHALLER, K. V.; SASSE, U.; TIETZE, R. u. SÜßMANN, A.: Konzept zur erhöhten Transporteffizienz für 40-Tonner. In: Automobiltechnische Zeitschrift H. 12. 2012
- DEVESA, A. u. INDINGER, T.: Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen. FAT-Schriftenreihe. 2011. Abrufbar unter: [http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen\\_downloads/detail.php?id=1053](http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen_downloads/detail.php?id=1053) (letzter Abruf: 07.08.2012)
- DOLD, R.: Abgasenergieerückgewinnung für schwere Fernverkehrsfahrzeuge. VDI Wissensforum – Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Celle, 2013
- DREYER, W.: Stochastischer Fahrzyklus für Stadt-Linienomnibusse. Sonderforschungsbereich 97, Fahrzeuge und Antrieb. Braunschweig, 1975
- DSLVL Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V.: Leitfaden Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. 2013. Abrufbar unter: [http://www.verkehrsrundschau.de/sixcms/media.php/4513/DSLVL-Leitfaden\\_Berechnung\\_von\\_THG-Emissionen\\_Stand\\_03-2013.pdf](http://www.verkehrsrundschau.de/sixcms/media.php/4513/DSLVL-Leitfaden_Berechnung_von_THG-Emissionen_Stand_03-2013.pdf)
- DURELLI, E.: Iveco Transport Concept. Fuel Efficiency Policies for HDVs. 2007 (letzter Abruf: 01.03.2011)
- EGGER, C.: Zertifizierung eines Verfahrens zur Ermittlung der relativen Kraftstoffeinsparung der IVECO Magirus AG Ulm. Stuttgart. 2010. Abrufbar unter: [http://web.iveco.com/germany/Neufahrzeuge/Documents/stralis/ecostralis/Tuev\\_Verfahrensbeschreibung.pdf](http://web.iveco.com/germany/Neufahrzeuge/Documents/stralis/ecostralis/Tuev_Verfahrensbeschreibung.pdf)
- EPA Environmental Protection Agency: Greenhouse Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles. EPA-HQ-OAR-



- 2010-0162. Federal Register. Washington D.C., United States of America. 2011. Abrufbar unter: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2011-09-15/pdf/2011-20740.pdf> (letzter Abruf: 19.06.2012)
- European Commission: Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles. LOT 1: Strategy. 2011. Abrufbar unter: [http://ec.europa.eu/clima/studies/transport/vehicles/docs/ec\\_hdv\\_ghg\\_strategy\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/studies/transport/vehicles/docs/ec_hdv_ghg_strategy_en.pdf)
- European Commission: Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles. LOT 2: Development and testing of a certification procedure for CO<sub>2</sub> emissions and fuel consumptions of HDV. 2012. Abrufbar unter: [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/docs/hdv\\_2011\\_01\\_09\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_2011_01_09_en.pdf)
- FISCHER, R. u. BLANKE, R.: Die aerodynamische Konzeption eines Reisebusses am Beispiel der neuen Stra ComfortClass 500. VDI Wissensforum – Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Celle, 2013
- FRANK, T.: Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen. Stand des Wissens. FAT-Schriftenreihe. 2012. Abrufbar unter: [http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen\\_downloads/detail.php?id=1077&PHPSESSID=t8sngcgrini7ofcg4kmeg6l4k2](http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen_downloads/detail.php?id=1077&PHPSESSID=t8sngcgrini7ofcg4kmeg6l4k2) (letzter Abruf: 14.06.2012)
- GLAESER, K.-P.; KASCHNER, R.; LERNER M.; RODER, K.; WOLF, A. u. ZANDER, U.: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesstraßennetzes. Schlussbericht, Langfassung. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. 2006. Abrufbar unter: [http://www.BASt.de/nn\\_42642/DE/Publikationen/Download-Berichte/unterseiten/60-tonner.html](http://www.BASt.de/nn_42642/DE/Publikationen/Download-Berichte/unterseiten/60-tonner.html)
- Goodyear Dunlop Tires Europe B. V.: Die Kraftstoffeffizienz von Nutzfahrzeugen optimieren. Auf dem Weg ins Jahr 2020. 2012. Abrufbar unter: <http://fleet-fuel-efficiency.eu/download/MjMw>
- GRAAF, R.: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Schriftenreihe Automobiltechnik 60. (Ika) Aachen, 2002
- GROßART, F.: Aerodynamisch optimierte Lastzüge im Flottentest. LastautoOmnibus Zukunftskongress, 2011
- GRÜNIG, G.: Wie viel spart ATE? In: Verkehrs-Rundschau H. 38. S. 56-61, 2012
- HAUPT, C.: Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge. Ausgewählte Kapitel der Fahrzeugentwicklung aus Sicht der Industrie – Vorlesung an der TU München. Garching bei München, 2012
- HAUSBERGER, S.; REXEIS, M.; BLASSNEGGER, J. u. SILBERHOLZ, G.: Evaluation of fuel efficiency improvements in the HDV sector from improved trailer and tire designs. 2012. Abrufbar unter: <http://www.theicct.org/evaluation-fuel-efficiency-improvements-hdv-sector-improved-trailer-and-tire-designs>
- HELMS, H. u. LAMBRECHT, U.: The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption. International Journal of Life Cycle Assessment Special Issue Vol. 12. Zürich, 2007
- HOEPKE, E.; BREUER, S. u. APPEL, W.: Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. (Vieweg + Teubner), Wiesbaden, 2010
- HOFMANN, P.: Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. (Springer Wien), Wien, 2009
- HOLLOH, K.-D.: Daimler-Technologien für einen energieeffizienten Straßenverkehr. N.N. 2008
- KAISER, C.; BAUMGART, R.; AURICH, J.; TEGETHOFF, W. u. KÖHLER, J.: Konzepte für die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von Omnibusklimanlagen. VDI Wissensforum – Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Celle, 2013
- KNECHT, S.: MAN Truck & Bus AG – Mit Antrieb der Umwelt zuliebe. N. N. 2009. Abrufbar unter: <http://www.straubing-sand.de/fileserver/straubingsand/files/30.pdf> (letzter Abruf: 07.08.2012)
- KOCHHAN, R.; FUCHS, S.; REUTER, B.; BURDA, P.; MATZ, S. u. LIENKAMP, M.: An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions. Research Gate. 2014. Abrufbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/260339436\\_An\\_Overview\\_of\\_Costs\\_for\\_Vehicle\\_Components\\_Fuels\\_and\\_Greenhouse\\_Gas\\_Emissions?ev=prf\\_pub](https://www.researchgate.net/publication/260339436_An_Overview_of_Costs_for_Vehicle_Components_Fuels_and_Greenhouse_Gas_Emissions?ev=prf_pub)
- KOPP, S.; SCHÖNHERR, S. u. KOOS, H.: Design und Aerodynamik bei Nutzfahrzeugen. In: Automobiltechnische Zeitschrift 2009



- LANGE, B.; BODE, M.; BODE, O.; GLAESER, K.-P. u. PFLUG, H.-C.: Rollwiderstand von Lkw-Reifen auf echten Fahrbahnen. Bandbreite der Beiwerte bei unterschiedlichen Randbedingungen. VDI Wissensforum – Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, 2013
- LUNANOVA, M.: Optimierung von Nebenaggregaten. Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emission von Kraftfahrzeugen. Vieweg + Teubner research. (Vieweg + Teubner), Wiesbaden, 2009
- MAN Nutzfahrzeuge Gruppe: Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik. Basiswissen Lkw und Bus. (Kirschbaum), Bonn, 2008
- MathWorks: MATLAB Simulink. Simulation and Model-Based Design. (MathWorks), 2014. Abrufbar unter: <http://www.mathworks.de/products/simulink/>
- McCALLEN, R.; BROWAND, F. u. ROSS, J. C.: The aerodynamics of heavy vehicles. Trucks, buses, and trains. Lecture notes in applied and computational mechanics 19. (Springer), Berlin, New York, 2004
- Michelin Manufacture Française des Pneumatiques Michelin: Energy Bereifung. Die Strategie für Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit im Transportwesen, 2008
- Michelin Manufacture Française des Pneumatiques Michelin: Revolution during tire life. intern, 2013
- MIRA The Motor Industry Research Association: Truck aerodynamic styling. Good practice guide. 2001. Abrufbar unter: [http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200602/20060210\\_121817\\_04842\\_GPG308.pdf](http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200602/20060210_121817_04842_GPG308.pdf) (letzter Abruf: 07.09.2012)
- NORDHOFF, F. u. BARLAGE, D.: Entwicklungen zum energieeffizienten Gütertransport mit Straßenfahrzeugen. Fachvortrag an der Fachhochschule Osnabrück, 2011
- REXEIS, M.; HAUSBERGER, S.; IDDO, R. u. TARTAKOVSKY, L.: Heavy Duty Vehicle Emissions. ARTEMIS WP400. 2005. Abrufbar unter: [http://www.inrets.fr/ur/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/road3/modelling33/Artemis\\_del4\\_HDV.pdf](http://www.inrets.fr/ur/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/road3/modelling33/Artemis_del4_HDV.pdf)
- Ricardo: Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles. Prepared for Department for Transport. 2010. Abrufbar unter: <http://www.dft.gov.uk/pgr/freight/lowcarbontechnologies/>
- SCHÜTZ, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetech- nik, Fahrdynamik, Komfort. ISBN 978-3-8348-2316-8. (Springer Fachmedien Wiesbaden), Wiesbaden, 2013
- SDR Systems Drag Reduction S.L.: Systems Drag Reduction, S.L. | Aerodynamic device for fuel saving. 2012. Abrufbar unter: <http://en.sdr-sys.com/> (letzter Abruf: 09.09.2012)
- Shell Shell-Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Berlin. 2010. Abrufbar unter: [http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal\\_news/newsarchiv/2010\\_3/Shell\\_Lkw\\_Studie\\_FIN\\_17042010.pdf](http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv/2010_3/Shell_Lkw_Studie_FIN_17042010.pdf)
- STADLER, S.; HIRSCHBERG, W. u. HIRZ, M.: Potenzial der Aerodynamik zur Steigerung der Transporteffizienz von schweren Nutzfahrzeu- gen. Grazer Nutzfahrzeug Workshop. Graz, 2012
- SÜßMANN, A.; SCHABERT, A. u. LIENKAMP, M.: Analyse von kundenspezifischen Verbrauchseinsparpotenzialen durch Aerodynamik-, Rollwiderstands- und Leichtbaumaßnahmen. VDI Wissensforum – Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge. Celle, 2013
- TU Braunschweig, I. F. M. M. U. N.: Homepage der TU Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge. 2012. Abrufbar unter: <https://www.tu-braunschweig.de/imn/institut/mitarbeiter/dopichay> (letzter Abruf: 07.11.2012)
- UITP Internationaler Verband für öffentliches Ver- kehrswesen: UITP Project SORT. Standardised On-Road Test Cycles, 2010
- van RAEMDONCK, G.: Fuel economy testing with aerodynamic add-ons for trailers. 2012. Abrufbar unter: [http://circa.europa.eu/Public/irc/enterprise/automotive/library?l=/mvwg\\_vehicles\\_working/119th\\_february\\_2012/overview\\_partpdf/\\_EN\\_1.0\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/enterprise/automotive/library?l=/mvwg_vehicles_working/119th_february_2012/overview_partpdf/_EN_1.0_&a=d) (letzter Abruf: 23.04.2012)
- VDA Verband der Automobilindustrie: Das Nutzfahrzeug. umweltfreundlich und effizient. 2008. Abrufbar unter: [http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen\\_downloads/detail.php?id=492](http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen_downloads/detail.php?id=492)

- VINCKEN, D.: Der Reifen. Rollwiderstand und Kraftstoffersparnis; wie Reifen Kraftstoffverbrauch und Emissionen senken können. (Société de Technologie Michelin) Clermont-Ferrand. 2005
- WEINBERGER, F.: Energieeffizienz- und Kraftstoffstrategien in der Nutzfahrzeugentwicklung. 2012. Abrufbar unter: [http://portal.wko.at/wk/dok\\_detail\\_file.wk?AngID=1&DocID=1006500&DstId=3943&StID=463281&SSTId=0](http://portal.wko.at/wk/dok_detail_file.wk?AngID=1&DocID=1006500&DstId=3943&StID=463281&SSTId=0)
- WELFERS, T.; WOHLECKER, R. u. ECKSTEIN, L.: Design of a Tractor for Optimised Safety and Fuel Consumption. Aachen. 2011. Abrufbar unter: [http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2012%2002%20FKA%20Smart%20Cab%20study\\_web.pdf](http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2012%2002%20FKA%20Smart%20Cab%20study_web.pdf)
- WITTENBRINK, P.: Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen – Optimierungspotenziale – Green Logistic. (Gabler), Wiesbaden, 2011
- ZF Friedrichshafen AG: AS Tronic (Truck). Antriebstechnik für den schweren Lkw. 2013. Abrufbar unter: <http://www.zf.com>



# 11 Anhang

	Kraftstoffverbrauch & CO2-Emission										Transporteffizienz										
	[l/100km]					[gCO2e/km]					[l/100km]					[gCO2e/km]					
	REF	OPT	delta	REF	OPT	delta	REF	OPT	delta	REF	OPT	delta	REF	OPT	delta	REF	OPT	delta	REF	OPT	delta
			relativ			abs.			relativ			abs.			relativ			abs.			abs.
Teil 1 Nutzl. lasten VR-Test mit originalen Nutzl. lasten	Etappe 1 - Autobahn medium	32,56	32,28	-0,28	803,7	803,8	-0,9%	1,28	1,27	-0,01	31,79	31,52	-0,27	-0,9%	0,36	0,36	0,00	9,01	8,93	-0,08	-0,9%
	Etappe 2 - Autobahn hügelig	36,01	35,71	-0,30	896,6	889,2	-0,8%	1,41	1,40	-0,01	35,16	34,87	-0,29	-0,8%	0,40	0,40	0,00	9,96	9,88	-0,08	-0,8%
	Etappe 3 - Autobahn Rollertappe	32,75	32,43	-0,33	807,4	807,4	-1,0%	1,28	1,27	-0,01	31,98	31,66	-0,32	-1,0%	0,36	0,36	0,00	9,06	8,97	-0,09	-1,0%
	Etappe 4 - Landstraße	31,79	31,58	-0,21	791,5	786,3	-0,7%	1,25	1,24	-0,01	31,04	30,83	-0,21	-0,7%	0,35	0,35	0,00	8,79	8,74	-0,06	-0,7%
	Etappe 5 - Autobahn leicht	31,87	31,52	-0,35	793,6	784,9	-1,1%	1,25	1,24	-0,01	31,12	30,78	-0,34	-1,1%	0,35	0,35	0,00	8,82	8,72	-0,10	-1,1%
	Gesamt: Teil 1 Vollbelastung	33,19	32,89	-0,30	805,3	803,9	-0,9%	1,30	1,29	-0,01	32,41	32,11	-0,29	-0,9%	0,37	0,37	0,00	9,03	8,93	-0,10	-0,9%
	Teil 2 Landstraße	27,83	27,67	-0,16	689,0	688,9	-0,1%	3,48	3,46	-0,02	86,62	86,11	-0,51	-0,6%	0,31	0,31	0,00	7,70	7,65	-0,05	-0,6%
	Nutzl. lasten	28,02	27,68	-0,34	697,6	689,2	-1,2%	3,50	3,46	-0,04	87,20	86,15	-1,05	-1,2%	0,31	0,31	0,00	7,75	7,66	-0,09	-1,2%
	Gesamt: Teil 2 Teilbelastung	27,96	27,67	-0,28	696,2	689,1	-1,0%	3,49	3,46	-0,04	87,02	86,14	-0,89	-1,0%	0,31	0,31	0,00	7,74	7,66	-0,08	-1,0%
	Teil 2 Landstraße	18,81	18,65	-0,16	468,5	464,5	-0,9%														
Autobahn	21,74	21,36	-0,38	541,2	531,7	-1,7%															
Gesamt: Teil 2 Leerfahrt	20,83	20,52	-0,31	538,7	510,9	-1,5%															
Gesamt	30,83	30,54	-0,30	767,8	760,3	-1,0%	1,56	1,55	-0,02	38,88	38,50	-0,38	-1,0%	0,34	0,34	0,00	8,53	8,45	-0,08	-1,0%	
Teil 1 VR-Test Etappen mit gewählter Nutzl. lasten	Etappe 1 - Autobahn medium	32,56	32,28	-0,28	803,7	803,8	-0,9%	1,28	1,27	-0,01	31,79	31,52	-0,27	-0,9%	0,36	0,36	0,00	9,01	8,93	-0,08	-0,9%
	Etappe 2 - Autobahn hügelig	36,01	35,71	-0,30	896,6	889,2	-0,8%	1,41	1,40	-0,01	35,16	34,87	-0,29	-0,8%	0,40	0,40	0,00	9,96	9,88	-0,08	-0,8%
	Etappe 3 - Autobahn Rollertappe	32,75	32,43	-0,33	807,4	807,4	-1,0%	1,28	1,27	-0,01	31,98	31,66	-0,32	-1,0%	0,36	0,36	0,00	9,06	8,97	-0,09	-1,0%
	Etappe 4 - Landstraße	31,79	31,58	-0,21	791,5	786,3	-0,7%	1,25	1,24	-0,01	31,04	30,83	-0,21	-0,7%	0,35	0,35	0,00	8,79	8,74	-0,06	-0,7%
	Etappe 5 - Autobahn leicht	31,87	31,52	-0,35	793,6	784,9	-1,1%	1,25	1,24	-0,01	31,12	30,78	-0,34	-1,1%	0,35	0,35	0,00	8,82	8,72	-0,10	-1,1%
	Gesamt: Teil 1	33,19	32,89	-0,30	805,3	803,9	-0,9%	1,30	1,29	-0,01	32,41	32,11	-0,29	-0,9%	0,37	0,37	0,00	9,03	8,93	-0,10	-0,9%
	Landstraße	37,37	37,22	-0,15	930,6	926,8	-0,4%	1,47	1,46	-0,01	36,49	36,35	-0,15	-0,4%	0,42	0,41	0,00	10,34	10,30	-0,04	-0,4%
	Autobahn	35,64	35,30	-0,34	887,4	879,0	-1,0%	1,40	1,38	-0,01	34,80	34,47	-0,33	-1,0%	0,40	0,39	0,00	9,86	9,77	-0,09	-1,0%
	Gesamt: Teil 2	36,18	35,89	-0,28	900,8	893,8	-0,8%	1,42	1,41	-0,01	35,32	35,05	-0,27	-0,8%	0,40	0,40	0,00	10,01	9,93	-0,08	-0,8%
	ACEA Long-haul Entwurf Autobahn (v = 87 km/h)	35,74	35,38	-0,36	889,9	881,0	-1,0%	1,40	1,39	-0,01	34,90	34,55	-0,35	-1,0%	0,40	0,39	0,00	9,89	9,79	-0,10	-1,0%
Konstantfahrt ebene Autobahn	28,60	28,19	-0,41	702,1	701,9	-10,2%	1,12	1,11	-0,02	27,99	27,59	-0,40	-1,4%	0,32	0,31	0,00	7,91	7,80	-0,11	-1,4%	
Konstantfahrt ebene Landstraße	25,14	24,85	-0,30	626,1	618,7	-1,2%	0,99	0,97	-0,01	24,55	24,26	-0,29	-1,2%	0,28	0,28	0,00	6,96	6,87	-0,08	-1,2%	

Bild 35: Ergebnisausgabemaske des CO<sub>2</sub>-Rechners

Seitenverkleidung + Heckenzugklappen + Aufliegerreifen + Leichtbautrailer ( $\Delta c_w = -0,08$ , $\Delta m = -0,8$ t, $\Delta f_R \approx -0,8$ kg/t)									
Leichtbauauflieger ( $\Delta m = -1,0$ t)									
Aufliegerreifen C-Label $\rightarrow$ A-Label ( $\Delta f_R \approx -0,8$ kg/t)									
Seitenverkleidung + Heckenzugklappen ( $\Delta c_w = -0,08$ , $\Delta m = +0,2$ t)									
Heckenzugklappen ( $\Delta c_w = -0,03$ )									
Seitenverkleidung ( $\Delta c_w = -0,05$ , $\Delta m = +0,2$ t)									
SDR-Diffusor ( $\Delta c_w = -0,02$ )									
Ausgangszustand									
Nutzlast	Etappe	$\emptyset$ -Emissionen	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.
[t]		[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]	[g(CO <sub>2</sub> )/km]
25,5	Etappe 1	810,7	-6,9	-14,4	-10,5	-24,1	-34,0	-13,8	-71,7
	Autobahn medium		(-0,9 %)	(-1,8 %)	(-1,8 %)	(-3,0 %)	(-4,2 %)	(-1,7 %)	(-8,8 %)
	Etappe 2	896,6	-7,4	-15,5	-11,4	-26,4	-37,5	-15,7	-78,8
	Autobahn hügelig		(-0,8 %)	(-1,7 %)	(-1,3 %)	(-2,9 %)	(-4,2 %)	(-1,7 %)	(-8,8 %)
	Etappe 3	815,5	-8,1	-17,9	-12,4	-29,8	-39,5	-12,4	-81,1
	Autobahn Rolletappe		(-1,0 %)	(-2,2 %)	(-1,5 %)	(-3,7 %)	(-4,8 %)	(-1,5 %)	(-9,9 %)
	Etappe 4	774,4	-4,6	-8,7	-6,9	-15,2	-42,4	-13,5	-70,4
	Landstraße		(-0,6 %)	(-1,1 %)	(-0,9 %)	(-2,0 %)	(-5,5 %)	(-1,7 %)	(-9,1 %)
	Etappe 5	793,6	-8,8	-19,7	-13,3	-32,4	-42,2	-10,8	-84,6
	Autobahn leicht		(-1,1, %)	(-2,5 %)	(-1,7 %)	(-4,1 %)	(-5,3 %)	(-1,4 %)	(-10,7 %)
	<b>Gesamt: erster Teil</b>	<b>823,9</b>	<b>-7,3</b>	<b>-15,6</b>	<b>-11,1</b>	<b>-26,2</b>	<b>-38,7</b>	<b>-13,3</b>	<b>-77,7</b>
			<b>(-0,9 %)</b>	<b>(-1,9 %)</b>	<b>(-1,4 %)</b>	<b>(-3,2 %)</b>	<b>(-4,7 %)</b>	<b>(-1,6 %)</b>	<b>(-9,4 %)</b>
12	Landstraße	668,4	-3,5	-5,1	-5,1	-9,6	-19,0	-17,9	-46,5
			(-0,6 %)	(-0,9 %)	(-0,9 %)	(-1,4 %)	(-2,8 %)	(-2,7 %)	(-7,0 %)
	Autobahn	697,6	-8,4	-19,0	-12,9	-31,0	-22,5	-13,1	-66,0
			(-1,4 %)	(-3,3 %)	(-2,2 %)	(-4,4 %)	(-3,2 %)	(-1,9 %)	(-9,5 %)
	<b>Gesamt: zweiter Teil</b>	<b>688,6</b>	<b>-6,9</b>	<b>-14,7</b>	<b>-10,5</b>	<b>-24,3</b>	<b>-21,4</b>	<b>-14,6</b>	<b>-60,0</b>
	<b>Teilbeladung</b>		<b>(-1,1 %)</b>	<b>(-2,6 %)</b>	<b>(-1,8 %)</b>	<b>(-3,5 %)</b>	<b>(-3,1 %)</b>	<b>(-2,1 %)</b>	<b>(-8,7 %)</b>
0	Landstraße	446,7	-3,4	-5,4	-5,2	-10,3	-10,0	-18,7	-38,2
			(-0,8 %)	(-1,2 %)	(-1,2 %)	(-2,3 %)	(-2,2 %)	(-4,2 %)	(-8,6 %)
(Leer-	Autobahn	541,2	-9,5	-21,8	-14,4	-35,4	-12,1	-12,6	-59,8
fahrt)			(-1,7 %)	(-4,0 %)	(-2,7 %)	(-6,5 %)	(-2,2 %)	(-2,3 %)	(-11,1 %)
	<b>Gesamt: zweiter Teil</b>	<b>512,0</b>	<b>-7,6</b>	<b>-16,7</b>	<b>-11,6</b>	<b>-27,6</b>	<b>-11,4</b>	<b>-14,5</b>	<b>-53,2</b>
	<b>Leerfahrt</b>		<b>(-1,5 %)</b>	<b>(-3,2 %)</b>	<b>(-2,3 %)</b>	<b>(-5,4 %)</b>	<b>(-2,2 %)</b>	<b>(-2,8 %)</b>	<b>(-10,4 %)</b>
	<b>VR-Test gesamt</b>	<b>764,1</b>	<b>-7,3</b>	<b>-15,6</b>	<b>-11,1</b>	<b>-26,2</b>	<b>-32,8</b>	<b>-13,7</b>	<b>-72,0</b>
			<b>(-1,0 %)</b>	<b>(-2,1 %)</b>	<b>(-1,5 %)</b>	<b>(-3,4 %)</b>	<b>(-4,3 %)</b>	<b>(-1,8 %)</b>	<b>(-9,4 %)</b>

Tab. 21: Simulierte Maßnahmen im VR-Test, ausgedrückt in der Maßeinheit g(CO<sub>2</sub>)/km (Tank-to-Wheel)



## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

## 2004

F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten  
Steven € 12,50

F 46: Anforderungen an zukünftige Kraffrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit  
Funke, Winner € 12,00

F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformations-systemen  
Jahn, Oehme, Rösler, Krems € 13,50

F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO  
Pullwitt, Redmann € 13,50

F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder  
Berg, Rucker, Bürkle, Mattern, Kallieris € 18,00

F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme  
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50

F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen  
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50

F 52: Intelligente Rückhaltesysteme  
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00

F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag  
Klanner, Ambos, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00

F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw  
Niewöhner, Berg € 16,50

## 2005

F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

## 2006

F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die Verwendung asphärischer Außenspiegel  
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00

F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften  
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00

F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren  
Steven, Kleinebrahm € 15,50

F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort  
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50

F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit  
Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

## 2007

F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00

F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belange der passiven Sicherheit  
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50

F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen  
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorradsicherheit

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit  
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

## 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](http://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](http://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](http://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: 5<sup>th</sup> 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: 6<sup>th</sup> 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen**

Süßmann, Lienkamp

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

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](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.