

TEXTE

32/2015

Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgas- minderung bei schweren Nutzfahrzeugen

TEXTE 32/2015

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 96 105
UBA-FB 002058

Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen

von

Frank Dünnebeil, Carsten Reinhard, Udo Lambrecht
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

Antonius Kies, Stefan Hausberger, Martin Rexeis
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik,
Technische Universität Graz, Graz, Österreich

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckenstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Februar 2015

Redaktion:

Fachgebiet I 3.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Andrea Fechter

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zukuenftige-massnahmen-zur-kraftstoffeinsparung>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2015

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3711 96 105 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Der Verkehrssektor ist heute für ca. 30 % des Endenergieverbrauchs und 20 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Dabei hat der Straßenverkehr den größten Anteil. Schwere Nutzfahrzeuge sind heute für rund ein Viertel des Energieverbrauchs im Straßenverkehr verantwortlich. Aktuelle Prognosen erwarten auch für die Zukunft eine weitere deutliche Zunahme des Lkw-Verkehrs. Um die Energieverbrauchs- und Klimaschutzziele zu erreichen sind damit auch bei schweren Nutzfahrzeugen deutliche Minde rungen des Kraftstoffverbrauchs notwendig. In der vorliegenden Studie wurden Energieeinspar- und Treibhausgasminderungspotenziale von bisher nicht serienmäßigen technologischen Effizienzmaßnahmen bei schweren Nutzfahrzeugen abgeschätzt sowie deren Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung untersucht.

Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden Potenziale zur Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen ausgewählter Technologien am Antriebstrang, zur Verbesserung von Aerodynamik und Rollwiderstand sowie Optimierungen von Fahrzeuggewicht, Nebenverbrauchern und Fahrzeugregelung systematisch untersucht. Dabei wurde mit dem Simulationstool VECTO das neue Berechnungsverfahren zur CO₂-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen in der Europäischen Union eingesetzt.

Anschließend erfolgte die Analyse von mit dem Einsatz dieser Technologien verbundenen Änderungen der Fahrzeugkosten, insbesondere zusätzlicher Anschaffungskosten und möglicher Kraftstoffkosteneinsparungen. Einsparpotenziale und Kosten einzelner Technologien sowie von Maßnahmenpaketen wurden in einer Kosten-Nutzen-Matrix zusammengeführt und Auswertungen zur Potenzialhöhe und Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung über verschiedene Betrachtungszeiträume durchgeführt.

In einem zusätzlichen Schwerpunkt des Vorhabens wurden mögliche Maßnahmen und politische Strategien untersucht, welche die Einführung zusätzlicher treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen unterstützen und ihre stärkere Verbreitung in Europa fördern können.

Abstract

The transport sector is currently responsible for approx. 30 % of final energy consumption and 20 % of greenhouse gas emissions in Germany. In this context, road transport accounts for the largest share. Heavy-duty vehicles (HDVs and buses >3.5 t GVW) account for about a quarter of the energy consumption in road transport at present. Current projections expect substantial increases of HDV transport in the future. Therefore, compliance with climate change mitigation goals and the minimisation of final energy consumption require a substantial reduction of the fuel consumption associated with heavy-duty vehicles. The objective of the present study is the estimation of energy and greenhouse gas emissions reduction potentials of technological efficiency measures that are not yet established in heavy-duty vehicles in Europe. The reduction potentials and associated costs are both identified and evaluated.

In the first work package, energy-saving and greenhouse gas reduction potentials of selected vehicle technologies in the fields of powertrain, aerodynamics, rolling resistance and optimisation of vehicle weight, engine auxiliaries and vehicle control systems were analysed. This was using VECTO the designated simulation-based approach for the standardised quantification of CO₂ emissions from heavy-duty vehicles in Europe.

The second work package included the analysis of changes in vehicle costs accompanying the use of these technologies, including primarily additional investment costs and fuel cost savings. GHG reduction potentials and cost changes of individual technologies as well as measure packages were consolidated in a cost-benefit matrix. On this basis, cost efficiency of the measures for GHG mitigation was assessed for different reference periods.

Many energy-saving and greenhouse gas-reducing technologies for heavy-duty vehicles already available on the market find limited application and are used by only a fraction of vehicle operators. In consequence, the scope of the present study included the discussion of political strategies to promote the introduction and establishment of such technologies

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis.....	14
Abkürzungsverzeichnis.....	15
Zusammenfassung	18
Summary	35
1 Hintergrund und Zielstellung	53
2 Technologische Energiespar- und Treibhausgasminderungspotenziale bei schweren Nutzfahrzeugen und damit verbundene Kosten	55
2.1 Zielstellung und Vorgehensweise	55
2.2 Untersuchte Fahrzeugklassen und Einsatzzwecke	56
2.2.1 Fahrzeugklassen und Einsatzzwecke bei schweren Nutzfahrzeugen.....	56
2.2.2 Auswahl von Fahrzeugklassen und Einsatzzwecken im Forschungsvorhaben	58
2.2.3 Technologische Ausstattung aktueller schwerer Nutzfahrzeuge – Konfiguration der Referenzfahrzeuge für die Potenzialanalysen	60
2.3 Auswahl energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien.....	65
2.3.1 Übersicht energiesparender und treibhausgasmindernder Zusatztechnologien	65
2.3.2 Technologieauswahl für die Potenzial- und Kostenanalysen	67
2.4 Ermittlung von Potenzialen zur Energie- und Treibhausgasreduktion	70
2.4.1 Europäisches Verfahren zur CO ₂ -Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen	70
2.4.2 Simulation des Energieverbrauchs der Referenzfahrzeuge	72
2.4.3 Methodische Erläuterungen zur Simulation der Potenziale	73
2.4.4 Verbrauchsoptimale aerodynamische Gestaltung schwerer Nutzfahrzeuge	78
2.4.5 Energiespar- und Treibhausgasreduktionspotenziale der Technologien	84
2.4.6 Bedeutung der Energieträger-Bereitstellung für die Treibhausgas-Minderungspotenziale durch den Einsatz alternativer Energieträger	94
2.4.7 Zusammenfassung der ermittelten Potenziale und Vergleich mit anderen Arbeiten	96
2.5 Änderungen der Fahrzeugkosten für die Fahrzeugbetreiber beim Einsatz energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien	97
2.5.1 Zusätzliche Anschaffungskosten für energiesparende Technologien.....	98
2.5.2 Änderung variabler Fahrzeugkosten durch die ausgewählten Technologien.....	102
2.5.3 Änderung der gesamten Fahrzeugkosten durch die ausgewählten Maßnahmen.....	103
2.5.4 Bedeutung zukünftiger Kostenentwicklungen für die Wirtschaftlichkeit von Hybrid- und Elektrofahrzeugen.....	109

2.6	Kosteneffizienz der untersuchten Technologien zur Minderung der Treibhausgasemissionen von schweren Nutzfahrzeugen	111
2.6.1	Kosteneffizienz der Einzelmaßnahmen zur Treibhausgasminderung	111
2.6.2	Mittlere Kosteneffizienz der Maßnahmenpakete zur Treibhausgasminderung.....	116
2.6.3	Kostenkurven von Grenzvermeidungskosten und kumulierten Vermeidungskosten	118
3	Strategien zur Förderung der Einführung und Verbreitung treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen.....	123
3.1	Zielstellung.....	123
3.2	Hemmnisse für die Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen	123
3.2.1	Übersicht von Hemmnissen	124
3.2.2	Technologiespezifische Hemmnisse	125
3.2.3	Finanzielle Hemmnisse.....	129
3.2.4	Strukturelle Hemmnisse	129
3.2.5	Informationsverfügbarkeit.....	130
3.2.6	Bewertung der Hemmnisse	131
3.3	Maßnahmen für eine Förderung des Einsatzes energieverbrauchs- und treibhausgasreduzierender Technologien.....	132
3.3.1	Informationsmaßnahmen	133
3.3.2	Fördernde Maßnahmen	138
3.3.3	Regulierende Maßnahmen.....	144
3.4	Strategische Roadmap zur Förderung einer Einführung und Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien.....	149
4	Quellenverzeichnis.....	151
5	Anhang	155
5.1	Literaturübersicht energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien für schwere Nutzfahrzeuge	155
5.1.1	Ausgewertete Literaturquellen	155
5.1.2	Technologieübersicht.....	156
5.2	Beschreibung der untersuchten Einzeltechnologien	161
5.2.1	Antriebsstrang.....	161
5.2.2	Aerodynamik und Rollwiderstand.....	163
5.2.3	Leichtbau, Fahrzeugregelung und Nebenverbraucher	164
5.3	Kostenanalyse der untersuchten Einzeltechnologien	165
5.3.1	Investitionskosten Antriebsstrang.....	165
5.3.2	Investitionskosten Aerodynamik und Rollwiderstand.....	168
5.3.3	Investitionskosten Leichtbau, Fahrzeugregelung und Nebenverbraucher	169

5.4 Datenblätter der simulierten Nutzfahrzeuge	170
5.4.1 Sattelzug 40 t auf Long Haul Cycle.....	170
5.4.2 Sattelzug 40 t auf Regional Delivery Cycle.....	173
5.4.3 Solo-Lkw 12 t auf Urban Delivery Cycle	175
5.4.4 Stadtbus 12 m (18 t zGG) auf Urban Bus Cycle.....	178
5.5 Modellierung beim seriellen Hybridbus	182
5.6 Vergleich der simulierten Sparpotenziale mit TIAX Studie 2011	186
5.7 Recherche zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugen	188
5.8 CFD Simulation von aerodynamischen Maßnahmen.....	196
5.9 Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen für verschiedene Betrachtungszeiträume	202
5.10 Kostenkurven der Grenzvermeidungskosten und kumulierten Vermeidungskosten.....	205
5.11 Rückmeldung der Industrie.....	211
5.11.1 Randbedingungen der Studie.....	211
5.11.2 Simulation der Sparpotentiale	211
5.11.3 Kosten	212
5.11.4 Sonstiges	212

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Rechenschema von VECTO für die Ermittlung des Motorbetriebspunktes und die Interpolation des Kraftstoffverbrauchs	19
Abbildung 2	Sattelzug auf Long Haul Cycle (Fernverkehr), Einzelmaßnahmen	20
Abbildung 3	Potenzielle der Maßnahmenpakete beim Sattelzug auf dem Long Haul (Fernverkehr) und Regional Delivery (regionaler Verteiler) Zyklus.....	21
Abbildung 4	Potenzielle der Maßnahmenpakete beim Verteiler-Lkw und Stadtbus	23
Abbildung 5	Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Sattelzug 40 t.....	24
Abbildung 6	Änderung der Fahrzeugkosten eines Sattelzugs 40 t im Fernverkehr in drei Jahren.....	26
Abbildung 7	Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	28
Abbildung 8	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten des Maßnahmenpakets Diesel B beim Sattelzug im Fernverkehr	29
Abbildung 9	Roadmap zur Förderung einer Verbreitung von Effizienz-Technologien im Nfz-Markt	34
Abbildung 10	Long Haul Cycle.....	58
Abbildung 11	Anteil der Nutzfahrzeugflotte an den europäischen CO ₂ -Emissionen 2010	58
Abbildung 12	Aufteilung der CO ₂ -Emissionen auf die Nutzfahrzeugklassen in Europa	59
Abbildung 13	Sattelzug 40 t, Verteiler-Lkw 12 t und Normalbus 18 t (v. l. n. r.; Beispielbilder)	59
Abbildung 14	Einteilung ausgewählter Nfz-Klassen nach Emissionsstufe, 12/2013	60
Abbildung 15	Variantenvielfalt innerhalb einer Modellreihe: Pkw und Verteiler-Lkw	70
Abbildung 16	Rechenschema von VECTO für die Ermittlung des Motorbetriebspunktes	71
Abbildung 17	Mechanischer Wirkungsgrad von ORC-Systemen über Abgas-Eintrittstemperatur.....	73
Abbildung 18	Verlauf der berechneten ORC-Leistung auf dem Long Haul Cycle (Ausschnitt)	74
Abbildung 19	Leistungskurve der Elektromaschine 120 kW für die Sattelzugmaschine	75
Abbildung 20	Betrieb der Elektromaschine, Parallelhybrid Verteiler-Lkw (Ausschnitt).....	75
Abbildung 21	Hybridfahrzeuge: Generatorleistung und theoretisch maximales Nutzbremsvermögen	76
Abbildung 22	Beispiel für Steuerkennfeld der Elektromaschine eines Parallelhybridbusses.....	77
Abbildung 23	Leistungsverlauf des Batterie-Verteiler-Lkw, Urban Delivery Cycle (Ausschnitt)	78
Abbildung 24	Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs	79
Abbildung 25	Sattelzugmodell 1:6 für Windkanalmessungen 1954	79

Abbildung 26	MAN Concept S und Krone AeroLiner auf IAA 2012	80
Abbildung 27	Beispiele für aerodynamische Maßnahmen an Sattelzügen	81
Abbildung 28	Klapbarer Heckeinzug 50 cm.....	82
Abbildung 29	Seitenverkleidung Auflieger.....	82
Abbildung 30	Erweiterung für das FAT Sattelzugmodell	82
Abbildung 31	Einsparpotenziale Sattelzug, Long Haul Cycle	86
Abbildung 32	Einsparpotenziale Sattelzug, Regional Delivery Cycle	88
Abbildung 33	Einsparpotenziale Verteiler-Lkw, Urban Delivery Cycle	90
Abbildung 34	Einsparpotenziale Stadtbus, Citybus Urban Cycle	92
Abbildung 35	Einfluss der Energieträger-Bereitstellungspfade auf die Treibhausgasminderungspotenziale durch Einsatz alternativer Energieträger.....	95
Abbildung 36	Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Sattelzug 40 t.....	99
Abbildung 37	Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Solo-Lkw 12 t	100
Abbildung 38	Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Stadtbus 18 t	101
Abbildung 39	Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr	105
Abbildung 40	Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Sattelzug 40 t im Regionalverkehr	105
Abbildung 41	Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferverkehr	106
Abbildung 42	Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus	107
Abbildung 43	Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	112
Abbildung 44	Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	114
Abbildung 45	Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Regionalverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	114
Abbildung 46	Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Solo-Lkw 12 t städtischen Lieferverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	115
Abbildung 47	Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Stadtbus im städtischen Fahrzyklus für verschiedene Betrachtungszeiträume	115
Abbildung 48	Treibhausgasminderungspotenziale durch die untersuchten Maßnahmenpakete	117

Abbildung 49	Mittlere Treibhausgasvermeidungskosten der Maßnahmenpakete für verschiedene Betrachtungszeiträume	118
Abbildung 50	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Fernverkehr.....	120
Abbildung 51	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Fernverkehr	121
Abbildung 52	Übersicht von Akteuren in der Logistik-Branche.....	125
Abbildung 53	Übersicht technologiespezifischer Hemmnisse für die ausgewählten Energiespar- und Treibhausgasminderungstechnologien	128
Abbildung 54	Roadmap zur Förderung einer Verbreitung von Effizienz-Technologien im Nfz-Markt	150
Abbildung 55	Links: Vereinheitlichung von Währungsangaben der Jahre 2000-2012 auf Euro; Rechts: Entwicklung verschiedener Preisindizes als Basis zur Vereinheitlichung von Kostenangaben in Nominalpreisen der jeweiligen Jahre auf Realpreise 2010	165
Abbildung 56	Regional Delivery Cycle.....	173
Abbildung 57	Urban Delivery Cycle.....	175
Abbildung 58	Urban Bus Cycle	178
Abbildung 59	Modell des Sattelzuges im Maßstab 1:6 für die Windkanalmessungen 1954	188
Abbildung 60	NASA Testfahrzeug der Ausrollmessungen 1974.....	189
Abbildung 61	Sattelzug der NASA Windkanalmessungen aus 1978	189
Abbildung 62	Luftwirbelgeschwindigkeit (o.) und Druckverteilung (u.) am Aufliegerheck.....	190
Abbildung 63	MB Actros 1 MP 3 mit Standardauflieger (l.) und optimiertem Auflieger (r.)	190
Abbildung 64	Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Sattelzug 40 t im Regionalverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	202
Abbildung 65	Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume	203
Abbildung 66	Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Solo-Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus für verschiedene Betrachtungszeiträume	204
Abbildung 67	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Regionalverkehr	205
Abbildung 68	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Regionalverkehr.....	206

Abbildung 69	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Solo-Lkw im städtischen Lieferverkehr	207
Abbildung 70	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Solo-Lkw im städtischen Lieferverkehr	208
Abbildung 71	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Stadtbus im städtischen Fahrzyklus	209
Abbildung 72	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Stadtbus im städtischen Fahrzyklus	210

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Mittlere Amortisationszeiten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen in den Szenarien	27
Tabelle 2	Anteilige Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete durch Maßnahmen mit im jeweiligen Betrachtungszeitraum negativen Vermeidungskosten	30
Tabelle 3	Einteilung der europäischen Lkw-Flotte in 17 Fahrzeugklassen	57
Tabelle 4	Einteilung der europäischen Busflotte in drei Fahrzeugklassen.....	57
Tabelle 5	Übersicht von treibausgasmindernden Technologien aus der Literaturrecherche.....	66
Tabelle 6	Technologieauswahl für die Fahrzeugklasse Sattelzug 40 t	68
Tabelle 7	Technologieauswahl für die Fahrzeugklasse Solo-Lkw 12 t.....	68
Tabelle 8	Technologieauswahl für die Fahrzeugklasse Stadtbus 18 t.....	69
Tabelle 9	Aerodynamische Maßnahmen Sattelzug	83
Tabelle 10	Mittlere Jahresfahrleistungen und Fahrzeuglebensdauer in den Fahrzeugklassen	103
Tabelle 11	Mittlere Preise für Kraftstoffe und Strom	103
Tabelle 12	Mittlere Amortisationszeiten der Einzelmaßnahmen in den Fahrzeugklassen	108
Tabelle 13	Szenarioannahmen zur Entwicklung der zusätzlichen Anschaffungskosten für die Beschaffung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen	109
Tabelle 14	Mittlere Amortisationszeiten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen in den Szenarien	110
Tabelle 15	Anteilige Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete durch Maßnahmen mit im jeweiligen Betrachtungszeitraum negativen Vermeidungskosten	122
Tabelle 16	Literaturquellen in der Hemmnisanalyse	124
Tabelle 17	Minimal- und Maximalwerte zur c_w -Wert-Verringerung aus der Literatur	192

Abkürzungsverzeichnis

$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius (Einheit, Temperatur)
Λ	Lambda, Luftzahl = Masse-Luft-ist / Masse-Luft-stöchiometrisch
η	Wirkungsgrad (griech. Buchstabe)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AGR	Abgasrückführung
AMT	Automated Manual Transmission (automatisiertes Schaltgetriebe)
APU	Auxiliary Power Unit (Hilfsbatterie)
A_q	Geometrische Querschnittsfläche
BEV	Battery electric vehicle (Batterie elektrisches Fahrzeug)
br	Bremse
c	centi
C	charge (Ladung)
$\text{C}_{13,66}\text{H}_{26,05}$	Ersatzmolekül für das Dieselgemisch, gleiche Zusammensetzung und molare Masse
CFD	Computational Fluid Dynamics, numerische Simulation von Fluid Strömungen
CMS	Camera Monitor System
CNG	Compressed Natural Gas, verdichtetes Erdgas, > 200 bar
CO	Kohlenmonoxid, Luftschadstoff im Motorenabgas
CO_2	Kohlendioxid
CO_2e	CO_2 -Äquivalente, Treibhausgaspotenzial
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
ΔH_{exh}	Enthalpiedifferenz im Abgasstrom
dem	demand (hier: v_{dem} = Soll-Geschwindigkeit)
EC	European Commission
el	elektrisch
EM	Elektromaschine
EU	Europäische Union
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Forschungsabteilung des VDA
Fig	Figur
Fz	Fahrzeug
F&E	Forschung und Entwicklung
g	Gramm (Einheit, Masse)
G	giga
gen	Generator
GHG	Greenhousegas (Treibhausgas)

H2O	Wasser
HA	Hinterachse
HC	Kohlenwasserstoffe, Luftschadstoff im Motorenabgas
HDV	Heavy Duty Vehicle
H _u	unterer Heizwert, Energieinhalt von Kraftstoffen
i	Übersetzungsverhältnis (Antriebs- zu Abtriebsdrehzahl)
IHK	Industrie- und Handelskammer
J	Joule (Einheit, Energie/Arbeit)
k	kilo
Kfz	Kraftfahrzeug
kin	kinetisch
Kl	Klasse
L	Liter (Einheit, Volumen)
LED	Light Emitting Diode, lichtemittierendes Halbleiter-Bauelement, besserer Licht-Wirkungsgrad
Li	Lithium
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas, verflüssigtes Erdgas, - 160 °C
M	mega
m	Meter (Einheit, Länge)
MAC	marginal abatement costs (spez. Grenzvermeidungskosten)
mech	mechanisch
MF	Fördernde Maßnahme
MI	Informationsmaßnahme
mot	Motor
MR	Regulierende Maßnahme
MwSt	Mehrwertsteuer
N	Newton (Einheit, Kraft)
N2	Stickstoff
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nfz	Nutzfahrzeug
Nm	Newtonmeter (Einheit, Kraft)
NOx	Stickoxide, Luftschadstoff im Motorenabgas
O ₂	Sauerstoff
ORC	Organic Rankine Cycle, Dampfkraftprozess mit organischem Arbeitsmedium, besonders für Wärmequellen mit niedriger Leistung und geringer Temperatur geeignet.

P	Leistung
Pa	Pascal (Einheit, Druck)
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
Pkw	Personenkraftwagen
P_m	mittlere Leistung
PM	Particulate Matter, Partikel, Luftschadstoff im Motorenabgas
RPE	Retail Price Equivalent
s	Sekunde (Einheit, Zeit)
Scap	Superkondensator
SCR	Selective Catalytic Reduktion, Entstickungsverfahren
SNF	schweres Nutzfahrzeug ($zGG \geq 3.5 \text{ t}$)
SOC	State of Charge
SZM	Sattelzugmaschine
t	Tonne (Einheit, Masse)
TCO	Total cost of ownership
tot	total
UN/ECE	United Nations Economic Commission for Europe
v	Geschwindigkeit
VA	Vorderachse
VECTO	Vehicle Energy consumption Calculation Tool
VKM	Verbrennungskraftmaschine
W	Watt (Einheit, Leistung)
Wh	Wattstunde (Einheit, Energie)
WTW	Wheel-To-Wheel, Bezug auf Energiebereitstellung von deren Quelle über Transport- und Wandlungskette bis zum Antriebsrad
zGG	zulässiges Gesamtgewicht
Zyl	Zylinder

Zusammenfassung

1. Hintergrund und Zielstellung

Der Verkehrssektor ist heute für ca. 30 % des Endenergieverbrauchs und 20 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Dabei hat der Straßenverkehr den größten Anteil. Hier hat in den vergangenen Jahren vor allem der Straßengüterverkehr deutlich zugenommen. So stieg die Verkehrsleistung der Lkw zwischen 2000 und 2010 um 26 % an. Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw und Busse >3.5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht) sind heute für rund ein Viertel des Energieverbrauchs im Straßenverkehr verantwortlich. Aktuelle Prognosen erwarten auch für die Zukunft eine weitere deutliche Zunahme des Lkw-Verkehrs (2010 bis 2030: +30 Prozent) und nur ein deutlich geringeres Wachstum beim Pkw (+10 Prozent) [BMVI, 2014].

Um die Klimaschutzziele zu erreichen und den Energieverbrauch zu verringern, sind damit auch bei schweren Nutzfahrzeugen deutliche Minderungen des Kraftstoffverbrauchs notwendig. Die Europäische Kommission arbeitet zusammen mit ihren Mitgliedern an Strategien zur Reduktion der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge und hat im Mai 2014 erste Eckpunkte dazu vorgelegt [EC, 2014a]. Eine wichtige Voraussetzung für fahrzeugbezogene Strategien ist die standardisierte Bestimmung der CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Aktuell lässt die EU ein entsprechendes Testverfahren erarbeiten. Der vorgesehene simulationsbasierte Ansatz (VECTO) soll in Bälde für die ersten Fahrzeugklassen einsatzfähig sein [JRC, 2014].

Ziel dieser Studie ist es, Energie- und Treibhausgasemissionsminderungspotenziale von bisher nicht serienmäßigen Effizienzmaßnahmen bei schweren Nutzfahrzeugen kompatibel mit dem CO₂-Testverfahren der EU sowie deren Kosten abzuschätzen und zu bewerten. Dazu wurden

- wichtige aktuelle oder zukünftig relevante Effizienztechnologien für schwere Nutzfahrzeuge ausgewählt
- technologiespezifische Minderungspotenziale (Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen) für Einzeltechnologien und Maßnahmenpakete mit dem zukünftig in der Nutzfahrzeugzertifizierung vorgesehenen CO₂-Simulationstool (VECTO) bestimmt
- eine Bewertung der Kosteneffizienz für Fahrzeugbetreiber sowie eine Analyse der spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten für die ausgewählten Technologien durchgeführt
- bestehende Hemmnisse für den Einsatz verfügbarer Technologien analysiert und darauf aufbauend politische Strategien für eine zukünftige Förderung des Einsatzes kraftstoffsparender und treibhausgasminimierender Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen untersucht.

2. Energiespar- und Treibhausgasminderungspotenziale bei schweren Nutzfahrzeugen

Untersuchte Fahrzeugklassen

Spezifische Minderungspotenziale (Energieverbrauch und Treibhausgase) durch ausgewählte Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen wurden für folgende Fahrzeugklassen untersucht:

- **Sattelzug 40 t** Diese Fahrzeugklasse trägt etwa die Hälfte zu den CO₂-Emissionen der Nfz-Flotte in Europa bei. Simuliert wurde im Long Haul Cycle (Fernverkehr) und Regional Delivery Cycle (Regionalverkehr).
- **Verteiler-Lkw 12 t** Mit 2,6 % ist der CO₂-Anteil dieser Fahrzeugklasse gering. Sie kann jedoch als repräsentativ für den Großteil der 4x2 und 6x2 Solo-Lkw gesehen werden (ca. 22 % CO₂-Anteil). Für die Analysen wurde der Urban Delivery Cycle (Lkw städtischer Lieferverkehr) gewählt.
- **Stadtbus 18 t (Normalbus, Länge 12 m)** Diese Nutzfahrzeugklasse hat mit 4,4 % CO₂-Anteil (Normal- und Gelenkbusse) einen relativ kleinen Anteil am Gesamtausstoß aller Nfz. Stadtbusse werden oft von öffentlichen Institutionen beschafft, sie haben somit eine Vorreiterrolle und sind damit auch im Fokus von Sparmaßnahmen. Analysiert wurde der Citybus Urban Cycle (städtischer Fahrzyklus).

Die Untersuchung war herstellerneutral, es wurde mit repräsentativen Durchschnittsfahrzeugen gearbeitet.

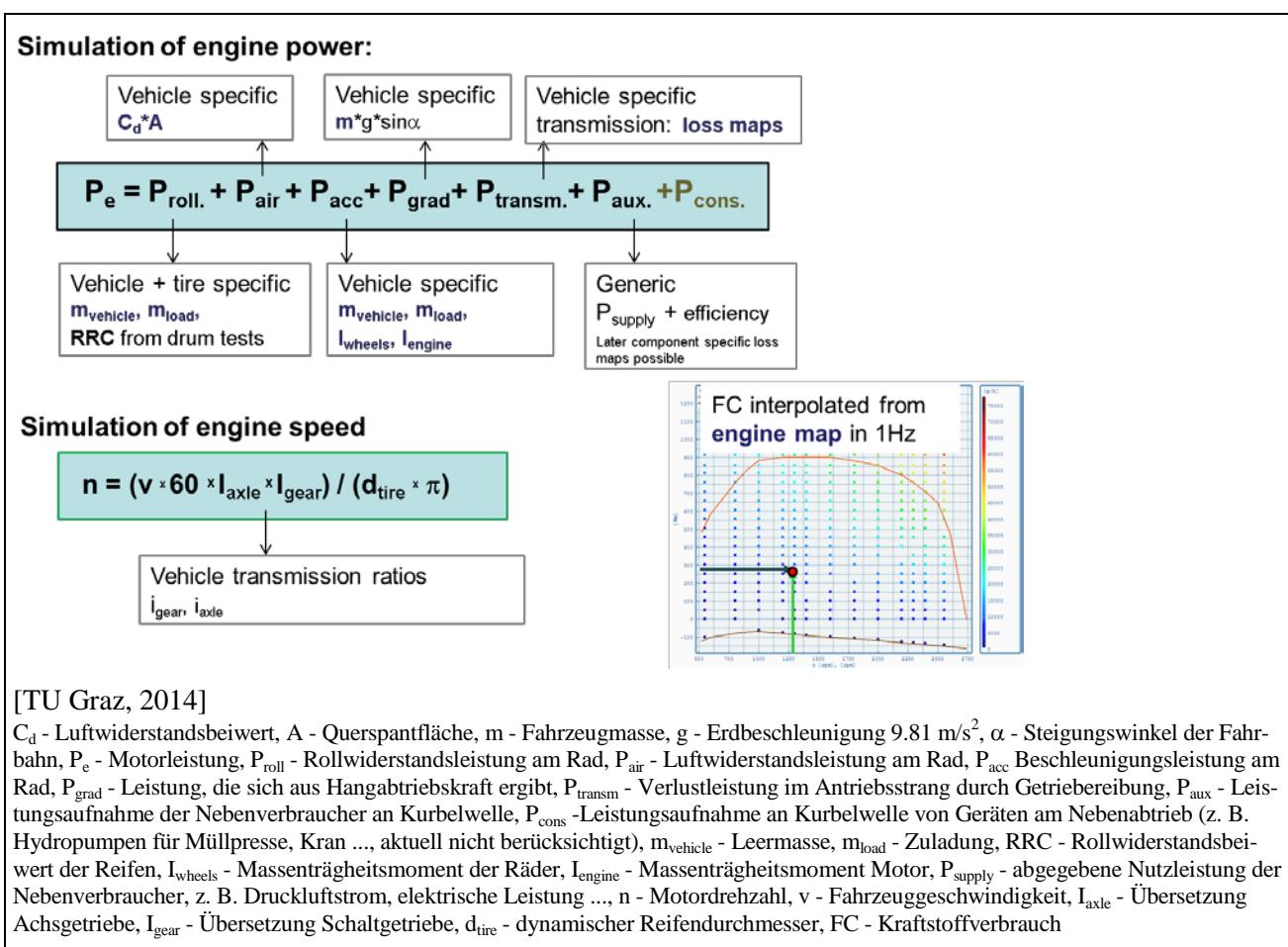
Eingesetztes Modell zur Ermittlung des Endenergieverbrauchs der Fahrzeuge (VECTO)

Aufgrund der großen Variantenvielfalt bei schweren Nutzfahrzeugen ist es zu aufwändig und teuer, Endenergieverbrauch und direkte CO₂-Emissionen von jedem Modell zu messen. So gibt es z. B. von einem Verteiler-Lkw 12 t weit über 1000 Varianten in einer Baureihe: Motorgrößen, Radstände, Kabinengrößen, Federungsarten, Zusatztanks, Klimageräte, Geschwindigkeitsbegrenzer etc. können in einem Baukastensystem nahezu beliebig kombiniert werden. Daher wurde von der Europäischen Kommission in Zusammenarbeit mit den Herstellern ein Ansatz gewählt, in dem die Komponenten einzeln vermessen werden und der Verbrauch des gesamten KFZ dann mit den Komponentendaten berechnet wird. Das für die kommende europäische CO₂-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen entwickelte Simulationsprogramm ist VECTO. Hierfür werden unter anderem Eingabedaten

- Motorverbrauchskennfeld, Getriebeverlustkennfeld, Leermasse, Luftwiderstandsbeiwert, Rollwiderstandsbeiwert Reifen nach EC 1222/2009, Leistungsaufnahme Nebenverbraucher (Lüfter, Kompressor, Lichtmaschine, Lenkhilfepumpe, Klimaanlage), Übersetzungsstufen Getriebe und Achsdifferential

mittels normierter Verfahren bestimmt. Damit werden Energieverbrauch und direkte CO₂-Emissionen für das jeweilige Fahrzeugmodell mit durchschnittlicher Zuladung auf standardisierten Zielgeschwindigkeitszyklen simuliert. Einen Überblick über den Rechengang in VECTO gibt die nachfolgende Abbildung.

Abbildung 1 Rechenschema von VECTO für die Ermittlung des Motorbetriebspunktes und die Interpolation des Kraftstoffverbrauches



Auswahl energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien

Zur Identifizierung von Einzeltechnologie, die heute bereits verfügbar sind oder in den nächsten Jahren voraussichtlich marktreif werden, aber bisher in Europa nicht zur Standardausstattung der untersuchten Fahrzeugklassen gehören, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt.

Auf dieser Grundlage wurde eine Auswahl von Technologien in verschiedenen Bereichen (Antriebsstrang, Aerodynamik, Rollwiderstand, Optimierungen von Fahrzeuggewicht, Nebenverbrauchern und Fahrzeugregelung) für die tiefergehenden Potenzialanalysen mit VECTO sowie Kostenanalysen getroffen. Dabei wurden, bedingt durch die unterschiedliche Konfiguration der Referenzfahrzeuge und die Verfügbarkeit sowie Bedeutung der Technologien für die untersuchten Einsatzzwecke (Fernverkehr, Stadtverkehr), je nach Fahrzeugklasse teilweise unterschiedliche Technologien ausgewählt.

Energiespar- und Treibhausgasreduktionspotenziale der untersuchten Technologien

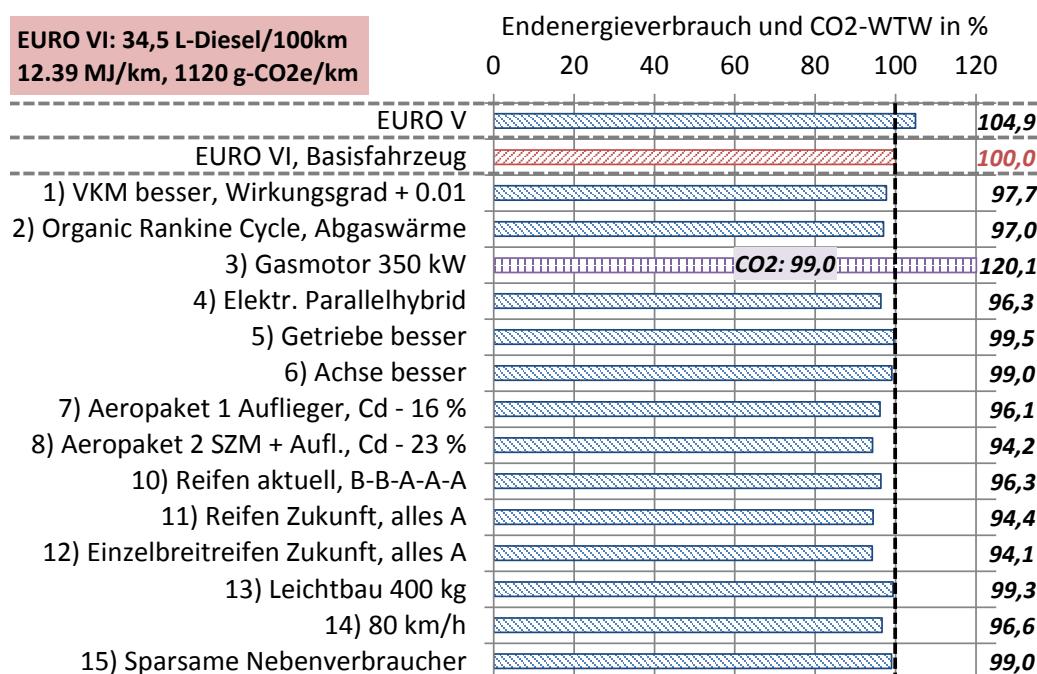
Für die ausgewählten technologischen Maßnahmen wurden standardisierte, miteinander vergleichbare Endenergie-Einsparpotenziale gegenüber aktuellen Referenzfahrzeugen (Stand der Technik bei EUR V und Euro VI) simuliert. Grundlage für die Simulation der Energieverbräuche von Referenzfahrzeugen und Potenziale der Energiesparmaßnahmen sind eigene Messwerte, Messwerte der Industrie, generischen Standarddaten für VECTO von der Industrie, technischen Datenblättern, Herstellerkatalogen, Expertenbefragungen.

Die Endenergiesparpotenziale für die meisten Maßnahmen wurden direkt mit VECTO simuliert. Für die Varianten Abgaswärme-Dampfkraftprozess (Organic Rankine Cycle - ORC), Hybridfahrzeuge, batterieelektrische Fahrzeuge und Start-Stopp-Automatik wurde mit nachgelagerten Berechnungen gearbeitet, da diese Funktionen in der verwendeten VECTO-Variante (noch) nicht verfügbar waren.

Ausgehend von den Endenergieverbräuchen wurden Treibhausgasreduktionspotenziale in CO₂-Äquivalenten (CO₂e) inkl. Vorkette der Kraftstoffgewinnung und -verteilung berechnet, unter Verwendung von Well-to-wheel-Emissionsfaktoren nach DIN EN 16258 sowie [JEC, 2014].

Die Einzelmaßnahmen beim Sattelzug und die Ergebnisse für den Fernverkehrszyklus zeigt Abbildung 2.

Abbildung 2 Sattelzug auf Long Haul Cycle (Fernverkehr), Einzelmaßnahmen



Die dargestellten Balken zeigen den geänderten Endenergieverbrauch. Wo aufgrund des Einsatzes alternativer Energieträger (statt Diesel) die Änderung der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente well-to-wheel) von der Änderung des Energieverbrauchs abweicht, sind entsprechende Zahlenangaben separat ausgewiesen.

Beim Referenzfahrzeug werden ein unverkleideter Auflieger und Reifen der Rollwiderstandsklassen B-C-BBB angenommen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass allein mit den sofort möglichen Maßnahmen

- 7) Aeropaket Auflieger (Seitenverkleidung mit Heckeneinzug 0,5 m)
- 10) beste aktuelle Reifen (B-B-AAA)
- 14) Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h

ca. 10 % Einsparung gegenüber dem Referenzfahrzeug EURO VI möglich sind.

Zum Parallelhybrid sei angemerkt, dass das Sparpotenzial weniger von der Struktur des Antriebsstrangs (parallel oder seriell) als vielmehr von der maximalen Generatorleistung der Elektromaschine abhängt (vgl. Kapitel 2.4.3.2, Abschnitt 'Einfluss der Elektromaschinenleistung auf das Sparpotenzial von Hybridfahrzeugen').

Ausgewählte Einzelmaßnahmen wurden zusätzlich zu Paketen gebündelt:

- **Paket A:** Alle Maßnahmen dieses Paketes sind bereits auf dem Markt verfügbar (Technologiestand Mitte 2014) oder könnten prinzipiell schnell eingeführt werden.
- **Paket B:** Die technologische Machbarkeit dieser Maßnahmen ist bereits absehbar. Die Komponenten, die noch nicht auf dem Markt verfügbar sind, befinden sich in Entwicklung und werden schätzungsweise bis Ende der Dekade bereitgestellt werden können. Im Falle der Aeropakete 2 für Lkw ist eine Vorschriftenänderung seitens der EU notwendig, bezüglich Fahrzeuggabmessungen und Rückfahrkameras.

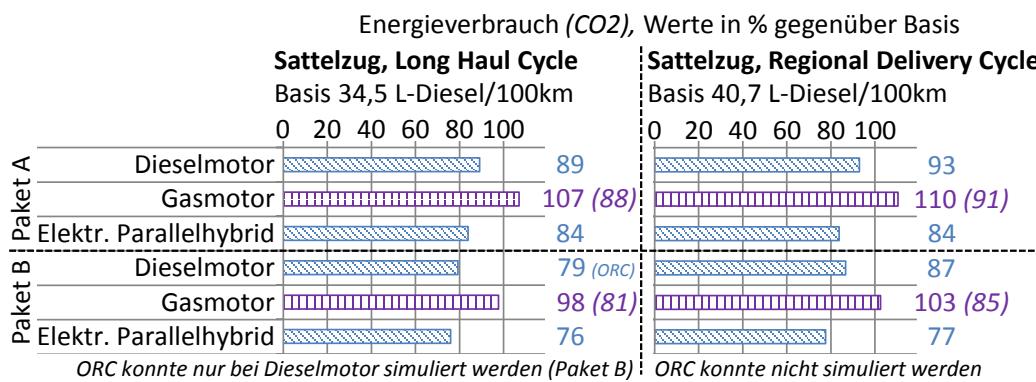
Entsprechende Maßnahmenpakete A und B wurden für jedes der untersuchten Antriebskonzepte (Diesel, Gas, Hybrid, Elektro) in den untersuchten Fahrzeugklassen definiert.

Beim **Sattelzug 40 t** wurden Maßnahmenpakete für Diesel-, Gas- und Parallelhybridfahrzeuge definiert:

- Paket A besteht aus den Einzelmaßnahmen: 7) Aeropaket 1, Auflieger, 10) aktuell beste Reifen, 14) Tempolimit 80 km/h, 15) sparsame Nebenverbraucher.
- Bei Paket B kommen die restlichen Maßnahmen aus Abbildung 2 dazu. (ORC konnte nur beim Dieselmotor auf dem Fernverkehrszzyklus simuliert werden).

Die Ergebnisse für die Einsparpotenziale der Maßnahmenpakete zeigt Abbildung 3. Beim aktuellen Stand der Technik (Paket A) sind beim Sattelzug bis zu 16 % Einsparung von Kraftstoff und Treibhausgasen möglich, bei Ausführung als Parallel-Hybrid-Variante. Mit reinem Diesel-Antriebsstrang sind auf dem Long Haul Cycle ca. 11 % Einsparung möglich. Das Fahrzeug mit Erdgasmotor (LNG-Tank) verbraucht in gleicher Ausbaustufe ca. 7 % mehr Endenergie als das Referenzfahrzeug infolge des verfahrensbedingt niedrigeren Motorwirkungsgrades, verursacht aber ca. 12 % weniger Treibhausgase wegen des niedrigeren Emissionsfaktors dieses Kraftstoffes (75 zu 90 g-CO₂e/MJ_{therm} well-to-wheel nach [JEC, 2014]).

Abbildung 3 Potenziale der Maßnahmenpakete beim Sattelzug auf dem Long Haul (Fernverkehr) und Regional Delivery (regionaler Verteiler) Zyklus



Die dargestellten Balken zeigen den geänderten Endenergieverbrauch. Wo aufgrund des Einsatzes alternativer Energieträger (statt Diesel) die Änderung der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente well-to-wheel) von der Änderung des Energieverbrauchs abweicht, sind entsprechende Zahlenangaben separat ausgewiesen.

Beim zukünftig möglichen Paket B können mit dem Dieselmotor (mit Abgaswärmensenutzung ORC) ca. 21 % Energie und Treibhausgase eingespart werden, mit einem Gasmotor (ohne ORC) ca. 2 % Energie und ca. 19 % Treibhausgase und beim Parallelhybrid (ohne ORC) sind es ca. 24 %.

Das Sattelzugmodell wurde ebenfalls auf dem Regional Delivery Cycle simuliert, ohne ORC, weil dessen Verhalten aufgrund des instationären Motorbetriebs nicht sicher nachgebildet werden konnte. Die Sparpotenziale sind etwas geringer als im Fernverkehrszyklus. Ein Grund dafür ist die niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit des Regionalverteilerzyklus (58,6 km/h) zum Fernverkehr (73,2 km/h). Dadurch ist der Effekt der aerodynamischen Anbauteile geringer, die besonders bei hohen Geschwindigkeiten wirksam sind.

Die Potenziale der Maßnahmenpakete A und B für Verteiler-Lkw und Stadtbus zeigt Abbildung 4.

Der betrachtete Fahrzeugtyp **Solo-Lkw, zGG 12 t** ist repräsentativ für Verteiler-Lkw der Gewichtsklassen 7,5 bis 18 t. Neben den Antriebsvarianten Dieselmotor, Gasmotor mit CNG-Tank (68,1 g CO₂e/MJ nach DIN EN 16258) und elektrischer Parallelhybrid mit Dieselmotor wurden Maßnahmenpakete auch für ein batterieelektrisches Fahrzeug simuliert.

- ▶ Die Maßnahmen beim Paket A sind: aerodynamische Verbesserungen mit Teilverkleidung und kurzem Heckeneinzug 0,5 m, aktuelle energieeffiziente Reifen (B-D, Referenzfahrzeug C-D), Start-Stopp-Automatik, Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h, sparsame Nebenverbraucher.
- ▶ Beim Paket B kommen hinzu: höherer Motorwirkungsgrad, verringerte Schalt- und Achsgetriebeverluste, Rückfahrkameras, zukünftige energieeffiziente Reifen (A-A), Leichtbau 200 kg, LED Scheinwerfer.

Mit den Maßnahmen in Paket A können bei Lkw mit Verbrennungsmotor beim reinen Dieselmotor 8 % Kraftstoff und Treibhausgase, beim Parallelhybrid 15 % gegenüber dem Referenzfahrzeug EURO VI gespart werden, Mit Gasmotor steigt der Energieverbrauch um 9 %, aber die Emissionen sinken um ca. 18 %.

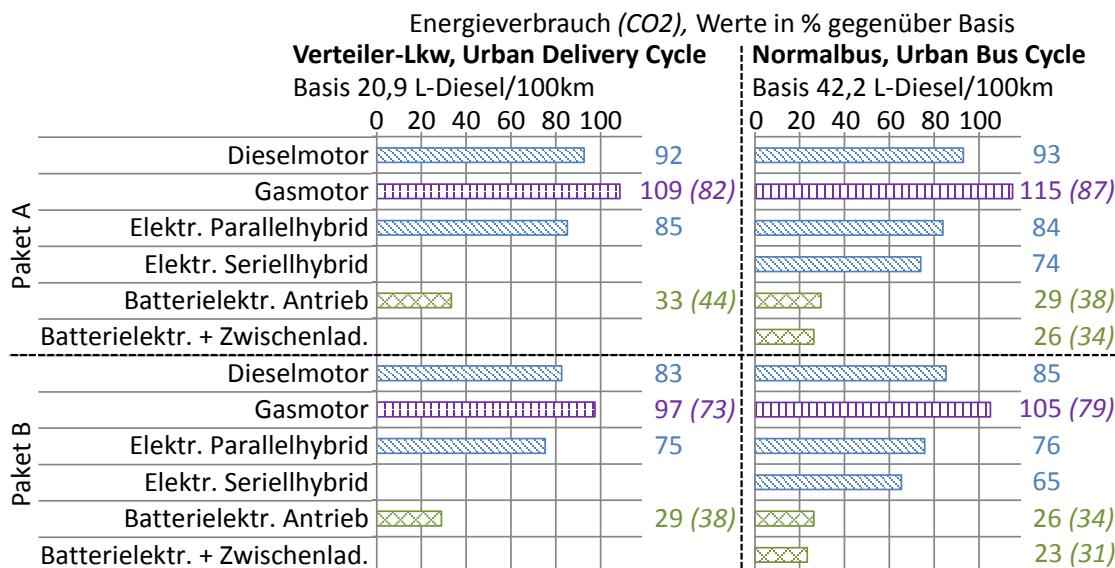
Deutlich höhere Reduktionspotenziale bietet der batterieelektrische Antrieb mit 67 % Endenergieverbrauchsreduktion und 56 % Treibhausgasminderung. Hier zeigt sich der prinzipielle Vorteil von Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Während die Umwandlung von Treibstoff in Bewegungsenergie bei Verbrennungsmotoren verfahrensbedingt mit Verlusten von 50 bis 65 % behaftet ist, liegt der Wirkungsgrad von Elektromotoren bei über 90%, so dass der Endenergiebedarf für die gleiche Bewegungsenergie deutlich geringer ist. Allerdings fallen beim Elektromotor je nach Strombereitstellungspfad (Kohle, Gas, Atom, Wind, Wasser, Solar) Umwandlungsverluste im Kraftwerk an. Der hier in den Berechnungen verwendete mittlere Treibhausgas-Emissionsfaktor pro Endenergie (Strommix der EU27-Länder nach DIN EN 16258) ist mit 118 g CO₂e/MJ_{el} deutlich höher als bei Diesel und Erdgas. Durch den ca. doppelt so hohen Wirkungsgrad von Elektromaschinen gegenüber Verbrennungsmotoren und die Möglichkeit zur Energierückgewinnung (als Nutzbremsen im Fahrzeugbetrieb) wird trotzdem insgesamt eine große Treibhausgasmenge eingespart.

Mit dem zukünftig möglichen Paket B steigen die Sparpotenziale weiter. Mit einem so verbesserten Diesel-Lkw können ca. 17 % eingespart werden, beim Gasmotor sind es ca. 27 % Treibhausgase. Der elektrische Parallelhybrid erlaubt hier ca. 25 % Reduktion von Endenergie und Emissionen, der batterieelektrische Lkw spart ca. 71 % Endenergie und ca. 62 % Treibhausgase ein.

Beim **Stadtbus 18 t (12 m Länge)** kamen zusätzlich zu den Antriebsarten der Lkw (Gasmotor mit CNG-Tank) die Antriebskonzepte elektrischer Serienhybrid sowie batterieelektrischer Antrieb mit Zwischenladung dazu. Beim Batteriebus mit Zwischenladung wurde eine gegenüber dem rein batterieelektrischen Bus deutlich kleinere Batterie berücksichtigt (Kosten- und Gewichtsaspekte), deren Ladung für maximal einen Umlauf auf einer Buslinie reicht (Nachladung an jeder Endhaltestelle - also zweimal pro Umlauf - für ca. 10 min.).

- ▶ Maßnahmenpaket A besteht aus den Einzelmaßnahmen: aktuelle energieeffiziente Reifen (C-C, Referenzfahrzeug D-D), Start-Stopp-Automatik, sparsame Nebenverbraucher ,
- ▶ Im Paket B kommen hinzu: höherer Motorwirkungsgrad, verringerte Achsgetriebeverluste, zukünftige energieeffiziente Reifen (A-A), Leichtbau 350 kg, LED Scheinwerfer, Teil-Isolation des Fahrgastrauums.

Abbildung 4 Potenziale der Maßnahmenpakete beim Verteiler-Lkw und Stadtbus



Die dargestellten Balken zeigen den geänderten Endenergieverbrauch. Wo aufgrund des Einsatzes alternativer Energieträger (statt Diesel) die Änderung der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente well-to-wheel) von der Änderung des Energieverbrauchs abweicht, sind entsprechende Zahlenangaben separat ausgewiesen.

Der Stadtbus mit dem Sparpaket A kann beim konventionellen Antrieb per Dieselmotor ca. 7 % Endenergie und Treibhausgase sparen, mit einem Gasmotor sind es ca. 15 % mehr Energie, aber ca. 13 % weniger Emissionen. Die Hybridantriebsstränge bieten mit dem Sparpaket A im Vergleich zu einem aktuellen EURO VI Dieselbus ein Reduktionspotential von ca. 16 % (Parallelhybrid) bis 26 % (Seriellhybrid). Dass der Seriellhybrid ein höheres Sparpotential als der Parallelhybrid hat, liegt hauptsächlich an der größeren Elektromaschine des verwendeten Fahrzeugmodells und *nicht* an der unterschiedlichen Antriebsstrangstruktur (siehe Kapitel 2.4.3.2). Wie beim Verteiler-Lkw sind die Endenergie- und Treibhausgasminderungspotenziale bei rein elektrischen Fahrzeugen am größten. Das Reduktionspotenzial des Batteriebusses ohne Zwischenladung ist wegen des höheren Fahrzeuggewichtes etwas geringer als beim Bus mit regelmäßiger Zwischenladung.

Mit den zusätzlichen Technologien in Paket B können bei allen Antriebskonzepten zusätzliche Endenergie- und Treibhausgasminderungen gegenüber Paket A erreicht werden (vgl. Abbildung 4). Die Hybrid- und Elektrobusse profitieren dabei besonders vom gesunkenen Rollwiderstand zukünftiger Reifen, weil diese dann weniger "mitbremsen" und somit mehr Bremsleistung rekuperiert werden kann.

Die Potenzialuntersuchungen zeigen, dass mit gemeinsamem Einsatz heute verfügbarer Technologien wie in den hier definierten Maßnahmenpaketen A Treibhausgasminderungen bei reinen Dieselfahrzeugen je nach Fahrzeugklasse von 7 % bis 11 % erreicht werden können, bei Hybridfahrzeugen 14 % (Sattelzug) bis 26 % (Stadtbus). Fahrzeuge mit Gasmotor führen zu einem Anstieg des Endenergieverbrauchs gegenüber den betrachteten EURO VI-Referenzfahrzeugen, aber die Treibhausgasemissionen können um 13-19 % sinken. Weitere Technologien, deren technologische Machbarkeit zeitlich absehbar ist, können je nach Fahrzeugklasse, Fahrprofil und Antriebskonzept weitere 6 % bis 10 % Treibhausgasminderung bringen. Durch Einsatz rein elektrischer Fahrzeuge können die Treibhausgasemissionen (well-to-wheel) bereits heute mehr als halbiert werden. Beim zusätzlichen Einsatz von weiteren in absehbarer Zukunft verfügbaren Technologien sind 60 % bis 70 % Treibhausgasminderung mit heutigem mittlerem Strommix der EU27-Länder möglich.

3. Kosten der untersuchten Maßnahmen zur Treibhausgasminderung

Wesentliche Voraussetzung für eine Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Fahrzeugtechnologien ist deren Kosteneffizienz. Damit ist die Analyse von Änderungen der Fahrzeugkosten eine wichtige Fragestellung in der Bewertung der untersuchten Technologien.

- ▶ Für die Fahrzeugbetreiber lohnt sich der Einsatz betriebswirtschaftlich nur, wenn die Zusatzkosten für den Einsatz der Technologien niedriger liegen als die Einsparungen bei den Kraftstoffkosten.
- ▶ Aus gesellschaftlicher Perspektive stellt sich die Frage, welche Minderungen an Treibhausgasen heute bzw. perspektivisch zu welchen Kosten möglich sind.

Für die analysierten Technologien wurden deshalb die Betriebswirtschaftlichkeit untersucht und Treibhausgasvermeidungskosten abgeleitet. Zudem wurden für die zusammengestellten Maßnahmenpakete Kostenkurven für die Grenzvermeidungskosten („MAC-Kurve“) und kumulierte Vermeidungskosten ermittelt.

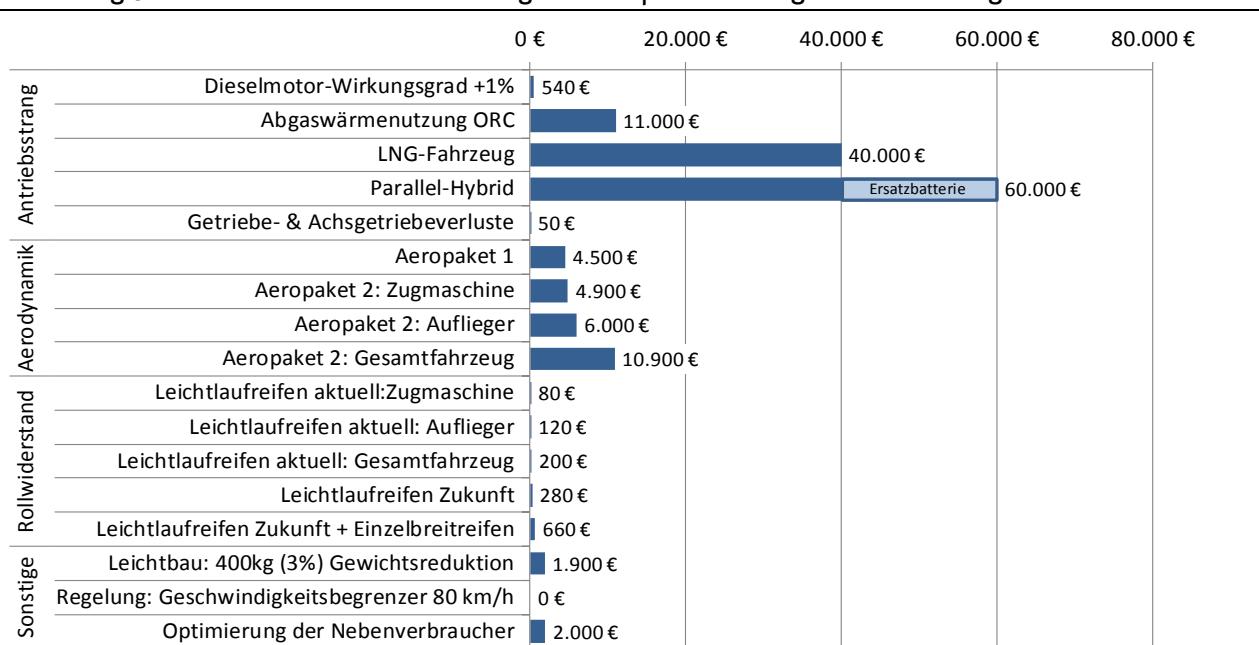
Technologiespezifische Zusatzkosten für die Fahrzeugbetreiber

In der Kostenanalyse wurden heute anfallende zusätzliche Anschaffungskosten für ein Fahrzeug mit den untersuchten zusätzlichen kraftstoffsparenden Technologien abgeschätzt. Grundlage dazu sind frei verfügbare Preisinformationen für bereits jetzt am Markt erhältliche Technologien, z. B. aus Preislisten und Fachzeitschriften. Für noch nicht verfügbare Technologien wurden Markteinführungspreise u.a. auf Basis von wissenschaftlichen Studien abgeschätzt. Teilweise weisen die ermittelten Anschaffungskosten für einzelne Technologien eine erhebliche Bandbreite zwischen verschiedenen Datenquellen auf. In diesen Fällen wurden für die weiteren Analysen mittlere Zusatzkosten für die Anschaffung verwendet.

Bei einem **Sattelzug mit 40 t** zulässigem Gesamtgewicht (vgl. Abbildung) bewegen sich die mittleren zusätzlichen Anschaffungskosten für die ausgewählten Technologiebündel aktuell zwischen 0 und ca. 60.000 Euro und können damit die gesamten Anschaffungskosten für einen Sattelzug um mehr als 50 % erhöhen.

- ▶ Ein Geschwindigkeitsbegrenzer auf 80 km/h verursacht keine Zusatzkosten. Der Einsatz von Leichtlaufreifen sowie die Maßnahmen zur Verbesserung des Motorwirkungsgrades und zur Verringerung von Achs- und Getriebeverlusten kosten unter 1.000 Euro pro Fahrzeug.
- ▶ Etwa 2.000 bis 8.000 Euro kosten die Optimierung von Aerodynamik und Nebenverbrauchern sowie begrenzter Leichtbau (Leergewichtsreduktion um 3 %). Für eine Abgaswärmenumutzung (ORC) wurden zusätzliche Anschaffungskosten bei Markteinführung von durchschnittlich 11.000 Euro abgeschätzt.
- ▶ Am teuersten ist die Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativem Antriebskonzept. Sattelzüge mit Erdgasmotor und LNG-Tank sind bereits heute erhältlich, dagegen gibt es bisher noch keine serienreifen Hybrid-Sattelzüge. Die angegebenen zusätzlichen Anschaffungskosten entsprechen daher einem angenommenen Preis bei Markteinführung, der sich zukünftig prinzipiell deutlich reduzieren kann.

Abbildung 5 Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Sattelzug 40 t



Beim **Solo-Lkw mit 12 t zGG** bewegen sich zusätzliche Anschaffungskosten für die ausgewählten Technologiebündel aktuell überwiegend zwischen 0 Euro (Geschwindigkeitsbegrenzer) und ca. 25.000 Euro (Parallelhybrid, zzgl. Kosten für späteren Batterietausch). Eine Ausnahme ist der batterieelektrische Lkw, der etwa das Dreifache eines Diesel-Lkws kostet.

Ähnlich ist das Bild beim **Stadtbus 18 t zGG**. Hier betragen die zusätzlichen Anschaffungskosten für die betrachteten Einzeloptimierungen im Mittel 300 bis 4.000 Euro. Deutlich teurer ist die Investition für Fahrzeuge mit alternativem Antriebskonzept. Ein Erdgasbus kostet im Mittel zusätzliche 34.000 Euro, ein Hybridbus ca. 70.000 bis 100.000 Euro mehr. Am teuersten ist ein batterieelektrischer Bus. Aus Preisinformationen für in Deutschland verkaufte Elektrobusse mit oder ohne Option zur Zwischenladung wurden aktuelle Aufpreise gegenüber einem Dieselbus im Bereich von ca. 100.000 Euro bis hin zu 400.000 Euro ermittelt.

Der Einsatz energiesparender Technologien kann auch verschiedene variable Fahrzeugkosten betreffen. Bei einigen Maßnahmen können diese fahrleistungsabhängigen Zusatzkosten langfristig deutlich höher sein als die einmaligen zusätzlichen Anschaffungskosten beim Fahrzeugkauf. Daher wurden folgende fahrleistungsabhängigen variablen Fahrzeugkostenänderungen in die Kostenanalysen einbezogen:

- ▶ Änderungen des Harnstoffverbrauchs für SCR-Anlagen (Dieselmotorwirkungsgrad, Erdgasfahrzeug),
- ▶ Ölwechsel (Leichtlauföle zur Verbesserung des Dieselmotorwirkungsgrades und Verringerung von Schalt- und Achsgetriebeverlusten),
- ▶ Reifenwechsel (energieeffiziente Reifen) sowie
- ▶ erhöhte Wartungskosten (Erdgasfahrzeuge).

Änderung der gesamten Fahrzeugkosten durch die ausgewählten Maßnahmen

Die untersuchten technologischen Maßnahmen rechnen sich nur betriebswirtschaftlich, wenn die mit den Technologien erreichten Einsparungen von Kraftstoffkosten insgesamt höher sind als die zusätzlich anfallenden Kosten durch die Technologienutzung. Daher wurden auf Basis der spezifischen Energiesparpotenziale der Maßnahmen mögliche Kraftstoffkosteneinsparungen für Fahrzeuge mit mittleren Jahresfahrleistungen (je Einsatzzweck) und unter Annahme durchschnittlicher heutiger Kraftstoffpreise abgeschätzt und den technologiespezifischen Zusatzkosten gegenübergestellt. Viele Fahrzeugbetreiber, insbesondere im Fernverkehr, streben eine Amortisation zusätzlicher Fahrzeugtechnologien in weniger als drei Jahren an. Daher erfolgte auch der Vergleich von Kraftstoffkosteneinsparungen und Zusatzkosten zunächst für diesen Zeitraum. In anderen Bereichen (z.B. Stadtverteiler, ÖPNV) sind je nach Fahrzeugbetreiber auch längerfristige Amortisationserwartungen möglich. Daher wurde in einem zweiten Schritt unter umgekehrter Fragestellung abgeschätzt, nach wie vielen Jahren sich die untersuchten Maßnahmen unter Annahme heutiger Zusatzkosten und gleichbleibender Kraftstoffpreise amortisieren würden.

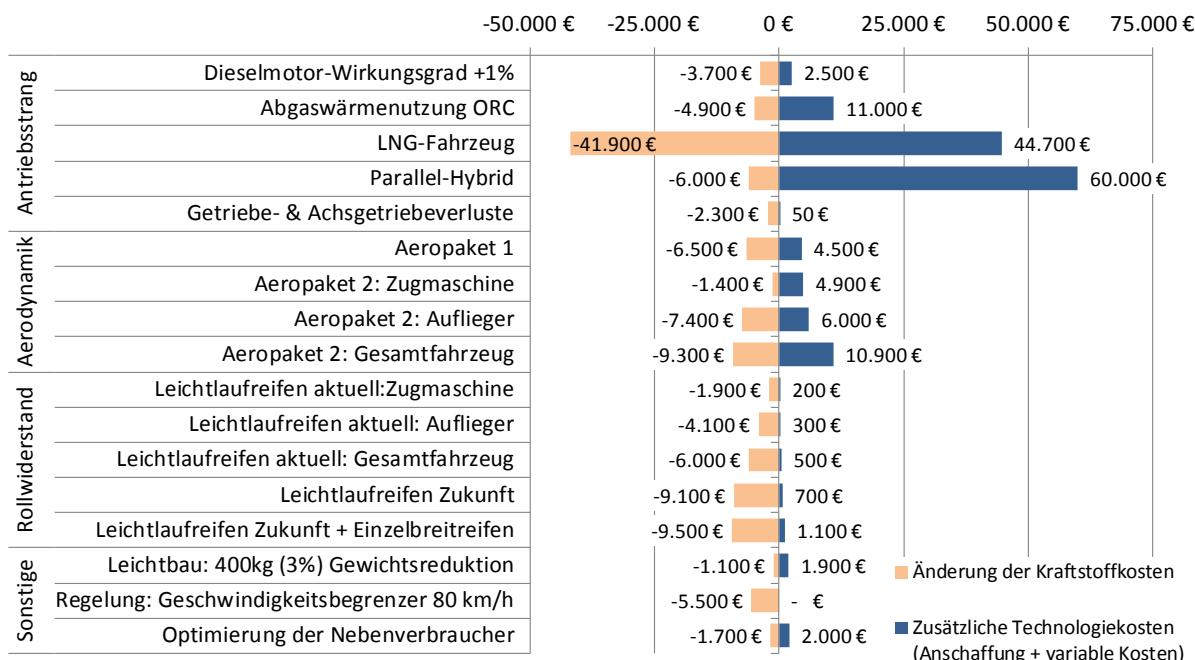
Sattelzüge mit 40 t zGG fahren zu einem großen Teil im mehrtägigen Fernverkehr. Vielfach sind Fahrzeuge dieser Größenklasse aber auch oder sogar überwiegend im regionalen Verteilerverkehr aktiv. Daher wurden in den Potenzial- und Kostenanalysen beide Einsatzzwecke untersucht. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Kostenanalyse für den Fernverkehr. Viele Technologien können hier bereits heute innerhalb von drei Jahren höhere Einsparungen an Kraftstoffkosten bringen, als ihr Einsatz an zusätzlichen Kosten verursacht. Das gilt insbesondere für die Maßnahmen mit besonders geringen Anschaffungskosten. Dagegen kosten die alternativen Antriebskonzepte (LNG, Parallelhybrid), Abgaswärmennutzung sowie Leichtbau und die Nebenverbraucher-Optimierung mehr, als in drei Jahren an Kraftstoffkosten eingespart wird. Im Fernverkehr beträgt die Amortisationszeit dieser Technologien drei bis vier Jahre (LNG-Fahrzeug, Nebenverbraucher) bis hin zu 30 Jahren beim Parallelhybrid. Im regionalen Verteilerverkehr sind die Amortisationszeiträume üblicherweise länger als im Fernverkehr hauptsächlich aufgrund der geringeren Jahresfahrleistungen.

Beim **Solo-Lkw mit 12 t zGG** sind die Potenziale zur Kraftstoffkosteneinsparung wegen der geringeren spezifischen Potenziale und niedrigeren Jahresfahrleistungen deutlich niedriger als beim Sattelzug. Die meisten untersuchten Maßnahmen bringen in drei Jahren Kosteneinsparungen unter 1.000 Euro. Nur für alternative Antriebe (CNG, Parallelhybrid, Elektro) und durch Effizienzreifen Klasse A wurden höhere Einsparungen

ermittelt. Die höchste Ersparnis der Energiekosten resultiert beim Elektro-Lkw mit ca. 15.000 Euro in drei Jahren. Leichtlauföle und Leichtlaufreifen amortisieren sich im ersten Jahr, Optimierungen am Dieselmotor, Fahrzeugregelung und der Kauf eines CNG-Lkw nach drei bis vier Jahren. Alle übrigen Maßnahmen haben bei heutigen Kosten hohe Amortisationszeiträume von meist deutlich über zehn Jahren. Beim Hybrid- und batterieelektrischen Lkw liegen die Amortisationszeiträume bisher wegen der hohen zusätzlichen Anschaffungskosten unter heutigen Rahmenbedingungen außerhalb der üblichen Fahrzeugelebensdauer.

Beim **Stadtbus mit 18 t zGG** amortisieren sich bereits innerhalb von ein bis zwei Jahren Leichtlaufreifen sowie die Optimierungen von Dieselmotorwirkungsgrad und Achsgetriebeverlusten. Eine Leergewichtsreduktion um drei Prozent rechnet sich nach drei Jahren. Auch die Optimierung der Nebenverbraucher rechnet sich innerhalb von fünf Jahren. Ebenso der Einsatz eines Erdgasbusses, soweit keine zusätzlichen Aufwendungen zur Bereitstellung der Versorgungsinfrastruktur erforderlich sind und die derzeitige Begünstigung bei der Energiesteuer erhalten bleibt. Hybridbusse und batterieelektrische Busse haben unter heutigen Bedingungen noch höhere Zusatzkosten bei ihrer Anschaffung als sie über die mittlere Lebensdauer an Energiekosten einsparen können. Bei Elektrobussen mit Zwischenladung erscheint mit den zugrunde gelegten zusätzlichen Anschaffungskosten eine Amortisation bereits innerhalb der Fahrzeugelebensdauer möglich.

Abbildung 6 Änderung der Fahrzeugkosten eines Sattelzugs 40 t im Fernverkehr in drei Jahren



Bei alternativen Antriebstechnologien sind im Falle zukünftig steigender Produktionsmengen durch Lerneffekte deutliche Verringerungen der Herstellungskosten und damit sinkende Anschaffungskosten gegenüber heutigen Rahmenbedingungen zu erwarten. Gleichzeitig gehen aktuelle Szenarien davon aus, dass die Kraftstoffpreise zukünftig auch inflationsbereinigt steigen werden. Zur Beurteilung, wie sich zukünftige Lerneffekte und steigende Kraftstoffpreise auf die Kosteneffizienz bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen auswirken, erfolgte eine ergänzende Analyse möglicher zukünftiger Änderungen der Amortisationszeiten.

In zwei Szenarien wurde eine Reduktion der zusätzlichen Anschaffungskosten um jährlich 5 Prozent (Szenario A) bzw. 10 Prozent (Szenario B) angenommen sowie ein Anstieg der inflationsbereinigten Kraftstoff- und Strompreise um 2,0 Prozent pro Jahr. Beim Parallel-Hybrid wurde zusätzlich die Variante untersucht, wenn zukünftige Batteriegenerationen eine erhöhte Haltbarkeit haben und somit wie bei batterieelektrischen Fahrzeugen kein Batterietausch innerhalb der Fahrzeugelebensdauer mehr erforderlich wird. Die folgende Tabelle zeigt die Veränderung der Amortisationszeiten in den Szenarien.

Beim Sattelzug 40 t wird im Fernverkehr der untersuchte Parallelhybrid selbst mit der in Szenario B angenommenen starken Senkung der zusätzlichen Anschaffungskosten um über 60 % nur wirtschaftlich, wenn

gleichzeitig zukünftige Batterien mit längerer Haltbarkeit einen Batterietausch obsolet machen. Im Regionalverkehr könnte ein Parallelhybrid auch mit Batterietausch kostendeckend werden. Beim Solo-Lkw können Parallelhybrid wie auch batterieelektrischer Lkw über die mittlere Fahrzeuglebensdauer kostendeckend werden. Allerdings bleibt die Amortisationsdauer auch im Falle einer Reduktion der zusätzlichen Investitionskosten um über 60 Prozent deutlich über den üblichen, wesentlich kurzfristigeren Amortisationszielen der Lkw-Betreiber. Beim Stadtbus wären Hybrid- oder Elektrofahrzeuge unter den angenommenen Kostensenkungen nach 7-11 Jahren (Szenario A) bzw. 4-6 Jahren (Szenario B) betriebswirtschaftlich günstiger als ein Dieselbus. Bei Elektrobussen mit Zwischenladung wären die Amortisationszeiten noch um 1-2 Jahre kürzer.

Demnach könnte ein Betrieb von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen grundsätzlich in Zukunft kostendeckend bzw. mit Kosteneinsparungen für die Fahrzeugbetreiber möglich werden. Voraussetzung dafür ist eine deutliche Abnahme der notwendigen zusätzlichen Anschaffungskosten für solche Fahrzeuge.

Tabelle 1 Mittlere Amortisationszeiten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen in den Szenarien

		Mittlere Amortisationszeiten in Jahren in zehn Jahren		
		Aktuell	Szenario A	Szenario B
Sattelzug 40 t Fernverkehr	Parallelhybrid - mit Batterietausch	30,0	15,0	8,8
	- ohne Batterietausch		10,0	5,8
Sattelzug 40 t Regionalverkehr	Parallelhybrid - mit Batterietausch	27,2	13,6	7,9
	- ohne Batterietausch		9,1	5,3
Solo-Lkw 12 t	Parallelhybrid - mit Batterietausch	40,2	20,1	11,7
	- ohne Batterietausch		14,4	8,4
	Elektro-Lkw	25,7	12,8	7,5
Stadtbus 18 t	Parallelhybrid - mit Batterietausch	22,0	11,0	6,4
	- ohne Batterietausch		8,5	5,0
	Seriellhybrid	14,8	7,4	4,3
	Elektrobus	14,4	7,2	4,2
Elektrobus mit Zwischenladung		10,7	5,3	3,1
Farblegende zur Amortisationszeit		≤3 Jahre	>3-6 Jahre	>6 Jahre, aber innerhalb Lebensdauer
				länger als Fahrzeuglebensdauer

Kosteneffizienz der Einzelmaßnahmen zur Treibhausgasminderung

Die Treibhausgasvermeidungskosten zeigen, zu welchen Kosten die Treibhausgasemissionen um 1 Tonne CO₂-Äquivalente verringert werden können (Euro / Tonne CO₂e). Damit wird ein Vergleich der Kosteneffizienz zur Emissionsminderung zwischen Maßnahmen im Verkehr, aber auch z.B. mit Maßnahmen aus anderen Bereichen möglich. Die spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten fahrzeugbezogener Maßnahmen berechnen sich als Quotient aus der Änderung der Fahrzeugkosten und den insgesamt erreichbaren Treibhausgasminderungen über einen festgelegten Zeitraum.

Je länger der Betrachtungszeitraum und damit die Fahrleistungen gewählt werden, umso höher ist die Höhe der Treibhausgasminderungen pro Fahrzeug ebenso wie der eingesparten Kraftstoffkosten.

$$\text{Treibhausgasvermeidungskosten} \left(\frac{\text{€}}{\text{Tonnen CO}_2\text{e}} \right) = \frac{[\text{Technologiezusatzkosten (€)}] - [\text{Kraftstoffkosteneinsparung (€)}]}{[\text{Treibhausgasminderung (Tonnen CO}_2\text{e)}]}$$

Aus gesellschaftlicher Perspektive ist die komplette Fahrzeuglebensdauer entscheidend. Dagegen beurteilen Fahrzeugbetreiber die Kosteneffizienz von Technologien nur für die Nutzungsdauer im eigenen Unterneh-

men und an den Fahrzeugkauf geknüpfte Amortisationserwartungen. Deshalb erfolgte eine Berechnung spezifischer Treibhausgasvermeidungskosten für die untersuchten Maßnahmen für verschiedene Zeiträume.

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft für den Sattelzug 40 t im Fernverkehr die Maßnahmen in der Reihenfolge ihrer Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung. Die spezifischen Vermeidungskosten liegen insgesamt in einer Bandbreite von -4.800 bis +3.300 €/t CO₂e. Bei einer Betrachtung über drei Fahrzeugjahre ergeben sich erwartungsgemäß teilweise deutlich höhere Vermeidungskosten als bei Betrachtung der mittleren Fahrzeuglebensdauer von ca. 8 Jahren. In der 3-Jahresbetrachtung verursachen einige Maßnahmen Zusatzkosten, haben aber über längere Betrachtungszeiträume negative Vermeidungskosten. So haben 10 von 17 Maßnahmen bereits innerhalb von drei Jahren negative Vermeidungskosten, über sechs Jahre sind es dagegen 14 und über die gesamte Lebensdauer 15 Maßnahmen.

Auch die Rangfolge der Maßnahmen ändert sich mit der Länge des Betrachtungszeitraums. Beispielsweise hat ein LNG-Sattelzug aufgrund der hohen Startinvestition in den ersten drei Jahren positive Vermeidungskosten und steht in der Rangfolge erst an 15. Position. Bereits bei einer Ausweitung der Betrachtung auf sechs Jahre werden mit zunehmender Kraftstoffersparnis die Vermeidungskosten negativ und der LNG-Sattelzug rückt in der Kosteneffizienz-Rangfolge nach vorn.

Abbildung 7 Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

	3 Jahre	Euro / t CO ₂ -Äqu.	6 Jahre	Euro / t CO ₂ -Äqu.	Lebensdauer (8 Jahre)	Euro / t CO ₂ -Äqu.
1	80 km/h-Regelung	-370 €	Erdgasfahrzeug (LNG)	-3.756 €	Erdgasfahrzeug (LNG)	-4.849 €
2	Getriebe- & Achsverluste	-363 €	80 km/h-Regelung	-370 €	80 km/h-Regelung	-370 €
3	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-342 €	Getriebe- & Achsverluste	-363 €	Getriebe- & Achsverluste	-363 €
4	Leichtl.reifen Zukunft	-341 €	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-342 €	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-342 €
5	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-338 €	Leichtl.reifen Zukunft	-341 €	Leichtl.reifen Zukunft	-341 €
6	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-329 €	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-338 €	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-338 €
7	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-327 €	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-335 €	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-336 €
8	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-124 €	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-329 €	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-329 €
9	Aeropaket 1	-115 €	Aeropaket 1	-243 €	Aeropaket 1	-275 €
10	Aeropaket 2: Auflieger	-70 €	Aeropaket 2: Auflieger	-220 €	Aeropaket 2: Auflieger	-258 €
11	Aeropaket 2: Komplett	66 €	Aeropaket 2: Komplett	-152 €	Aeropaket 2: Komplett	-207 €
12	Optim. Nebenverbraucher	66 €	Optim. Nebenverbraucher	-152 €	Optim. Nebenverbraucher	-207 €
13	Leichtbau	276 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-147 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-153 €
14	Abgaswärmennutzung ORC	467 €	Leichtbau	-47 €	Leichtbau	-128 €
15	Erdgasfahrzeug (LNG)	617 €	Abgaswärmennutzung ORC	48 €	Abgaswärmennutzung ORC	-57 €
16	Aeropaket 2: SZM	946 €	Aeropaket 2: SZM	288 €	Aeropaket 2: SZM	123 €
17	Parallel-Hybrid	3.340 €	Parallel-Hybrid	1.485 €	Parallel-Hybrid	1.021 €

Die Analysen der Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung zeigen für alle untersuchten Fahrzeugklassen, dass viele Einzelmaßnahmen unter heutigen Rahmenbedingungen negative Vermeidungskosten haben. Insbesondere Maßnahmen zur Reduktion der Fahrwiderstände amortisieren sich oft schon in den ersten drei Jahren und erfüllen somit prinzipiell auch die wirtschaftlichen Erwartungen vieler Fahrzeugbetreiber. Bei Akzeptanz längerer Amortisationszeiten kämen weitere Technologien mit effektiven Kostenminderungen hinzu. Die zeitliche Perspektive, unter der die Kosteneffizienz von Treibhausgasminderungsmaßnahmen betrachtet wird, hat somit erhebliche Relevanz zur Einstufung der Kosteneffizienz einer Technologie.

Aus gesellschaftlicher Perspektive, d. h. über die mittlere Fahrzeuglebensdauer, haben die meisten untersuchten Technologien negative Vermeidungskosten (d.h. der Einsatz ist auch ein ökonomischer Vorteil). Wichtigste Ausnahme sind Hybrid- und Elektrofahrzeuge, die mit den aktuellen hohen Preisen auch über das komplette Fahrzeugleben noch zusätzliche Kosten verursachen, d.h. positive Vermeidungskosten haben. Allerdings haben die Szenarienrechnungen gezeigt, dass bei entsprechender zukünftiger Reduktion der Technologiekosten (Lern- und Skaleneffekte mit steigenden Produktionsmengen) auch für diese Technologien negative Vermeidungskosten denkbar sind.

Kosteneffizienz von Maßnahmenpaketen zur Treibhausgasminderung

Für die in den Potenzialanalysen definierten Maßnahmenpakete erfolgten verschiedene Kostenanalysen

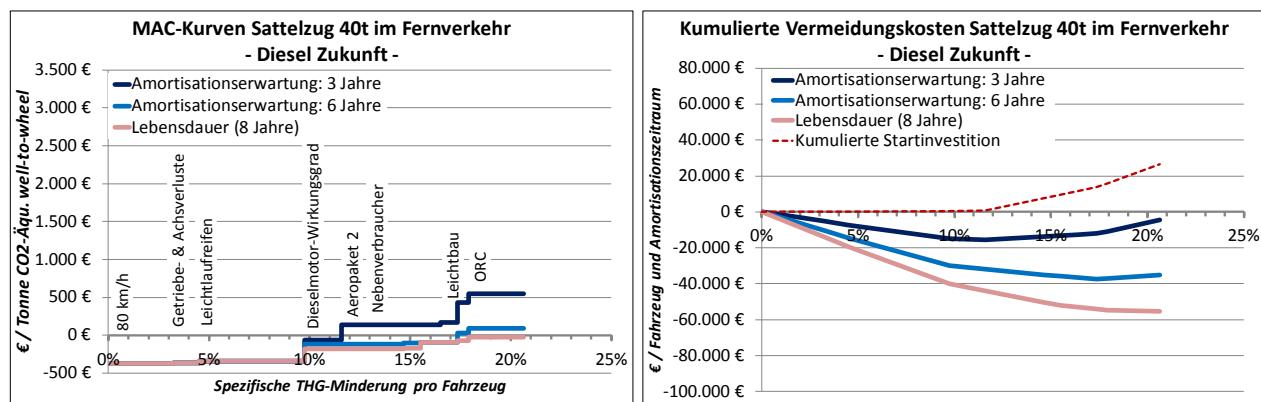
- ▶ Mittlere Treibhausgasvermeidungskosten der Maßnahmenpakete wurden über die kombinierten Treibhausgasminderungspotenziale sowie Fahrzeugkostenänderungen der enthaltenen Maßnahmen ermittelt.
- ▶ Für jedes Paket wurden MAC-Kurven (Marginal Abatement Costs - Grenzkosten zur Treibhausgasminderung) abgeleitet.
- ▶ Darauf aufbauend wurden die kumulierten Vermeidungskosten pro Fahrzeug berechnet.

MAC-Kurven zeigen, zu welchen Grenzkosten welche zusätzlichen Emissionsminderungen bei einem betrachteten System (z.B. Lkw-Maßnahmen) möglich sind. Dazu wurden die Maßnahmen in den Paketen nach ihrer individuellen Kosteneffizienz (Grenzkosten in €/ t CO₂e) sortiert und ausgehend von der kosteneffizientesten Maßnahme kombiniert. Für jede hinzukommende Maßnahme wurden das zusätzliche Treibhausgasminderungspotenzial und die spezifischen Kosten der Zusatzminderung bestimmt und aufgetragen.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch für das Maßnahmenpaket „Diesel B“ beim Sattelzug im Fernverkehr links MAC-Kurven sowie rechts kumulierte Treibhausgasvermeidungskosten pro Fahrzeug, d.h. die aufsummierte Änderung der Fahrzeugkosten mit der schrittweisen Kombination der Einzelmaßnahmen. Die Darstellung zeigt also, zu welchen Gesamtkostenänderungen pro Fahrzeug es bei welchen Treibhausgasminderungen kommt. Die maximale Kosteneinsparung pro Fahrzeug wird durch alleinige Kombination aller Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten erreicht. Weitere Maßnahmen (mit positiven Vermeidungskosten) führen dann dazu, dass die Kostensparnis für den Spediteur kleiner wird.

Beim dieselbetriebenen Sattelzug 40 t im Fernverkehr sind im Paket „Diesel B“ durch Kombination von Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten 12 Prozent Treibhausgasminderung innerhalb von drei Jahren bis 21 Prozent über die mittlere Fahrzeugglebensdauer möglich. Die maximale kumulierte Kostenmindehung pro Fahrzeug beträgt je nach Betrachtungszeitraum 15.000 bis 55.000 Euro. Selbst ein Ausschöpfen des kompletten Vermeidungspotenzials von 21 Prozent würde die Fahrzeugkosten bereits nach drei Jahren insgesamt um 4.000 Euro reduzieren, da die Kosteneinsparungen der Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten höher sind als die Zusatzkosten der Maßnahmen mit positiven Vermeidungskosten.

Abbildung 8 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten des Maßnahmenpakets Diesel B beim Sattelzug im Fernverkehr



Abschließend wurden für alle Maßnahmenpakete die maximalen kumulierten Treibhausgasminderungspotenziale mit negativen Vermeidungskosten den Gesamtpotenzialen gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigt sich klar, dass eine Beschränkung auf Maßnahmen, die spätestens nach drei Jahren Kostensparnisse bringen, die Treibhausgasminderungspotenziale eines Pakets nur begrenzt ausschöpfen würde. Mit Ausweitung der Amortisationserwartungen auf sechs Jahre oder mehr sind in den meisten Paketen deutliche zusätzliche Emissionsminderungen möglich, da die Zahl der Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten steigt.

Daran zeigt sich die Bedeutung der Amortisationserwartungen bei den Fahrzeughbetreibern für die Bewertung von Maßnahmen und somit für die Realisierbarkeit von Minderungspotenzialen durch energiesparende und treibhausgasmindernde Technologien. Könnten Fahrzeughbetreiber von längeren Amortisationszeiträumen überzeugt werden, würde das für eine Reihe von bereits heute oder zukünftig verfügbaren Technologien zur Treibhausgasminderung schwerer Nutzfahrzeuge eine stärkere Verbreitung fördern.

Tabelle 2 Anteilige Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete durch Maßnahmen mit im jeweiligen Betrachtungszeitraum negativen Vermeidungskosten

Fahrzeugklasse & Einsatzzweck	Maßnahmenpaket	Minderungspotenziale aller Maßnahmen pro Paket	Anteilige Minderungspotenziale von Maßnahmen im Paket mit negativen Vermeidungskosten		
			nach 3 Jahren	nach 6 Jahren	Innerhalb Lebensdauer
Sattelzug 40 t im Fernverkehr	Diesel A	11%	10%	+1%	+0%
	Erdgas (LNG) A	12%	10%	+2%	+0%
	Hybrid A	16%	10%	+1%	+0%
	Diesel B	21%	12%	+6%	+3%
	Erdgas (LNG) B	19%	10%	+9%	+1%
	Hybrid B	24%	12%	+6%	+1%
Sattelzug 40 t im Regionalverkehr	Diesel A	7%	4%	+0%	+2%
	Erdgas (LNG) A	9%	4%	+0%	+4%
	Hybrid A	16%	4%	+0%	+2%
	Diesel B	13%	9%	+0%	+1%
	Erdgas (LNG) B	15%	7%	+0%	+5%
	Hybrid B	23%	9%	+0%	+1%
Solo-Lkw 12 t im städtischen Liefer-verkehr	Diesel A	8%	4%	+2%	+0%
	Erdgas (CNG) A	18%	4%	+11%	+2%
	Hybrid A	15%	4%	+2%	+0%
	Elektro A	56%	2%	+0%	+2%
	Diesel B	17%	7%	+5%	+3%
	Erdgas (CNG) B	27%	7%	+14%	+3%
	Hybrid B	25%	7%	+5%	+3%
	Elektro A	62%	8%	+0%	+3%
Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus	Diesel A	7%	2%	+3%	+3%
	Erdgas (CNG) A	13%	2%	+3%	+9%
	Parallelhybrid A	16%	2%	+3%	+3%
	Seriellhybrid A	26%	2%	+3%	+3%
	Elektro A	62%	2%	+3%	+0%
	Elektro Zwischenlad. A	66%	2%	+3%	+61%
	Diesel B	15%	8%	+4%	+2%
	Erdgas (CNG) B	21%	6%	+12%	+2%
	Parallelhybrid B	24%	8%	+4%	+2%
	Seriellhybrid B	35%	8%	+4%	+2%
	Elektro B	66%	6%	+4%	+0%
	Elektro Zwischenlad. B	69%	6%	+4%	+59%

Unter aktuellen Rahmenbedingungen führt in allen untersuchten Fahrzeugklassen der Einsatz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen auch über deren gesamte Lebensdauer zu zusätzlichen Kosten, die meist auch durch gleichzeitigen Einsatz anderer Technologien mit negativen Vermeidungskosten nicht kompensiert werden können. Allerdings sind diese alternativen Antriebskonzepte noch nicht lange am Markt bzw. für einige Fahrzeugklassen noch gar nicht verfügbar. Bei einer stärkeren Verbreitung könnten die zusätzlichen Technologiekosten zukünftig deutlich sinken und auch für diese alternativen Antriebstechnologien negative Vermeidungskosten erreicht werden. Demnach wäre zukünftig die Erschließung erheblicher weiterer Treibhausgasminderungspotenziale möglich, wenn die Weiterentwicklung und Verbreitung alternativer Antriebe und damit eine Verringerung ihrer Kosten durch geeignete Maßnahmen gefördert wird.

4. Strategien zur Förderung der Einführung und Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen

Viele energiesparende und treibhausgasmindernde Technologien für schwere Nutzfahrzeuge, die bereits heute am Markt verfügbar sind, werden bisher nur von einem vergleichsweise geringen Anteil der Fahrzeugbetreiber eingesetzt. Daher wurden im Rahmend des Vorhabens mögliche politische Strategien diskutiert, welche die Einführung und Verbreitung solcher Technologien unterstützen können.

Im ersten Schritt wurden über Treibhausgasminderungspotenziale und Kosten (-Einsparungen) hinausgehende Voraussetzungen und Hemmnisse für eine Markteinführung und -verbreitung treibhausgasmindernder Technologien analysiert. Dazu gehören rechtliche und praktische Rahmenbedingungen ebenso wie Informationsdefizite und andere Akzeptanzhemmnisse bei Akteuren im Güterverkehr. Auf dieser Grundlage erfolgte im zweiten Schritt eine erste Analyse von Strategien, welche die Einführung und Verbreitung von energiesparenden Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen in Europa fördern können. Vor- und Nachteile verschiedener Strategien sowie deren Akzeptanz in der Güterlogistik-Branche wurden diskutiert. Ausgehend von den Einzelstrategien wurde eine strategische Roadmap skizziert, die verschiedene Strategien verknüpft.

Hemmnisse für die Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien

Zur Analyse von Voraussetzungen und Hemmnissen für eine Markteinführung und Verbreitung energiesparender Technologien wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, ergänzt durch einen Austausch mit Marktakteuren im Güterverkehr (Lkw-Hersteller, Fuhrbetriebe und Speditionen).

Die Einführung energiesparender Nutzfahrzeugtechnologien wird durch verschiedene Hemmnisse erschwert:

- ▶ **Technologiespezifische Hemmnisse** ergeben sich aus Eigenschaften (z. B. Abmessungen, Gewicht) einer bestimmten Technologie oder bestimmten Voraussetzungen, welche der Einsatz einer Technologie erfordert. Wesentliche technologiespezifische Hemmnisse betreffen insbesondere
 - Reduzierte Anwenderfreundlichkeit (z.B. Fahrerkomfort, zeitaufwändige Ablaufroutinen)
 - Reduktion des Fahrzeugnutzens zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben (z.B. für bauliche Veränderungen) oder durch verringerte Kompatibilität zu weltweiten Standards (z.B. Kranbarkeit)
 - Fehlende Versorgungsinfrastruktur und Service-Netze (z.B. für Erdgas- und Elektrofahrzeuge)
- ▶ **Finanzielle Hemmnisse** ergeben sich aus den absoluten Kosten (z.B. hohe Anschaffungskosten) oder aus der Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses einer Technologie (z.B. Beurteilung von Ausfallwahrscheinlichkeiten, Amortisationserwartungen, Wiederverkaufswert). Insbesondere kleinere Unternehmen haben oft zu geringe Personalkapazitäten zur Einschätzung von Kosteneinsparpotenzialen, verfügen nur über begrenzte eigene finanzielle Mittel und haben einen schlechteren Zugang zu Krediten.
- ▶ **Strukturelle Hemmnisse** ergeben sich aus den vorherrschenden Strukturen und Abläufen innerhalb der Logistik-Branche. Zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist die Bedeutung der Kraftstoffkosten für die Fahrzeugbetreiber, abhängig einerseits vom Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten des Betriebs und andererseits von der „Kraftstoff-Verantwortlichkeit“, d.h. wer letztlich die Kraftstoffkosten der Transportdienstleistung zu tragen hat. Kraftstoffkosten spielen insbesondere im Regional- und Fern-

verkehr mit einem Anteil von 20-30 % an den Gesamtkosten eine wichtige Rolle. Allerdings gibt es verschiedene Mechanismen, mit denen Fuhrunternehmer ihre Kraftstoff-Kosten an den Auftraggeber weitergeben können (z.B. Dieselpreis-Gleitklauseln). Je weiter jedoch diese Verantwortlichkeit abgegeben wird, desto geringer wird der Anreiz für Effizienzmaßnahmen im Fuhrpark des Fuhrunternehmers. Umgekehrt hat ein kleiner Auftraggeber einem großen Auftragnehmer gegenüber weniger Möglichkeiten zur Einflussnahme hinsichtlich der Verwendung von Energieeffizienz-Technologien.

- ▶ **Informationsdefizite** ergeben sich aus der Komplexität des Themas, insbesondere aus der Herausforderung, Minderungspotenziale und Kosten adäquat zu bestimmen und zu kommunizieren.

In der Bewertung der Hemmnisse wird zwischen den technologiespezifischen Hemmnissen und den übrigen differenziert. Die Beurteilung der Relevanz technologiespezifischer Hemmnisse hängt stark davon ab, wie wichtig die Technologie aus Sicht von Politik, Wirtschaft und Umwelt eingestuft wird. Zudem muss zwischen Hemmnissen mit einer ausschließenden und einer verzögernden Wirkung unterschieden werden.

Die weiteren technologieunabhängigen Hemmnisse sind stärker im Zusammenhang zu betrachten. Grundsätzlich ist nach Umfragen davon auszugehen, dass in der Gütertransportbranche ein Bewusstsein für energiesparende Technologien vorhanden ist. Als das zentrale Hemmnis für deren breitere Implementierung in den eingesetzten Fahrzeugen wird die fehlende Verfügbarkeit glaubwürdiger Informationen gesehen. Das Wissen über das Einsparpotenzial einer Technologie ist elementar zur Berechnung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Das Fehlen von Wirtschaftlichkeitsberechnungen wiederum erschwert die Beschaffung von Kapital für die zusätzlichen Anschaffungskosten. Vor allem kleine Firmen sind aufgrund geringer personeller und finanzieller Kapazitäten gehemmt, in neue Technologien zu investieren. Ergänzend sind auch geringere Verlässlichkeiten neuer Technologien eine wesentliche Barriere aus Sicht der Fahrzeughalter.

Maßnahmen zur Förderung des Technologieeinsatzes und der Verbreitung bei Nutzfahrzeugen

Ausgehend von der Hemmnisanalyse wurden Maßnahmen untersucht, wie die Einführung energiesparender Nutzfahrzeugtechnologien und deren Durchdringung der Fahrzeugflotte gefördert werden kann. Insbesondere wurden politische Anreize zur grundsätzlichen Steigerung der Kraftstoffeffizienz im Straßengüterverkehr beleuchtet. Die Maßnahmen wurden nach ihrem Wirkungsansatz in drei Gruppen eingordnet:

- ▶ **Information** umfasst Maßnahmen zur Bereitstellung und Verbreitung von Informationen;
- ▶ **Förderung** umfasst Maßnahmen, die auf eine finanzielle Unterstützung hinauslaufen;
- ▶ **Regulierung** umfasst Maßnahmen, welche auf Änderungen im Gesetz hinwirken.

Sowohl die Hemmnisanalyse als auch die Maßnahmenanalyse zeigen, dass eine Kombination verschiedener Maßnahmen angestrebt werden sollte, die unterschiedliche Hemmnisse und Zielgruppen adressieren. Daher wurden die vorgeschlagenen Maßnahmen in einer strategischen Roadmap zusammengeführt (Abbildung 9).

Information: Potenzielle Käufer sind auf zuverlässige und transparente Informationen zu Einsparpotenzialen und Kosten einer Technologie angewiesen, um Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchführen zu können. Um den Bedarf an zuverlässigen und transparenten Informationen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis von Effizienztechnologien zu befriedigen, ist in einem ersten Schritt die Einführung eines standardisierten CO₂-Testverfahrens notwendig, sowohl für komplette Fahrzeuge als auch für Einzeltechnologien. Mit dem im Auftrag der Europäischen Kommission entwickelten Simulationsmodell VECTO wird dieser Ansatz bereits verfolgt. Aufgrund der Vielfalt von Technologien können derzeit aber noch nicht alle Technologien und deren Kombinationen simuliert werden. Eine Weiterentwicklung von VECTO bzw. die Entwicklung ergänzender Verfahren für nicht mit VECTO simulierbare Technologien ist daher erforderlich, mit dem Ziel, möglichst alle heute verfügbaren aber auch zukünftige Technologien nach klaren Standards modellieren zu können..

Standardisierte Testverfahren bilden die Grundlage für eine Reihe weiterer Maßnahmen, dieser Zusammenhang wird in der Grafik durch die einheitliche blaue Färbung verdeutlicht. Eine zentrale Maßnahme ist die CO₂-Zertifizierung von Nutzfahrzeugen bzw. Einzeltechnologien, um die Informationen zum Einsparpotenzial transparent und verständlich darzustellen. Für neue Nutzfahrzeuge sollte eine verpflichtende Verbrauchs- und

CO₂-Kennzeichnung angestrebt werden. Ergänzend sollte eine freiwillige Zertifizierung bei (insb. nachrüstfähigen) Einzeltechnologien möglich sein, mit der die Hersteller den Einspareffekt ihrer Technologie belegen können. Eine solche Zertifizierung ermöglicht das Auflegen von zielgerichteten Förderprogrammen, um das Hemmnis hoher Investitionskosten bei der Anschaffung neuer Fahrzeuge bzw. Nachrüstung des Fahrzeugbestands mit energieverbrauchs- und treibhausgasmindernden Technologien zu reduzieren.

Auch bei entsprechender Informationsverfügbarkeit ist deren Zusammenstellung und die Erstellung von Amortisationsrechnungen insbesondere für kleinere Unternehmen weiterhin ein erheblicher Aufwand. Herstellerunabhängige Effizienzberater können Fuhrunternehmen bei der Anschaffung effizienter Fahrzeuge bzw. der Nachrüstung von Effizienz-Technologien unterstützen. Ebenso kann den Beratern die Aufgabe zu kommen, Unternehmen über vorhandene Förderprogramme zu informieren und sie bei der Einführung eines Kraftstoff-Verbrauchs-Monitorings zu unterstützen. Über allgemeine Informationsveranstaltungen (Messen, Road-Shows), auf denen Erfolge bei der Verbrauchsreduktion durch verfügbare oder neu entwickelte Effizienztechnologien den Fahrzeugbetreibern vorgestellt werden, besteht zudem die Möglichkeit, ein stärkere Wahrnehmung für das grundsätzliche Thema Energieeffizienz von Nutzfahrzeugen sowie für vorhandene Möglichkeiten zur Energieeinsparung schaffen.

Förderung: Auch bei grundsätzlich gegebener Wirtschaftlichkeit können hohe Anschaffungskosten ein Hinderungsgrund für die Investition in zusätzliche energiesparende Technologien beim Fahrzeugkauf sein. Geeignete Fördermaßnahmen können helfen, dieses Hemmnis abzubauen. Das können beispielsweise vergünstigte Investitionskredite für zertifizierte Technologien sein oder Investitionsprogramme für Kommunen zur Fuhrparkumrüstung. Denkbar sind auch Umweltprämien für die Stilllegung alter Nutzfahrzeuge bei gleichzeitiger Anschaffung neuer Fahrzeuge mit vorgegebenen Effizienzstandards. Mit Förderprogrammen kann gezielt die Einführung von heute noch nicht wirtschaftlichen, aber politisch gewollten Technologien unterstützt werden. Die damit erreichbare Steigerung der Produktionszahl und damit verbundene Lerneffekte können zu einer Verringerung der spezifischen Herstellungskosten und damit längerfristig zur Senkung der Anschaffungskosten führen. Auch Forschung und Entwicklung bei Technologie-Herstellern können gefördert werden, um Marktverfügbarkeit, Funktions-Zuverlässigkeit und wirtschaftliche Preise früher zu erreichen.

Neben staatlich finanzierte Förderung ist auch ein privates Spritspar-Contracting denkbar. Externe Investoren übernehmen die Anschaffungskosten (bzw. einen Teil davon) der Effizienztechnologie und werden anschließend an den damit erreichten Kosteneinsparungen beteiligt. Voraussetzung dafür ist die Einführung eines Kraftstoffverbrauchs-Monitorings bei den Fuhrunternehmen.

Maßnahmen zu alternativen Antrieben bilden einen eigenen Bereich innerhalb der Roadmap. Die Integration alternativer Antriebe in den Markt erfordert umfangreiche Maßnahmen insbesondere hinsichtlich der Versorgungsinfrastruktur. Ein Ausbau der Energie-Versorgungsinfrastruktur durch Erweiterung von Tankstellen mit Zapfsäulen für Erdgas (CNG, LNG) und Stromladesäulen ist für die Verbreitung alternativer Antriebe ebenso erforderlich wie ein flächendeckendes Service-Netz für Wartungen und Reparaturen. Solange es zu wenige Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten gibt, werden Werkstätten nur begrenzt in die Fortbildung ihrer Mitarbeiter und Anschaffung neuer Werkzeuge investieren. Andersherum sind Käufer gehemmt, in neue Technologien zu investieren, wenn ein passendes Service-Netzwerk nur rudimentär ausgebildet ist. Schließlich sollte geprüft werden, in welchem Rahmen Steuerbegünstigungen wie die aktuelle Energiesteuerermäßigung von Erdgas zur Förderung alternativer Antriebe geeignet sind.

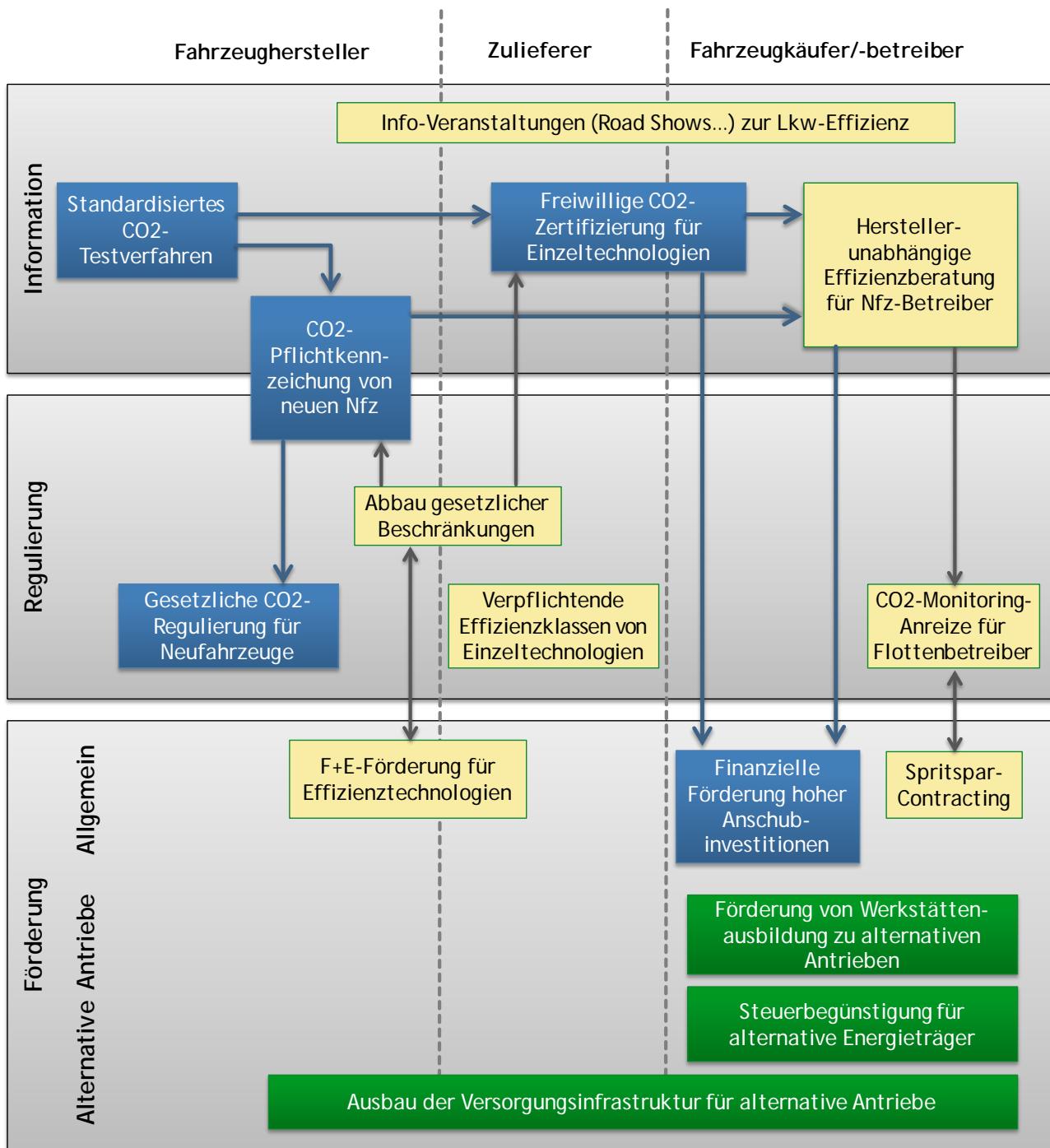
Regulierung: Einige technische Maßnahmen werden bisher nicht umgesetzt, da die Technologien größer oder schwerer sind als der Dieselantrieb und somit Nutzlast bzw. -volumen stark einschränken würden. Auch wenn zukünftige technische Entwicklungen diesbezügliche Optimierungen bringen können, wird empfohlen, für solche Technologien Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen zu prüfen, die den Herstellern mehr Spielraum bei der Entwicklung zusätzlicher Effizienztechnologien geben.

Handlungsdruck kann weiterhin durch verpflichtende Effizienzklassen einzelner Technologien aufgebaut werden, z.B. eine weitere Verschärfung zukünftiger Anforderungen an den Rollwiderstand von Reifen über die bereits von der EU beschlossenen Regelungen hinaus. Dies kann dazu führen, dass zum einen Fahrzeuge

im Bestand auf energieeffiziente Technologien umgerüstet werden und zum anderen Fahrzeugsbetreiber bei Verbrauchsteilen (z. B. Reifen, Öle, Beleuchtung) nicht nachträglich auf ineffiziente Klassen wechseln.

Falls Informations- und Fördermaßnahmen nicht die angestrebten Erfolge zur Verringerung der Treibhausgasemissionen von Nutzfahrzeugen bringen, sollte analog zum Pkw-Sektor die Einführung einer europaweiten gesetzlichen CO₂-Regulierung für Nutzfahrzeuge angestrebt werden.

Abbildung 9 Roadmap zur Förderung einer Verbreitung von Effizienz-Technologien im Nfz-Markt



Summary

1. Background and objective

The transport sector is currently responsible for approx. 30 % of final energy consumption and 20 % of greenhouse gas emissions in Germany. In this context, road transport accounts for the largest share. In recent years, road freight transport in particular has steadily increased. Transport services of heavy-duty vehicles rose by 26 % between 2000 and 2010. Heavy-duty vehicles (HDVs and buses >3.5 t GVW) account for about a quarter of the energy consumption in road transport at present. Current projections expect substantial increases of HDV transport in the future (2010 to 2030: +30 %) and distinctly slower growth for passenger cars (+10 %) [BMVI, 2014].

Compliance with climate change mitigation goals and the minimisation of final energy consumption require a substantial reduction of the fuel consumption associated with heavy-duty vehicles. The European Commission is devising strategies for the reduction of CO₂ emissions from heavy-duty vehicles in collaboration with its member states and published an initial Key Issues Paper in May 2014 [EC, 2014a]. One vital prerequisite for vehicle-related strategies is the standardised quantification of CO₂ emissions from heavy-duty vehicles. The EC is currently developing an appropriate test method. The designated simulation-based approach (VECTO) should be available for application for certain vehicle categories shortly [JRC, 2014].

The objective of the present study is the estimation of energy and greenhouse gas emissions reduction potentials of technological efficiency measures that are not yet established in heavy-duty vehicles in Europe. All calculations performed seek to comply with the EC test method. The reduction potentials and associated costs are both identified and evaluated. For this purpose,

- ▶ Important current or future efficiency technologies relevant for heavy-duty vehicles were selected;
- ▶ Technology-specific reduction potentials (energy consumption, greenhouse gas emissions) of individual technologies and their combinations were calculated with the CO₂ emission simulation tool (VECTO), the future tool for heavy-duty vehicle certification;
- ▶ An evaluation of the cost efficiency for vehicle operators as well as an analysis of specific greenhouse gas abatement costs for the selected technologies was performed;
- ▶ Existing impediments for the application of available technologies were analysed. Based on these results, political strategies for the future advance of fuel-efficient and greenhouse gas reducing technologies for heavy-duty vehicles were devised.

2. Energy saving and greenhouse gas reduction potentials of heavy-duty vehicles

Vehicle categories under investigation

Specific reduction potentials (energy consumption and greenhouse gases) of selected technologies for heavy-duty vehicles were investigated for the following vehicle classes:

- ▶ **Semi-trailer truck 40 t:** This vehicle class is associated with about half of the overall CO₂ emissions of the commercial vehicle fleet in Europe. The simulation was carried out for both the options Long Haul Cycle and Regional Delivery Cycle.
- ▶ **Delivery truck 12 t:** At 2.6 %, the CO₂ share of this vehicle class is minor. However, the class may be seen as representative of the majority of 4x2 and 6x2 solo HDVs (approx. CO₂ share 22 %). The analyses were performed with the setting Urban Delivery Cycle.
- ▶ **City bus 18 t (rigid bus, length 12 m):** This vehicle class is associated with 4.4 % of CO₂ emissions (including rigid and articulated buses, thus representing a minor proportion of the overall emissions. City buses are frequently purchased by public institutions and thus they are in the public eye, yet may be the focus of cost-cutting measures. Analyses were carried out with the City bus Urban Cycle.

There was no bias towards any manufacturer in the analyses. All vehicles in the models were based on assumptions for default vehicles equipped generic technology.

Vehicle Energy Consumption Calculation Tool (VECTO)

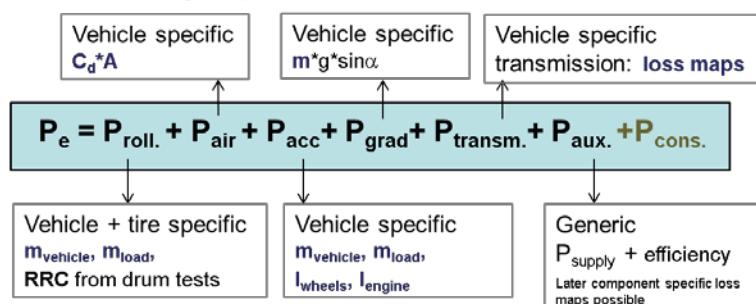
Due to the high number of models and variants on the heavy-duty vehicle market, the calculation of final energy consumption and direct CO₂ emissions for each individual model is both too elaborate and too expensive. For instance, there are more than 1000 different options for a 12 t delivery truck within one production series: engine size, wheel base, cabin size, type of suspension, additional tanks, air conditioning, speed control etc. may all be combined practically at random from a modular system. For these reasons, the European Commission in collaboration with the OEMs chose an approach that first tested all individual components separately. The total consumption of the vehicle then follows from the individual component test data. The simulation programme developed for the impending European CO₂ certification of heavy-duty vehicles is VECTO. Amongst others, the following input data

- ▶ engine fuel consumption map, gearbox loss map, curb weight, air drag coefficient, rolling resistance coefficient of the tyres according to EC 1222/2009, power consumption of engine auxiliaries (e.g. fan, compressor, alternator, steering pump, air conditioning), gear ratios gearbox and axle differential

are quantified with standardised methodology. Thus, energy consumption and direct CO₂ emissions of the respective vehicle model with an average load are simulated assuming standardised target speed cycles. An overview of the calculations scheme in VECTO may be found in the following figure.

Figure 1 Calculation of VECTO to determine the engine operation point and to interpolate the fuel consumption

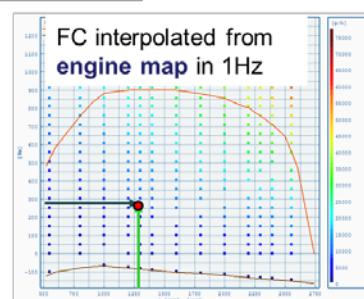
Simulation of engine power:



Simulation of engine speed

$$n = (v \times 60 \times I_{\text{axle}} \times I_{\text{gear}}) / (d_{\text{tire}} \times \pi)$$

Vehicle transmission ratios
 $I_{\text{gear}}, I_{\text{axle}}$



[TU Graz, 2014]

C_d - Air drag coefficient, A - cross sectional area, m - vehicle mass, g - gravitational acceleration 9.81 m/s², α - road gradient angle, P_e - engine power, P_{roll} - rolling resistance power at wheels, P_{air} - air drag power at wheels, P_{acc} - acceleration power at wheels, P_{grad} - wheel power due to grade resistance, P_{trans} - power loss in drivetrain due to gearbox friction, P_{aux} - power consumption of auxiliary consumers, P_{cons} - power consumption at crankshaft of power take off (e. g. hydraulic pumps for waste presses, cranes ...), actual not depicted), m_{vehicle} - vehicle curb weight, m_{load} - payload, RRC - rolling resistance coefficient of tires, I_{wheels} - rotational inertia of wheels, I_{engine} - rotational inertia of engine, P_{supply} - useful power output of auxiliaries, e. g. pressurized air, electrical power ..., n - engine speed, v - vehicle velocity, I_{axle} - axle ratio, I_{gear} - gearbox ratio, d_{tire} - dynamic tire diameter, FC - fuel consumption

Selection of energy-saving and greenhouse gas-reducing technologies

An elaborate literature search was performed to identify individual technologies that may already be available, or ready for market introduction in the coming years, yet not currently included in the European standard set of technologies applied in the relevant vehicle categories.

Based on the results of the literature survey, a selection of technologies for the different areas of application (powertrain, aerodynamics, rolling resistance, optimisation of vehicle weight, engine auxiliaries and vehicle control systems) was chosen for both in-depth potential analyses with VECTO and cost efficiency analyses. In this context, different technologies were selected for the respective vehicle categories, depending on the configuration of the reference vehicles and the availability and relevance of the individual technology for the specified mission profile (e.g. long-haul transport, urban delivery).

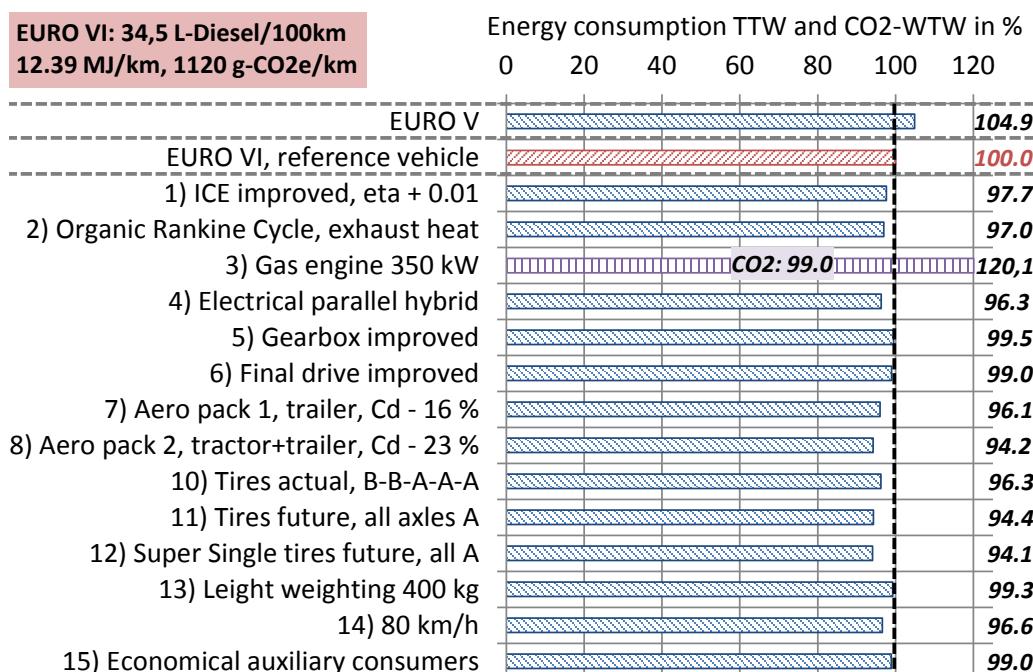
Energy-saving and greenhouse gas potentials of the technologies under investigation

The modelling process for the selected technological measures involved the simulation of standardised comparable final energy savings potentials based on current reference vehicle data (state of the art EURO V and EURO VI). The input data for the simulation of the energy consumption of reference vehicles and the potentials of energy saving measures were derived from own measurement data, industry data, generic standard data for VECTO from the industry, technical data sheets, product catalogues and expert consultation.

The final energy consumption potentials for most measures were directly simulated with VECTO. The options exhaust heat recovery (Organic Rankine Cycle - ORC), electric hybrid vehicles, battery-electric vehicles and start-stop-automatic were modelled with post-processing as these features were not (yet) available in the employed version of VECTO. Based on the final energy consumption levels, greenhouse gas reduction potentials in CO₂ equivalents (CO₂e) were calculated including the well-to-tank processes of fuel production and distribution. Well-to-wheel emission factors were applied according to DIN EN 16258 and [JEC, 2014].

The specific fuel-saving measures for the semi-trailer truck and the results of the Long Haul Cycle may be found in Figure 2.

Figure 2 semi-trailer truck on long haul cycle, single measures



The bars in the figure show the changed final energy consumption. Differing changes of GHG emissions (CO₂e wtw) for measures with alternative energy carriers instead of diesel are indicated separately.

The assumptions for the reference truck included tyre fuel-efficiency classes B-C-BBB and an aerodynamically non-optimised trailer. The simulation reveals that the measures available for immediate implementation

- 7) aero pack trailer (side- and underbody panels with boat tail 0.5 m)
- 10) best tyres on the market (B-B-AAA)
- 14) speed limiter of 80 km/h

would allow savings of approx. 10 % in comparison with the reference vehicle EURO VI.

The saving potential of the parallel hybrid is not primarily dependent on the structure of the powertrain (parallel or serial), but on the maximum generator power of the electrical machine (cf. Chapter 2.4.3.2).

In addition, selected single measures were combined into efficiency packages:

- **Efficiency Package A:** All measures proposed in this package are readily available on the market (state of the art mid 2014) and could in principle be implemented immediately.
- **Efficiency Package B:** In all likelihood, these measures will be technologically feasible in the foreseeable future. Development of components not yet available on the market is under way and market introduction is expected to be complete at the end of the current decade. In the case of the aero packages 2 for trucks, a change of EU legislation is necessary to accommodate vehicle length and rear view cameras.

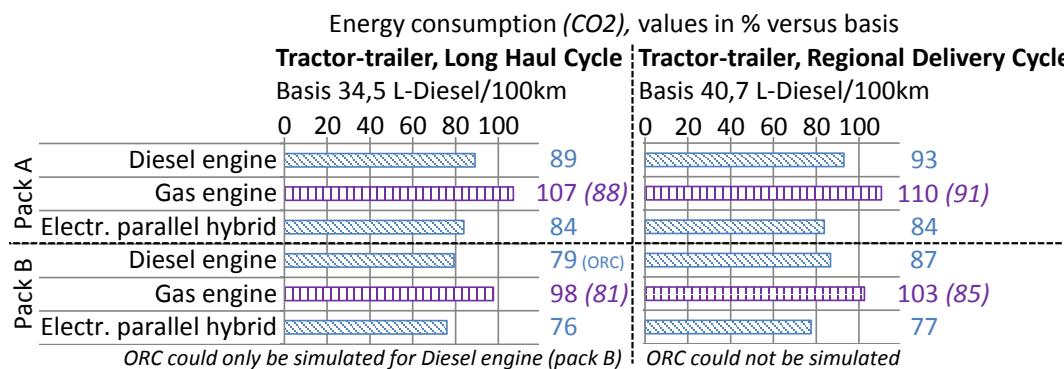
Appropriate efficiency packages were compiled for each of the drive concepts under investigation (diesel, gas, electric hybrid, battery-electric) in the relevant vehicle classes.

For the **semi-trailer truck 40 t**, packages for diesel, gas and parallel hybrid vehicles were defined:

- Efficiency Package A consists of single measures: 7) aero package 1 trailer, 10) best tyres on the market, 14) speed limiter 80 km/h, 15) efficient engine auxiliaries.
- In Efficiency Package B, the additional measures detailed in Figure 2 were included. (ORC could only be simulated for the diesel engine assuming the Long Haul Cycle).

The reduction potentials of the packages of measures are illustrated in Figure 3. Assuming state of the art technology (Package A), the semi-trailer truck could potentially achieve savings of up to 16 % of fuel consumption and greenhouse gas emissions. With a dedicated diesel powertrain, savings of approx. 11 % on the Long Haul Cycle are possible. The final energy consumption of the natural gas engine (LNG-tank) with a similar level of technology is approx. 7 % higher due to the lower energy conversion efficiency of this engine concept. However, the greenhouse gas emissions in this case are reduced by 12 % due to the lower emission factor of the fuel (75 vs. 90 g CO₂e/MJ_{therm} well-to-wheel, see [JEC, 2014]). For the parallel hybrid, the reduction potential with Efficiency Package A amounts to approx. 16 %.

Figure 3 semi-trailer truck on Long Haul and Regional Delivery Cycle, measure packages



The bars in the figure show the changed final energy consumption. Differing changes of GHG emissions (CO₂e wtw) for measures with alternative energy carriers instead of diesel are indicated separately.

The reduction potentials associated with the future Efficiency Package B are as follows: diesel engine (with ORC) approx. 21 % energy and greenhouse gas savings, a gas engine (without ORC) ca. 2 % energy and ca. 19 % greenhouse gases, and parallel hybrid (without ORC) approx. 24 %.

The semi-trailer truck model was also simulated on the Regional Delivery Cycle, without ORC, because its behaviour could not be calculated reliably due to the non-stationary engine operation. All reduction potentials are slightly lower in comparison with the Long Haul Cycle. One reason is the lower average speed of the Regional Delivery Cycle (58.6 km/h) in comparison with the Long Haul Cycle (73.2 km/h). Thus, the effect of the aerodynamic add-ons, which are particularly effective at high vehicle speeds, is attenuated.

The potentials of the Efficiency Packages A and B for delivery trucks and city buses are shown in Figure 4.

The investigated vehicle class **delivery truck 12 t GVW** is representative for rigid trucks from 7.5 t to 18 t. In addition to the diesel engine, gas engine with CNG tank (68 g CO₂e/MJ, see DIN EN 16258) and diesel engine with electric parallel hybrid, the measure packages were also modelled for a battery-electric vehicle.

- ▶ Efficiency Package A: aerodynamic improvement by partial fairings and a short boat tail of 0.5 m, current energy efficient tyres (B-D, reference vehicle C-D), start-stop-automatic, speed limiter 80 km/h, efficient auxiliary consumers.
- ▶ Additional measures of Efficiency Package B: improved engine efficiency, reduced gearbox and axle losses, rear view cameras, future energy efficient tires (A-A), light weighting 200 kg, LED headlights.

For HDVs with combustion engines, the measures detailed in Package A could achieve savings of 8 % fuel and greenhouse gases in dedicated diesel engines, whereas the savings of the parallel hybrid amount to 15 % in comparison with the reference vehicle EURO VI. The use of gas engines increases the energy consumption by 9 %, yet the emissions decrease by approx. 18 %.

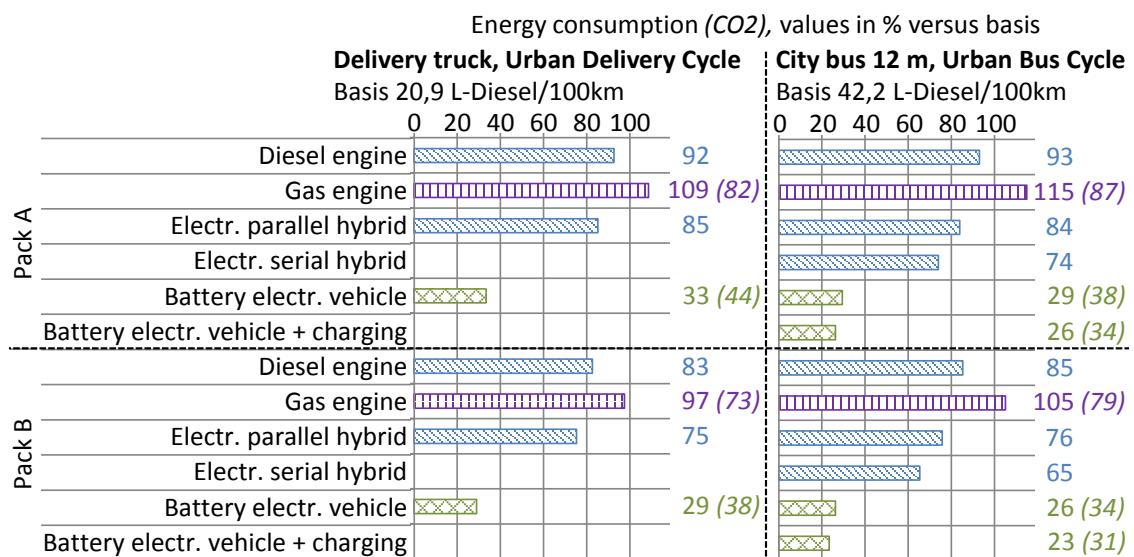
Substantially higher reduction potentials are associated with battery-electric engines, i.e. 67 % reduction of final energy consumption and 56 % greenhouse gas savings. The fundamental advantage of electric engines over combustion engines is revealed here. The conversion of fuel into kinetic energy in combustion engines is associated with process-related losses of 50 to 65 %, whereas the energy conversion efficiency of electric engines frequently exceeds 90 %. Thus, the final energy demand for the same kinetic energy is substantially lower. However, there are losses during conversion in the power plant depending on the electricity supply pathway (coal, gas, nuclear, wind, hydro, solar). The average greenhouse gas emission factor per final energy of 118 g CO₂e/MJ_{el} applied here (electricity mix of the EU27 member states according to DIN EN 16258) is distinctly higher than those of diesel or natural gas. Nonetheless, the approximately doubled conversion efficiency of electric engines in reference to combustion engines, as well as the option of energy recovery (regenerative brakes in vehicles), allows the saving of substantial quantities of greenhouse gases.

Implementation of the future measures of Package B further increases savings potentials. The GHG savings of thus improved diesel trucks amount to approx. 17 %, whereas gas engines could save approx. 27 %. The electric parallel hybrid concept achieves a reduction of final energy and emissions of approx. 25 %, the savings of the battery-electric HDV amount to approx. 71 % final energy and approx. 62 % greenhouse gases.

For the **City bus 18 t (length 12 m)**, in addition to the HDV powertrains above (gas engine with CNG tank), the drive concepts electrical serial hybrid and battery-electric vehicle with intermediate charging were included in the analysis. In the case of the battery-electric bus with intermediate charging, the size of the battery was assumed to be substantially smaller than that of a dedicated battery-electric bus (cost and weight aspects). The charge of the smaller battery is sufficient to complete one run of a bus line (recharge is required at each final stop, i.e. twice per cycle, for approx. 10 minutes).

- ▶ Efficiency Package A consists of single measures: current energy efficient tyres (C-C, reference vehicle D-D), start-stop automatic, efficient auxiliary consumers;
- ▶ Additional measures of Package B: improved engine efficiency, reduced axle losses, future energy-efficient tyres (A-A), lightweighting 350 kg, LED headlights, partly insulated passenger compartment.

Figure 4 Delivery truck and city bus, measure packages



For the city bus, the measures of Efficiency Package A achieve savings of approx. 7 % energy and greenhouse gases for a conventional diesel engine. With a natural gas engine, the final energy demand is approx. 15 % higher, yet the greenhouse gas emissions are approx. 13 % lower. In comparison with the EURO VI reference bus, the hybrid drivetrains with implementation of Package A offer a reduction potential of approx. 16 % for a parallel hybrids and approx. 26 % for serial hybrids. The higher saving potential of the serial hybrid primarily results from the bigger electrical machine of the selected vehicle model, and *not* from differences in the powertrain structure, for further details see chapter 2.4.3.2. Overall, the reduction potentials for final energy and greenhouse gas emissions of the city bus reflect those of the delivery truck with the most substantial savings achieved by dedicated electric vehicles. The reduction potential of the battery bus without intermediate charge is slightly lower due to the increased vehicle weight in reference to the bus with frequent intermediate charge.

Implementation of the additional technologies summarised in Efficiency Package B is likely to result in further final energy and greenhouse gas savings for all drive concepts (see Figure 4). Both hybrid and electric buses are going to benefit from the decreased rolling resistance of future tyres due to the fact that these tyres will exert less of a ‘braking effect’, thus allowing improved energy recovery with regenerative brakes.

In conclusion, the analyses of reduction potentials reveal that the implementation of current technologies summarised in Efficiency Package A could achieve greenhouse gas reductions of 7 % to 11 % for dedicated diesel vehicles, depending on the vehicle category. The savings of hybrid vehicles range from 14 % (semi-trailer truck) to over 26 % (city bus). Vehicles with natural gas engines are associated with an increase of final energy consumption in comparison with the EURO VI reference vehicles, however, greenhouse gas emissions decrease by 13 to 19 %. Additional technologies that are feasible and will be available in the foreseeable future could reduce greenhouse gas emission by an additional 6 to 10 % depending on vehicle category, mission profile and powertrain. At present, the use of dedicated battery-electric vehicles could already cut greenhouse gas emissions (well-to-wheel) by half. With the additional implementation of soon-to-be-available technologies, greenhouse gas savings on 60 % to 79 % assuming the current average electricity mix of the EU27 member states are possible.

3. Costs of the investigated efficiency measures for the reduction of greenhouse gases

Among the key factors for the implementation of energy-efficient and greenhouse gas-saving technologies is the cost efficiency of the proposed measures. Thus, the analysis of vehicle cost differences is a pivotal aspect of the evaluation of the technologies under investigation.

- ▶ The use of novel technologies is only economically beneficial for the vehicle operators if the additional costs associated with technology implementation do not exceed the resulting fuel cost savings.
- ▶ From a socio-economic perspective, the question of currently feasible and future expected greenhouse gas savings and their associated costs arises.

In consequence, the single technologies investigated in the present study were subject to an analysis of business economics and GHG abatement costs. In addition, marginal abatement cost curves (MAC curves) and cumulative savings costs were estimated for the packages of efficiency measures proposed here.

Additional technology-specific costs for vehicle operators

The cost analysis estimated the level of current additional investment costs for the purchase of a vehicle equipped with the investigated additional fuel-saving technologies. The calculations were based on published information on pricing of technology measures already available on the market, e.g. manufacturer price lists and relevant technical journals.

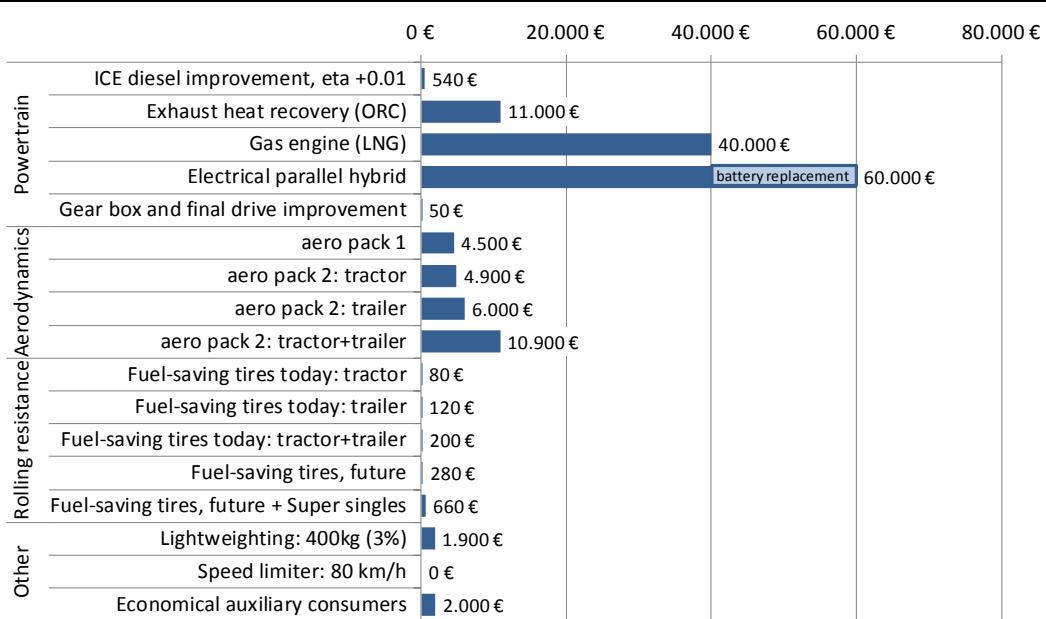
In the case of a **semi-trailer truck 40 t GVW** (see Figure 5), the average investment costs for the selected efficiency technologies range between 0 and approx. 60 000 €. In consequence, the total investment costs for the purchase of a tractor-trailer may increase by more than 50 %.

- ▶ A speed limiter restricting the vehicle speed to 80 km/h is not associated with any additional costs. The application of low rolling resistance tyres and measures for the optimisation of axle and transmission losses will not exceed 1000 € per vehicle.
- ▶ The costs for optimisation of aerodynamics and engine auxiliaries as well as limited lightweight retrofitting (curb weight reduction of 3 %) range between 2 000 and 8 000 €. The costs for exhaust heat recovery via ORC were estimated to result in additional average costs of 11 000 €.
- ▶ The most expensive measure is the purchase of vehicles with alternative drive concepts. Trucks with natural gas engines and LNG tanks are available on the market today. In contrast, no hybrid semi-trailer trucks are currently available on the market. The reported additional investment costs thus represent an estimate for the price upon market introduction, which could be substantially reduced in the future.

For **delivery trucks with 12 t GVW**, the additional investment costs for the selected technology packages currently range between 0 € (speed limiter) and approx. 25 000 € (parallel hybrid, not including extra costs for battery replacement). The battery-electric delivery truck represents an exception; the cost is tripled in reference to a diesel HDV.

A similar picture emerges for the **city bus with 18 t GVW**. In this case, the additional investment costs for the single optimisation measures under investigation range between averages of 300 to 4 000 €. However, investing in vehicles with alternative drive concepts is substantially more expensive. The additional costs for the purchase of a natural gas-fuelled bus amount to an average of 34 000 €, whereas a hybrid bus exceeds the cost of the reference vehicle by 70 000 to 100 000 €. The most expensive option is the battery-electric bus. Based on pricing for battery-electric buses sold in Germany, the current surcharge in reference to a diesel bus was calculated to range between 100 000 to 400 000 € independent of differences between dedicated battery-electric buses or models with intermediate charge option (overhead wire, induction).

Figure 5 Additional investment costs per vehicle – semi-trailer truck 40 t



The application of energy-efficient technologies may also affect a number of variable vehicle costs. In the context of some efficiency measures, the mileage-dependent additional costs may distinctly exceed the immediate additional investment costs. In consequence, the following mileage-dependent variable differences in vehicle costs were included in the cost analyses:

- ▶ Changes in the urea consumption for SCR facilities (improvement of diesel engine energy conversion efficiency, natural gas vehicle),
- ▶ Oil changes (low-friction oil for the improvement of the energy conversion efficiency of diesel engines, minimisation of axle and transmission losses),
- ▶ Tyre changes (energy-efficient tyres) as well as
- ▶ Increased maintenance costs (natural gas vehicles).

Changes to the overall vehicle costs due to implementation of the selected measures

The analysed technological measures will not pay off from an economic point of view unless the technology-dependent fuel cost savings exceed the additional costs incurred through the technology application. Based on the energy savings potentials of the proposed measures for vehicles with medium annual mileage (per mission profile), a comparison between potential fuel cost savings and technology-specific additional costs was carried out assuming current fuel prices. Many vehicle operators, especially in long-haul transport strive for amortisation of additional vehicle technologies within a maximum of three years. In line with this, the comparison of fuel cost savings and additional costs in the present study applied the same time period. However, in other mission profiles (e.g. urban passenger transport) varying payback expectations are possible. Hence, in a second step, the question was reversed to examine the payback period, i.e. the time it would take for the measures to achieve full amortisation assuming current additional costs and constant fuel prices.

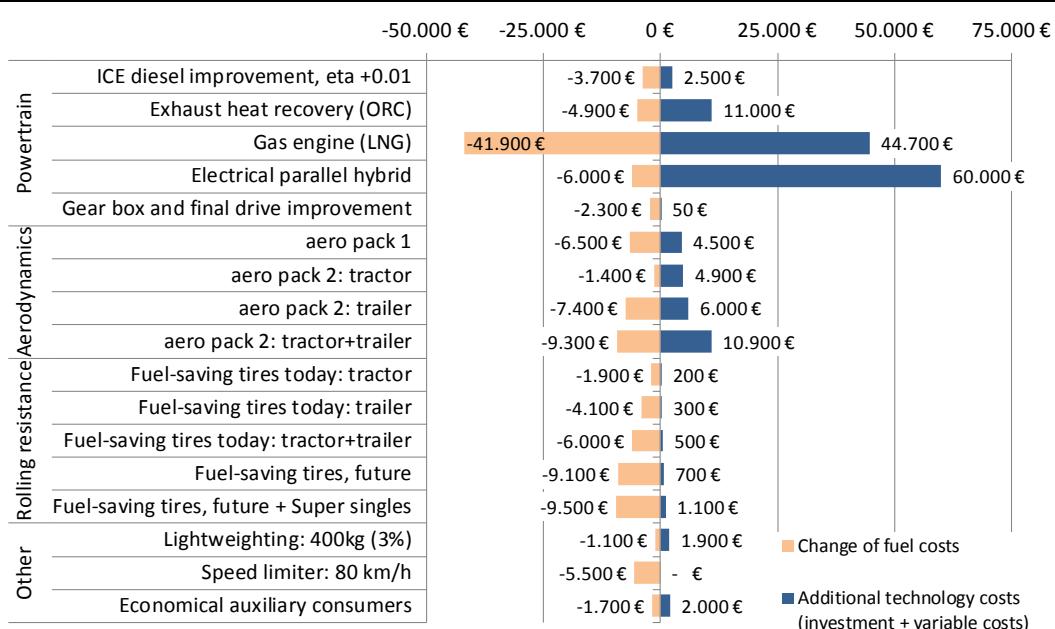
Semi-trailer trucks 40 t GVW are primarily operated in multi-day long-haul transport. However, vehicles of that size class are also frequently or even predominantly employed in regional delivery. In consequence, the present study examined both mission profiles. Figure 6 illustrates the results of the cost analysis for the long-haul transport. Many technologies are able to achieve fuel cost savings that exceed the additional investment into their implementation within the initial three years. This applies for measures with very low investment costs in particular. In contrast, the additional costs for alternative drive concepts (LNG, parallel hybrid), exhaust heat recovery, lightweighting and optimisation of engine auxiliaries are higher than the fuel cost savings achieved over the period of three years. In long-haul transport, the length of the payback period

ranges between three to four years (LNG vehicle, engine auxiliaries) to about 30 years for the parallel hybrid. The payback periods for a truck regional delivery transport are generally longer in comparison with long-haul transport due to lower annual mileage.

For **delivery trucks 12 t GVW**, the potentials for fuel cost savings are distinctly lower in comparison with the tractor-trailer due to lower specific potentials and lower annual mileage. Most of the measures under investigation yield cost savings below 1000 € during the initial three years. Only alternative drive concepts (CNG, parallel hybrid, battery-electric) and tyres of efficiency category A were associated with higher savings. The highest energy costs savings of about 15,000 € within three years were achieved by the battery-electric delivery truck. Low-friction oil and low rolling resistance tyres will achieve amortisation within the first year, whereas the length of the payback period of diesel engine optimisation measures, vehicle regulation and the purchase of CNG trucks ranges between three and four years. The length of the payback period of all remaining measures distinctly exceeds ten years with current costs. Due to high additional investment costs, the payback periods of hybrid and battery-electric vehicles exceed the regular vehicle service life.

In the case of the **city bus 18 t GVW**, low rolling resistance tyres, optimisation measures for diesel engine energy conversion efficiency and axle losses all have a payback period of about one year. A 3 % reduction of curb weight is going to pay off after three year. Moreover, the optimisation of engine auxiliaries breaks even in less than five years. The use of natural gas buses also pays off within five years, as long as there is no need for additional supply infrastructure and the current energy tax benefits remain in place. In contrast, assuming current conditions, both hybrid and battery-electric buses are associated with higher additional investment costs than may be saved through reduced energy costs over the average service life. Only for battery-electric buses with intermediate charge, a payback within regular vehicle service life seems possible with current additional investment costs.

Figure 6 Change in costs per vehicle in the first 3 years for a semi-trailer truck in long-haul transport



With increasing production, the production costs of alternative drive technologies are expected to fall due to learning and optimisation of production processes, thus resulting in lower investment costs for vehicle purchase. Simultaneously, current scenarios expect fuel prices to rise in the future due to inflation. An additional analysis was carried out to examine the effects of future learning resulting in optimised production and rising fuel prices on the overall cost efficiency of hybrid and battery-electric vehicles, thus influencing the length of future payback periods. Two scenarios modelled the reduction of additional investment costs by an annual rate of 5 and 10 %, respectively, while simultaneously assuming an annual increase of fuel and electricity

prices driven by inflation of 2 %. For parallel-hybrid vehicles additional the case was analysed if future battery generations have a better durability and no battery replacement is required anymore within regular vehicle service life. The following table illustrates the changes in payback periods in the scenarios in comparison with current conditions.

A semi-trailer truck 40 t with parallel hybrid technology will not become economically viable in long-haul transport even with a reduction of additional investment costs by more than 60 % - unless an additional battery replacement can be avoided with future battery generations of longer durability. In regional delivery, a parallel hybrid semi-trailer truck could pay off within regular vehicle service life also including battery replacement. Also a delivery truck 12 t with parallel-hybrid or battery-electric technology could pay off in future with assumed strong reductions of additional investment costs – however still having payback periods beyond typical short-term expectations of vehicle operators. Urban buses with hybrid or electric technology could become economically viable in case of assumed cost reductions within 7-11 years (scenario A) resp. 4-6 years (scenario B) compared to a regular diesel bus. Electric buses with intermediate charge could pay off even one or two years earlier. According to the scenario results, hybrid and electric heavy-duty vehicles could become economically viable in future and generate cost savings for the vehicle operators. Indeed, this will only be achieved in case of substantial reductions of additional investment costs for such vehicles with alternative powertrain technologies.

Table 1 Average payback periods of hybrid and electric vehicles in different scenarios

Average payback periods in years		with today's costs	with future costs in 10 years	
			scenario A	scenario B
Semi-trailer truck 40 t long-haul	parallel hybrid - with battery replacement	30.0	15.0	8.8
	- without battery replacement		10.0	5.8
Semi-trailer truck 40 t regional delivery	parallel hybrid - with battery replacement	27.2	13.6	7.9
	- without battery replacement		9.1	5.3
Delivery truck 12 t	parallel hybrid - with battery replacement	40.2	20.1	11.7
	- without battery replacement		14.4	8.4
Urban bus 18 t	electric	25.7	12.8	7.5
	parallel hybrid - with battery replacement	22.0	11.0	6.4
	- without battery replacement		8.5	5.0
	serial hybrid	14.8	7.4	4.3
	electric	14.4	7.2	4.2
	electric with intermediate charge	10.7	5.3	3.1
Legend of payback periods	≤3 years	>3-6 years	>6 years, but within vehicle service life	Not within vehicle service life

Cost efficiency of the single technological measures for greenhouse gas reduction

Greenhouse gas abatement costs are defined as the costs that allow the reduction of greenhouse gas emissions by 1 ton of CO₂ equivalents (€ton CO₂e). In this way, a comparison of the cost efficiencies of different measures in transport, but also of measures and approaches in other areas is possible. The specific greenhouse gas reduction costs of vehicle-related measures is calculated from the quotient of the difference in vehicle costs divided by the overall achievable greenhouse gas reductions in a defined period of time.

Longer periods of time and thus, higher mileages, are associated with higher greenhouse gas reductions per vehicle and higher fuel cost savings.

$$GHG abatement costs \left(\frac{\text{€}}{\text{tons CO}_2\text{e}} \right) = \frac{[\text{additional technology costs (€)} - [\text{fuel costs savings (€)}]}{[\text{GHG emission reduction (tons CO}_2\text{e)}]}$$

From a socio-economic perspective, the entire vehicle service life is relevant. In contrast, vehicle operators assess cost efficiency of technologies in reference to the period of use in their businesses and expectations towards the payback period on the additional investments. For these reasons, the calculation of specific greenhouse gas abatement costs for the measures included several different reference periods.

The following figure exemplifies the greenhouse gas reduction measures for the semi-trailer truck 40 t in long-haul transport sorted according to their GHG abatement cost efficiency. The specific abatement costs range between -4 800 up to +3 300 €/t CO₂e. In the three-year assessment, the abatement costs are higher compared to an assessment based on the average vehicle service life of about eight years. Over three years, a number of measures cause additional costs although their specific GHG abatement costs are negative over longer periods of time. In fact, 10 out of 17 measures are associated with negative abatement costs over a period of three years. This number rises to 14 measures over a period of six years and totals at 15 measures with negative abatement costs over the entire vehicle service life.

Figure 7 Specific GHG abatement costs of technological measures for a semi-trailer truck in long-haul transport depending on the reference period

3 years	Euro / t CO ₂ e	6 years	Euro / t CO ₂ e	vehicle service life (8 years)	Euro / t CO ₂ e
1 Speed limiter 80 km/h	-370 €	Gas engine (LNG)	-3.756 €	Gas engine (LNG)	-4.849 €
2 Gearbox and final drive improved	-363 €	Speed limiter 80 km/h	-370 €	Speed limiter 80 km/h	-370 €
3 Fuel-saving tyres today: trailer	-342 €	Gearbox and final drive improved	-363 €	Gearbox and final drive improved	-363 €
4 Fuel-saving tyres future	-341 €	Fuel-saving tyres today: trailer	-342 €	Fuel-saving tyres today: trailer	-342 €
5 Fuel-saving tyres today: all axles	-338 €	Fuel-saving tyres future	-341 €	Fuel-saving tyres future	-341 €
6 Fuel-saving tyres today: tractor	-329 €	Fuel-saving tyres today: all axles	-338 €	Fuel-saving tyres today: all axles	-338 €
7 Fuel-saving tyres future + supersingles	-327 €	Fuel-saving tyres future + supersingles	-385 €	Fuel-saving tyres future + supersingles	-386 €
8 ICEdiesel improved	-124 €	Fuel-saving tyres today: tractor	-329 €	Fuel-saving tyres today: tractor	-329 €
9 Aero pack 1	-115 €	Aero pack 1	-243 €	Aero pack 1	-275 €
10 Aero pack 2: trailer	-70 €	Aero pack 2: trailer	-220 €	Aero pack 2: trailer	-258 €
11 Aero pack 2: tractor+trailer	66 €	Aero pack 2: tractor+trailer	-152 €	Aero pack 2: tractor+trailer	-207 €
12 Economical auxiliary consumers	66 €	Economical auxiliary consumers	-152 €	Economical auxiliary consumers	-207 €
13 Lightweighting	276 €	ICEdiesel improved	-147 €	ICEdiesel improved	-153 €
14 Exhaust heat recovery with ORC	467 €	Lightweighting	-47 €	Lightweighting	-128 €
15 Gas engine (LNG)	617 €	Exhaust heat recovery with ORC	48 €	Exhaust heat recovery with ORC	-57 €
16 Aero pack 2: tractor	946 €	Aero pack 2: tractor	288 €	Aero pack 2: tractor	123 €
17 Electric parallel hybrid	3.340 €	Electric parallel hybrid	1.485 €	Electric parallel hybrid	1.021 €

The order of measures also changes according to the length of the reference period. For instance, the LNG semi-trailer truck is associated with positive GHG abatement costs in the first three years due to the high initial investment. In consequence, its rank is 15 out of 17. However, if the reference period is extended to six years, the reduction costs turn negative with increasing fuel savings and the LNG truck ranks first (with current energy prices including energy tax benefits for natural gas).

The cost efficiency analyses reveal negative abatement costs of most single technological measures under present conditions for the semi-trailer truck as well as for the other analysed vehicle classes. In particular, measures for the reduction of driving resistance can pay off often within the initial three years, thus within the economic expectations of many vehicle owners. If acceptance of longer payback periods was established by vehicle owners, a number of additional technologies would be rated cost efficient. In consequence, the temporal aspect, i.e. the reference period for cost efficiency of greenhouse gas reduction measures, is critically relevant for the assessment of the cost efficiency of individual technologies.

From a socio-economic perspective, i.e. across the average vehicle service life, most technologies incur negative abatement costs. Thus, the implementation is associated with an economic advantage. But this is not the case for hybrid and battery-electric vehicles. These technologies generate additional costs (= positive abatement costs) even over the entire service life due to the high technology costs at present. However, the

scenario calculations revealed that these technologies may also achieve negative abatement costs in future given relevant reductions of technology costs (learning and economy of scale effects with increasing production).

Cost efficiency of packages of measures for greenhouse gas reduction

A number of cost analyses were carried out for the packages of measures defined in the potential analyses

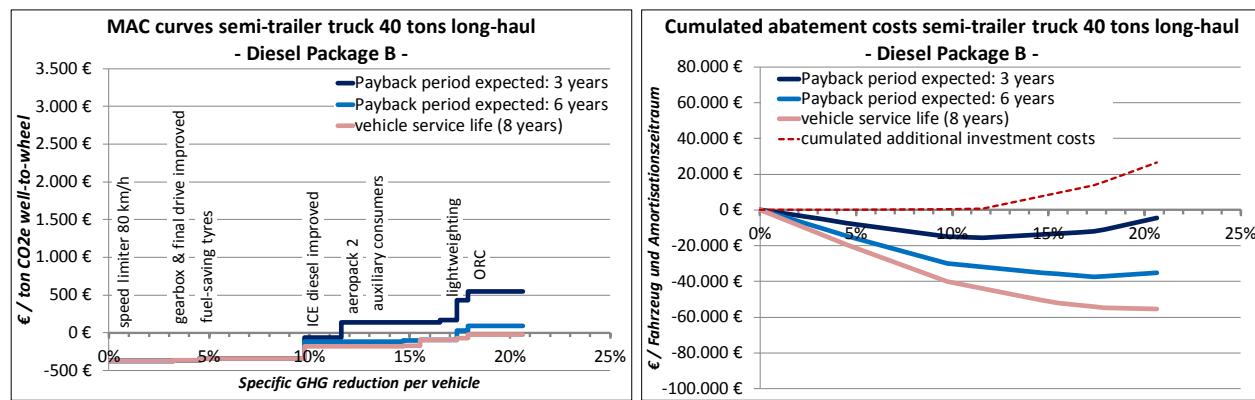
- ▶ Average greenhouse gas abatement costs of the efficiency packages were calculated based on combined greenhouse gas reduction potentials and vehicle cost changes of the measures included in the packages;
- ▶ Marginal abatement cost (MAC) curves were computed for all packages;
- ▶ Based on these MAC curves, the cumulative abatement costs per vehicle were calculated.

MAC curves reveal the marginal costs that allow additional emission reductions within a given system (e.g. truck measures). For this purpose, measures within the efficiency packages were sorted according to their individual cost efficiency (marginal cost in €/ t CO₂e) and combined based on the most cost-efficient measure. For each additional measure, the additional greenhouse gas reduction potential and the specific costs of the additional reduction were calculated and applied.

Figure 8 exemplifies MAC curves (left) and cumulative greenhouse gas abatement costs per vehicle (right), i.e. the sum of the changes to vehicle costs with the incremental combination of single measures. The figure, thus, reveals which total cost changes per vehicle are associated with which GHG reductions. The maximum cost reduction is achieved with the combination of all measures with negative abatement costs alone. Further measures (with positive abatement costs) will in consequence result in decreased savings for the operator.

For the semi-trailer truck 40 t in long-haul transport, combination of analysed technologies in measure package Diesel B with negative GHG abatement costs can save 12 % with technologies that pay off within three years up to 21 % with all technologies that pay off within vehicle service life. The maximum cost reduction per vehicle is 15 000 Euro (3 years) up to 55 000 Euro (vehicle service life). Combining all technologies that pay off within vehicle service life (thus saving 21 % of GHG emissions) would reduce vehicle costs already within the first three years by about 4 000 Euro as cost savings from most cost-efficient technologies would offset the additional costs of those technologies, which pay off only after longer time periods.

Figure 8 **MAC curves and cumulated GHG abatement costs of measure packages B for a semi-trailer truck 40 t in long-haul transport**



Finally, the maximum cumulative GHG reduction potentials with negative marginal abatement costs of all efficiency packages were compared with the total potentials. The results show clearly that a restriction to measures with payback period of maximum three years will limit the exploitation of the full GHG reduction potential of the package. An extension of the payback period to six years or more distinctly broadens the scope for additional emission reductions due to the fact that the number of measures with negative abatement costs increases. Thus, the relevance of the expectations of vehicle operators towards payback periods for

their assessment of measures is revealed. This in turn influences the likelihood and feasibility of reduction potentials through energy-saving and greenhouse gas reducing technologies. If vehicle operators could be won over to accept longer payback periods, a number of current and future technologies for greenhouse gas reduction in heavy-duty vehicles could be much more common and popular.

The use of hybrid and battery-electric vehicles is associated with additional costs for all vehicle classes under investigation, even across the entire vehicle service life, assuming present technology and fuel costs. In general, those positive abatement costs may not be compensated with other technologies having negative abatement costs. However, these alternative drive concepts have been recently introduced to the market, or may not even be available for some vehicle classes as yet. Relevant future cost reductions could render city buses viable within five to six years and shorten the payback period of delivery trucks to seven to eight years. Thus, considerable additional greenhouse gas reduction potentials could be exploited as soon as development and increased availability of alternative drive concepts effectively lower production costs.

Table 2 Total GHG mitigation potentials of the measure packages and partial mitigation potentials of measures in the packages with negative GHG abatement costs

Vehicle class and mission profile	Measure package	Combined GHG mitigation potential of the package	Partial GHG mitigation potentials of individual measures in the package with negative GHG abatement costs		
			After 3 years	After 6 years	Within vehicle service life
Semi-trailer truck 40 t, long haul cycle	Diesel A	11% 12% 16% 21% 19% 24%	10%	+1%	+0%
	Natural gas (LNG) A		10%	+2%	+0%
	Parallel hybrid A		10%	+1%	+0%
	Diesel B		12%	+6%	+3%
	Natural gas (LNG) B		10%	+9%	+1%
	Parallel hybrid B		12%	+6%	+1%
Semi-trailer truck 40 t, regional delivery cycle	Diesel A	7% 9% 16% 13% 15% 23%	4%	+0%	+2%
	Natural gas (LNG) A		4%	+0%	+4%
	Parallel hybrid A		4%	+0%	+2%
	Diesel B		9%	+0%	+1%
	Natural gas (LNG) B		7%	+0%	+5%
	Parallel hybrid B		9%	+0%	+1%
Delivery truck 12 t, urban delivery cycle	Diesel A	8% 18% 15% 56% 17% 27% 25% 62%	4%	+2%	+0%
	Natural gas (CNG) A		4%	+11%	+2%
	Parallel hybrid A		4%	+2%	+0%
	Electric A		2%	+0%	+2%
	Diesel B		7%	+5%	+3%
	Natural gas (CNG) B		7%	+14%	+3%
	Parallel hybrid B		7%	+5%	+3%
	Electric A		8%	+0%	+3%
City bus 18 t, city-bus urban cycle	Diesel A	7% 13% 16% 26% 62% 66% 15% 21% 24%	2%	+3%	+3%
	Natural gas (CNG) A		2%	+3%	+9%
	Parallel hybrid A		2%	+3%	+3%
	Serial hybrid A		2%	+3%	+3%
	Electric A		2%	+3%	+0%
	Electric with intermediate charging A		2%	+3%	+61%
	Diesel B		8%	+4%	+2%
	Natural gas (CNG) B		6%	+12%	+2%
	Parallel hybrid B		8%	+4%	+2%

Vehicle class and mission profile	Measure package	Combined GHG mitigation potential of the package	Partial GHG mitigation potentials of individual measures in the package with negative GHG abatement costs		
			After 3 years	After 6 years	Within vehicle service life
	Serial hybrid B Electric B Electric with intermediate charging B	35% 66% 69%	8% 6% 6%	+4% +4% +4%	+2% +0% +59%

4. Strategies to promote the introduction and establishment of energy-saving and greenhouse gas-reducing technologies for heavy-duty vehicles

Many energy-saving and greenhouse gas-reducing technologies for heavy-duty vehicles already available on the current market find limited application and are used by only a fraction of vehicle operators. In consequence, the scope of the present study included the discussion of political strategies to promote the introduction and establishment of such technologies.

The initial step included the analysis of prerequisites and barriers for a market introduction and establishment of greenhouse gas-reducing technologies beyond greenhouse gas reduction potentials and cost (reductions). These include legal and practical parameters as well as information deficits and other barriers to stakeholder acceptance in freight transport. Based on these results, the second step included the analysis of strategies to promote the introduction and establishment of energy-saving technologies for heavy-duty vehicles in Europe. Advantages and disadvantages of different strategies as well as their acceptance within the freight logistics sector were discussed. From these single strategies, a roadmap combining different strategies was developed.

Barriers for the establishment of energy-saving and greenhouse gas-reducing technologies

The analysis of prerequisites and barriers for the market introduction and establishment of energy-saving technologies included a literature search complemented by consultations with stakeholders in freight transport (truck manufacturers, haulage businesses and transport companies).

The introduction of energy-saving HDV technologies is hampered by a number of obstacles:

- ▶ **Technology-specific barriers** are related to characteristic features (e.g. dimensions, weight) of a specific technology or special prerequisites necessary for the application of a certain technology. Major technology-specific barriers are associated with
 - Reduced ease of use/ user friendliness (e.g. driver comfort, time-consuming routines)
 - Reduced economical use of the vehicle for compliance with legal requirements (e.g. construction changes) or reduced compatibility with international standards (e.g. craneability)
 - Non-existent supply infrastructure and service network (e.g. for natural gas, hybrid and battery-electric vehicles)
- ▶ **Financial barriers** result from absolute costs (e.g. high investment costs) or from the evaluation of the cost-benefit-ratios of a technology (e.g. assessment of outage probabilities, payback expectations, resale value). Smaller businesses in particular frequently lack the personnel to accurately assess cost reduction potentials and have both limited financial means at their disposal and limited access to loans.
- ▶ **Structural barriers** are caused by existing structures and established procedures in the logistics sector. The pivotal question in this context is the importance of fuel costs for vehicle operators. There are two aspects relevant to the question, the proportion of fuel costs in reference to the overall total of the business, and the ‘fuel responsibility’, i.e. which party effectively pays for the fuel consumed during transport. With a share of 20-30 %, fuel costs are particularly relevant in regional and long-haul transport. However, a number of mechanisms exist for hauliers to shift costs to clients (e.g. fuel escalation clauses). If the financial responsibility is shifted to the client to a large extent, the incentive for the establishment of efficiency measures among the fleet is low. Beyond that, a smaller transport client has only limited opportunities to induce the establishment of energy-saving technologies in a major haulage contractor.
- ▶ **Information deficits** arise due to the complexity of the topic, particularly with respect to the challenge of accurate calculation of reduction potentials and costs, and the adequate communication of results.

The assessment of barriers distinguishes between technology-specific barriers and others. The assessment of the relevance of technology-specific barriers strongly depends on the evaluation of the importance of a technology from political, economic and environmental angles. Moreover, barriers should be differentiated into those with a foreclosing and those with a delaying effect.

The additional barriers not related to individual technologies should be considered in context. According to survey data, there is a general awareness of energy-saving technologies within the freight transport sector. A pivotal barrier to widespread implementation may be found in the lack of reliable and credible information. Knowledge on reduction potentials of a given technology is fundamentally important for the calculation of cost-benefit-ratios. The absence of economic analyses in turn impedes the acquisition of funding for additional purchases. Small businesses are at a particular disadvantage to invest in novel technologies due to limited personnel and restricted financial resources. In addition, a limited reliability of novel technologies may act as a major deterrent in the view of vehicle operators.

Measures to promote technology introduction and establishment in heavy-duty vehicles

Based on the analysis of barriers, measures promoting the introduction of energy-saving HDV technologies and their widespread establishment throughout the vehicle fleet were examined. The focus was particularly on political incentives for the improvement of fuel efficiency in road freight transport. The resulting measures were grouped depending on their overall approach:

- ▶ **Information** involves measures for the supply and dissemination of information;
- ▶ **Funding** comprises measures that involve financial support;
- ▶ **Regulation** defines measures addressing changes in legislation.

Both the analysis of barriers and the analysis of measures revealed that a combination of different measures should be pursued to most effectively address the different barriers and stakeholders. A synthesis of the different aspects is attempted in the proposed roadmap (Figure 9).

Information: Potential buyers depend on reliable and transparent information on reduction potentials and costs of a technology to carry out realistic cost-benefit-analyses. To satisfy the demand for reliable and transparent information on cost-benefit-analyses of efficiency technologies, an initial requirement would be a standardised test methodology for the quantification of CO₂ emissions. These data are required both for entire vehicles and individual technologies. The VECTO simulation model of the European Commission is already pursuing this approach. However, due to the great diversity and complexity of technologies, it is not possible to model all technologies and combinations at present. Further development of VECTO or the development of supplementary methods for technologies currently not included in the VECTO model is required. The goal should be a model that includes all available and future technologies applying unequivocal standards.

Standardised test methodology acts as the foundation for a number of additional measures. This correlation is illustrated with a uniform blue colouring in the figure. One pivotal measure is the CO₂ certification of HDVs or single technologies for the purpose of publishing information on reduction potentials in a transparent and comprehensible way. Energy consumption and CO₂ certification should be mandatory for all new HDVs. As a complement to these general certificates, a voluntary certification for single technologies should be made available, particularly for technologies with retrofitting potential, thus providing manufacturers with proof of the efficiency effects of their technologies. Such certification allows the establishment of targeted incentives, which in turn alleviate the barrier of high investment costs for the purchase of new vehicles, or the retrofitting of the existing fleet with energy-saving and greenhouse gas-reducing technologies.

Even with appropriate information available, smaller businesses may struggle to compile such information and calculate payback periods adequately. Independent efficiency consultants could support hauliers during the purchase of vehicles with superior efficiency or supervise the retrofitting with efficiency technologies. Moreover, such consultants could be in charge of disseminating information on government incentives (e.g. funding programmes) and support the introduction of fuel-consumption monitoring. General information events (e.g. trade fairs, road shows) introducing successful examples of consumption reduction through available or newly developed efficiency technologies present an opportunity for stronger promotion of the entire topic of HDV energy efficiency and measures for energy savings.

Funding: Despite the general promise of economic benefits, high cost of purchase may act as a barrier preventing investment into additional energy-saving technologies when purchasing a new vehicle. Appropriate funding measures may help alleviate this obstacle. Among the incentives could be investment loans at reduced rates for certified technologies, or funding programmes for municipalities allowing the retrofitting of their fleets. Another conceivable option would be the establishment of environmental incentives in the form of a scrappage scheme for old HDVs with simultaneous purchase of a new vehicle. Funding programmes may target technologies that are currently not economical, but desired from a political point of view. Targeted funding may increase production numbers, which in turn generates knowledge and learning of optimal methods, thus reducing specific production costs and lowering prices for new vehicles. Moreover, research and development by technology manufacturers could be funded to accelerate market availability, functionality, reliability and economic pricing.

In addition to government funding, private fuel-saving-contracting should be considered. External investors bear the cost of purchase for efficiency technology (or part thereof) in return for a stake in the subsequent cost savings. The introduction of fuel consumption monitoring in the transport sector would be a prerequisite for such schemes.

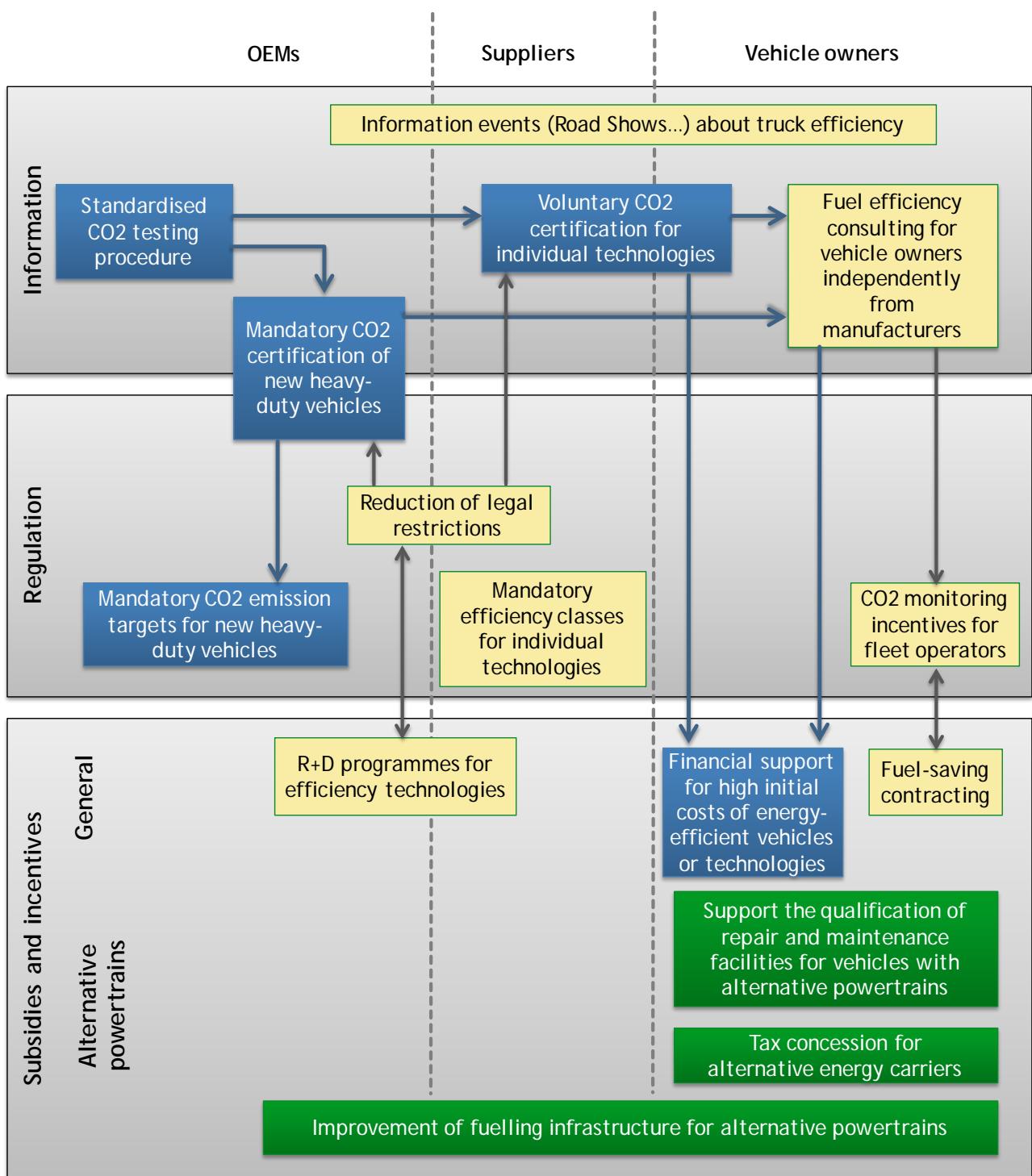
Measures for the promotion of alternative drive concepts are seen as a separate group within the roadmap. The integration of alternative drives into the market requires extensive support, particularly with regard to the supply infrastructure. The development of the energy supply infrastructure including the extension of refuelling stations with natural gas supply (CNG, LNG) and electricity charging stations is indispensable for the establishment of alternative drives. A comprehensive service network for maintenance and repairs is equally important. As long as the number of vehicles with alternative engines remains low, garages are unlikely to invest in the education of their staff or the purchase of new equipment. Conversely, potential buyers may be reluctant to invest in new technology if the service network is underdeveloped and adequate service is scarce. Finally, the suitability of tax benefits such as the current energy tax benefit of natural gas should be examined for other alternative drive concepts.

Regulation: A number of technical measures are currently ignored due to the fact that these technologies are frequently larger or heavier than regular diesel engines, thus considerably decreasing the payload. Although future technical developments may optimise dimensions, it is recommended to consider adaptations of legal requirements for such technologies to provide manufacturers with more flexibility during the development of efficiency technologies.

Pressure to act may also be generated through mandatory efficiency classes for individual technologies, e.g. tighter restrictions for the rolling resistance of future tyres exceeding current EU standards. Such measures not only promote the equipment of vehicles with the most energy-efficient technology, they also prevent vehicle operators from letting standards slip during the maintenance with consumables (e.g. tyres, oil, lighting) and electing to use less efficient products.

In the case that information and funding measures fail to produce the desired effects in lowering greenhouse gas emission of HDVs, the introduction of a mandatory European CO₂ regulation for heavy-duty vehicles should be considered in analogy to the passenger car sector.

Figure 9 Roadmap of political measures to promote the establishment of energy-saving and GHG reducing technologies in the HDV fleet



1 Hintergrund und Zielstellung

Der Verkehrssektor ist heute für ca. 30 % des Endenergieverbrauchs und 20 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Dabei hat der Straßenverkehr den größten Anteil. Hier hat in den vergangenen Jahren vor allem der Straßengüterverkehr deutlich zugenommen. So stieg die Verkehrsleistung der Lkw zwischen 2000 und 2010 um 26 % an. Der Zuwachs war damit deutlich stärker als beim Pkw-Verkehr mit 7 %. Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw und Busse >3.5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht) sind heute für rund ein Viertel des Energieverbrauchs im Straßenverkehr verantwortlich. Aktuelle Prognosen erwarten auch für die Zukunft eine weitere deutliche Zunahme des Lkw-Verkehrs (2010 bis 2030: +30 Prozent) und nur ein deutlich geringeres Wachstum beim Pkw (+10 Prozent) [BMVI, 2014].

Um die Klimaschutzziele zu erreichen und den Energieverbrauch zu verringern, sind damit auch bei schweren Nutzfahrzeugen deutliche Minderungen des Kraftstoffverbrauchs notwendig. Die Europäische Kommission arbeitet zusammen mit ihren Mitgliedern an Strategien zur Reduktion der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge und hat im Mai 2014 erste Eckpunkte dazu vorgelegt [EC, 2014a]. Eine wichtige Voraussetzung für fahrzeugbezogene Strategien ist die standardisierte Bestimmung der CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. Hierzu lässt die EU aktuell ein entsprechendes Testverfahren erarbeiten, das für die meisten der bei schweren Nutzfahrzeugen zahlreichen Fahrzeugkonfigurationen anwendbar ist. Für die ersten Fahrzeugklassen soll der dafür vorgesehene simulationsbasierte Ansatz in Bälde einsatzfähig sein [JRC, 2014].

Um darüber hinaus auch Potenziale von bisher nicht serienmäßigen Effizienzmaßnahmen abschätzen zu können, wurde vom UBA diese Studie beauftragt. Hauptziel des Forschungsprojekts ist die Ermittlung von Energieeinspar- und Treibhausgasminderungspotenzialen von bisher nicht serienmäßigen Fahrzeugtechnologien bei schweren Nutzfahrzeugen. Mit dem zukünftig in der Nutzfahrzeugzertifizierung vorgesehenen CO₂-Simulationstool (VECTO) sollen die technologiespezifischen Minderungspotenziale bestimmt werden und darauf aufbauend eine Bewertung der Kosteneffizienz der ausgewählten Technologien erfolgen. Ergänzend dazu werden in der Studie politische Strategien für eine Förderung des Einsatzes kraftstoffsparender und treibhausgasmindernder Fahrzeugtechnologien untersucht. Dabei wurde an Ergebnisse bereits laufender und abgeschlossener (internationaler) Forschungsvorhaben zu Einsparpotenzialen und Kosten von Lkw-Technologien angeknüpft.

Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden ausgewählte, derzeit noch nicht standardmäßig bei schweren Nutzfahrzeugen eingesetzte Technologien in Hinblick auf Potenziale zur Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen sowie damit verbundene Kosten bewertet. Dazu wurden ausgewählte Einzeltechnologien am Antriebstrang, zur Verbesserung von Aerodynamik und Rollwiderstand sowie Optimierungen von Fahrzeuggewicht, Nebenverbrauchern und Fahrzeugregelung systematisch untersucht. Zur Festlegung der untersuchten aerodynamischen Maßnahmen wurden dabei zunächst Möglichkeiten zur verbrauchsoptimalen aerodynamischen Gestaltung von schweren Nutzfahrzeugen in einem eigenen Arbeitspaket erörtert.

Einsparpotenziale und Kosten der Technologien wurden in einer Kosten-Nutzen-Matrix zusammengeführt, die einen Technologievergleich zu verschiedenen Fragestellungen wie Potenzialhöhe und Kosteneffizienz über verschiedene Betrachtungszeiträume ermöglicht. Weiterhin wurden auf dieser Basis Maßnahmenpakete definiert und fahrzeugbezogene Gesamtpotenziale zur Treibhausgasminderung sowie Kostenkurven der Treibhausgasvermeidungskosten abgeleitet.

Eine Vielzahl treibhausgasmindernder Technologien für schwere Nutzfahrzeuge ist bereits heute am Markt verfügbar. Dennoch werden verschiedene dieser Technologien bisher nur von einem vergleichsweise geringen Anteil der SNF-Betreiber eingesetzt. Ziel des zweiten Arbeitspaketes ist daher die Diskussion möglicher Maßnahmen und politischer Strategien, welche die Einführung zusätzlicher treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen unterstützen und ihre stärkere Verbreitung bei schweren Nutzfahrzeugen in Europa fördern können.

Im ersten Schritt wurden über Minderungspotenziale und Kosten hinausgehende Voraussetzungen und Hemmnisse für eine Markteinführung und -verbreitung energiesparender Nfz-Technologien analysiert. Dazu

gehören rechtliche und praktische Rahmenbedingungen (gesetzliche Regelungen, praktische Einschränkungen) ebenso wie Informationsdefizite/Wissenslücken und andere Akzeptanzhemmnisse/Vorbehalte bei Akteuren im Güterverkehr (z. B. Amortisationserwartungen, Fahrersicherheits- und -komfortfragen, Marktstrukturen). Auf dieser Grundlage erfolgte im zweiten Schritt eine Analyse von politischen Strategien, welche die Einführung und Verbreitung von energiesparenden Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen in Europa fördern können. Ausgehend von den Einzelstrategien wurde eine strategische Roadmap skizziert, welche die verschiedenen Strategien miteinander verknüpft.

2 Technologische Energiespar- und Treibhausgasminderungspotenziale bei schweren Nutzfahrzeugen und damit verbundene Kosten

2.1 Zielstellung und Vorgehensweise

Ein Hauptziel des vorliegenden Forschungsprojekts ist die Beurteilung von Treibhausgasminderungspotenzialen¹ durch zusätzliche Technologien, die derzeit noch nicht standardmäßig bei schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt werden, sowie die Abschätzung von damit verbundenen zusätzlichen Kosten für die Fahrzeuggbetreiber. Dazu wurden ausgewählte Einzeltechnologien am Antriebstrang, zur Verbesserung von Aerodynamik und Rollwiderstand sowie Optimierungen von Fahrzeuggewicht, Nebenverbrauchern und Fahrzeugregelung systematisch untersucht. Einsparpotenziale und Kosten der Technologien wurden in einer Kosten-Nutzen-Matrix zusammengeführt, die einen Technologievergleich zu verschiedenen Fragestellungen wie Potenzialhöhe und Kosteneffizienz über verschiedene Betrachtungszeiträume ermöglicht. Weiterhin wurden auf dieser Basis Maßnahmenpakete definiert und fahrzeugbezogene Gesamtpotenziale zur Treibhausgasminderung sowie Kostenkurven der Treibhausgasvermeidungskosten abgeleitet.

Ausgangspunkt der Analysen war eine umfangreiche Literaturrecherche des international aktuellen Stands der Wissenschaft zu zusätzlichen kraftstoffsparenden bzw. treibhausgasmindernden Technologien für schwere Nutzfahrzeuge. Für diese Technologien wurden aktuell verfügbare Literaturwerte zu Potenzialen und Kosten für verschiedene Fahrzeuggrößen und Einsatzbereiche in einer Datenbank gesammelt. Für die weiteren Analysen wurde daraus eine Auswahl von Technologien mit vielversprechenden Potenzialen bzw. niedrigen Kosten getroffen, die bereits am Markt verfügbar sind bzw. voraussichtlich in wenigen Jahren marktreif sein werden, aber bisher nicht zur Standardausstattung in Europa gehören.

Die ausgewählten Technologien wurden zu Maßnahmen in verschiedenen Bereichen (Antriebsstrang, Aerodynamik, Rollwiderstand...) zusammengefasst und standardisierte, miteinander vergleichbare Energieeinsparpotenziale abgeleitet. Dabei wurde mit dem Simulationstool VECTO das neue Berechnungsverfahren zur CO₂-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt, welches die TU Graz in Kooperation mit dem Verband der europäischen Fahrzeugindustrie ACEA sowie mit der Zuliefererindustrie für die EU-Kommission entwickelt hat [JRC, 2014]. Warum für schwere Nutzfahrzeuge ein Simulationsverfahren zur CO₂-Zertifizierung notwendig ist, wird in Kapitel 2.4.1 erläutert. Für Technologien, die bisher nicht mit VECTO simuliert werden können, erfolgte die Potenzialanalyse mit nachgelagerten Verfahren. Auf dieser Grundlage erfolgte über die Potenzialermittlung hinaus auch eine qualitative Bewertung zur aktuellen und zukünftigen Eignung des Simulationstools VECTO zur standardisierten Potenzialbewertung auch für zukünftige Technologien als Voraussetzung für deren Einbezug in eine zukünftige CO₂-Regulierung von schweren Nutzfahrzeugen.

Parallel zur Potenzialanalyse wurden mit dem Einsatz der Technologien verbundene zusätzliche Investitions- und Betriebskosten für die Fahrzeuggbetreiber abgeschätzt. Die Kostenanalyse erfolgte vorrangig anhand von frei verfügbaren Preisinformationen für die ausgewählten Technologien, z. B. in Preislisten und Fachzeitschriften, ergänzt durch Auswertung verfügbarer wissenschaftlicher Literatur und einzelne Anfragen bei Herstellern, Händlern bzw. Fahrzeuggbetreibern.

Zur Diskussion der Konfiguration einzelner Technologien, damit erreichbaren Einsparpotenzialen und verbundenen zusätzlichen Investitionskosten wurden Einzelgespräche mit Technologiezulieferern sowie Fahrzeuggbetreibern geführt. Weiterhin erfolgte eine Diskussion aller ausgewählten Technologien in zwei Experten-Workshops bei den Nutzfahrzeugherrstellern Daimler und MAN sowie ein Workshop beim Umweltbundesamt zur Diskussion der Zwischenergebnisse mit Vertretern von Nutzfahrzeug- und Aufliegerindustrie. Die Experten-Rückmeldungen flossen in die finalen Ergebnisse der Potenzial- und Kostenanalysen ein.

¹ Treibhausgase aus dem Verkehr sind fast ausschließlich CO₂, daher wird in der Studie teilweise vereinfachend nur von CO₂ gesprochen. In allen Angaben von CO₂-Mengen und –Minderungspotenzialen, die neben den direkten Emissionen auch die Vorkette zur Energiebereitstellung einbeziehen („well-to-wheel“), sind stets CO₂-Äquivalent-Emissionen gemeint.

Mit den Ergebnissen der Potenzial- und Kostenanalysen in den einzelnen Technologiebereichen wurde eine Kosten-Nutzen-Matrix erstellt, in der sowohl die einzelnen Maßnahmen gegenübergestellt als auch deren Kombination in unterschiedlichen Maßnahmenpaketen zur Fahrzeug-Gesamtoptimierung untersucht wurden. Für die Einzelmaßnahmen wurde zunächst analysiert, welche Einsparungen an Kraftstoffkosten den zusätzlichen Investitionskosten gegenüberstehen und wie gut sich damit die Maßnahmen in unterschiedlichen Amortisationszeiträumen rechnen würden. Durch Ermittlung der technologiespezifischen Differenzkosten über die gesamte Fahrzeuglebensdauer wurde eine Rangfolge der Einzelmaßnahmen nach ihrer Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung erarbeitet.

Darauf aufbauend wurden Vermeidungskostenkurven für die Kombination von Einzelmaßnahmen in verschiedenen Maßnahmenpaketen abgeleitet. Mit diesen Kostenkurven wurden abschließend die Höhe der spezifischen Grenzvermeidungskosten (MAC-Kurve) sowie die kumulierten Kosten zur Erreichung unterschiedlicher prozentualer Treibhausgasminderungen pro Fahrzeug durch Kombination von Technologien beurteilt.

2.2 Untersuchte Fahrzeugklassen und Einsatzzwecke

2.2.1 Fahrzeugklassen und Einsatzzwecke bei schweren Nutzfahrzeugen

Für die vorliegende Arbeit wurde auf die Einteilung der europäischen Nutzfahrzeugflotte zurückgegriffen, die im Rahmen der Erarbeitung eines Zertifizierungsverfahrens für CO₂ von SNF in Kooperation mit der ACEA erarbeitet worden ist. 20 Fahrzeugklassen werden auf verschiedenen Fahrzyklen simuliert, die für die jeweilige Klasse typische Einsatzzwecke repräsentieren. Insgesamt wurden folgende zehn Fahrzyklen für typische Einsatzzwecke entwickelt:

- ▶ Urban delivery (Lkw städtischer Lieferverkehr)
- ▶ Regional delivery (Lkw Regionalverkehr)
- ▶ Long haul (Lkw Fernverkehr)
- ▶ Construction (Lkw Bauverkehr)
- ▶ Municipal utility (Lkw städtische Müllabfuhr)
- ▶ Citybus heavy urban (Linienbus Innenstadt)
- ▶ Citybus urban (Linienbus städtischer Fahrzyklus)
- ▶ Citybus suburban (Linienbus Außenbezirke)
- ▶ Interurban bus (Linienbus Überland)
- ▶ Coach (Reisebus)

Welche Fahrzeugklassen in welchen Zyklen fahren, kann aus Tabelle 3 und Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 3 Einteilung der europäischen Lkw-Flotte in 17 Fahrzeugklassen

Axles	Axe configuration	Identification of vehicle class			Segmentation (vehicle configuration and cycle allocation)					Norm body allocation		
		Chassis configuration	Maximum GVW [t]	<-- Vehicle class	Long haul	Regional delivery	Urban delivery	Municipal utility	Construction	Standard body	Standard trailer	Standard semitrailer
2	4x2	Rigid	>3.5 - 7.5	0 **)		R	R			B0		
2	4x2	Rigid or Tractor	7.5 - 10	1		R	R			B1		
		Rigid or Tractor	>10 - 12	2	R	R	R			B2		
		Rigid or Tractor	>12 - 16	3		R	R			B3		
		Rigid	>16	4	R+T	R		R		B4	T1	
		Tractor	>16	5	T+S	T+S						S1
	4x4	Rigid	7.5 - 16	6				R	R	(B3)		
		Rigid	>16	7					R	(B5)		
		Tractor	>16	8					T+S			(S1)
	6x2/2-4	Rigid	all weights	9	R+T	R		R		B6	T1	
		Tractor	all weights	10	T+S	T+S						S2
		Rigid	all weights	11					R	(B7)		
		Tractor	all weights	12					R			(S2)
	6x6	Rigid	all weights	13					R	(B7)		
		Tractor	all weights	14					R			(S2)
4	8x2	Rigid	all weights	15					R	(B8)		
	8x4	Rigid	all weights	16					R	(B9)		
	8x6 & 8x8	Rigid	all weights	17					R	(B9)		
R = Rigid & Body R+T = Rigid & Body & Trailer *) T+S = Tractor & Semitrailer () = no (Cd*A) measurement, only vehicle weight and frontal area												
*) Whether it is sufficient to simulate the truck-trailer combination based on Cd*A for Rigid & Body or the full-vehicle test for aerodynamic drag has to be performed additionally with Rigid & Body & Trailer has to be clarified **) Suitability of cycles and entire process for segment <7.5t GVW to be evaluated												

Quelle: [TU Graz, 2014]

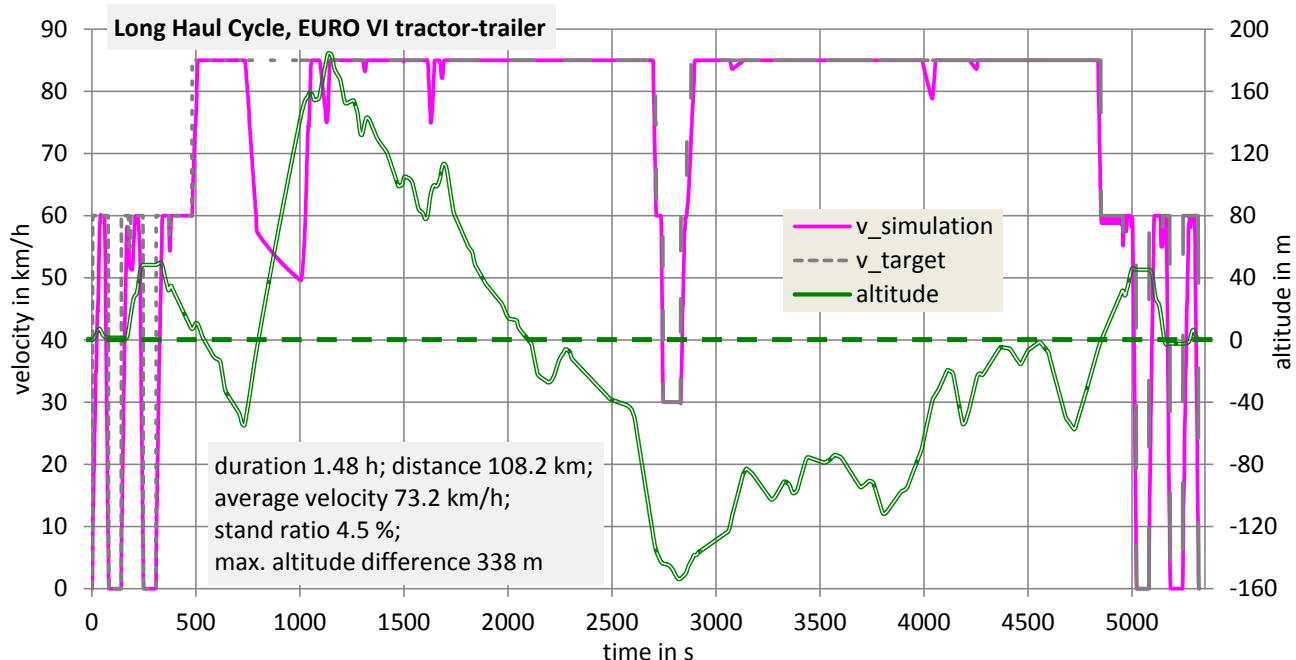
Tabelle 4 Einteilung der europäischen Busflotte in drei Fahrzeugklassen

Vehicle class	Mission	First approach: classification according EU registration (2001/85/EU)	Second approach: If vehicle can be registered as:			Cycle allocation					
			Class I or II		Class II or III		Heavy Urban	Urban	Suburban	Interurban	Coach
B1	City	Class I	Low Floor Low Entry (Def.: minimum 2 doors with low entrance) Double decker (w/o luggage compartment)		---		HU	UR	SU		
B2	Interurban	Class II	luggage compartment		Floor height <= 900mm				IU		
B3	Coach	Class III	---		Floor height > 900mm Double decker						CO

Quelle: [TU Graz, 2014]

In der Simulation der Fahrzyklen im Zertifizierungsverfahren der EU (vgl. Kap. 2.4.1) werden Soll-Geschwindigkeit, Fahrbahnsteigung und Standdauer über Weg vorgegeben. Da es sich um die Vorgabe der maximalen Soll-Geschwindigkeit handelt, wird gewährleistet, dass Fahrzeuge mit stärkerem Motor beim Beschleunigen und an Steigungen schneller sind und damit der Verbrauchsunterschied zwischen verschiedenen Motorgrößen korrekt simuliert wird. Würde in der Vorgabe die Ist-Geschwindigkeit verwendet, müsste diese so niedrig sein, dass auch das leistungsschwächste Fahrzeug einer Klasse folgen kann. Dies führt zu unrealistisch langsamem Testzyklen wie dem NEFZ, der auch für leistungsschwache Kleinwagen zu Beginn der 1970er Jahre passen musste. Als Beispiel für einen Nfz-Fahrzyklus ist in Abbildung 10 der Long Haul Cycle dargestellt, simuliert mit dem Modell eines typischen EURO-VI-Sattelzugs. Alle verwendeten Testzyklen stellen den derzeitigen Entwicklungsstand dar [TU Graz, 2014] und könnten bis zur Einführung der CO₂-Zertifizierung noch geringfügig geändert werden.

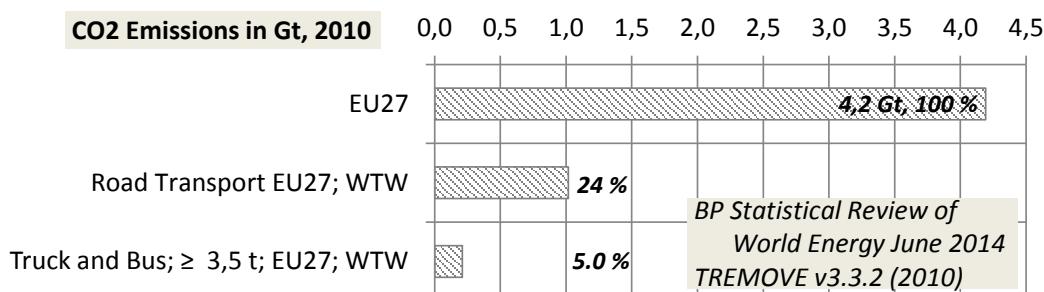
Abbildung 10 Long Haul Cycle



2.2.2 Auswahl von Fahrzeugklassen und Einsatzzwecken im Forschungsvorhaben

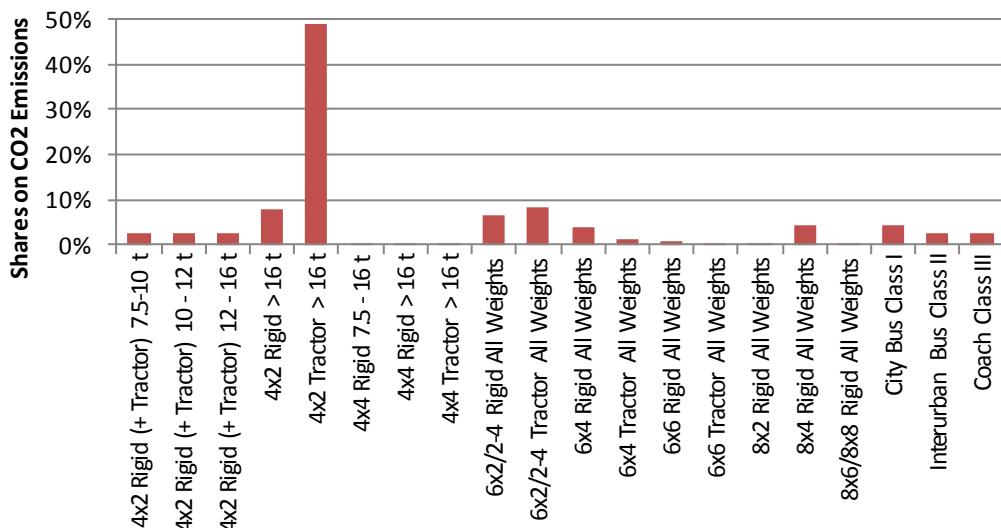
Das Ziel dieses Projektes ist die Ermittlung des Minderungspotenzials von Treibhausgasen, im Falle von schweren Nutzfahrzeugen (SNF) hauptsächlich CO₂. Den Anteil der europäischen SNF-Flotte an den CO₂-Emissionen zeigt Abbildung 11.

Abbildung 11 Anteil der Nutzfahrzeugflotte an den europäischen CO₂-Emissionen 2010



Quelle: [BP, 2014], [TML, 2010]

Abbildung 12 Aufteilung der CO₂-Emissionen auf die Nutzfahrzeugklassen in Europa



Quelle: [TU Graz, 2012a]

Innerhalb der Nfz-Flotte Europas teilen sich die CO₂-Emissionen auf wie in Abbildung 12 dargestellt. Den weitaus größten Anteil haben mit 49 % die Sattelzüge im Fernverkehr und regionalen Verteilerverkehr. Hier machen sich Maßnahmen bei der Kraftstoffeinsparung sofort in der Gesamtbilanz bemerkbar.

In dieser Studie wurden folgende Fahrzeugklassen untersucht:

- ▶ **Sattelzug 40 t** Diese Fahrzeugklasse trägt mit 49 % am meisten zum CO₂ der Nfz Flotte in Europa bei. Simuliert wurden die Fahrzeugmodelle auf dem Long Haul Cycle (Lkw Fernverkehr) und dem Regional Delivery Cycle (Lkw Regionalverkehr).
- ▶ **Verteiler-Lkw 12 t** Mit 2,6 % ist der CO₂-Anteil dieser Fahrzeugklasse gering. Sie kann jedoch als repräsentativ für den Großteil der 4x2 und 6x2 Solo-Lkw gesehen werden (ca. 22 % CO₂-Anteil), auf die somit für den Verteiler-Lkw ermittelte Reduktionspotenziale übertragbar sind. Diese Fahrzeugklasse wurde auch im Rahmen von LOT3 [TU Graz, 2014] untersucht, so dass hier eine sehr gute Datenbasis vorhanden war. Für die Analysen wurde der Urban Delivery Cycle (städtischer Lieferverkehr) gewählt.
- ▶ **Stadtbus 18 t (Normalbus, Länge 12 m)** Diese Nutzfahrzeugklasse hat mit 4,4 % CO₂-Anteil (Normal- und Gelenkbusse) einen relativ kleinen Anteil am Gesamtausstoß aller Nfz. Allerdings sprechen hier im Speziellen auch politische Gründe für Sparmaßnahmen: Stadtbusse fahren in Ballungsräumen, werden oft von öffentlichen Institutionen beschafft und haben somit eine Vorreiterrolle. Ein typisches Fahrprofil für den Stadtbus ist der Citybus Urban Cycle (städtischer Fahrzyklus).

Für die untersuchten Fahrzeugklassen werden in Abbildung 13 Beispielbilder gezeigt. Die Untersuchung war herstellerneutral und es wurde mit Modellen von repräsentativen Durchschnittsfahrzeugen gearbeitet.

Abbildung 13 Sattelzug 40 t, Verteiler-Lkw 12 t und Normalbus 18 t (v. l. n. r.; Beispielbilder)



wikimedia.org, 2007, CC BY-SA 3.0



openswisscloud.de, 2014



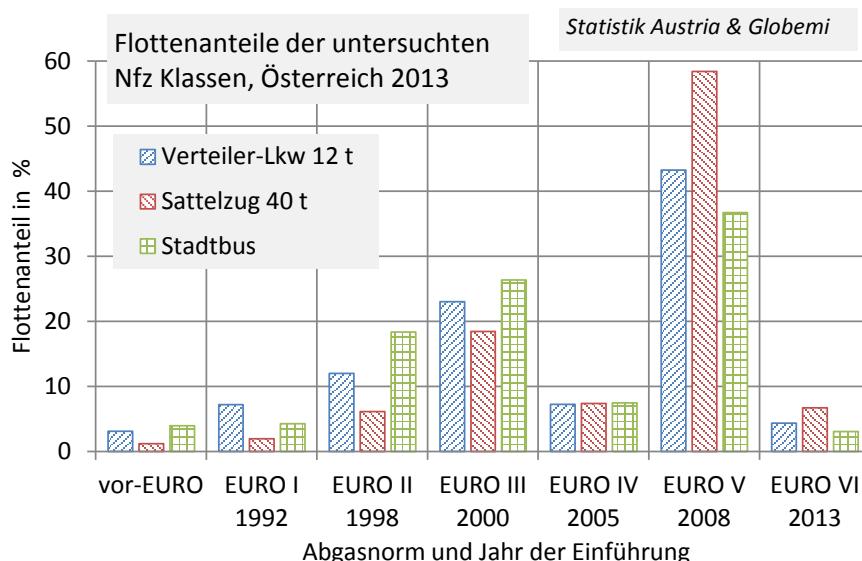
wikipedia.org, 2006, CC BY-SA 3.0

2.2.3 Technologische Ausstattung aktueller schwerer Nutzfahrzeuge – Konfiguration der Referenzfahrzeuge für die Potenzialanalysen

Im Folgenden werden die Referenzfahrzeuge vorgestellt, die Ausgangspunkt zur Analyse zusätzlicher Energie- spars- und Treibhausgasminderungspotenziale sind. Die jeweiligen EURO-VI-Fahrzeuge sind ein Querschnitt des aktuellen Standes der Technik und können mit ein paar Unterschieden so gekauft werden. Bei den Referenzfahrzeugen sind einige Maßnahmen, die in der Literatur als Energiespartechnologien angegeben sind, bereits Standard; damit mögliche Einsparungen können somit nicht als Zusatzpotenziale gesehen werden. Bei der Sattelzugmaschine sind dies z. B. die Windleitbleche zwischen Kabine und Auflieger, die Seitenverkleidung und die teilweise Unterbodenverkleidung. Auch die Reifen der untersuchten Nfz sind innerhalb der Bandbreite des Angebo tes vergleichsweise rollwiderstandsarm, so dass aktuell nur eine Rollwiderstandsklasse (nach EC 1222/2009) Verbesserung möglich ist. Die meisten EURO-VI-Modellreihen bei Nfz wurden innerhalb der letzten zwei Jahre eingeführt und haben bereits viele Sparmaßnahmen serienmäßig, die vorher noch als Extra galten.

Bei der Einteilung von verbrauchsreduzierenden Maßnahmenpaketen ist Folgendes zu beachten: Die Fahrzeuge, die zwischen 2008 und 2013 nach dem EURO-V-Standard gebaut wurden, werden auch in den nächsten Jahren noch einen großen Teil der Nfz-Flotte stellen. Die Flottenzusammensetzung der österreichischen Nfz-Flotte mit Stichtag 31.12.2013 [TU Graz, 2013a] ist in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 14 Einteilung ausgewählter Nfz-Klassen nach Emissionsstufe, 12/2013



Quelle: [TU Graz, 2013a]

Man sieht, dass sieben Jahre nach Produktionsende 2006 die EURO-III-Nfz noch ca. 20 % der österreichischen Flotte ausmachten. Ende 2010 hatten sie auf österreichischen Autobahnen noch einen Gesamt- Fahrleistungsanteil von 46 %. Daraus lässt sich folgern, dass die bis letztes Jahr produzierten EURO-V-Nfz bis ca. 2020 beim Kraftstoffverbrauch eine bedeutende Rolle spielen und daher bei der Einteilung in Technikstufen und Maßnahmenpakete als ergänzende Vergleichsbasis gewählt werden können. In Deutschland und anderen EU Ländern wird die Aufteilung der Nfz Flotte etwas von den gezeigten Zahlen abweichen, jedoch bleibt die Grundaussage gültig: Die bis Ende 2013 produzierten und zugelassenen EURO-V Nfz werden in den nächsten Jahren einen signifikanten Anteil an Kraftstoffverbrauch und CO₂ Emissionen haben.

Die Recherche publizierter Fahrzeugmessungen ergab, dass EURO-VI-Nfz gegenüber den EURO-V-Vorgängern ca. 4 bis 5 % Kraftstoff einsparen [LAO, 2010a] [LAO, 2013a] [Busmagazin, 2013] [Daimler, 2014]. Daher ist bereits mit Anreizen, früher auf neue EURO-VI-Fahrzeuge umzusteigen, eine merkbare Verbrauchseinsparung möglich. Mit den in diesem Projekt betrachteten Technologien werden darüber hinausgehende zukünftige Ein- sparpotenziale untersucht.

In den nächsten Abschnitten wird die Konfiguration der Referenzfahrzeuge dargestellt.

Sattelzug 40 t

	EURO V	EURO VI
Gesamtfahrzeug	Sattelzug mit 40 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht - Sattelzugmaschine mit Fernfahrerhaus; - Kofferauflieger	
Motor	EURO V Motor 13 L Standard Antriebsleistung (kW): 350 $\eta_{\max} = 0,459$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,428$ Abgasnachbehandlung mittels SCR-Anlage,	EURO VI Motor 13 L Standard Antriebsleistung (kW): 350 $\eta_{\max} = 0,459$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,435$ Abgasnachbehandlung mittels SCR-Anlage, Partikelfilter und Oxidationskatalysator, zusätzlich Abgasrückführung am Motor zur Senkung der Roh-NO _x
Getriebe Verlustkennfelder Schalt- und Achsgetriebe: Standarddaten für VECTO, Stand 7/2014; eigene Recherche: Schleppmoment Achsgetriebe	Automatisiertes Schaltgetriebe (AMT) zwölf Gänge, 14,90 bis 1,00 $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,973$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,982$ $i_{HA} = 3,00$, $\eta_{Achse,m} = 0,956$	Automatisiertes Schaltgetriebe (AMT) 12 Gänge, 14,90 bis 1,00 $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,974$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,983$ $i_{HA} = 2,60$, $\eta_{Achse,m} = 0,959$
Reifen Rollwiderstandsbeiwerte: Obergrenze der Effizienzklassen nach EC 1222/2009 Achslastverteilung: Nach ACEA Whitebook 4/2014	Rollwiderstand achsabhängig - VA 315/70R22,5 Kl. B - HA 315/70R22,5 Kl. C - Auflieger 385/55R22,5 Kl. B Gesamt-Rollwiderstand 5,38 N/kN	Rollwiderstand achsabhängig - VA 315/70R22,5 Kl. B - HA 315/70R22,5 Kl. C - Auflieger 385/55R22,5 Kl. B Gesamt-Rollwiderstand 5,37 N/kN
Aerodynamik²	Sattelzugmaschine: Dachspoiler, Seitenspoiler Auflieger: keine Maßnahmen $C_w = 0,552$, $C_w * A_q = 5,52 \text{ m}^2$	Sattelzugmaschine: EURO V + Kühllufteinlass verschließbar, seitl. Fahrgestellverkleidung, Unterboden-Teilverkleidung Auflieger: keine Maßnahmen $C_w = 0,530$, $C_w * A_q = 5,30 \text{ m}^2$
Leermasse	Zugmaschine: 7,25 t, Tank 800 L, halbvoll Auflieger: 7,0 t	Zugmaschine: 7,40 t, Tank 800 L, halbvoll Auflieger: 7,0 t
Nebenverbraucher Mittlere Leistungsaufnahme gemäß VECTO Standard-Daten 7/2014, ACEA Whitebook 4/2014 und eigener Recherche (LED-Leuchten)	<u>Lüfter</u> : Viskokupplung, $P_m = 0,62 \text{ kW}$ <u>Kompressor</u> : Permanentantrieb, $P_m = 2,39 \text{ kW}$ <u>Lenkhilfepumpe</u> : Konstantpumpe, $P_m = 0,72 \text{ kW}$ <u>Klimaanlage</u> : Standard, $P_m = 0,36 \text{ kW}$ <u>Generator</u> : Topfgenerator, $P_m = 2,308 \text{ kW}$, $\eta_m = 0,477$ <u>Beleuchtung</u> : Halogen- und Glühbirnen, $P_{el,m} = 1,100 \text{ kW}_{el}$ (alle elektr. Verbraucher) $P_{m,Nv} = 6,40 \text{ kW}$	<u>Lüfter</u> : Viskokupplung, verringerte Leerlaufverluste, $P_m = 0,52 \text{ kW}$ <u>Kompressor</u> : verringerte Leerlaufverluste, $P_m = 1,59 \text{ kW}$ <u>Lenkhilfepumpe</u> : Konstantpumpe, $P_m = 0,72 \text{ kW}$ <u>Klimaanlage</u> : Standard, $P_m = 0,36 \text{ kW}$ <u>Generator</u> : Kompaktgenerator, $P_m = 1,367 \text{ kW}$, $\eta_m = 0,750$ <u>Beleuchtung</u> : LED-Teilausstattung $P_{el,m} = 1,025 \text{ kW}_{el}$ (alle elektr. Verbraucher) $P_{m,Nv} = 4,56 \text{ kW}$
Mittlere Beladung	19,3 t	19,3 t

Die Eingabedaten Motorkennfeld, Getriebekennfelder, Schaltlogik und Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher entsprechen dem VECTO-Standarddatensatz, Stand 7/2014. Die mittleren Wirkungsgrade von Motor und Getriebe

² EURO V: $c_{W,EURO-VI} + 4 \%$, EURO VI: Messung im Rahmen des HDV- CO₂- Lot-3-Projektes

sind bereits Ergebnisse der Simulation. Die EURO-VI-SZM hat eine um 150 kg höhere Leermasse durch die aufwändigeren Abgasnachbehandlungsanlage.

Zum Achsgetriebe sei angemerkt, dass der angesetzte Wirkungsgrad wahrscheinlich zu niedrig ist. Im Standardkennfeld, vorgeschlagen von der Industrie als Datensatz für die CO₂-Zertifizierung, falls keine gemessenen Achsverluste für das konkrete Fahrzeug vorliegen, wird ein konstantes Schleppmoment von 40 Nm angenommen³. Aufgrund von bekannten Messwerten eines Pkw-Achsgetriebes⁴ wurde dieser hohe Wert reduziert und auf 5 bis 16 Nm (ansteigend mit der Drehzahl) geschätzt. Hier besteht aus derzeitiger Sicht der Autoren Bedarf für die Überarbeitung der Standard-Eingabedaten.

Verteiler-Lkw (Solo-Lkw 12 t)

	EURO V	EURO VI
Gesamtfahrzeug	Solo-Lkw mit zwölf Tonnen zulässigem Gesamtgewicht - Kleines Fahrerhaus, - Radstand ca. 4,1 m, Kofferaufbau, - Ladebordwand - z. B. Renault D12 MED P4x2 250E6, MB Atego 1224 2x4	
Motor	EURO V Motor 8 L Standard Antriebsleistung (kW): 185 $\eta_{\max} = 0,431$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,386$ Abgasnachbehandlung mittels SCR-Anlage	EURO VI Motor 8 L Standard Antriebsleistung (kW): 185 $\eta_{\max} = 0,433$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,391$ Abgasnachbehandlung mittels SCR-Anlage, Partikelfilter und Oxidationskatalysator, zusätzlich Abgasrückführung am Motor zur Senkung der Roh-NOx
Getriebe Verlustkennfelder Schaltgetriebe: Standarddaten für VECTO, Stand 7/2014, Achsgetriebe: Konstantwert	Manuell 6 Gänge, 6,75 - 0,78 $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,966$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,981$ $i_{HA} = 4,00$, $\eta_{Achse,m} = 0,96$	Automatisiertes Schaltgetriebe 6 Gänge, 6,75 - 0,78 $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,967$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,986$ $i_{HA} = 4,00$, $\eta_{Achse,m} = 0,96$
Reifen Rollwiderstandsbeiwerte: Obergrenze der Effizienzklassen nach EC 1222/2009 Achslastverteilung: Nach ACEA Whitebook 4/2014	VA 265/70R19,5 Kl. C HA 265/70R19,5 Kl. D Gesamt-Rollwiderstand 6,76 N/kN	VA 265/70R19,5 Kl. C HA 265/70R19,5 Kl. D Gesamt-Rollwiderstand 6,75 N/kN
Aerodynamik⁵	Dachspoiler $C_w = 0,560$, $C_w * A_q = 4,93 \text{ m}^2$	Dachspoiler $C_w = 0,549$, $C_w * A_q = 4,83 \text{ m}^2$
Leergewicht	Motorwagen-Chassis: 4,8 t Aufbau mit Ladebordwand: 1,6 t Gesamt: 6,4 t	Motorwagen-Chassis: 4,9 t Aufbau mit Ladebordwand: 1,6 t Gesamt: 6,5 t
Nebenverbraucher Leistungswerte gemäß VECTO Standard-Daten 7/2014, ACEA Whitebook 4/2014 und eigener Recherche (LED-Leuchten)	<u>Lüfter</u> : Viskokupplung, $P_m = 0,52 \text{ kW}$ <u>Kompressor</u> : Permanentantrieb, $P_m = 1,11 \text{ kW}$ <u>Lenkhilfepumpe</u> : Konstantpumpe, $P_m = 0,31 \text{ kW}$ <u>Generator</u> : Topfgenerator, $P_m = 1,772 \text{ kW}$, $\eta_m = 0,553$ <u>Beleuchtung</u> : Halogen- und Glühbirnen, $P_{el,m} = 0,980 \text{ kW}_{el}$ $P_{m,Nv} = 3,71 \text{ kW}$	<u>Lüfter</u> : Viskokupplung, $P_m = 0,52 \text{ kW}$ <u>Kompressor</u> : Verringerte Leerlaufverluste, $P_m = 0,67 \text{ kW}$ <u>Lenkhilfepumpe</u> : Konstantpumpe, $P_m = 0,31 \text{ kW}$ <u>Generator</u> : Kompaktgenerator, $P_m = 1,227 \text{ kW}$, $\eta_m = 0,737$ <u>Beleuchtung</u> : LED-Teilausstattung, $P_{el,m} = 0,905 \text{ kW}_{el}$ $P_{m,Nv} = 2,73 \text{ kW}$

³ ACEA Whitebook "CO₂ declaration procedure HDV", Stand 4/2014, Annex D, S. 144

⁴ SAE J1266, Axle Efficiency Test Procedure, 2001-04, S. 5 Fig. 2.

⁵ EURO V: c_w Wert nach Messung Lot2 Projekt und Literaturwerten [Unruh 2011]; EURO VI: $c_{w,EURO-V} - 2 \%$

	EURO V	EURO VI
Mittlere Beladung	2,8 t	2,8 t

Stadtbus 18 t

	EURO V	EURO VI
Gesamtfahrzeug	Solowagen mit 18 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht und 12 Meter Länge. - Etwa 35 Sitz-, 55 Stehplätze - z. B. MAN Lion's City, MB Citaro	
Motor	EURO V Motor 8 L Standard Antriebsleistung (kW): 220 $\eta_{\max} = 0,431$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,397$ Abgasnachbehandlung mittels SCR-Anlage,	EURO VI Motor 8 L Standard Antriebsleistung (kW): 220 $\eta_{\max} = 0,438$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,406$ Abgasnachbehandlung mittels SCR-Anlage, Partikelfilter und Oxidationskatalysator, zusätzlich Abgasrückführung am Motor zur Senkung der Roh-NOx
Getriebe Verlustkennfelder Automatikgetriebe: Standarddaten für VECTO, Stand 7/2014, Achsgetriebe: Konstantwert	Automatikgetriebe 3 Gänge + Wandergang 1,36 bis 0,74 $\eta_{\text{Wandler,m}} = 0,760$, $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,916$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,947$ $i_{\text{HA}} = 6,212$, $\eta_{\text{Achse,m}} = 0,95$	Automatikgetriebe 3 Gänge + Wandergang 1,36 bis 0,74 $\eta_{\text{Wandler,m}} = 0,759$, $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,916$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,947$ $i_{\text{HA}} = 6,212$, $\eta_{\text{Achse,m}} = 0,95$
Reifen Rollwiderstandsbeiwerte: Obergrenze der Effizienzklassen nach EC 1222/2009 Achslastverteilung: Nach ACEA Whitebook 4/2014	VA 275/70R22,5 Kl. D HA 275/70R22,5 Kl. D Gesamt-Rollwiderstand 7,26 N/kN	VA 275/70R22,5 Kl. D HA 275/70R22,5 Kl.D Gesamt-Rollwiderstand 7,27 N/kN ⁶
Aerodynamik⁷	$C_w = 0,67$, $C_w * A_q = 5,36 \text{ m}^2$	$C_w = 0,67$, $C_w * A_q = 5,36 \text{ m}^2$
Leergewicht	11,7 Tonnen	11,5 Tonnen
Nebenverbraucher Leistungswerte gemäß VECTO Standard-Daten 7/2014, ACEA Whitebook 4/2014, Fraunhofer IVI Rechenprogramm Bus-Klimaanlage 4/2013 und eigener Recherche (LED-Leuchten) → Es wird ohne Heizung simuliert, da die Motorabwärme nicht genau bestimmt werden kann.	<u>Lüfter</u> : Viskokupplung, $P_m = 2,00 \text{ kW}$ <u>Kompressor</u> : Permanentantrieb, $P_m = 1,25 \text{ kW}$ <u>Lenkhilfepumpe</u> : Konstantpumpe, $P_m = 1,05 \text{ kW}$ <u>Klimaanlage</u> : Zweipunktregelung, $P_m = 2,22 \text{ kW}$ <u>Generator</u> : Topfgenerator, $P_m = 2,915 \text{ kW}$, $\eta_m = 0,607$ <u>Beleuchtung</u> : Halogen- und Glühbirnen, $P_{el,m} = 1,770 \text{ kW}_{el}$ $P_{m,Nv} = 9,44 \text{ kW}$	<u>Lüfter</u> : Viskokupplung, $P_m = 2,00 \text{ kW}$ <u>Kompressor</u> : Verringerte Leerlaufverluste, $P_m = 0,69 \text{ kW}$ <u>Lenkhilfepumpe</u> : Konstantpumpe, $P_m = 1,05 \text{ kW}$ <u>Klimaanlage</u> : Zweipunktregelung, $P_m = 2,22 \text{ kW}$ <u>Generator</u> : Kompaktgenerator, $P_m = 2,219 \text{ kW}$, $\eta_m = 0,764$ <u>Beleuchtung</u> : LED-Teilausstattung, $P_{el,m} = 1,695 \text{ kW}_{el}$ $P_{m,Nv} = 8,18 \text{ kW}$
Mittlere Auslastung laut VDV im Tagesmittel: 18 Passagiere à 68 kg	18 Personen = 1,22 t	18 Personen = 1,22 t

⁶ Der etwas höhere spezifische (d. h. auf das Fahrzeuggewicht bezogene) Rollwiderstand des EURO-VI-Fahrzeugs ergibt sich bei gleicher Bereifung durch das geringere Leergewicht im Vergleich zum EURO-V-Bus.

⁷ Cw-Wert Stadtbusse aus ACEA Whitebook, Querschnittsfläche repräsentativ für aktuelle Fahrzeuge; keine Untersuchung aerodynamischer Maßnahmen, da der Anteil Luftwiderstand am Kraftstoffverbrauch nur ca. 6 % beträgt.

2.3 Auswahl energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien

Erster Schritt für die Potenzial- und Kostenanalysen war die Auswahl von erfolgversprechenden Einzeltechnologien, die heute bereits verfügbar sind, oder in den nächsten Jahren voraussichtlich marktreif werden, die aber bisher in Europa nicht zur Standardausstattung der untersuchten Fahrzeugklassen (vgl. Kap. 2.2) gehören. Dazu erfolgte zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche zu zusätzlichen kraftstoffsparenden bzw. treibhausgasmindernden Technologien für schwere Nutzfahrzeuge sowie in der Literatur angegebenen Potenzialen und Kosten.

Aus dieser Gesamtübersicht wurde für die anschließenden Detailanalysen in Absprache mit dem Umweltbundesamt eine Auswahl von Technologien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Technologiebereiche (Antriebsstrang, Aerodynamik, Rollwiderstand, Optimierungen von Fahrzeuggewicht, Nebenverbrauchern und Fahrzeugregelung) getroffen.

2.3.1 Übersicht energiesparender und treibhausgasmindernder Zusatztechnologien

Als Grundlage zur Auswahl erfolgversprechender Einzeltechnologien für detaillierte Potenzial- und Kostenanalysen wurde eine ausführliche Literaturrecherche zu bereits verfügbaren oder in Entwicklung befindlichen Technologien zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei schweren Nutzfahrzeugen sowie den damit verbundenen Kosten durchgeführt. Daraus wurde eine erste Matrix von Technologien sowie deren Potenziale und Kosten entsprechend international aktuellem Stand der Wissenschaft erarbeitet. Die Minderungstechnologien wurden nach verschiedenen Technologiefeldern (Antriebsstrang, Aerodynamik, Rollwiderstand, Optimierungen von Fahrzeuggewicht, Nebenverbrauchern und Fahrzeugregelung) klassifiziert. Potenzial- und Kostenangaben wurden nach verschiedenen Einsatzzwecken (z. B. Fernverkehr, städt. Verteilverkehr...) sowie nach Fahrzeuggrößen differenziert, soweit dies anhand der Literaturangaben möglich war.

Potenziale treibhausgasmindernder Technologien für schwere Nutzfahrzeuge wurden in verschiedenen internationalen Studien abgeschätzt, einige Studien enthalten auch Kostenangaben zu den Technologien. Eine Übersicht der ausgewerteten Literaturquellen gibt Kap. 5.1.1 im Anhang. In den untersuchten Quellen wird eine Vielzahl von Technologien dargestellt. Dabei werden für die gleichen Technologien teilweise sehr unterschiedliche Minderungspotenziale angegeben. Gründe dafür können vielfältig sein, z. B. Berechnung vs. Messung, Bezug auf unterschiedliche Referenzfahrzeuge, Fahrzeuggrößen oder Einsatzzwecke)⁸. Die Potenzialangaben aus der Literatur können somit nicht direkt auf die aktuelle Situation in Deutschland bzw. in Europa angewandt werden. Sie wurden jedoch für eine erste Orientierung genutzt, welche Einzeltechnologien grundsätzlich signifikante Minderungspotenziale aufweisen und daher in eine vertiefende Betrachtung einbezogen werden sollten.

Dazu wurde als Ergebnis der Literaturrecherche eine tabellarische Übersicht von insgesamt über 90 Einzeltechnologien in verschiedenen Technologiefeldern erstellt. Tabelle 5 gibt eine Übersicht der in den einzelnen Technologiefeldern ermittelten Optimierungsansätze. Eine vollständige Übersicht aller Einzeltechnologien enthält Kap. 5.1.2 im Anhang. Zu allen Technologien ist die Bandbreite der Potenzialangaben aus der Literatur angegeben, soweit möglich erfolgte dies differenziert für verschiedene Einsatzzwecke. Auch Minderungstechnologien ohne verfügbare Potenzialangaben sind in der Übersicht erfasst.

⁸ Ein wichtiger Grund für studienspezifische Unterschiede ist auch der geografische Raum, für den Potenziale ermittelt worden sind. Beispielsweise haben Sattelzüge in Nordamerika eine andere Bauform gegenüber Sattelzügen in Europa, so dass aerodynamische Maßnahmen unterschiedliche Wirkungen auf den Luftwiderstand und damit auf den Kraftstoffverbrauch haben. Auch Geschwindigkeiten und Fahrprofile und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch unterscheiden sich je nach Region. Nicht zuletzt gehören einige verbrauchsmindernde Technologien in Europa zur Standardausstattung, die in anderen Regionen als zusätzliche kraftstoffsparende Technologien eingestuft werden.

Tabelle 5 Übersicht von treibausgasmindernden Technologien aus der Literaturrecherche

Technologiebereich	Technologieansatz
1 Motor und Antriebsstrang	1.1 Optimierter Verbrennungsprozess (z. B. Einspritzdruck; Turbolader, Variable Ventilsteuerung) 1.2 Abwärmenutzung von Abgas, Abgasrückführung oder Kühlsystem (z. B. Turbocompounding, Organic Rankine cycle, Thermoelektrischer Generator) 1.3 Reduzierung parasitärer Verluste der Motor-Nebenaggregate (z. B. regelbare Wasser- und Ölpumpe, Luftkompressor) 1.4 Hybridantriebe in verschiedenen Ausführungen (z. B. Elektromotor und Batterie, Hydromaschine und Blasenspeicher, Stufenloses Getriebe und Schwungrad ...) sowie Start-Stopp-Automatik 1.5 Alternative Antriebe (z. B. elektrischer Hybrid, Dual-Fuel-Motoren Diesel/Erdgas, Erdgasmotoren, vollelektrischer Antrieb) 1.6 Reibungsarme Schmiermittel (Leichtlauföle) 1.7 Getriebeoptimierung (z. B. Doppelkupplungsgetriebe, Anpassungen der Schaltlogik)
2 Aerodynamik	2.1 Fahrerhaus-Zugmaschine (z. B. Dachspoiler, Seiten- und Unterbodenverkleidung, Luftleitbleche, Frontverlängerung, Rückfahrkameras statt Rückspiegeln) 2.2 Anhänger/Aufbau (z. B. Seiten- und Unterbodenverkleidung, Heckeneinzug, Heckdiffusor) 2.3 Gesamtfahrzeug (vehicle streamlining) 2.4 Aerodynamik-Optimierung für Spezialfahrzeuge (z. B. Kipplaster, Tanklaster)
3 Reifen	3.1 Leichtlaufreifen 3.2 Einzelbreitreifen („Supersingles“), mit/ohne Leichtlaufreifen 3.3 Automatische Reifendruckanpassung 3.4 Verringerung der Achsenanzahl
4 Nebenaggregate	4.1 Hilfsgeneratoren (z. B. Diesel-APU, Batterie, Brennstoffzelle) 4.2 Optimierte Nebenaggregate (z. B. Beleuchtung, Lüfter) 4.3 Kühleinheiten
5 Leichtbau	5.1 Fahrerhaus+ Chassis (leichtere Materialien, leichtere Konstruktion) 5.2 Anhänger/Aufbau 5.3 Gesamtfahrzeug
6 ITS+ICT*	6.1 Aktive Fahrsteuerung (z. B. Predictive cruise control, EcoRoll, Platooning) 6.2 Fahrerinformation (z. B. Telematik, Grüne-Zone-Anzeigen)

* ITS: Intelligent transport systems; ICT: Information and Communication Technology

Quellen: vgl. Literaturübersicht in Kap. 5.1.1

2.3.2 Technologieauswahl für die Potenzial- und Kostenanalysen

Zur Auswahl von Technologien für eine detaillierte Betrachtung im Rahmen der Potenzial- und Kostenanalyse wurden die in der Literaturrecherche ermittelten Einzeltechnologien zunächst nach ihrem aktuellen Entwicklungsstand eingestuft:

- **Standardausstattung:** Einige Technologien sind in Europa bereits als Standardausstattung von schweren Nutzfahrzeugen anzusehen, abhängig vom Fahrzeug-Einsatzzweck. Beispielsweise sind Dachspoiler und Spaltverkleidungen zum Auflieger/Aufbau bei Sattelzügen für den Fernverkehr Standard, nicht jedoch bei kleineren Lkw im Verteilerverkehr.
- **Marktverfügbare Zusatztechnologien** (Stand Mitte 2014): Verschiedene Technologien werden nur von einzelnen Herstellern verbaut oder sind bei der Fahrzeugbeschaffung als Zusatzoption verfügbar bzw. nachrüstbar. Dies betrifft unterschiedliche Technologiefelder wie Antriebsstrang (z. B. regelbare Wasserpumpe, Hybridbus), Aerodynamik (Seitenverkleidungen für Sattelaufleger), Rollwiderstand (Leichtlaufreifen) oder aktive Fahrsteuerung (z. B. EcoRoll).
- **Marktreife absehbar:** Weiterhin gibt es Technologien, die aktuell noch nicht am Markt verfügbar sind, bei denen jedoch die Entwicklung soweit fortgeschritten ist, dass eine Markteinführung in den nächsten Jahren möglich erscheint. So arbeiten verschiedene Hersteller an der Rückgewinnung von Abgaswärme (Organic-Rankine-Cycle-Systeme). Hybrid- oder vollelektrische Antriebe, die bei Bussen und Solo-Lkw bereits teilweise verfügbar sind, könnten in wenigen Jahren auch für Sattelzüge verfügbar sein.
- **Prototyp/Forschung:** Einige kraftstoffsparende Zusatztechnologien befinden sich noch im Entwicklungsstadium (z. B. Brennstoffzellen-Hybrid) und werden daher in den kommenden Jahren noch nicht am Markt verfügbar sein.

Weiterhin erfolgte eine Einstufung, wie gut Energiesparpotenziale der einzelnen Technologien mit dem Simulationstool VECTO modelliert werden können, das die TU Graz in Kooperation mit ACEA und der Fahrzeugindustrie als Testverfahren zur zukünftigen CO₂-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen für die EU-Kommission entwickelt hat (vgl. Kap. 2.4.1). Grundsätzlich muss für alle CO₂-reduzierenden Technologien für Nutzfahrzeuge eine Erfassung in dem genannten Testverfahren angestrebt werden. Für Technologien, die (auch zukünftig) nicht mit VECTO simuliert werden können, werden nachgelagerte Modellverfahren zur Ermittlung standardisierter Potenzialangaben erforderlich.

Anschließend wurden in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt die weitergehend zu analysierenden Technologien festgelegt. Es wurden vorrangig Technologien mit kurz- und mittelfristiger Verfügbarkeit ausgewählt, d. h. die bereits heute als Zusatzoptionen verfügbar sind oder aber in den nächsten Jahren verfügbar werden können⁹. Im Anhang Kap. 5.2 werden alle für die Analyse ausgewählten Einzeltechnologien und ihre Funktionsweisen kurz vorgestellt.

Zur Potenzial- und Kostenanalyse wurden teilweise mehrere Einzeltechnologien eines Technologiebereichs zu Technologiebündeln zusammengefasst. Die so definierten technologischen Maßnahmen sind für die untersuchten Fahrzeugklassen in Tabelle 6 (Sattelzug 40 t),

Tabelle 7 (Solo-Lkw 12 t) und Tabelle 8 (Stadtbus 18 t) dargestellt. Die Technologieauswahl unterscheidet sich teilweise zwischen den Fahrzeugklassen, bedingt durch die unterschiedliche Konfiguration der Referenzfahrzeuge (jeweilige Standardausstattung, vgl. Kap. 2.2.3) und die Verfügbarkeit sowie Bedeutung der Technologien für die untersuchten Einsatzzwecke (Fernverkehr, Stadtverkehr). Im weiteren Projektverlauf wurden als Grundlage für die Simulation der Einsparpotenziale Kennblätter erarbeitet, welche die einzelnen Maßnahmen mit zentralen Informationen, insb. Konfiguration sowie Auswirkungen auf energieverbrauchs- und emissionsrelevante Fahrzeugparameter (Luftwiderstand, Leergewicht) näher charakterisieren.

⁹ Zur Analyse von Potenzialen durch Leichtbau wurde ein vereinfachter technologieneutraler Ansatz gewählt, da Leichtbau auf vielfältigen Wegen mit verschiedenen Leichtbaumaterialien ebenso wie mit unterschiedlichen Leichtbaukonstruktionen für verschiedene Bauteile möglich ist.

Tabelle 6 Technologieauswahl für die Fahrzeugklasse Sattelzug 40 t

Technologiebereich	Maßnahmen (Technologiebündel)
Motor und Antriebsstrang	<p>Verbesserung Dieselmotor-Wirkungsgrad um einen Prozentpunkt (+0,01; z. B. von 0,43 auf 0,44). Beispielsweise durch Einsatz vollvariabler Wasser- und Ölpumpe, von Leichtlaufölen sowie Abgasnachbehandlung nur SCR (statt SCR+AGR)</p> <p>Abgaswärmeverwendung mittels ORC (Organic Rankine Cycle: Kleiner Dampfkraftprozess mit organischem Arbeitsmedium). Übertragung von 0 bis ca. 20 kW_{mech} mittels Ketten-/Riementrieb an Kardanwelle.</p> <p>Reduktion der Verluste von Getriebe und Achsgetriebe z. B. durch Einsatz von Leichtlaufölen, Trockensumpfschmierung und variabler Ölpumpe</p> <p>Erdgasfahrzeug mit LNG-Tank Verringerung Reichweite Long Haul von 2700 auf 900 km</p> <p>Elektrischer Parallelhybrid</p>
Aerodynamik	<p>Aeropaket 1: Auflieger mit Seitenverkleidung und Heckeinzug 50 cm</p> <p>Aeropaket 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Sattelzugmaschine mit Rückfahrkameras statt Spiegeln b) Auflieger mit Seiten- und Unterbodenverkleidung sowie Heckeinzug 100 cm <p>Aeropaket 3: Aeropaket 2 sowie runde Frontverlängerung der Sattelzugmaschine um 0,5m</p>
Rollwiderstand	<p>Energieeffiziente Reifen, aktuell verfügbar:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Zugmaschine Hinterachse Effizienzklasse B (statt C) b) Auflieger Achsen Effizienzklasse A (statt B) <p>Energieeffiziente Reifen, zukünftig verfügbar: alle Reifen Effizienzklasse A</p> <p>Einzelbreitreifen auf der Antriebsachse; Reifen auf allen Achsen mit Effizienzklasse A</p>
Leichtbau	Reduktion des Leergewichts vom Gesamtfahrzeug um 400 kg (ca. 3 %)
Fahrzeugregelung	Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h
Optimierung der Nebenverbraucher	Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, variable Lenkhilfepumpe, Beleuchtung mit LED-Vollausstattung

Tabelle 7 Technologieauswahl für die Fahrzeugklasse Solo-Lkw 12 t

Technologiebereich	Maßnahmen (Technologiebündel)
Motor und Antriebsstrang	<p>Verbesserung Dieselmotor-Wirkungsgrad um 0,01 Beispielsweise durch Einsatz vollvariabler Wasser- und Ölpumpe, von Leichtlaufölen sowie Abgasnachbehandlung nur SCR (statt SCR+AGR)</p> <p>Reduktion der Verluste von Getriebe und Achsgetriebe z. B. durch Einsatz von Leichtlaufölen</p> <p>Erdgasfahrzeug mit CNG Reichweite 340 km</p> <p>Elektrischer Parallelhybrid</p> <p>Batterieelektrischer Lkw Reichweite 150 km</p>
Aerodynamik	<p>Aeropaket 1: Windleitbleche zwischen Kabine und Aufbau, abgerundete Vorderkanten des Kofferaufbaus, Seitenverkleidung, Heckeinzug 0,5 m</p> <p>Aeropaket 2: Aeropaket 1 sowie Rückfahrkameras statt Außenspiegeln</p>

Technologiebereich	Maßnahmen (Technologiebündel)
Rollwiderstand	Energieeffiziente Reifen, aktuell verfügbar: c) Vorderachse Effizienzklasse B (statt C) d) Hinterachse: Keine Verbesserung der Effizienzklasse (weiterhin D) Energieeffiziente Reifen, zukünftig verfügbar: Alle Reifen Effizienzklasse A
Leichtbau	Reduktion des Leergewichts vom Gesamtfahrzeug um 200 kg (ca. 3 %)
Fahrzeugregelung	Start-Stopp-Automatik (Standabschaltung), Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h
Optimierung der Nebenverbraucher	Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, variable Lenkhilfepumpe, Beleuchtung mit LED-Vollausstattung

Tabelle 8 Technologieauswahl für die Fahrzeugklasse Stadtbus 18 t

Technologiebereich	Maßnahmen (Technologiebündel)
Motor und Antriebsstrang	Verbesserung Dieselmotor-Wirkungsgrad um 0,01 Beispielsweise durch Einsatz vollvariabler Wasser- und Ölpumpe, von Leichtlaufölen sowie Abgasnachbehandlung nur SCR (statt SCR+AGR) Reduktion der Verluste im Achsgetriebe z. B. durch Einsatz von Leichtlaufölen Erdfasfahrzeug mit CNG Reichweite 480 km Elektrischer Parallelhybrid mit elektrisch angetriebenen Nebenverbrauchern Elektrischer Seriellhybrid mit elektrisch angetriebenen Nebenverbrauchern Batterieelektrischer Bus Reichweite 180 km Batterieelektrischer Bus mit Zwischenladung (z. B. an Oberleitung oder Endstation)
Rollwiderstand	Energieeffiziente Reifen, aktuell verfügbar: alle Reifen Effizienzklasse C (statt D) Energieeffiziente Reifen, zukünftig verfügbar: alle Reifen Effizienzklasse A
Leichtbau	Reduktion des Leergewichts vom Gesamtfahrzeug um 350 kg (ca. 3 %)
Fahrzeugregelung	Start-Stopp-Automatik
Optimierung der Nebenverbraucher	Kompressor m. Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, variable Lenkhilfepumpe, Beleuchtung mit LED-Vollausstattung Klimakompressor dreistufig statt zweistufig geregelt Wärmeisolierung des Fahrgastrams (Thermoverglasung, Isolierung an Seiten und Türen)

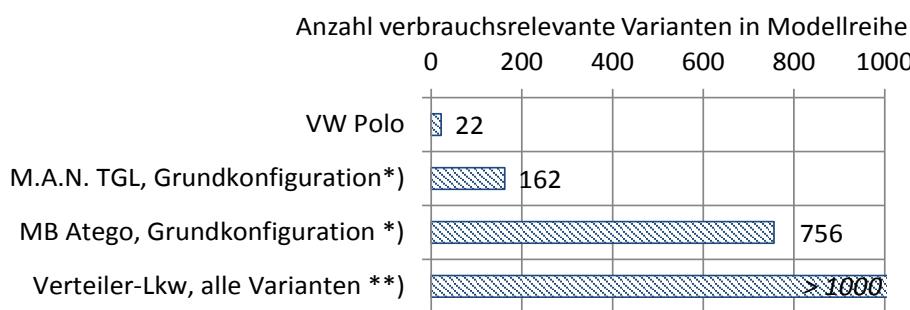
2.4 Ermittlung von Potenzialen zur Energie- und Treibhausgasreduktion

Grundlage für die Berechnung der Einsparpotenziale für die meisten der ausgewählten Technologien war das Längsdynamiksimulationsmodell VECTO, welches für das europäische Verfahren zur CO₂-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen entwickelt worden ist. Nur der Parallelhybridbus wurde mit einer Version des Programmes PHEM gerechnet [TU Graz, 2013b], aus welchem VECTO hervorgegangen ist.

2.4.1 Europäisches Verfahren zur CO₂-Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen

Zu Anfang soll kurz erläutert werden, weshalb bei schweren Nutzfahrzeugen die CO₂-Zertifizierung überhaupt mittels Simulation und nicht mit einer Messung stattfinden soll. Der Grund ist, dass es im Gegensatz zu Pkw innerhalb einer Nutzfahrzeug-Modellreihe sehr viel mehr Varianten gibt. Der Kunde kann sich aus einem Baukastensystem sein individuelles Fahrzeug zusammenstellen. Die Unterschiede zwischen Pkw und Lkw (hier Verteiler 12 t) in der Variantenvielfalt innerhalb einer Modellreihe werden in Abbildung 15 gezeigt.

Abbildung 15 Variantenvielfalt innerhalb einer Modellreihe: Pkw und Verteiler-Lkw¹⁰



*) Motor, Fahrerhaus, Federungsart, Radstand

**) Alle verbrauchsrelevanten Varianten, zusätzlich optional Klimaanlage, Heizung, Zusatztanks, Geschwindigkeitsbegrenzer, Sonnenblende außen ...

Je nach Auswahlmöglichkeiten können sich weit über 1000 verbrauchsrelevante Varianten innerhalb einer Modellreihe ergeben; damit wäre die Messung jeder Variante viel zu aufwändig und teuer. Erschwerend kommt hinzu, dass es wesentlich weniger Rollenprüfstände für Nutzfahrzeuge als für Pkw gibt, deren Betrieb teurer ist und Nfz typischerweise niedrigere Stückzahlen als Pkw haben, so dass der Preisaufschlag per Fahrzeug durch solch ein Messverfahren hoch wäre.

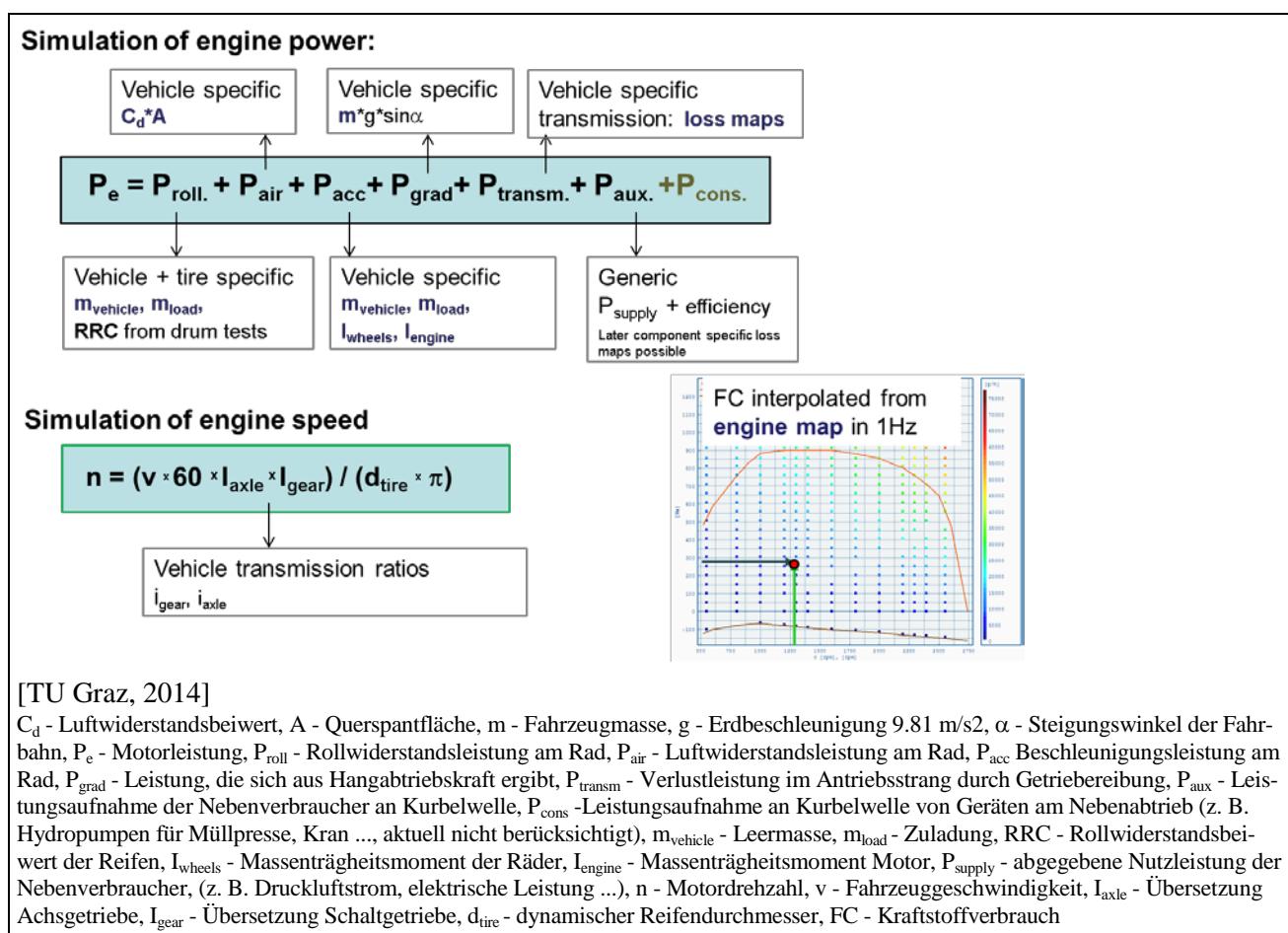
Deshalb wurde seitens der Europäischen Kommission in Kooperation mit der Industrie ein Ansatz für ein CO₂-Zertifizierungsverfahren bestehend aus Vermessung der Einzelkomponenten verbunden mit der Simulation der CO₂-Emissionen für das aggregierte Fahrzeug gewählt. An Eingabedaten für die Simulation werden die verbrauchsrelevanten Kennwerte der einzelnen Fahrzeugkomponenten gemessen, wie z. B. Verbrauchskennfelder der Verbrennungsmotoren, Luftwiderstandsbeiwerte (c_w) der Fahrerhäuser, Rollwiderstandsbeiwerte der Reifen, Luftverbräuche der Federungsarten, Leermassen bei verschiedenen Radständen, Leistungsaufnahme von Klimaanlage und Heizung etc. Diese Kennwerte werden in das Programm „VECTO“ (Vehicle Energy consumption Calculation Tool) eingegeben und es wird auf typischen Fahrzyklen der Verbrauch simuliert. VECTO wurde im Rahmen mehrerer Projektphasen im Auftrag der Europäischen Kommission federführend von der TU Graz entwickelt. Das Verfahren ist in mehreren Berichten ausführlich dokumentiert [TU Graz, 2012a] [JRC, 2014] [TU Graz, 2014], eine Übersicht zum Simulationsansatz gibt Abbildung 16.

¹⁰ VW Polo: Polo 13, Cross Polo 6, Polo Blue GR 2, Polo Blue Motion 1, <http://www.volkswagen.de/de/models/der-polo/brochure/catalogue.html>, „Technik und Preise“

MAN TGL: Motoren 3, Fahrerhäuser 3, Federungsarten 2, Radstände 9, http://www.truck.man.eu/global/de/konfigurator/1_start/Step_1.jsp

Mercedes Benz Atego: Motoren 7, Fahrerhäuser 4, Federungsarten 3, Radstände 9, https://toc.mercedes-benz.com/LKW_Konfigurator_TOC_de1/toc.dll

Abbildung 16 Rechenschema von VECTO für die Ermittlung des Motorbetriebspunktes



Über die Addition des Leistungsbedarfs für Fahrwiderstände, Antriebsstrangreibung und Nebenverbraucher wird die Leistungsabgabe des Motors bestimmt. Mittels eines Gangschaltmodells wird des Weiteren der eingelegte Gang ermittelt. Aus Geschwindigkeit und Übersetzungsverhältnis ergibt sich die Motordrehzahl. Mit diesen beiden Werten (Motorleistung, Motordrehzahl) wird aus dem Motorkennfeld der Verbrauch interpoliert. Im Modell sind noch zusätzlich weitere Effekte abgebildet, auf die hier nicht im Detail eingegangen wird.

Im Zuge der Entwicklung des Zertifizierungsverfahrens wurden auch Untersuchungen zur Genauigkeit des Verfahrens aus Komponententest und nachfolgender Fahrzeugsimulation durchgeführt, z. B. [JRC, 2014]. Dabei wurden an mehreren Fahrzeugen sämtliche Einzelkomponenten vollständig vermessen und die Eingabeparameter für VECTO erzeugt. Diese Fahrzeuge wurden dann unter kontrollierten Bedingungen auf Teststrecken sowie auf realen Routen gefahren und Kraftstoffverbrauch und Umgebungsbedingungen aufgezeichnet. Diese Fahrten wurden mit VECTO nachsimuliert und mit der Messung verglichen. Die Abweichungen zwischen gemessenem Verbrauch und Simulation lagen dabei stets in einem Bereich von kleiner als 5 %. Dieser Wert kann als Abschätzung für die absolute Genauigkeit des Ansatzes verwendet werden. Relative Änderungen (z. B. ein Verbrauchunterschied durch die Änderung des c_w-Wertes oder der Reduktion des Leerlaufverlustes eines Nebenverbrauchers) können mit diesem Ansatz noch mit wesentlich höherer Genauigkeit bewertet werden.

2.4.2 Simulation des Energieverbrauchs der Referenzfahrzeuge

Als Ausgangspunkt für die Analyse der Einsparpotenziale durch Zusatztechnologien wurden die in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Referenzfahrzeuge mit VECTO simuliert und die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft. Der direkte Vergleich mit Messergebnissen war nicht möglich, weil keine Messdaten für die generischen Durchschnittsfahrzeuge, definiert gemäß Abschnitt 2.2.3, vorlagen. Jedoch wurde mit veröffentlichten Ergebnissen von Fahrzeugtests abgeglichen, ob der simulierte Verbrauch in der richtigen Größenordnung liegt sowie die relativen Unterschiede zwischen den Fahrzeugtechnologien korrekt wiedergegeben werden.

Nachgelagert zu den Verbrauchssimulationen wurden Treibhausgasemissionen der Referenzfahrzeuge in CO₂-Äquivalenten (CO₂e) inkl. Vorkette der Kraftstoffgewinnung und -verteilung (Well-to-wheel) berechnet. Dazu wurden Faktoren nach DIN EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“ verwendet.

Die Basissimulationen mit VECTO lieferten für die einzelnen Kombinationen von Fahrzeug und Fahrzyklus folgende Verbräuche:

Sattelzug, Long Haul Cycle

- ▶ Euro V: 13,0 MJ/km, 36,2 L-Diesel/100 km, 1175 g-CO₂e/km (WTW)
- ▶ Euro VI: 12,4 MJ/km, 34,5 L-Diesel/100 km, 1120 g-CO₂e/km (WTW)

Sattelzug, Regional Delivery Cycle¹¹

- ▶ Euro V: 15,1 MJ/km, 42,1 L-Diesel/100 km, 1368 g-CO₂e/km (WTW)
- ▶ Euro VI: 14,6 MJ/km, 40,7 L-Diesel/100 km, 1322 g-CO₂e/km (WTW)

Relativunterschied EURO VI zu EURO V: Die Fachzeitschrift lastauto omnibus führt regelmäßig Messungen von Sattelzügen durch. Die Teststrecke ist ein ca. 140 km langer Autobahnabschnitt nördlich von Saarbrücken zwischen den Abfahrten Kusel und Prüm, auf der A62, der A60 und der A1 [LAO, 2010b]. Es werden mehrere Runden mit voller Zuladung gefahren. Im Jahr 2010 wurde mit vier EURO-V-Sattelzügen mit Fernfahrerhaus ein mittlerer Verbrauch von 38,2 L/100km gemessen [LAO, 2010a]. Im Jahr 2013 lag der mittlere Verbrauch von fünf Sattelzügen EURO VI bei 36,5 L/100km, was 4,5 % weniger sind¹². Der Verbrauchsunterschied EURO VI zu V mit den VECTO-Modellen auf dem Long Haul Cycle bei gleichen Gesamtmaschen ist 38,0 zu 39,5 L/100km. Hier beträgt die Verbrauchsreduktion EURO VI zu V 3,8 %.

Verteiler-Lkw, Urban Delivery Cycle

- ▶ Euro V: 7,8 MJ/km, 21,8 L-Diesel/100 km, 707 g-CO₂e/km (WTW)
- ▶ Euro VI: 7,5 MJ/km, 20,9 L-Diesel/100 km, 678 g-CO₂e/km (WTW)

Relativunterschied EURO VI zu EURO V: In der Simulation wird eine Verbrauchsreduktion von EURO VI zu V von 4,1 % erreicht. Laut Herstellerangaben sind bis zu 5 % möglich, wobei die Einsparung im Stadtverkehr etwas niedriger ausfällt [Daimler, 2014].

Stadtbus

- ▶ Euro V: 16,0 MJ/km, 44,5 L-Diesel/100 km, 1444 g-CO₂e/km (WTW)
- ▶ Euro VI: 15,2 MJ/km, 42,2 L-Diesel/100 km, 1370 g-CO₂e/km (WTW)

Relativunterschied EURO VI zu EURO V: In der Simulation werden von EURO V zu VI 5,1 % Einsparung erreicht. Nach Messungen bei Busbetrieben sind bis 5 % möglich [Busmagazin, 2013].

¹¹ Es wurde das Referenzfahrzeug auf dem Regional Delivery Cycle simuliert: großes Fahrerhaus, 350-kW-Motor, 19,3 t Zuladung. Laut ACEA Whitebook 4/2014, Teil 1 S. 176, hat der Sattelzug auf diesem Zyklus im Schnitt 12,9 t Zuladung. Allerdings sind im Regionalverkehr typischerweise andere Zugmaschinen mit kleinem/mittleren Fahrerhaus und weniger Motorleistung unterwegs, so dass es ein zusätzliches Fahrzeugmodell gegeben hätte. Daher wurde das eine Fahrzeugmodell beibehalten, womit die absolute Einsparung leicht überschätzt werden dürfte. Der relative Unterschied sollte in etwa gleich bleiben.

¹² mittlere Gesamtmasse EURO V 39,55 t, EURO VI 39,66 t

2.4.3 Methodische Erläuterungen zur Simulation der Potenziale

Aufbauend auf den Referenzfahrzeugen wurden für die ausgewählten Technologien (vgl. Kap.2.3) die Energieeinsparpotenziale simuliert. Die meisten Sparmaßnahmen wurden direkt mittels VECTO simuliert. Einige Technologien (z. B. Abgaswärmenumsetzung) sind in VECTO noch nicht vorgesehen und wurden über eine nachgelagerte Berechnung in Microsoft Excel bewertet, teilweise in Kombination mit PHEM¹³. Diese nachgelagerten Verfahren werden nachfolgend zusammenfassend erläutert.

2.4.3.1 Abgaswärmenumsetzung mittels Organic Rankine Cycle

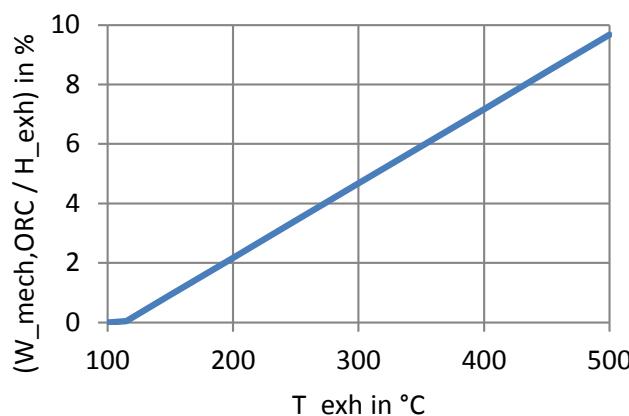
Mit PHEM wurde mit einem vereinfachten Modell der thermischen Trägheiten im Abgastrakt der Temperaturverlauf am Auspuff simuliert. Aus dem Motorkennfeld sind Kraftstoff- und Luftmassenstrom bekannt, woraus unter der Annahme idealer Verbrennung die Abgaszusammensetzung berechnet wurde:



Mit Tabellenwerten für die spezifische Enthalpie der einzelnen Abgasbestandteile, abhängig von der Temperatur, wurde die theoretisch nutzbare Enthalpiedifferenz (ΔH_{exh}) zwischen Abgastemperatur und Umgebungstemperatur 20 °C berechnet.

Aus Literaturwerten [Bosch, 2012] [Volvo, 2012] konnten die Betriebspunkte von ausgeführten ORC-Systemen und aus einem Motorkennfeld die Abgastemperatur ermittelt werden. Dies wurde in einer Kennlinie des temperaturabhängigen Wirkungsgrades zusammengefasst, siehe Abbildung 17.

Abbildung 17 Mechanischer Wirkungsgrad von ORC-Systemen über Abgas-Eintrittstemperatur

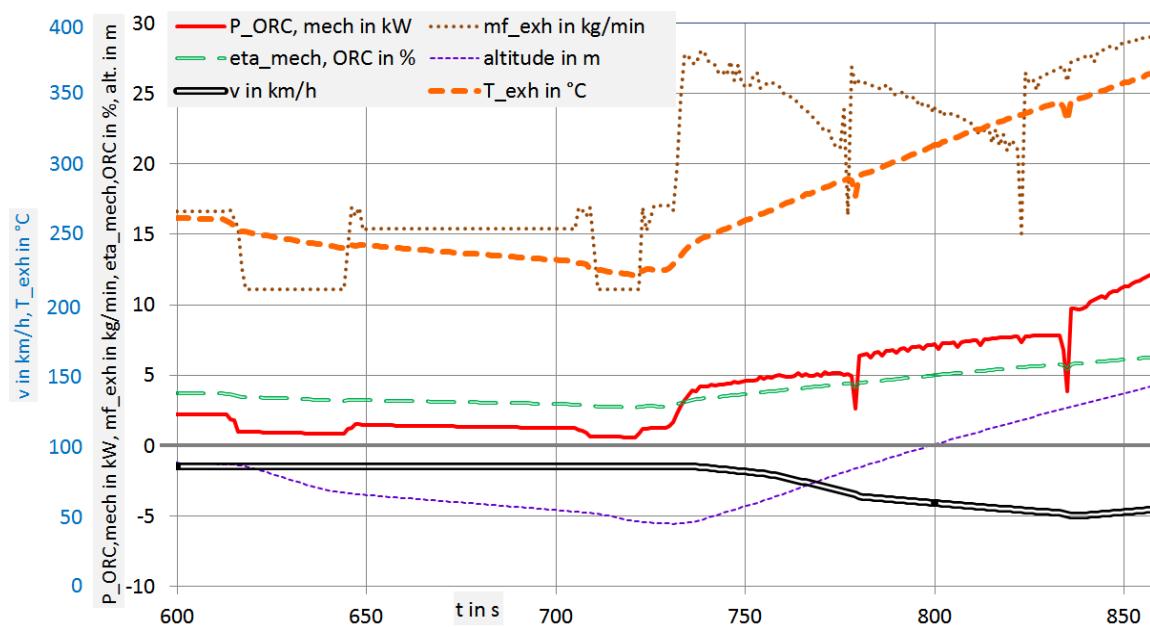


In Kombination mit Abgasenthalpiestrom und Abgastemperatur konnte so die mechanische Leistung abgeschätzt werden, die das ORC-System abgibt. Die thermische Trägheit des ORC selber konnte jedoch nicht berücksichtigt werden, da keine Messwerte zum Transientverhalten eines ORC-Systems vorhanden waren. Somit beruhen die hier getroffenen Aussagen auf der Analyse eines quasistationären Systems. Ein Beispiel für den berechneten Verlauf der mechanischen ORC-Leistung ist in Abbildung 18 gegeben.

Die vom Dampfkraftprozess abgegebene Leistung wird mit 10 % Übertragungsverlusten mechanisch an die Kardanwelle übertragen. Die VKM-Leistung wird dementsprechend – unter Berücksichtigung der Änderung der Getriebeverluste – korrigiert. Damit und mit der aktuellen Motordrehzahl wird der neue Motorbetriebspunkt ermittelt und der neue Verbrauch aus dem Kennfeld interpoliert. Das Ergebnis sind 3 % Einsparung beim Sattelzug im Long Haul Cycle.

¹³ Bei PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model, z. B. [TU Graz, 2012b] [TU Graz, 2013c]) handelt es sich analog zu VECTO um ein Längsdynamiksimulationsprogramm, das jedoch neben Kraftstoffverbrauch v. a. für die Simulation der gesetzlich regulierten Abgaskomponenten wie NO_x, HC, CO und PM optimiert ist. Mit PHEM können z. B. auch Massenstrom und Temperaturen im Abgassystem berechnet werden. PHEM wird u. a. für die Simulation der Emissionsfaktoren im HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, z. B. [INFRAS, 2010]) verwendet.

Abbildung 18 Verlauf der berechneten ORC-Leistung auf dem Long Haul Cycle (Ausschnitt)



Für ein ausgeführtes ORC-System, das wie berechnet nur die Abgaswärme nutzt, wird in der Literatur eine Einsparung von 2 bis 4 % angegeben [Volvo, 2012], so dass die mit dem sehr einfachen Modell berechneten 3 % in der Mitte liegen. Falls die Abwärme der Abgasrückführstrecke (AGR-Strecke) eingebunden wird, können bis 5 % Einsparung erreicht werden [Daimler, 2013]. Jedoch ist fraglich, ob AGR auch in zukünftigen Nfz-Generationen zum Einsatz kommt. AGR bringt verfahrensbedingt einen etwas niedrigeren Motorwirkungsgrad mit sich und wird von einigen Herstellern bereits durch ein Nur-SCR System mit höherer NO_x-Konversionsrate ersetzt, z. B. Iveco-Motor Cursor 11 F3G und Scania-Motor DC13-115. Wenn sich zusätzlich der Motorwirkungsgrad weiter verbessert, bleibt weniger Abgaswärme übrig, so dass die Einsparung mit ORC-Systemen eher zwischen 2 und 3 % liegen sollte.

Weil das beschriebene Modell quasistationär ist, kann nur für den Long Haul Cycle mit einigermaßen gleichmäßigem Motorbetrieb eine Abschätzung gemacht werden.

2.4.3.2 Hybridfahrzeuge

Elektrischer Parallelhybrid

Für schwere Hybrid-Nutzfahrzeuge ist in VECTO bisher keine Option vorgesehen. Für diese Fahrzeuge gibt es bei der UN/ECE die "Informal Working Group on Heavy Duty Hybrids"¹⁴, die einen Vorschlag für Zertifizierung und Modellierung erarbeitet.

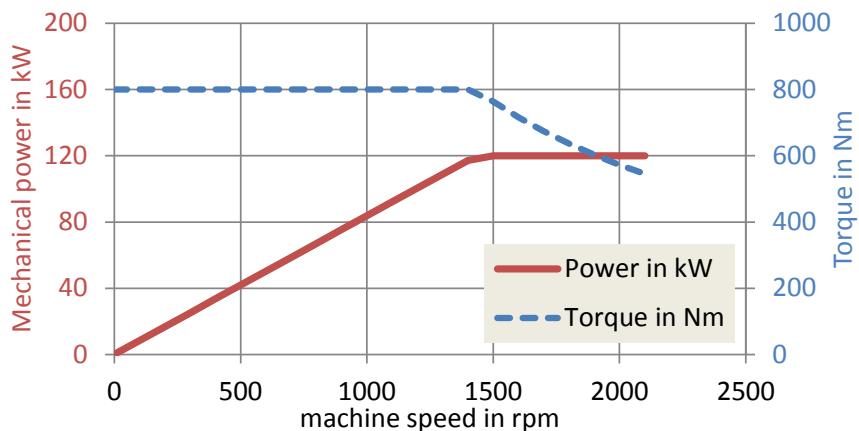
Der Parallelhybridbus wurde mit einer Version des Programmes PHEM gerechnet, die in einem anderen Projekt separat erstellt und angepasst wurde [TU Graz, 2013b].

Lkw wurden mit einem vereinfachten Modell in Excel gerechnet. Die Fahrzeuge wurden zuerst „normal“ d. h. ohne Hybridsystem mit VECTO in dem Fahrzyklus simuliert. Danach wurde folgendermaßen vorgegangen:

- ▶ Eine Elektromaschine (EM) läuft bei jeder Bremsung am Getriebeeingang als Generator mit (unter Berücksichtigung von Antriebsstrangverlusten). Es wird angenommen, dass die restliche Bremsleistung von den mechanischen Radbremsen aufgebracht wird. Ein Beispiel für die Leistungskurve der EM der Sattelzugmaschine gibt Abbildung 19.

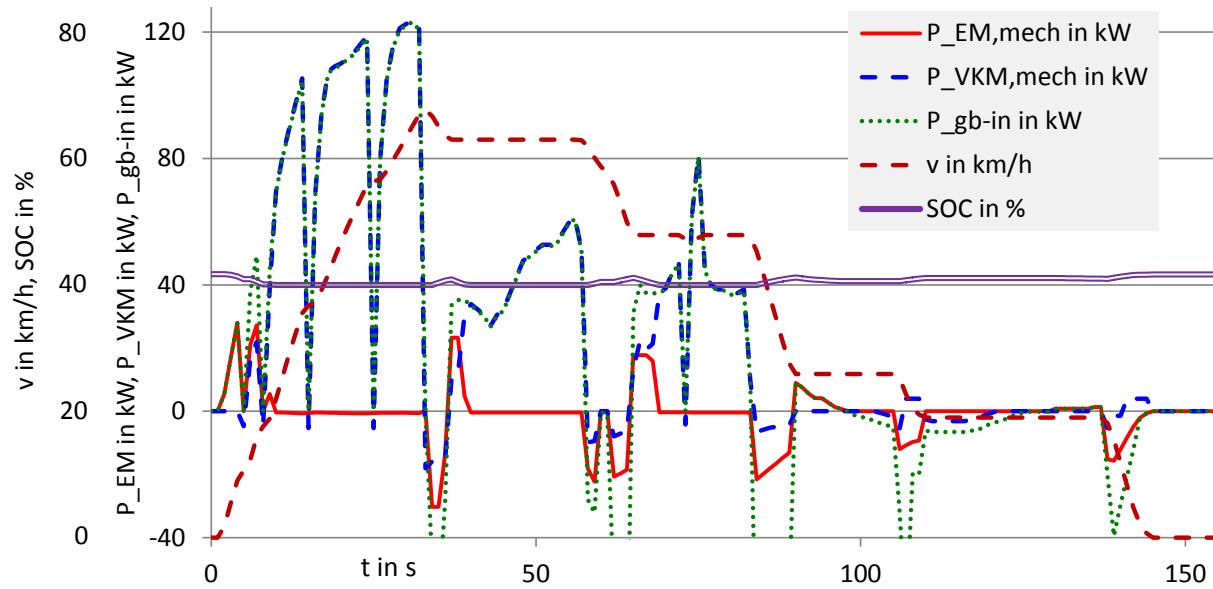
¹⁴ <https://www2.unece.org/wiki/pages/viewpage.action?pageId=2523163>

Abbildung 19 Leistungskurve der Elektromaschine 120 kW für die Sattelzugmaschine¹⁵



- Der Wirkungsgrad der EM wird beim Sattelzug aus einem Kennfeld interpoliert oder beim Verteiler-Lkw als konstant angenommen ($\eta_{EM,mot} = 0,93$, $\eta_{EM,gen} = 0,92$).
- Die rekuperierte Bremsleistung wird über einen Umrichter in die Batterie eingespeist. Beide Komponenten haben einen Wirkungsgrad von jeweils 0,95 (eine Leistungsflussrichtung, Laden oder Entladen).
- Beim Antrieben läuft die EM als Motor mit und entlastet den Verbrennungsmotor.
- Die Batterie wird als einfaches Speichermodell nachgebildet. Wenn die vorgegebene Unter- oder Obergrenze des Speicherstandes erreicht ist, z. B. 20 bis 40 %, arbeitet die EM nicht mehr.
- Damit ergibt sich der zeitliche Verlauf der EM-Leistung, siehe Abbildung 20.

Abbildung 20 Betrieb der Elektromaschine, Parallelhybrid Verteiler-Lkw (Ausschnitt)



- Die VKM wird bei Fahrzeugstillstand abgeschaltet. Die dort anfallende Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher wird auf den Fahrbetrieb umgelegt.
- Beim Fahrzeugantrieb ergibt sich die neue VKM-Leistung aus der Differenz aus Getriebeeingangsleistung und EM-Leistung, zuzüglich des Leistungsbedarfs von Nebenverbrauchern und Eigenbeschleunigung (Massenträgheitsmoment).
- Mit den Werten Drehzahl und Leistung wird der aktuelle Kraftstoffverbrauch der VKM des Hybridfahrzeugs sekündlich aus dem Motorkennfeld interpoliert.

¹⁵ Die Nennleistungskurve der Elektromaschine wird für Motor- und Generatorbetrieb gleich angenommen, mit jeweils unterschiedlichen Vorzeichen.

Elektrischer Seriellhybrid

Für den Seriellhybridbus wurde ein vereinfachtes Modell als Kombination aus VECTO und Excel erstellt. In VECTO können Elektrofahrzeuge simuliert werden, jedoch ist noch kein Batteriemodell implementiert. Im Falle des Seriellhybridbusses wurde das Busmodell mit einer Elektromaschine als Antrieb versehen, welche beim Bremsen als Generator mitläuft. Der Energiespeicher ist ein Supercap. Der Verbrennungsmotor wird zugeschaltet, wenn der Supercap leer ist, und immer an dem Betriebspunkt mit niedrigstem Verbrauch pro Leistung angesteuert. Das komplette Modell ist im Anhang in Abschnitt 5.5 beschrieben.

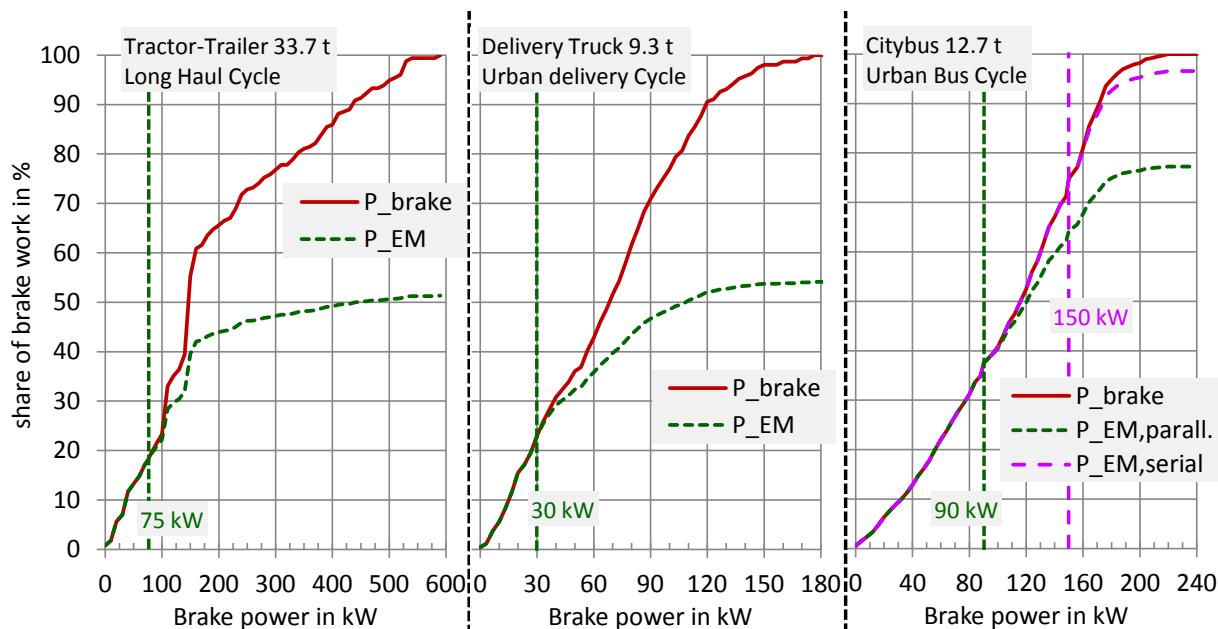
Das simulierte Sparpotenzial von ca. 22 % liegt in der Größenordnung, die mit einem ausgeführten Hybridbus gemessen wurden [MAN, 2014].

Einfluss der Elektromaschinenleistung auf das Sparpotenzial von Hybridfahrzeugen

Ein wesentlicher Verbrauchsvorteil, den Hybridfahrzeuge gegenüber Standardfahrzeugen haben, ist die Möglichkeit, einen Teil der Bremsarbeit zurückzugewinnen (Nutzbremsung, Rekuperation) und in der Batterie zwischen zu speichern. Somit fällt bei Standard- und Hybridfahrzeugen unter sonst gleichen Bedingungen die gleiche Antriebsarbeit an. Diese vermindert sich bei Hybriden um die Bremsarbeit, welche unter Abzug aller Verluste¹⁶ wieder zum Antreiben verwendet werden kann. Der rekuperierbare Anteil der Bremsarbeit hängt vom Verhältnis der maximalen Generatorleistung der EM zur Bremsleistung ab. Bei gleichem Fahrzeug und gleichem Geschwindigkeitsverlauf führt eine größere EM, die mehr Bremsarbeit zurückgewinnen kann, zu einer höheren Einsparung. Dies ist unabhängig von der Struktur des Hybridantriebs. Ein Parallelhybrid mit einer großen EM wird unter sonst gleichen Bedingungen mehr einsparen als ein Seriellhybrid mit einer kleineren EM. Bei heute ausgeführten Fahrzeugen ist es so, dass Parallelhybride eine kleinere EM haben als Seriellhybride, weil zugleich eine VKM für den Antrieb und ein Schaltgetriebe verbaut sind. Zusätzlich wird die Größe der EM von Mehrkosten und Mehrgewicht begrenzt. Prinzipiell wäre es auch denkbar, Parallel- und Seriellhybride mit gleich großen EM auszustatten. Diese Arbeit orientierte sich an heute ausgeführten Hybridfahrzeugen, weshalb z. B. der Parallelhybridbus eine kleinere EM hat als der Seriellhybridbus.

Der Einfluss der EM-Größe auf die rekuperierbare Bremsarbeit wird in Abbildung 21 gezeigt.

Abbildung 21 Hybridfahrzeuge: Generatorleistung und theoretisch maximales Nutzbremsvermögen



¹⁶ Antriebsstrangreibung, 2x Energiewandlung Elektromaschine, je 2x Verluste Umrichter und Batterie

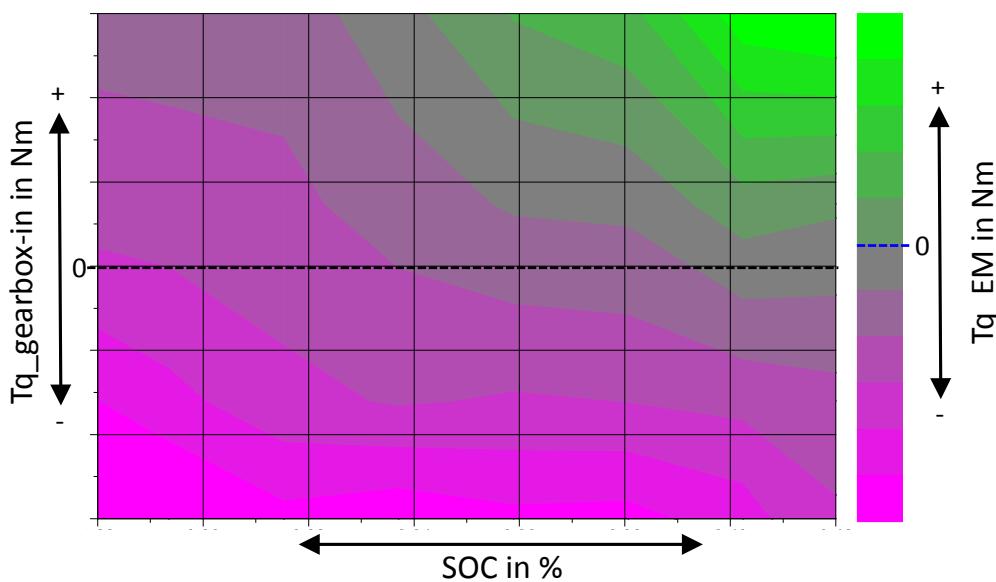
Die Annahme ist, dass die EM bei jeder Bremsung mit maximaler Generatorleistung mitläuft; es wird also das theoretische maximale Nutzbremsvermögen dargestellt. Bei Bremsvorgängen bis zur Nennleistung des Generators kann somit die gesamte Bremsarbeit vom Generator aufgenommen werden (Schnittpunkt der Kurven mit dem Nennleistungswert der EM in Abbildung 21). Ist die Bremsleistung höher als die Generatorleistung, wird der Rest von den Radbremsen aufgebracht (Verlust, Bereich zwischen roter und grüner Kurve). Beim Sattelzug mit der EM 75 kW und beim Verteiler-Lkw mit der EM 30 kW könnten theoretisch jeweils gut die Hälfte der anfallenden Bremsarbeit zurückgewonnen werden. Beim Parallelhybrid-Stadtbus mit einer 90-kW-EM wären es knapp 80 % der Bremsarbeit und beim Seriellhybrid mit einer 150-kW-EM knapp 100 %.

Bei ausgeführten Fahrzeugen ist das Rekuperationsvermögen niedriger als die hier gezeigten theoretischen Maxima. Neben der maximalen Generatorleistung haben die Antriebsstrangsteuerung beim Bremsen, die Antriebsstrangreibung und das Speichervermögen der Batterie Einfluss.

Betriebsstrategie bei Hybridfahrzeugen

Bei Hybridfahrzeugen hat die Betriebsstrategie einen entscheidenden Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Unter Betriebsstrategie wird dabei die komplette Antriebsstrangsteuerung verstanden, d. h. unter welchen Betriebsbedingungen welche Maschine (EM bzw. VKM) antreibt bzw. Strom generiert. Bei einem an der TU Graz vermessenen Parallelhybridbus war es z. B. so, dass bei niedrigem Ladestand der Batterie die EM weniger als Motor verwendet wurde und beim Fahren mittels VKM Überschussleistung zum Antrieb der EM als Generator und zum Laden der Batterie bereitgestellt wurde. Aus den Messdaten wurde ein Kennfeld der Drehmomentanforderung an die EM erstellt, abhängig vom Ladestand und dem Soll-Drehmoment am Getriebeeingang (siehe Abbildung 22).

Abbildung 22 Beispiel für Steuerkennfeld der Elektromaschine eines Parallelhybridbusses



in Anlehnung an [TU Graz, 2013b, S. 25]

Für das Modell des Parallelhybridbusses konnte mit diesem Steuerkennfeld gearbeitet werden [TU Graz, 2013a], weil die entsprechenden Daten vorlagen.

Für die Abschätzung der Einsparpotenziale der anderen Hybridfahrzeuge in dieser Studie lagen keine detaillierten Daten zur Betriebsstrategie vor. Daher wurde auf eine einfache Betriebsführung des Hybridsystems zurückgegriffen, welche im Abschnitt „Elektrischer Parallelhybrid“ beschrieben wurde. Die gleiche Betriebsführung wurde für den Seriellhybrid gewählt, nur dass der Energiespeicher dort ein Kondensator mit niedrigerer Kapazität ist.

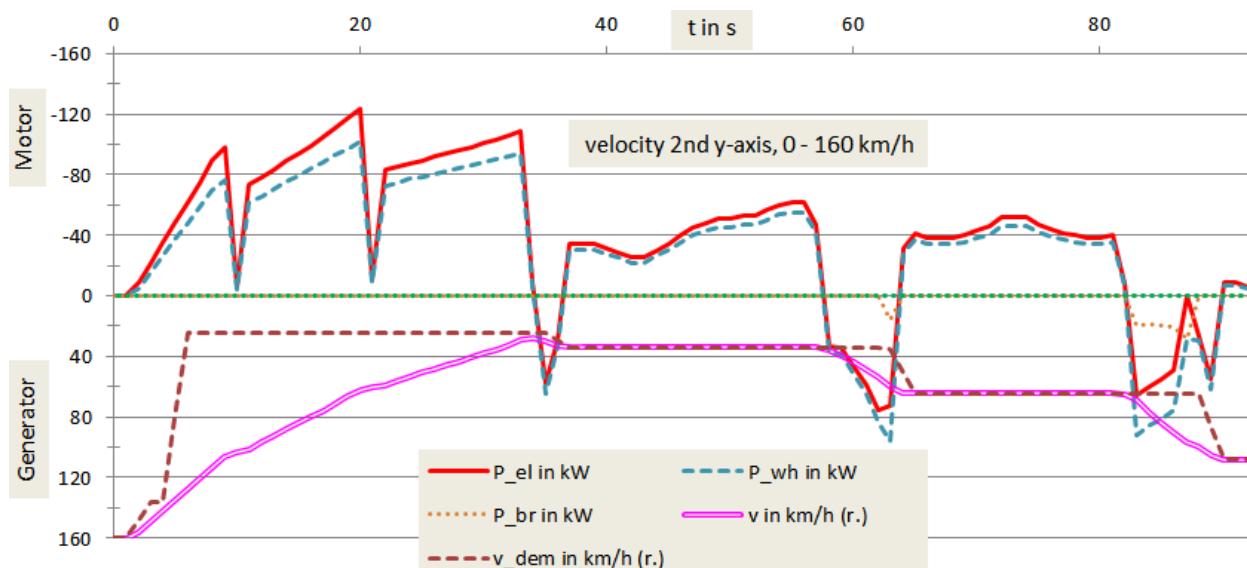
Über eine Anpassung der Betriebsstrategie an die Streckenführung können in der Praxis weitere Einsparungen erzielt werden, z. B. indem an Steigungen die Batterie bis zur Untergrenze entladen und am folgenden Gefälle per Nutzbremsung wieder vollgeladen wird. Diese Potenziale konnten in der vorliegenden Studie allerdings nicht berücksichtigt werden.

2.4.3.3 Batteriefahrzeuge

Reine Elektro-Fahrzeuge werden mit den Kennfeldern der Elektromaschinen simuliert, das Ergebnis ist der Leistungsverlauf an den EM-Klemmen. Das Beispiel des Batterie-Verteiler-Lkw auf dem Urban Delivery Cycle ist in Abbildung 23 gezeigt.

In Excel wird nachgelagert der Leistungsfluss in/aus der Batterie gerechnet und der Leistungsbedarf der elektrisch versorgten Nebenverbraucher (Lenkhilfepumpe, Bremskompressor, Klimaanlage) eingerechnet. Für Umrichter und Batterie wird in jede Richtung des Leistungsflusses (Laden/Entladen) jeweils ein Wirkungsgrad von 0,95 angenommen. Das Ergebnis ist der Stromverbrauch aus der Batterie in kWh/km und mit der vorgegebenen Batteriegröße die Reichweite in km.

Abbildung 23 Leistungsverlauf des Batterie-Verteiler-Lkw, Urban Delivery Cycle (Ausschnitt)



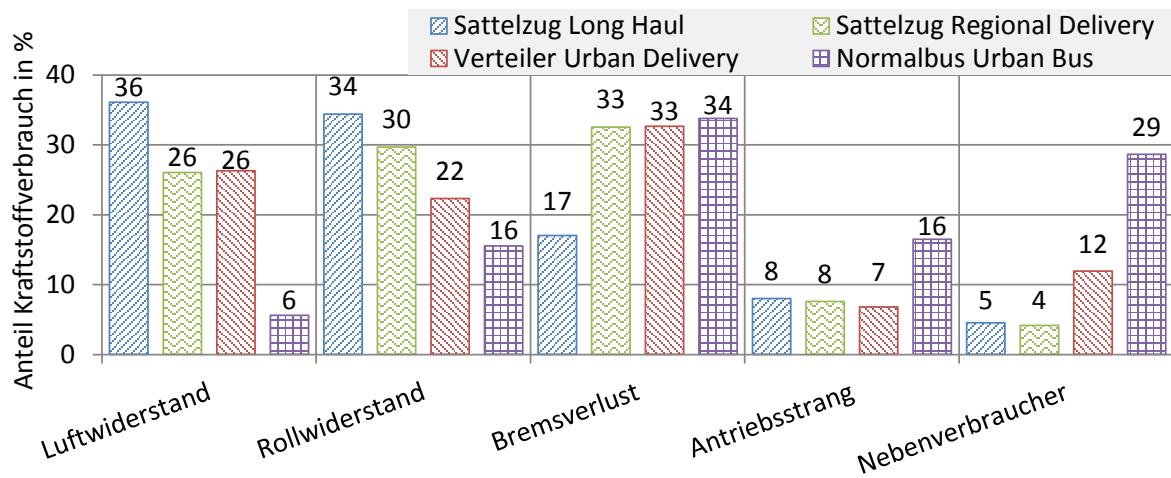
2.4.3.4 Start/Stopp-Automatik

In diesem Projekt wurde mit einer VECTO-Version gerechnet, die Start/Stopp noch nicht implementiert hatte. Der Spareffekt wurde nachgelagert mit Excel gerechnet. Es wurde das Rechenschema der aktuellen VECTO-Version befolgt, welches in [TU Graz, 2014] beschrieben ist. Der Motor wird im Stand abgeschaltet und die Arbeit der Nebenverbraucher, welche im Stand anfiele, wird auf den Fahrbetrieb aufgeschlagen.

2.4.4 Verbrauchsoptimale aerodynamische Gestaltung schwerer Nutzfahrzeuge

Ein zentraler Ansatz zur Senkung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen ist die Reduktion der Fahrwiderstände Luft-, Roll- und Beschleunigungswiderstand. Der Rollwiderstand kann durch die Wahl der verwendeten Reifen sowie die Fahrzeugmasse beeinflusst werden. Der Beschleunigungswiderstand hängt von der Fahrzeugmasse sowie der Trägheit der rotierenden Teile (u. a. der Räder) ab. Um den Luftwiderstand zu senken, muss die Karosserie strömungsgünstig modifiziert werden. Dies ist bei Lkw und Anhängern vergleichsweise kostengünstig durch Kunststoffpanelee möglich, verspricht eine kurze Amortisationsdauer und soll deshalb näher untersucht werden. Um Fahrzeugklassen zu finden, bei denen sich Aerodynamik lohnt, wurde die Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs untersucht, siehe Abbildung 24.

Abbildung 24 Aufteilung des Kraftstoffverbrauchs

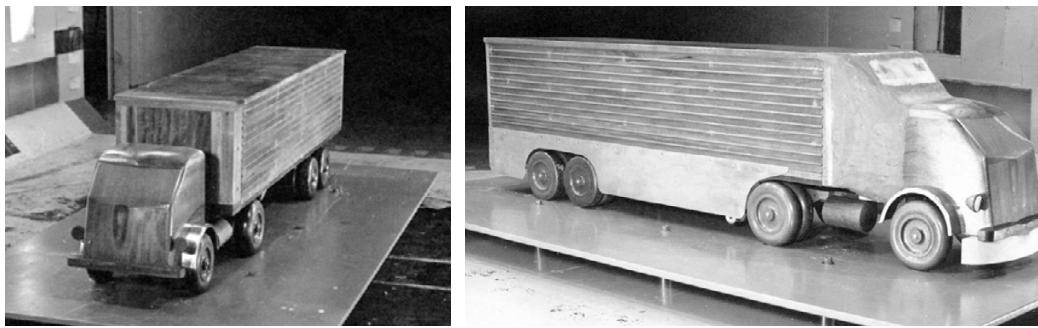


Es wird deutlich, dass der Luftwiderstand nur bei Fahrzyklen mit hoher Durchschnittsgeschwindigkeit einen merkbaren Anteil am Kraftstoffverbrauch hat. Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik sind daher insbesondere für Fahrzeuge im Fernverkehr (Long Haul Cycle), aber auch für Sattelzüge im Regionalverkehr und bei Verteiler-Lkw im städtischen Lieferverkehr (Urban Delivery Cycle) interessant¹⁷. Beim Stadtbus lohnen aerodynamische Maßnahmen nicht, der Verbrauchsanteil des Luftwiderstandes beträgt dort nur 6 %. Zusätzlich hat ein Bus bereits einen einteiligen, geschlossenen Strömungskörper, so dass aerodynamische Maßnahmen einen Umbau der kubischen Kabinenform erfordern würden. Bei Lkw und Anhängern hingegen, die meist einen unverkleideten Unterbau haben, kann bereits mit einfachen Maßnahmen viel erreicht werden. Aus diesem Grund wurden im Vorfeld der Festlegung aerodynamischer Maßnahmen für die Simulation von Energieeinsparpotenzialen Möglichkeiten zur verbrauchsoptimalen aerodynamischen Gestaltung von schweren Nutzfahrzeugen in einem eigenen Arbeitspaket untersucht (Abschnitt 5.7 und 5.8 im Anhang).

2.4.4.1 Aerodynamik von Nutzfahrzeugen: Stand der Technik

Als erster Schritt wurde der Stand der Forschung der Nutzfahrzeug-Aerodynamik recherchiert. Die Recherche ergab, dass bereits in den 1950er Jahren mit der aerodynamischen Optimierung von Nutzfahrzeugen begonnen wurde [Sherwood, 1954], siehe Abbildung 25.

Abbildung 25 Sattelzugmodell 1:6 für Windkanalmessungen 1954



Quelle: [Cooper 2004]

¹⁷ Dass der Luftwiderstandsanteil beim Sattelzug auf dem Regional Delivery und beim Verteiler auf dem Urban Delivery Cycle gleich groß ist, liegt an den unterschiedlichen Fahrzeugen. Der Sattelzug hat einen $c_w \cdot A_q$ -Wert von $5,30 \text{ m}^2$ und einen Rollwiderstand von $1,78 \text{ kN}$ ($F_{\text{Roll}} = \text{Rollwiderstandsbeiwert} * \text{Gesamtmasse} * \text{Erdbeschleunigung}$), beim Verteiler-Lkw sind es $4,83 \text{ m}^2$ und $0,62 \text{ kN}$. Der Verteiler hat somit bei gleicher Geschwindigkeit immer ein höheres Verhältnis von Luft- zu Rollwiderstand ($F_{\text{Luft}}/F_{\text{Roll}}$) ($F_{\text{Luft}} = c_w \cdot A_q \cdot \text{Luftdichte} \cdot 0,5 \cdot v^2$). Bei 50 km/h beispielsweise beträgt der Wert beim Sattelzug $0,34$ und beim Verteiler $0,90$. Dies führt dazu, dass der Verteiler auf dem langsameren Urban Delivery Cycle einen gleich großen Luftwiderstandsanteil am Kraftstoffverbrauch hat wie der Sattelzug auf dem schnelleren Regional Delivery Cycle.

Grundsätzlich sind auf dem rechten Bild schon viele Merkmale aktueller strömungsoptimierter Lkw zu sehen, wie z. B.:

- ▶ ein weitestgehend geschlossener Strömungskörper mit großen Anströmradien
- ▶ Windleitbleche zwischen Kabine und Anhänger
- ▶ seitliche Verkleidung des Aufliegers.

Der c_w -Wert sank von links 1,02 auf rechts 0,56 [Cooper, 2004]. Zusätzliche Maßnahmen am dargestellten Modell wären eine Seitenverkleidung an der Sattelzugmaschine und ein Heckeneinzug am Auflieger.

Der Kurzbericht über die Rechercheergebnisse ist in Abschnitt 5.7 zu finden.

In den letzten 50 Jahren ist die Forschung zu diesem Thema weiter fortgeschritten. Eine Sattelzugform, die konsequent auf beste Aerodynamik ausgelegt wurde, ist die Kombination aus MAN Concept S und Krone AeroLiner, siehe Abbildung 26.

Abbildung 26 MAN Concept S und Krone AeroLiner auf IAA 2012



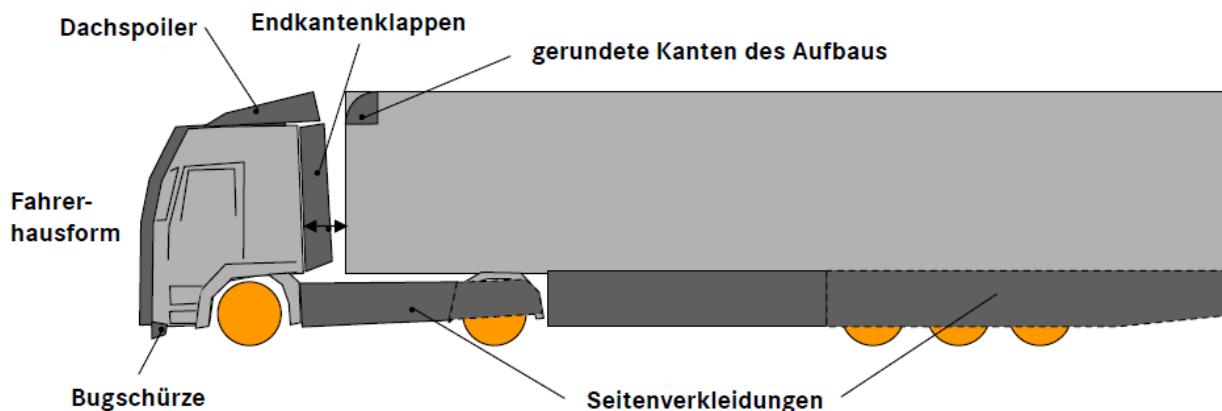
Quelle: [auto-bild.de]

Der an diesem Prototyp im Windkanal gemessene c_w -Wert beträgt 0,30 [MAN, 2012]. Allerdings ist der Gesamtzug knapp 4 m länger als das erlaubte Höchstmaß von 16,5 m. Dies ist notwendig, um die längere Kabine und den stromlinienförmigen, dafür längeren Auflieger bei gleichbleibendem Ladevolumen zu kompensieren.

Die aerodynamischen Maßnahmen, die real ausgeführt werden können, sind also ein Kompromiss aus c_w -Wert-Verringerung, Abmessungen, Ladevolumen und Alltagstauglichkeit. Falls die Neukonstruktion von wesentlichen Fahrzeugteilen wie der Fahrerkabine dazukommt, sind ebenfalls beträchtliche Entwicklungskosten zu berücksichtigen.

Was bei aktuellen Sattelzugmaschinen und Aufliegern aerodynamisch optimiert werden kann und teilweise schon gemacht wird, ist in Abbildung 27 dargestellt.

Abbildung 27 Beispiele für aerodynamische Maßnahmen an Sattelzügen



Quelle: [CVE, 2014]

Auf Seiten der simulierten Sattelzugmaschine EURO VI sind diese Maßnahmen bereits umgesetzt, mit Ausnahme der Hinterradabdeckung.

In der EU sind seit 12/2012 als aerodynamische Maßnahme faltbare Heckanbauten von max. 50 cm Länge¹⁸ erlaubt. In der Diskussion ist eine Verlängerung der Nfz um max. 2 m für aerodynamische Maßnahmen¹⁹. Auf Seiten der UN/ECE gibt es die Arbeitsgruppe „Camera Monitor Systems (CMS-II)“²⁰, die sich weiter mit der Einführung von Rückfahrkameras befasst. Durch Rückfahrkameras kann komplett auf Außenspiegel verzichtet werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die folgenden aerodynamischen Maßnahmen untersucht:

- ▶ Verkleidungssteile, die die maximalen Abmessungen nicht ändern
- ▶ Heckeneinüge innerhalb der erlaubten und diskutierten Verlängerung für aerodynamische Anbauteile
- ▶ Rückfahrkameras

2.4.4.2 Potenzial aktuell am Markt verfügbare Nachrüstteile für den Auflieger

In dieser Studie wurde das Potenzial von aktuell am Markt verfügbaren aerodynamischen Nachrüstteilen mittels CFD-Simulationen bewertet. Die Recherche ergab, dass derzeit an erlaubten Nachrüstteilen für Auflieger faltbare Heckeneinüge (Abbildung 28) sowie Seitenverkleidungen für den Auflieger (Abbildung 29) verfügbar sind.

¹⁸ Commission Regulation (EU) no 1230/2012 of 12 december 2012. S. 53 Tabelle 1 Eintrag 18. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:353:0031:0079:EN:PDF>

¹⁹ COM(2013) 195 final. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 96/53/EC of 25 July 1996. S. 12 Abs. 5. [http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/04/doc/com\(2013\)195_en.pdf](http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/04/doc/com(2013)195_en.pdf)

²⁰ <https://www2.unece.org/wiki/pages/viewpage.action?pageId=3178974>

Abbildung 28 Klappbarer Heck einzug 50 cm



Quelle: Trailer Tail Eco-50, <http://www.atdynamics.com>

Abbildung 29 Seitenverkleidung Auflieger



Quelle: Chassisverkleidung <http://megaform-eu.de>

Für beide Anbauteile lagen keine exakten Geometriedaten vor, so dass für die CFD-Simulationen die Abmessungen aus Fotos geschätzt und in CAD implementiert wurden, siehe Abbildung 30.

Abbildung 30 Erweiterung für das FAT Sattelzugmodell



Mit dem FAT-Modell²¹ eines Standard-Sattelzuges wurde die Änderung des c_w -Wertes durch die Nachrüstteile mit CFD simuliert. Der Kurzbericht zur Simulation ist in Abschnitt 5.8 zu finden. Das Ergebnis ist eine rechnerische Reduktion des c_w -Wertes um 7,3 % bei Anströmung des Fahrzeugs in Fahrtrichtung (Abschnitt 5.8, Abb. 5, Variante 1). Dies führt in der VECTO-Simulation zu einer Verbrauchsreduktion um ca. 2 % von 34,5 auf 33,8 L/100km. Bei Schräganströmung des Fahrzeugs (entsteht im realen Fahrbetrieb durch Seitenwindeinfluss) ist das hier ermittelte aerodynamische Reduktionspotenzial noch größer (8,5 %). In der Realität sind Anströmwinkel bis ca. 10 ° relevant.²²

Weitere Ergebnisse aus der Literatur basierend auf Windkanalmessungen [Daimler, 2012a] [Cooper, 2012] [Raemdonck, 2010] zeigen tendenziell noch höhere Einsparpotenziale als hier mittels CFD simuliert (siehe auch Abschnitt 5.6). In die Simulation des Maßnahmenpotenzials auf Kraftstoffverbrauch mittels VECTO wurden anhand der oben beschriebenen Informationen folgende aerodynamische Reduktionspotenziale abgeleitet: Heckeinzug 50 cm: -8 %, Seitenverkleidung Auflieger: -8 %.

2.4.4.3 Kombination von aerodynamischen Maßnahmen („Aeropakete“)

Aus der Recherche des Luftwiderstandsbeiwertes, siehe Abschnitt 5.6, und weiteren Quellen wurden Aeropakete zusammengestellt, die im Folgenden erläutert werden. Für jedes Aeropaket wurde in einem Schritt die Reduktion des Luftwiderstands berechnet. In einem zweiten Schritt wurde dann mit VECTO die Verbrauchseinsparung simuliert.

Das Aeropaket 1 kann bei aktueller Vorschriftenlage verwendet werden, für das Aeropaket 2 bedarf es Änderungen bei Fahrzeuglänge und Rückfahrkameras.

Sattelzug

Tabelle 9 Aerodynamische Maßnahmen Sattelzug

Aerodynamische Maßnahme	Reduktion c_w -Wert in %
a) SZM verlängerte Aerofront 50 cm	4
b) Rückspiegel durch Kameras ersetzen	3
c) Seitenverkleidung Auflieger	8
d) Unterbodenverkleidung Auflieger	2
e) Heckeinzug 50 cm	8
f) Heckeinzug 100 cm	10
Aeropaket 1 Auflieger, c) e)	16
Aeropaket 2 SZM, b)	3
Aeropaket 2 Auflieger, c) d) f)	20
Aeropaket 2 SZM + Auflieger, b) c) d) f)	23
Aeropaket 3 SZM + Auflieger, a) b) c) d) f)	27

Das einfache Aufsummieren der c_w -Wert-Minderung ist zwar nicht ganz korrekt, weil sich die Maßnahmen alle gegenseitig beeinflussen. Aber die Summeneffekte der Aeropakete liegen in Bereichen, die durch Messungen bestätigt werden. Daimler hat mit dem „Aerodynamics Trailer“, der die Komponenten c) d) e) und einen Heckdiffusor beinhaltet, eine Abnahme des c_w -Wertes von 18 % gemessen [Daimler, 2012a]. Mit konservativen Abschätzungen für die Maßnahmen a) b) f), die sich auf Windkanalmessungen stützen, erreicht man für die Aeropakete c_w -Wert-Minderungen, die nicht zu hoch sein sollten.

²¹ FAT „Forschungvereinigung Automobiltechnik“, eine Abteilung des Abteilung des VDA (Verband der Automobilindustrie) in Deutschland

²² Zusätzliche CFD-Rechnungen mit größeren Anströmwinkeln konnten in der vorliegenden Studie aus Kostengründen nicht durchgeführt werden.

Verteiler-Lkw

Beim Verteiler wurde einfacher vorgegangen. Der Aerodynamics Truck von Mercedes beinhaltet die Maßnahmen

- ▶ Windleitbleche Kabine - Aufbau,
- ▶ abgerundete Vorderkanten Koffer,
- ▶ Seiten- und Unterbodenverkleidung,
- ▶ kurzer Heckeneinzug 0,5 m,
- ▶ Heckdiffusor.

Es wurde die c_w -Wert-Minderung 12 % gemessen [Daimler, 2012b]. Ohne Heckdiffusor werden für das Aeropaket 1 beim Verteiler 10 % Minderung angenommen. Beim Aeropaket 2 kommen Rückfahrkameras dazu, so dass die Minderung bei 13 % liegt.

2.4.5 Energiespar- und Treibhausgasreduktionspotenziale der Technologien

Für jede Fahrzeugklasse wurden zunächst einzelne Maßnahmen untersucht (vgl. Kap. 2.3.2), deren Auswirkungen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen hier dargestellt wird. Die nähere Beschreibung und Simulationsergebnisse der Einzelmaßnahmen sind in den Datenblättern in Kapitel 0 gegeben.

Anschließend wurden auch die Potenziale durch Kombination von einzelnen Maßnahmen untersucht. Dazu wurden für jeden Antriebsstrang jeweils zwei Maßnahmenpakete definiert:

- ▶ **Paket A:** Diese Maßnahmen sind aktuell (Technologiestand 2014) machbar. Alle Komponenten sind bereits verfügbar oder können mit geringem Aufwand bereitgestellt werden.
- ▶ **Paket B:** Die Machbarkeit dieser Maßnahmen ist bereits absehbar. Die Komponenten, die noch nicht verfügbar sind, befinden sich in Entwicklung und werden schätzungsweise bis Ende der Dekade fertig sein. Im Falle der Aeropakete für Lkw ist eine Vorschriftenänderung seitens der EU notwendig, bezüglich Fahrzeugabmessungen und Rückfahrkameras.

Um die Fahrzeugantriebe unabhängig vom eingesetzten Energieträger gegenüberstellen zu können, wurden sämtliche Verbräuche bezogen auf die eingesetzte Endenergie (d. h. die aus dem Energiespeicher im Fahrzeug entnommene Energie) in [MJ/km] umgerechnet. Dabei wurden diese Umrechnungsfaktoren verwendet:

- ▶ Diesel: 2,79 (L/100km) pro (MJ/km); Stoffwerte: $H_u = 43,0 \text{ MJ/kg}$, Dichte = 0,835 kg/L,
- ▶ Erdgas CNG/LNG: 21,4 (g-Gas/km) pro (MJ/km); Stoffwerte: $H_u = 46,8 \text{ MJ/kg}$
- ▶ Strom: 0,278 (kWh/km) pro (MJ/km);

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten inkl. Vorkette bei der Kraftstoffgewinnung und Verteilung (Well-to-wheel, "WTW") wurden Faktoren gemäß DIN EN 16258 "Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)" gewählt, Faktoren für das in der europäischen Norm bisher nicht enthaltene LNG nach Angaben in der JEC Well-to-Wheels-Analysis [JEC, 2014]:

- ▶ Diesel: 90,4 g CO₂e/MJ,
- ▶ Erdgas LNG: 74,5 g CO₂e/MJ (Quelle: [JEC, 2014])
- ▶ Erdgas CNG: 68,1 g CO₂e/MJ,
- ▶ Strom (EU27): 424 g CO₂e/kWh = 117,8 g CO₂e/MJ

Die Höhe der WTW-Emissionsfaktoren hängt auch von den Bereitstellungspfaden der Energieträger ab. In einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 2.4.6 wurde daher die Relevanz verschiedener Bereitstellungspfade, die bisher nicht von der europäischen Norm erfasst werden, für die Treibhausgasminderungspotenziale bei Nutzung der alternativen Energieträger Erdgas und Strom beispielhaft untersucht.

2.4.5.1 Energieverbrauchs- und Treibhausgaseinsparpotenziale beim Sattelzug

Die Einzelbeschreibung der Maßnahmen ist in den Datenblättern im Anhang Kapitel 5.4.1 zu finden. Es wurden die folgenden Kombinationen A und B gebildet:

Paket A

- ▶ *Aeropaket 1.* Seitenverkleidung und Heckeinzug 50 cm am Auflieger. Maßnahme Nr. 7
- ▶ *Aktuelle energieeffiziente Reifen.* SZM Hinterachse Reifen Kl. B statt C, Auflieger Kl. A statt B. Maßnahme Nr. 10
- ▶ *Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h.* Die max. Geschwindigkeit wird von 85 auf 80 km/h gesenkt. Maßnahme Nr. 14
- ▶ *Sparsame Nebenverbraucher.* Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, variable Lenkhilfepumpe, LED-Scheinwerfer. Maßnahme Nr. 15

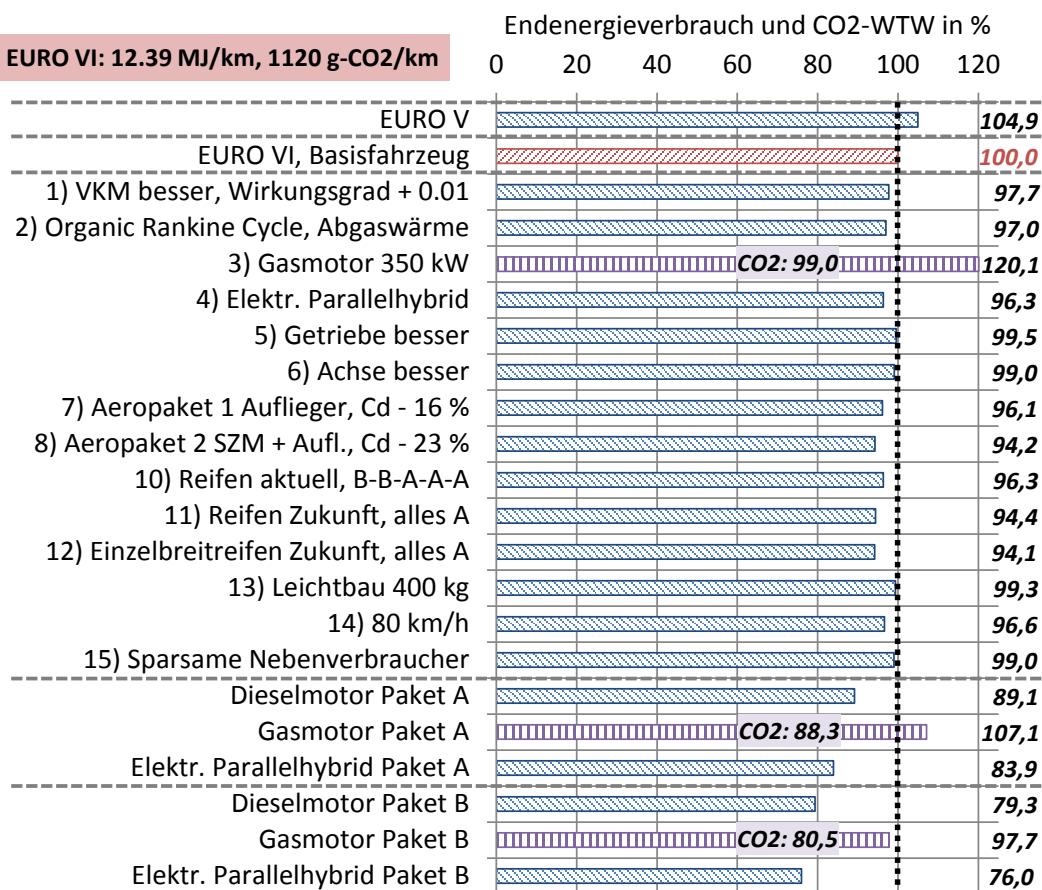
Paket B

- ▶ *Wirkungsgrad VKM verbessern.* Der mittlere Motorwirkungsgrad wird um einen Prozentpunkt verbessert. Maßnahme Nr. 1
- ▶ *Organic Rankine Cycle (ORC).* Dampfkraftprozess, betrieben mit Abgaswärme. Maßnahme Nr. 2²³
- ▶ *Schaltgetriebeeverluste verringern.* Die Verluste im Schaltgetriebe werden um 1/4 verringert. Maßnahme Nr. 5
- ▶ *Achsgetriebeeverluste verringern.* Die Verluste im Achsgetriebe werden um 1/4 verringert. Maßnahme Nr. 6
- ▶ *Aeropaket 2 SZM und Auflieger.* Rückfahrkameras statt Rückspiegel, kombinierte Seiten- und Unterbodenverkleidung am Auflieger, Heckeinzug 100 cm. Maßnahme Nr. 8
- ▶ *Zukünftige energieeffiziente Reifen.* Alle Achsen Reifen Kl. A. Maßnahme Nr. 11
- ▶ *Leichtbau 400 kg.* Durch Änderungen an Konstruktion und Material der Basisfahrzeuge sinkt die Leermasse von SZM und Auflieger um 400 kg ($\approx 3\%$). Maßnahme Nr. 13
- ▶ *Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h.* Maßnahme Nr. 14
- ▶ *Sparsame Nebenverbraucher.* Maßnahme Nr. 15

Die Ergebnisse für den Sattelzug werden in Abbildung 31 (Fernverkehr) und Abbildung 32 (Regionalverkehr) gezeigt. Als 100 % Referenzwert dient jeweils der Endenergieverbrauch des EURO-VI-Basisfahrzeugs. Falls nicht anders angegeben entsprechen die Unterschiede im Endenergieverbrauch auch den Differenzen in den Treibhausgasemissionen.

²³ Nur beim Dieselmotor im Long Haul Cycle.

Abbildung 31 Einsparpotenziale Sattelzug, Long Haul Cycle²⁴



Potenziale der Einzelmaßnahmen im Fernverkehr:

- ▶ Verbesserungen am konventionellen Fahrzeug wie
 - 1) Motorwirkungsgrad erhöhen,
 - 5) & 6) Antriebsstrangverluste verringern,
 - 10) & 11) rollwiderstandsarme Reifen,
 - 13) Leichtbau,
 - 14) Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h,
 - 15) Sparsame Nebenverbraucher
 haben einzelne Sparpotenziale, die von 0,5 % (Getriebe) bis hin zu 5,6 % (Reifen Zukunft) reichen. Sofort umsetzbar sind die Maßnahmen 10) Reifen aktuell und 14) Geschwindigkeitsbegrenzer, die in Kombination bereits ca. 7 % Einsparung ermöglichen. Die Grundkonfiguration und Nutzung des Fahrzeugs ändert sich nicht, lediglich bei der Geschwindigkeitsbegrenzung sinkt die Transportgeschwindigkeit.
- ▶ Die Aerodynamikmaßnahmen 7) und 8) erlauben ca. 4 % bis knapp 6 % Einsparung, wobei das Aeropaket 1 für den Auflieger ebenfalls sofort umsetzbar wäre. Für Aeropaket 2 wären für Heckeneinzug 1 m und Rückfahrkameras Änderungen der gesetzlichen Vorschriften nötig.
- ▶ Das Gasfahrzeug verbraucht 20 % mehr Energie als das Dieselfahrzeug. Dennoch sind die Treibhausgasemissionen ca. 1 % niedriger, da der CO₂e-Faktor (well-to-wheel) von LNG mit 74,5 g/MJ ca. 18 % niedriger als der von Diesel mit 90,4 g/MJ ist.
- ▶ Maßnahmen, die einen Umbau des Antriebsstrangs erfordern wie ein ORC, der an die Kardanwelle gekoppelt ist, oder ein elektrischer Parallelhybrid, haben im Fernverkehr ein in Relation zum Aufwand eher geringes Sparpotenzial von ca. 3 bis knapp 4 %. Im Falle des ORC dürfte dieses Potenzial in Zukunft

²⁴ Da der relative Unterschied der CO₂e-Emissionen bei Erdgas und Strom zum Diesel-Referenzfahrzeug nicht gleich dem relativen Unterschied im Energieverbrauch ist, sind bei diesen Antriebsarten die Zahlen separat aufgetragen.

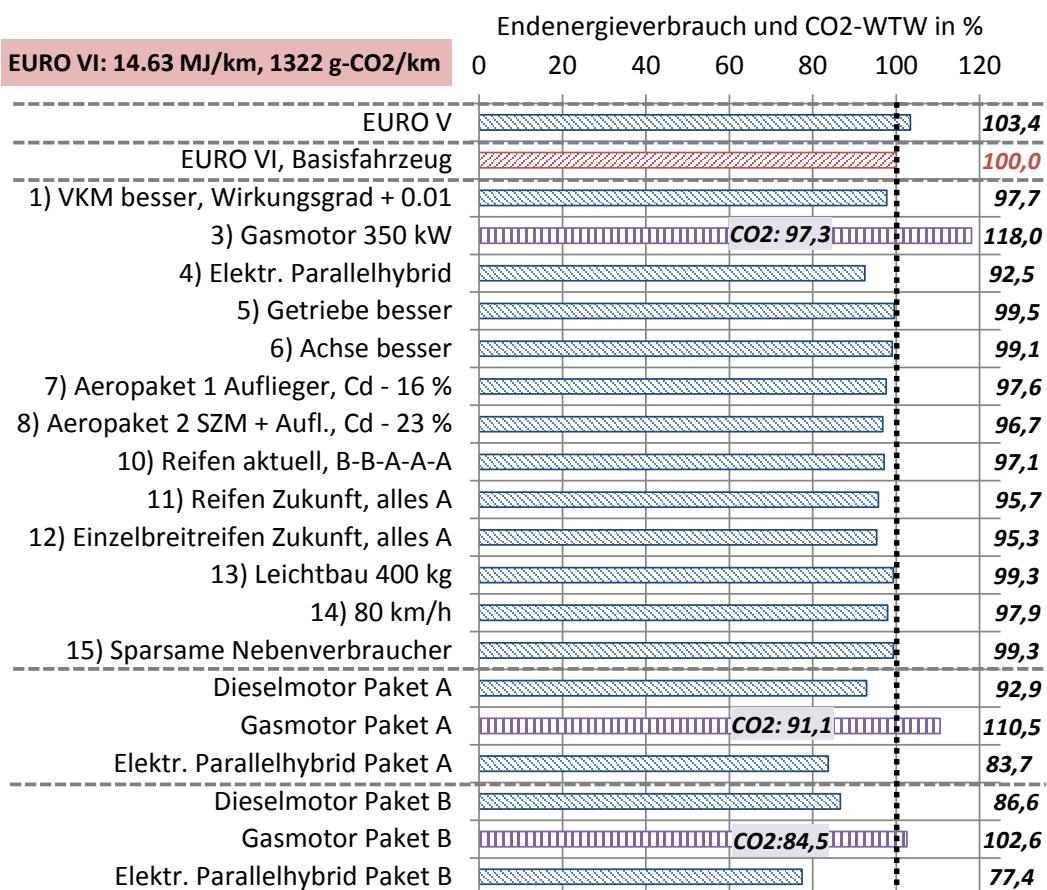
etwas sinken, siehe die Erläuterungen hinter Abbildung 18. Beim Parallelhybrid kann das Sparpotenzial größer sein, wenn Zusatzfunktionen der Betriebsführung wie Lastpunktverschiebung etc. genutzt werden, die hier nicht simuliert werden konnten.

- ▶ Einzelbreitreifen der zukünftig möglicherweise verfügbaren Rollwiderstandsklasse A würden gegenüber Zwillingsreifen der gleichen Klasse nur einen Sparvorteil von ca. 0,3 % bringen, der hauptsächlich aus der Verringerung von Masse und Drehträgheit der Antriebsräder herröhrt. Daher ist fraglich, ob sich die Weiterentwicklung hierfür lohnt. Die Maßnahme wurde dementsprechend bei den folgenden Simulationen nicht weiterverfolgt.

Potenziale der Maßnahmenpakete im Fernverkehr:

- ▶ Bei der Maßnahmenkombination Paket A (*aktuell machbar; bestehend aus: 7) Aeropaket 1 Auflieger, 10) Reifen aktuell, 14) Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h, 15) Sparsame Nebenverbraucher*) zeigt sich, dass beim Antrieb mit VKM (Diesel oder Gas) knapp 11 % Einsparung zum jeweiligen Basisfahrzeug sofort erzielbar sind.
- ▶ Der Parallelhybrid inkl. Maßnahmenpaket A spart gegenüber dem Basisfahrzeug EURO VI ca. 16 % Endenergie und Treibhausgase ein und gegenüber dem konventionellen Dieselfahrzeug Paket A knapp 6 %. Dass der Parallelhybrid mit Paket A gegenüber dem gleich ausgestatteten Dieselfahrzeug Paket A mehr einspart als im Fall von Hybrid vs. konventionellem Fahrzeug (jeweils ohne Sparpaket) ist plausibel; dies liegt am verringerten Luft- und Rollwiderstand und dem dadurch höheren Rekuperationspotenzial während der Bremsvorgänge.
- ▶ Beim Maßnahmenpaket B [*1) $\eta_{VKM} + 0,01$, 2) ORC, 5) & 6) Getriebe und Achse besser, 8) Aeropaket 2 SZM + Auflieger, 11) alle Reifen Kl. A 13) Leichtbau 400 kg, 14) Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h, 15) sparsame Nebenverbraucher*] liegt das Sparpotenzial bei Dieselantrieb bei gut 20 %. Der Parallelhybrid Paket B spart hier nur ca. 4 % zusätzlich gegenüber dem normalen Dieselantrieb Paket B ein, weil der ORC nicht berücksichtigt werden konnte. Falls ein ORC überhaupt bei einem Parallelhybrid zur Anwendung kommt, wird das Sparpotenzial aber geringer sein als bei einem konventionellen Antrieb. Die Elektromaschine entlastet die VKM, weshalb insgesamt weniger Abgasenthalpie zum Antrieb des ORC anfällt. Weil die verwendeten Modellierungsansätze für ORC und Parallelhybrid nicht kompatibel sind, ist über diesen Effekt keine nähere Aussage möglich.

Abbildung 32 Einsparpotenziale Sattelzug, Regional Delivery Cycle



Potenziale der Einzelmaßnahmen im Regionalverkehr:

- ▶ Die Maßnahmen am konventionellen Antriebsstrang (1, 5, 6, 10, 11, 13, 14, 15) haben Sparpotenziale von 0,5 % (Getriebe besser) bis 4,3 % (Reifen Zukunft) und damit im Schnitt weniger als beim Fernverkehrszyklus. Dies liegt daran, dass im Regionalverkehr mehr gebremst wird als im Fernverkehr, die aufgezählten Maßnahmen aber nur im Fall "Antreiben" eine Einsparung bewirken.
- ▶ Die Aerodynamikmaßnahmen 7) und 8) erlauben mit 2,4 % und 3,3 % eine ebenfalls geringere Einsparung als im Fernverkehr, weil die mittlere Geschwindigkeit auf dem Regionalzyklus geringer ist (58,6 km/h zu 73,2 km/h). Aerodynamik-Maßnahmen haben aber besonders bei hoher Geschwindigkeit ein signifikantes Sparpotenzial.
- ▶ Der Mehrverbrauch der Fahrzeuge mit Gasmotor gegenüber denen mit Dieselmotor der gleichen Ausbaustufe liegt bei allen untersuchten Varianten bei 18 bis 19 %. Damit ist eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um 3 % verbunden.
- ▶ Weil auf dem Regionalverteilerzyklus mehr Rekuperationspotenzial aus Nutzbremsvorgängen besteht werden kann, liegt die Einsparung des Hybridfahrzeugs hier bei 7,5 % und damit höher als im Fernverkehrszyklus.

Potenziale der Maßnahmenpakete im Regionalverkehr:

- ▶ Beim Paket A (7, 10, 14, 15), das sofort umsetzbar wäre, lassen sich mit dem Dieselantrieb gegenüber EURO VI ca. 7 % einsparen, mit dem Parallelhybrid ca. 16 %. Gegenüber dem Dieselantrieb-Paket A spart das Hybrid-Paket ca. 10 % ein, aufgrund der verringerten Fahrwiderstände steigt das Nutzbremsvermögen, wie beim Fernverkehr beschrieben.
- ▶ Beim Paket B (1, 5, 6, 8, 11, 13, 14, 15) liegt das Sparpotenzial beim Dieselfahrzeug bei gut 13 % (ohne ORC), beim Parallelhybrid bei knapp 23 %. Gegenüber dem Dieselantrieb der gleichen Technikstufe erhöht sich das Sparpotenzial des Hybriden weiter auf knapp 11 %.

2.4.5.2 Energieverbrauchs- und Treibhausgaseinsparpotenziale beim Verteiler-Lkw

Die Einzelbeschreibung der Maßnahmen ist in den Datenblättern im Anhang Kapitel 5.4.3 zu finden. Es wurden die folgenden Kombinationen A und B gebildet:

Paket A

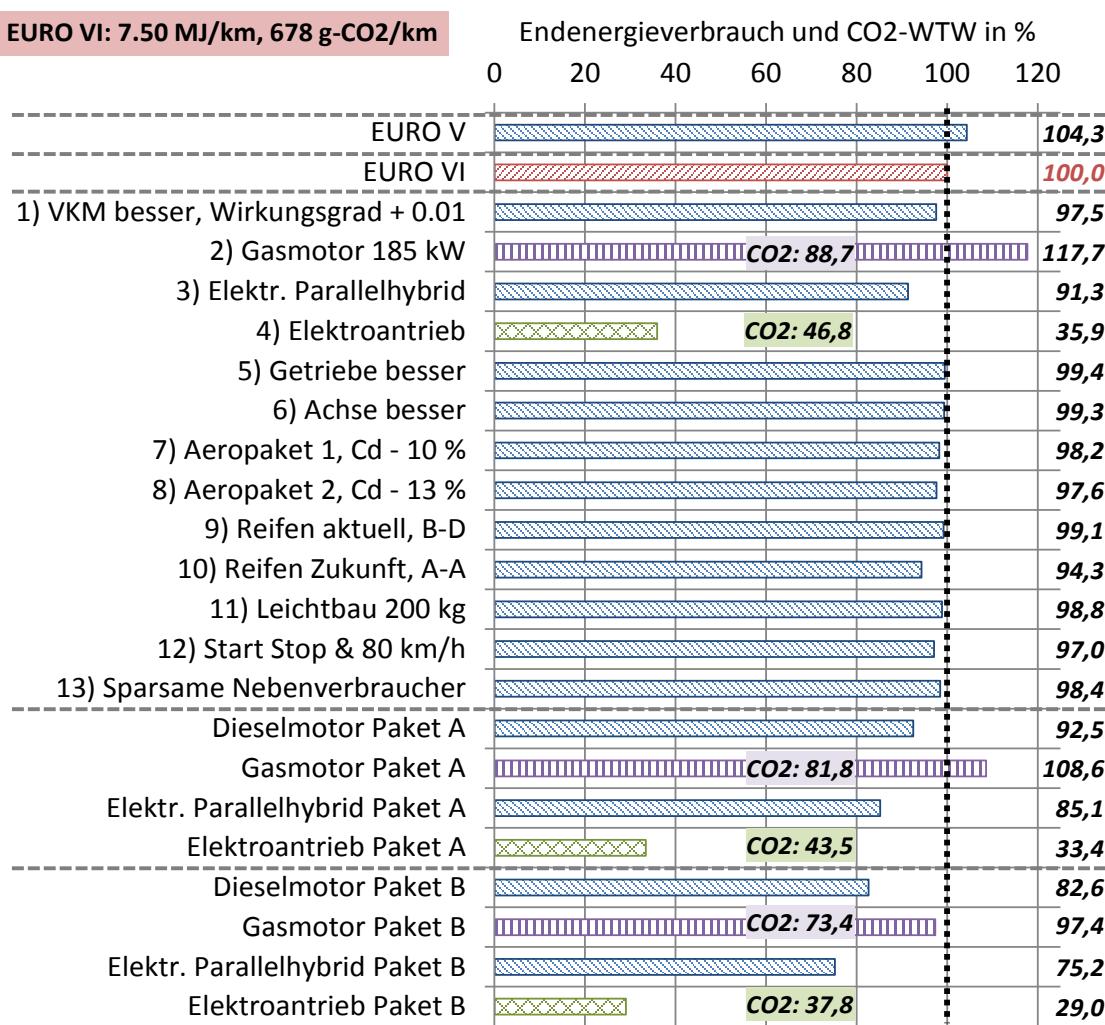
- ▶ *Aeropaket 1.* Seitliche Windleitbleche Kabine-Aufbau, abgerundete Vorderkanten Aufbau, Seitenverkleidung, Heckeneinzug 50 cm, Maßnahme Nr. 7
- ▶ *Aktuelle energieeffiziente Reifen.* Vorderachse Reifen Kl. B statt C. Maßnahme Nr. 9
- ▶ *Start/Stopp-Automatik (Standabschaltung).* Der Motor wird bei Fahrzeugstillstand abgeschaltet. Maßnahme Nr. 12
- ▶ *Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h.* Die max. Geschwindigkeit wird von 85 auf 80 km/h gesenkt. Maßnahme Nr. 12
- ▶ *Sparsame Nebenverbraucher.* Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, variable Lenkhilfepumpe, LED-Scheinwerfer. Maßnahme Nr. 13

Paket B

- ▶ *Wirkungsgrad VKM verbessern.* Der mittlere Motorwirkungsgrad wird um 0,01 verbessert. Maßnahme Nr. 1
- ▶ *Schaltgetriebeverluste verringern.* Die Verluste im Schaltgetriebe werden um 1/4 verringert. Maßnahme Nr. 5
- ▶ *Achsgetriebeverluste verringern.* Die Verluste im Achsgetriebe werden um 1/4 verringert. Maßnahme Nr. 6
- ▶ *Aeropaket 2.* Aeropaket 1 und Rückfahrkameras. Maßnahme Nr. 8
- ▶ *Zukünftige energieeffiziente Reifen.* Alle Achsen Reifen Kl. A. Maßnahme Nr. 10
- ▶ *Leichtbau 200 kg.* Durch Änderungen an Konstruktion und Material sinkt die Leermasse vom Lkw um 200 kg ($\approx 3\%$). Maßnahme Nr. 11
- ▶ *Start/Stopp-Automatik (Standabschaltung).* Der Motor wird bei Fahrzeugstillstand abgeschaltet. Maßnahme Nr. 12
- ▶ *Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h.* Die max. Geschwindigkeit wird von 85 auf 80 km/h gesenkt. Maßnahme Nr. 12
- ▶ *Sparsame Nebenverbraucher.* Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, variable Lenkhilfepumpe, LED Scheinwerfer. Maßnahme Nr. 13

Die Ergebnisse werden in Abbildung 33 gezeigt. Wie schon zuvor dient als 100 % Referenzwert jeweils der Endenergieverbrauch des EURO-VI-Basisfahrzeugs. Falls nicht anders angegeben, entsprechen die Unterschiede im Endenergieverbrauch auch den Differenzen in den Treibhausgasemissionen.

Abbildung 33 Einsparpotenziale Verteiler-Lkw, Urban Delivery Cycle



Potenziale der Einzelmaßnahmen:

- ▶ Beim Verteiler-Lkw haben die konventionellen Sparmaßnahmen
 - 1) Wirkungsgraderhöhung VKM um 0,01,
 - 5) & 6) Getriebe und Achse besser,
 - 9) & 10) rollwiderstandsreduzierte Reifen,
 - 11) Leichtbau,
 - 12) Start/Stopp Automatik,
 - 13) Sparsame Nebenverbraucher
- Einzelpotenziale von 0,6 % (Getriebe) bis 5,7 % (Reifen Zukunft). Das Reifenpotenzial ist im Vergleich zum Sattelzug deshalb so hoch, weil die Standardreifen derzeit Klasse C und D sind, insbesondere für die Antriebsachse gibt es aktuell noch keine höhere Effizienzklasse. Daher hat ein Reifen der Klasse A ein verhältnismäßig großes Einsparungspotenzial, der Rollwiderstand sinkt von 6,8 N/kN um ca. 40 % auf 4,1 N/kN. Beim Sattelzug war das Referenzfahrzeug durchgängig mit besseren Reifen ausgestattet.
- ▶ Der Energieverbrauch des Gasfahrzeugs liegt in alle Ausstattungsstufen (Basis, Paket A, Paket B) 17 bis 18 % über dem Dieselfahrzeug. Die Treibhausgasemissionen sind v. a. aufgrund des niedrigeren Kohlenstoffgehalts von Erdgas im Vergleich zu Diesel um ca. 11 % niedriger.
- ▶ Die Aeropakete sparen nur 1,8 bis 2,4 % Treibhausgase. Ein Grund ist, dass das aerodynamische Verbesserungspotenzial bei Lkw mit Kastenaufbau geringer ist als bei den mehrteiligen Sattelzügen, der c_w -Wert sinkt nur um 10 bis 13 %, gegenüber bis zu 20 % beim Sattelzug. Zudem ist der städtische Verteilerzyklus mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 30,9 km/h deutlich langsamer als Regional- oder Fernverkehr, damit hat der Luftwiderstand einen relativ geringen Anteil am Gesamtenergieverbrauch.

- ▶ Rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge sind für den Einsatz als Verteiler-Lkw denkbar. Bei diesem Antriebskonzept sinkt der Energieverbrauch beim Basisfahrzeug um ca. 64 %. Beim Vergleich zwischen Elektromotoren und VKM muss allerdings beachtet werden, dass je nach Strommix mehr oder weniger große Verluste bei der Energiewandlung von fossilen Brennstoffen zu Strom in den thermischen Kraftwerken anfallen. Beispielsweise liegen die elektrischen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken neuerer Bauart zwischen 40 % und 50 % [Uni Bochum, 2007]. Da allerdings ein Teil des Stroms aus CO₂-armen bis -freien Quellen wie Atom-/Wasser-/Windkraft gewonnen wird, liegt im EU27-Durchschnitt der CO₂-Faktor mit 117,8 g-CO₂/MJ_{el}²⁵ deutlich unter dem Wert von ca. 278 g-CO₂/MJ_{el} für reinen Kohlestrom [Uni Bochum, 2007, S. 46].
Bei Betrachtung der Emissionen sind die 117,8 g-CO₂e/MJ_{el} des EU27-Strommixes immer noch ca. 30 % mehr als die 90,4 g-CO₂e/MJ_{t_{therm}} von Dieselkraftstoff, allerdings erzeugt ein Elektromotor aufgrund des über doppelt so hohen Wirkungsgrades deutlich mehr mechanische Arbeit (MJ_{mech}) pro MJ_{el} als eine Diesel-VKM pro MJ_{t_{therm}}. Die hohen Verluste der thermischen Energiewandlung fallen bei VKM im Fahrzeug selber an, bei Elektroanrieben – proportional zum Fossilstromanteil – in der Vorkette.
- ▶ Das Einsparpotenzial einer Start-Stopp-Automatik wurde für den Verteiler-LKW mit 2 % berechnet, in Verbindung mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h sind es 3 %.

Potenziale der Maßnahmenpakete:

- ▶ Beim aktuell umsetzbaren Sparpaket A [7) Aeropaket 1, 9) Reifen aktuell, 12) Start-Stopp-Automatik und Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h, 13) Sparsame Nebenverbraucher] hat der Dieselantrieb ein Sparpotenzial von gut 7 %, der Hybrid von 15 % und der Batterie-Lkw von knapp 66 % gegenüber dem EURO-VI-Basisfahrzeug. Gegenüber dem Dieselantrieb Paket A spart der Hybrid Paket A ca. 8 % ein und der Elektro-LKW Paket A ca. 64 %. Dass die Einsparung der (teil-)elektrifizierten LKW im Paket nicht wie beim Sattelzug höher als beim Basisfahrzeug ist, liegt an der Start-Stopp-Automatik, die beim Verteiler-LKW mit Dieselantrieb in Paket A bereits enthalten ist.
- ▶ Beim zukünftigen Sparpaket B [1) Wirkungsgradsteigerung VKM um 0.01, 5) & 6) Getriebe und Achse besser, 10) Aeropaket 2, 10) Reifen Zukunft, 11) Leichtbau, 12) Start-Stop und 80 km/h, 13) Sparsame Nebenverbraucher] spart der Diesel-Lkw gut 17 % ein, der Hybrid ca. 25 % und der Elektro-Lkw 71 % gegenüber Basis EURO VI. Alleine die Reifen Klasse A machen davon ca. 5 % aus. Gegenüber dem Dieselantrieb Stufe B spart der B-Hybrid wieder ca. 9 % ein und der B-Elektro-Lkw ca. 65 %. Dieses Verhältnis ändert sich nicht wesentlich über die Technologiestufen des Grundfahrzeuges.

2.4.5.3 Energieverbrauchs- und Treibhausgaseinsparpotenziale beim Stadtbus

Die Einzelbeschreibung der Maßnahmen ist in den Datenblättern im Anhang Kapitel 5.4.4 zu finden. Es wurden die folgenden Kombinationen A und B gebildet:

Paket A

- ▶ *Aktuelle energieeffiziente Reifen.* Alle Achsen Reifen Kl. C statt D. Maßnahme Nr. 8
- ▶ *Start/Stopp-Automatik (Standabschaltung).* Der Motor wird bei Fahrzeugstillstand abgeschaltet. Maßnahme Nr. 11
- ▶ *Sparsame Nebenverbraucher.* Kompressor mit Kupplung, variable Lenkhilfepumpe, LED-Scheinwerfer, Klimakompressor 2- statt 3-stufig geregelt, Teil-Isolation Passagierraum. Maßnahme Nr. 12

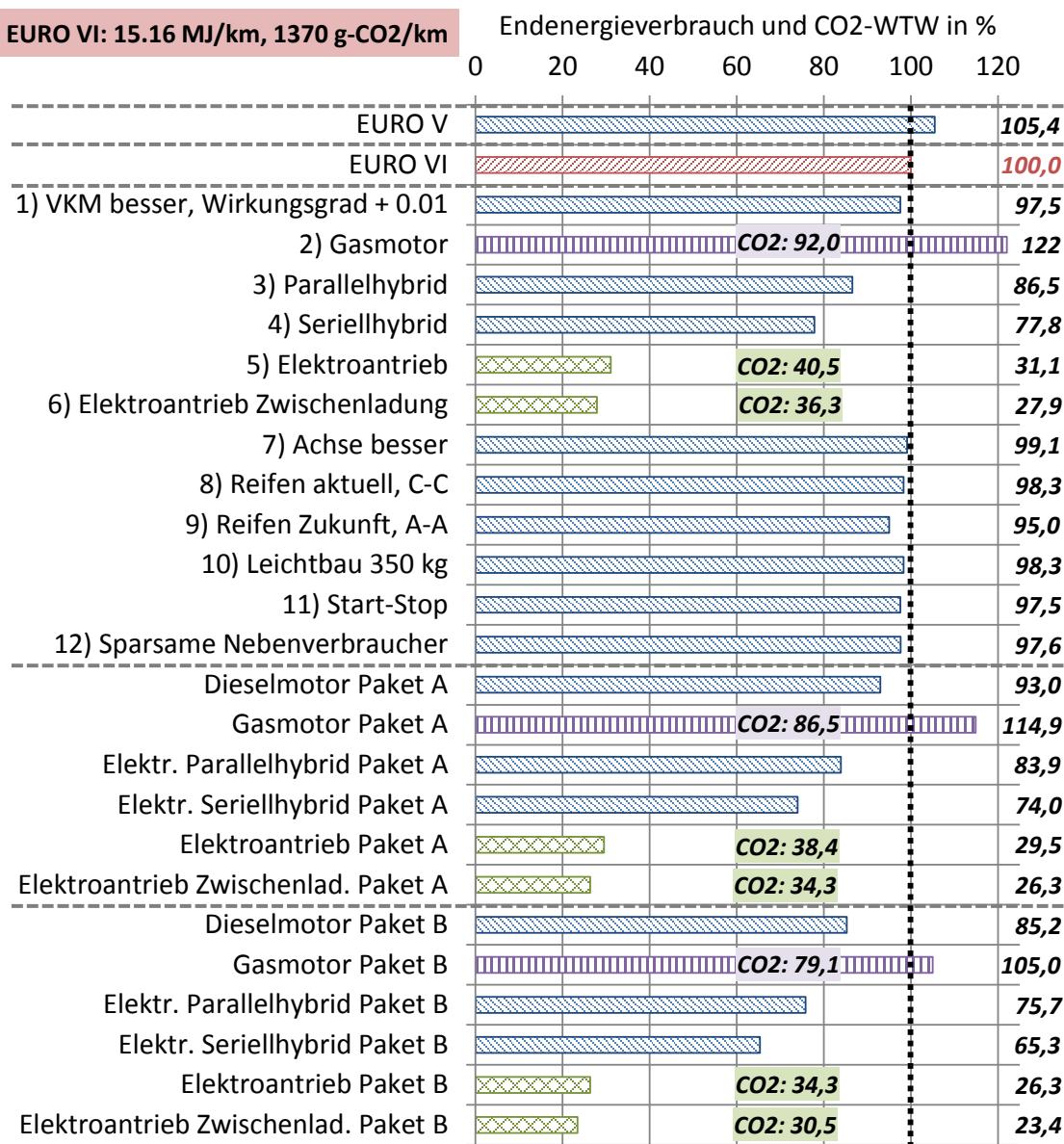
²⁵ Es werden die Indices "el", "therm" und "mech" verwendet. el - Elektrische Leistung oder Energie, so wie sie aus der Steckdose kommt oder in Batterien gespeichert ist. therm - Thermische Leistung oder Energie. Hier der untere Heizwert von Dieselkraftstoff, welcher bei Verbrennung in eine Wärmemenge umgesetzt wird. mech - Mechanische Leistung oder Arbeit (Energie), so wie sie von den belasteten Abtriebswellen laufender Motoren abgegeben wird. Mittels Energiewandlungsmaschinen sind die verschiedenen Energieformen mit mehr oder weniger hohen Verlusten untereinander konvertierbar.

Paket B

- ▶ *Wirkungsgrad VKM verbessern.* Der mittlere Motorwirkungsgrad wird um 0,01 verbessert. Maßnahme Nr. 1
- ▶ *Achsgetriebeverluste verringern.* Die Verluste im Achsgetriebe werden um 1/4 verringert. Maßnahme Nr. 7
- ▶ *Zukünftige energieeffiziente Reifen.* Alle Achsen Reifen Kl. A. Maßnahme Nr. 9
- ▶ *Leichtbau 350 kg.* Durch Änderungen an Konstruktion und Material sinkt die Leermasse vom Bus um 350 kg (~ 3 %). Maßnahme Nr. 10
- ▶ *Start/Stopp-Automatik (Standabschaltung).* Der Motor wird bei Fahrzeugstillstand abgeschaltet. Maßnahme Nr. 11
- ▶ *Sparsame Nebenverbraucher.* Kompressor mit Kupplung, variable Lenkhilfepumpe, LED-Scheinwerfer, Klimakompressor 2- statt 3-stufig geregelt, Teil-Isolation Passagierraum Maßnahme Nr. 12

Die Ergebnisse werden in Abbildung 34 gezeigt.

Abbildung 34 Einsparpotenziale Stadtbus, Citybus Urban Cycle



Potenziale der Einzelmaßnahmen:

- ▶ Die Sparmaßnahmen am konventionellen Dieselbus
 - 1) Wirkungsgradsteigerung VKM um+ 0,01
 - 7) Achse besser
 - 8) Reifen aktuell
 - 9) Reifen Zukunft
 - 10) Leichtbau
 - 11) Start-Stopp
 - 12) Sparsame Nebenverbraucher
- haben Einzelpotenziale von 0,9 % (Achse besser) bis 5 % (Reifen Zukunft). Wie beim Verteiler-Lkw haben Reifen der Klasse A das größte Sparpotenzial, weil die aktuellen Busse standardmäßig nur mit Klasse D unterwegs sind. Der Rollwiderstand könnte damit von 7,3 N/kN um ca. 57 % auf 4,2 N/kN sinken. Ebenfalls fällt auf, dass die Nebenverbraucher beim Bus mit 2,4 % ein höheres Sparpotenzial als bei den Lkw mit 0,7 % bis 1,6 % bieten. Dies liegt daran, dass die Nebenverbraucher beim Stadtbus mit knapp 30 % einen deutlich höheren Anteil am Kraftstoffverbrauch haben als bei Lkw (vgl. Abbildung 24). Besonders der Lüfter und der Klimakompressor machen sich hier mit jeweils ca. 2 kW_{mech} bemerkbar.
- ▶ Der Mehrverbrauch des Gasmotors zum Dieselmotor in den drei Technologiestufen Basis, Paket A und Paket B liegt zwischen 22 und 24 % und ist damit relativ unabhängig von der Technologiestufe.
- ▶ Bei den (teil-)elektrischen Antrieben gibt es bei Stadtbussen eine große Palette an eingesetzten Konzepten, weil Stadtbusse aufgrund des stark transienten Fahrbetriebs mit häufigem Anfahren und Verzögern für die Nutzbremsung prädestiniert sind. Der Parallelhybrid spart gut 13 % gegenüber dem EURO-VI-Basisbus ein und der Seriellhybrid 22 %. Dabei ist zu beachten, dass die hier ermittelten stark unterschiedlichen Potenziale zwischen Parallel- und Seriellhybrid nicht auf das Antriebstrangkonzept, sondern v. a. durch die mit 150 kW zu 90 kW wesentlich größere elektrische Bremsleistung des Seriellhybrid zurückzuführen ist (siehe hierzu auch die Erläuterungen im Abschnitt „*Einfluss der Elektromaschinenleistung auf das Sparpotenzial von Hybridfahrzeugen*“). Die Batteriebusse sparen im Fall „Nur-Batterie“ ca. 69 % und mit „Zwischenladung“ und damit verbunden kleinerer Batterie ca. 72 % Endenergie ein. Der Elektrobus mit Zwischenladung verbraucht weniger Strom als der Nur-Batteriebus, weil er aufgrund der deutlich kleineren Batterie knapp 2 t weniger wiegt. Beim Vergleich mit dem Dieselbus gelten die gleichen Aussagen zur Berücksichtigung der Wandlungsverluste wie bei Verteiler-Lkw erläutert.
- ▶ Die Start-Stopp-Automatik erlaubt beim Stadtbus aufgrund des hohen Stillstandanteils eine Einsparung von ca. 2,5 %.

Potenziale der Maßnahmenpakete:

- ▶ Beim recht kleinen, aktuell umsetzbaren Sparpaket A [8) Reifen aktuell, 11) Start-Stop-Automatik, 12) Sparsame Nebenverbraucher] lassen sich mit dem Dieselbus 7 % Endenergie gegenüber EURO VI sparen, bei den Hybriden 16 % bzw. 26 % und bei den Batteriebussen 70 % sowie knapp 74 %. Innerhalb der Technologiestufe A sinkt das Sparpotenzial der Hybriden leicht auf 10 % bzw. 20 %, weil der Dieselbus in der Basisversion keine Start-Stopp-Automatik hatte, die Hybriden schon. Das Sparpotenzial der Elektrobusse-A zum Dieselbus-A bleibt fast gleich bei 68 % und 72 %.
- ▶ Das zukünftig umsetzbare Sparpaket B (1) Wirkungsgradsteigerung VKM um + 0,01, 7) Achse besser, 9) Reifen Zukunft, 10) Leichtbau, 11) Start-Stop-Automatik, 12) Sparsame Nebenverbraucher) erlaubt beim Dieselbus eine Energieeinsparung von ca. 15 %, bei den Hybriden, 24 % und 35 % (parallel und seriell) sowie bei den Elektrobussen knapp 74 % und knapp 77 % (ohne und mit Zwischenladung). Die max. Treibhausgasminderung von knapp 70 % gegenüber EURO VI lässt sich mit dem Elektrobus mit Zwischenladung erreichen. Innerhalb dieser Technologiestufe B hat der Parallelhybrid gegenüber dem Dieselbus ein Sparpotenzial von ca. 11 %, der Seriellhybrid ca. 23 %, der Batteriebus 69 % und der Batteriebus mit Zwischenladung knapp 73 %. Bei den Bussen mit Nutzbremsung macht sich besonders der verringerte Rollwiderstand bemerkbar, welcher die rückgewinnbare Bremsleistung erhöht. Hiervon profitieren besonders Fahrzeuge mit großer Generatorleistung.

2.4.6 Bedeutung der Energieträger-Bereitstellung für die Treibhausgas-Minderungspotenziale durch den Einsatz alternativer Energieträger

Die well-to-wheel-Emissionsfaktoren (WTW) eines Endenergiträgers variieren in Abhängigkeit von den Bereitstellungspfaden (Herkunft, Verteilungs- und Transformationsprozesse) und damit verbundenen unterschiedlich hohen anteiligen Vorkettenemissionen (well-to-tank) für die Energieträgerbereitstellung. Unterschiedliche Bereitstellungspfade können sich deshalb signifikant auf die Treibhausgasminderungspotenziale bei einem Wechsel von Diesel zu alternativen Energieträgern auswirken.

In einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse wurde daher die Relevanz verschiedener Bereitstellungspfade für die Treibhausgasminderungspotenziale bei Nutzung der alternativen Energieträger Erdgas und Strom beispielhaft untersucht. Für alle vier betrachteten Fahrzeugklassen wurden den Potenzialanalysen für Erdgas- und Elektrofahrzeuge mit den in dieser Studie verwendeten Emissionsfaktoren ergänzende Berechnungen mit alternativen WTW-Emissionsfaktoren aus aktuellen Literaturquellen gegenübergestellt:

- ▶ Für **verflüssigtes Erdgas LNG** gibt [JEC, 2014] als Bandbreite 72,9 - 76,1 g CO₂e/MJ an. Daraus wurde für die Potenzialanalysen in dieser Studie ein mittlerer Emissionsfaktor von 74,5 g CO₂e/MJ definiert. [MKS, 2014] untersucht gezielt den möglichen Einsatz von LNG bei Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen und gibt für die heutige Situation 73-79 g CO₂e/MJ an, für die Zukunft 72-76 g CO₂e/MJ.
- ▶ Für **komprimiertes Erdgas CNG** wurde in den Potenzialanalysen dieser Studie ein Emissionsfaktor von 68,1 g CO₂e/MJ gemäß der Ende 2012 herausgegebenen europäischen Norm EN 16258 verwendet. [JEC, 2014] gibt demgegenüber für den „EU-Mix“ einen etwas höheren Wert von 69,3 g CO₂e/MJ an. Weiterhin werden Emissionsfaktoren für den Pipeline-Transport über 4.000 km bzw. 7.000 km mit 71,1 bzw. 77,6 g CO₂e/MJ angegeben.
- ▶ Die Treibhausgas-Emissionsfaktoren für **Strom** variieren erheblich zwischen einzelnen europäischen Ländern in Abhängigkeit von deren Strommix, d.h. den Anteilen verschiedener Primärenergieträger in der Stromerzeugung. Für die Potenzialanalysen dieser Studie wurde der für Europa (EU27) in der europäischen Norm EN 16258 angegebene Emissionsfaktor (0,424 kg/kWh) verwendet. In der Sensitivitätsanalyse wurden zusätzlich die Treibhausgasemissionen mit ausgewählten nationalen Strommixen berechnet: Deutschland (0,583 kg/kWh), Österreich (0,210 kg/kWh) und Polen (1,005 kg/kWh).

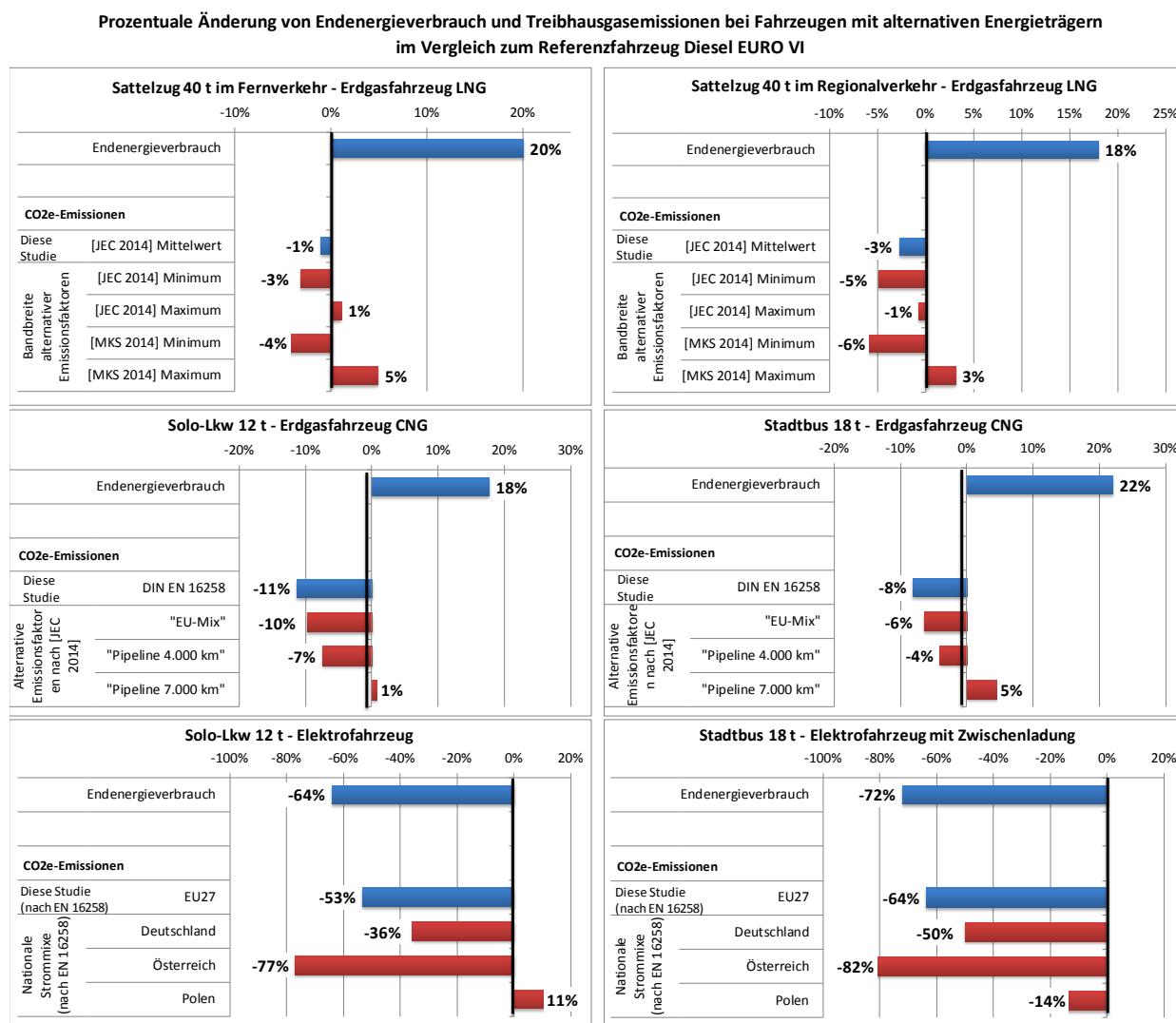
Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Sie belegen klar die Relevanz der Bereitstellungspfade nicht nur für die Höhe der Treibhausgasminderungspotenziale, sondern teilweise auch dafür, ob der Wechsel auf einen alternativen Energieträger überhaupt zu Treibhausgasminderungen führt.

- ▶ Ein LNG-Sattelzug mit gegenüber der Dieselvariante 18-20 % höherem Endenergieverbrauch (je nach Einsatzprofil) kann im günstigsten Fall die Treibhausgasemissionen um vier bis sechs Prozent reduzieren. Beim Einsatz von LNG aus Bereitstellungspfaden mit hohen spezifischen Emissionen können die Treibhausgasemissionen aber auch um drei bis fünf Prozent gegenüber dem Dieselfahrzeug ansteigen.
- ▶ Der Einsatz von CNG bei Solo-Lkw 12 t bzw. bei Stadtbussen bewirkt trotz gegenüber Dieselfahrzeugen höherem Endenergieverbrauch mit dem derzeitigen EU-Mix der CNG-Herkunft eine Treibhausgasminderung um 10-11 % (Solo-Lkw) bzw. 6-8 % (Stadtbus). Auch der Einsatz von CNG, was 4.000 km durch Pipelines nach Europa transportiert worden ist, bewirkt noch Treibhausgasminderungen. Bei einer Transportentfernung von 7.000 km sind die spezifischen Emissionen für CNG dagegen so hoch, dass mit dem aktuellen Mehrverbrauch von Gasfahrzeugen auch die Treibhausgasemissionen ansteigen können.
- ▶ Elektrofahrzeuge bewirken eine starke Verringerung des Endenergieverbrauchs, durch den wesentlich höheren Wirkungsgrad von Elektro- gegenüber Verbrennungsmotoren (vgl. Kap. 2.4.5.2). Die Minderung der Treibhausgasemissionen kann aber erheblich abweichen, abhängig von den Anteilen regenerativer Energien bzw. von fossilen Primärenergieträgern mit hoher CO₂-Intensität (insbesondere Kohle) an der Stromerzeugung. Bei Ländern mit hohem Anteil erneuerbarer Energien (z. B. Österreich) können die prozentualen Treibhausgasminderungen höher ausfallen als die Endenergieeinsparungen. Dagegen können in Ländern mit hohem Kohlenanteil in der Stromerzeugung (z. B. Polen) auch bei hohen Energieeinsparungen nur geringe Treibhausgasminderungen oder sogar ein Emissionsanstieg resultieren.

Der Einsatz von Erdgas bei schweren Nutzfahrzeugen kann somit derzeit trotz erhöhtem Endenergieverbrauch meist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bewirken. Die Minderungspotenziale sind allerdings bisher relativ gering und zudem erheblich vom Bereitstellungspfad des Erdgases abhängig. Beim Einsatz von LNG mit erhöhten Vorkettenemissionen ebenso wie bei großen Transportentfernungen von CNG kann es teilweise auch statt Treibhausgasminderungen zu einem leichten Emissionsanstieg kommen. Für zukünftige Entwicklungen ist davon auszugehen, dass sich der Mehrverbrauch von Gasfahrzeugen ggü. Dieselfahrzeugen deutlich reduzieren lässt, wenn die Entwicklung der Gasmotoren für schwere Lkw von der Fahrzeugindustrie weiter vorangetrieben wird. In dem Fall wird der Einsatz von Erdgas zukünftig auch bei CO₂-intensiveren Bereitstellungspfaden zu Treibhausgasminderungen bei schweren Nutzfahrzeugen führen.

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen führt zu einer deutlichen Reduktion des Endenergieverbrauchs und im Allgemeinen auch der Treibhausgasemissionen. Allerdings kann es auch hier beim Einsatz von Strom aus CO₂-intensiven Bereitstellungspfaden (z. B. Kohle) zu einem Emissionsanstieg kommen. Bei der Förderung von Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen sollte daher immer gleichzeitig der Einsatz möglichst hoher Anteile erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung angestrebt werden. Zusätzlich muss hier auch der Einbezug der Fahrzeugherrstellung in den Umweltvergleich diskutiert werden. Vorliegende Analysen im Pkw-Bereich zeigen, dass bei Elektrofahrzeugen die Fahrzeugherrstellung einen deutlich größeren Anteil an den Treibhausgasemissionen (und anderen Umweltwirkungen) über den gesamten Lebenszyklus hat als bei herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (vgl. z. B. [IFEU, 2011]).

Abbildung 35 Einfluss der Energieträger-Bereitstellungspfade auf die Treibhausgasminderungspotenziale durch Einsatz alternativer Energieträger



2.4.7 Zusammenfassung der ermittelten Potenziale und Vergleich mit anderen Arbeiten

Das Ergebnis der Simulationen ist, dass bei den untersuchten Nutzfahrzeugklassen bei konsequenter Anwendung der aktuell verfügbaren und erlaubten Sparmaßnahmen für konventionelle Diesel-Antriebsstränge 7 bis 11 % Verbrauchs- und Treibhausgasemissionsminderung (well-to-wheel) möglich wären (Paket A).

Gasmotoren erlauben in den meisten Fällen eine Treibhausgasminderung zwischen 1 % und 11 %, obwohl der heizwertbezogene Endenergieverbrauch um ca. 20 % ansteigt. Die Gründe sind einerseits der niedrigere CO₂-Faktor von Erdgas (abhängig von den Emissionen in der Vorkette: LNG vs. CNG), andererseits der brennverfahrensbedingt niedrigere Wirkungsgrad der umgebauten Dieselmotoren.

Die Untersuchung elektrischer Hybrid-Antriebsstränge ergab, dass das Sparpotenzial sehr Fahrzeug- und Fahrzyklus-abhängig ist. In den untersuchten Konfigurationen reicht es von knapp 4 % für den Sattelzug im Fernverkehr und 9 % beim Verteiler-Lkw bis hin zu 22 % beim (Seriell-)Hybridbus im städtischen Einsatz.

Reine Elektrofahrzeuge wurden nur beim Verteiler-Lkw und dem Stadtbus untersucht. Dort erlauben sie bei der aktuellen Fahrzeugausrüstung eine Energieeinsparung von 64 % bis über 72 % und eine Treibhausgasminderung von 53 % bis 64 % (berechnet anhand der CO₂-Faktoren des EU27-Strommixes).

Bei Maßnahmenpaket B mit weiteren, zukünftig verfügbaren Maßnahmen, beträgt die Einsparung der reinen Dieselfahrzeuge 13 bis 20 %. Hybrid- und Elektrofahrzeuge mit Möglichkeit zur Nutzbremsung profitieren besonders von den verringerten Fahrwiderständen. Die Hybridbusse können hier 24 bis 35 % zum EURO-VI-Referenzfahrzeug einsparen. Der Elektrobus mit Zwischenladung ermöglicht in Kombination mit Paket B eine Energieeinsparung von ca. 77 % und eine Treibhausgasminderung von knapp 70 %.

Vergleich der ermittelten Potenziale mit anderen Arbeiten

In den letzten Jahren sind mehrere Studien zum behandelten Thema veröffentlicht worden. Eine Abschätzung des zukünftigen Kraftstoffeinsparungspotenzials bei SNF wird z. B. in folgenden Studien gegeben: [AEA, 2011; NRC, 2010; Ricardo, 2009a; TIAX, 2009, 2011].

In den zitierten Studien werden deutlich größere Sparpotenziale angegeben, z. B. für Sattelzüge im Fernverkehr für den Zeitraum 2014 bis 2020²⁶ eine mittlere Verbrauchsreduktion von 41 %²⁷. Das ist ungefähr doppelt so viel wie die in dieser Arbeit simulierten 20 % bis 23 % (siehe Abbildung 31 Sparpakete B), die mit Maßnahmen erreicht werden können, die für Anfang der 2020er Jahre machbar erscheinen.

Die Unterschiede zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie wurden – soweit möglich – analysiert und lassen sich im Wesentlichen durch folgende Punkte erklären:

- ▶ Definition der Referenzfahrzeuge
- ▶ Methodik der Ermittlung des Einsparpotenzials
- ▶ Auswahl der als marktrelevant eingeschätzten Spartechnologien
- ▶ Zeitpunkt der Studienerstellung

Eine detaillierte Aufschlüsselung einiger Unterschiede zwischen der vorliegenden Studie und [TIAX, 2011] findet sich im Anhang 5.6. In der vorliegenden Arbeit wurde vor allem auf Daten (u. a. zu den Basisfahrzeugen und den Fahrzyklen) und Methoden (u. a. Simulationsmodell VECTO) zurückgegriffen, die seit 2010 im Rahmen der Erarbeitung eines europäischen Zertifizierungsverfahrens für CO₂-Emissionen [TU Graz, 2012a], [TU Graz, 2014] erarbeitet wurden. Somit stellen diese Ergebnisse aus Sicht der Autoren die derzeit für den europäischen Markt realitätsnächsten Werte dar.

²⁶ [TIAX, 2011], S. 3-1: "The fuel efficiency improvement technologies considered are expected to be available in the 2015 to 2020 timeframe".

²⁷ [TIAX, 2011], S. 5-8/5-9: Für den Sattelzug wird von 2010 bis 2020 ein mittleres Sparpotenzial von 47 % angenommen. Bei der Erstellung der Studie im Herbst 2011 wurden jedoch pauschal 10 % Verbrauchsminderung von 2010 bis 2014 definiert [letzter Eintrag "Fuel efficiency improvements between 2010 and 2014 (baseline)" S. 5-8]. D. h. auf 2014 gerechnet beträgt das Sparpotenzial bis 2020 ca. 41 % = (1 - 0.47) / (1 - 0.10) - 1.

2.5 Änderungen der Fahrzeugkosten für die Fahrzeugsbetreiber beim Einsatz energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien

Eine wesentliche Voraussetzung für eine Verbreitung von energiesparenden und treibhausgasmindernden Fahrzeugtechnologien ist, dass sich deren Einsatz betriebswirtschaftlich rechnet²⁸. Die mit einer Technologie eingesparten Kraftstoffkosten und eventuell andere Kosteneinsparungen müssen also die mit dem Technologieeinsatz verbundenen Zusatzkosten mindestens aufwiegen. Dementsprechend ist die Analyse von Änderungen der Fahrzeugkosten für die Fahrzeugsbetreiber ein wichtiger Bestandteil der Bewertung der untersuchten Technologien auf ihre Effizienz zur Treibhausgasminderung.

Eine vollständige Betrachtung der Kosteneffizienz zusätzlicher kraftstoffsparender Technologien erfordert grundsätzlich eine Betrachtung der Änderung der Gesamtbetriebskosten („Total Cost of Ownership“, TCO). Zentrale Fragestellung für die Fahrzeugsbetreiber ist zunächst die Änderung der Anschaffungskosten (Zusatzinvestition) für den Kauf eines Fahrzeugs mit zusätzlichen kraftstoffsparenden Technologien bzw. für eine Nachrüstung vorhandener Fahrzeuge. Je nach Technologie können weitere fahrzeugbezogene Kosten relevant sein, vor allem geänderte Kosten für Wartung und Reparaturen sowie für Betriebsmittel (z. B. AdBlue), aber auch ggf. notwendige Ersatzinvestitionen zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. Batterietausch) und Änderungen des Wiederverkaufswerts eines Fahrzeugs. Die nachfolgende Analyse der Zusatzkosten für die Fahrzeugsbetreiber konzentriert sich vor allem auf zusätzliche Anschaffungskosten beim Fahrzeugkauf. Ergänzend wurden technologiespezifische Änderungen ausgewählter Betriebs- und Wartungskosten sowie spätere Ersatzinvestitionen abgeschätzt, soweit dies als relevanter Kostenfaktor eingestuft wurde. Mögliche Abweichungen des Wiederverkaufswerts eines Fahrzeugs durch kraftstoffsparende Technologien gegenüber einem vergleichbaren Referenzfahrzeug konnten im Projekt nicht ermittelt werden²⁹.

Den zusätzlichen Fahrzeugkosten für den Einsatz energiesparender Technologien steht eine Reduktion der Kraftstoffkosten in der Fahrzeugnutzung gegenüber. Damit der Einsatz einer energiesparenden Technologie insgesamt zur Verringerung der Fahrzeugkosten führt und sich somit für den Fahrzeugsbetreiber lohnt, müssen die Einsparungen an Kraftstoffkosten die zusätzlichen technologiespezifischen Kosten überwiegen. Die Kraftstoffkosteneinsparungen sind abhängig von den technologiespezifischen Verbrauchsminderungen; sie steigen mit zunehmenden Fahrzeugfahrleistungen sowie bei hohen Kraftstoffpreisen. Damit hängt es auch erheblich vom gewählten Vergleichszeitraum ab, ob für den Einsatz einer Technologie insgesamt eine Reduktion der Fahrzeugkosten ermittelt wird. Von Fahrzeugsbetreibern wird häufig eine Amortisation zusätzlicher Technologien nach maximal drei Jahren angestrebt. Viele Technologien führen allerdings erst nach längeren Zeiträumen zu einer Kostensenkung. In den Analysen in diesem Kapitel wird die Kosteneffizienz der Technologien für den Fahrzeugsbetreiber mittels Gegenüberstellung der Kraftstoffkosteneinsparungen mit den zusätzlichen Fahrzeugkosten daher für verschiedene Zeiträume beurteilt. Alle Kostenangaben in dieser Studie erfolgen als Nettowerte ohne Mehrwertsteuer.

²⁸ Weitere Hemmnisse für den Einsatz kraftstoffsparender Technologien werden in Kapitel 3.2 untersucht.

²⁹ Insbesondere im Fernverkehr eingesetzte Fahrzeuge werden häufig bereits nach wenigen Jahren vom Erstbesitzer weiterverkauft. Wenn die kraftstoffsparenden Technologien zu einem höheren Wiederverkaufswert führen, müsste diese Differenz prinzipiell von den zusätzlichen Anschaffungskosten für das Neufahrzeug abgezogen werden. Allerdings ist eine Erhöhung des Wiederverkaufswerts nicht durchgängig anzunehmen (insbesondere bei alternativen Antrieben infolge der erhöhten Anforderungen z. B. an qualifizierte Werkstätten sowie Versorgungsinfrastruktur). In den Berechnungen wurden daher keine technologiespezifischen Änderungen des Wiederverkaufswerts berücksichtigt.

2.5.1 Zusätzliche Anschaffungskosten für energiesparende Technologien

Ziel der Kostenanalyse war die Abschätzung von heute erforderlichen zusätzlichen Investitionen (Anschaffungskosten) für einen Fahrzeugkäufer bei Entscheidung für die im Projekt untersuchten kraftstoffsparenden Technologien. Als zusätzliche Anschaffungskosten wurden dabei allein die technologiespezifischen Aufpreise beim Kauf eines Neufahrzeugs definiert. Anderweitige Zusatzkosten (Händlerprovisionen, Abgaben u.ä.) wurden nicht angenommen. Die Erhöhung der Anschaffungskosten eines Fahrzeugs für bereits jetzt am Markt erhältliche Technologien wurde anhand von aktuellen frei verfügbaren Preisinformationen, z. B. aus Preislisten und Fachzeitschriften, ermittelt. Für noch nicht verfügbare Technologien wurden Markteinführungspreise abgeschätzt, vorwiegend auf Basis von wissenschaftlichen Studien.

Für Technologien ohne verfügbare bzw. mit inkonsistenten Preisangaben wurden ergänzend ausgewählte Zulieferfirmen kontaktiert. Manche Technologien sind bisher nur für wenige Fahrzeugklassen verfügbar (z. B. elektrischer Hybrid). In diesen Fällen wurden fehlende Angaben teilweise über näherungsweise Umrechnung der Anschaffungskosten aus Fahrzeugklassen mit verfügbarer Technologie auf die anderen Fahrzeugklassen anhand von Unterschieden der Fahrzeugkonfiguration (z. B. Fahrzeuggröße, Batterie) abgeschätzt. Die für heutige Rahmenbedingungen abgeschätzten Zusatzkosten wurden für alle betrachteten Technologien auch im Rahmen von Expertengesprächen bei den Nutzfahrzeugherrsteller Daimler und MAN sowie eines Workshops beim Umweltbundesamt mit Vertretern von Nutzfahrzeug- und Aufliegerindustrie diskutiert und entsprechend der Experten-Rückmeldungen angepasst.

Die Datengrundlagen zur Ableitung der zusätzlichen Anschaffungskosten für alle untersuchten Einzeltechnologien sind im Anhang in Kap. 5.3 dargestellt. Soweit die in der Recherche ermittelten Kosten nicht direkt vergleichbar waren (unterschiedliche Währungen und Bezugsjahre, Produktionskosten statt Preise), wurden die Kostenangaben zunächst entsprechend der Erläuterungen im Anhang vereinheitlicht. Die Rückmeldungen der Industrie zu den Zwischenergebnissen sind in Kap. 5.11.3 dokumentiert.

Teilweise weisen die ermittelten Anschaffungskosten für einzelne Technologien eine erhebliche Bandbreite zwischen verschiedenen Datenquellen auf. Dafür sind vielfältige Gründe möglich, u. a.

- ▶ Bandbreite von Marktpreisen zwischen verschiedenen Herstellern;
- ▶ Listenpreise vs. tatsächliche Anschaffungskosten: Beim Fahrzeugkauf sind häufig größere Rabatte gegenüber dem Listenpreis üblich. Auch der gleichzeitige Abschluss eines fahrzeugbezogenen Wartungsvertrags beim Fahrzeugkauf kann die Anschaffungskosten reduzieren – allerdings auch höhere laufende Folgekosten für die Fahrzeugwartung bedeuten. Die Anschaffungskosten bei Mitbestellung von Technologien beim Fahrzeugkauf können niedriger sein als die Preise im Zubehörmarkt (z. B. für Nachrüstung);
- ▶ unterschiedliche Fahrzeug- oder Komponentengröße (z. B. Batteriekapazität);
- ▶ Preisunterschiede zwischen Fahrzeugen mit bzw. ohne betreffende Technologie durch weitere Unterschiede bei den Fahrzeugeigenschaften mit begründet (z. B. Ausstattungsunterschiede zwischen Hybrid- und Dieselbussen).

Bei den betreffenden Technologien wurden für die weiteren Analysen mittlere Zusatzkosten für die Anschaffung abgeschätzt. In Fällen, wo die Bandbreite der verfügbaren Kostenangaben sehr groß ist und die Verwendung von niedrigen bzw. hohen Kosten innerhalb dieser Bandbreite Auswirkungen auf die grundsätzliche Interpretation der Ergebnisse hat, wird in den Auswertungen darauf ergänzend eingegangen.

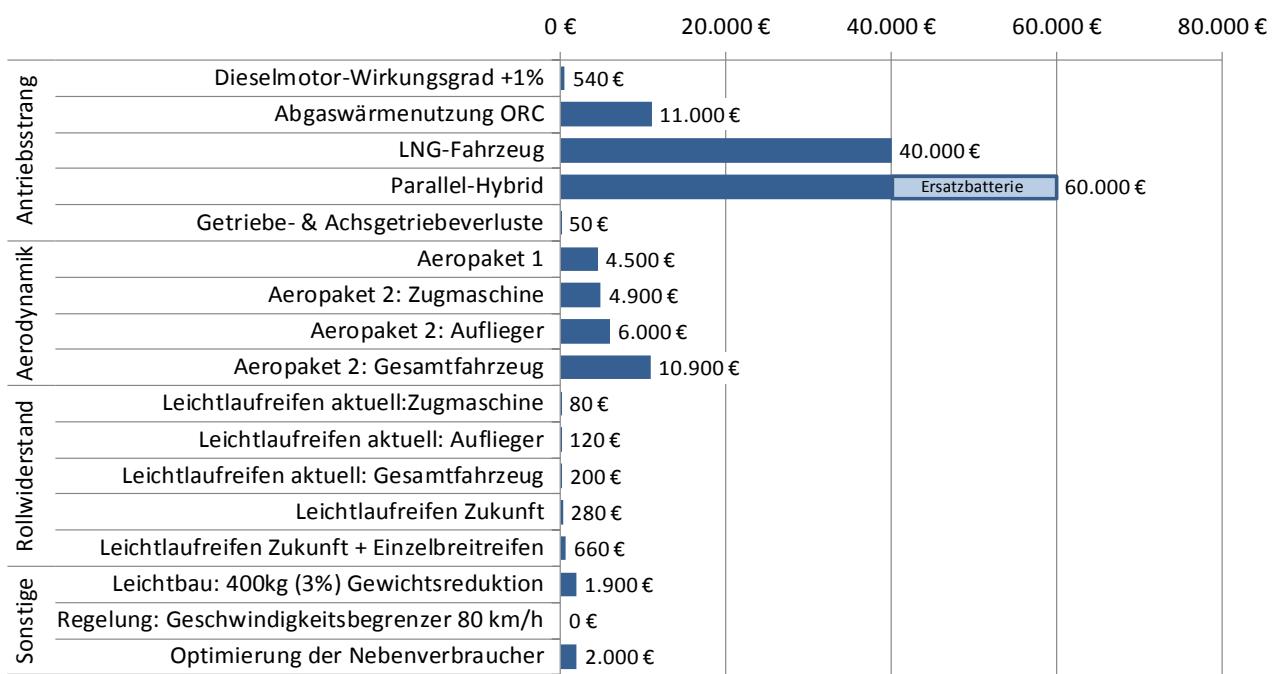
Aus den mittleren zusätzlichen Anschaffungskosten für die Einzeltechnologien wurden anschließend die heutigen Zusatzkosten für die in Kap. 2.3.2 definierten Maßnahmen (= Technologiebündel) ermittelt. Diese sind nachfolgend für die untersuchten Fahrzeugklassen in Abbildung 36 (Sattelzug 40 t), Abbildung 37 (Soli-Lkw 12 t) und Abbildung 38 (Stadtbus 18 t) dargestellt.

2.5.1.1 Sattelzug 40 t

Mittlere zusätzliche Anschaffungskosten für die ausgewählten Technologiebündel beim Sattelzug mit 40 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht bewegen sich aktuell zwischen 0 und ca. 40.000 bis 60.000 Euro und können damit die gesamten Anschaffungskosten für einen Sattelzug um bis zu 50 % erhöhen³⁰.

- ▶ Am kostengünstigsten ist eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h. Solche Geschwindigkeitsbegrenzer zählen bereits heute zur üblichen Fahrzeugausrüstung (mit anderen Maximalgeschwindigkeiten), daher sind mit der Maßnahme keine Zusatzkosten verbunden.
- ▶ Mit dem Einsatz von Leichtlaufreifen sowie den Maßnahmen zur Verbesserung des Motorwirkungsgrades und zur Verringerung von Achs- und Getriebeverlusten sind bei der Fahrzeugbeschaffung nur geringe Zusatzkosten von deutlich unter 1.000 Euro pro Fahrzeug erforderlich.
- ▶ Etwa 2.000 bis 11.000 Euro kosten die Maßnahmen zur Optimierung von Aerodynamik³¹ und Nebenverbrauchern. Auch für Leichtbau ergeben sich nur um knapp 2.000 Euro erhöhte Anschaffungskosten. Allerdings wird hier nur eine Leergewichtsreduktion um drei Prozent (400 kg) betrachtet. Weitere Gewichtsreduktionen würden zu überproportional höheren Zusatzkosten führen.
- ▶ Für eine Abgaswärmeverwendung mittels Organic Rankine Cycle (ORC) wurden zusätzliche Anschaffungskosten bei Markteinführung von durchschnittlich 11.000 Euro abgeschätzt.
- ▶ Am teuersten ist die Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativem Antriebskonzept. Während Sattelzüge mit Erdgasmotor und LNG-Tank bereits erhältlich sind, gibt es noch keine serienreifen Hybrid-Sattelzüge. Die angegebenen zusätzlichen Anschaffungskosten entsprechen daher einem angenommenen Preis bei Markteinführung, der sich bei zukünftig größeren Stückzahlen prinzipiell deutlich reduzieren kann. Ergänzend wurde für den Parallel-Hybrid entsprechend Einschätzungen in [TÜV Nord, 2012] ein einmaliger Batterietausch angenommen. Dafür wurden Kosten in Höhe von 20.000 Euro abgeschätzt, ausgehend von heutigen Kosten einer Hybridbatterie von ca. 30.000 Euro nach [TÜV Nord, 2012] sowie [TU Graz, 2013b] und einer Kostenabnahme in den nächsten fünf Jahren um jährlich ca. 10 % wie in [ebd.].

Abbildung 36 Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Sattelzug 40 t



Quellen: vgl. Kap. 5.3 im Anhang

³⁰ Anschaffungskosten für einen Sattelzug bestehend aus Sattelzugmaschine und Auflieger (Curtainsider) wurden anhand der Beispiele in den Kostenberechnungen in [LAO, 2014b] auf etwa 105.000 bis 150.000 Euro (Marktpreise ohne MWSt.) abgeschätzt.

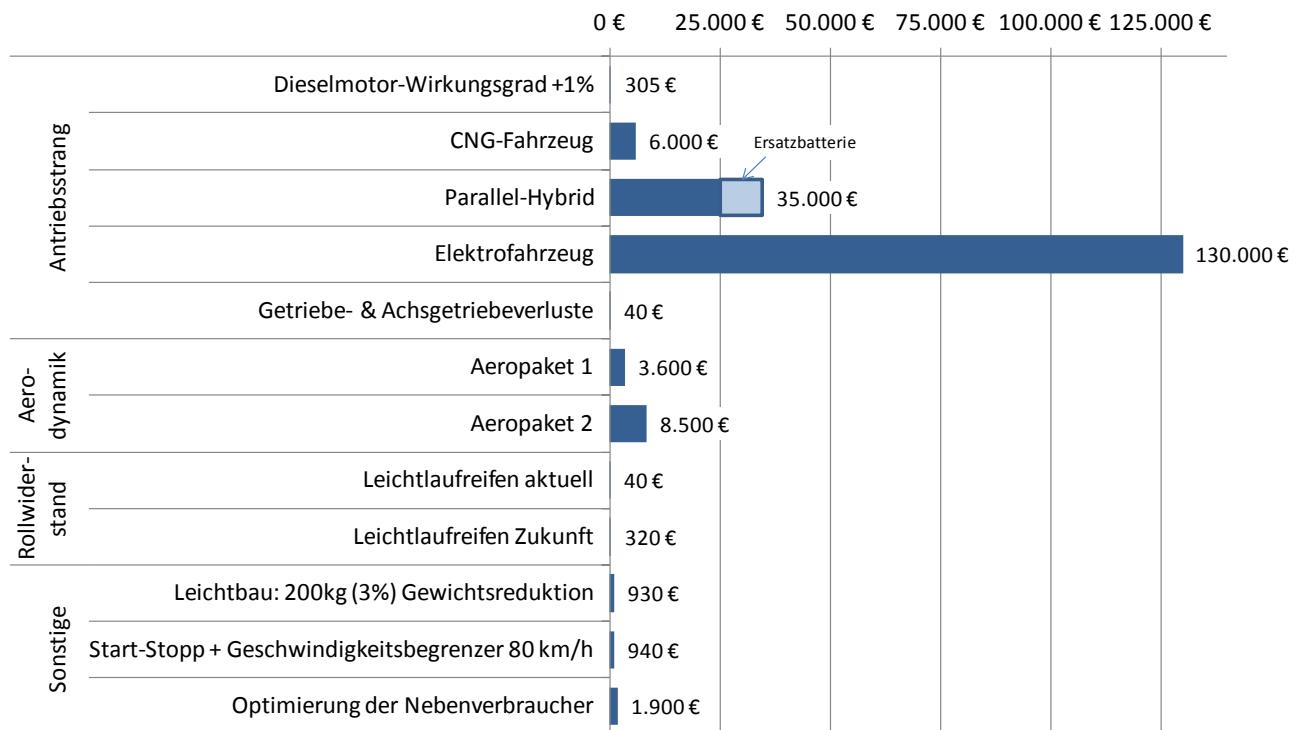
³¹ Für das „Aeropaket 3“ war keine Kostenabschätzung möglich, da für die darin enthaltene Frontverlängerung der Sattelzugmaschine um 0,5 m keine Technologiekosten ermittelt werden konnten.

2.5.1.2 Solo-Lkw 12 t

Zusätzliche Anschaffungskosten für die ausgewählten Technologiebündel beim Solo-Lkw mit zwölf Tonnen zulässigem Gesamtgewicht bewegen sich aktuell überwiegend zwischen 0 und ca. 25.000 Euro und können damit die gesamten Anschaffungskosten für einen Lkw um bis zu 50 % erhöhen. Eine Ausnahme ist der batterieelektrische Lkw, der mit einer Erhöhung der Anschaffungskosten um 130.000 Euro etwa das Dreifache eines dieselbetriebenen Solo-Lkws kostet³².

- ▶ Maßnahmen zur Optimierung des Dieselmotor-Wirkungsgrades sowie der Einsatz von Leichtlaufölen und Leichtlaufreifen erfordern bei heutigen Preisen eine Erhöhung der Anschaffungskosten pro Fahrzeug um weniger als 500 Euro.
- ▶ Für begrenzten Leichtbau (200 kg Leergewichtsreduktion), den Einsatz eines Start-Stopp-Systems, Optimierungen der Nebenverbraucher und aerodynamische Maßnahmen fallen zusätzliche Anschaffungskosten im Bereich 1.000 bis 3.600 Euro an. Nur das Aeropaket 2 kostet mit 8.500 Euro deutlich mehr, was an den angenommenen hohen Preisen für ein geeignetes Kamerasytem zum Ersatz der Außenspiegel liegt.
- ▶ Am höchsten sind die zusätzlichen Anschaffungskosten für den Kauf eines Fahrzeugs mit alternativer Antriebstechnik, dabei sind die Zusatzkosten für ein Erdgasfahrzeug allerdings mit 6.000 Euro deutlich niedriger als für einen Hybrid- oder batterieelektrischen Lkw mit 25.000 bzw. über 100.000 Euro Mehrkosten. Beim Parallel-Hybrid wurde wie für den Sattelzug ein einmaliger Batterietausch angenommen. Wegen der kleineren Batteriegröße wurden geringere Kosten in Höhe von 10.000 Euro angenommen. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist lt. Erfahrungen des Herstellers Smith Electric Vehicles meist kein Batterietausch erforderlich [FleetNews, 2010]. Andere Hersteller gehen derzeit für batterieelektrische Lkw noch von der Notwendigkeit eines Batterietauschs aus (vgl. Abschnitt 5.11.1).

Abbildung 37 Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Solo-Lkw 12 t



Quellen: vgl. Kap. 5.3 im Anhang

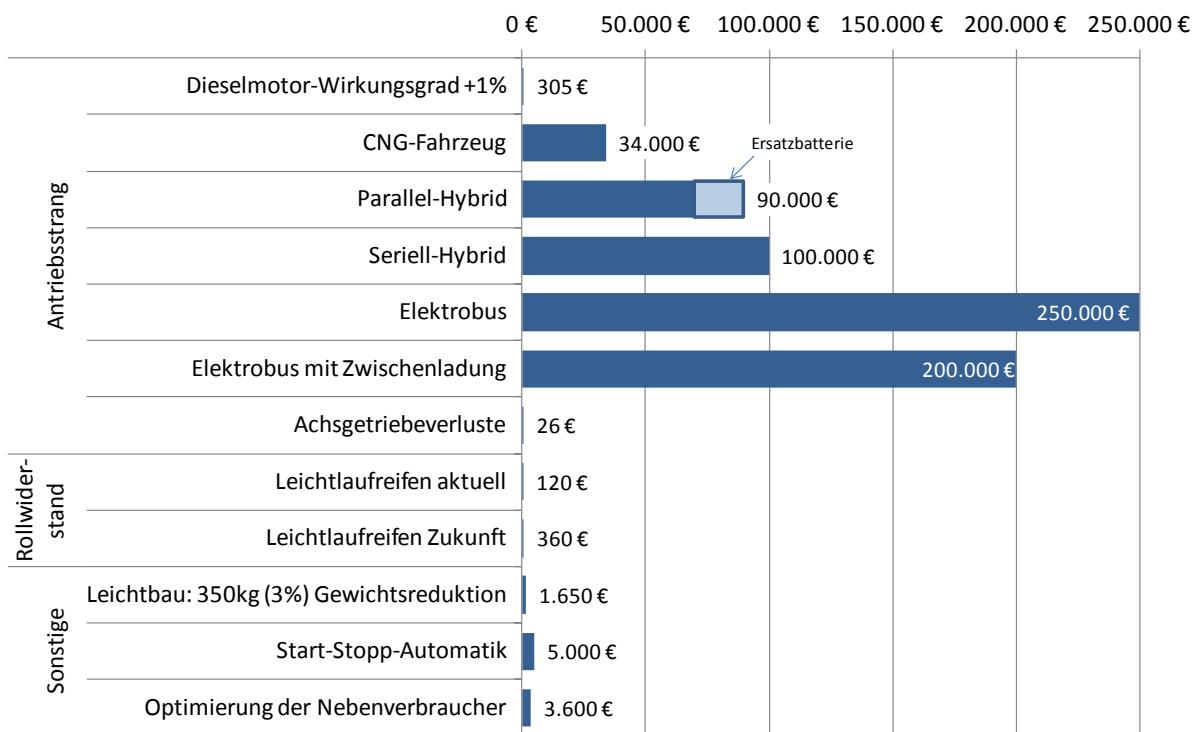
³² Anschaffungskosten für einen dieselbetriebenen Solo-Lkw wurden anhand der Beispiele in den Kostenberechnungen in [LAO, 2014b] auf etwa 53.000 bis 63.000 Euro (Marktpreise ohne MWSt.) abgeschätzt.

2.5.1.3 Stadtbus 18 t

Beim Stadtbus mit 18 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht und ca. 12 Meter Länge betragen die zusätzlichen Anschaffungskosten für die betrachteten Einzeloptimierungen aktuell im Mittel 300 bis 5.000 Euro. Deutlich teurer ist die Investition in Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnologie, was bis zu einer Verdopplung der Anschaffungskosten führen kann³³.

- ▶ Maßnahmen zur Optimierung des Dieselmotor-Wirkungsgrades sowie der Einsatz von Leichtlaufölen und Leichtlaufreifen erfordern bei heutigen Preisen eine Erhöhung der Anschaffungskosten pro Fahrzeug um weniger als 500 Euro.
- ▶ Auch für den Einsatz eines Start-Stopp-Systems, begrenzten Leichtbau (350 kg Leergewichtsreduktion) und Optimierungen der Nebenverbräuche (v. a. Wärmeisolierung des Fahrgasträums) fallen relativ geringe zusätzliche Anschaffungskosten zwischen 1.000 und 5.000 Euro an.
- ▶ Von den alternativen Antriebstechnologien ist der Erdgasbus mit CNG mit 34.000 Euro Zusatzkosten am günstigsten in der Anschaffung. Demgegenüber bedeuten Hybridbusse etwa doppelt bis dreimal so hohe Zusatzkosten in der Anschaffung. Beim Parallel-Hybrid fällt zudem nach einigen Jahren noch ein Batterietausch mit zusätzlichen Kosten in Höhe von 20.000 Euro an (vgl. Erläuterungen beim Sattelzug).
- ▶ Am teuersten ist ein batterieelektrischer Bus. Aus den verfügbaren Preisinformationen für in Deutschland verkaufte Elektrobusse wurden aktuelle Aufpreise gegenüber einem Dieselbus in einer Bandbreite von etwa 100.000 Euro bis über 400.000 Euro ermittelt. Davon ausgehend wurden für rein batterieelektrische Busse für die heutige Situation mittlere zusätzliche Anschaffungskosten von 250.000 Euro angenommen. Für Elektrobusse mit Zwischenladung wurden ausgehend von aktuellen Einschätzungen des VDA im Rahmen des Projekts Zusatzkosten in Höhe von 200.000 angenommen, worin auch anteilige Infrastrukturaufwendungen enthalten sind (vgl. Kap. 5.11.3).

Abbildung 38 Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Stadtbus 18 t



Quellen: vgl. Kap. 5.3 im Anhang

³³ Anschaffungskosten für einen 12-m-Standard-Dieselbus EURO VI wurden anhand der Beispiele in [Bus-Fahrt, 2014] auf etwa 215.000 bis 285.000 Euro (Marktpreise ohne MWSt.) abgeschätzt.

2.5.2 Änderung variabler Fahrzeugkosten durch die ausgewählten Technologien

Der Einsatz zusätzlicher energiesparender Technologien kann neben der angestrebten Verringerung der Kraftstoffkosten auch weitere variable Fahrzeugkosten betreffen, die dementsprechend zur Beurteilung der Kosteneffizienz der Technologien für die Fahrzeugbetreiber nach Möglichkeit einbezogen werden sollten. In den Kostenanalysen wurden folgende Änderungen solcher variablen Fahrzeugkosten betrachtet³⁴:

- ▶ Änderungen des Harnstoffverbrauchs bei Fahrzeugen mit vom Referenzfahrzeug abweichender Abgasnachbehandlung (betrifft die Maßnahmen „Optimierung Dieselmotor-Wirkungsgrad“ mit reiner SCR statt SCR+AGR sowie „Erdgasfahrzeug“ ohne SCR);
- ▶ Änderung der Kosten für periodische Ölwechsel durch Einsatz von Leichtlaufölen im Motor („Optimierung Dieselmotor-Wirkungsgrad“) sowie in Getriebe und Achsgetriebe;
- ▶ Änderung der Kosten für periodische Reifenwechsel durch Einsatz von Leichtlaufreifen;
- ▶ erhöhte jährliche Wartungskosten bei Erdgasfahrzeugen ggü. Dieselfahrzeugen.

Harnstoffverbrauch: Ein Diesel-Lkw mit Abgasnachbehandlung durch SCR und Abgasrückführung (AGR) benötigt für die SCR-Anlage fahrleistungsabhängig Harnstoff in Höhe von ca. 3 % des Kraftstoffverbrauchs. Eine Umstellung auf reine SCR (ohne AGR) führt etwa zu einer Verdopplung des Harnstoffverbrauchs ([LAO, 2013b], [LAO, 2014a]). Umgekehrt fällt bei Erdgasfahrzeugen ohne SCR der Harnstoffeinsatz mit den damit verbundenen variablen Kosten komplett weg. Bei einem mittleren Preis für Harnstoff von ca. 0,45 Euro/Liter (nach [LAO, 2014a]) ändern sich damit die laufenden Kosten je nach Fahrzeuggröße um ca. 0,3 Euro-Cent/km.

Ölwechsel: In Motor und Getrieben eingesetzte Öle müssen in regelmäßigen Intervallen gewechselt werden. Dementsprechend fallen mit dem Einsatz von Leichtlaufölen anstelle herkömmlicher Öle auch bei jedem Ölwechsel zusätzliche Kosten an. Zur Berechnung der mit Ölwechseln verbundenen Zusatzkosten wurde für Motoröle nach [Texaco, 2014] ein jährlicher Ölwechsel angenommen. Für Getriebe und Achsgetriebe wurde bei Sattelzügen ein Ölwechsel alle drei Jahre, bei Solo-Lkw und Bussen alle zwei Jahre angenommen. Eine Änderung der Ölwechselintervalle durch Einsatz von Leichtlaufölen lässt sich anhand von [Texaco, 2014] nicht ableiten. Entsprechend den Zusatzkosten pro Ölwechsel (vgl. Kapitel 5.3 im Anhang) ergeben sich daraus ab dem ersten Ölwechsel zusätzliche variable Fahrzeugkosten in Höhe von 0,1-0,2 Euro-Cent/km.

Reifenwechsel: Auch die Fahrzeureifen müssen beim Nutzfahrzeug regelmäßig erneuert werden. Dementsprechend fallen die zusätzlichen Kosten für den Einsatz von Leichtlaufreifen bei jedem Reifenwechsel an. Mittlere Reifenlaufleistungen werden in [LAO, 2014b] für Sattelzüge im Bereich 147.000-173.000 km, Verteiler-Lkw 59.000-69.000 und für Linienbusse mit 69.000 km angegeben. Diese mittleren Laufleistungen wurden für die Berechnung variabler, kilometerabhängiger Zusatzkosten für eine Beibehaltung von Leichtlaufreifen über die gesamte Fahrzeugnutzung mit den im vorigen Abschnitt abgeschätzten zusätzlichen Anschaffungskosten pro Fahrzeug und Reifenwechsel verwendet. Eine Verkürzung der Laufleistung gegenüber bisherigen Standardreifen wurde für aktuelle und zukünftige Leichtlaufreifen nicht angenommen.

Erhöhte Unterhaltskosten für Erdgasfahrzeuge: Nutzfahrzeuge mit Erdgasmotor haben gegenüber Dieselfahrzeugen abweichende jährliche Unterhaltskosten, was aus den unterschiedlichen Antriebssystemen und damit verbundenen Anforderungen (z. B. Zündanlage, Abgasnachbehandlung) resultiert. In den Berechnungen wurden für Erdgas-Sattelzüge zusätzliche jährliche Unterhaltskosten nach [KFZ-Anzeiger, 2012a] in Höhe von 2.200 Euro angesetzt, für Solo-Lkw halb so hohe Zusatzkosten. Für Erdgasbusse wurden zusätzliche jährliche Unterhaltskosten in Höhe von ca. 1.500 Euro aus [Novatlantis, 2010] übernommen.

Prinzipiell können weitere Kostenänderungen auch bei anderen Technologien entstehen, z. B. durch Beschädigungen bei Aerodynamik-Anbauten oder erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeiten bei neuen, wenig erprobten Technologien. Entsprechende Abschätzungen waren im vorliegenden Projekt aber nicht möglich.

³⁴ Die Änderung der Kraftstoffkosten durch zusätzliche energiesparende Technologien wird erst im folgenden Kapitel behandelt.

2.5.3 Änderung der gesamten Fahrzeugkosten durch die ausgewählten Maßnahmen

Die untersuchten technologischen Maßnahmen rechnen sich erst dann betriebswirtschaftlich für die Fahrzeugbetreiber, wenn die mit den Technologien erreichten Einsparungen von Kraftstoffkosten insgesamt höher sind als die zusätzlich anfallenden Kosten bei der Fahrzeugbeschaffung (Kap0) sowie Änderungen sonstiger variabler Fahrzeugkosten (Kap. 2.5.2). Daher wurden auf Basis der in Kap. 2.4.4 ermittelten Energieeinsparpotenziale die damit erreichbaren Kraftstoffkosteneinsparungen abgeschätzt und anschließend mit den technologiespezifischen Zusatzkosten verglichen.

Insbesondere im Fernverkehr wird seitens der Fahrzeugbetreiber eine Amortisation zusätzlicher Fahrzeugtechnologien nach maximal drei Jahren angestrebt, teilweise können die Amortisationserwartungen auch deutlich kürzer sein (vgl. Kap. 5.11.1). Daher erfolgte auch der Vergleich von Kraftstoffkosteneinsparungen und Zusatzkosten zunächst für einen Dreijahreszeitraum. In anderen Bereichen (z.B. Stadtverteiler, ÖPNV) sind je nach Fahrzeugbetreiber auch längerfristige Amortisationserwartungen möglich. In einem zweiten Schritt wurde daher unter umgekehrter Fragestellung abgeschätzt, nach wie vielen Jahren sich die untersuchten Maßnahmen bei heutigen Zusatzkosten und gleichbleibender Kraftstoffpreise amortisieren würden.

Für die Berechnung der jährlichen Einsparungen an Kraftstoffkosten wurden Annahmen zu mittleren Jahresfahrleistungen³⁵ und Fahrzeuglebensdauer für Sattelzüge und Solo-Lkw aus [CE Delft, 2012a] übernommen, für Stadtbusse entsprechend VDA-Einschätzungen (vgl. Tabelle 10). Weiterhin wurden aktuelle Preise für Dieselkraftstoff, Erdgas und Strom in Deutschland ermittelt (Tabelle 11). Die gewählten Rahmenbedingungen Jahresfahrleistungen und Kraftstoffpreisen können sich relevant auf die Einschätzungen zur Betriebswirtschaftlichkeit auswirken. Im Falle höherer Jahresfahrleistungen bei einem Fahrzeugbetreiber sowie bei höheren Kraftstoffpreisen (bzw. Preisdifferenzen zwischen alternativen Energieträgern) als in den Analysen dieser Studie zugrunde gelegt, rechnen sich kraftstoffsparende Technologien schneller betriebswirtschaftlich. Umgekehrt erhöht sich die Amortisationsdauer bei geringeren Jahresfahrleistungen bzw. Kraftstoffpreisen.

Tabelle 10 Mittlere Jahresfahrleistungen und Fahrzeuglebensdauer in den Fahrzeugklassen

	Sattelzug 40 t Fernverkehr	Sattelzug 40 t Regionalverkehr	Solo-Lkw 12 t Stadtverteiler	Stadtbus
Jahresfahrleistung	130.000 km	60.000 km	40.000 km	60.000 km
Fahrzeuglebensdauer	8 Jahre	12 Jahre	19 Jahre	12 Jahre

Quelle: [CE Delft, 2012a], Rückmeldung der Industrie (Kap. 5.11.1)

Tabelle 11 Mittlere Preise für Kraftstoffe und Strom

	Diesel	Erdgas (H)	Strom
Kraftstoffpreis	1,20 Euro/Liter	0,93 Euro/kg	0,17 Euro/kWh
Quellen	Durchschnittspreise ohne Mehrwertsteuer nach [BMWi, 2014]	Mittlerer Strompreis (ohne Mehrwertsteuer) 2013 für Industriekunden in Deutschland mit 20-500 MWh Jahresverbrauch nach [Eurostat 2014]	

³⁵ Tendenziell haben neue Fahrzeuge in den ersten Jahren höhere Jahresfahrleistungen, die mit zunehmendem Fahrzeualter abnehmen. Geeignete Basisdaten zur Berücksichtigung dieser Altersabhängigkeit lagen jedoch nicht vor. Durch Verwendung der mittleren Jahresfahrleistungen werden daher die Kraftstoffeinsparungen und entsprechenden Kosteneinsparungen für die ersten Betriebsjahre tendenziell unterschätzt.

Änderung der Fahrzeugkosten und Amortisationszeiten beim Sattelzug 40 t

Sattelzüge mit 40 t zulässigem Gesamtgewicht fahren zu einem großen Teil im mehrtägigen Fernverkehr, vielfach sind Fahrzeuge dieser Größenklasse aber auch oder sogar überwiegend im regionalen Verteilerverkehr aktiv (vgl. [AEA, 2011]). Daher wurden die Änderungen der gesamten Fahrzeugkosten durch energie sparende und treibhausgasmindernde Technologien für Sattelzüge für zwei Einsatzzwecke „Fernverkehr“ (Abbildung 39) und „Regionalverkehr“ (Abbildung 40) untersucht.

Die Auswertung zeigt, dass viele Technologien bereits heute sowohl im Fern- als auch Regionalverkehr innerhalb von drei Jahren höhere Einsparungen an Kraftstoffkosten bringen können, als ihr Einsatz an zusätzlichen Anschaffungskosten und variablen Fahrzeugkosten für die Fahrzeugbetreiber verursacht. Dies gilt insbesondere für die besonders preisgünstigen Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbegrenzer, Einsatz von Leichtlaufreifen sowie von Leichtlaufölen in Getriebe und Achsen. Bei diesen Technologien stehen Zusatzkosten (Fahrzeugbeschaffung und variable Kosten) von wenigen hundert Euro Kraftstoffeinsparungen im Fernverkehr in Höhe von 2.000 bis über 9.000 Euro gegenüber. Im Regionalverkehr sind die Kosteneinsparungen niedriger als im Fernverkehr.

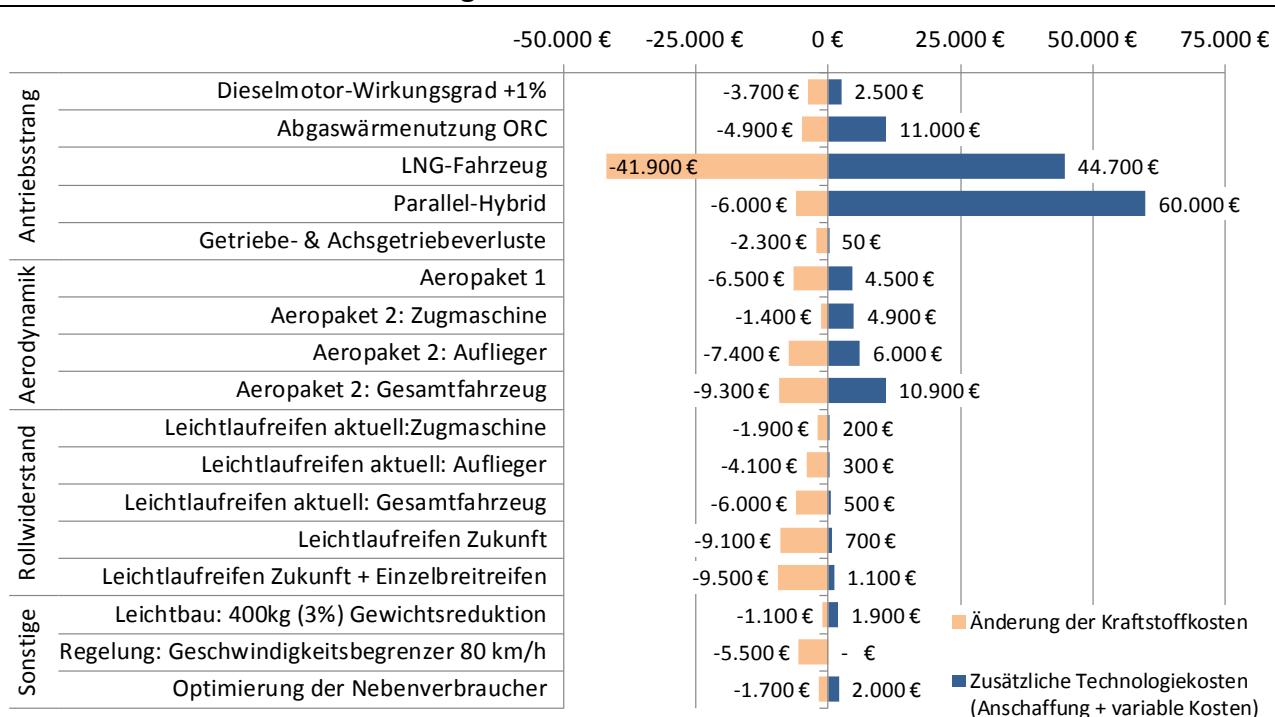
Auch die Aerodynamik-Maßnahmen am Auflieger bringen im Fernverkehr bereits in den ersten drei Jahren höhere Kraftstoffkosteneinsparungen, als sie bei der Fahrzeugbeschaffung zusätzlich kosten, im Regionalverkehr allerdings nicht. Bei Kamerasystemen statt Außenspiegeln an der Zugmaschine führen die hohen zusätzlichen Anschaffungskosten nicht zu ausreichenden Kraftstoffeinsparungen zur schnellen Amortisation.

Dagegen kosten die untersuchten alternativen Antriebskonzepte (LNG, Parallelhybrid), Abgaswärmennutzung mit ORC sowie Leichtbau und die betrachteten Nebenverbraucher-Optimierungen mehr, als innerhalb von drei Jahren an Kraftstoffkosten eingespart wird. Wie aus Tabelle 12 hervorgeht, beträgt die Amortisationszeit für diese Technologien im Fernverkehr knapp über drei Jahre (LNG-Fahrzeug, Nebenverbraucher-Optimierung) bis hin zu 30 Jahren beim Parallelhybrid³⁶ - und liegt damit in letzterem Fall weit außerhalb der üblichen Lebensdauer eines Sattelzugs.

Die Amortisationsdauer der Technologien ist im Regionalverkehr generell etwa zwei- bis dreimal so hoch wie im Fernverkehr (vgl. Tabelle 12). Eine Ausnahme ist der Parallelhybrid. Im Regionalverkehr hat der Hybridantrieb ein Minderungspotenzial von etwas über sieben Prozent und damit deutlich mehr als im Fernverkehr mit knapp vier Prozent. Die Amortisationszeit ist daher trotz der geringeren Jahresfahrleistungen im Regionalverkehr etwas niedriger als im Fernverkehr – mit 27 Jahren aber immer noch am höchsten für alle untersuchten Technologien und außerhalb der üblichen Lebensdauer eines Sattelzugs.

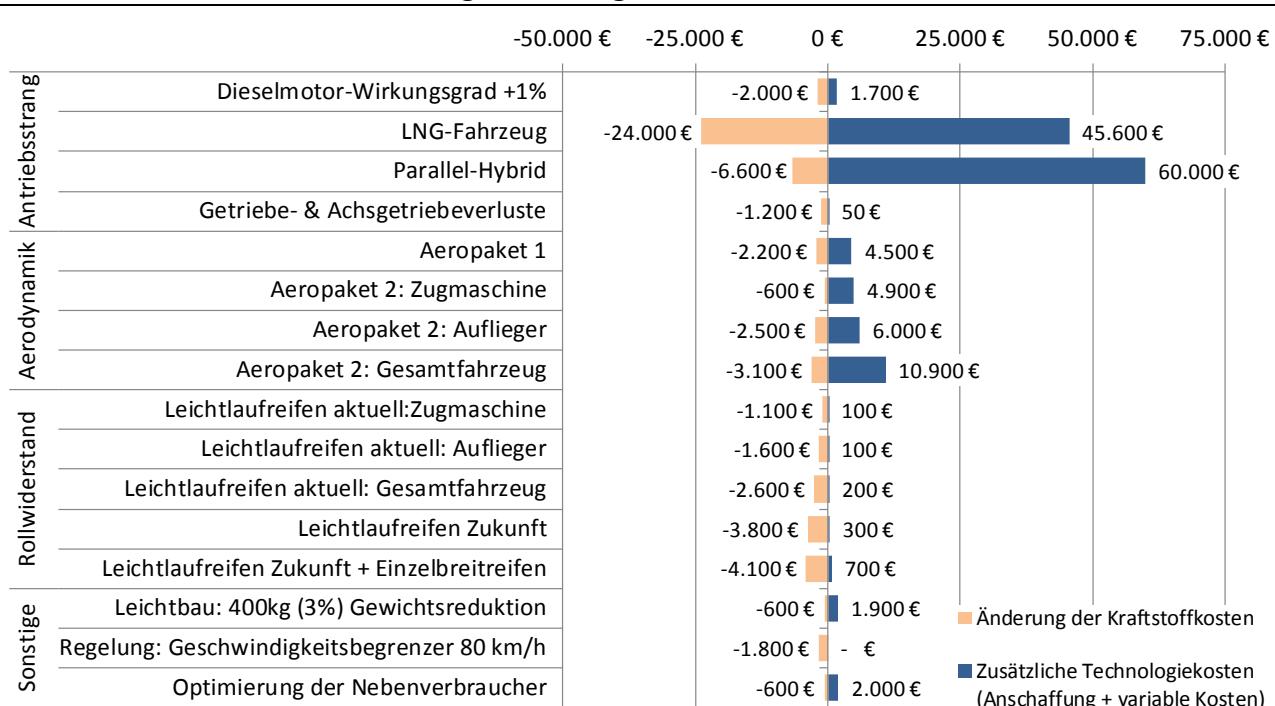
³⁶ Dabei sind auch die Kosten eines zusätzlichen Batterietauschs mit eingerechnet, die beispielsweise bereits ab Fahrzeugkauf über zusätzliche Service-Verträge mit laufenden Raten mitfinanziert sein können, oder aber bei Nichtberücksichtigung eine relevante Verringerung des Fahrezugrestwerts zur Folge haben können.

Abbildung 39 Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr



Angaben auf 100 Euro gerundet

Abbildung 40 Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Sattelzug 40 t im Regionalverkehr



Angaben auf 100 Euro gerundet.

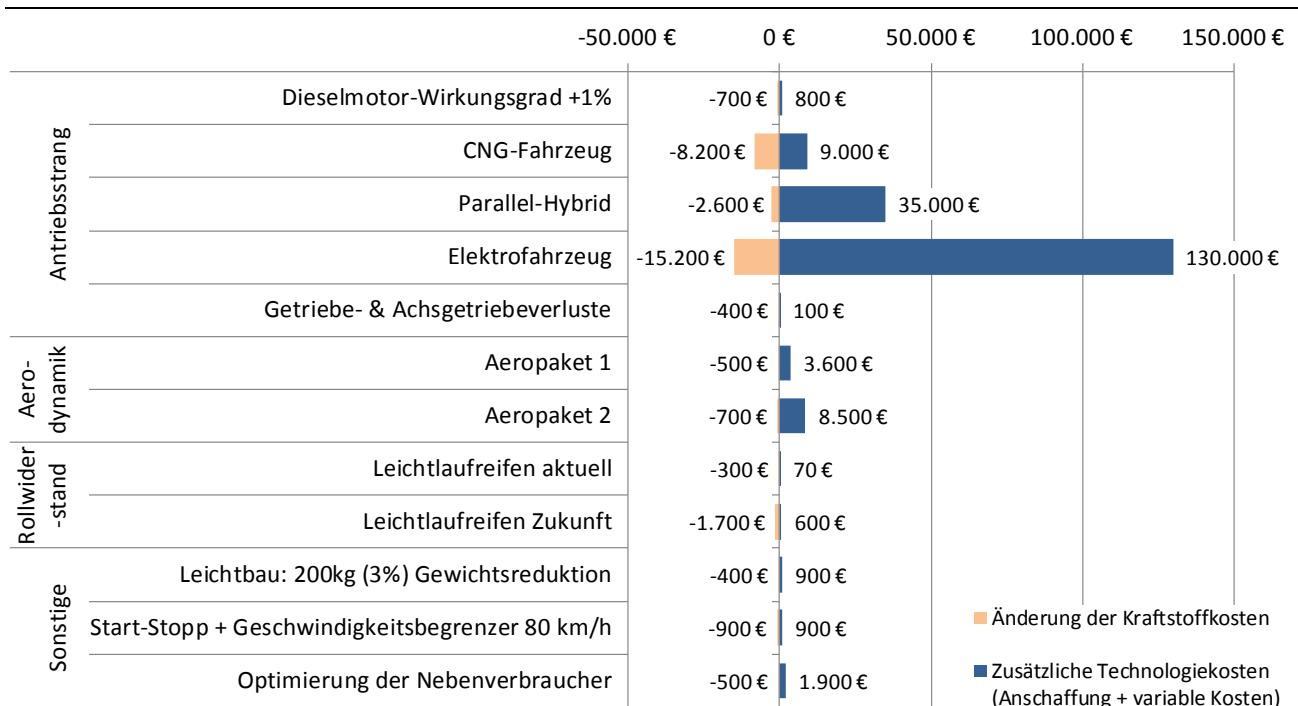
Unterschiede der fahrzeugspezifischen Zusatzkosten einiger Technologien im Regionalverkehr gegenüber dem Fernverkehr sind auf die unterschiedlichen Jahresfahrleistungen und entsprechende Unterschiede der variablen, fahrleistungsabhängigen Kostenänderungen (vgl. voriges Kapitel) zurückzuführen.

Änderung der Fahrzeugkosten und Amortisationszeiten beim Solo-Lkw 12 t

Beim Solo-Lkw mit 12 t zulässigem Gesamtgewicht im städtischen Lieferverkehr (Abbildung 41) sind die Potenziale zur Kraftstoffkosteneinsparung deutlich niedriger als beim Sattelzug. Die Mehrzahl der untersuchten Maßnahmen bringt innerhalb von drei Jahren Kosteneinsparungen von weniger als 1.000 Euro. Lediglich durch alternative Antriebe (CNG, Parallelhybrid, Batterieelektrisches Fahrzeug) und durch Ausstattung des gesamten Fahrzeugs mit Leichtlaufreifen der Effizienzklasse A können höhere Einsparungen erzielt werden. Am größten ist die Einsparung an Kraftstoffkosten bei einem Elektrofahrzeug mit ca. 15.000 Euro in drei Jahren. Gleichzeitig sind bei den alternativen Antrieben allerdings auch die Zusatzkosten durch den Technologieeinsatz deutlich höher.

Von den ausgewählten Maßnahmen beim Solo-Lkw amortisieren sich lediglich der Einsatz von Leichtlaufölen zur Reduktion von Getriebe- und Achsgetriebeverlusten sowie von Leichtlaufreifen bereits innerhalb des ersten Jahres (vgl. Tabelle 12). Optimierungen am Dieselmotor, an der Fahrzeugregelung (Start-Stopp-System + Geschwindigkeitsbegrenzer) und der Kauf eines CNG-Lkw (statt Diesel) amortisieren sich nach etwa drei bis vier Jahren³⁷. Alle übrigen Maßnahmen (alternative Antriebe, Aerodynamik, Leichtbau, Nebenverbraucher) haben bei heutigen Kosten hohe Amortisationszeiträume von meist deutlich über zehn Jahren. Bei den untersuchten Aerodynamikmaßnahmen sowie beim Hybrid- und batterieelektrischen Lkw liegen die Amortisationszeiträume derzeit außerhalb der üblichen Fahrzeugelebensdauer.

Abbildung 41 Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferverkehr



Angaben auf 100 Euro gerundet

³⁷ Für einen CNG-Lkw gilt das Ergebnis unter der Rahmenbedingung der derzeitigen Energiesteuerermäßigung in Deutschland lt. Energiesteuergesetz (EnergieStG).

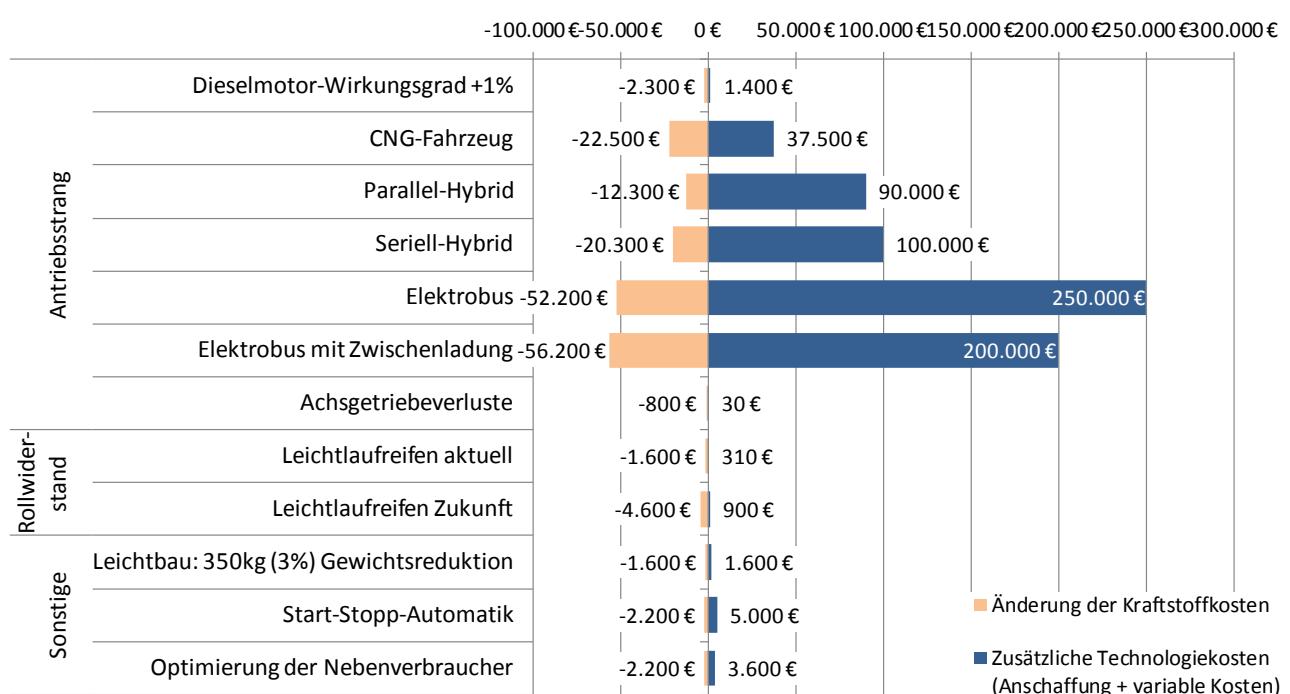
Änderungen der Fahrzeugkosten und Amortisationszeiten beim Stadtbus 18 t

Beim Stadtbus (Abbildung 42) betragen die potenziellen Kraftstoffkosteneinsparungen für die betrachteten Einzeltechnologien 800 bis max. 4.600 Euro innerhalb der ersten drei Jahre. Deutlich höher sind die Kraftstoffkosteneinsparungen für alternative Antriebskonzepte mit 12.000 (Parallelhybrid) bis hin zu über 56.000 Euro (Elektrobus mit Zwischenladung). Gleichzeitig sind aber auch die Zusatzkosten für Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten vielfach höher gegenüber den anderen betrachteten Optimierungsmaßnahmen.

Der Einsatz von Leichtlaufreifen sowie die Maßnahmen zur Optimierungen von Dieselmotorwirkungsgrad und Reduktion der Achsgetriebeverluste amortisieren sich bereits innerhalb des ersten Jahres. Beim Stadtbus kann auch Leichtbau eine kosteneffiziente Maßnahme zur Verbrauchsreduktion sein. Eine Reduktion des Leergewichts um drei Prozent rechnet sich nach ca. vier Jahren. Ebenso ist die Optimierung der Nebenverbraucher (v.a. Wärmeisolierung zur Verringerung des Klimatisierungsbedarfs) in weniger als sechs Jahren kostendeckend. Ein Start/Stopp-System rechnet sich nach nach ca. sieben Jahren

Bei den alternativen Antriebstechnologien rechnet sich die Umstellung auf Erdgasfahrzeuge innerhalb von reichlich fünf Jahren. Das gilt allerdings nur unter der Annahme, dass keine zusätzlichen Aufwendungen zur Bereitstellung der Versorgungsinfrastruktur (CNG-Tankstelle) erforderlich sind und die derzeitige Begünstigung bei der Energiesteuer erhalten bleibt. Hybridbusse und batterieelektrische Busse verursachen unter heutigen Bedingungen noch höhere Zusatzkosten bei ihrer Anschaffung als sie über die Fahrzeuglebensdauer an Kraftstoffkosten einsparen können, die berechneten Amortisationszeiträume sind allerdings geringer als bei Lkw. Bei Elektrobussen mit Zwischenladung erscheint mit nach Einschätzungen von Fahrzeugherstellern (vgl. Kap. 2.5.1.3) zugrunde gelegten zusätzlichen Anschaffungskosten eine Amortisation bereits innerhalb der Fahrzeuglebensdauer möglich.

Abbildung 42 Änderung der Fahrzeugkosten pro Fahrzeug im Zeitraum von drei Jahren bei einem Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus



Angaben auf 100 Euro gerundet

Tabelle 12 Mittlere Amortisationszeiten der Einzelmaßnahmen in den Fahrzeugklassen

		Mittlere Amortisationszeiten in Jahren			
		Sattelzug 40 t Fernverkehr	Sattelzug 40 t Regionalverkehr	Solo-Lkw 12 t Stadtverteiler	Stadtbus
Antriebsstrang	Dieselmotor-Wirkungsgrad +1 %	0,9	2,0	3,5	0,7
	Abgaswärmevernützung	6,8	-	-	-
	Erdgasfahrzeug (LNG, CNG)	3,2	6,5	3,4	5,3
	Parallelhybrid	30,0	27,2	40,2	22
	Seriellhybrid	-	-	-	14,8
	Elektrofahrzeug	-	-	25,7	14,4
	Elektrofahrzeug mit Zwischenladung	-	-	-	10,7
Aerodynamik	Getriebe- & Achsgetriebeverluste	0,1	0,1	0,4	0,1
	Aeropaket 1	2,1	6,2	19,7	-
	Aeropaket 2: Zugmaschine	10,7	25,6	-	-
	Aeropaket 2: Auflieger	2,4	7,3	-	-
Rollwiderstand	Aeropaket 2: Gesamtfahrzeug	3,5	10,7	35,3	-
	Leichtlaufreifen aktuell: Zugmaschine	0,1	0,2	-	-
	Leichtlaufreifen aktuell: Auflieger	0,1	0,2	-	-
	Leichtlaufreifen aktuell: Gesamtfahrzeug	0,1	0,3	0,7	0,3
	Leichtlaufreifen Zukunft	0,1	0,2	0,8	0,3
Sonstige	Leichtlaufreifen Zukunft + Einzelbreitreifen	0,2	0,5	-	-
	Leichtbau: 3 % Gewichtsreduktion	5,2	9,8	7,9	3,1
	Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h	0,0	0,0	-	-
	Start-Stopp-System + Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h	-	-	3,1	6,7
Optimierung der Nebenverbraucher		3,5	10,4	11,8	4,9
Farblegende zur Amortisationszeit		≤3 Jahre	>3-6 Jahre	>6 Jahre, aber innerhalb Lebensdauer	länger als Fahrzeuglebensdauer

2.5.4 Bedeutung zukünftiger Kostenentwicklungen für die Wirtschaftlichkeit von Hybrid- und Elektrofahrzeugen

Wie im Vorkapitel ermittelt, können mehrere Maßnahmen unter aktuellen Rahmenbedingungen die hohen zusätzlichen Anschaffungskosten auch über die komplette Fahrzeugglebensdauer nicht durch eingesparte Kraftstoffkosten ausgleichen. Das betrifft vor allem die alternativen Antriebe Hybrid- und Elektrofahrzeug, von denen bisher nur kleine Stückzahlen verkauft worden sind.

Bei zukünftig steigenden Produktionsmengen sind allerdings durch Lerneffekte deutliche Verringerungen der Herstellungskosten und dementsprechend auch sinkende Anschaffungskosten zu erwarten. Gleichzeitig gehen viele aktuelle Szenarien davon aus, dass die Kraftstoffpreise zukünftig auch inflationsbereinigt ansteigen werden (z. B. Verkehrsprognose 2030 der Bundesregierung in [BMVI, 2014]). Damit wären zukünftig bei gleicher Kraftstoffeinsparung höhere Kraftstoff-Kosteneinsparungen möglich als bisher. Sowohl sinkende Herstellungskosten als auch steigende Kraftstoffpreise können demnach zu einer deutlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Hybrid- und Elektrofahrzeugen beitragen. Technologien, deren Einsatz unter heutigen Rahmenbedingungen noch nicht wirtschaftlich ist, könnten damit zukünftig zu kosteneffizienten Optionen für die Energieverbrauchs- und Treibhausgasreduktion von schweren Nutzfahrzeugen werden.

Zur Beurteilung, wie sich zukünftige Lerneffekte und steigende Kraftstoffpreise auf die Kosteneffizienz bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen auswirken, wurden in einer ergänzenden Analyse Änderungen der Amortisationszeiten für Hybrid- und Elektrofahrzeuge für folgende zwei Szenarien abgeschätzt.

- ▶ **A:** Die Aufpreise der Technologie gegenüber dem Dieselfahrzeug sinken jährlich um durchschnittlich fünf Prozent gegenüber dem Vorjahr. Die zusätzlichen Anschaffungskosten betragen damit nach zehn Jahren noch 60 Prozent des heutigen Ausgangswerts.
- ▶ **B:** Die Technologieaufpreise sinken jährlich um durchschnittlich zehn Prozent gegenüber dem Vorjahr und betragen damit nach zehn Jahren noch 35 Prozent des heutigen Ausgangswerts³⁸.

Beim Parallel-Hybrid wurde zusätzlich auch die Variante untersucht, wenn zukünftige Batteriegenerationen eine erhöhte Haltbarkeit haben und somit wie bei batterieelektrischen Fahrzeugen kein Batterietausch mehr erforderlich wird. Tabelle 13 zeigt die getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Anschaffungskosten für die alternativen Antriebskonzepte in den verschiedenen Fahrzeugklassen in den Zukunftsszenarien.

Tabelle 13 Szenarioannahmen zur Entwicklung der zusätzlichen Anschaffungskosten für die Beschaffung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen

		Mittlere zusätzliche Anschaffungskosten (€ ₂₀₁₀)		
		in zehn Jahren		
		Aktuell	Szenario A	Szenario B
Sattelzug 40 t	Parallelhybrid - mit Batterietausch - ohne Batterietausch	40 000 € + 20 000 €	36 000 € 24 000 €	21 000 € 14 000 €
Solo-Lkw 12 t	Parallelhybrid - mit Batterietausch - ohne Batterietausch	25 000 € + 10 000 €	21 000 € 15 000 €	12 250 € 8 750 €
	Elektro-Lkw	130 000 €	78 000 €	45 500 €
Stadtbus 18 t	Parallelhybrid - mit Batterietausch - ohne Batterietausch	70 000 € + 20 000 €	54 000 € 42 000 €	31 500 € 24 500 €
	Seriellhybrid	100 000 €	60 000 €	35 000 €
	Elektrobus	250 000 €	150 000 €	87 500 €
	Elektrobus mit Zwischenladung	200 000 €	120 000 €	70 000 €

³⁸ Die Annahme einer 10-prozentigen Kostenreduktion pro Jahr erscheint relativ hoch. Allerdings sind in den vergangenen Jahren z.B. die Kosten bei Batterien jährlich um 10-14 % gesunken (vgl. z.B. "Electric Vehicle Battery Price Index" von Bloomberg in [TU Graz, 2013b] S. 54), so dass eine solche Preisentwicklung z. B. für Elektrofahrzeuge grundsätzlich möglich erscheint.

In beiden Szenarien wurde in Anlehnung an [BMVI, 2014] ein Anstieg der realen Kraftstoffpreise einschließlich Mineralölsteuer (ohne Mehrwertsteuer) um 2,0 Prozent pro Jahr angenommen. Für Strom wurde ein ähnlicher Preisanstieg wie für Diesel unterstellt. Alle übrigen Annahmen (Fahrzeuglebensdauer, mittlere Jahresfahrleistung) wurden wie in den vorhergehenden Analysen in Kap. 2.5.3 beibehalten.

Tabelle 14 zeigt die Veränderung der Amortisationszeiten in den Szenarien.

- ▶ Ein Parallelhybrid wird beim Sattelzug 40 t im Fernverkehr mit dem im Projekt ermittelten Einsparpotenzial (4 %) auch bei Verringerung der zusätzlichen Anschaffungskosten inkl. Batterietausch um über 60 Prozent nicht wirtschaftlich. Im Regionalverkehr kann ein Parallelhybrid durch das höhere Einsparpotenzial (7,5 %) in diesem Fall kostendeckend werden, bleibt aber mit einer Amortisationszeit von etwa acht Jahren für viele Fahrzeugbetreiber eher unattraktiv. Falls zukünftige Batterien mit längerer Haltbarkeit keinen Batterietausch mehr erfordern sollten, kann sich dagegen mit der angenommenen Reduktion der zusätzlichen Anschaffungskosten um über 60 Prozent die Amortisationsdauer im Fernverkehr auf etwa sechs Jahre, im Regionalverkehr auf fünf Jahre verkürzen.
- ▶ Beim Solo-Lkw können Parallelhybrid wie auch batterieelektrischer Lkw über die mittlere Fahrzeuglebensdauer kostendeckend werden. Allerdings bleibt bei beiden Antriebskonzepten die Amortisationsdauer auch im Falle der angenommenen starken Reduktion der zusätzlichen Investitionskosten um über 60 Prozent deutlich über den üblichen, wesentlich kurzfristigeren Amortisationszielen der Lkw-Betreiber.
- ▶ Anders ist die Situation bei Stadtbussen. Bereits bei Verringerung der notwendigen Zusatzinvestitionen um 40 % amortisieren sich sowohl die beiden Hybridvarianten als auch batterieelektrische Busse nach sieben bis elf Jahren, ein Elektrobus mit Zwischenladung in etwas über fünf Jahren. Bei stärkeren Kostensenkungen um über 60 Prozent gegenüber den für heute ermittelten Aufpreisen würde der Amortisationszeitraum auf vier bis sechs Jahre sinken, beim Elektrobus mit Zwischenladung sogar auf drei Jahre.

Damit lässt sich festhalten, dass ein Betrieb von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen anstelle eines reinen Dieselfahrzeugs zukünftig kostendeckend bzw. mit Kosteneinsparungen für die Fahrzeugbetreiber möglich werden kann. Voraussetzung dafür ist eine deutliche Abnahme der notwendigen zusätzlichen Anschaffungskosten für solche Fahrzeuge. Aktuell lohnt sich eine Anschaffung solcher Fahrzeuge für die Fahrzeugbetreiber nur bei entsprechender Förderung der hohen Zusatzinvestitionen, da die Fahrzeuge sich allein über die eingesparten Kraftstoffkosten bisher nicht rechnen.

Tabelle 14 Mittlere Amortisationszeiten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen in den Szenarien

		Mittlere Amortisationszeiten in Jahren in zehn Jahren		
		Aktuell	Szenario A	Szenario B
Sattelzug 40 t Fernverkehr	Parallelhybrid - mit Batterietausch	30,0	15,0	8,8
	- ohne Batterietausch		10,0	5,8
Sattelzug 40 t Regionalverkehr	Parallelhybrid - mit Batterietausch	27,2	13,6	7,9
	- ohne Batterietausch		9,1	5,3
Solo-Lkw 12 t	Parallelhybrid - mit Batterietausch	40,2	20,1	11,7
	- ohne Batterietausch		14,4	8,4
Stadtbus 18 t	Elektro-Lkw	25,7	12,8	7,5
	Parallelhybrid - mit Batterietausch	22,0	11,0	6,4
	- ohne Batterietausch		8,5	5,0
	Seriellhybrid	14,8	7,4	4,3
	Elektrobus	14,4	7,2	4,2
	Elektrobus mit Zwischenladung	10,7	5,3	3,1
Farblegende zur Amortisationszeit		≤3 Jahre	>3-6 Jahre	>6 Jahre, aber innerhalb Lebensdauer
				länger als Fahrzeuglebensdauer

2.6 Kosteneffizienz der untersuchten Technologien zur Minderung der Treibhausgasemissionen von schweren Nutzfahrzeugen

Eine zentrale Frage aus gesellschaftlicher Perspektive für den Einsatz zusätzlicher Fahrzeugtechnologien zur Energieeinsparung und Emissionsminderung ist, welche Minderungen an Treibhausgasen zu welchen Kosten möglich sind. Dazu wurden für die analysierten Technologien die Potenziale zur Treibhausgasminderung (Kap. 2.4.5) und die damit verbundenen Kostenänderungen (Kap. 2.5.3) verknüpft und Treibhausgasvermeidungskosten abgeleitet.

Im ersten Schritt erfolgte eine Bewertung der Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung für jede Einzelmaßnahme, damit wurde eine Rangfolge der Maßnahmen nach ihrer Kosteneffizienz erstellt. Im zweiten Schritt wurden Einzelmaßnahmen zu Maßnahmenpaketen kombiniert. Für jedes Maßnahmenpaket wurden durch schrittweise Hinzunahme der Einzelmaßnahmen entsprechend ihrer Kosteneffizienz (beginnend mit der kosteneffizientesten Maßnahme) Kostenkurven für die Grenzvermeidungskosten („MAC-Kurve“) zur Erreichung unterschiedlicher prozentualer Treibhausgasemissionsminderungen ermittelt. Zusätzlich wurden auch kumulierte Vermeidungskosten ermittelt, das heißt die Änderung der Gesamtkosten pro Fahrzeug mit zunehmender Treibhausgasminderung.

Damit sind zum einen Aussagen möglich, bis zu welchen prozentualen Treibhausgasminderungen gleichzeitig die Fahrzeugkosten weiter abnehmen, und welche darüber hinausgehenden Minderungen nur mit zusätzlichen Kosten erreichbar sind. Zum anderen kann beurteilt werden, in welchem Umfang Technologien mit negativen Vermeidungskosten andere Technologien mit positiven Kosten „subventionieren“ können – so dass mit dem zusätzlichen Einsatz kostensteigernder Technologien weitere Emissionsminderungen bei trotzdem insgesamt verringerten Gesamtkosten pro Fahrzeug erreicht werden.

2.6.1 Kosteneffizienz der Einzelmaßnahmen zur Treibhausgasminderung

Erster Schritt zur Bewertung der Kosteneffizienz der untersuchten Technologien und ihrer Kombination war die Bewertung der Kosteneffizienz für jede Einzelmaßnahme nach heutigen Kosten und die Erstellung einer Rangfolge der Maßnahmen nach ihrer Kosteneffizienz.

Zur Berechnung der spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten (Euro / Tonne CO₂e) wurden für jede Maßnahme zum einen die pro Fahrzeug erreichbaren Treibhausgasminderungen entsprechend der spezifischen Minderungspotenziale (Kap. 2.4.5) berechnet (CO₂-Äquivalente „well-to-wheel“ mit Faktoren gemäß DIN EN 16258). Zum anderen wurden die aus Zusatzkosten und Kraftstoffkosteneinsparungen insgesamt resultierenden Änderungen der Fahrzeugkosten (Kap. 2.5.3) ermittelt. Anschließend wurden die Differenzkosten durch die Treibhausgasminderungen dividiert.

$$\text{Treibhausgasvermeidungskosten} \left(\frac{\text{€}}{\text{Tonnen CO}_2\text{e}} \right) = \frac{[\text{Technologiezusatzkosten (€)}] - [\text{Kraftstoffkosteneinsparung (€)}]}{[\text{Treibhausgasminderung (Tonnen CO}_2\text{e)}]}$$

Die Höhe der absolut erreichbaren Treibhausgasminderungen pro Fahrzeug ebenso wie der einzusparenden Kraftstoffkosten gegenüber einem Fahrzeug ohne emissionsmindernde Technologien ist umso höher, je länger der Betrachtungszeitraum und damit die Fahrleistungen gewählt werden. Aus gesellschaftlicher Perspektive ist grundsätzlich die komplette Fahrzeugglebensdauer entscheidend. Dagegen beurteilen Fahrzeugbetreiber die Kosteneffizienz von Technologien nur für die Nutzungsdauer im eigenen Unternehmen und an den Fahrzeugkauf geknüpfte Amortisationserwartungen (vgl. Kap. 2.4.6). Aus diesem Grund erfolgte eine Berechnung und Gegenüberstellung der spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten für folgende Zeiträume:

- ▶ **3 Jahre** = kurzfristige Amortisationserwartungen durch die Fahrzeugbetreiber (vgl. Kap. 2.5.3).
- ▶ **6 Jahre** = Änderung der Bewertung zur Kosteneffizienz bei Bereitschaft der Fahrzeugbetreiber zu längeren Amortisationszeiträumen
- ▶ **Gesamte Fahrzeugglebensdauer** = gesellschaftliche Perspektive

Abbildung 43 Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

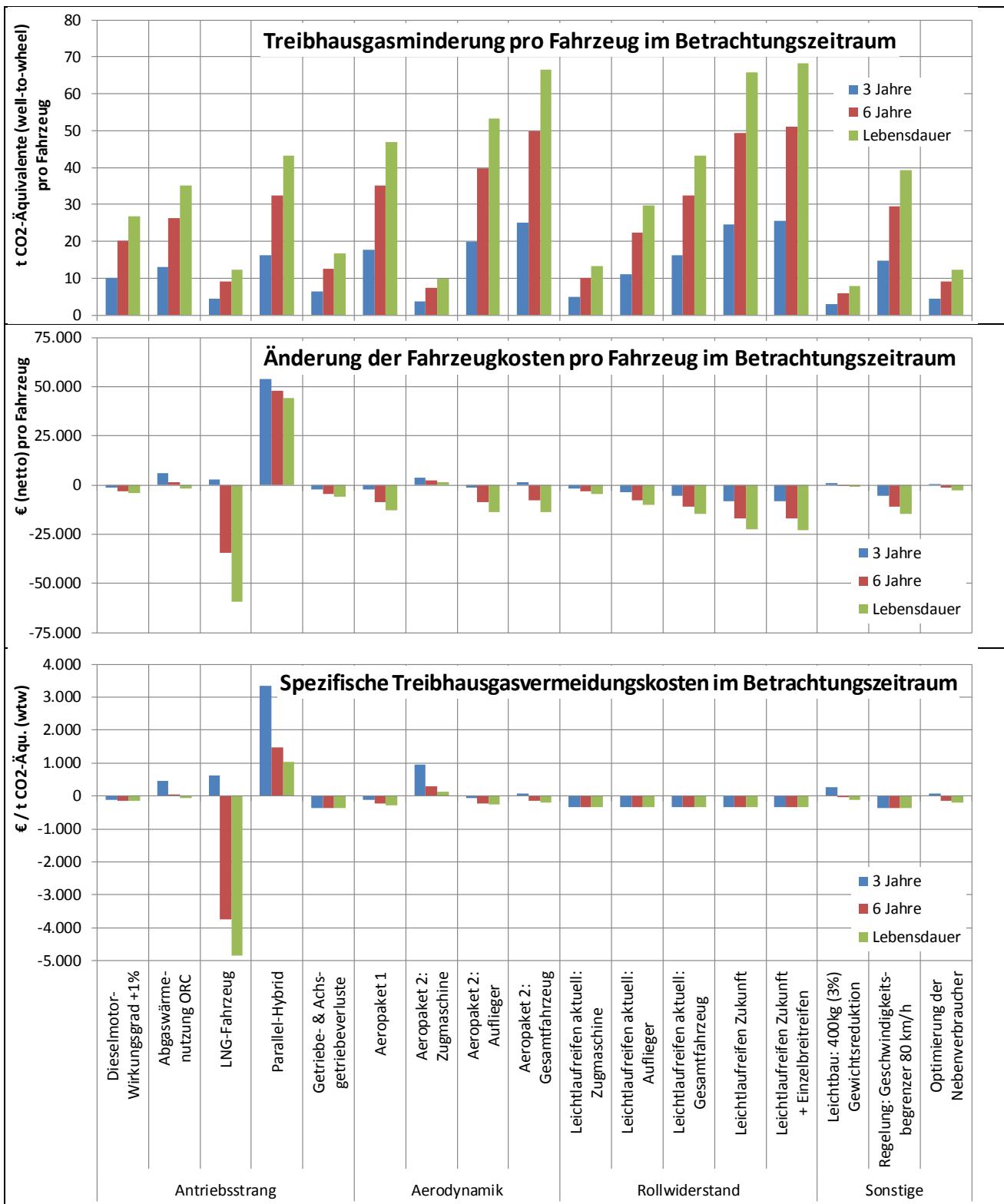


Abbildung 43 zeigt beispielhaft für einen Sattelzug im Fernverkehr die Treibhausgasminderungspotenziale pro Fahrzeug innerhalb von drei Jahren, sechs Jahren bzw. über die gesamte Lebensdauer, die Änderung der Fahrzeugkosten in diesen Betrachtungszeiträumen sowie die daraus resultierenden spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten (Darstellung für die anderen Fahrzeugklassen im Anhang in Abschnitt 5.9).

- ▶ Die **Treibhausgasminderungspotenziale** jeder Einzelmaßnahme sind über sechs Jahre betrachtet doppelt so hoch wie nach drei Jahren (bei Annahme gleichbleibender Jahresfahrleistungen in allen Jahren). Über die gesamte Fahrzeuglebensdauer, die beim Sattelzug im Fernverkehr mit 8 Jahren angenommen wurde, werden weitere Treibhausgasminderungen erzielt.
- ▶ Die **Änderung der Fahrzeugkosten** resultiert einerseits aus der Einsparung an Kraftstoffkosten, andererseits aus den zusätzlichen Technologiekosten, welche zusätzliche Anschaffungskosten beim Fahrzeugkauf, Ersatzinvestitionen zu einem späteren Zeitpunkt (z.B. Ersatzbatterie beim Hybrid-Lkw) und Änderungen variabler Fahrzeugkosten (z.B. SCR-Bedarf) beinhalten können. Damit ergeben sich technologiespezifisch unterschiedliche Änderungen der Fahrzeugkosten für verschiedene Betrachtungszeiträume. Beispielsweise ist beim LNG-Fahrzeug die Änderung der Fahrzeugkosten in den ersten drei Jahren positiv (d.h. es fallen zusätzliche Kosten an), bedingt durch die hohen zusätzlichen Anschaffungskosten. Über sechs Jahre wird insgesamt die Kostenänderung aber negativ, da über diesen Zeitraum die Einsparung an Kraftstoffkosten die zusätzlichen Anschaffungskosten (sowie weitere Zusatzkosten) deutlich überwiegt. Bei anderen Technologien mit niedrigen Anschaffungskosten (z.B. aerodynamischer Heckeneinzug im Aeropaket 2) ist die Änderung der Fahrzeugkosten bereits innerhalb der ersten drei Jahre negativ, d.h. es kommt zu Kosteneinsparungen. Diese Einsparungen nehmen über 6 Jahre bzw. die Fahrzeugelebensdauer durch die weiterhin erzielten Kraftstoffkosteneinsparungen weiter zu.
- ▶ Die **spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten** der Maßnahmen ergeben sich als Quotient aus Änderung der Fahrzeugkosten und eingesparten Treibhausgasmengen. Bei Maßnahmen, die im jeweiligen Betrachtungszeitraum zu Kosteneinsparungen für die Fahrzeugbetreiber führen, ergeben sich negative Vermeidungskosten. Kommt es zu Kostenerhöhungen für die Fahrzeugbetreiber, ergeben sich entsprechend positive Vermeidungskosten. Vor allem bei Maßnahmen mit hohen Anfangsinvestitionen (zusätzliche Anschaffungskosten, z.B. Leichtbau), die erst mit zunehmender Nutzungsdauer durch die eingesparten Kraftstoffkosten wieder aufgewogen werden, hat der Betrachtungszeitraum große Bedeutung für die Beurteilung der Kosteneffizienz. Bei Maßnahmen mit geringen Anfangsinvestitionen bzw. mit variablen oder wiederkehrenden Zusatzkosten (z.B. Reifenwechsel bei Leichtlaufreifen) bleibt dagegen die Kosteneffizienz auch über verschiedene Betrachtungszeiträume verhältnismäßig konstant.

Abbildung 44 bis Abbildung 47 zeigen die Einzelmaßnahmen in allen Fahrzeugklassen in der Reihenfolge ihrer Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung in den unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen.

Beim Sattelzug 40 t liegen die spezifischen Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen in einer Bandbreite von -4.800 €/t CO₂e bis +3.300 €/t CO₂e. Im Regionalverkehr sind die Vermeidungskosten häufig höher als im Fernverkehr, vor allem bei Aerodynamik-Maßnahmen. Die Vermeidungskosten für den Einsatz von Parallelhybridtechnik sind im Regionalverkehr niedriger als im Fernverkehr.

Bei einer Betrachtung nur der ersten drei Fahrzeugjahre ergeben sich erwartungsgemäß teilweise deutlich höhere Vermeidungskosten als bei Betrachtung über die gesamte Fahrzeugelebensdauer. Einige Maßnahmen, die innerhalb der ersten drei Jahre noch zusätzliche Kosten verursachen, haben bei Ausweitung der Betrachtung auf längere Zeiträume negative Vermeidungskosten. So haben im Fernverkehr über drei Jahre nur 10 von 17 Maßnahmen negative Vermeidungskosten, über sechs Jahre sind es dagegen 14 Maßnahmen und über die gesamte Lebensdauer 15 Maßnahmen. Nur der Einsatz von Parallelhybridtechnik sowie der Einsatz von Kameras statt Rückspiegel (Aeropaket 2: Sattelzugmaschine) haben auch bei Betrachtung über die gesamte Lebensdauer unter aktuellen Rahmenbedingungen positive Treibhausgas-Vermeidungskosten.

Auch die Rangfolge der Maßnahmen ändert sich teilweise bei verschiedenen Betrachtungszeiträumen. Beispielsweise hat ein LNG-Sattelzug aufgrund der hohen Startinvestition in den ersten drei Jahren positive Vermeidungskosten und steht erst an 14. Position in der Vermeidungskosten-Rangfolge. Bereits bei einer Ausweitung der Betrachtung auf sechs Jahre werden mit zunehmender Kraftstoffersparnis die Vermeidungskosten im Fernverkehr negativ und der LNG-Sattelzug steht in der Kosteneffizienz-Rangfolge im Fernverkehr ganz vorn (unter der Annahme der aktuellen Diesel- und Erdgaspreise gemäß Tabelle 11, in denen auch die aktuelle Begünstigung von Erdgas bei der Energiesteuer enthalten ist).

Abbildung 44 Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

	3 Jahre	Euro / t CO2-Äqu.	6 Jahre	Euro / t CO2-Äqu.	Lebensdauer (8 Jahre)	Euro / t CO2-Äqu.
1	80 km/h-Regelung	-370 €	Erdgasfahrzeug (LNG)	-3.756 €	Erdgasfahrzeug (LNG)	-4.849 €
2	Getriebe- & Achsverluste	-363 €	80 km/h-Regelung	-370 €	80 km/h-Regelung	-370 €
3	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-342 €	Getriebe- & Achsverluste	-363 €	Getriebe- & Achsverluste	-363 €
4	Leichtl.reifen Zukunft	-341 €	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-342 €	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-342 €
5	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-338 €	Leichtl.reifen Zukunft	-341 €	Leichtl.reifen Zukunft	-341 €
6	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-329 €	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-338 €	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-338 €
7	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-327 €	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-335 €	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-336 €
8	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-124 €	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-329 €	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-329 €
9	Aeropaket 1	-115 €	Aeropaket 1	-243 €	Aeropaket 1	-275 €
10	Aeropaket 2: Auflieger	-70 €	Aeropaket 2: Auflieger	-220 €	Aeropaket 2: Auflieger	-258 €
11	Aeropaket 2: Komplett	66 €	Aeropaket 2: Komplett	-152 €	Aeropaket 2: Komplett	-207 €
12	Optim. Nebenverbraucher	66 €	Optim. Nebenverbraucher	-152 €	Optim. Nebenverbraucher	-207 €
13	Leichtbau	276 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-147 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-153 €
14	Abgaswärmennutzung ORC	457 €	Leichtbau	-47 €	Leichtbau	-128 €
15	Erdgasfahrzeug (LNG)	617 €	Abgaswärmennutzung ORC	48 €	Abgaswärmennutzung ORC	-57 €
16	Aeropaket 2: SZM	946 €	Aeropaket 2: SZM	288 €	Aeropaket 2: SZM	123 €
17	Parallel-Hybrid	3.340 €	Parallel-Hybrid	1.485 €	Parallel-Hybrid	1.021 €

Abbildung 45 Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Regionalverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

	3 Jahre	Euro / t CO2-Äqu.	6 Jahre	Euro / t CO2-Äqu.	Lebensdauer (12 Jahre)	Euro / t CO2-Äqu.
1	80 km/h-Regelung	-370 €	80 km/h-Regelung	-370 €	Erdgasfahrzeug (LNG)	1.286 €
2	Getriebe- & Achsverluste	-356 €	Getriebe- & Achsverluste	-356 €	80 km/h-Regelung	-370 €
3	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-337 €	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-337 €	Getriebe- & Achsverluste	-356 €
4	Leichtl.reifen Zukunft	-337 €	Leichtl.reifen Zukunft	-337 €	Leichtl.reifen aktuell: Auflieger	-337 €
5	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-337 €	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-337 €	Leichtl.reifen Zukunft	-337 €
6	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-336 €	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-336 €	Leichtl.reifen aktuell: SZM	-337 €
7	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-306 €	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-323 €	Leichtl.reifen aktuell: Komplett	-336 €
8	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-64 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-106 €	Leichtl.reifen Zukunft + EBR	-332 €
9	Aeropaket 1	390 €	Aeropaket 1	10 €	Aeropaket 1	-180 €
10	Aeropaket 2: Auflieger	527 €	Aeropaket 2: Auflieger	78 €	Aeropaket 2: Auflieger	-146 €
11	Leichtbau	840 €	Leichtbau	235 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-127 €
12	Optim. Nebenverbraucher	914 €	Erdgasfahrzeug (LNG)	246 €	Leichtbau	-68 €
13	Aeropaket 2: Komplett	949 €	Optim. Nebenverbraucher	272 €	Optim. Nebenverbraucher	-49 €
14	Aeropaket 2: SZM	2.794 €	Aeropaket 2: Komplett	290 €	Aeropaket 2: Komplett	-40 €
15	Parallel-Hybrid	2.987 €	Aeropaket 2: SZM	1.212 €	Aeropaket 2: SZM	421 €
16	Erdgasfahrzeug (LNG)	3.310 €	Parallel-Hybrid	1.308 €	Parallel-Hybrid	469 €

Beim Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferverkehr liegt die Bandbreite der Treibhausgasvermeidungskosten mit -470 €/t CO₂e bis +4.600 €/t CO₂e ähnlich wie beim Sattelzug. Allerdings haben hier nur drei von zwölf Maßnahmen innerhalb der ersten drei Jahre negative Vermeidungskosten. Über sechs Jahre sind sechs Maßnahmen, über die gesamte Lebensdauer neun von zwölf Maßnahmen kostensenkend.

Ähnlich wie beim Sattelzug führt auch beim Solo-Lkw 12 t der Einsatz eines Erdgasfahrzeugs in den ersten Jahren zu Zusatzkosten, ist jedoch unter Annahme aktueller Erdgaspreise über die gesamte Fahrzeuglebensdauer die kosteneffizienteste Maßnahme. Der Einsatz von Rückfahrkameras statt Spiegeln (Aeropaket 2) und der Einsatz eines Parallelhybrids bei heutigen Kosten über die komplette Lebensdauer weiterhin positive Treibhausgasvermeidungskosten. Auch ein batterieelektrischer 12-t-Lkw ist bei heutigen Kosten über die komplette Lebensdauer noch nicht kostendeckend.

Abbildung 46 Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Solo-Lkw 12 t städtischen Lieferverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

	3 Jahre	Euro / t CO ₂ -Äqu.	6 Jahre	Euro / t CO ₂ -Äqu.	Lebensdauer (19 Jahre)	Euro / t CO ₂ -Äqu.
1	Getriebe- & Achsverluste	-315 €	Getriebe- & Achsverluste	-315 €	Erdgasfahrzeug (CNG)	-471 €
2	Leichtlaufreifen aktuell	-264 €	Leichtlaufreifen aktuell	-264 €	Getriebe- & Achsverluste	-315 €
3	Leichtlaufreifen Zukunft	-244 €	Erdgasfahrzeug (CNG)	-248 €	Start-Stopp + 80 km/h	-309 €
4	Dieselmotor-Wirkungsgrad	16 €	Leichtlaufreifen Zukunft	-244 €	Leichtlaufreifen aktuell	-264 €
5	Start-Stopp + 80 km/h	18 €	Start-Stopp + 80 km/h	-176 €	Leichtlaufreifen Zukunft	-244 €
6	Erdgasfahrzeug (CNG)	78 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-42 €	Leichtbau	-216 €
7	Leichtbau	606 €	Leichtbau	118 €	Optim. Nebenverbraucher	-141 €
8	Optim. Nebenverbraucher	1.086 €	Optim. Nebenverbraucher	358 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-82 €
9	Aeropaket 1	2.064 €	Aeropaket 1	847 €	Aeropaket 1	14 €
10	Elektrofahrzeug	2.653 €	Elektrofahrzeug	1.151 €	Elektrofahrzeug	123 €
11	Aeropaket 2	3.994 €	Aeropaket 2	1.812 €	Aeropaket 2	319 €
12	Parallel-Hybrid	4.595 €	Parallel-Hybrid	2.112 €	Parallel-Hybrid	414 €

Beim Stadtbus 18 t wurden weniger Einzeltechnologien betrachtet als bei Lkw, aber mehrere alternative Antriebskonzepte (CNG, Hybrid, Elektro). Die Bandbreite der Vermeidungskosten reicht von -530 €/t CO₂e bis +2.300 €/t CO₂e. Die betrachteten Einzeltechnologien sind bei Betrachtung über drei bzw. sechs Jahre durchgängig kosteneffizienter als eine Umstellung auf alternative Antriebe. Über die komplette Lebensdauer ist allerdings auch beim Stadtbus ein Erdgasfahrzeug die kosteneffizienteste Maßnahme.

Hybridbusse sowie batterieelektrische Busse haben bei heutigen mittleren Kosten über alle betrachteten Zeiträume insgesamt positive Treibhausgas-Vermeidungskosten. Bei Betrachtung der kompletten Fahrzeugelebensdauer sinken die Vermeidungskosten teilweise bereits nah an die Schwelle zur Kostenneutralität. Nur ein Elektrobus mit Zwischenladung hat über die komplette Lebensdauer bei den angenommenen mittleren zusätzlichen Investitionskosten von ca. 200.000 Euro bereits heute leicht negative Vermeidungskosten.

Abbildung 47 Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Stadtbus im städtischen Fahrzyklus für verschiedene Betrachtungszeiträume

	3 Jahre	Euro / t CO ₂ -Äqu.	6 Jahre	Euro / t CO ₂ -Äqu.	Lebensdauer (12 Jahre)	Euro / t CO ₂ -Äqu.
1	Achsgetriebeverluste	-359 €	Achsgetriebeverluste	-359 €	Erdgasfahrzeug (CNG)	-533 €
2	Leichtlaufreifen aktuell	-297 €	Leichtlaufreifen aktuell	-297 €	Achsgetriebeverluste	-359 €
3	Leichtlaufreifen Zukunft	-295 €	Leichtlaufreifen Zukunft	-295 €	Leichtlaufreifen aktuell	-297 €
4	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-132 €	Leichtbau	-177 €	Leichtlaufreifen Zukunft	-295 €
5	Leichtbau	17 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-152 €	Leichtbau	-274 €
6	Optim. Nebenverbraucher	231 €	Erdgasfahrzeug (CNG)	-105 €	Optim. Nebenverbraucher	-220 €
7	Start-Stopp-Automatik	455 €	Optim. Nebenverbraucher	-70 €	Start-Stopp-Automatik	-164 €
8	Erdgasfahrzeug (CNG)	752 €	Start-Stopp-Automatik	42 €	Dieselmotor-Wirkungsgrad	-161 €
9	Elektrobus m. Zwischenladung	915 €	Elektrobus m. Zwischenladung	279 €	Elektrobus m. Zwischenladung	-40 €
10	Elektrobus	1.348 €	Elektrobus	496 €	Elektrobus	70 €
11	Seriell-Hybrid	1.456 €	Seriell-Hybrid	543 €	Seriell-Hybrid	86 €
12	Parallel-Hybrid	2.341 €	Parallel-Hybrid	986 €	Parallel-Hybrid	308 €

Die Analysen der Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung zeigen, dass viele der untersuchten Einzelmaßnahmen unter heutigen Rahmenbedingungen negative Vermeidungskosten haben – also effektiv zu Kosteneinsparungen führen. Insbesondere die betrachteten Einzeltechnologien zur Reduktion der Fahrwiderstände können sich häufig innerhalb der ersten drei Jahre amortisieren und wären somit für die Fahrzeugbetreiber prinzipiell wirtschaftlich sinnvoll³⁹. Bei Akzeptanz höherer Amortisationszeiträume (z. B. sechs Jahre), kämen weitere Technologien mit effektiven Kostenminderungen hinzu. Die zeitliche Perspektive, unter der die

³⁹ Weitere Hemmnisse für den Einsatz kraftstoffsparender Technologien werden in Kapitel 3.2 untersucht.

Kosteneffizienz von Maßnahmen zur Treibhausgasminderung betrachtet wird, hat somit erhebliche Relevanz zur Einstufung der Kosteneffizienz einer Technologie seitens der Fahrzeugbetreiber.

Aus gesellschaftlicher Perspektive, d. h. über die mittlere Fahrzeuglebensdauer (unabhängig von Wechseln der Fahrzeugbesitzer und Einsatzorte) haben die meisten untersuchten Technologien negative Vermeidungskosten. Wichtigste Ausnahme sind Hybrid- und Elektrofahrzeuge, die mit den aktuellen hohen Technologiekosten auch über das komplette Fahrzeugleben teilweise noch positive Treibhausgas-Vermeidungskosten verursachen. Allerdings sind zukünftig bei einer Reduktion der Technologiekosten sowie weiter ansteigenden Dieselpreisen (vgl. 2.5.4) auch für diese Technologien negative Vermeidungskosten vorstellbar.

2.6.2 Mittlere Kosteneffizienz der Maßnahmenpakete zur Treibhausgasminderung

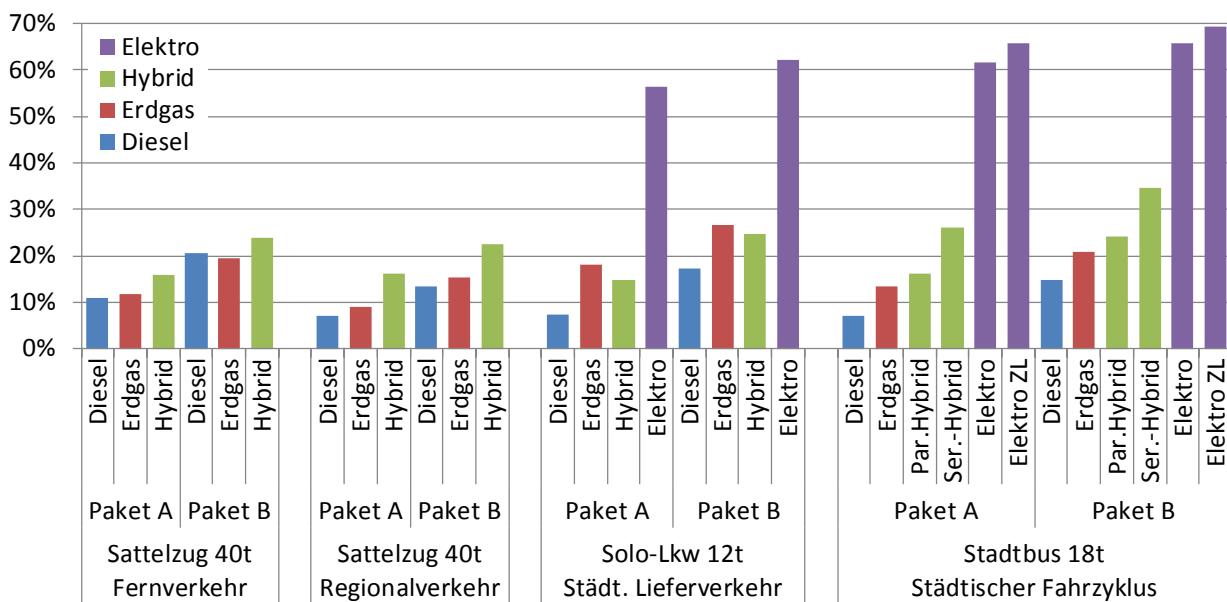
Zusätzlich zu den Einzelmaßnahmen wurden Treibhausgasminderungspotenziale auch für verschiedene Maßnahmenpakete simuliert. In den Paketen wurden die Maßnahmen zur Optimierung von Aerodynamik und Rollwiderstand, Leichtbau, Fahrzeugregelung und Nebenverbrauchern mit verschiedenen Antriebskonzepten (optimierter Diesel, Erdgas, Hybrid, Elektro) kombiniert. Für jedes Antriebskonzept wurden zwei Pakete simuliert:

- ▶ **Paket A:** Die Maßnahmen sind aktuell (Technologiestand 2014) machbar. Alle Komponenten sind bereits verfügbar oder können mit geringem Aufwand bereitgestellt werden.
- ▶ **Paket B:** Die Machbarkeit dieser Maßnahmen ist bereits absehbar. Die Komponenten, die noch nicht verfügbar sind, befinden sich in Entwicklung und werden schätzungsweise bis Ende der Dekade fertig sein. Im Falle der Aeropakete für Lkw ist eine Vorschriftenänderung seitens der EU notwendig, bezüglich Fahrzeugabmessungen und Rückfahrkameras.

Die Maßnahmenpakete sowie die Ergebnisse der simulierten Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen sind in Kapitel 2.4.4 erläutert. Abbildung 48 stellt die kumulierten Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete für alle untersuchten Fahrzeugklassen und Einsatzzwecke gegenüber.

- ▶ Am niedrigsten sind die Potenziale der Pakete mit reinem Dieselfahrzeug. In Paket A sind je nach Fahrzeugklasse sieben bis elf Prozent Treibhausgasminderung möglich, in Paket B 13 bis 21 Prozent. Am höchsten sind die Potenziale beim Sattelzug im Fernverkehr.
- ▶ Die kumulierten Potenziale von Erdgas- und Hybridfahrzeugen mit zusätzlichen verbrauchsmindernden Einzeltechnologien sind meist höher als beim reinen Dieselfahrzeug. Sie liegen im Paket A bei 9-26 Prozent, im Paket B bei 19-35 Prozent.
- ▶ Am größten sind die Potenziale bei den Paketen mit Elektrofahrzeugen (Solo-Lkw, Stadtbus), die mit dem verwendeten aktuellen europäischen Strommix (EU27) durchgängig über 50 Prozent liegen. Ein anderer Strommix (z. B. auf nationaler Ebene) führt abhängig von den Anteilen einzelner Energieträger (Kohle, Atom, Wind ...) zu anderen Potenzialen (vgl. Kapitel 2.4.6).

Abbildung 48 Treibhausgasminderungspotenziale durch die untersuchten Maßnahmenpakete



Die kumulierten Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete wurden anschließend mit den damit verbundenen Kostenänderungen pro Fahrzeug verknüpft und so analog zu den Einzelmaßnahmen (vgl. Kap. 2.6.1) die mittleren Treibhausgas-Vermeidungskosten pro Maßnahmenpaket berechnet. Die resultierende mittlere Kosteneffizienz der Maßnahmenpakete zur Treibhausgasreduktion zeigt Abbildung 49.

Innerhalb der ersten drei Jahre werden nur bei wenigen Maßnahmenpaketen insgesamt negative Treibhausgas-Vermeidungskosten erreicht, nämlich nur die Diesel- und Erdgaspakete⁴⁰ A und B bei Sattelzügen im Fernverkehr sowie Dieselpaket A bei Sattelzügen im Regionalverkehr und Dieselpaket B bei Stadtbussen. Alle anderen Maßnahmenpakete führen unter heutigen Rahmenbedingungen in den ersten drei Jahren insgesamt zu einer Kostensteigerung.

Bei einer Erweiterung des Betrachtungszeitraums auf sechs Jahre erhöht sich die Zahl der Maßnahmenpakete mit insgesamt negativen Treibhausgasvermeidungskosten. Dieselpaket B ist in dem Fall auch beim Sattelzug im Regionalverkehr kostensenkend. Außerdem bewirken beim Solo-Lkw Erdgaspaket A und beim Stadtbus beide Erdgaspakete A und B insgesamt Kostensenkungen.

Über die mittlere Fahrzeuglebensdauer erreichen alle Maßnahmenpakete mit reinem Diesel- und Erdgasfahrzeug insgesamt negative Treibhausgas-Vermeidungskosten. Teilweise werden über die Fahrzeuglebensdauer auch bei Maßnahmenpaketen mit Hybridantrieb insgesamt Kostenreduktionen erreicht (Sattelzug im Fernverkehr Hybrid A und B, Stadtbus Serieller Hybrid B). Dass ist damit zu erklären, dass in den Paketen jeweils mehrere Einzelmaßnahmen mit deutlich negativen Vermeidungskosten enthalten sind. Diese „subventionieren“ die hohen positiven Vermeidungskosten für den Hybrid, so dass die gemittelten Vermeidungskosten des Gesamtpakets deutlich niedriger sind als die der teuersten Einzelmaßnahme. Von den Maßnahmenpaketen mit reinen Elektrofahrzeugen erreichen nur die Pakete A und B beim Elektrobus mit Zwischenladung unter heutigen Rahmenbedingungen negative Vermeidungskosten.

⁴⁰ Dabei sind ausschließlich Kosten für die Fahrzeugbetreiber bei aktuellen Erdgaspreisen berücksichtigt, jedoch keine Kosten für die Versorgungsinfrastruktur (z. B. Aufbau eines europaweiten LNG-Tankstellennetzes).

Abbildung 49 Mittlere Treibhausgasvermeidungskosten der Maßnahmenpakete für verschiedene Betrachtungszeiträume

		Euro / t CO2-Äqu.					
		3 Jahre		6 Jahre		Lebensdauer	
Sattelzug 40 t im Fernverkehr	Diesel A	-223 €	Diesel A	-291 €	Diesel A	-308 €	
	Erdgas A	-62 €	Erdgas A	-513 €	Erdgas A	-626 €	
	Hybrid A	585 €	Hybrid A	111 €	Hybrid A	-8 €	
	Diesel B	-48 €	Diesel B	-194 €	Diesel B	-230 €	
	Erdgas B	-46 €	Erdgas B	-368 €	Erdgas B	-449 €	
	Hybrid B	374 €	Hybrid B	15 €	Hybrid B	-75 €	
Sattelzug 40 t im Regionalverkehr	Diesel A	30 €	Diesel A	-163 €	Diesel A	-260 €	
	Erdgas A	1.139 €	Erdgas A	47 €	Erdgas A	-499 €	
	Hybrid A	1.349 €	Hybrid A	492 €	Hybrid A	64 €	
	Diesel B	160 €	Diesel B	-80 €	Diesel B	-200 €	
	Erdgas B	770 €	Erdgas B	27 €	Erdgas B	-345 €	
	Hybrid B	1.059 €	Hybrid B	359 €	Hybrid B	9 €	
Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferverkehr	Diesel A	696 €	Diesel A	169 €	Diesel A	-192 €	
	Erdgas A	374 €	Erdgas A	-46 €	Erdgas A	-334 €	
	Hybrid A	3.064 €	Hybrid A	1.350 €	Hybrid A	177 €	
	Elektro A	2.599 €	Elektro A	1.124 €	Elektro A	114 €	
	Diesel B	596 €	Diesel B	155 €	Diesel B	-147 €	
	Erdgas B	455 €	Erdgas B	33 €	Erdgas B	-255 €	
	Hybrid B	2.043 €	Hybrid B	866 €	Hybrid B	60 €	
	Elektro A	2.449 €	Elektro A	1.052 €	Elektro A	97 €	
Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus	Diesel A	143 €	Diesel A	-105 €	Diesel A	-229 €	
	Erdgas A	595 €	Erdgas A	-46 €	Erdgas A	-366 €	
	Par.Hybrid A	2.117 €	Par.Hybrid A	877 €	Par.Hybrid A	257 €	
	Ser.-Hybrid A	1.326 €	Ser.-Hybrid A	480 €	Ser.-Hybrid A	57 €	
	Elektro A	1.315 €	Elektro A	480 €	Elektro A	63 €	
	Elektro ZL A	899 €	Elektro ZL A	271 €	Elektro ZL A	-43 €	
	Diesel B	-24 €	Diesel B	-167 €	Diesel B	-239 €	
	Erdgas B	320 €	Erdgas B	-109 €	Erdgas B	-323 €	
	Par.Hybrid B	1.346 €	Par.Hybrid B	506 €	Par.Hybrid B	86 €	
	Ser.-Hybrid B	945 €	Ser.-Hybrid B	300 €	Ser.-Hybrid B	-22 €	
	Elektro B	1.221 €	Elektro B	434 €	Elektro B	41 €	
	Elektro ZL B	843 €	Elektro ZL B	244 €	Elektro ZL B	-55 €	

2.6.3 Kostenkurven von Grenzvermeidungskosten und kumulierten Vermeidungskosten

Die Analyse der Vermeidungskosten pro Maßnahmenpaket im vorigen Kapitel zeigt, ob die Maßnahmenpakete insgesamt zusätzliche Kosten zur Treibhausgasminderung verursachen oder negative Vermeidungskosten haben. Sie gibt jedoch keine Information, in welchem Rahmen dabei kostensenkende Einzelmaßnahmen die kostenverursachenden Maßnahmen „subventionieren“. Ebenso ist keine Aussage möglich, welche Treibhausgasminderungen allein durch Kombination von kostensenkenden Einzelmaßnahmen möglich sind, und wie hoch die dabei maximal möglichen Kosteneinsparungen pro Fahrzeug sind.

Mit der Erstellung von Kurven der Grenzkosten zur Treibhausgasminderung, sogenannten MAC⁴¹-Kurven, wurde für die Kombination von Einzelmaßnahmen in den festgelegten Maßnahmenpaketen beurteilt, mit welchen spezifischen Kostensenkungen bzw. -erhöhungen welche zusätzliche prozentuale Treibhausgasminderung im Paket erreichbar ist. Dazu wurden die pro Maßnahmenpaket ausgewählten Maßnahmen zunächst nach ihrer individuellen Kosteneffizienz sortiert und anschließend ausgehend von der kosteneffizientesten Maßnahme schrittweise miteinander kombiniert. Für jede hinzukommende Maßnahme wurden die damit verbundene Erhöhung des Treibhausgasminderungspotenzials im Paket sowie die spezifischen Kosten für die Zusatzminderung ermittelt und gegeneinander aufgetragen. Da die Potenziale der Einzelmaßnahmen im Paket von den Einzelpotenzialen abweichen, ergeben sich in der Kostenkurve abweichende spezifische Mindeungskosten gegenüber der Einzelbetrachtung. Üblicherweise ist das zusätzliche Minderungspotenzial einer Maßnahme im Paket (d. h. bei einem bereits teilweise optimierten Fahrzeug) niedriger als beim nicht-optimierten Referenzfahrzeug, die spezifischen Vermeidungskosten sind damit im Paket höher. In Ausnah-

⁴¹ MAC = marginal abatement costs

mefällen kann das Potenzial einer Maßnahme allerdings auch in Kombination mit anderen Maßnahmen ansteigen⁴², in dem Fall sinken die spezifischen Vermeidungskosten.

Ergänzend zu den MAC-Kurven wurde für die schrittweise Kombination der Einzelmaßnahmen auch die jeweilige Änderung der absoluten Vermeidungskosten pro Fahrzeug berechnet. Die Darstellung zeigt zum einen, welche maximalen Kosteneinsparungen pro Fahrzeug bei ausschließlicher Kombination von Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten möglich sind. Zum anderen kann damit abgeschätzt werden, bis zu welchen prozentualen Treibhausgasminderungen eine Kombination von Maßnahmen mit negativen und positiven Vermeidungskosten insgesamt mindestens kostenneutral ist.

MAC-Kurven und Kurven der kumulierten Vermeidungskosten⁴³ werden nachfolgend exemplarisch für den Sattelzug 40 t im Fernverkehr dargestellt (Pakete A: Abbildung 50; Pakete B: Abbildung 51) erläutert. Die Kostenkurven der anderen untersuchten Fahrzeugklassen beinhaltet im Anhang Kap. 5.9.

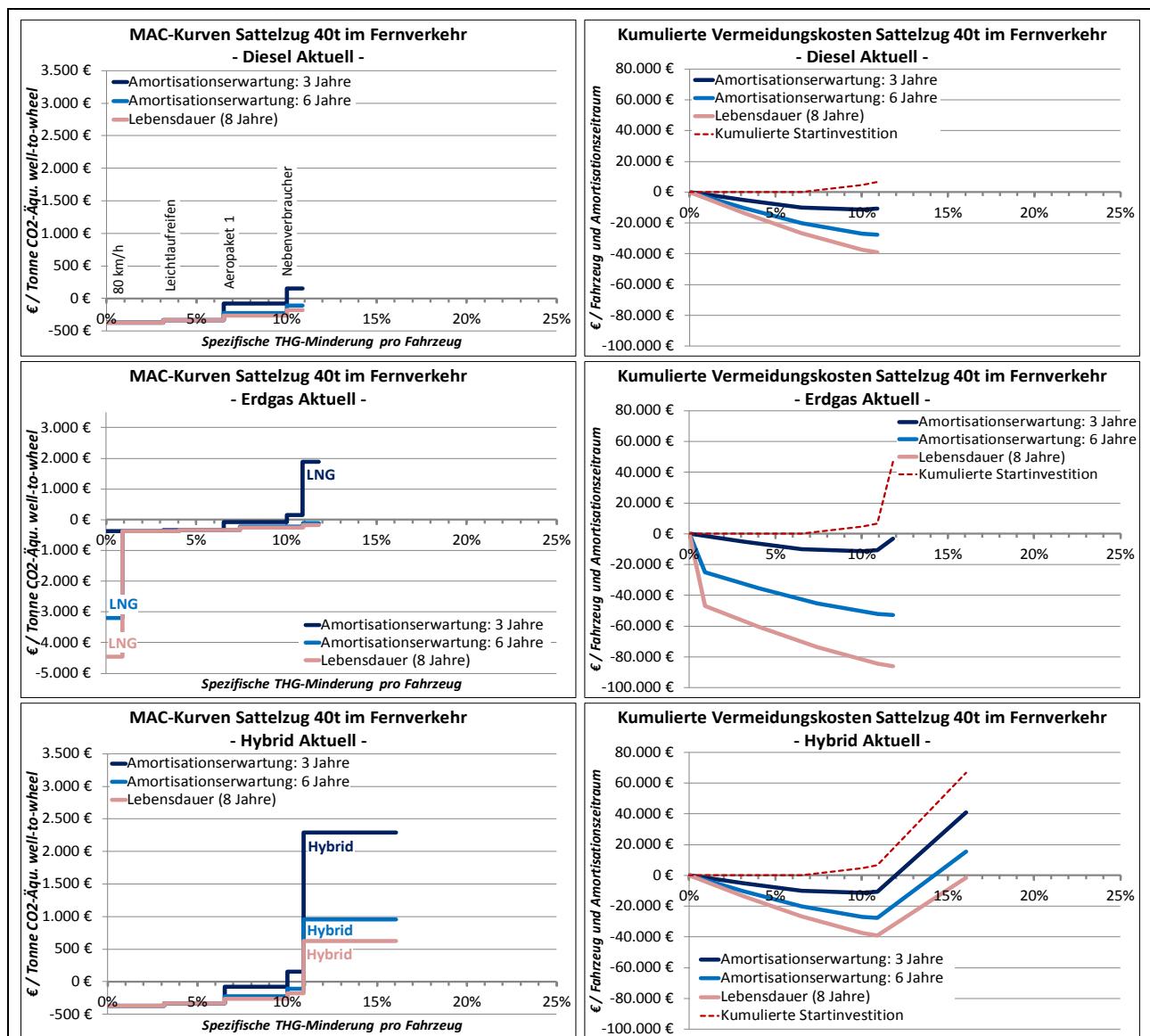
Abschließend wurden die anteiligen Treibhausgasminderungspotenziale derjenigen Maßnahmen pro Maßnahmenpaket mit negativen Vermeidungskosten den gesamten Minderungspotenzialen gegenübergestellt. Tabelle 15 zeigt, dass eine Beschränkung auf Maßnahmen, die nach spätestens drei Jahren Kostensenkungen im Fahrzeugbetrieb bringen, die Treibhausgasminderungspotenziale der Pakete bei allen Fahrzeugklassen nur begrenzt ausschöpfen würde. Mit Ausweitung des Zeitraums, in dem sich Maßnahmen amortisieren sollen, auf sechs Jahre sind in den meisten Maßnahmenpaketen deutliche zusätzliche Emissionsminderungen möglich, da die Zahl der Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten steigt. Weitere Potenziale könnten prinzipiell bei Ausweitung auf alle Maßnahmen mit Amortisation innerhalb der mittleren Fahrzeugelebensdauer erschlossen werden. Daran zeigt sich die Bedeutung der Amortisationserwartungen bei den Fahrzeugbetreibern für die Bewertung von Maßnahmen und somit für die Realisierbarkeit von Minderungspotenzialen durch Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien. Könnten Fahrzeugbetreiber von längeren Amortisationszeiträumen überzeugt werden, würde das für eine Reihe von bereits heute oder zukünftig verfügbaren Technologien zur Treibhausgasminderung schwerer Nutzfahrzeuge eine stärkere Verbreitung fördern.

Unter aktuellen Rahmenbedingungen (insbesondere hohe Technologiekosten) führt in allen untersuchten Fahrzeugklassen der Einsatz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen auch über deren gesamte Lebensdauer noch zu zusätzlichen Kosten, die meist auch nicht durch gleichzeitigen Einsatz anderer Technologien mit negativen Vermeidungskosten kompensiert werden (vgl. Abbildungen der kumulierten Vermeidungskosten in diesem Abschnitt und im Anhang Kap. 5.9.). Allerdings sind diese alternativen Antriebskonzepte noch nicht lange am Markt bzw. für einige Fahrzeugklassen noch gar nicht verfügbar. Bei einer stärkeren Verbreitung könnten die Technologiekosten zukünftig deutlich sinken. Damit und bei dem erwarteten weiteren Anstieg der Kraftstoffpreise erscheinen zukünftig deutlich niedrigere bis hin zu negativen Vermeidungskosten für diese Technologien möglich. Wie die Auswertungen in Kap. 2.5.4 zeigen, erscheint für Hybrid- und batterie-elektrische Fahrzeuge bei entsprechender Reduktion der erforderlichen Zusatzinvestitionen eine deutliche Verringerung der Amortisationszeiten bei Lkw auf fünf bis acht Jahre und bei Stadtbussen auf drei bis sechs Jahre möglich. Demnach wäre in diesen Fahrzeugklassen zukünftig die Erschließung erheblicher weiterer Treibhausgasminderungspotenziale möglich, wenn die Weiterentwicklung und Verbreitung alternativer Antriebe und damit eine Verringerung ihrer Kosten durch geeignete Maßnahmen gefördert wird.

⁴² Beispielsweise ist das Einsparpotenzial durch Hybridisierung beim Sattelzug am anderweitig optimierten Fahrzeug höher als gegenüber dem Referenzfahrzeug. Der Grund ist die Möglichkeit zur Nutzbremsung. Zum Bremsen muss eine negative Radleistung aufgebracht werden, Roll- und Luftwiderstand sind ein Teil davon und "bremsen mit". Die negative Radleistung, die nicht von den Fahrwiderständen aufgebracht wird, wird von den Radbremsen als Reibungswärme abgeführt, dies ist die eigentliche Bremsleistung. Im Fall von Hybridfahrzeugen kann ein Teil davon mittels Nutzbremsung zurückgewonnen werden. Sinken die Fahrwiderstände, wird mehr Bremsleistung frei und Hybridfahrzeuge können mehr rekuperieren, was das Sparpotenzial erhöht.

⁴³ Zur ergänzenden Orientierung sind in den Kurven der kumulierten Kosteneinsparungen auch die notwendigen Startinvestitionen der jeweiligen Maßnahmenkombinationen dargestellt.

Abbildung 50 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Fernverkehr

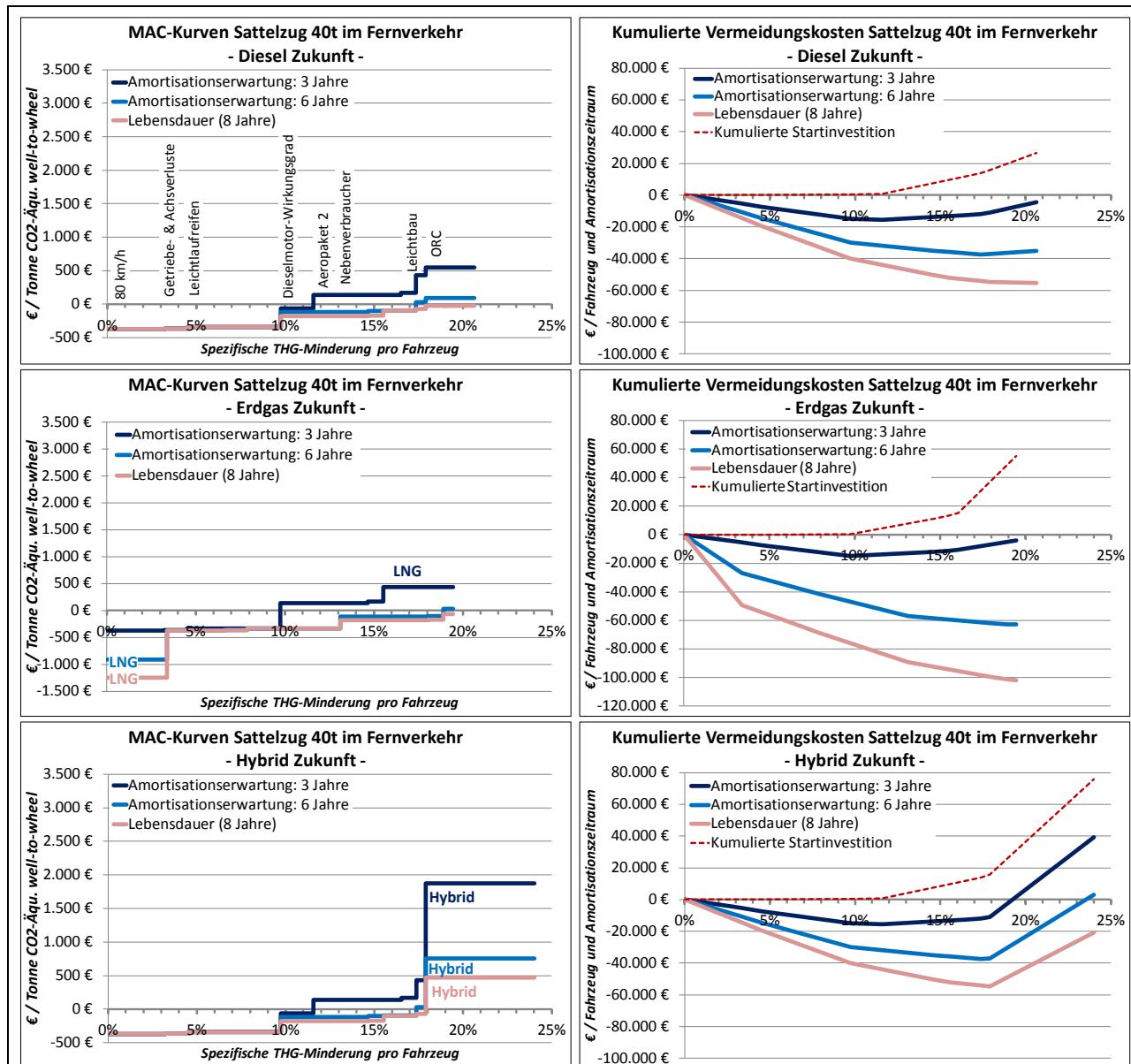


Im Paket „Diesel A“ haben drei Maßnahmen innerhalb von drei Jahren negative Vermeidungskosten: 80 km/h-Geschwindigkeitsbegrenzer, Leichtlaufreifen und Aeropaket 1. Damit könnten die Treibhausgasemissionen um zehn Prozent gegenüber dem Referenzfahrzeug EURO VI reduziert werden (oben links). Dafür wäre eine zusätzliche Startinvestition von insgesamt 4.700 Euro notwendig, die sich aber kurzfristig amortisiert. Bereits nach drei Jahren würde die kumulierte Kostenminderung pro Fahrzeug 11.000 Euro betragen (oben rechts). Bei einer Ausweitung des Betrachtungszeitraums auf sechs Jahre haben alle vier Maßnahmen im Paket negative Vermeidungskosten. Insgesamt wären elf Prozent Treibhausgasminderung möglich, die kumulierte Kostenminderung beträgt nach sechs Jahren 28.000 Euro, über die mittlere Fahrzeugelebensdauer knapp 40.000 Euro.

Das Paket „Erdgas A“ beinhaltet alle Maßnahmen aus Paket „Diesel A“, ergänzt um die Umstellung des Antriebskonzepts auf Erdgas (LNG). Bei Betrachtung nur der ersten drei Jahre sind die Rangfolge der Einzelmaßnahmen sowie Vermeidungspotenziale und Kostenminderungen beider Pakete gleich. Bei einem längeren Betrachtungszeitraum hat auch die Umstellung auf Erdgas allein negative Vermeidungskosten (bei aktuell bestehender Energiesteuerermäßigung) und steht in der MAC-Kurve an erster Stelle. Über mindestens sechs Jahre betrachtet sind im Paket „Erdgas A“ insgesamt 12 Prozent Treibhausgasminderung möglich. Die kumulierte Kostenminderung pro Fahrzeug um 53.000 Euro (6 Jahre) bis 86.000 Euro (Lebensdauer) ist deutlich höher als im „Paket Diesel A“.

Auch das Paket „Hybrid A“ umfasst alle Einzelmaßnahmen aus Paket „Diesel A“ nach ihrer Kosteneffizienz sowie den Wechsel vom reinen Dieselmotor auf Hybrid-Technik. Ein Hybrid hat bei aktuellen Preisen über die komplette Lebensdauer positive Vermeidungskosten und fände damit bei einer Begrenzung auf Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten keine Berücksichtigung. Wie die Änderung der kumulierten Kosten (unten rechts) zeigt, werden die hohen Hybrid-Zusatzkosten (inkl. Batterietausch) nur bei Betrachtung der gesamten Fahrzeugelebensdauer durch die Kosteneinsparungen der anderen Maßnahmen im Paket aufgewogen.

Abbildung 51 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Fernverkehr



Bei den Paketen B mit zukünftig absehbaren Technologien sind die Treibhausgasvermeidungspotenziale ebenso wie die potentiellen Kostenminderungen höher. Im Paket „Diesel B“ sind 12 Prozent Treibhausgasminderung innerhalb von drei Jahren bis 21 Prozent über die mittlere Fahrzeulebensdauer durch Kombination von Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten möglich. Die maximale kumulierte Kostenminderung pro Fahrzeug beträgt je nach Betrachtungszeitraum 15.000 bis 55.000 Euro. Selbst ein Aus schöpfen des kompletten Vermeidungspotenzials von 21 Prozent würde die Fahrzeugkosten bereits nach drei Jahren insgesamt um 4.000 Euro reduzieren, da die Kosteneinsparungen der Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten höher sind als die Zusatzkosten der Maßnahmen mit positiven Vermeidungskosten.

Im Paket „Erdgas B“ wären in den ersten drei Jahren 10 Prozent Treibhausgasminderung bei kumulierter Kosteneinsparung von 15.000 Euro möglich – ohne Umstellung auf Erdgasmotor, da diese Maßnahme sich innerhalb von drei Jahren noch nicht amortisiert. Bereits bei einer Ausweitung der Betrachtung auf sechs Jahre hat auch der Erdgasmotor negative Vermeidungskosten und führt damit zu weiteren Kostensenkungen. Insgesamt könnten bei aktuellen Diesel- und Erdgaspreisen pro Fahrzeug je nach Betrachtungszeitraum 53.000 Euro (6 Jahre) bis 102.000 Euro (Lebensdauer) gegenüber dem EURO VI-Referenzfahrzeug gespart werden.

Im Paket „Hybrid B“ sind bei Beschränkung auf Maßnahmen mit negativen Vermeidungskosten die gleichen Treibhausgasminde rungen und kumulierten Kosteneinsparungen möglich wie im Paket „Diesel B“. Wegen der positiven Vermeidungskosten einer Umstellung von reinem Diesel- auf Hybridantrieb (bei aktuellen Technologiekosten) können nur bei Betrachtung der mittleren Lebensdauer die Kosteneinsparungen der anderen Einzelmaßnahmen im Paket die Zusatzkosten der Hybridtechnologie kompensieren.

Tabelle 15 Anteilige Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete durch Maßnahmen mit im jeweiligen Betrachtungszeitraum negativen Vermeidungskosten

Fahrzeugklasse & Einsatzzweck	Maßnahmen-paket	Minderungspotenziale aller Maßnahmen pro Paket	Anteilige Minderungspotenziale von Maßnahmen im Paket mit negativen Vermeidungskosten		
			nach 3 Jahren	nach 6 Jahren	Innerhalb Lebensdauer
Sattelzug 40 t im Fernverkehr	Diesel A	11%	10%	+1%	+0%
	Erdgas (LNG) A	12%	10%	+2%	+0%
	Hybrid A	16%	10%	+1%	+0%
	Diesel B	21%	12%	+6%	+3%
	Erdgas (LNG) B	19%	10%	+9%	+1%
	Hybrid B	24%	12%	+6%	+1%
Sattelzug 40 t im Regionalverkehr	Diesel A	7%	4%	+0%	+2%
	Erdgas (LNG) A	9%	4%	+0%	+4%
	Hybrid A	16%	4%	+0%	+2%
	Diesel B	13%	9%	+0%	+1%
	Erdgas (LNG) B	15%	7%	+0%	+5%
	Hybrid B	23%	9%	+0%	+1%
Solo-Lkw 12 t im städtischen Liefer-verkehr	Diesel A	8%	4%	+2%	+0%
	Erdgas (CNG) A	18%	4%	+11%	+2%
	Hybrid A	15%	4%	+2%	+0%
	Elektro A	56%	2%	+0%	+2%
	Diesel B	17%	7%	+5%	+3%
	Erdgas (CNG) B	27%	7%	+14%	+3%
	Hybrid B	25%	7%	+5%	+3%
	Elektro A	62%	8%	+0%	+3%
Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus	Diesel A	7%	2%	+3%	+3%
	Erdgas (CNG) A	13%	2%	+3%	+9%
	Parallelhybrid A	16%	2%	+3%	+3%
	Seriellhybrid A	26%	2%	+3%	+3%
	Elektro A	62%	2%	+3%	+0%
	Elektro Zwischenlad. A	66%	2%	+3%	+61%
	Diesel B	15%	8%	+4%	+2%
	Erdgas (CNG) B	21%	6%	+12%	+2%
	Parallelhybrid B	24%	8%	+4%	+2%
	Seriellhybrid B	35%	8%	+4%	+2%
	Elektro B	66%	6%	+4%	+0%
	Elektro Zwischenlad. B	69%	6%	+4%	+59%

3 Strategien zur Förderung der Einführung und Verbreitung treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen

3.1 Zielstellung

Viele energiesparende und treibhausgasmindernde Technologien für schwere Nutzfahrzeuge sind bereits heute am Markt verfügbar (z. B. zur Verbesserung der Aerodynamik, Leichtlaufreifen). Allerdings ist ihr Einsatz unterschiedlich stark verbreitet. Obwohl seit mehreren Jahren verfügbar, werden solche Technologien teilweise bisher nur von einem vergleichsweise geringen Anteil der Fahrzeugbetreiber eingesetzt. Ziel dieses Arbeitspakets ist daher die Diskussion möglicher Maßnahmen und politischer Strategien, welche die Einführung zusätzlicher treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen unterstützen und ihre stärkere Verbreitung in Europa fördern können.

Im ersten Schritt werden über Treibhausgasminderungspotenziale und Kosten (-Einsparungen) hinausgehende Voraussetzungen und Hemmnisse für eine Markteinführung und -verbreitung treibhausgasmindernder Fahrzeugtechnologien analysiert. Dazu gehören rechtliche und praktische Rahmenbedingungen ebenso wie Informationsdefizite und andere Akzeptanzhemmnisse oder Vorbehalte bei Akteuren im Güterverkehr (z. B. Amortisationserwartungen, Fahrersicherheits- und -komfortfragen, Marktstrukturen).

Auf dieser Grundlage erfolgt im zweiten Schritt eine erste Analyse von Strategien, welche die Einführung und Verbreitung von treibhausgasmindernden Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen in Europa fördern können. Der Fokus liegt dabei hauptsächlich auf politischen Anreizsystemen zur generellen Verbesserung der Energieeffizienz im Straßengüterverkehr. Vor- und Nachteile verschiedener Strategien sowie deren Akzeptanz in der Güterlogistik-Branche werden diskutiert.

Ausgehend von den Einzelstrategien wird eine strategische Roadmap skizziert, welche verschiedene Strategien miteinander verknüpft, um die Einführung von treibhausgasmindernden Technologien auf europäischer Ebene zu erleichtern sowie deren Verbreitung bei (neuen) schweren Nutzfahrzeugen zu fördern.

3.2 Hemmnisse für die Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen

Definition „Hemmnis“

Ein Hemmnis im hier betrachteten Kontext beschreibt eine Ursache, die dazu führt, dass eine neue Effizienz-Technologie nur langsam vom Markt bzw. von einer Zielgruppe angenommen wird (Ecofys Germany, 2007).

Zur Analyse von Voraussetzungen und Hemmnissen für eine Markteinführung und Verbreitung energiesparender Technologien wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Die Studien werden in Tabelle 16 kurz aufgelistet und beschrieben. Die Literaturrecherche wurde durch einen Austausch mit Marktakteuren im Güterverkehr (Lkw-Hersteller, Fuhrbetriebe und Speditionen) ergänzt.

Tabelle 16 Literaturquellen in der Hemmnisanalyse

Quelle	Fokus	Umfang	Region
[CE Delft, 2012b]	Umfrage und vertiefende Interviews zu Hemmnissen bzgl. der Marktintegration von Effizienztechnologien im Straßengüterverkehr	53 Umfrageteilnehmer; 13 Interviews	Europa
[Ricardo-AEA, 2012]	Interviews und Online-Umfrage unter Flottenbetreibern, Herstellern, Technologie-Entwicklern und Kraftstoff-Anbietern zu Hemmnissen bzgl. der Einführung von technischen Effizienz-Maßnahmen	23 Interviews; 50 Umfrageteilnehmer	England
[NACFE, 2013]	Interviews und Online-Umfrage zur Untersuchung der Hemmnisse bzgl. der Integration von Effizienz-Technologien in den Straßengüterverkehr	40 Interviews und 1900 Umfrageteilnehmer	Nordamerika
[M.J. Bradley & Associates LLC, 2009]	Studie über Hemmnisse zur Einführung von Effizienz-Standards in den Nutzfahrzeugsektor		USA
[Technomar GmbH, 2012]	Umfrage zum Stellenwert von Effizienz-Maßnahmen unter deutschen Fuhrunternehmen	200 Umfrageteilnehmer	Deutschland
[Goodyear Dunlop, 2012]	Umfrage unter Flottenmanagern zur Bedeutung von Effizienz-Maßnahmen im Unternehmen	400 Umfrageteilnehmer	Europa

3.2.1 Übersicht von Hemmnissen

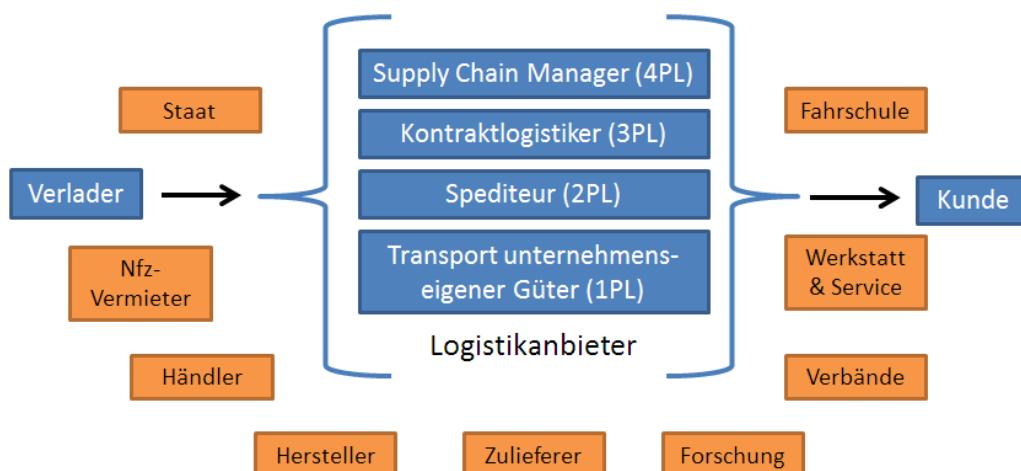
Die Einführung von Energieeffizienz-Technologien wird durch verschiedene Hemmnisse erschwert. Hemmnisse lassen sich wie folgt klassifizieren (in Anlehnung an [CE Delft, 2012b]):

- ▶ **Technologiespezifische Hemmnisse** ergeben sich aus Eigenschaften (z. B. Abmessungen, Gewicht) einer bestimmten Technologie oder bestimmten Voraussetzungen, welche der Einsatz einer Technologie erfordert.
- ▶ **Finanzielle Hemmnisse** ergeben sich aus den absoluten Kosten (z.B. hohe Anschaffungskosten) oder aus der Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses einer Technologie.
- ▶ **Strukturelle Hemmnisse** ergeben sich aus den vorherrschenden Strukturen und Abläufen innerhalb der Logistik-Branche. Sie sind überwiegend unabhängig von konkreten Technologien.
- ▶ **Informationsdefizite** ergeben sich aus der Komplexität des Themas, insbesondere aus der Herausforderung, Minderungspotenziale und Kosten adäquat zu bestimmen und zu kommunizieren.

Die Logistik-Branche ist durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Akteuren geprägt. Die Akteure lassen sich nach verschiedenen Kriterien einteilen:

- ▶ Funktion innerhalb der Logistik-Branche (siehe Abbildung 52);
- ▶ Art des Transportgutes: Containergut, Stückgut, Massengut;
- ▶ Zusammensetzung und Größe des Fuhrparks: Anzahl an Sattelzugmaschinen, Solo-Lkw über 12 t zGG, Solo-Lkw zwischen 3,5 und 12 t zGG, Sattelaufzieher, Anhänger, Busse, sonstige Nutzfahrzeuge;
- ▶ Einsatzbereich (bzgl. Entfernung): Nahverkehr, Regionalverkehr, Fernverkehr.

Abbildung 52 Übersicht von Akteuren in der Logistik-Branche



In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Hemmnisse genauer erläutert. Wo möglich, werden betroffene Akteure und Technologien benannt.

3.2.2 Technologiespezifische Hemmnisse

In den nachfolgenden Tabellen werden verschiedene technologiespezifische Hemmnissen aufgelistet. Auf eine kurze Beschreibung folgt eine Auflistung von Technologien und Akteuren, welche beispielhaft durch dieses Hemmnis betroffen sind. Im Anschluss an die Tabellen wird grafisch (Abbildung 53) eingeschätzt, welche der in der vorliegenden Studie untersuchten Technologien durch welche technologiespezifischen Hemmnisse an einer Verbreitung im Markt gehindert werden.

Reduzierte Anwenderfreundlichkeit	
Beschreibung	Technologien können sich negativ auf das Handling des Fahrzeugs, den Fahrerkomfort, den Aufwand zum Betreiben des Fahrzeugs oder auf bestehende Ablaufroutinen auswirken
Betroffene Technologien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Heckeinzüge vergrößern den Wendekreis, erschweren das Rückwärtsfahren und müssen vor dem Andocken an Laderampen demontiert werden. Zudem ist eine korrekte Positionierung notwendig, damit sie ihre volle Wirksamkeit entfalten. ▶ Aerodynamisch vorteilhafte Seiten- und Unterbodenverkleidungen sind anfällig für Beschädigungen und können ggf. den Reparaturbedarf erhöhen [Ricardo-AEA, 2012]. ▶ Aerodynamische Verkleidungen erschweren bei Wartungen und Reparaturen den Zugang zum Fahrzeug [ICCT, 2014a]. ▶ Fahrzeuge mit alternativen Antrieben sind teilweise in der Routenwahl eingeschränkt, da sich diese an der Verfügbarkeit von Tankstellen orientieren muss. Da außerdem häufig die Energiespeicher der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben aus konstruktiven und/oder finanziellen Gründen begrenzt sind, ist die Reichweite oft reduziert [LAO, 2012a]. ▶ Fahrzeuge mit (teil-)elektrischen Antrieben erfordern eine andere Fahrweise als konventionell angetriebene Fahrzeuge, z. B. bei Hybridfahrzeugen das bewusste Nutzbremsen mit geringerer Verzögerung. Dies kann bei Bussen die Umlaufzeit signifikant verlängern ([TU Graz, 2013b], S. 53 ff.).
Betroffene Akteure	Logistik-Anbieter (hier vor allem Fahrer)

Reduktion des Fahrzeugnutzens bei aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen

Beschreibung	Technologien scheitern an gesetzlichen Voraussetzungen oder reduzieren, um den gesetzlichen Rahmen zu wahren, den Nutzen eines Fahrzeuges [Ricardo-AEA, 2012]
Betroffene Technologien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Alle Technologien, welche die räumlichen Abmessungen (Länge, Höhe und Breite) sowie die Masse des Fahrzeuges vergrößern würden. Im Fall des Fahrzeuggewichtes reduziert sich die Nutzlast, im Fall der Abmessungen reduziert sich das nutzbare Volumen (Heckverlängerungen über 0,5 m sind gesetzlich nicht zulässig). ▶ Fahrzeuge mit CNG-, LNG- oder batterieelektrischen Antrieben haben vergleichsweise geringe Reichweiten. Für die gleiche Reichweite wie ein Dieselfahrzeug sind größere Tanks/Batterien erforderlich. In der Praxis wird die Tankgröße häufig limitiert, um nicht zu viel Volumen und Masse einzunehmen sowie um die Zusatzkosten im Rahmen zu halten.
Betroffene Akteure	Alle Logistik-Anbieter, welche volumen- und massenkritische Transporte haben

Fehlende Energie-Versorgungsinfrastruktur

Beschreibung	Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (CNG, LNG, Strom) erfordern eine zusätzlich Energie-Versorgungsinfrastruktur (insb. Tankstellen), damit sie effizient eingesetzt werden können [LAO, 2012a].
Betroffene Technologien	LNG-, CNG- und batterieelektrische Fahrzeuge
Betroffene Akteure	Logistik-Anbieter, die Fahrzeuge mit alternativen Antrieben in der Flotte nutzen

Fehlendes Service-Netz

Beschreibung	Der Einsatz neuer Technologien erfordert, dass Werkstätten mit entsprechenden (Spezial-)Werkzeugen ausgestattet sind und das Personal für die Wartung und Reparatur dieser Technologien ausgebildet ist. So sind für Arbeiten an Hybrid- und Batteriefahrzeugen Schulungen und spezielle Sicherheitsvorkehrungen im Umgang mit Hochspannungssystemen durchzuführen.
Betroffene Technologien	LNG- und CNG-Fahrzeuge (Arbeiten mit Tieftemperaturen und hohen Drücken); Hybrid- und Batteriefahrzeuge (Arbeiten an Hochspannungsanlagen); ORC (neue Bauteile, Hochdruckprozess, Arbeitsfluide)
Betroffene Akteure	Werkstätten (insbesondere freie Werkstätten)

Nachrüstung nicht möglich oder sehr aufwändig

Beschreibung	Technologien, die ab Werk in Neufahrzeugen verbaut sind, sind nicht immer für eine Nachrüstung geeignet bzw. nur mit großen Aufwand in ein bestehendes Fahrzeug zu integrieren. Dadurch können solche Technologien nur über Neufahrzeuge in den Markt integriert werden.
Betroffene Technologien	z.B. Hybrid- und elektrische Antriebe; Verbesserungen am Dieselmotor;
Betroffene Akteure	Alle Logistik-Anbieter, deren Fahrzeuge eine lange Laufzeit haben bzw. die Gebrauchtfahrzeuge einsetzen

Fehlende Kompatibilität zu weltweiten Standards

Beschreibung	Ein hoher Standardisierungsgrad ermöglicht es, Technologien weltweit einzusetzen. Wenn neue Technologien inkompatibel zu diesen Standards sind, reduzieren sie ggf. die Nutzbarkeit des Fahrzeugs.
Betroffene Technologien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Wenn Anbauten an Aufliegern die Abmessungen verändern, kann dies ggf. die Einsetzbarkeit im kombinierten Straßen-Schienen-Verkehr reduzieren, da beispielsweise die Kranbarkeit nicht mehr gegeben ist. ▶ Aerodynamische Veränderungen an Standard-Auflieger sind ebenfalls nur begrenzt möglich (z.B. Kompatibilität von Heckeneinzügen mit Laderampen).
Betroffene Akteure	Logistik-Anbieter von Container-Transporten im Kombiverkehr (Bahn und Schiff)

Wechselnde Nutzungsprofile

Beschreibung	Einige Technologien sind nur unter bestimmten Einsatzbedingungen sinnvoll und können unter anderen Bedingungen Nachteile haben. In solchen Fällen reduziert sich mit der Technologie die Einsatzmöglichkeit des Fahrzeugs.
Betroffene Technologien	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Aerodynamik-Anbauten, welche im Fernverkehr sinnvoll sind, können im Stadtverkehr die Manövriertbarkeit beeinträchtigen und bringen in diesem Fahrprofil keine Kraftstoffeinsparungen; ▶ Fahrzeuge mit LNG- und CNG-Betrieb können nur in Gegenden bzw. entlang von Strecken mit einer entsprechenden Versorgungsinfrastruktur eingesetzt werden
Betroffene Akteure	Betreiber von Fahrzeugen, die vielfältig eingesetzt werden.

In der nachfolgenden Grafik wird zusammenfassend dargestellt, welche Technologien durch welche Hemmnisse an einer Verbreitung im Markt gehindert werden. ROT zeigt an, dass dieses Hemmnis auf eine Technologie deutlich zutrifft, während ORANGE andeutet, dass hier eine leichte Hemmniswirkung vorliegt. GRÜN zeigt an, dass keine Hemmniswirkung gesehen wird.

Abbildung 53 Übersicht technologiespezifischer Hemmnisse für die ausgewählten Energiespar- und Treibhausgasminderungstechnologien

		Hemmnis	Reduktion des Fahrzeugnutzens	Reduzierte Anwenderfreundlichkeit	Fehlende Energie-Versorgungsinfrastruktur	Fehlendes Service-Netz	Nachrüstbarkeit	Fehlende Kompatibilität	Wechselnde Nutzungsprofile
		Technologie							
Antrieb	Verbesserung Dieselmotor								
	Abgaswärmennutzung durch ORC		■					■	
	LNG-Antrieb	■		■	■	■	■		■
	CNG	■		■	■	■	■		■
	Hybrid-Antrieb parallel	■		■	■	■	■		■
	Hybrid-Antrieb seriell	■		■	■	■	■		■
	BEV	■	■	■	■	■	■		■
	BEV mit Zwischenladung	■	■	■	■	■	■		■
	Getriebeeverlust vermindern								
Aerodynamik	Achsgetriebeeverlust vermindern								
	BellyBox		■					■	
	Windleitbleche								
	Abgerundete Vorderkanten am Koffer						■	■	
	Heckeneinzug 0,5 m			■					
	Heckeneinzug 1 m		■	■					
	Kamera				■				
Reifen	Frontverlängerung					■		■	
	Energieeffiziente Reifen			■					
	Einzelbreitreifen			■					
Leichtbau	Leichtbau						■		
Fahrzeug-Regelung	Geschwindigkeitsbegrenzer			■					
	Start-Stopp-Automatik								
Nebenverbraucher	Kompressor mit Kupplung								
	variable Lenkhilfepumpe								
	LED-Vollausstattung								
	3-stufiger Klimakompressor								
	Thermoverglasung					■			

3.2.3 Finanzielle Hemmnisse

Neue Technologien, die erst in geringen Stückmengen hergestellt werden, haben oft hohe **Anschaffungskosten**. Dies ist unabhängig davon, ob die Technologien in Neufahrzeugen eingebaut oder nachgerüstet werden. Neben den Kosten für die Technologie selbst besteht zudem ein Aufwand für die Informationsbeschaffung bzw. Beratung [NACFE, 2013]. Bei einer Nachrüstung fallen zusätzliche Kosten für den Ein- oder Umbau sowie für die Ausfallzeit des Fahrzeuges an. Mit der neuen Technologie können dann weitere Kosten für Wartung und Reparaturen anfallen [CE Delft, 2012b] [NACFE, 2013].

Mit diesem Hemmnis sind vor allem kleine Unternehmen konfrontiert, welche nur über begrenzte finanzielle Mittel verfügen und einen schlechteren Zugang zu Krediten haben. Zudem fehlt es hier an Personalkapazitäten, um sich intensiv mit der Anschaffung neuer Effizienz-Technologien zu beschäftigen [NACFE, 2013].

Wenn Technologien noch sehr neu sind, ist die **Ausfallwahrscheinlichkeit** höher. Ist die Technologie für den Betrieb des Fahrzeugs notwendig, führt ein Versagen zum Ausfall des Fahrzeugs. In ungünstigen Fällen können Kundenaufträge nicht bearbeitet werden, was Vertragsstrafen und den Verlust des Kunden zur Folge haben kann. Da Logistik-Anbieter in der Regel auf zeitliche Zuverlässigkeit setzen, könnten diese gehemmt sein, in derartige Technologien zu investieren [CE Delft, 2012b].

Je nach Halter des Fahrzeuges gibt es unterschiedliche Anforderungen an die **Amortisationszeiten**. Je kürzer Fahrzeuge gehalten werden (in der Regel bei großen Speditionen), desto schneller müssen sich Investitionen in neue Technologien amortisieren. Sind die finanziellen Ersparnisse, die sich während der Nutzung aus der Technologie in dieser Zeit ergeben, kleiner als die anfangs getätigte Investition, ist dies ein Hemmnis. Insbesondere bei stark Rendite-orientierten Firmen nimmt die Amortisationszeit eine wichtige Rolle ein [ebd.].

Eine weitere Unsicherheit besteht zur Höhe der **Wiederverkaufswertes**. Viele Fahrzeuge werden im Ausland weiterbetrieben. Bei Fahrzeugen, die auf einen Energieträger angewiesen sind, der noch nicht flächen-deckend angeboten wird (CNG und LNG), ist unklar, wie groß die Nachfrage auf dem Gebrauchtmärkt sein wird und welche Wiederverkaufspreise erzielt werden können. Ähnliches gilt für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, bei denen u. a. der Zustand der Batterie entscheidend sein kann für den Wiederverkaufswert.

Herstellerseitige Hemmnisse: Die hohen Anschaffungskosten für zusätzliche energiesparende Technologien bei Nutzfahrzeugen, insbesondere im Vergleich zur Pkw-Branche, resultieren auch aus den deutlich geringeren produzierten Stückzahlen in Kombination mit hohen Entwicklungskosten. Wenn eine neue Effizienz-Technologie zudem nur für Fahrzeuge mit einem bestimmten Einsatzzweck und einer bestimmten Fahrleistung in Frage kommt, reduziert sich die potenziell verkäufliche Stückzahl weiter. Entsprechend ist gerade bei Entwicklung aufwändiger Technologien auch ein eher zurückhaltendes Herangehen der Hersteller nachvollziehbar.

3.2.4 Strukturelle Hemmnisse

Unter strukturellen Hemmnissen werden solche verstanden, die sich aus den in der Logistik-Branche vor-herrschenden Strukturen ergeben. Zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist die Bedeutung der Kraftstoffkosten für die Fahrzeugbetreiber, abhängig einerseits vom Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten des Betriebs und andererseits von der „Kraftstoff-Verantwortlichkeit“, d.h. wer letztlich die Kraftstoffkosten der Transportdienstleistung zu tragen hat.

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass der Anreiz für eine Investition in Energieeffizienz-Technologien umso höher ist, je größer der Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten der Dienstleistung ist. Nachfolgend wird die Rolle der Kraftstoffkosten betrachtet. Der Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsor-gung stellt auf seiner Internetseite einen Kostenentwicklungsrechner zu Verfügung, mit dem sich die Kostenstrukturen im Fern-, Regional- und Nahverkehr vergleichen lassen. Für das Jahr 2013 gibt der Rechner fol-gende Anteile der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten an [BGL e.V., 2014]:

- ▶ Nahverkehr: ca. 13 %
- ▶ Regionalverkehr: ca. 20 %
- ▶ Fernverkehr: ca. 26 %

Die Studie [Goodyear Dunlop, 2012] kommt in einer Befragung zu einer ähnlichen Größenordnung und weist 30 % Kostenanteil für Kraft- und Schmierstoffe im Fernverkehr aus. Daraus wird ersichtlich, dass Kraftstoffkosten und damit Energieeffizienz-Technologien insbesondere für den Fernverkehr und Regionalverkehr, aber weniger für den Nahverkehr prinzipiell eine große Rolle spielen sollten. Allerdings gibt es verschiedene Mechanismen, die dem entgegenwirken [CE Delft, 2012b]:

- 1) Der Verursacher trägt nicht die Kosten: Zwar verbraucht der Fuhrunternehmer die Energie, die Bezahlung erfolgt aber durch den Auftraggeber. Sofern dieser nicht Anforderungen an die Effizienz des Transportes stellt, ist der Fuhrunternehmer nicht veranlasst, in neue Technologien zu investieren und reicht statt dessen die entstandenen Kraftstoffkosten weiter. Dies zeigt auch die Umfrage in [Goodyear Dunlop, 2012], nach der nur 19 % der Befragten starken bis sehr starken Druck seitens der Kunden erfahren.
- 2) Dieselpreis-Gleitklausel: Damit Fuhrunternehmen vor schwankenden Kraftstoff-Kosten geschützt sind, wurde ein Instrument eingeführt, das sich Dieselpreis-Gleitklausel nennt. Danach werden Transportverträge zu einem festen Preis vereinbart. Steigt jedoch zwischen der Beauftragung und der tatsächlich durchgeführten Transportdienstleistung der Dieselpreis, kann der Fuhrunternehmer die zusätzlichen Kosten an den Auftraggeber weitergeben. Auch dieser Mechanismus reduziert den Anreiz zu Effizienz-Maßnahmen.
- 3) Mieter-Vermieter-Dilemma: Zwar hat ein Mieter Interesse daran, energieeffiziente Fahrzeuge und Anhänger/Auflieger zu leihen, um geringe Kraftstoffkosten zu erreichen. Da jedoch der Vermieter von den im Betrieb entstehenden Ersparnissen nicht profitiert, fehlt ihm der Anreiz, in Effizienz-Maßnahmen zu investieren [Carbon War Room, 2012].
- 4) Lieferketten: Transporte auf der Straße sind häufig in Lieferketten eingebunden, denen Transportwege auf dem Meer und der Schiene vorausgehen bzw. folgen. Innerhalb dieser Lieferketten verursacht der Transport auf der Straße einen kleineren Anteil an den Gesamtkosten. Mit sinkendem Anteil der Kraftstoff-Kosten sinkt aber auch der Anreiz zu Effizienzmaßnahmen.

Indem der Fuhrunternehmer, bei dem die Kraftstoffkosten direkt anfallen, seine Kosten an den Auftraggeber weitergeben kann, gibt er auch die Kraftstoff-Verantwortlichkeit weiter. Je weiter jedoch diese Verantwortlichkeit abgegeben wird, desto geringer wird der Anreiz für Effizienzmaßnahmen im Fuhrpark des Fuhrunternehmers. Umgekehrt hat ein kleiner Auftraggeber einem großen Auftragnehmer gegenüber weniger Möglichkeiten zur Einflussnahme hinsichtlich der Verwendung von Energieeffizienz-Technologien.

3.2.5 Informationsverfügbarkeit

Unter der Voraussetzung, dass ein Fuhrparkbetreiber grundsätzlich ein Interesse an Energieeffizienz-Technologien hat, steht er vor folgenden Herausforderungen:

- a) Zunächst hat er den Aufwand der Informationsbeschaffung (siehe auch 3.2.3).
- b) Die Beschaffung glaubwürdiger Informationen gestaltet sich als schwierig, da es derzeit kein allgemein anerkanntes Verfahren zur Ermittlung der CO₂-Ersparnis einer Technologie gibt. Vorliegende Verbrauchsminderungen aus Tests werden in der Realität oft nicht erreicht [NACFE, 2013]. Entsprechend gering ist das Vertrauen potentieller Kunden in die Angaben zu Einsparpotenzialen [CE Delft, 2012b]. Eine Standardisierung wird derzeit mit VECTO verfolgt, weist jedoch bisher Einschränkungen auf, v.a. da eine große Vielfalt an Nutzfahrzeugkombinationen und Fahrprofilen vorliegt und bisher nicht alle Technologien mit VECTO abgebildet werden können (siehe Kapitel 2.4.1).
- c) Neben verlässlichen Angaben zu möglichen Energie-Einsparpotenzialen einer Technologie steht für den potentiellen Käufer das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vordergrund (Amortisationsrechnung). Das Kosten-Nutzen-Verhältnis wiederum erfordert die Beurteilung folgender Parameter:
 - a. Wie entwickeln sich die Treibstoffkosten durchschnittlich in den nächsten Jahren?
 - b. Welche Fahrleistungen haben meine Fahrzeuge in den zukünftigen Jahren (oder: Wie entwickelt sich das Unternehmen in den nächsten Jahren?)

- c. Welche durchschnittlichen Verbräuche haben meine Fahrzeuge aktuell? Verfüge ich über ein gutes Kraftstoff-Monitoring?

- d. Wie entwickeln sich die politischen Rahmenbedingungen: Wie lange bleibt z. B. in Deutschland die Begünstigung von Erdgas bei der Energiesteuer erhalten?

Insbesondere kleine Unternehmen führen oftmals kein Monitoring der Kraftstoffverbräuche durch und sind damit kaum in der Lage, das Kosten-Nutzen-Verhältnis zusätzlicher Technologien zu bestimmen.

- d) Wenn es um die Finanzierung geht, kann die fehlende Kenntnis der Förderlandschaft die Investition scheitern lassen.
- e) Nach Anschaffung einer neuen Technologie steht der Betreiber vor der Aufgabe, Fahrer und Werkstatt darauf vorzubereiten (siehe auch Versorgungsinfrastruktur in 3.2.2).

Die eingangs genannte Voraussetzung eines grundsätzlichen Interesses eines Fuhrparkbetreibers an energie sparenden Technologien ist umso mehr gegeben, je wichtiger die Transportdienstleistung für die Geschäftstätigkeit des Unternehmens ist. Im umgekehrten Fall, in dem die Energiekosten einen geringen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen, sinkt nach [Ecofys Germany, 2007] die Priorität für Effizienz-Maßnahmen.

3.2.6 Bewertung der Hemmnisse

In der Bewertung der Hemmnisse wird zwischen den technologiespezifischen Hemmnissen und den übrigen differenziert. Die Beurteilung der Relevanz technologiespezifischer Hemmnisse hängt stark davon ab, wie wichtig die Technologie aus Sicht von Politik, Wirtschaft und Umwelt eingestuft wird. Die übrigen Hemmnisse betreffen überwiegend alle Technologien.

Abbildung 53 gibt bereits einen Überblick der technologiespezifischen Hemmnisse. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Hemmnissen mit einer ausschließenden und einer verzögernden Wirkung.

- Eine fehlende Versorgungsinfrastruktur insbesondere für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben ist ein ausschließendes Hemmnis. Wenn das Tankstellennetz für CNG- und LNG-Fahrzeuge nicht ausgebaut wird, werden diese Technologien nicht stärker den Markt durchdringen können. Auch für batterieelektrische Fahrzeuge bedarf es eines forcierten Ausbaus einer Ladeinfrastruktur, wenn diese Technologien stärker nachgefragt werden sollen.
- Die Einschränkung des Fahrzeugnutzens durch Technologien muss intensiv im Einzelfall geprüft werden. Hier kommt es sehr auf die Transportgüter (Volumen oder Masse) sowie auf die Distanzen (Nah vs. Fern) an, wie stark der eingeschränkte Nutzen sich im Vergleich zu den Vorteilen auswirkt.
- Die reduzierte Anwenderfreundlichkeit ist durchaus problematisch, kann allerdings in vielen Fällen mit verhältnismäßig einfachen Maßnahmen, wie z. B. Schulungen, bearbeitet werden.
- Die Kompatibilität zu weltweiten Standards betrifft vor allem aerodynamische Maßnahmen – insbesondere Anbauten am Fahrzeugheck und die Verkleidung von Aufliegerseiten und -unterboden. Hier bedarf es teilweise noch weiterer Entwicklungen, um das gängige Container-Format mit Effizienztechnologien auszustatten, ohne Anwenderfreundlichkeit oder Fahrzeugnutzen (z. B. Kranbarkeit) zu reduzieren.
- Eine aufwändige Nachrüstung betrifft nur wenige Technologien und ist daher eher vernachlässigbar.
- Wechselnde Lkw-Nutzungsprofile werden als Hemmnis von geringer Bedeutung eingeschätzt, da die meisten Nutzfahrzeuge bei einem Betreiber ein verhältnismäßig konstantes Nutzungsprofil haben. Beim Weiterverkauf des Lkw spielt das Nutzungsprofil allerdings eine entsprechende Rolle und nur Anwender werden adäquate Preise zahlen, deren Nutzungsprofil zu eingesetzten Technologie kompatibel ist.

Die weiteren Technologie-unabhängigen Hemmnisse sind stärker im Zusammenhang zu betrachten. In einer Umfrage für den TÜV SÜD wurden 200 Fuhrunternehmen befragt. Darin maßen 76 Prozent der Befragten dem Thema Energieeffizienz einen hohen Stellenwert bei [Technomar GmbH, 2012]. Demnach ist davon auszugehen, dass grundsätzlich bei Fuhrunternehmen ein Bewusstsein für die Bedeutung energiesparender Technologien vorhanden ist. Als das zentrale Hemmnis für deren breitere Implementierung in den eingesetz-

ten Fahrzeugen wird die fehlende Verfügbarkeit glaubwürdiger Informationen gesehen. Wie unter 3.2.5 aufgeführt, ist das Wissen über das Einsparpotenzial einer Technologie elementar zur Berechnung eines Kosten-Nutzen-Verhältnisses und damit der Amortisationszeiten. Das Fehlen von Wirtschaftlichkeitsberechnungen wiederum erschwert die Beschaffung von Kapital für die zusätzlichen Anschaffungskosten. Vor allem kleine Firmen sind aufgrund geringer personeller und finanzieller Kapazitäten gehemmt, in neue Technologien zu investieren. Ergänzend ist auch eine geringere Verlässlichkeit neuer Technologien eine wesentliche Barriere aus Sicht der Fahrzeugbetreiber.

Die Umfrage in [Goodyear Dunlop, 2012] offenbart, dass für 40 % der 400 Befragten fehlende finanzielle Mittel das Haupthindernis für die Anschaffung neuer Lkw mit einer besseren Kraftstoffeffizienz sind. Für 28 % lag das größte Hemmnis im fehlenden Knowhow. Nach Aussage von [CE Delft, 2012b] haben die Interviews nicht gezeigt, dass die Weitergabe der Kraftstoff-Verantwortlichkeit eine große Barriere wäre.

3.3 Maßnahmen für eine Förderung des Einsatzes energieverbrauchs- und treibhausgasreduzierender Technologien

Ausgehend von Hemmnisanalyse werden Maßnahmen untersucht, wie die Einführung kraftstoffsparender Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen und deren Durchdringung der Fahrzeugflotte gefördert werden kann. Dabei werden insbesondere politische Anreize zur grundsätzlichen Steigerung der Kraftstoffeffizienz im Straßengüterverkehr beleuchtet. Vor- und Nachteile verschiedener Maßnahmen werden erörtert und ihre Akzeptanz und Wirksamkeit bei den Akteuren diskutiert. Die gesammelten Maßnahmen bilden die Grundlage für die im anschließenden Kapitel entwickelte Roadmap.

Die Maßnahmen werden entsprechend ihres Wirkungsansatzes in drei Gruppen eingeordnet:

- ▶ **Information:** umfasst Maßnahmen zur Bereitstellung und Verbreitung von Informationen;
- ▶ **Förderung:** umfasst Maßnahmen, die auf eine finanzielle Unterstützung hinauslaufen.
- ▶ **Regulierung:** umfasst Maßnahmen, welche auf Änderungen im Gesetz hinwirken;

Jede Maßnahme wird nachfolgend in Maßnahmenblättern über ihren Wirkungsansatz sowie die adressierten Hemmnisse charakterisiert. Weiterhin wurden Zielgruppen sowie notwendige Voraussetzungen und Akteure für die Umsetzung (siehe auch Übersicht in 3.2.1) identifiziert. Neben ersten Ideen zur Umsetzung werden gegebenenfalls vorhandene Voraussetzungen identifiziert. In einer SWOT-Analyse werden Stärken und Schwächen der Maßnahme sowie Chancen und Risiken, welche sich aus den derzeit gegebenen Rahmenbedingungen ergeben, benannt.

Eine politische Maßnahme ist von zentraler Bedeutung und wird daher an dieser Stelle vorweg genommen. Entscheidend für die Verbreitung von Effizienz-Maßnahmen ist ein verlässlicher politischer Rahmen. Nfz-Hersteller, Technologie-Entwickler und Nfz-Nutzer sind auf verlässliche Aussagen angewiesen, etwa zu Fragestellungen bezgl. der Maut, der Steuern, des Emissionshandels, der Kraftstoffversorgung und verpflichtender Treibhausgasminderungsziele. Nur mit klaren Rahmenbedingungen können Investitionen in Forschung und Entwicklung auf Seiten der Entwickler sowie in neue Nutzfahrzeuge mit effizienten Technologien auf Seiten der Nutzer getätig werden.

3.3.1 Informationsmaßnahmen

- ▶ Entwicklung eines standardisierten CO₂-Testverfahrens
- ▶ CO₂-Pflichtkennzeichnung von neuen Fahrzeugen
- ▶ freiwillige CO₂-Zertifizierung für Einzeltechnologien
- ▶ Nutzfahrzeug-Effizienzberater
- ▶ Durchführung von Messen, Road-Shows und Wettbewerben

Potenzielle Käufer sind auf zuverlässige und transparente Informationen zu Einsparpotenzialen und Kosten einer Technologie angewiesen, um Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchführen zu können. Nur so können Fahrzeugbetreiber ermitteln, ob sich die Investition in eine Technologie in der von ihnen anvisierten Zeit amortisiert. Dazu bedarf es eines **standardisierten CO₂-Testverfahrens**, mit dem sowohl Nutzfahrzeuge als auch Einzeltechnologien realitätsnah simuliert werden können. Geeignete abgestimmte Methoden und Modelle sind bereits bei der Europäischen Kommission in Entwicklung (vgl. Kap. 2.4.1). Aufgrund der Vielfalt von Technologien können derzeit aber noch nicht alle Technologien und deren Kombinationen simuliert werden. Es wird daher die Weiterentwicklung von Methoden empfohlen, mit dem Ziel, möglichst alle heute verfügbaren aber auch zukünftige Technologien nach klaren Standards modellieren zu können.

Im nächsten Schritt kann aufbauend auf einem Testverfahren eine **Zertifizierung** eingeführt werden, um die Informationen zum Einsparpotenzial transparent und verständlich darzustellen. Dies könnte beispielsweise analog zur Kennzeichnung von Reifen in Form von Effizienz-Klassen passieren. Für neue Nutzfahrzeuge sollte eine verpflichtende Verbrauchskennzeichnung eingeführt werden. Ergänzend sollte die Zertifizierung einzelner Zusatztechnologien auf freiwilliger Basis möglich sein.

Auch bei entsprechender Informationsverfügbarkeit ist deren Zusammenstellung und die Erstellung von Amortisationsrechnungen insbesondere für kleinere Unternehmen weiterhin ein erheblicher Aufwand. Daher wird als flankierende Maßnahme die Ausbildung von **Nutzfahrzeug-Effizienzberatern** vorgeschlagen, die Unternehmen bei der Anschaffung von Effizienz-Technologien herstellerunabhängig beraten. Über allgemeine **Informationsveranstaltungen** (Messen, Road-Shows) besteht zudem die Möglichkeit, ein breites Publikum über Effizienz-Möglichkeiten in der Nutzfahrzeugbranche zu informieren.

Informationen		MI 01
Maßnahme	Entwicklung standardisierter CO₂-Testverfahren	
Wirkungsansatz	Bereitstellung zuverlässiger Informationen zu Einsparpotenzialen	
Adressierte Hemmnisse	Fehlende, transparente und vergleichbare Bewertung von Effizienz-Technologien hinsichtlich Energie- und CO ₂ -Einsparpotenziale	
Zielgruppe	Nfz-Hersteller, Technologie-Entwickler, Modell-Entwickler	
Akteur	EU-Kommission	
Voraussetzung	Nfz-Hersteller und Technologie-Entwickler unterstützen den Prozess und stellen Daten für die Modellierung zur Verfügung	
Umsetzung	Es werden Mittel zur Verfügung gestellt, um Simulations-Modelle für eine standardisierte Verbrauchserfassung von Nutzfahrzeugen und Einzeltechnologien zu entwickeln.	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - Ein Europäisches Verfahren zur CO₂-Zertifizierung ist in Erarbeitung, erste Modelle für ausgewählte Fahrzeugklassen und Einsatzzwecke sind bereits verfügbar (z. B. VECTO, vgl. Kap. 2.4.1), auf die aufgebaut werden kann. - Bereits heute ist eine Vielzahl von Eingaben für eine differenzierte Erfassung unterschiedlicher Fahrzeuge möglich. - Relativunterschiede bei Änderung von Komponenten am Fahrzeug werden zuverlässig wiedergegeben. 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Die Verbrauchssimulationen bisheriger Modelle sind z. T. noch ungenau in Bezug auf den Absolutwert. - Es können noch nicht alle Technologien simuliert werden. 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Die Maßnahme wird von der EU gefördert und ist damit ausgelegt, auch über einzelne Staaten hinaus anerkannt zu werden. - Technologie-Entwickler und Nfz-Hersteller sind bereits in diese Maßnahme eingebunden und unterstützen den Prozess von ihrer Seite mit Daten. 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - mangelnde Versorgung mit Industriedaten aufgrund von Vertraulichkeitsbedenken - mangelnde Bekanntheit / Akzeptanz bei den Fahrzeugkäufern 	
Sonstiges		

Informationen		MI 02
Maßnahme	CO₂-Pflichtkennzeichnung von neuen Nutzfahrzeugen	
Wirkungsansatz	Allgemein verständliche, transparente Darstellung des Einsparpotenzials von neuen Nutzfahrzeugen	
Adressierte Hemmnisse	Geringe Informationsverfügbarkeit; fehlende, transparente Vergleichbarkeit der Effizienz von neuen Nutzfahrzeugen	
Zielgruppe	Nfz-Hersteller, -Nutzer	
Akteur	EU-Kommission; Technologie-Entwickler; unabhängige zertifizierende Institution	
Voraussetzung	MI 01: Eine Zertifizierung kann nur erfolgen, wenn ein allgemein anerkanntes und einheitliches CO ₂ -Testverfahren zur Verfügung steht.	
Umsetzung	Entwurf eines Kennzeichnungs-Schemas (Label oder Informationsblatt), in dem wichtige Kenngrößen zur Beurteilung der Effizienz eines Nfz übersichtlich und vergleichbar dargestellt werden	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - einheitliche, vergleichende Darstellung 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Darstellung ist Kompromiss aus Vereinfachung und Belastbarkeit 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Aktivierung der Marktkräfte durch Beseitigung des Informationsdefizits 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Eine Zertifizierung kann unterschiedlich realisiert werden (siehe dazu Quellenangabe unter Sonstiges). Es ist wichtig, hier ein abgestimmtes Zertifizierungsverfahren zu definieren. 	
Sonstiges	Eine ausführliche Diskussion zu verschiedenen Umsetzungs-Varianten von CO ₂ -Standards und Labels für schwere Nfz findet sich in [CE Delft, 2013a]	

Informationen		MI 03
Maßnahme	Freiwillige CO₂-Zertifizierung für Einzeltechnologien	
Wirkungsansatz	Allgemein verständliche, transparente Darstellung des Einsparpotenzials von neuen Einzeltechnologien	
Adressierte Hemmnisse	Geringe Informationsverfügbarkeit; fehlende, transparente Vergleichbarkeit der Effizienz von neuen Effizienz-Technologien	
Zielgruppe	Nfz-Hersteller, -Nutzer	
Akteur	EU-Kommission; Technologie-Entwickler; unabhängiges zertifizierendes Institut	
Voraussetzung	MI 01: Eine Zertifizierung kann nur erfolgen, wenn ein allgemein anerkanntes und einheitliches CO ₂ -Testverfahren zur Verfügung steht.	
Umsetzung	Entwurf eines Kennzeichnungs-Schemas (Label oder Informationsblatt), in dem wichtige Kenngrößen zur Beurteilung der Effizienz einer Technologie übersichtlich und vergleichbar dargestellt werden	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - einheitliche, vergleichende Darstellung 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Darstellung ist Kompromiss aus Vereinfachung und Belastbarkeit 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Aktivierung der Marktkräfte durch Beseitigung des Informationsdefizits - bietet Technologie-Entwicklern die Möglichkeit den Effizienz-Vorteil ihrer Technologie unter Beweis zu stellen 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Zertifizierung nur sinnvoll, wenn innerhalb jeder Technologiegruppe mehrere Konkurrenz-Produkte zertifiziert werden 	
Sonstiges	Erfahrungen in der Zertifizierung in der Reifen-Industrie	

Informationen		MI 04
Maßnahme	Ausbildung und Entsendung von Nutzfahrzeug-Effizienzberatern	
Wirkungsansatz	Beratung von Fahrzeug- und Flottenbetreibern; Unterstützung bei der Analyse des Fuhrparks und der Suche nach passenden Effizienz-Maßnahmen; Unterstützung bei der Durchführung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen; Unterstützung bei der Beantragung von Fördermitteln	
Adressierte Hemmnisse	Geringe Informationsverfügbarkeit; fehlende Kenntnis in Wirtschaftlichkeitsberechnungen; Unkenntnis der Förderlandschaft	
Zielgruppe	Beratungsbüros, (kleine) Nfz-Betreiber	
Akteur	Bund; Länder	
Voraussetzung	Die Verfügbarkeit von Effizienzkennzeichnungen (MI 02 + 03) würde die Arbeit von Beratern einfacher und glaubwürdiger machen.	
Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellerunabhängige Ausbildung von Beratern zu den Themen Effizienz-Technologien, Wirtschaftlichkeitsberechnung und Fördermittel - Zielgruppenspezifische herstellerunabhängige Beratungsangebote für Firmen zur Unterstützung bei der Anschaffung von Effizienz-Technologien 	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - Individuelle Beratung erhöht die Präsenz des Themas bei den Flottenbetreibern und erhöht die Wahrscheinlichkeit der Umsetzung von Maßnahmen. - Das Angebot richtet sich auch an Betreiber kleiner Flotten. 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Beratung sowie Ausbildung der Berater tendenziell kostenintensiv - Gewährleistung der dauerhaften Unabhängigkeit der Berater von Herstellern, Marken und Zulieferern 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Es können auch Unternehmen mit hoher Hemmschwelle möglicherweise von Effizienzmaßnahmen überzeugt werden. - Beratene Firmen können zu Multiplikatoren werden. 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Beratung wird v. a. von Firmen in Anspruch genommen, die bereits ein hohes Bewusstsein für Effizienzthemen haben – hier sind möglicherweise nur geringe Potenziale zu heben. 	
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> - Ausführung analog zu Energieberatern im Gebäudebereich - Initiierung über Verteilung von Beratungsgutscheinen möglich 	

Informationen		MI 05
Maßnahme	Durchführung von öffentlichen Veranstaltungen wie Messen und Road-Shows zum Thema „Energie-effiziente Nutzfahrzeuge“	
Wirkungsansatz	Information und Öffentlichkeitsarbeit	
Adressierte Hemmnisse	Fehlende Informationen	
Zielgruppe	Berater; Nfz-Nutzer	
Akteur	Technologie-Entwickler, insbesondere Nfz-Hersteller, Bund, Länder, Kommunen	
Voraussetzung		
Umsetzung	<p>Planung und Durchführung öffentlicher Veranstaltungen in verschiedenen Regionen Deutschlands unter Einbindung regionaler Flottenbetreiber</p> <p>Demo-Prüfstände, z. B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - verschiedene Reifen auf Trommelprüfständen im Vergleich - Modell-Sattelzüge mit Aeropaketen in transparenten Vorführ-Windkanälen mit Kraftmessdosen - Vorführ-Messungen auf Rundkurs: <ul style="list-style-type: none"> - SZM mit Live-Verbrauchsmessung - Standard-Auflieger - Standard-Auflieger Reifen A - Aero-Auflieger Reifen A 	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - einfach umzusetzende Maßnahme - Bei Vorführungen sieht die Zielgruppe die Wirksamkeit der Maßnahmen. 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - weiche Maßnahme ohne messbare Wirkung - Kosten für Anschaffung, Betrieb und Wartung der Vorführ-Messtechnik 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - könnte Vernetzung der Akteure verbessern - Aufzeigen von Best-Practice-Anwendungen 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Beteiligung aus Zeitmangel / Desinteresse 	
Sonstiges	<p>Wettbewerb „Energy-efficient Truck of the Year“: Durch Auslobung eines Wettbewerbes, welcher bei erfolgreicher Teilnahme zum grünen Image des Herstellers beitragen kann, werden neue Effizienz-Technologien bekannter gemacht.</p> <p>Der Wettbewerb könnte auch auf einzelne Baugruppen (Antrieb, Aufbauten, ...) ausgeweitet werden.</p>	

3.3.2 Fördernde Maßnahmen

- ▶ Auflegung von Förderprogrammen
- ▶ Energiespar-Contracting
- ▶ Förderung F&E
- ▶ Förderung der Werkstätten-Ausbildung im Umgang mit alternativen Antrieben
- ▶ Ausbau Tankstellennetz für CNG, LNG und Strom

Auch bei gegebener Wirtschaftlichkeit können hohe Anschaffungskosten ein Hinderungsgrund für die Investition in zusätzliche energiesparende Technologien beim Fahrzeugkauf sein. Geeignete Fördermaßnahmen können helfen, diese Schwelle hoher Anschaffungskosten deutlich zu senken. Fördermaßnahmen können vielfältig ausgestaltet werden. Ohne im Detail betrachtet zu werden, sind hier einige Möglichkeiten genannt:

- ▶ **Günstige Investitionskredite:** Bei Aufnahme eines Kredites zur Anschaffung von zertifizierten Effizienztechnologien wird ein günstiger Zins gewährt;
- ▶ **Investitionsprogramme für Kommunen:** Kommunen werden finanziell bei der Umrüstung des eigenen Fuhrparks auf alternative Antriebe unterstützt;
- ▶ Mauterleichterung: Nutzern von Effizienz-Technologien wird ein Bonus auf die Maut angerechnet;
- ▶ **Umweltpremie:** Einführung einer Prämie für die Stilllegung von alten Nutzfahrzeugen bei gleichzeitiger Anschaffung neuer Fahrzeuge, welche vorgegebene Effizienzkriterien erfüllen müssen. Auch damit würde der Absatz angekurbelt werden, was mittelfristig die Produktionskosten senken sollte.

Zudem können **Förderprogramme** gezielt die Einführung von heute noch nicht wirtschaftlichen, aber politisch gewollten Technologien unterstützen. Die damit erreichbare Steigerung der Produktionszahl und damit verbundene Lerneffekte können zu einer Verringerung der spezifischen Herstellungskosten und damit längerfristig zur Senkung der Anschaffungskosten führen. Auch **Forschung und Entwicklung** bei Technologie-Herstellern können gefördert werden, um Marktverfügbarkeit, Funktions-Zuverlässigkeit und wirtschaftliche Preise früher zu erreichen.

Neben staatlich finanzierte Förderung könnte auch ein privates **Energiespar-Contracting** erfolgen. Private Investoren übernehmen die Anschaffungskosten (bzw. einen Teil davon) der Effizienz-Technologie und werden anschließend an den damit erreichten Kosteneinsparungen beteiligt.

Zur Förderung alternativer Antriebe mit Erdgas (CNG, LNG) sollte geprüft werden, in welchem Rahmen die aktuelle **Energiesteuerermäßigung von Erdgas** über das Jahr 2018 hinaus fortgeführt werden kann.

Die alternativen Antriebe stehen vor weiteren Hürden: Bisher fehlt eine ausreichende **Energie-Versorgungsinfrastruktur**. Um die Verbreitung von alternativen Antrieben zu forcieren, könnte die Erweiterung von Tankstellen mit Zapfsäulen für Erdgas (CNG, LNG) und mit Stromladesäulen vorangetrieben werden. Zudem könnte der Aufbau eines flächendeckenden **Service-Netzes für Wartungen und Reparaturen** unterstützt werden. Solange es zu wenige Fahrzeuge mit neuen Energiespar-Technologien gibt, werden Werkstätten kaum in die Fortbildung ihrer Mitarbeiter und Anschaffung neuer Werkzeuge investieren. Andersherum sind Käufer gehemmt, in neue Technologien zu investieren, wenn ein passendes Service-Netzwerk nur rudimentär ausgebildet ist. Mit einer Maßnahme zur Unterstützung von Werkstätten beim Aufbau von Kompetenzen im Umgang mit alternativen Antrieben kann diesem Hemmnis entgegengewirkt werden.

Förderung	MF 01
Maßnahme	Auflegung von Förderprogrammen
Wirkungsansatz	Gezielte finanzielle Unterstützung beim Kauf bestimmter Technologien
Adressierte Hemmnisse	Hohe Anschaffungskosten in der Einführungsphase einer neuen Technologie
Zielgruppe	Nfz-Käufer, Technologie-Entwickler
Akteur	Bund (KfW); Länder
Voraussetzung	MI 02 + 03 (Zertifizierung) stellen Informationen zur Verfügung, anhand derer sich die Förderung richten kann.
Umsetzung	<ol style="list-style-type: none"> 1) Festlegung zu fördernder Technologien und einer Zielgruppe; Definition von Bedingungen für eine Förderung (z. B. Effizienzklassen) 2) Festlegung der Art des Förderprogramms (vergünstigte Kredite, Übernahme von X % der Anschaffungskosten, Mauterleichterung, steuerliche Vorteile) und des Förderumfangs 3) Bewerbung des Förderprogramms
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - Förderung von Technologien, die aus Sicht der Flottenbetreiber derzeit noch nicht wirtschaftlich sind - vielfältige Ausgestaltung von Förderprogrammen möglich, um individuell Technologien zu stützen
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - verursacht Kosten in der Einführungsphase - erfordert zusätzlichen Aufbau von Bürokratie
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Markthochlauf senkt die Kosten je produzierter Einheit
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Kleineren Flottenbetreibern fehlt das Personal, um sich mit der Förderlandschaft zu beschäftigen und Anträge zu stellen. - Technologiespezifische Förderung kann Fehlanreize setzen.
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> - Mit Förderprogrammen wurde bereits viel Erfahrung im Bereich der erneuerbaren Energie und der Förderung von Effizienz-Technologien in verschiedenen Bereichen (z. B. Gebäude-Heizung, Straßenbeleuchtung) gemacht; die hier gesammelten Erfahrungen lassen sich evtl. auf den Nutzfahrzeugsektor übertragen. - Auflegung eines kommunalen Investitionsprogrammes zur Umrüstung kommunaler Nfz-Flotten auf alternative Antriebe

Förderung	MF 02
Maßnahme	Energiespar-Contracting
Wirkungsansatz	Senkung der Anschaffungskosten von Effizienz-Technologien für den Flottenbetreiber; Teilung des Restrisikos, falls Technologie nicht den erwarteten Kosten-Nutzen-Vorteil bringt
Adressierte Hemmnisse	Hohe Anschaffungskosten; Restrisiko in der Wirtschaftlichkeitsberechnung
Zielgruppe	Nfz-Käufer
Akteur	Private Investoren; Banken
Voraussetzung	MR 02: Durch ein Monitoring kann erst die genaue Ersparnis festgestellt werden, die dann zwischen Betreiber und Investor aufgeteilt werden kann.
Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> - Bewerbung der Idee des Energiespar-Contracting - Bereitstellung von Informationen und Beispielverträgen zum Contracting - ggf. Schaffung eines gesetzlichen Rahmens
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - marktwirtschaftliches Instrument
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexität der Verträge könnte kleine Unternehmen überfordern. - Transaktionskosten mindern die mögliche Gewinnspanne für beide Seiten.
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Betreiber sehen die Potenziale der effizienten Technologie im eigenen Betrieb und werden dadurch überzeugt, zukünftig selber verstärkt zu investieren. - Aus Contracting-Modellen können attraktive Finanzprodukte für umweltbewusste Anleger entstehen.
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - zu wenig Wissen auf Seiten der potentiellen Kontraktoren - Skepsis gegenüber längerer vertraglicher Bindung bei den Flottenbetreibern - Skepsis, weil ein Teil der „Souveränität“ über die Fahrzeuge abgegeben wird
Sonstiges	

Förderung		MF 03
Maßnahme	Förderung von F&E	
Wirkungsansatz	Unterstützung der Technologie-Entwickler, um früher eine Marktreife neuer Technologien zu erzielen	
Adressierte Hemmnisse	Hoher F&E-Aufwand für Technologie-Entwickler	
Zielgruppe	Technologie-Entwickler aus Wirtschaft und öffentlicher Forschung	
Akteur	Bund; Länder	
Voraussetzung		
Umsetzung	1) Festlegung zu fördernder Technologien 2) Festlegung eines Fördervolumens 3) Ausschreibung von Forschungsprojekten	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - Ermöglichung der Forschung an Technologie mit hohem Potenzial, die sich aber für die Hersteller absehbar erst auf längere Sicht rechnen werden 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Nfz-Käufer profitieren nur mit Verzögerung. - Technologien, die bereits weitgehend entwickelt, aber kostenmäßig noch nicht darstellbar sind, profitieren in der Regel wenig davon. 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Durchbrechen von Pfadabhängigkeiten bei der Entwicklung (z. B. durch Förderung der Entwicklung teilelektrischer Antriebe) - je nach Auslegung der Programme evtl. Förderung der Kooperation zwischen den Herstellern 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Förderung von technologischen „Sackgassen“ 	
Sonstiges		

Förderung		MF 04
Maßnahme	Ausbau Tankstellennetz für CNG, LNG und Strom	
Wirkungsansatz	Schaffung von Infrastruktur, welche Voraussetzung für die Nutzung der alternativen Antriebe mit CNG, LNG und Strom ist	
Adressierte Hemmnisse	Fehlende Energie-Versorgungsinfrastruktur	
Zielgruppe	Tankstellenbetreiber; Nfz-Käufer- und -Mieter; Technologie-Entwickler	
Akteur	Bund; Tankstellen-Betreiber; Energie-Lieferanten	
Voraussetzung		
Umsetzung	1) Identifikation von Routen, auf denen Bedarf an einer Versorgung mit CNG, LNG und Strom vorliegt 2) Entwicklung von Konzepten, wie diese Standorte mit CNG und LNG versorgt werden können (via Leitung oder Tanklastzug) 3) Installation der Anlagen	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - Tankstellen-Netz liegt grundsätzlich vor; Investitionen vor allem in zusätzliche „Zapfanlagen“ und Speicher 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - erfordert große Investitionen in die Infrastruktur, von der verhältnismäßig wenige profitieren - Marktfestigung von Erdgas als zusätzlichem Kraftstoff für die nächsten Jahrzehnte 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Diversifizierung der Energieträger; Abhängigkeit vom Erdöl sinkt - Langfristig Einbindung von erneuerbaren Methan möglich 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Je nach Quelle stärkere Abhängigkeit von Ländern, welche LNG und CNG exportieren 	
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> - Die Befreiung von der Mineralölsteuer ist eine weitere Voraussetzung für die Verbreitung von CNG und LNG-Fahrzeugen. - Da ein Tankstellen-Netz nur über einen längeren Zeitraum aufgebaut werden kann, bedarf es kurzfristig vor allem eines politischen Signals, dass eine Verbreitung von CNG- und LNG-Antrieben gewollt ist und gefördert wird. Andernfalls werden Hersteller und Flottenbetreiber nicht das nötige Vertrauen haben, um in diese Technologien zu investieren [Ricardo-AEA, 2012]. 	

Förderung		MF 05
Maßnahme	Förderung der Werkstätten-Ausbildung zu Effizienz-Technologien	
Wirkungsansatz	Schaffung eines Reparatur-Netzwerkes, welches im Umgang mit neuen Effizienz-Technologien geschult ist	
Adressierte Hemmnisse	Fehlendes Reparatur-Netzwerke; insbesondere für alternative Antriebe (CNG, LNG, Hybride, BEV)	
Zielgruppe	Werkstätten, große Flottenbetreiber, Technologie-Entwickler	
Akteur	Technologie-Entwickler; IHK	
Voraussetzung		
Umsetzung	1) Identifikation von neuen Effizienz-Technologien, die besondere Ansprüche (Werkzeug und Ausbildung) an Wartung und Reparatur erfordern 2) Entwicklung und Durchführung eines Fortbildungsangebotes 3) Unterstützung bei der Anschaffung von Spezial-Ausrüstung	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - gutes Servicenetzwerk ist starker Faktor für Akzeptanz, da Verfügbarkeit der Fahrzeuge eine zentrale Rolle spielt 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - Je wirkungsvoller die Effizienztechnologie (z. B. alternative Antriebe), desto höher ist i. d. R. der Aufwand für die Umstellung des Service-Betriebs. 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Frühzeitige Beschäftigung mit neuen Technologien kann Werkstätten einen Wettbewerbsvorteil beim weiteren Markthochlauf der Technologien verschaffen. - Beschäftigung mit Effizienztechnologien bei den Werkstätten kann zu Multiplikatoreffekten führen. 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Ob sich die Investitionen rechnen, hängt vom Erfolg der jeweiligen Technologien ab. 	
Sonstiges		

3.3.3 Regulierende Maßnahmen

- ▶ Anpassung gesetzlicher Rahmenbedingungen, um Sparmaßnahmen zu ermöglichen
- ▶ CO₂-Monitoring-Anreize für Flottenbetreiber
- ▶ verpflichtende Effizienzklassen von Einzeltechnologien
- ▶ bei ausbleibenden Minderungserfolgen: Gesetzliche CO₂-Regulierung für Neufahrzeuge

Einige technische Maßnahmen werden bisher nicht umgesetzt, da die Technologien größer oder schwerer sind als der Dieselantrieb und somit Nutzlast bzw. -volumen stark einschränken würden. Beispielsweise sind alternative Antriebe schwerer und/oder größer als der Diesel-Antrieb. Auch andere Effizienz-Technologien, wie z. B. der ORC, bewirken unter aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen eine verringerte Nutzlast oder im Fall von Aerodynamik-Teilen (z.B. Heckeneinzug mit 1m Länge) ein reduziertes Nutzvolumen. Auch wenn zukünftige technische Entwicklungen diesbezügliche Optimierungen bringen können, wird empfohlen, für solche Technologien über **Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen** zu diskutieren.

Als zweite Maßnahme werden Anreize für ein **Kraftstoff-Monitoring** empfohlen. Nutzfahrzeugbetreiber sollten motiviert werden, regelmäßig über die von ihnen verursachten Emissionen zu berichten. Dies würde ein regelmäßiges Erfassen der Kraftstoffverbräuche bedingen und damit das Bewusstsein für die Bedeutung von Energieeffizienz fördern sowie eine gute Grundlage für Wirtschaftlichkeitsberechnungen schaffen.

Handlungsdruck kann weiterhin durch **verpflichtende Effizienzklassen einzelner Technologien** aufgebaut werden. Von der EU wurde bereits im Jahr 2009 eine Verordnung (EG 661/2009) erlassen, welche den Verkauf von Nutzfahrzeugreifen mit Effizienzklasse schlechter als D ab 1.11.2020 verbieten. Diese Anforderungen könnten zukünftig mit breiter Verfügbarkeit von Effizienzreifen der Klasse A für alle Nutzfahrzeugklassen weiter erhöht werden. Das würde neben der Erstausrüstung neuer Fahrzeuge mit energieeffizienten Reifen auch das Risiko einer Verschlechterung auf ineffiziente Reifen bei späteren Reifenwechseln verringern. Ähnliche Regelungen sind auch für andere Technologien (z.B. Leichtlauföle, Nebenverbraucher) denkbar.

Wenn die oben vorgeschlagenen Maßnahmen eingeführt und ausführlich erprobt wurden und sich dennoch nicht der gewünschte Minderungserfolg einstellt, sollte analog zum Pkw-Sektor die **Einführung einer gesetzlichen CO₂-Regulierung für Nutzfahrzeuge** auf europäischer Ebene diskutiert werden.

Regulierung		MR 01
Maßnahme	Anpassung gesetzlicher Rahmenbedingungen	
Wirkungsansatz	Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen zugunsten des Einsatzes von Effizienz-Technologien, ohne dabei eine Nutzenreduktion des Nutzfahrzeugs zu verursachen	
Adressierte Hemmnisse	Nutzenreduktion eines Fahrzeuges durch Integration von Effizienz-Technologien bzw. Verhinderung von Effizienz-Technologien durch gegebene gesetzliche Rahmenbedingung, z.B. Verringerung von Zuladung und/oder Ladevolumen	
Zielgruppe	Nfz-Käufer und Mieter; Technologie-Entwickler	
Akteur	EU; Bund; Länder	
Voraussetzung	siehe Umsetzung	
Umsetzung	1) Identifikation von Effizienz-Technologien, deren Nutzung <ol style="list-style-type: none"> gesetzlich nicht zulässig ist zu einer Nutzenreduktion des Fahrzeuges führt 2) Überprüfung, inwieweit Änderungen der Gesetze einen Einsatz ermöglichen, ohne dabei den Fahrzeugnutzen einzuschränken oder den Straßenverkehr zu gefährden	
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - Aerodynamik-Maßnahmen, die von Anpassungen der Rahmenbedingungen besonders profitieren würden, haben großes Minderungspotenzial zu relativ geringen Kosten. 	
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - langwieriger Prozess, Vielzahl beteiligter Akteure - Gesetzliche Vorgaben werden durch die Anpassungen tendenziell komplizierter und schwerer zu überprüfen. 	
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - mehr Spielraum bei Entwicklung neuer aerodynamischer Technologien; 	
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - In der Regel würden Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen dazu führen, dass Fahrzeuge größer und schwerer werden; dies könnte zu ähnlichen Diskussionen führen, wie sie im Zusammenhang mit den Lang-Lkw („Gigaliner“) geführt werden. 	
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> - Heckeinzug 0,5 m kürzlich zugelassen - Lockerung von innerstädtischen Nachtfahrverboten für leise Fahrzeuge (z. B. BEV-Verteiler) 	

Regulierung		MR 02
Maßnahme	CO ₂ -Monitoring-Anreize für Flottenbetreiber	
Wirkungsansatz	Flottenbetreiber werden motiviert, ihre Kraftstoffverbräuche systematisch auszuwerten, welche Grundlage für Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind	
Adressierte Hemmnisse	fehlende Auswertungen zum Kraftstoffverbrauch der eigenen Flotte; fehlende Informationen für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung;	
Zielgruppe	Flottenbetreiber	
Akteur	EU-Kommission; Bund	
Voraussetzung		
Umsetzung	1) Festlegung von Bilanzierungsregeln 2) Anreize für die Speditionen zur Meldung ihrer CO ₂ -Emissionen	
Stärken	- Schaffung von Transparenz und Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Transportdienstleistern	
Schwächen	- alleiniger Fokus auf CO ₂ greift zu kurz	
Chancen	- Grundlage für Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Umweltberichte - rückt THG-Emissionen in den Fokus von Flottenbetreibern - Grundlage für Vergleiche der CO ₂ -Effizienz von Transportdienstleistungen (im Rahmen privatwirtschaftlicher Initiativen, z. B. GreenFreight Europe)	
Risiken	- zusätzlicher Aufwand → benachteiligt Betreiber kleiner Flotten	
Sonstiges	Die Maßnahme MI 04 kann bei der Beratung zum CO ₂ -Monitoring unterstützen	

Regulierung	MR 03
Maßnahme	Verpflichtende Effizienzklassen von Einzeltechnologien
Wirkungsansatz	Für die Anschaffung von Technologien wird die Einhaltung bestimmter Effizienzklassen verpflichtend; dadurch können ineffiziente Technologien aus dem Markt gezogen und dafür effiziente Technologien integriert werden
Adressierte Hemmnisse	Geringer Handlungsdruck
Zielgruppe	Nfz-Käufer; Technologie-Entwickler
Akteur	EU; Bund; Länder
Voraussetzung	MI 02 + 03. Einzeltechnologien müssen durch eindeutige Parameter vergleichbar klassifiziert sein. Nur dann können anhand der Klassifizierung verpflichtende Effizienzkriterien festgelegt werden.
Umsetzung	1) Identifikation von Technologien, welche für dieses Vorgehen geeignet sind 2) Entwurf der entsprechenden gesetzlichen Vorschriften
Stärken	- Maßnahme wirkt sicher
Schwächen	- funktioniert nur mit günstigen Technologien - Effektivität von einzelnen Technologien kann sich möglicherweise stark nach Einsatzzweck unterscheiden
Chancen	- schnelle Integration in den Markt möglich
Risiken	- kann das Preisniveau dieser Technologien anheben - Evtl. Härtefallregelung für Firmen nötig, die Investition nicht leisten können
Sonstiges	- Erfahrungen können z. B. aus dem Verbot konventioneller Glühbirnen in der EU gezogen werden. - Eine mögliche Erweiterung der obigen Maßnahme besteht darin, Ver- und Gebote auch auf den Einsatz zu beziehen. So können gezielt Regelungen geschaffen werden, um effiziente Technologien zu fördern und ineffiziente Technologien zu benachteiligen. Beispielsweise können elektrische betriebene Fahrzeuge von innerstädtischen Nachtfahrverboten befreit werden.

Regulierung	MR 04
Maßnahme	Gesetzliche CO ₂ -Regulierung für Neufahrzeuge
Wirkungsansatz	Nfz-Hersteller werden rechtlich verpflichtet, die CO ₂ -Emissionen ihrer Fahrzeuge schrittweise zu reduzieren.
Adressierte Hemmnisse	Fehlender Handlungsdruck
Zielgruppe	Nfz-Hersteller
Akteur	EU; Bund
Voraussetzung	MI 01 + 02: CO ₂ -Emissionen müssen nach einem standardisierten Verfahren erfasst werden können.
Umsetzung	Eine europaweite gesetzliche Regulierung der CO ₂ -Emissionen für Neufahrzeuge sollte angestrebt werden, wenn mit der Einführung und ausführlichen Erprobung alternativer Maßnahmen nicht die gewünschten Minderungserfolge erzielt werden.
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> - verlässlicher Rahmen für technologische Investitionen und Kaufentscheidungen der Betreiber - Unabhängigkeit der Umweltperformance von aktuellen wirtschaftlichen Trends - Gleichbehandlung aller Hersteller - Mit VECTO ist bereits ein leistungsfähiges und weithin anerkanntes Tool zum Benchmarking in Entwicklung.
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> - große Vielfalt bei verfügbaren Lkw-Modellen / Technologien / Einsatzprofilen - schwierig, allgemeingültige Standards zu setzen
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> - Die Entwicklung neuer Technologien kann langfristig den Standort Europas als Hersteller für Nutzfahrzeuge konkurrenzfähig machen. - Die EU kann auf Erfahrungen bei der Einführung von verpflichtenden CO₂ Standards im Pkw-Sektor (inkl. leichter Nutzfahrzeuge) aufbauen.
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> - Durch zu erwartende Verteuerung der Fahrzeuge kann deren Wettbewerbsfähigkeit im außereuropäischen Markt benachteiligt sein.
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> - Japan hat 2007 eine CO₂-Regulierung nach dem Top-Runner-Ansatz auch für schwere Nfz eingeführt [EC, 2014b]. - Eine freiwillige Selbstverpflichtung als Alternative zur Verpflichtung hat möglicherweise die Schwäche, dass die Minderungsziele deutlich abgemildert werden und die Wirkung einer Verpflichtung nicht erreicht würde [ebd.]. - freiwillige Initiativen der Privatwirtschaft (z. B. GreenFreight Europe)

3.4 Strategische Roadmap zur Förderung einer Einführung und Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien

Sowohl die Hemmnisanalyse als auch die Untersuchung der politischen Maßnahmen zeigen, dass es nicht DIE eine Maßnahme zur besseren Integration von Effizienz-Technologien in den Markt gibt. Stattdessen sollte eine Kombination verschiedener Maßnahmen angestrebt werden, die unterschiedliche Hemmnisse und unterschiedliche Zielgruppen adressieren. Abbildung 54 skizziert eine strategische Roadmap, welche die beschriebenen Maßnahmen zusammenführt.

Die Hemmnisanalyse hat gezeigt, dass es einen Bedarf an zuverlässigen und transparenten Informationen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis von Effizienztechnologien gibt. Um den Informationsbedarf zu befriedigen, ist in einem ersten Schritt die Einführung eines standardisierten CO₂-Testverfahrens für alle Nutzfahrzeugklassen notwendig, sowohl für komplette Fahrzeuge als auch für Einzeltechnologien. Mit VECTO wird dieser Ansatz bereits verfolgt, jedoch deckt VECTO bisher nicht alle Technologien ab. Eine Weiterentwicklung von VECTO bzw. die Entwicklung ergänzender Verfahren für nicht mit VECTO simulierbare Technologien ist daher erforderlich. Standardisierte Testverfahren bilden die Grundlage für eine Reihe weiterer Maßnahmen, dieser Zusammenhang wird durch die einheitliche blaue Färbung in der Grafik verdeutlicht.

Eine zentrale Maßnahme ist die CO₂-Kennzeichnung von Nutzfahrzeugen bzw. Einzeltechnologien. Für neue Nutzfahrzeuge sollte eine verpflichtende CO₂-Zertifizierung angestrebt werden. Bei (insb. nachrüstfähigen) Einzeltechnologien ist eine freiwillige Zertifizierung denkbar, mit der die Hersteller den Einspareffekt ihrer Technologie belegen können. Eine solche Zertifizierung ermöglicht das Auflegen von zielgerichteten Förderprogrammen, um das Hemmnis hoher Investitionskosten bei der Anschaffung neuer Fahrzeuge bzw. Nachrüstung des Fahrzeugbestands mit energieverbrauchs- und treibhausgasmindernden Technologien zu reduzieren.

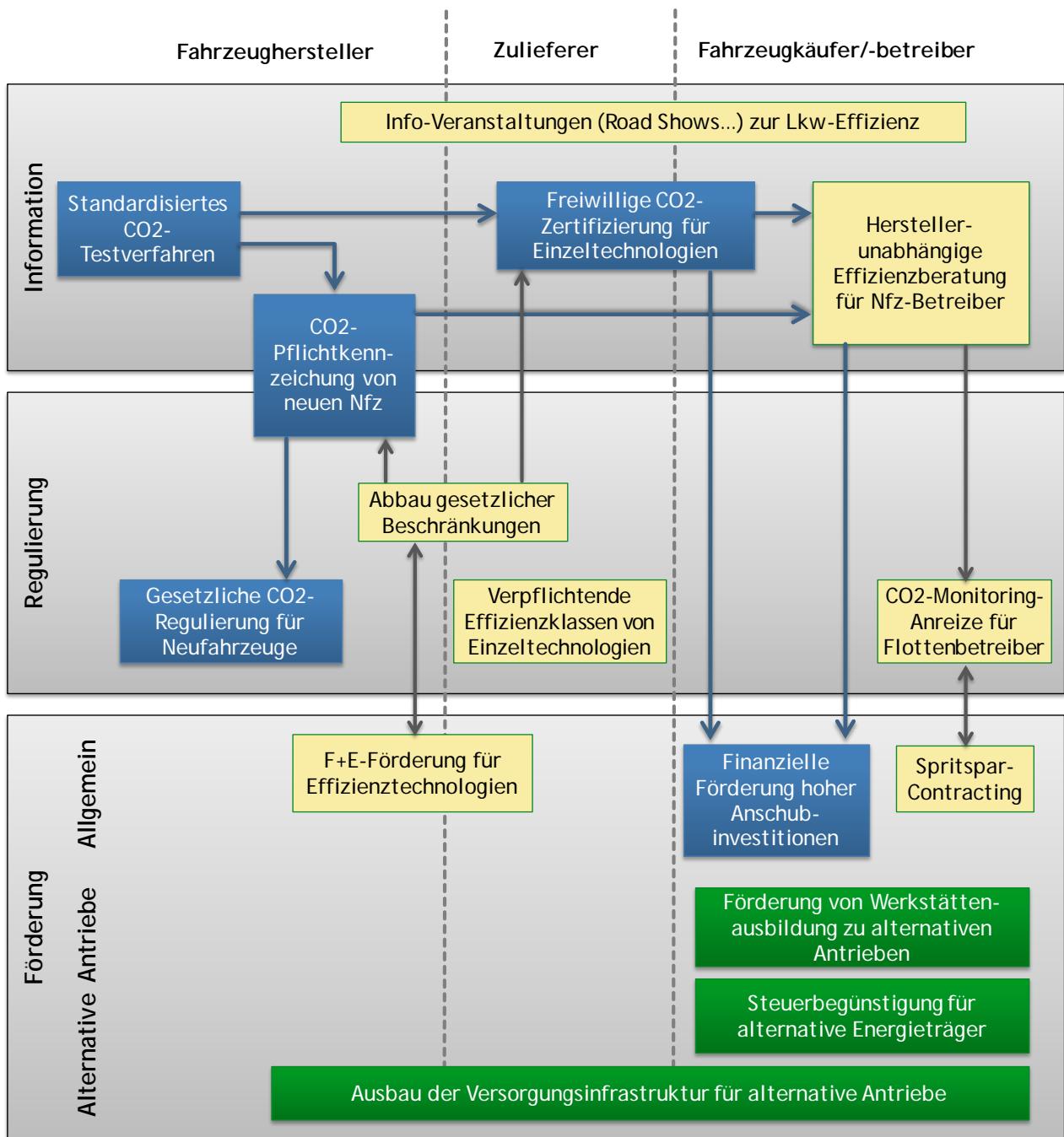
Falls Informations- und Fördermaßnahmen nicht die angestrebten Erfolge zur Verringerung der Treibhausgasemissionen von Nutzfahrzeugen bringen, sollte analog zum Pkw-Sektor eine europaweite gesetzliche Regulierung der CO₂-Emissionen für neue schwere Nutzfahrzeuge angestrebt werden. Auch hierfür ist ein standardisiertes CO₂-Testverfahren Grundvoraussetzung.

Zahlreiche weitere Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes effizienter Technologien sind grundsätzlich losgelöst von dem standardisierten CO₂-Testverfahren möglich (gelbe Färbung in der Grafik), können zum Teil aber zusätzlich davon profitieren.

- ▶ Herstellerunabhängige Effizienzberater können Fuhrunternehmen bei der Anschaffung effizienter Fahrzeuge bzw. der Nachrüstung von Effizienz-Technologien unterstützen. Ebenso kann den Beratern die Aufgabe zukommen, Unternehmen über vorhandene Förderprogramme zu informieren sowie über die Möglichkeiten eines Kraftstoff-Verbrauchs-Monitorings. Letzteres wäre Voraussetzung für ein Spritspar-Contracting, bei dem Fuhrunternehmen einen externen Investor für Effizienztechnologien gewinnen, der dafür an den späteren Kosteneinsparungen durch diese Technologien beteiligt wird.
- ▶ Verpflichtende Effizienzklassen für Einzeltechnologien können dazu führen, dass zum einen Fahrzeuge im Bestand auf energieeffiziente Technologien umgerüstet werden und zum anderen Fahrzeug-Betreiber bei Verbrauchsteilen (z. B. Reifen, Öle, Beleuchtung) nicht nachträglich auf ineffiziente Klassen umsteigen, weil diese gegebenenfalls in der Anschaffung billiger sind.
- ▶ Im Bereich der Regulierung wird ergänzend vorgeschlagen, den Abbau gesetzlicher Beschränkungen voranzutreiben. Hier ist im Detail zu prüfen, unter welchen Voraussetzungen welche gesetzlichen Beschränkungen überschritten werden dürfen. Änderungen der gesetzlichen Vorgaben würden auch den Herstellern mehr Spielraum bei der Entwicklung zusätzlicher Effizienztechnologien geben.
- ▶ Weiterhin kann die Entwicklung neuer Technologien direkt durch geeignete Forschungsprogramme gefördert werden.
- ▶ Informationsveranstaltungen, auf denen Erfolge bei der Verbrauchsreduktion durch verfügbare oder neu entwickelte Effizienztechnologien den Fahrzeugbetreibern vorgestellt werden, können flankierend zu den anderen Maßnahmen ein stärkere Wahrnehmung für das grundsätzliche Thema Energieeffizienz von Nutzfahrzeugen sowie für vorhandene Möglichkeiten zur Energieeinsparung schaffen.

Maßnahmen zu alternativen Antrieben bilden einen eigenen Bereich innerhalb der Roadmap. Die Integration alternative Antriebe in den Markt erfordert umfangreiche Maßnahmen insbesondere hinsichtlich der Versorgungsinfrastruktur. Dies betrifft zum einen die Versorgung mit den jeweiligen Energieträgern (LNG, CNG, Strom) in der Fläche, zum anderen die Versorgung durch ein Service-Netz. Steuerbegünstigungen für alternative Antriebe können zudem das Hemmnis der hohen Zusatzinvestitionen bei der Beschaffung solcher Fahrzeuge abmildern.

Abbildung 54 Roadmap zur Förderung einer Verbreitung von Effizienz-Technologien im Nfz-Markt



4 Quellenverzeichnis

- A. Hinsch (2011): Praxisbeispiel Transport und Logistik: A . Hinsch & Co . Bremen GmbH. Bremer Offensive. <http://www.bremer-erdgasfahrzeug.info/index.php?obj=page&id=211&unid=d7410764cc6e40b98af367735e327ed> (last accessed: 07/15/2014).
- AEA (2011): Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy. Nikolas Hill et al., Didcot. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/studies_en.htm (last accessed: 07/15/2014).
- ArvinMeritor (2010): Class 8 Electric Hybrids – Opportunities and Challenges. In: *SAE Government/Industry Meeting*. Hicks, Brad, Washington. <http://www.sae.org/events/gim/presentations/2010/BradHicks.pdf>.
- BGL e.V. (2014): Kostenentwicklungsrechner. <http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten_kalkulator.htm&v=2> (Jul. 8, 2014).
- BMVI (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Markus Schubert et al., Berlin. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf?__blob=publicationFile (last accessed: 07/15/2014).
- BMWi (2014): Bekanntmachung zur Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung. Bundesanzeiger BAnz AT 30.06.2014, Berlin. pp. 1–2.
- Bosch (2012): Waste Heat Recovery for Commercial Vehicles with a Rankine Process. In: *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*. Dieter Seher et al., Stuttgart. www.ac-kolloquium.rwth-aachen.de/pdf/Vortr_Nachger/2012/E3.3_Seher_Bosch.pdf.
- BP (2014): BP Statistical Review of World Energy June 2014. <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- Braunschweigheute.de (2014): Leiser und ruckelt nicht – Eine Runde im neuen E-Bus der Verkehrs AG. André Ehlers, Braunschweig. <http://braunschweigheute.de/leiser-und-ruckelt-nicht-eine-runde-im-neuen-e-bus-der-verkehrs-ag/> (last accessed: 07/07/2014).
- Bus-Fahrt (2014): Der Citaro gegen den Rest der Welt. Wolfgang Tschakert, Krefeld.
- Busmagazin (2013): Test Mercedes-Benz Citaro EURO VI. J. Görgler, Bonn. pp. 10–13.
- Californiahvip (2014): HVIP. <<http://www.californiahvip.org/eligible-vehicles>> (Jul. 7, 2014).
- Carbon War Room (2012): Road Transport: Unlocking Fuel-Saving Technologies in Trucking and Fleets. Tessa Margaret Lee, Matthew Stanley Cullinen. <http://www.carbonwarroom.com/what-we-do/research-publications>.
- CE Delft (2012a): Marginal abatement cost curves for Heavy Duty Vehicles. Arno Schroten, Geert Warringa, Mart Bles, Delft.
- CE Delft (2012b): Market Barriers to Increased Efficiency in the European On-road Freight Sector. Aarnink, Sanne Faber, Jasper den Boer, Eelco, Delft. <http://www.theicct.org/market-barriers-increased-efficiency-european-road-freight-sector> (last accessed: 07/15/2014).
- CE Delft (2013a): CO2 standards and labels for Heavy duty vehicles - A comparative analysis of design options. Sanne Aarnink, Arno Schroten, Huib van Essen. http://www.cedelft.eu/?go=home.downloadPub&id=1473&file=CE_Delft_4A94_A_comparative_analysis_of_design_options_DEF.pdf (last accessed: 07/15/2014).
- CE Delft (2013b): Zero emissions trucks - An overview of state-of-the-art technologies and their potential. den Boer, Eelco Aarnik, Sanne Kleiner, Florian Pagenkopf, Johannes, Delft.
- Cooper, K. (2004): Commercial Vehicle Aerodynamic Drag Reduction: Historical Perspective as a Guide. In: *McCallen E. et al. The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*. Berlin.
- Cooper, K. (2012): Wind Tunnel and Track Tests of Class 8 Tractors Pulling Single and Tandem Trailers Fitted with Side Skirts and Boat-tails. In: *SAE Paper*. Warrendale. <http://papers.sae.org/2012-01-0104/>.
- CVE (2014): Gestaltungsansätze bei schweren Nutzfahrzeugen zur Reduktion ihrer CO2. Hans-Christian Pflug, Graz.
- DAF (2014): DAF-Optionspreisliste. <http://www.daf.eu/DE/Trucks/Model-range/Pages/Option-Price-List.aspx> (last accessed: 07/07/2014).
- Daimler (2012a): Der Mercedes-Benz Aerodynamics Trailer. Stuttgart. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1608998-49-1609004-1-0-0-1609343-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html>.

- Daimler (2012b): Der Mercedes-Benz Aerodynamics Truck. Stuttgart. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1608998-49-1609007-1-0-0-1609343-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html>.
- Daimler (2013): Abgasenergierückgewinnung für schwere Fernverkehrsfahrzeuge. In: *Tagungsbeitrag. Nutzfahrzeuge 2013 - Truck, Bus, Van, Trailer.* VDI. R. Dold, Celle.
- Daimler (2014): Der neue Atego - Kraftstoffverbrauch. Stuttgart. http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/trucks_/home/distribution/new_atego/economy/fuel_consumption.html.
- Destatis (2014): Verbraucherpreis-Indices. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/Verbraucherpreisindizes/Tabellen_Einzelhandelspreise.html?cms_gtp=146572_slot=2&https=1.
- DOE (2008): FY 2008 Progress Report For Advanced Combustion Engine Technologies. Singh, G. http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/2008_adv_combustion_engine.pdf.
- EC (2014a): Strategy for reducing Heavy-Duty Vehicles' fuel consumption and CO2 emissions. European Commission, Brüssel. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/documentation_en.htm.
- EC (2014b): Impact Assessment accompanying the document "Strategy for Reducing Heavy-Duty Vehicles Fuel Consumption and CO2 Emissions." European Commission, Brussels. http://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/02/64/EU_26435/index.shtml (last accessed: 07/15/2014).
- Ecofys Germany (2007): Making Energy-Efficiency happen: From Potential to Reality. Corinna Klessman, Wina Graus, Mirjam Harmelink, Fieke Geurts, Utrecht. <http://www.ecofys.com/de/veroeffentlichung/making-energy-efficiency-happen/>.
- Erdgasmobil (2013): Die unterschätzte Option. Timm Kehler, Berlin. <http://www.gemeinderat-online.de/index.php?id=747> (last accessed: 07/15/2014).
- Eurotransport.de (2014): Hybridbusse polarisieren Kunden. Rosenberger, Thomas. <http://www.eurotransport.de/news/volvo-buses-hybridbusse-polarisieren-kunden-6536044.html> (last accessed: 05/20/2014).
- Finke, H.-S. (n.d.): Preise für Verglasung. <<http://www.fenster-preise.net/fenster/verglasung>> (Apr. 29, 2014).
- FleetNews (2010): New evidence shows electric vans could last more than 10 years. <http://www.fleetnews.co.uk/news/2010/12/1/new-evidence-shows-electric-vans-could-last-more-than-10-years/38353/>.
- Fxtop (2014): Historische Wechselkurse. <http://fxtop.com/de/historische-wechselkurse.php?A=1&C1=USD&C2=DEM&YA=1&DD1=01&MM1=01&YYYY1=1990&B=1&P=&I=1&DD2=31&MM2=12&YYYY2=1998&btnOK=Gehen>.
- Goodyear Dunlop (2012): Die Kraftstoffeffizienz von Nutzfahrzeugen optimieren. Diegem.
- ICCT (2014a): The U.S. Supertruck Program: Expediting the Development of Advanced Heavy-Duty Vehicle Efficiency Technologies. Oscar Delgado, Nic Lutsey, Washington. <http://www.theicct.org/us-supertruck-program-expediting-development-advanced-hdv-efficiency-technologies>.
- ICCT (2014b): Costs and Adoption Rates of Fuel-Saving Technologies for Trailers in the North American On-Road Freight Sector. Ben Sharpe, Mike Roeth, Washington. <http://www.theicct.org/costs-and-adoption-rates-fuel-saving-trailer-technologies> (last accessed: 07/15/2014).
- IFEU (2011): Umbrella: Umweltbilanzen Elektromobilität - Grundlagenbericht. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. H. Helms, J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht, M. Pehnt. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg. <http://www.emobil-umwelt.de/> (last accessed: 08/02/2013).
- INFRAS (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA), Version 3.1. Dokumentation in Vorbereitung, Bern. www.hbefa.net.
- Iveco (2013): Preisliste: Der neue Daily.
- JEC (2014): WELL-TO-TANK Report Version 4 . a - WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT.
- JRC (2014): Development of a CO2 certification and monitoring methodology for Heavy Duty Vehicles – Proof of Concept report. Georgius Fontaras et al., Luxembourg. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/development-co2-certification-and-monitoring-methodology-heavy-duty-vehicles-proof-concept>.

- KFZ-Anzeiger (2012a): Der Preis entscheidet. Adelbert Schwarz, Krefeld. pp. 16–19.
- KFZ-Anzeiger (2012b): Mit Bremsen sparen. Wolfgang Tschakert, Krefeld. pp. 34–37 <http://www.kfz-anzeiger.com/testberichte/trucks> (last accessed: 07/15/2014).
- KFZ-Anzeiger (2013): Schön grün , schön teuer. Wolfgang Tschakert, Krefeld. pp. 18–21 <http://www.kfz-anzeiger.com/testberichte/trucks> (last accessed: 07/15/2014).
- LANXESS (2013): "Grüne Reifen" -Test für Nutzfahrzeuge in Kooperation mit TALKE und TÜV Rheinland. Christoph Kalla. p. 37 http://lanxess.com/en/media-download/lanxess-reifetest-praesentation-pdf_de/ (last accessed: 07/15/2014).
- LAO (2010a): Vergleichstest von 4 EURO V Fernverkehr-Sattelzugmaschinen. In: *Lastauto Omnibus 3*. Frank Zeitzen, Stuttgart. pp. 10–21.
- LAO (2010b): Teststrecke. In: *Lastauto Omnibus 4*. Frank Zeitzen, Stuttgart. pp. 16–17.
- LAO (2012a): Saubere Rechnung. In: *eurotransport.de*. Frank Zeitzen, Stuttgart. <http://www.eurotransport.de/news/iveco-stralis-440s33-cng-saubere-rechnung-543313.html> (last accessed: 07/15/2014).
- LAO (2012b): MAN Lion's City Hybrid. EuroTransportMedia, Stuttgart. p. 74.
- LAO (2013a): Vergleichstest von 5 EURO VI Fernverkehr-Sattelzugmaschinen. In: *Lastauto Omnibus 1-2*. Frank Zeitzen, Stuttgart. pp. 24–35.
- LAO (2013b): Ein Fall für Zwischentöne. In: *Lastauto Omnibus 11*. Frank Zeitzen, Stuttgart. pp. 18–21.
- LAO (2014a): Angriff am Königsflügel. In: *Lastauto Omnibus 3*. Frank Zeitzen, Stuttgart. pp. 1–4.
- LAO (2014b): Katalog 2014. EuroTransportMedia, Stuttgart.
- M.J. Bradley & Associates LLC (2009): Setting the Stage for Regulation of Heavy-Duty Vehicle Fuel Economy & GHG Emissions: Issues and Opportunities. Dana Lowell, Thomas Balon, Washington DC.
- MAN (2012): MAN präsentiert aerodynamisch optimierten Sattelzug der Zukunft. München. <http://www.corporate.man.eu/de/presse-und-medien/pressecenter/MAN-praesentiert-aerodynamisch-optimierten-Sattelzug-der-Zukunft-20800.html>.
- MAN (2014): Hybridbusse – Basis für die Zukunft ?!. In: *Tagungsbeitrag. 5. VDV-Akademie Konferenz Elektrobusse*. Götz von Esebeck, Berlin.
- Mercedes-Benz (2013): Preisliste Mitsubishi Fuso Canter. Salzburg. pp. 1–20 <http://www.fuso-trucks.at/fusoaustralia/0-1185-1428913-49-1482292-1-0-0-0-1-0-1428913-0-0-0-0-0-0-0.html>.
- MKS (2014): LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Kurzstudie im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung. Erstellt in Zusammenarbeit von DLR, IFEU, LBST und DBFZ., München, Heidelberg, Berlin.
- NACFE (2013): Barriers to the Increased Adoption of Fuel Efficiency Technologies in the North American On-Road Freight Sector. Mike Roeth, Dave Kircher, Joel Smith, Rob Swim. <http://www.theicct.org/hdv-technology-market-barriers-north-america>.
- NESCCAF (2009): Reducing Heavy-Duty Long Haul Combination Truck Fuel Consumption and CO₂ Emissions. Coralie Cooper et al., Boston. <http://www.theicct.org/reducing-heavy-duty-long-haul-combination-truck-fuel-consumption-and-co2-emissions> (last accessed: 07/15/2014).
- Novatlantis (2010): Vergleichsstudie: Erdgas- und Dieselbus beim Busbetrieb Olten Gösgen Gäu. Dübendorf. <http://www.novatlantis.ch/projekte/mobilitaet/downloads.html> (last accessed: 07/15/2014).
- NRC (2010): Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium and heavy-duty vehicles. Andrew Brown et al., Washington. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12845 (last accessed: 07/15/2014).
- Öl-Engel (2014): Motorenöle. <http://www.oel-engel.de/LKW-Motorenöl> (last accessed: 07/15/2014).
- Raemdonck, G. van (2010): Numerical and Wind Tunnel Analysis together with Road Test of Aerodynamic Add-Ons for Trailers. In: *Tagungsbeitrag. Aerodynamics of Heavy Vehicles III: Trucks, Buses and Trains*. Potsdam.
- Ricardo (2009a): Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles. Baker, Hannah Cornwell, Richard Koehler, Enrico Patterson, Jane, West Sussex. http://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/090715_Review_of_low_carbon_technologies_for_heavy_goods_vehicles.pdf (last accessed: 07/15/2014).
- Ricardo (2009b): Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles – Annex 1 Prepared for Department for Transport. Hannah Baker et al., West Sussex. pp. 1–206 http://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/Review_of_low_carbon_technologies_for_heavy_goods_vehicles_Annex.pdf (last accessed: 07/15/2014).

- Ricardo-AEA (2012): Opportunities to overcome the barriers to uptake of low emission technologies for each commercial vehicle duty cycle. Duncan Kay, Nikolas Hill, London. <http://www.ricardo-aea.com/cms/overcoming-the-barriers-to-uptake-of-low-emission-technologies-for-heavy-goods-vehicles/?stage=Live>.
- Rundschau, K. (2014): Pilotprojekt: Elektrobus soll 2016 fahren. In: *Kölnische Rundschau*. <http://www.rundschau-online.de/koeln/pilotprojekt-elektrobus-soll-2016-fahren,15185496,26218970.html>.
- Sherwood, A. (1954): A study of the wind resistance of tractors and truck-trailers. Maryland. <http://worldcat.org>.
- SPON (2012): Busse aus China: Elektroschock für Daimler und Co. In: *Spiegel Online*. Nils-Viktor Sorge. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/batteriebusse-aus-china-haengen-deutsche-bushersteller-ab-a-840795.html> (last accessed: 05/20/2014).
- Tagesspiegel (2013): Elektromobilität - Bis zur nächsten Oberleitung. <http://www.tagesspiegel.de/wissen/elektromobilitaet-bis-zur-naechsten-oberleitung/8671924.html>.
- Technomar GmbH (2012): Repräsentative Umfrage zum TÜV SÜD als Dienstleister für Nutzfahrzeuge. TÜV SÜD Auto Service GmbH, München. <http://www.technomar.de/downloads/energieeffizienzfuhrunternehmen.pdf>.
- Texaco (2014): Ölberater. <http://www.texaco.de/htcms/oelberater.html> (last accessed: 07/15/2014).
- TIAX (2009): Assessment of Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles. Matthew Kromer et al., Washington.
- TIAX (2011): European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles. Karen Law et al., San Francisco. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT GHG Reduction Potential_final.pdf (last accessed: 07/15/2014).
- TML (2010): TREMOVE v3.3.2 (2010). Leuven. <http://www.tmleuven.be/contact/home.htm>.
- TU Graz (2012a): Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles - LOT 2. Stefan Hausberger et al., Graz. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/studies_en.htm.
- TU Graz (2012b): New Emission Factors for EURO 5 & 6 Vehicles. In: *19th International Conference „Transport and Air Pollution“*. Stefan Hausberger et al., Thessaloniki.
- TU Graz (2013a): Straßenverkehrsemisionen und Emissionen sonstiger mobiler Quellen Österreichs für die Jahre 1990 bis 2012. Stefan Hausberger, Graz. https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.showMask?pOrg=123&pPersonNr=0&pCurrPk=68480&pVtKbz=EFB&pStatus=A&pSiteNr=1004600 (last accessed: 07/15/2014).
- TU Graz (2013b): EHEV - Eco Drive for Hybrid Electric Vehicles. Antonius Kies, Graz. <http://www.klimafonds.gv.at/service/studien-blue-globe-reports/mobilitaet>.
- TU Graz (2013c): User Guide for the Model PHEM, Version 11.2. Raphael Luz et al., Graz.
- TU Graz (2014): Development and validation of a methodology for monitoring and certification of greenhouse gas emissions from heavy duty vehicles through vehicle simulation. Raphael Luz et al., Graz. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/studies_en.htm.
- TU Wien (2011): NANUPOT - Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050. In: *NANUPOT*. Kloess et al., Wien. <https://www2.fgg.at/verkehr/studien.php?id=646&lang=de&browse=programm> (last accessed: 07/15/2014).
- Uni Bochum (2007): CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. In: *VDI*. Wagner H. et al. Vol. BWK10/2007, p. S. 44 – 52.
- Volvo (2012): Waste Heat Recovery. In: *Trucks/Off-Road Powertrain*. N. Espinosa, Lyon.
- VOS et al. (2012): LNG Heavy Duty Trucks Case Studies Europe. Informal Document for the 104th meeting of Group of Experts on General Safety United Nations, Geneva 15-19 April 2012 submitted by the Chairman of the LNG Task Force, Genf. <http://www.unece.org> (last accessed: 07/15/2014).
- Wang, J. (2012): China's BYD to make electric buses in the US. <<http://www.carnewschina.com/2012/12/19/chinas-byd-to-make-electric-buses-in-the-us/>> (Jul. 7, 2014).

5 Anhang

5.1 Literaturübersicht energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien für schwere Nutzfahrzeuge

5.1.1 Ausgewertete Literaturquellen

Zentrale ausgewertete Informationsquellen in der allgemeinen Literaturrecherche zu energiesparenden und treibhausgasmindernden Nutzfahrzeugtechnologien waren:

- ▶ **European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles.** Prepared for the International Council on Clean Transportation (ICCT). TIAX, Dezember 2011.
- ▶ **Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy.** Final Report to the European Commission – DG Climate Action Ref: DG ENV. 070307/2009/548572/SER/C3. AEA und Ricardo, UK 2011.
- ▶ **Greenhouse gas reduction potential and costs of light-duty vehicle technologies.** International Workshop. The International Council on Clean Transportation (ICCT) am 01.02.2012 in Brüssel.
- ▶ **Reducing greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles: Policy options, development, and prospects.** Unterlagen des Öffentlichen Workshops der Europäischen Kommission (DG Climate Action) und ICCT (International Council on Clean Transportation) am 10.11.2011 in Brüssel.
- ▶ **Directions in Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference.** Vorträge der jährlichen Konferenzen für 2008-2011. Dearborn/Detroit (USA), 2008-2011.
- ▶ **Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles.** Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles; National Research Council of the National Academies; Transportation Research Board. Washington D.C. 2010.
- ▶ **Reducing Heavy-Duty Long Haul Combination Truck Fuel Consumption and CO₂ Emissions.** NESCCAF Northeast States Center for a Clean Air Future, ICCT International Council on Clean Transportation, Southwest Research Institute, TIAX, LLC. Oktober 2009.
- ▶ **Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles.** Prepared for Department for Transport. Ricardo, UK 2009.
- ▶ **Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen.** FluiDyna GmbH. Gefördert mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT). FAT Schriftenreihe Nr. 237. 2011.
- ▶ **Design of a Tractor for Optimized Safety and Fuel Consumption.** Forschungsgesellschaft Kraftfahrtwesen mbH Aachen. Report 104190. Im Auftrag von Transport & Environment (T&E). Aachen 2011.
- ▶ **SmartWay Technology Program.** Informationsbasis im Rahmen der SmartWay-Initiative zwischen US EPA und der Güterverkehrsindustrie zur Unterstützung von Speditionen und Logistikunternehmen bei Verbesserungen der Kraftstoffeffizienz und Kosteneinsparungen.
- ▶ **Shell-Lkw-Studie:** Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Erstellung und Projektdurchführung durch Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Shell Deutschland, unter Mitarbeit des hamburgischen Weltwirtschaftsinstituts (HWI) Hamburg/Berlin 2010.
- ▶ **GHG-TransPoRD 4th workshop: Techno-economic analysis of scenarios and policy packages to achieve GHG reductions of transport,** am 26./27. September 2011 in Brüssel.

5.1.2 Technologieübersicht

Techno- logiefeld	Einzeltechnologie	Einsatzzweck							
		o. A.	Fern- verkehr	Region. Vertei- ler	Städ. Vertei- ler	Service <7,5t	Stadt- & Rei- sebus	Kommu- nal- & Baufzg.	
1 Motor und Antriebsstrang	1.1 Optimierter Verbrennungsprozess	1.1.1 Diverse: Höherer Einspritzdruck, höherer Zylinderdruck, Verbrennungskontrolle, Turboaufladung		14,6-17,9 %	9,4-12 %	9,4-12 %	4-5 %		
		1.1.2 Zweistufige Aufladung mit Ladeluftkühlung		1-2 %	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.1.3 Variable Ventilsteuerung	1,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
	1.2 Abwärmenutzung (Abgas, EGR, Kühlstrom)	1.1.4 Gekühlte Abgasrückführung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.2.1 Ab gasturbine mechanisch mit Kurbelwelle (mech. turbo-compounding)	0-5 %	3-5 %	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.2.2 Ab gasturbine mit Generator zur Stromerzeugung gekoppelt (electrical turbo-compounding)		3,0 %	2,5 %	1,0 %	1,0 %	1-2,5 %	1,0 %
		1.2.3 Organic Rankine cycle (ORC-Prozess)		5-7,5 %	2,5 %	1,5 %	1,5 %	1,5-2,5 %	1,5 %
	1.3 Parasitäre Verluste der Motor-Nebenaggregate	1.2.4 Thermoelektrischer Generator	2,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.3.1 Vollvariable mechanische Wasserpumpe	0,7 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.3.2 Elektrische Wasserpumpe	1-1,5 % /4 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.3.3 Drehzahlvariable Ölpumpe	1-1,5 % /3 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
	1.4 Hybridantriebe	1.3.4 Regelbarer Luftkompressor		1,5 %	1,0 %	k.A.	k.A.	1,5 %	
		1.4.1 Stopp-Start-Hybrid		1,0 %	3,0 %	6,0 %	6,0 %	3-4 %	6,0 %
		1.4.2 Hydraulischer Hybrid		n.a.	k.A.	10,0 %	10,0 %	k.A.	15-25 %
		1.4.3 Schwungrad-Hybrid		5,0 %	7,5 %	15,0 %	15,0 %	7,5-20 %	15,0 %
		1.4.4 Pneumatic Booster System (PBS) (Druckluft-Hybrid)		2-4,5 %	1,5 %	1,5 %	1,5 %	1,5-2,0 %	1,5 %
		1.4.5 Elektr. Hybrid (parallel, seriell)	6,0 %	7-12 %	8-12 %	20-35 %	20-30 %	10-30 %	20,0 %
	1.5 Alternative Antriebe	1.4.6 Brennstoffzellen-Hybrid	abh. von H2-Kette	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.5.1 Dual-fuel-Systeme (Diesel+CNG)		10-21 %	10-21 %	10-21 %	10-21 %	10-21 %	10-21 %
		1.5.2 Dual-fuel mit Biogas	60,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		1.5.3 Erdgas-Fahrzeuge	15,0 %						

Techno- logiefeld	Einzeltechnologie		Einsatzzweck						
			o. A.	Fern- verkehr	Region- Vertei- ler	Städ. Vertei- ler	Service <7,5t	Stadt- & Rei- sebus	Kommu- nal- & Baufzg.
1 Antrieb & Getriebe	1.5 Elektrifizierung	1.5.4 Voll-Elektrischer Antrieb	abh. von Strom-erzeug.						
		1.5.5 Oberleitungs-Lkw		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
	1.6 Reibungarme Schmiermittel			1-1,5 %	1-1,5 %	0,0 %	0-1 %		
	1.7 Getriebe	1.7.1 Automatisierte Schaltgetriebe (AMT)	4-10 %	1,5 %	1,5 %	5,0 %	5,0 %	5,0 %	5,0 %
		1.7.2 Erweiterte Schaltgetriebe (mehr Gänge)		k.A.	k.A.	k.A.	2,7- 4,1 %		
		1.7.3 Doppelkupplungsgetriebe	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		1.7.4 Schaltlogik (frühes Hochschalten)		k.A.	k.A.	k.A.	1,5- 2,5 %		
2 Aerodynamik	2.1 Fahrer- haus- Zugmaschine	2.1.1 Gesamtform (Cab-Streamlining, Frontverlängerungen)		0,6- 5,3 %	1-2 %	k.A.	k.A.		
		2.1.2 Verkleidungen/Spoiler							
		<i>Dachspoiler 2D</i>		1,2-2,4 % / 7 %	2-3 %	2-3 %	k.A.		
		<i>Dachspoiler 3D</i>		2,3-5,9 % / 10 %	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Spaltverkleidung zum Aufbau/Anhänger</i>		0,6-3 %	0,6-3 %	0,5-1 %	k.A.		
		<i>Dachspoiler 3D + Spaltverkleidung</i>		3,2- 8,0 %	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Aerodynamische Sonnenblende</i>	1,6- 3,6 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Luftleitbleche an den Fahrerhausecken (side edge turning vanes)</i>	0,3- 0,6 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Frontschrürze /Spoilerlippe</i>	0,3- 0,9 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Seitenverkleidung</i>		0,6-4 %	0,5-1 %	k.A.	k.A.		
	2.2 Anhänger/ Aufbau	<i>Unterbodenverkleidung</i>		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Hinterachsenabdeckung</i>	1,4 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		2.1.3 Spiegel							
		<i>Aerodynamische Spiegel</i>	0,1- 0,2 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		<i>Kameras</i>		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
		2.2.1 Aerodynamic trailer (z. B. Teardrop)		5-18 %	k.A.	k.A.	k.A.		
		2.2.2 Seitenverkleidung (mit/ohne Radabdeckung)	s. 2.3.1	s. 2.3.1	s. 2.3.1	s. 2.3.1			
		2.2.3 Stirnseite-Anbauten am Auflieger		0,7- 3,8 %	0,5- 1,0 %	k.A.	k.A.		

Techno- logiefeld	Einzeltechnologie	Einsatzzweck						
		o. A.	Fern- verkehr	Region. Vertei- ler	Städ. Vertei- ler	Service <7,5t	Stadt- & Rei- sebus	Kommu- nal- & Baufzg.
	2.2.4 Dacheinzug hinten		0,3- 3,0 %	k.A.	k.A.	k.A.		
	2.2.5 Heckeinzug ("Boat tail", offener o. geschlossener Anbau)		3-8 %	2-6 %	1,5-3 %	k.A.	3-5 %	
	2.2.6 Dach-Heckleitschaufeln	1-1,5 %						
	2.2.7 Active flow control (Heck-Diffusor am Dach)		7-8,7 %	k.A.	k.A.	k.A.		
	2.2.8 Unterboden-Heckdiffusor (DLR)	cw -10- 15 %						
	2.2.9 Unterbodenverkleidung	cw - 12 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
	2.2.10 Turbulator (Vortex Generator = kleine Wirbelzeuger an Strömungsabrißkanten)		0,6- 1,0 %	0,6- 1,0 %	0,6- 1,0 %	0,6- 1,0 %		
	2.2.11 Achsverkleidung (Bogie cover)	1,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
	2.3 Gesamt-fahrzeug	0,4- 7,5 %	0,7- 3,0 %	2-3 %	2-3 %	k.A.		
	2.3.1 Seitenverkleidung ZM+Auflieger...		cw -15- 20 %	k.A.	1-3 %	1-3 %	3-4 %	
	2.3.3 Geschwindigkeits-abhängige Änderung cw-Wert: Schließen Spalt SZM - Auflieger bei hohen Geschwindigkeiten per verschiebbarer Sattelkupplung; Abdecken Trittstufen, Leitern	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	2.3.4 Luftdurchlässige Schmutzfänger		1,5- 3,5 %	1,5- 2,0 %	1,0- 1,5 %	1,0- 1,5 %		
	2.3.5 Radkappen	cw -0,6- 1,3 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
	2.4 Spezial-fahrzeuge	9-15 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		
3 Reifen	3.1 Leichtlaufreifen		5-12 %	3,0 %	1,0 %	1,0 %	1-3 %	
	3.2 Supersingle-Reifen	2-10 %	5,0 %	6,0 %	4,0 %	k.A.	4,0 %	
	3.3 Supersingle-Leichtlaufreifen (inkl. Alufelgen-Gewichtsreduktion)		9-12 %	9-12 %	2,1- 4,2 %	k.A.	k.A.	
	3.4 Automatische Reifendruckanpassung (ZM+Auflieger)		3-8 %	1-2 %	1,0 %	k.A.	1,0 %	
	3.5 Spur- und Sturzeinstellung (bei 1° Fehlstand)		5,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	3.6 Verringerung der Achsenanzahl	0,1 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	

Techno- logiefeld	Einzeltechnologie		Einsatzzweck						
			o. A.	Fern- verkehr	Region- Vertei- ler	Städ. Vertei- ler	Service <7,5t	Stadt- & Rei- sebus	Kommu- nal- & Baufzg.
4 Neben- aggregate	4.1 Hilfsge- neratoren	4.1.1 Diesel-APU	6,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.1.2 Elektrische APU (Batterie u/o Plugin)	6,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.1.3 Alternativ- betriebene APUs (z. B. Brennstoffzelle)	10-20 %	10-20 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	10-20 %
	4.2 Optimier- te Nebenagg- regate	4.2.1 Elektrifizierung von Nebenaggregaten	0-8 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.2.2 Fahrkabinen- Heizung		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.2.3 LED Leuchten, redu- zierter Strombedarf		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.2.4 Elektrischer Lüfter		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	4.3 Kühlein- heiten	4.3.1 Hochisolierende Vakuumpaneele (Wärme- dämmung)	5-10 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.3.2 Photovoltaik- Systeme		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.3.3 Kryogene Kühlung		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.3.4 Absorptions- und Adsorptionssysteme		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.3.5 Thermoelektrische Kühlung		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		4.3.6 Kühlturbinen (air- cycle refrigeration)		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
5 Leicht- bau	5.1 Fahrer- haus+ Chas- sis	5.1.1 Supersingle-Reifen auf Aluminiumfelgen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		5.1.2 Fahrer- haus/Chassis-Gewicht	Von Ge- wichts- reduktion abh.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	5.2 Anhä- nger/Aufbau	5.2.1 Supersingle-Reifen auf Aluminiumfelgen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		6.2.2 Aluminiumlegierun- gen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		5.3 Gesamtfahrzeug	Von Ge- wichts- reduktion abh.	2,2 %	2,2 %	2,2-5 %	1-2,2 %	2-6 %	4,7 %
6 ITS+ICT	6.1 Aktive Fahrsteue- rung	6.1.1 Adaptive Geschwin- digkeitsregelung	0-6 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		6.1.2 Vorausschauende Geschwindigkeitsrege- lung		1-5 %	1-2 %	k.A.	k.A.	k.A.	
		6.1.3 Geschwindigkeits- begrenzer		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
		6.1.4 Beschleunigungs- regelung		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	

Techno- logiefeld	Einzeltechnologie	Einsatzzweck						
		o. A.	Fern- verkehr	Region. Vertei- ler	Städ. Vertei- ler	Service <7,5t	Stadt- & Rei- sebus	Kommu- nal- & Baufzg.
6.2 Fahrerin- formation	6.1.5 Ecoroll Freilauffunk- tion	highly applica- tion- depend- ent	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	6.1.6 Kolonnenfahrt mittels elektrischer An- hängerkupplung		20,0 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	6.1.7 Intelligente Licht- maschine		1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %
	6.2.1 Lenkende Drehzahl- steuerung (für früheres Schalten)		k.A.	k.A.	1-4 %	k.A.	k.A.	
	6.2.2 Grüne-Zone- Anzeige	5-10 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	6.2.3 Navigation und Routenoptimierung		0-1 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	6.2.4 Telematiksysteme (e.g. Fleetboard)		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
	6.2.5 (Fahrerschulungen)		1-4 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	

Quellen: vgl. Literaturübersicht in Kap. 5.1.1

5.2 Beschreibung der untersuchten Einzeltechnologien

5.2.1 Antriebsstrang

Verbesserung des Motorwirkungsgrades

Aufgabe	Wirkungsgradverbesserung und Verringerung der parasitären Verluste
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	<ul style="list-style-type: none"> - Verzicht auf die Abgasrückführung. Die dadurch erhöhten NO_x im Roh-Abgas werden durch eine vergrößerte SCR-Anlage reduziert. - Durch Verwendung von einer variablen Ölpumpe und einer variablen Wasserpumpe werden deren parasitären Verluste verringert. - Durch Verwendung von Leichtlauföl werden die Reibungsverluste verringert. <p>Die Annahme ist, dass sich der mittlere Motorwirkungsgrad durch diese Maßnahmen um 0,01 verbessert, z. B. von 0,42 auf 0,43</p>

Abgaswärmennutzung durch ORC

Aufgabe	Umwandlung der Abgaswärme in mechanische Antriebsleistung
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Mittels der Abgasenthalpie am Ende des Abgassystems wird ein kleiner Dampfkraftprozess mit einem organischen Arbeitsmedium betrieben (Organic Rankine Cycle - ORC). Die an dessen Kraftmaschine (Hubkolbenexpander, Schraubenexpander, Turbine) anfallende mechanische Leistung wird mittels eines Ketten- oder Riementriebes an die Kardanwelle übertragen. Der Wirkungsgrad ist temperaturabhängig und die Leistung variiert zwischen 0 und ca. 20 kW _{mech} .

Gasmotor, LNG- oder CNG-Tank

Aufgabe	Fahrzeugantrieb
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Ein Standard Gasmotorkennfeld wurde auf die Nennleistung des jeweiligen Dieselmotors skaliert und mit geänderten Schaltkurven und einer anders übersetzten Hinterachse simuliert. Die Übersetzungänderung war notwendig, um die andere Nenndrehzahl des Gasmotors auszugleichen. Für den Sattelzug wurde ein LNG-Tieftemperaturtank angenommen, für Verteiler-Lkw und Stadtbus CNG-Drucktanks. Deren Füllmenge wurde an den Werten von Serienfahrzeugen angelehnt, um einen realistischen Kompromiss aus Mehrgewicht und Reichweitenverringerung zu erreichen.

Parallelhybrid

Aufgabe	Rekuperation von Bremsenergie und elektrische Unterstützung des Dieselmotors beim Antreiben
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Die Fahrzeuge werden mit zusätzlichen Elektromaschinen auf der Getriebeeingangswelle simuliert. Diese läuft bei jeder Bremsung als Generator mit und speist einen Teil der Bremsleistung in eine Li-Ionen-Batterie ein. Damit werden elektrische Nebenverbraucher und beim Antrieb die Elektromaschine als Motor betrieben. Das Mehrgewicht der Hybridkomponenten wird durch Verkleinerung oder Wegfall von Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs z.T. kompensiert. Der Spareffekt ist, dass ein Teil der Bremsarbeit zurückgewonnen werden kann.

Seriellhybrid

Aufgabe	Elektrische Maschine als Antriebsmotor, Energieerzeugung mittels Dieselgenerator und Rekuperation eines Teils der Bremsarbeit
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	<p>Das Fahrzeug wird von einer Elektromaschine angetrieben, welche beim Bremsen als Generator mitläuft. Die Energiequelle ist hauptsächlich ein Dieselgenerator sowie die in Supercaps zwischengespeicherte rekuperierte Bremsarbeit. Die Nebenverbraucher werden rein elektrisch angetrieben. Das Fahrzeug hat kein Schaltgetriebe.</p> <p>Der Spareffekt ist, dass ein Teil der Bremsarbeit zurückgewonnen werden kann.</p>

Batterieelektrisches Fahrzeug

Aufgabe	Elektrische Maschine als Antriebsmotor, Energiequelle ist ein Li-Ionen-Akku
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	<p>Das Fahrzeug wird von einer Elektromaschine angetrieben, welche beim Bremsen als Generator mitläuft. Die Energiequelle ist eine Li-Ionen-Batterie, welche auch als Zwischenspeicher für die rekuperierte Bremsarbeit dient. Die Nebenverbraucher werden rein elektrisch angetrieben. Das Fahrzeug hat ein Getriebe mit reduzierter Gangzahl oder kein Getriebe.</p> <p>Elektrische Fahrzeuge haben den Vorteil, die Bremsarbeit teilweise zurückgewinnen zu können. Im Fall von 100 % Ökostrom ist ein emissionsfreier Betrieb möglich.</p> <p>Im Falle des Batteriebusses mit Zwischenladung reicht die Batterie für max. einen Umlauf auf der Buslinie. Der Bus hat einen Pantograf d. h. einen ausfahrbaren Stromabnehmer auf dem Dach. An jeder Endhaltestelle ist eine kurze Oberleitung verbaut, an der die auf der halben Runde verbrauchte Energie nachgeladen wird.</p>

Verringerung der Getriebeverluste

Aufgabe	Verringerung der Antriebsstrangverluste
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	<ul style="list-style-type: none"> - Durch Einbau einer Trockensumpfschmierung mit variabler Ölpumpe werden die Planschverluste der sonst im Ölbad drehenden Zahnräder vermindert. - Durch Verwendung von Leichtlauföl werden die Reibungsverluste verringert. <p>Die Annahme ist, dass durch diese Maßnahmen die Getriebeverluste um 25 % verringert werden.</p>

5.2.2 Aerodynamik und Rollwiderstand

Seiten- und/oder Unterbodenverkleidung

Aufgabe	Verringerung des Luftwiderstandes des Aufliegers oder Aufbaus an der Unterseite
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Durch Kunststoffpaneele werden die Seiten des Chassis und/oder der Unterboden strömungsgünstig verkleidet. Diese winkeligen Strukturen führen ansonsten besonders bei Seitenwind zur Ausbildung von Luftwirbeln, welche den Luftwiderstand erhöhen.

Heckeinzug am Auflieger oder Lkw-Aufbau

Aufgabe	Verringerung des Luftwiderstandes des Aufliegers durch einen Heckeinzug
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Durch einen Heckeinzug werden die Wirbelbildung und das resultierende Unterdruckgebiet am Heck vermindert, was den Luftwiderstand senkt. In der ersten, bereits gesetzlich erlaubten Ausbaustufe ist der Einzug 0,5 m lang, in der zweiten Stufe, die aktuell seitens der EU diskutiert wird, ist der Einzug 1 m lang.

Frontverlängerung am Fahrerhaus

Aufgabe	Verringerung des Luftwiderstandes durch eine abgerundete Verlängerung der Front der Sattelzugmaschine
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Die Vorderseite der SZM wird mit einer abgerundeten Verlängerung versehen. Dies kann entweder bei der Grundkonstruktion oder durch ein Nachkaufteil geschehen. Der Effekt ist die Verringerung des cw-Wertes des Gesamtfahrzeuges bei gleichbleibendem oder leicht vergrößerterem Volumen der Kabine, welche für den Fahrer den Arbeits- und Wohnbereich darstellt.

Rückfahrkameras

Aufgabe	Seitenspiegel werden durch aerodynamisch optimierte Kameras ersetzt
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Die Rück-, Front- und Bordsteinspiegel werden durch strömungsgünstig geformte kleine Kameras ersetzt. cw-Wert und Querschnittsfläche der SZM verringern sich.

Energiesparreifen

Aufgabe	Reduktion des Rollwiderstandes
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Auf allen Achsen werden Reifen mit einem reduzierten Rollwiderstand eingesetzt, wobei die minimal erreichbaren Beiwerte von aktuellen Serien-Reifen gewählt werden.

Einzelbreitreifen

Aufgabe	Reduzierung der Fahrzeugmasse und der Drehträgheit der Räder, falls möglich Senkung des Rollwiderstandes.
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Einzelbreitreifen auf der Antriebsachse reduzieren je nach Nfz-Klasse die Fahrzeugmasse um ca. 80 bis 130 kg. Zusätzlich verringert sich die Drehträgheit der Räder, was in einer geringeren Beschleunigungsleistung resultiert.

5.2.3 Leichtbau, Fahrzeugregelung und Nebenverbraucher

Leichtbau

Aufgabe	Verringerung des Fahrzeug-Eigengewichtes
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Durch konstruktive Maßnahmen oder den Einsatz leichterer Materialien wird das Leergewicht des Nfz gesenkt. Dadurch sinken die Fahrwiderstände Rollwiderstand, Steigung und Beschleunigung.

Geschwindigkeitsbegrenzer

Aufgabe	Begrenzung der max. Geschwindigkeit auf 80 km/h
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Die max. Fahrgeschwindigkeit wird auf 80 km/h begrenzt. Dadurch werden alle Anteile der Fahrwiderstandsleistung begrenzt, im Besonderen die Luftwiderstandsleistung.

Start-Stopp-Automatik

Aufgabe	Abschaltung des Dieselmotors bei Fahrzeugstillstand.
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Beim Fahrzeug-Stillstand wird der Dieselmotor abgeschaltet, was den Wegfall des Leerlaufverbrauches bedeutet. Die Arbeit, welche die Nebenverbraucher in den Stillstandsphasen bei laufender VKM konsumieren würde, wird auf die Fahrdauer umgelegt.

LED-Vollausstattung

Aufgabe	LED-Scheinwerfer
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Es werden LED-Strahler für Abblend-, Fern- und Nebelscheinwerfer verwendet, wodurch die elektrische Leistungsaufnahme sinkt.

Klimaanlage mit hoher Leistungszahl

Aufgabe	3-stufige statt 2-stufiger Kompressorregelung.
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Der Klimakompressor wird mit einer 3- statt 2-stufigen Regelung versehen (aus/halb/voll statt an/aus), wodurch sich die mittlere Leistungszahl verbessert.

Thermoverglasung

Aufgabe	Doppelverglasung zur Verringerung des Wärmedurchgangs
Funktionsweise (Änderung bzw. Zusatzfunktion)	Es werden doppeltverglaste Thermofenster untersucht, welche im Sommer weniger Wärme ein- und im Winter weniger Wärme ausdringen lassen. Dadurch sinkt die mittlere Leistungsaufnahme von Klimakompressor und Heizung.

5.3 Kostenanalyse der untersuchten Einzeltechnologien

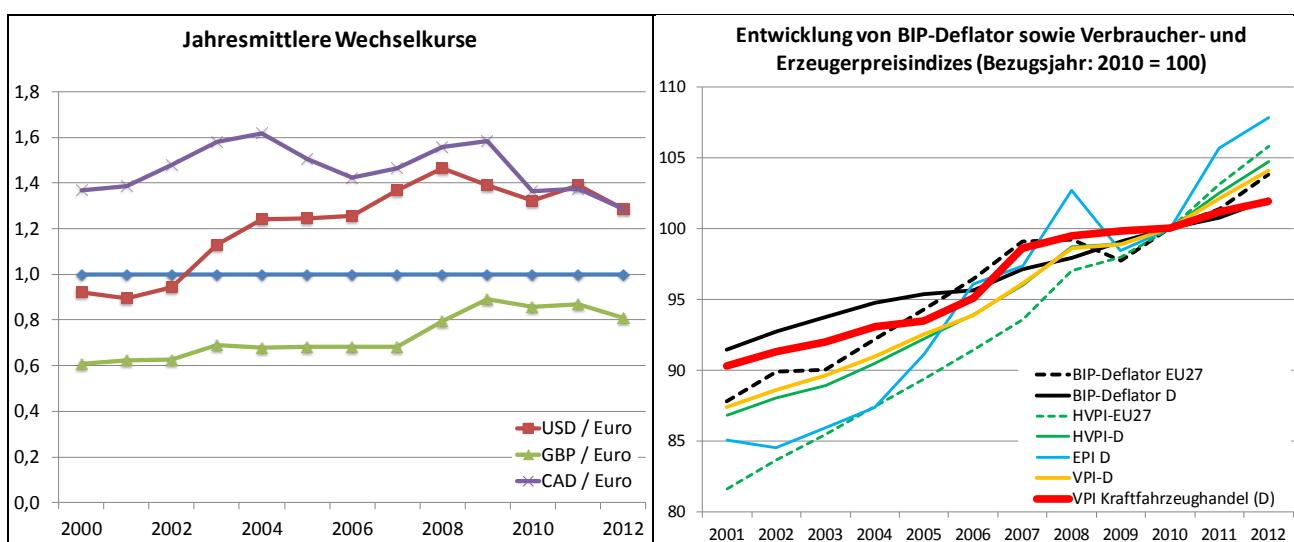
Erläuterungen zur Vereinheitlichung von Kostenangaben

Zur Berechnung vergleichbarer Kosten-Nutzen-Verhältnisse einzelner Technologien bzw. von Technologiepaketen ist eine Vereinheitlichung der verwendeten Kostenangaben (zusätzliche Investitions- und Betriebskosten) eine wichtige Voraussetzung. Folgende Parameter wurden standardisiert:

- ▶ Umrechnung anderer Währungen in EURO über Wechselkurse der Jahre, auf die sich die Kostenangaben beziehen bzw. aus denen die Preisangaben sind (vgl. Abbildung 55, links),
- ▶ Aktuelle Preisangaben (ab 2010) wurden für die Analysen direkt übernommen. Einzelne Preisangaben aus früheren Jahren wurden über den Verbraucherpreisindex für den Handel mit Kraftfahrzeugen (vgl. Abbildung 55, rechts) auf das Bezugsjahr 2010 umgerechnet.
- ▶ Umrechnung von Produktionskosten in Preise mit einem Retail-Price-Equivalent RPE 1,5.

In den Tabellen der folgenden Abschnitte sind stets die vereinheitlichten Kosten angegeben.

Abbildung 55 Links: Vereinheitlichung von Währungsangaben der Jahre 2000-2012 auf Euro; Rechts: Entwicklung verschiedener Preisindizes als Basis zur Vereinheitlichung von Kostenangaben in Nominalpreisen der jeweiligen Jahre auf Realpreise 2010



Quellennachweis Preisindizes und Wechselkurse: [Destatis, 2014] [Fxtop, 2014]

5.3.1 Investitionskosten Antriebsstrang

Fahrzeugklasse	Spezifizierung	Bandbreite von Kostenangaben (in Euro)	Quellen	Zusatzinvestition (Euro)	Erläuterung
Variable Wasserpumpe					
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG		75	[Ricardo, 2009b] S.98ff, "ca. Faktor vier teurer als eine ungeregelte Pumpe"	300	Übernahme der Kosteneinschätzungen der Industrie beim Abschlussworkshop
		300	Industrierückmeldung (Kap. 5.11.3)		

Fahrzeugklasse	Spezifizierung	Bandbreite von Kostenangaben (in Euro)	Quellen	Zusatzinvestition (Euro)	Erläuterung
Variable Ölpumpe					
Sattelzug 40 t zGG Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG		160	[Ricardo, 2009b] S.93ff	160	Ca. Faktor acht teurer als ungeregelte Pumpe
Abgasnachbehandlung nur mit SCR (Wegfall von AGR)					
Sattelzug 40 t zGG Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG		Kostenneutral	Eigene Annahme	0	Kosten für komplexere SCR kompensiert durch AGR-Wegfall
Leichtlauf-Motoröl					
Sattelzug 40 t zGG	5W-30 Leichtlauföl, 45 L	1,70 Euro/Liter Aufpreis zu Standard-Motoröl (z. B. 15W-40)	[Öl-Engel, 2014]; [Texaco, 2014]	77	Jährlicher Ölwechsel über zusätzliche Betriebskosten berücksichtigt
Solo-Lkw 12 t zGG	5W-30 Leichtlauföl, 40 L			68	
Linienbus 18 t zGG	5W-30 Leichtlauföl, 40 L			68	
Leichtlauf-Getriebeöl zur Verringerung der Getriebeverluste					
Sattelzug 40 t zGG	75W-80 Leichtlauföl, 16 L	1,70 Euro/Liter Aufpreis zu Standard-Getriebeöl (z. B. 85W-90)	[Öl-Engel, 2014]; [Texaco, 2014]	27	Ölwechsel alle drei (SZ) bzw. zwei Jahre (Solo-Lkw) über zusätzliche Betriebskosten erfasst
Solo-Lkw 12 t zGG	75W-80 Leichtlauföl, 15 L			26	
Leichtlauf-Getriebeöl zur Verringerung der Achsgetriebeverluste					
Sattelzug 40 t zGG	75W-80 Leichtlauföl, 15 L	1,70 Euro/Liter Aufpreis zu Standard-Motoröl (z. B. 85W-90)	[Öl-Engel, 2014]; [Texaco, 2014]	26	Ölwechsel alle drei (SZ) bzw. zwei Jahre (Solo-Lkw, Stadtbus) über zusätzliche Betriebskosten erfasst
Solo-Lkw 12 t zGG	75W-80 Leichtlauföl, 10 L			17	
Linienbus 18 t zGG	75W-80 Leichtlauföl, 15 L			26	
Abgaswärmennutzung mittels Organic Rankine Cycle (ORC)					
Sattelzug 40 t zGG	12 kW Leistung	9.300	[NESCCAF, 2009] S.112	11.000	Gemittelte leistungsbezogene Kosten für VECTO-Fahrzeug mit ORC-Leistung 20 kW
	30 kW Leistung	16.800			
	57 kW Leistung	26.400			
Erdgasfahrzeug					
Sattelzug 40 t zGG (LNG)	MB Econic LNG; Iveco Stralis LNG	40.000 - 60.000	[VOS et al., 2012]	40.000	Mittelwert aus der ermittelten Bandbreite
	LNG-Truck	30.000-40.000			
Solo-Lkw 12 t zGG (CNG)	Solo-Lkw <12 t	4.115	[TU Wien, 2011] S. 21, 146	6.000	Skaliert von [A. Hirsch, 2011] auf

Fahrzeugklasse	Spezifizierung	Bandbreite von Kostenangaben (in Euro)	Quellen	Zusatzinvestition (Euro)	Erläuterung
	Iveco Daily 50 C 14 GV;	4.780	[Iveco, 2013]		abweichende Tankkapazität des in VECTO simulierten Fahrzeugs
	Lkw bis 6,5 t: Iveco Daily mit 45kg CNG-Tank	4.000	[A. Hirsch, 2011]		
Linienbus 18 t zGG (CNG)	Diverse Modelle	15.000 - 50.000	[Erdgasmobil, 2013]	34.000	Mittelwert aus der ermittelten Bandbreite
Elektrischer Hybrid					
Sattelzug 40 t zGG	Diverse Hybrid-Lkw 17 t zGG	43.000	[Californiahvip, 2014]	40.000	Übernahme der Kostenschätzung der Industrie beim Abschlussworkshop
	Parallel-Hybrid 40 t zGG	40.000	Einschätzung VDA, Kap. 5.11.3		
Solo-Lkw 12 t zGG	MB Atego 12 t (44kW _{el} , 1,9 kWh)	+60 % = ca. 30.000 bei Annahme 50.000 Euro Grundpreis für Dieselversion	[KFZ-Anzeiger, 2013]	25.000	Gewichtet aus der ermittelten Bandbreite. Einbezug von Iveco und Mitsubishi mit kleinerer Fahrzeugklasse, da vergleichbare Hybridisierung (Motor, Batterie) wie 12-Tonner
	Diverse Hybrid-fahrzeuge	30.000	[Californiahvip, 2014]		
	IVECO EuroCargo 7,5 t (44 kW _{el} , 1,87 kWh)	16.000	[KFZ-Anzeiger, 2012b]		
	Mitsubishi Fuso hybrid Eco Canter 7,5 t (40 kW _{el} , 2kWh)	7.800 netto (Preisunterschied Fuso Canter 7C15 Duonic vs. 7C15 Duonic Eco Hybrid)	[Mercedes-Benz, 2013]		
Linienbus 18 t zGG Parallelhybrid	Volvo Solobus Parallelhybrid-	85.000-90.000	[Eurotransport.de, 2014]	70.000	Mittelwert aus der ermittelten Bandbreite
	Hybrid-Solo-Bus	50.000	[TU Graz, 2013b]		
Linienbus 18 t zGG Seriellhybrid	MAN Lion's City Seriellhybrid	100.000	[LAO, 2012b]	100.000	Standardbus: 255.000 [Bus-Fahrt, 2014]
Batterieelektrisches Fahrzeug					
Solo-Lkw 12 t zGG	Smith Newton Electric (80 kWh, 120 kW _{el})	88.000	[Ricardo, 2009b] S.144	130.000	Abgeleiteter Mittelwert für VECTO-Fahrzeug (120 kW _{el} & 120 kWh)
	Solo-Lkw 12 t (250 kWh, 150 kW _{el})	170.000	[CE Delft, 2013b] S.72		
Linienbus 18 t zGG	BYD Solobus Batterieelektr.	100.000 - 208.000	[SPON, 2012], [Wang, 2012]	Batterie-elektrischer Bus: 250.000 Batterie-elektrischer Bus	Batterieelektrischer Bus: Mittelwert aus der ermittelten Bandbreite in aktuellen Quellen Batterieelektrischer Bus mit Zwischenla-
	Solaris Urbino Electric 12 m mit/ohne Zwischenladung	400.000	[Braunschweig eute.de, 2014]		
	VDL-Gelenkbus Batterie + Ober-	+350.000-400.000	[Rundschau, 2014]		

Fahrzeugklasse	Spezifizierung	Bandbreite von Kostenangaben (in Euro)	Quellen	Zusatzinvestition (Euro)	Erläuterung
Sattelzug 40 t zGG - Auflieger	leitung			mit Zwischenladung: 200.000	dung: Mittelwert der Kosteneinschätzung der Industrierückmeldung beim Abschlussworkshop
	Rampini Midibus 8 m 96 kWh Batterie und Oberleitung	+200.000	[Tagesspiegel, 2013]		
	Elektrobus mit Zwischenladung	180.000-220.000	Einschätzung VDA, Kap. 5.11.3		

5.3.2 Investitionskosten Aerodynamik und Rollwiderstand

Fahrzeugklasse	Spezifizierung	Bandbreite von Kostenangaben (in Euro)	Quellen	Zusatzinvestition (Euro)	Erläuterung
Seitenverkleidung sowie Heck einzug					
Sattelzug 40 t zGG - Auflieger	Seiten- und Unterbodenverkleidung „Belly Box“	1.138-1.669	[ICCT, 2014b] S.9-10	Aeropaket 1: 4.500 € Aeropaket 2: 6.000 €	Übernahme der Kosteneinschätzungen der Aufliegerhersteller beim Abschlussworkshop.
	Heck einzug 50 cm	532-847			
	Heck einzug 100 cm	760-1.210			
	Aeropaket 1: Seitenverkleidung und Heck einzug 50 cm	4.500	Industrierückmeldung (Kap. 5.11.3)		
	Aeropaket 2: Seitenverkleidung und Heck einzug 100 cm	6.000	Industrierückmeldung (Kap. 5.11.3)		
Solo-Lkw 12 t zGG	Seitenverkleidung und Heck einzug 50 cm	-	-	3.150	Eigene Annahme: 70% der Kosten vom Sattelzug
Rückfahrkameras					
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG	3 Kameras (Seite + Vorn)	4.920	[DAF, 2014]	4.900	
Energiesparreifen					
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG	an Lenk-, Antriebs-, Aufliegerachse	15-22 pro Reifen	[LANXESS, 2013] S.22; [TIAX, 2009] S.3-13	20	Felge und Reifen; Mehrkosten für Optimierung um eine Energieeffizienzklasse
Einzelbreitreifen („Super Singles“)					
Sattelzug 40 t zGG	Antriebsachse	160-200 pro Achse	[NESCCAF, 2009] S.95; [TIAX, 2009] S.3-13	180	

5.3.3 Investitionskosten Leichtbau, Fahrzeugregelung und Nebenverbraucher

Fahrzeugklasse	Spezifizierung	Bandbreite von Kostenangaben (in Euro)	Quellen	Zusatzinvestition (Euro)	Erläuterung
Leichtbau					
Sattelzug 40 t zGG	400 kg Leergewichtsreduktion	3,10-6,20 Euro/kg für einfache Optionen mit geringer Gewichtsreduktion	[TIAX, 2009, 2011];	1.900	Bei Verwendung mittlerer spezifischer Kosten von 4,65 Euro/kg
Solo-Lkw 12 t zGG	200 kg Leergewichtsreduktion			930	
Linienbus 18 t zGG	350 kg Leergewichtsreduktion			1.650	
Geschwindigkeitsbegrenzer (80 km/h-Regelung)					
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG		0	eigene Annahme	0	Bereits Standard in Sattelzügen (mit 85 bzw. 90 km/h)
Start-Stopp-System					
Linienbus 18 t zGG		940	[AEA, 2011]	5.000	Mittelwert aus Industrierückmeldung beim Abschlussworkshop
		4.000-6.000	Industrierückmeldung (Kap. 5.11.3)		
LED-Beleuchtung					
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG	Fern- und Abblendlicht: Hella Luminator LED	600-800	diverse Internetangebote	700	Angaben je Set; Mittelwert aus der ermittelten Bandbreite
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG	Nebelscheinwerfer: Osram LEDriving FOG	150-250	diverse Internetangebote	200	Angaben je Set; Mittelwert aus der ermittelten Bandbreite
Variable Lenkhilfepumpe					
Sattelzug 40 t zGG; Solo-Lkw 12 t zGG; Linienbus 18 t zGG		160	Eigene Annahme	160	angelehnt an Mehrkosten für variable Ölpumpe (s.o.)
Wärmeisolierung mit Thermoglas					
Linienbus 18 t zGG	für 23 m ² Fensterfläche	100-200 Euro/m ²	[Finke, n.d.]	3.450	Bei mittleren Kosten von 150 Euro/m ²

5.4 Datenblätter der simulierten Nutzfahrzeuge

5.4.1 Sattelzug 40 t auf Long Haul Cycle

Der Fahrzyklus mit dem Sattelzug 40 t wird in Abbildung 10 gezeigt.

5.4.1.1 Verbrauch Referenzfahrzeuge

- ▶ Euro V: 13,0 MJ/km, 36,2 L-Diesel/100km, 1175 g-CO₂/km (WTW)
- ▶ Euro VI: 12,4 MJ/km, 34,5 L-Diesel/100km, 1120 g-CO₂/km (WTW)

5.4.1.2 Maßnahmen Antriebsstrang

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
1) Verbesserung Dieselmotor	Mittleren Motorwirkungsgrad um einen Prozentpunkt verbessern - AGN nur mittels SCR, AGR fällt weg - variable Wasser- und Ölpumpe - Leichtlauföl $\eta_{\max} = 0,469$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,445$	12,1	1.094	- 2,3 %	540
2) Abgaswärmennutzung	Abgaswärmennutzung mit ORC (Organic Rankine Cycle) am Auspuffende - kleiner Dampfkraftprozess mit organischem Arbeitsmedium, Wirkungsgrad temperaturabhängig, Leistung ergibt sich aus Wirkungsgrad und Abgas-Enthalpiestrom, Übertragung von 0 bis ca., 20 kW _{mech} mittels Ketten-/ Riementrieb an Kardanwelle, Änderung Leermasse: +150 kg	12,0	1.086	- 3,0 %	11.000
3) Gasmotor LNG-Tank	Sattelzug mit Erdgasmotor, LNG Tank: - Gasmotor 350 kW 13,5 L $\eta_{\max} = 0,394$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,356$ - 670 L LNG Tank (300 kg-Gas), Verringerung Reichweite Long Haul von 2200 auf 940 km - Änderung Leermasse: - 100 kg	14,9 = 318 g-Gas/km	1.013	EEV: +20 %; THG: - 1 %	40.000
4) Parallelhybrid	Parallelhybrid: - EM +/- 120 kW +/- 800 Nm zwischen VKM und Getriebe - Batterie 12 kWh Li-Ion 500 kg (Leistungszel- len), SOC 40-60 % Änderung Leermasse: + 600 kg	11,9	1.079	- 3,7 %	40.000, zzgl. 20.000 Batterietausch
5+6) Achs- und Getriebe-verluste vermindern	Achs- und Getriebeverluste um 1/4 vermindern - Trockensumpfschmierung mit variabler Öl- pumpe - Leichtlauföl $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,980$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,986$ $\eta_{\text{Achse,m}} = 0,967$	12,2	1.104	- 1,4 %	50

5.4.1.3 Maßnahmen Aerodynamik

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
7) Aeropaket 1	<u>Optimierung des Aufliegers</u> - SZM: wie Referenzfzg., EURO VI - Auflieger: Seitenverkleidung und Heckeneinzug 50 cm - Änderung Leermasse: + 200 kg Cw-Wert: 0,445 (- 16 %)	11,9	1.076	- 3,9 %	4.500
8) Aeropaket 2	<u>Optimierung der Sattelzugmaschine</u> - SZM: Rückfahrkameras - Auflieger: wie Referenz, EURO VI Cw-Wert: 0,514 (- 3 %)	12,3	1.110	- 0,9 %	4.900
	<u>Optimierung des Aufliegers</u> - Sattelzugmaschine: wie Referenz EURO VI - Auflieger: Aero 1 mit Heckeneinzug 1,0 m - Änderung Leermasse: + 250 kg Cw-Wert: 0,424 (- 17 %)	11,8	1.065	- 4,9 %	6.000
	<u>Optimierung von Sattelzugmaschine & Auflieger</u> - SZM: Rückfahrkameras - Auflieger: Aero 1 + Heckeneinzug 1,0 m - Änderung Leermasse: + 250 kg Cw-Wert: 0,408 (- 20 %)	11,7	1.055	- 5,8 %	10.900
9) Aeropaket 3	<u>Optimierung von Sattelzugmaschine & Auflieger</u> SZM: Aero2 + runde Frontverlängerung 0,5 m Auflieger: Aero2 - Änderung Leermasse: + 250 kg Cw Wert 0,387 (- 24 %)	11,5	1.045	- 6,8 %	n.a.

5.4.1.4 Maßnahmen Rollwiderstand

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
10) Energie-effiziente Reifen aktuell verfügbar	<u>Optimierung der Sattelzugmaschine</u> - SZM VA: 2x Kl. B - SZM HA: 4x Kl. B - Auflieger: 6x Kl. B Gesamt-Rollwiderstand 5,11 N/kN	12,2	1.107	- 1,1 %	80
	<u>Optimierung des Auflieger</u> - SZM VA: 2x Kl. B - SZM HA: 4x Kl. C - Auflieger: 6x Kl. A - Gesamt-Rollwiderstand 4,81 N/kN	12,1	1.091	- 2,6 %	120
	<u>Optimierung von Sattelzugmaschine & Auflieger</u> - SZM VA: 2x Kl. B - SZM HA: 4x Kl. B Auflieger: 6x Kl. A Gesamt-Rollwiderstand 4,55 N/kN	11,9	1.078	- 3,7 %	200
11) Energie-effiziente Reifen zukünftig verfügbar	<u>Optimierung von Sattelzugmaschine & Auflieger</u> Alle Achsen Reifen Kl. A Gesamt-Rollwiderstand 4,09 N/kN	11,7	1.057	- 5,6 %	280
12) Einzelbreitreifen zukünftig verfügbar	<u>Optimierung von Sattelzugmaschine & Auflieger</u> - SZM VA: 2x Kl. A - SZM HA: 2x Einzelbreitreifen Kl. A J_Räder - kg*m^2 - Auflieger: 6x Klasse A Gesamt-Rollwiderstand: 4,09 N/kN Änderung Leermasse: - 130 kg	11,7	1.054	- 5,9 %	660

5.4.1.5 Sonstige Maßnahmen

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
13) Leichtbau	Gewichtsreduktion SZM + Auflieger durch Leichtbau (Material, Konstruktion) um 3 % Änderung Leermasse: -400 kg	12,3	1.112	- 0,7 %	1.900
14) Fahrzeugregelung	- Geschwindigkeitsbegrenzer: 80 statt 85 km/h	12,0	1.082	- 3,4 %	0
15) Nebenverbraucher	- Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, P _m = 0,45 kW - variable Lenkhilfepumpe, P _m = 0,43 kW - LED-Vollausstattung, P _{el,m} = 0,96 kW _{el} - Nebenverbraucher komplett, P _{m,Nv} = 3,05 kW	12,3 12,4 12,4 12,3	1.111 1.118 1.119 1.108	- 0,8 % - 0,2 % - 0,04 % - 1,0 %	2.000

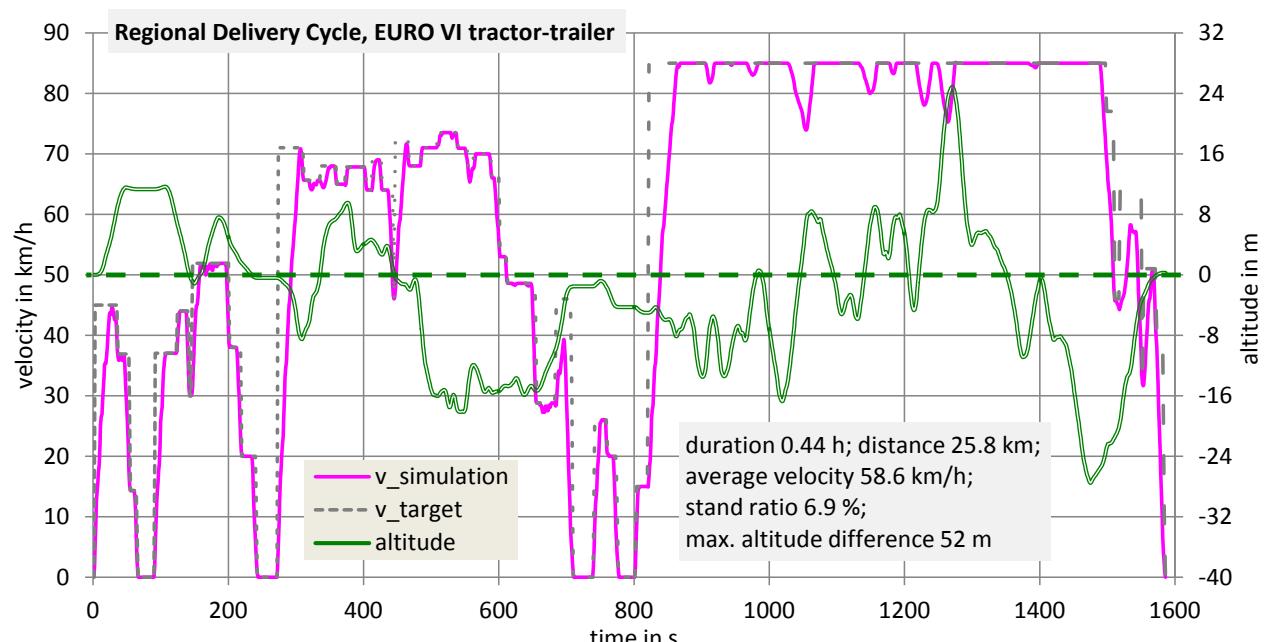
5.4.1.6 Kombination von Maßnahmen

- **Paket A:** 7) Aeropaket 1 Auflieger, 10) Leichtlaufreifen aktuell, 14) Geschwindigkeit 80 km/h, 15) Sparsame Nebenverbraucher
- **Paket B:** 1) VKM besser, 2) ORC 5) Getriebeverluste geringer, 6) Achsgetriebeverluste geringer, 8) Aeropaket 2 SZM und Auflieger, 11) Reifen Zukunft, 13) Leichtbau 400 kg, 14) Geschwindigkeit 80 km/h, 15) Sparsame Nebenverbraucher

Kombina-tion	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treib-hausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investi-tion (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
Diesel A	Kombination Basisfahrzeug EURO VI mit Paket A Cw-Wert: 0,451 (- 15 %)	11,0	998	- 10,9 %	6.700
Gasmotor A	Gasmotor mit Paket A Änderung Leermasse: - 100 kg Cw-Wert: 0,451 (- 15 %)	13,3 = 284 g-Gas/km	988	EEV: +7,1 % THG: -11,7 %	46.700
Parallelhyb-rid A	Parallelhybrid mit Paket A Änderung Leermasse: + 600 kg Cw-Wert: 0,451 (- 15 %)	10,4	940	- 16,1 %	66.700
Diesel B	Kombination Basisfahrzeug EURO VI mit Paket B Änderung Leermasse: - 400 kg Cw-Wert: 0,424 (- 20 %)	9,8	889	- 20,7 %	26.670
Gasmotor B	Gasmotor ($\eta_m + 0,01$) mit Paket B Änderung Leermasse: - 500 kg Cw-Wert: 0,424 (- 20 %)	12,1 = 259 g-Gas/km	902	EEV: -2,3 % THG - 19,5 %	55.130
Parallelhyb-rid B	Parallelhybrid mit Paket B Änderung Leermasse: + 200 kg Cw-Wert: 0,424 (- 20 %)	9,4	851	- 24,0 %	75.670

5.4.2 Sattelzug 40 t auf Regional Delivery Cycle

Abbildung 56 Regional Delivery Cycle



5.4.2.1 Verbrauch Referenzfahrzeuge

► Sattelzug EURO V:	15,1 MJ/km	42,1 L/100km	1368 g-CO ₂ e/km
► Sattelzug EURO VI:	14,6 MJ/km	40,7 L/100km	1322 g-CO ₂ e/km

5.4.2.2 Maßnahmen Antriebsstrang

Maßnahme	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)		
	MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI
1) Verbesserung Dieselmotor	14,3	1.292	- 2,3 %
3) Gasmotor, LNG-Tanks	17,3 = 369 g-Gas/km	1.286	EEV: +18 % THG: - 2,7 %
4) Elektrischer Parallelhybrid	13,5	1223	- 7,5 %
5+6) Achs- und Getriebeeverlust vermindern	14,4	1.304	- 1,4 %

5.4.2.3 Maßnahmen Aerodynamik und Rollwiderstand

Maßnahme	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)		
	MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI
7) Aeropaket 1	14,3	1.290	- 2,4 %
8) Aeropaket 2, SZM und Auflieger	14,2	1.279	- 3,3 %
9) Aeropaket 3	14,0	1.268	- 4,1 %
10) Energieeffiziente Reifen <u>aktuell</u>	14,2	1.284	- 2,9 %
11) Energieeffiziente Reifen <u>Zukunft</u>	14,0	1.266	- 4,3 %
12) Einzelbreitreifen <u>Zukunft</u>	13,9	1.260	- 4,7 %

5.4.2.4 Sonstige Maßnahmen

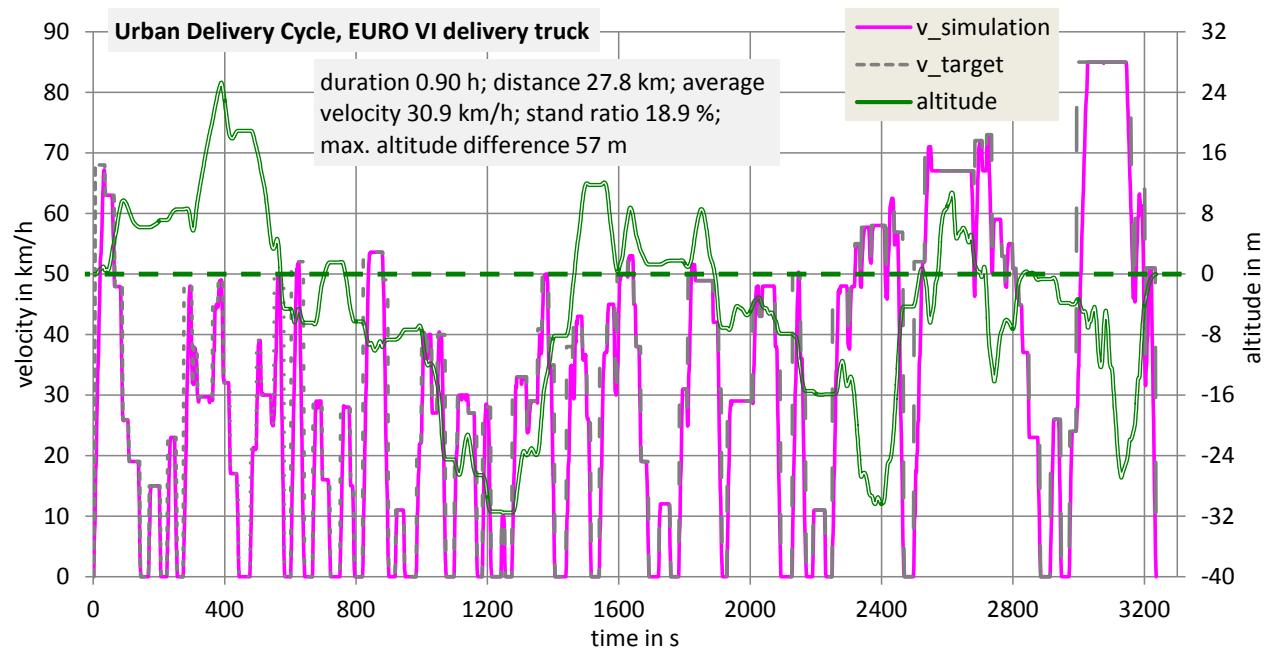
Maßnahme	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)		
	MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI
13) Leichtbau	14,5	1.314	- 0,7 %
14) Fahrzeugregelung	14,3	1.295	- 2,1 %
15) Nebenverbraucher	14,5	1.314	- 0,7 %

5.4.2.5 Kombination von Maßnahmen

Kombination	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)		
	MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI
Diesel A	13,6	1.229	- 7,1 %
Gasmotor A	16,2 = 345 g-Gas/km	1.204	EEV: +10,5 % THG: - 8,9 %
Parallelhybrid A	12,2	1.107	- 16,3 %
Diesel B	12,7	1.146	- 13,4 %
Gasmotor B	15,0 = 321 g-Gas/km	1.117	EEV: +2,6 % THG: - 15,5 %
Parallelhybrid B	11,3	1.023	- 22,6 %

5.4.3 Solo-Lkw 12 t auf Urban Delivery Cycle

Abbildung 57 Urban Delivery Cycle



5.4.3.1 Verbrauch Referenzfahrzeuge

- Euro V: 7,8 MJ/km, 21,8 L-Diesel/100km, 707 g-CO₂/km (WTW)
- Euro VI: 7,5 MJ/km, 20,9 L-Diesel/100km, 678 g-CO₂/km (WTW)

5.4.3.2 Maßnahmen Antriebsstrang

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
1) Verbesserung Dieselmotor	Mittleren Motorwirkungsgrad um 0,01 verbessern - AGN nur mittels SCR, AGR fällt weg - variable Wasser- und Ölpumpe - Leichtlauföl $\eta_{\max} = 0,443$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,401$	7,3	661	- 2,5 %	305
2) Gasmotor CNG-Tank	Erdgasmotor, CNG Tanks: - Gasmotor 185 kW 7,1 L, CNG Tank 500 L (66 kg-Gas) statt Dieseltank 130 L, Reichweite 340 km Änderung des Leergewichts: + 170 kg $\eta_{\max} = 0,395$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,330$	8,8 = 189 g-Gas/km	601	EEV: +17,7 % THG: - 11,3 %	6.000
3) Elektrischer Parallelhybrid	Parallelhybrid - Diesel VKM 5 L 160 kW (vier Zyl., statt sechs Zyl.), Standabschaltung - EM +/- 30 kW +/- 180 Nm - Li-Ion Batterie 2 kWh 90 kg (Leistungszellen), SOC zwischen 40 und 60 % Änderung des Leergewichts: +170 kg	6,8	619	- 8,7 %	25.000, zzgl. 10.000 Batterietausch

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
4) Batterie-elektrischer Lkw	<p>Batterieelektrischer Lkw</p> <ul style="list-style-type: none"> - EM +/- 120 kW +/- 620 Nm - $\eta_{max,mot} = 0,949$, $\eta_{mittel,mot} = 0,931$, $\eta_{max,gen} = 0,940$, $\eta_{mittel,gen} = 0,918$ - Li-Ion Batterie 150 kWh 1,35 t (Energiezellen), SOC zwischen 20 und 100 % - 3 Gang Getriebe 2,80/1,50/1,00 $\eta_m 0,96/0,96/0,98$ - Achse 1:3,80 $\eta_m = 0,96$ - Elektrisch angetriebene Nebenverbraucher (Lenkhilfepumpe, Kompressor), $P_{el,m} = 1,57 \text{ kW}_{el}$ (alle elektr., Verbraucher außer EM) - Reichweite 160 km <p>Änderung des Leergewichts: + 490 kg</p>	2,7 = 0,75 kWh _{el} /km	317	EEV: -64,1 % THG: -53,2 %	130.000
5+6) Achs- und Getriebeeverlust vermindern	<p>Getriebeeverluste um 1/4 vermindern</p> <ul style="list-style-type: none"> - Trockensumpfschmierung mit variabler Ölpumpe - Leichtlauföl <p>$\eta_{übersetzt,m} = 0,974$, $\eta_{direkt,m} = 0,985$ $\eta_{Achse,m} = 0,970$</p>	7,4	669	- 1,3 %	40

5.4.3.3 Maßnahmen Aerodynamik und Rollwiderstand

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
7) Aeropaket 1	<ul style="list-style-type: none"> - Windleitbleche Kabine - Aufbau, - abgerundete Vorderkanten Koffer, - Seitenverkleidung - kurzer Heckeneinzug 0,5 m <p>Cw-Wert: 0,494 (- 10 %)</p>	7,4	665	- 1,8 %	3.150
8) Aeropaket 2	<ul style="list-style-type: none"> - Aerodynamik-Paket 1 + Rückfahrkameras <p>Cw-Wert: 0,478 (- 13 %)</p>	7,3	662	- 2,4 %	8.050
9) Energie-effiziente Reifen aktuell verfügbar	<u>Energieeffiziente Reifen</u> <ul style="list-style-type: none"> - VA Kl. B - HA Kl. D - Gesamt-Rollwiderstand 6,24 N/kN 	7,4	672	- 0,9 %	40
10) Energie-effiziente Reifen zukünftig verfügbar	<u>Energieeffiziente Reifen</u> <ul style="list-style-type: none"> - VA & HA Kl. A - Gesamt-Rollwiderstand 4,08 N/kN 	7,1	639	- 5,7 %	320

5.4.3.4 Sonstige Maßnahmen

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
11) Leichtbau	Gewichtsreduktion durch Leichtbau (Material, Konstruktion) um ca., 3 % Änderung Leermasse: -200 kg	7,3	670	- 1,2 %	930
12) Fahrzeugregelung	- Standabschaltung (Start-Stopp) $\eta_{VKM, mittel} = 0,400$	7,3	663	- 2,2 %	940
	- Geschwindigkeitsbegrenzer 80 km/h	7,4	672	- 0,8 %	
	- Standabschaltung & Geschwindigkeitsbegrenzer	7,3	658	- 3,0 %	
13) Nebenverbraucher	- Kompressor mit Kupplung und Förderung im Schubbetrieb, $P_m = 0,32 \text{ kW}$	7,4	671	- 1,0 %	1.900
	- variable Lenkhilfepumpe, $P_m = 0,19 \text{ kW}$	7,5	675	- 0,3 %	
	- LED-Vollausstattung, $P_{el,m} = 0,84 \text{ kW}_{el}$	7,5	676	- 0,3 %	
	- Nebenverbraucher komplett, $P_{m,Nv} = 2,18 \text{ kW}$	7,4	667	- 1,6 %	

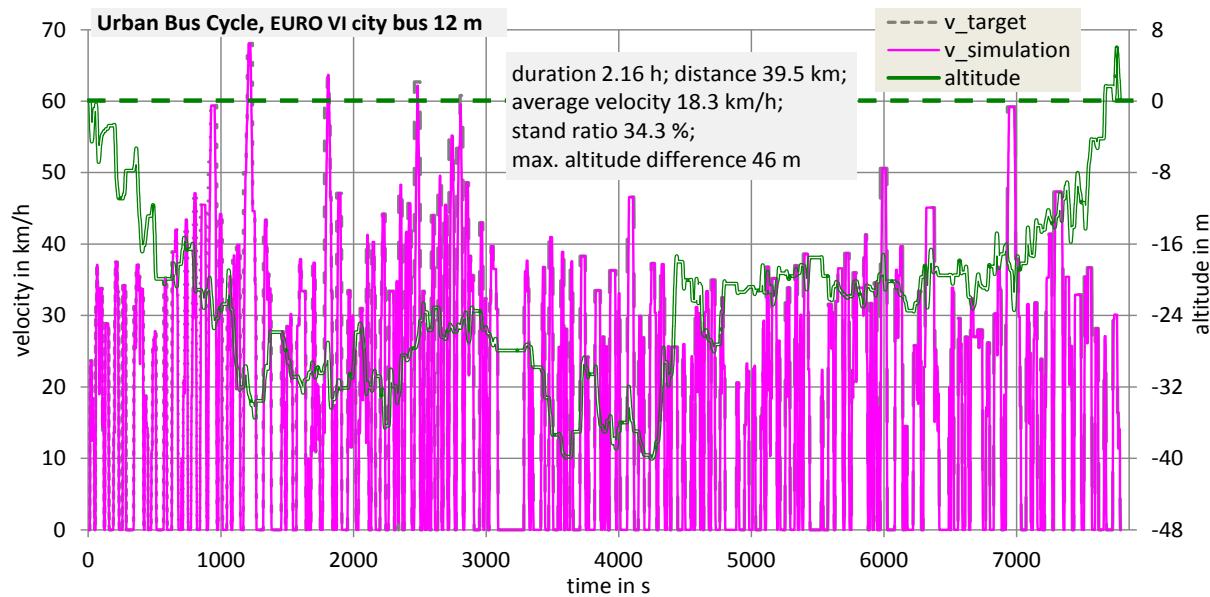
5.4.3.5 Kombination von Maßnahmen

- **Paket A:** 7) Aeropaket 1, 9) Reifen aktuell, 12) Start/Stopp-Automatik und 80 km/h-Begrenzung, 13) Sparsame Nebenverbraucher
- **Paket B:** 1) VKM besser 5) Getriebeverluste verringern, 6) Achsgetriebeverluste verringern, 8) Aeropaket 2, 10) Reifen Zukunft, 11) Leichtbau 200 kg, 12) Start/Stopp-Automatik und 80 km/h-Begrenzung, 13) Sparsame Nebenverbraucher

Kombination	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
Diesel A	Kombination Basisfahrzeug EURO VI mit Paket A Cw-Wert: 0,494 (- 10 %)	6,9	627	- 7,5 %	6.030
Gasmotor A	Gasmotor mit Paket A Änderung Leermasse: +170 kg Cw-Wert: 0,494 (- 10 %)	8,1 = 174 g-Gas/km	555	EEV: +8,6 % THG: - 18,2 %	12.030
Parallelhybrid A	Parallelhybrid mit Paket A Änderung Leermasse: + 170 kg Cw-Wert: 0,494 (- 10 %)	6,4	577	- 14,9 %	41.030
Batterie-Lkw A	Batterie-Lkw mit Paket A Änderung Leermasse: + 460 kg Cw-Wert: 0,494 (- 10 %)	2,5 = 0,70 kWh _{el} /km	295	EEV: -66,6 % THG: - 56,5 %	135.090
Diesel B	Kombination Basisfahrzeug EURO VI mit Paket B Cw-Wert: 0,478 (- 13 %) Änderung Leermasse: - 200 kg	6,2	560	- 17,4 %	12.485
Gasmotor B	Gasmotor ($\eta_m + 0,01$) mit Paket B Änderung Leermasse: - 30 kg Cw-Wert: 0,478 (- 13 %)	7,36 = 156 g-Gas/km	497	EEV: -2,6 % THG: - 26,6 %	18.180
Parallelhybrid B	Parallelhybrid mit Paket B Änderung Leermasse: - 30 kg Cw-Wert: 0,478 (- 13 %)	5,6	510	- 24,8 %	47.485
Batterie-Lkw B	Batterie-Lkw mit Paket B Änderung Leermasse: + 260 kg Cw-Wert: 0,478 (- 13 %)	2,2 = 0,60 kWh _{el} /km	256	EEV: -71,0 % THG: - 62,2 %	141.240

5.4.4 Stadtbus 12 m (18 t zGG) auf Urban Bus Cycle

Abbildung 58 Urban Bus Cycle



5.4.4.1 Verbrauch Referenzfahrzeuge

- Euro V: 16,0 MJ/km, 44,5 L-Diesel/100km, 1444 g-CO₂/km (WTW)
- Euro VI: 15,2 MJ/km, 42,2 L-Diesel/100km, 1370 g-CO₂/km (WTW)

5.4.4.2 Maßnahmen Antriebsstrang

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
1) Verbesserung Dieselmotor	Mittleren Motorwirkungsgrad um 0,01 verbessern - AGN nur mittels SCR, AGR fällt weg - variable Wasser- und Ölpumpe - Leichtlauföl $\eta_{\text{max}} = 0,448$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,416$	14,8	1.336	- 2,5 %	305
2) Gasmotor CNG-Tank	Stadtbus mit Erdgasmotor, CNG Tanks: - Gasmotor 220 kW 8,5 L, CNG Tanks 200 bar 1400 L (190 kg-Gas) statt Dieseltank 260 L, Reichweite 480 km - $\eta_{\text{max}} = 0,394$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,338$ Änderung Leermasse: +580 kg	18,5 = 395 g-Gas/km	1.260	EEV: +22,1 % THG: - 8,0 %	34.000
3) Parallelhybrid	Parallelhybrid mit - VKM 5 L 160 kW (4 statt 6 Zyl.), Start-Stopp - $\eta_{\text{max}} = 0,438$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,419$ - EM +75/-90 kW, +400/-500 Nm - Batterie 4,8 kWh 200 kg (Leistungszellen), SOC zwischen 30 und 60 %, - 12 G AMT Getriebe 14,94 - 1,00: $\eta_{\text{übersetzt,m}} = 0,96$, $\eta_{\text{direkt,m}} = 0,98$; $i_{\text{HA}} = 4,72$, $\eta_{\text{Achse,m}} = 0,95$ - Elektrisch angetriebene Nebenverbraucher (Kompressor, Lüfter, Lenkhilfepumpe, Klima), $P_{\text{el,m}} = 6,7 \text{ kW}_{\text{el}}$ (alle el., Verbraucher ohne EM) Änderung Leermasse: +300 kg	13,1	1.186	- 13,5 %	70.000, zzgl. 20.000 Batterietausch

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
4) Seriellhybrid	<p>Seriellhybrid mit</p> <ul style="list-style-type: none"> - VKM 7 L 185 kW, Standabschaltung - $\eta_{\max} = 0,433$, $\eta_{\text{mittel}} = 0,416$ - Generator 185 kW 900 Nm 3 kg*m² - Supercap 0,4 kWh - 2 EM +67/-76 kW +/- 1500 Nm 4 kg*m² $\eta_{\max,\text{mot}} = 0,948$, $\eta_{\text{mittel},\text{mot}} = 0,902$, $\eta_{\max,\text{gen}} = 0,940$, $\eta_{\text{mittel},\text{gen}} = 0,884$ - Summiergetriebe 1:0,80 $\eta_m = 0,98$ - $i_{HA} = 5,77$, $\eta_m = 0,95$ - Elektrisch angetriebene Nebenverbraucher (Kompressor, Lüfter, Lenkhilfepumpe, Klima), $P_{el,m} = 6,7 \text{ kW}_{el}$ (alle el., Verbraucher ohne EM) <p>Änderung Leermasse: + 1,2 t</p>	11,8	1.066	- 22,2 %	100.000
5) Batterie-elektrischer Bus	<p>Batterieelektrischer Bus mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Batterie 300 kWh 2,7 t (Energiezellen), SOC 20 bis 100 % - 2 EM +/- 76 kW +/- 1500 Nm 4 kg*m² - $\eta_{\max,\text{mot}} = 0,948$, $\eta_{\text{mittel},\text{mot}} = 0,902$, $\eta_{\max,\text{gen}} = 0,940$, $\eta_{\text{mittel},\text{gen}} = 0,884$ - Summiergetriebe 1:0,80, $\eta_m = 0,98$ - $i_{HA} = 5,77$, $\eta_m = 0,95$ - Elektrisch angetriebene Nebenverbraucher (Kompressor, Lenkhilfepumpe), $P_{el,m} = 5,0 \text{ kW}_{el}$ - Reichweite 183 km - Nach vier Umläufen (160 km, 8,6 h) für 45 min, mit 300 kW_{el} = 1 C nachladen, oder für 8 h mit 28 kW_{el} = 0,093 C, <p>Änderung Leermasse: + 2 t</p>	4,7 = 1,31 kWh _{el} /km	555	EEV: -68,9 % THG: - 59,5 %	250.000
6) Batterie-elektrischer Bus mit Zwischenladung	<p>Batterieelektrischer Bus mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Batterie 60 kWh 540 kg (Energiezellen), SOC 20 bis 100 % - 2 EM +/- 76 kW +/- 1500 Nm 4 kg*m² $\eta_{\max,\text{mot}} = 0,948$, $\eta_{\text{mittel},\text{mot}} = 0,902$, $\eta_{\max,\text{gen}} = 0,940$, $\eta_{\text{mittel},\text{gen}} = 0,885$ - Summiergetriebe 1:0,80, $\eta_m = 0,98$ - $i_{HA} = 5,77$ $\eta_m = 0,95$ - Pantograf - Elektrisch angetriebene Nebenverbraucher (Kompressor, Lenkhilfepumpe) $P_{el,m} = 5 \text{ kW}_{el}$ - Reichweite 41 km - 2x pro Umlauf für 10 min, mit 150 kW_{el} = 2,5 C nachladen <p>Änderung Leermasse: + 40 kg</p>	4,2 = 1,17 kWh _{el} /km	497	EEV: -72,1 % THG: - 63,7 %	200.000
7) Achsgetriebeverlust vermindern	<p>Achsgetriebeverluste um 1/4 vermindern</p> <ul style="list-style-type: none"> - Trockensumpfschmierung mit variabler Ölpumpe - Leichtlauföl <p>$\eta_{Achse,m} = 0,963$</p>	15,0	1.358	- 0,9 %	26

5.4.4.3 Maßnahmen Rollwiderstand

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
8) Energieeffiziente Reifen aktuell verfügbar	<u>Energieeffiziente Reifen</u> - VA & HA Kl. C Gesamt-Rollwiderstand 6,22 N/kN	14,9	1.346	- 1,7 %	120
9) Energieeffiziente Reifen zukünftig verfügbar	<u>Energieeffiziente Reifen</u> - VA & HA Kl. A Gesamt-Rollwiderstand 4,15 N/kN	14,4	1.301	- 5 %	360

5.4.4.4 Sonstige Maßnahmen

Maßnahme	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treibhausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investition (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
10) Leichtbau	Gewichtsreduktion durch Leichtbau (Material, Konstruktion) um 3 % Änderung Leermasse: -350 kg	14,9	1.346	- 1,7 %	1.650
11) Fahrzeugregelung	Start/Stopp-Automatik $\eta_{VKM, mittel} = 0,414$	14,8	1.337	- 2,5 %	5.000
12) Nebenverbraucher	<ul style="list-style-type: none"> - Kompressor mit Kupplung, $P_m = 0,42 \text{ kW}$ - variable Lenkhilfepumpe, $P_m = 0,79 \text{ kW}$ - LED Vollausstattung, $P_{el,m} = 1,630 \text{ kW}_{el}$ - Klimakompressor 3stufig statt 2stufig geregelt, Thermoverglasung, Isolation an Seiten und Türen (Fläche: 23 m²), $P_m = 1,87 \text{ kW}$ - <u>Nebenverbraucher komplett</u>, $P_{m,Nv} = 7,21 \text{ kW}$ 	15,0 15,0 15,1 15,0	1.360 1.360 1.366 1.358	- 0,8 % - 0,7 % - 0,3 % - 0,9 %	3.600
		14,8	1.337	- 2,4 %	

5.4.4.5 Kombination von Maßnahmen

- **Paket A:** 8) Reifen aktuell, 11) Start/Stopp-Automatik, 12) sparsame Nebenverbraucher
- **Paket B:** 1) VKM besser, 7) Achsgetriebeverluste verringern, 9) Reifen Zukunft, 10) Leichtbau 350 kg, 11) Start/Stopp-Automatik, 12) sparsame Nebenverbraucher

Kombina-tion	Kurzbeschreibung	Endenergieverbrauch & Treib-hausgasemissionen (wtw)			Zusatz-Investi-tion (€)
		MJ/Fz-km	g CO ₂ e /Fz-km	Änderung zu EURO VI	
Diesel A	Kombination vom Basisfahrzeug EURO VI mit Paket A	14,1	1.274	- 7,0 %	8.720
Gasmotor A	Gasmotor mit Paket A Änderung Leermasse: + 580 kg	17,4 = 372 g-Gas/km	1.186	EEV: +14,9 % THG: - 13,5 %	42.720
Parallelhybrid A	Parallelhybrid mit Paket A Änderung Leermasse: + 300 kg	12,7	1.149	- 16,1 %	98.720
Seriell-hybrid A	Seriellhybrid mit Paket A Änderung Leermasse: + 1,2 t	11,2	1.013	- 26,0 %	108.720
Batteriebus A	Batteriebus mit Paket A Änderung Leermasse: + 2,0 t	4,5 = 1,24 kWh _{el} /km	526	EEV: -70,5 % THG: - 61,6 %	253.720
Batteriebus Zwischen-ladung A	Batteriebus Zwischenladung mit Paket A Änderung Leermasse: + 40 kg	4,0 = 1,11 kWh _{el} /km	469	EEV: -73,7 % THG: - 65,7 %	203.720
Diesel B	Kombination vom Basisfahrzeug EURO VI mit Paket B Änderung Leermasse: - 350 kg	12,9	1.167	- 14,8 %	10.941
Gasmotor B	Gasmotor ($\eta_m + 0,01$) mit Paket B Änderung Leermasse: + 230 kg	15,9 = 340 g-Gas/km	1.084	EEV: +5,0 % THG: - 20,9 %	44.636
Parallelhybrid B	Parallelhybrid mit Paket B Änderung Leermasse: - 50 kg	11,5	1.038	- 24,3 %	100.941
Seriell-hybrid B	Seriellhybrid mit Paket B Änderung Leermasse: + 850 kg	9,9	894	- 34,7 %	110.941
Batteriebus B	Batteriebus mit Paket B Änderung Leermasse: + 1,65 t	4,0 = 1,11 kWh _{el} /km	469	EEV: -73,7 % THG: - 65,7 %	255.636
Batteriebus Zwischen-ladung B	Batteriebus Zwischenladung mit Paket B Änderung Leermasse: - 310 kg	3,6 = 0,99 kWh _{el} /km	419	EEV: -76,6 % THG: - 69,5 %	205.636

5.5 Modellierung beim seriellen Hybridbus

Inhalt von Powerpoint-Folien zur Beschreibung des Seriellhybridbus-Modells

HA mit Differential, $\eta_{Achse} = 0.95$

2 x EM 75 kW/1500 Nm per Summiergetriebe ($\eta_{SummGetr} = 0.98$) zusammengefasst

Antriebsleistung: + 67 kW / 1500 Nm

$\eta_{max,mot} = 0.948$, $\eta_{mittel,mot} = 0.902$

Bremsleistung: - 75 kW / - 1500 Nm

$\eta_{max,gen} = 0.940$, $\eta_{mittel,gen} = 0.884$

Umrichter, $\eta_{Umrichter} = 0.95$

Supercap 0.4 kWh = 1440 kJ = $1/2 * 18 \text{ t} * (45.5 \text{ km/h})^2 \approx W_{kin,Bus,46\text{km/h}}$

$\eta_{SCap,Lade/Entlade} = 0.95$

Generator 150 kW, $\eta_{Gen} = 0.9$

Diesel-VKM 185 kW 900 Nm, $\eta_{VKM,max} = 0.433$, $\eta_{VKM,mittel} = 0.416$

$m_{leer} = 12.7 \text{ t}$ (ca. 1.2 t mehr als Standardbus)

Nebenverbraucher

Wirkungsgrad der einzelnen Elektromotoren: $\eta_{mot} = 0.85$

Verbraucher	P_{mech} in kW _{mech}	P_{el} in kW _{el}
Lüfter Viskokupplung	1.47	1.7
Lenkhilfepumpe elektrohydraulisch	0.23	0.3
Klimakompressor 2stufige Regelung	2.17	2.6
Bremskompressor	0.41	0.5
Elektrische Verbraucher		1.7
Nebenverbraucher gesamt		6.7 kW_{el}

→ keine Berücksichtigung der Heizung (Anteil Motorabwärme unklar)

Bedeutung nach

ACEA Whitebook 4/2014, Annexes S. 187 - 211

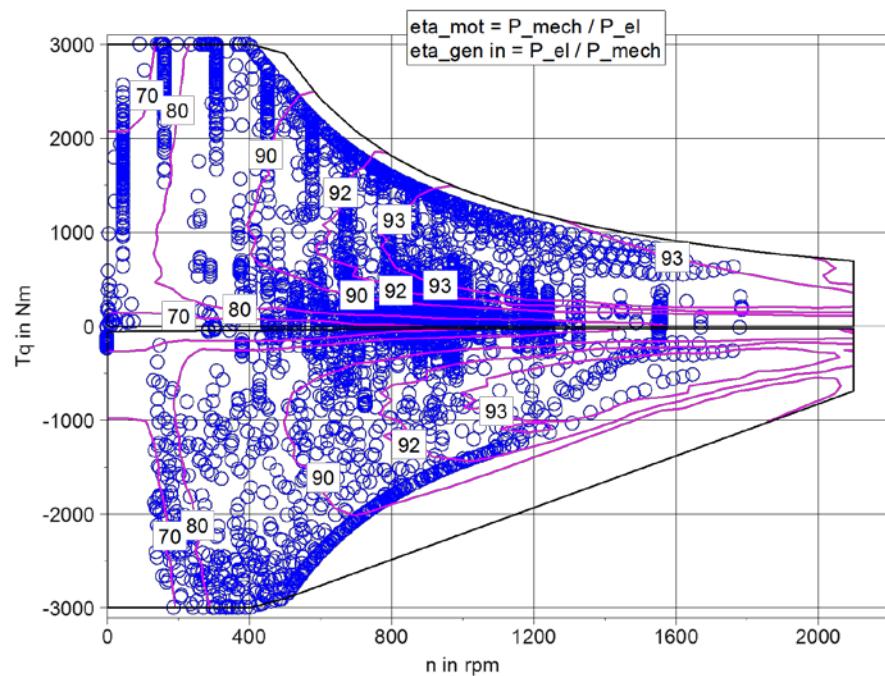
Fraunhofer IVI HVACCO2SIM Programm 4/2013

Abschätzungen: Leistungsabnahme Lüfter Seriellhybrid (weniger Motorbetrieb); 0,5 kW_{el} Mehrverbrauch
Stadtbus gegenüber Lkw (0,98 kW_{el}-Lkw + 0,5 kW_{el}-Bus + 0.27 kW_{el}-Klima)

Betriebspunkte EM

Zusammenfassung 2 EM 75 kW/1500 Nm zu einer großen Maschine:

+ 134 / - 150 kW, +/- 3000 Nm

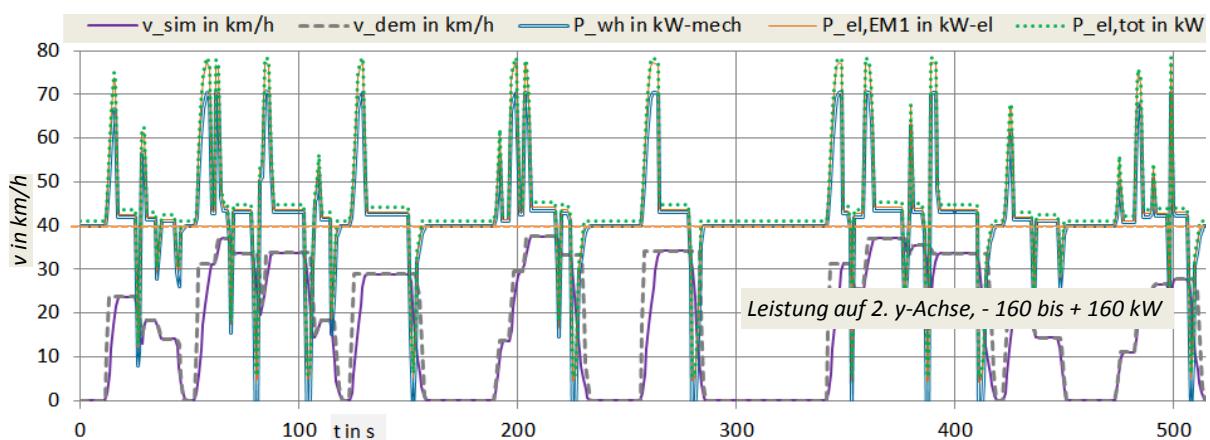


Begrenzung der Motorleistung, damit inklusive aller Wandlungsverluste plus elektr. Leistung Nebenverbraucher nicht mehr Leistung als vom VKM verfügbar angefordert wird.

$$(134 \text{ kW}_{\text{mech}} / \eta_{\text{EM}} / \eta_{\text{Umrichter}} + P_{\text{Nebenverbraucher,el}}) / \eta_{\text{Gen}} = (134 \text{ kW}_{\text{mech}} / 0.9 / 0.95 + 6.7 \text{ kW}_{\text{el}}) / 0.9 \approx 182 \text{ kW}_{\text{mech}}$$

1. Lauf VECTO

Zeitl. Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme/-abgabe der EM ($P_{\text{el,EM1}}$)



Zwischenrechnung Excel:

Addition der elektr. Leistung Nebenverbraucher -> elektr. Gesamtleistung ($P_{\text{el,tot}}$)

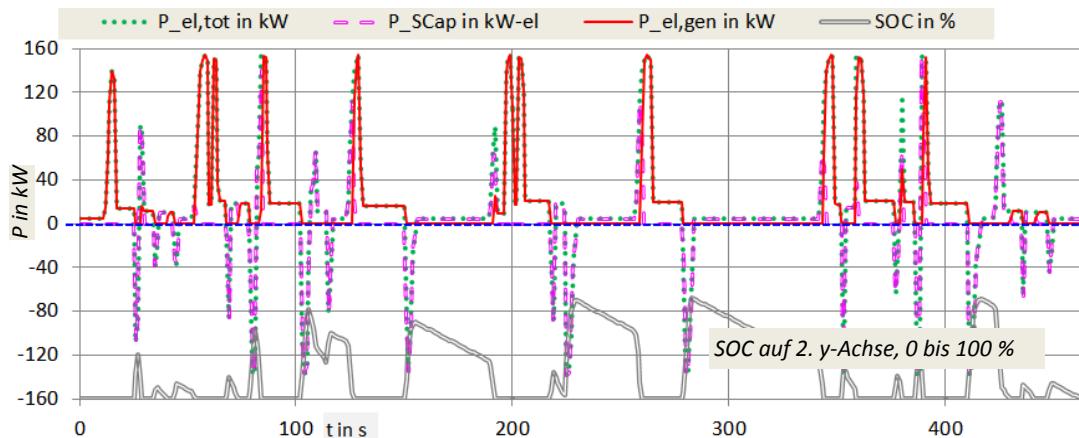
Berechnung des Ladestandes des Supercaps (SOC) inkl. 2 x 5 % Wandlungsverlust (Umrichter, SCap)

- Beim Bremsen wird SCap geladen
- Im Stand versorgt der SCap die elektr. Nebenverbraucher mit 6.7 kW_{el}
- Beim Anfahren wird die EM aus dem SCap gespeist

→ Berechnung der elektr. Leistung des SCap inkl. aller Wandlungsverluste (P_{SCap})

→ Ist der SCap leer oder liefert zu wenig Leistung, wird die Differenz vom Generator angefordert

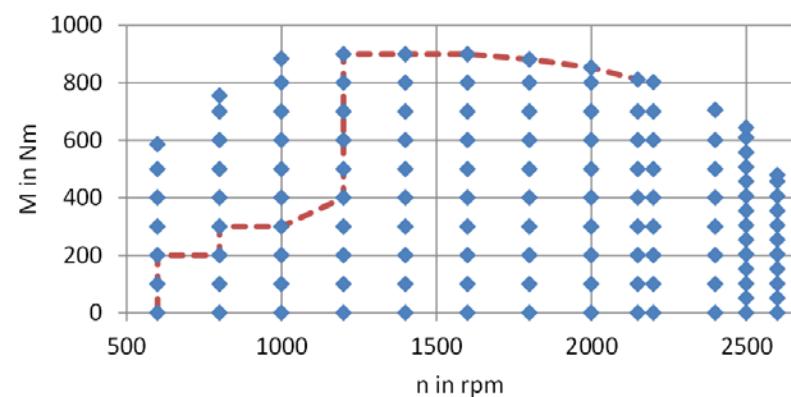
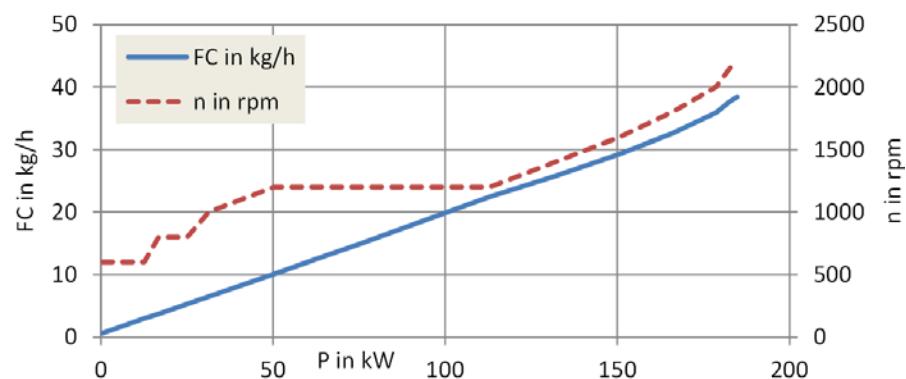
$$(P_{el,Gen} = P_{el,tot} - P_{SCap})$$



Aufschlag Wandlungsverluste im Generator ($P_{VKM,mech} = P_{el,Gen} / 0.9$)

→ Ergebnis ist der zeitl. Verlauf der VKM-Leistung

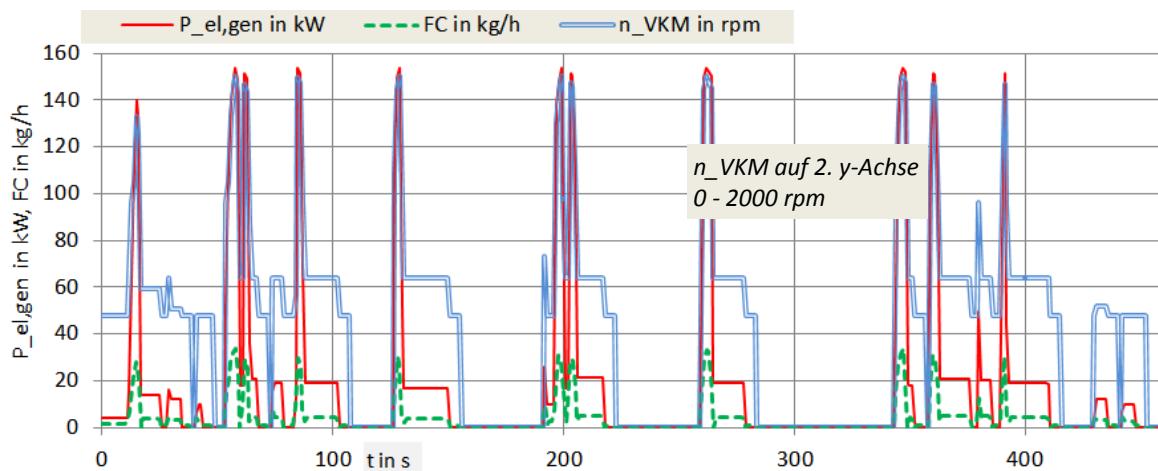
VKM: Betriebspunkte bei niedrigstem Verbrauch per Leistung gewählt $\Rightarrow n_{soll}(P_{mech})$



2. Lauf VECTO

engine only, nur VKM mit Vorgabe Drehzahl und mech. Leistung

$$J_{\text{ges}} = J_{\text{VKM}} + J_{\text{Gen}} = (2.3 + 3) \text{ kg}^* \text{m}^2 = 5.3 \text{ kg}^* \text{m}^2$$



→ Ergebnis ist der zeitl. Verlauf des Kraftstoffverbrauchs

5.6 Vergleich der simulierten Sparpotenziale mit TIAX Studie 2011

Wie in Kapitel 0 geschrieben, sind die in der vorliegenden Arbeit simulierten Sparpotenziale deutlich niedriger als die bisher veröffentlichten Ergebnisse. Daher werden im Folgenden für die bis dato aktuellste Studie für den europäischen Nfz-Markt [TIAX, 2011] einige Unterschiede erläutert, die die anderen Ergebnisse verursachen.

- ▶ Andere Basisfahrzeuge

Der TIAX Sattelzug hat einen $c_w \cdot A_q$ -Wert von ca. 6 m^2 ⁴⁴, einen Rollwiderstandsbeiwert von ca. $6,1 \text{ N/kN}$ ⁴⁵ (entspricht einer Mischung von Reifen Kl. C und D) und einen max. Motorwirkungsgrad von $0,44$ ⁴⁶.

Der in dieser Arbeit untersuchte Referenz-Sattelzug EURO VI hat einen $c_w \cdot A_q$ -Wert von ca. $5,3 \text{ m}^2$ ⁴⁷, einen Rollwiderstandsbeiwert von ca. $5,4 \text{ N/kN}$ ⁴⁸ (Reifen Kl. B und C) und einen max. Motorwirkungsgrad von $0,46$ ⁴⁹.

Allein aufgrund der höheren Fahrwiderstände des Basisfahrzeuges und des niedrigeren Wirkungsgrades der VKM hat der TIAX-Sattelzug ein höheres Sparpotenzial.

- ▶ Andere Auswahl von Einzelmaßnahmen

TIAX hat einige Maßnahmen angeführt, die hier nicht untersucht wurden, z. B.

- ▶ Automatische Reifen-Aufpumpsysteme an allen Achsen: Aufgrund des hohen technischen Aufwandes, für jedes Rad eine Druckluftzufuhr durch die Felge zu montieren, und des resultierenden schlechten Einsparung/Investition-Verhältnisses wurde diese Technologie nicht untersucht.
- ▶ Externe Stromversorgung für den Campingbetrieb am Wochenende: In den USA gibt es bereits einen Markt für „Auxiliary Power Units“, um den Energiebedarf für Strom, Heizung und Klimatisierung während längeren Standphasen (= „Hotel Load“) zu decken und den Leerlaufbetrieb des Dieselmotors bei schlechtem Wirkungsgrad zu vermeiden. In Europa wird dies anders gelöst: Es gibt als wählbare Optionen für Neufahrzeuge Standheizung und Standklimaanlage, und der Strombedarf beim Campieren wird mittels der 24-V-Bordbatterien gedeckt.
- ▶ Predictive Cruise Control: Diese topografieabhängige Antriebsstrangregelung erlaubt es, vor Kuppen automatisch früher vom Gas zu gehen, mit einer definierten Mindestgeschwindigkeit (z. B. 75 km/h) darüber zu rollen, auf dem folgenden Gefälle erst bei einer Maximalgeschwindigkeit, z. B. 95 km/h, die Dauerbremse einzuschalten und so am Anfang der nächsten Steigung erst später Gas geben zu müssen. In Kombination führt dies dazu, dass auf hügeligen Höhenprofilen an den Steigungen weniger Kraftstoff verbraucht wird. Diese Technologie ist von den meisten europäischen OEM bereits implementiert, z. B. „Predictive Powertrain Control“ von Daimler, „I-See“ bei Volvo oder „Ecoroll“ bzw. „Eco-Roll“ bei Renault und Scania. In VECTO lässt sich diese Maßnahme noch nicht simulieren und konnte daher nicht untersucht werden.
- ▶ „Route Management“ sowie „Training and Feedback“: Dies sind keine fahrzeugseitigen Technologien und können somit nicht simuliert werden.
- ▶ TIAX wiederum hat keine Geschwindigkeitsbegrenzung untersucht.

⁴⁴ S. 4-2 Table 4-1: Frontal area (m^2) < 10; S. 4-3 Table 4-3: $c_{w,\text{US}}$ 0,62 bis 0,64, $c_{w,\text{EU}} \approx c_{w,\text{US}}$

⁴⁵ S. 5-8 Table 5-6: Für "Next generation low rolling resistance wide-base single tires" wird ein Sparpotenzial von 9 bis 12 % angegeben, mit Verweis auf TIAX/NAS. Auf S. 2-1 werden diese Quellen als [TIAX, 2009] und [NRC, 2010] angegeben. In [TIAX, 2009], S. 4-57 Table 4-30 werden die Annahmen für das Sparpotenzial von Reifen gegeben. "Next generation WBS" (= wide base single tires, Einzelbreitreifen) bringen dort 11 bis 14 % Verbrauchsreduktion, bezogen auf einen Basis-Rollwiderstandsbeiwert von $6,8 \text{ N/kN}$. Laut der Tabelle werden mit diesen Einzelbreitreifen 9 bis 12 % Reduktion erreicht, wenn die Basisreifen bei ca. $6,1 \text{ N/kN}$ liegen, 2. Eintrag "Low rolling resistance duals"

⁴⁶ S. 4-8 Table 4-8: "peak thermal efficiency 43 to 44 %"

⁴⁷ Wert aus Messung im Rahmen des Lot 3 Projektes

⁴⁸ Typische Reifen für Neufahrzeuge laut Herstellerangaben

⁴⁹ Gemessenes Kennfeld eines Dieselmotors für Sattelzugmaschinen

- ▶ Unterschiede bei einzelnen Sparpotenzialen und Komponenten: Für die Einzelmaßnahmen werden unterschiedliche Sparpotenziale und Bauweisen angenommen, hier zwei Beispiele:
 - ▶ TIAX schließt den Leistungsgewinn der Abwärmenutzung mittels ORC in den Motorwirkungsgrad ein und nimmt ein Sparpotenzial von 6 bis 10 % an. Die zugrundeliegende Messung wurde mit einem Cummins ISX Motor, Modelljahr 2007, durchgeführt⁵⁰, die Wärmequellen für den ORC waren der AGR-Kühler und ein Abgas-Wärmeübertrager. Zum damaligen Zeitpunkt fand die NO_x-Reduzierung der Cummins-ISX-Motoren nur mittels AGR statt, es wurde kein SCR-Katalysator verwendet⁵¹.⁵² Daher fiel an der AGR-Strecke wesentlich mehr Abwärme an als bei neueren Motoren, die alle mit weniger AGR, aber dafür mit SCR-Katalysator unterwegs sind. Wenn bei zukünftigen VKM der Wirkungsgrad steigt und möglicherweise ganz auf AGR verzichtet wird⁵³, bleibt am Auspuffende weniger Abwärme zur Rückgewinnung übrig, was das Sparpotenzial dieser Maßnahme senkt. Das liegt hauptsächlich am steigenden Motorwirkungsgrad, der zu weniger Verlusten in Form von Abwärme führt. Diese teilt sich auf Kühlwasser, Abgas, Wärmestrahlung und ggf. den AGR-Kühler auf.
 - ▶ Für den Hybridantrieb werden 8 bis 12 % Verbrauchsreduktion angenommen. Dort ist allerdings die Einsparung durch den Wegfall des Motorleeraufes während der „Hotel Load“, siehe oben, eingeschlossen, was es in der Form in Europa nicht gibt. In der zugrundeliegenden Studie [TIAX, 2009, S. 4-84] wird für den Fahrbetrieb mit einem Dual-Mode-Hybrid eine Einsparung von 6 bis 9 % angegeben. Der referenzierte Dual-Mode-Hybrid von Arvin Meritor für Sattelzugmaschinen [ArvinMeritor, 2010] ist ein halbelektrischer Antrieb, die Anordnung ist:

VKM normale Größe - EM1 - Trennkupplung - EM2 - Kardanwelle

Bis knapp 80 km/h wird elektrisch gefahren, die beiden Elektromaschinen sind über einen Umrichter miteinander und mit der Batterie verbunden und arbeiten als elektrisches Getriebe. Über 80 km/h wird die Kupplung geschlossen, die VKM ist mechanisch mit der Kardanwelle gekoppelt, was die Verluste von ca. 15 % im elektrischen Strang ausschließt, und EM2 funktioniert hauptsächlich als Nutzbremsen. Diese Konfiguration unterscheidet sich komplett vom hier untersuchten Parallelhybrid, wo eine EM auf der Getriebeeingangswelle montiert wird und sonst keine Änderungen am Antriebsstrang vorgenommen werden. Ein weiterer Grund für die höhere Einsparung des Dual-Mode-Hybrids ist die Generatorleistung von EM2. Diese wird mit mindestens 150 kW angegeben ([ArvinMeritor, 2010], S. 12). Daher hat deren Sattelzugmaschine ein höheres Nutzbremsvermögen als der hier untersuchte Parallelhybrid mit einer 120 kW-EM.

Aus dieser Auflistung wird deutlich, warum in der aktuellen Arbeit andere, z. T. niedrigere Sparpotenziale für Nutzfahrzeuge ermittelt wurden als bisher veröffentlicht.

⁵⁰ S. 5-8, „Advanced 11-15L engine“, Verweis auf [TIAX, 2009]. Dort wird auf S. 4-20 die Einsparung eines ORC-Systems mit 6 bis 9 % angenommen und auf [DOE, 2008] S. 208 bis 211 verwiesen.

⁵¹ <http://cumminsengines.com/showcase-item.aspx?id=103&title=ISX+for+Truck+and+Bus+%28EPA+07%29&Filters=0#features>

⁵² <http://cumminsengines.com/ix15-heavy-duty-truck-2013?Filters=0&Categories=85#features>

⁵³ Der Wegfall der AGR erhöht verfahrensbedingt den Motorwirkungsgrad leicht. Iveco macht das aktuell beim Motor Cursor 11 F3G, Scania beim Motor DC13-115.

5.7 Recherche zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugen

Kies A., Hausberger S., 10/2012

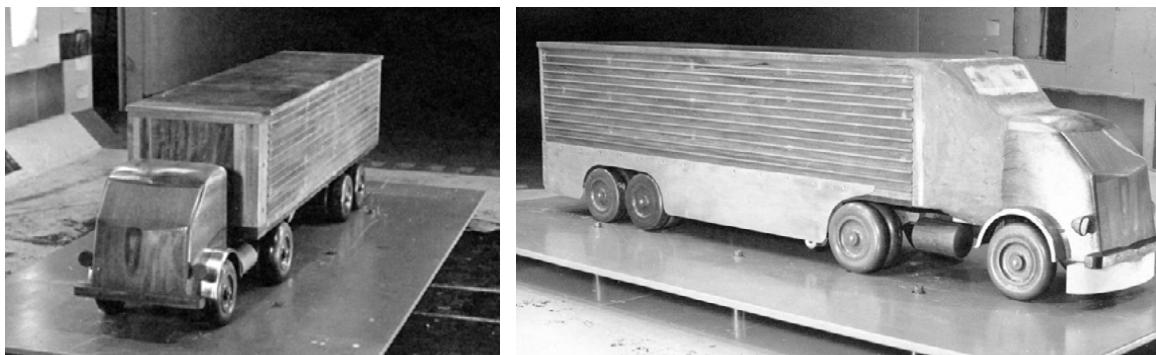
Das Ziel eines gesonderen Arbeitspakets in dieser Studie war, aus verschiedenen aerodynamischen Verbesserungen von Nutzfahrzeugen diejenigen mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis zu ermitteln. Durch eine verbesserte Aerodynamik sinkt der Luftwiderstandsbeiwert und besonders bei hoher Fahrgeschwindigkeit, wo der Luftwiderstand bis zur Hälfte des gesamten Motorleistungsbedarfs ausmacht, der Kraftstoffverbrauch. Daher bieten sich aerodynamische Maßnahmen besonders für Sattelzugmaschinen und Auflieger an, welche meistens mit hoher Geschwindigkeit unterwegs sind.

Als Beginn wurde der Stand der Forschung der Nutzfahrzeug-Aerodynamik recherchiert. Dabei stellte sich heraus, dass seit ca. 30 Jahren fast alle Maßnahmen bekannt sind, um den Luftwiderstand von Lastkraftwagen und Bussen signifikant zu senken. Für das Längsdynamikmodell, mit dem die Fahrwiderstandskräfte und der Kraftstoffverbrauch berechnet werden, braucht es den Luftwiderstandsbeiwert c_w als Zahlenwert oder die relative Änderung gegenüber dem Referenz- c_w -Wert; daher wurde der Schwerpunkt auf Arbeiten gelegt, die entsprechende Messergebnisse beinhalten.

Anfänge der Nutzfahrzeug-Aerodynamik

In den 1950er Jahren wurden an der Universität Maryland erste Windkanalmessungen von Sattelzügen mit Aufliegern des Herstellers Trailmobile im Maßstab 1:6 durchgeführt (Sherwood, 1954). Laut dem US-amerikanischen Fachautor Kevin Cooper begann damit die Nutzfahrzeug-Aerodynamik (Cooper, 2012 S. 16). Zwei der Windkanalmodelle sind in Abbildung 59 gezeigt.

Abbildung 59 Modell des Sattelzuges im Maßstab 1:6 für die Windkanalmessungen 1954



Quelle: (Cooper, 2004 S. 15)

Das linke Modell ist der aerodynamische Normalzustand damaliger Sattelzüge. Die Verbesserungen beim rechten Modell sind unter anderem die gerundeten Anströmradien an Kabine und Auflieger, die Seitenverkleidungen unten, die Verkleidung zwischen Kabine und Auflieger sowie der Dachspoller auf der Kabine. Der c_w -Wert sinkt von links 1,02 auf rechts 0,56 (Cooper, 2004 S. 16). Besonders die Seitenwindanfälligkeit, d. h. die c_w -Wert-Erhöhung bei Schräganströmung, wodurch sich Wirbel in der Kabine-Auflieger-Lücke und dem verwinkelten Aufliegerchassis ausbilden, sinkt beträchtlich. An diesen grundlegenden Erkenntnissen hat sich seitdem nichts geändert. In den folgenden 20 Jahren gibt es vereinzelte Veröffentlichungen zum Thema, eine Übersicht ist im Literaturverzeichnis von (Saltzman, 1974-10 S. 11) zu finden.

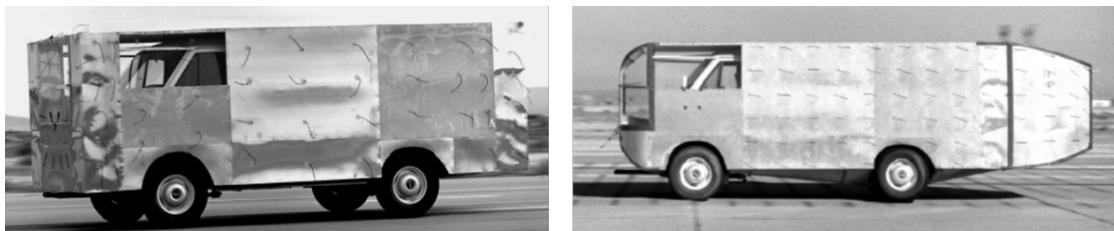
Intensivierung der Aerodynamikforschung durch die Ölkrise ab 1973

Einen regelrechten Schub erlebte die Forschung zur Reduzierung des Luftwiderstandes von Kraftfahrzeugen und zur Kraftstoffeinsparung allgemein durch die erste Ölkrise 1973. Durch den Jom-Kippur-Krieg und das folgende Öl-Teilembargo der OPEC bedingt kam es zu einem schnellen Anstieg des Ölpreises, der nur der

erste von vielen politischen Einflüssen war. In den folgenden zehn Jahren wurden mehr Grundlagen erforscht und konkrete Maßnahmen für eine optimale Karosserieform erarbeitet. Die Luftfahrt-Aerodynamiker der NASA untersuchten in umfangreichen Studien Verbesserungen an Lieferwagen, Verteiler-Lkw und Sattelzügen. Es wurden grundlagenorientierte Ausroll-Messungen zur Karosserieform durchgeführt (Saltzman, 1974-05) (Saltzman, 1974-10) (Peterson, 1981). Beispiele verschiedener Konfigurationen zeigt Abbildung 60.

Der linke Aufbau ist eine rechteckige Kiste mit scharfen Kanten, zusätzlich ist der Unterboden des Fahrzeugs unverkleidet. Im rechten Bild sind drei grundlegende Verbesserungen zu sehen: abgerundete Anströmkanten an der Front, ein glatt abgedeckter Unterboden und ein Heckeneinzug. Der c_w -Wert sinkt von **links 0,89** auf **rechts 0,242**, mit einem längeren, spitz zulaufenden Heckeneinzug sogar auf 0,238 (Saltzman, 1999 S. 14).

Abbildung 60 NASA Testfahrzeug der Ausrollmessungen 1974



Quelle: (Saltzman, 1999 S. 11)

Zur gleichen Zeit findet eine der ersten Konferenzen zum Thema Fahrzeugaerodynamik statt (Lissaman, 1974) und die Forschung in Deutschland beginnt (Drewitz, 1977) (Götz, 1978) (Hau, 1978).

1978 werden Windkanal-Messungen im Maßstab 1:1 mit einem Sattelzug durchgeführt (Muirhead, 1978), siehe Abbildung 61: Verbesserungen sind u.a. die abgerundete Fahrzeugfront, die seitliche und obere Verkleidung der Lücke zwischen Kabine und Auflieger, eine Unterbodenverkleidung, eine Seitenverkleidung unten am Auflieger und ein spitz zulaufender Heckeneinzug. Der c_w -Wert sinkt von **links 0,99** auf **rechts 0,40** (Muirhead, 1978 S. 44). Auch bei diesem verkleideten Sattelzug sinkt die Seitenwindanfälligkeit signifikant.

Abbildung 61 Sattelzug der NASA Windkanalmessungen aus 1978

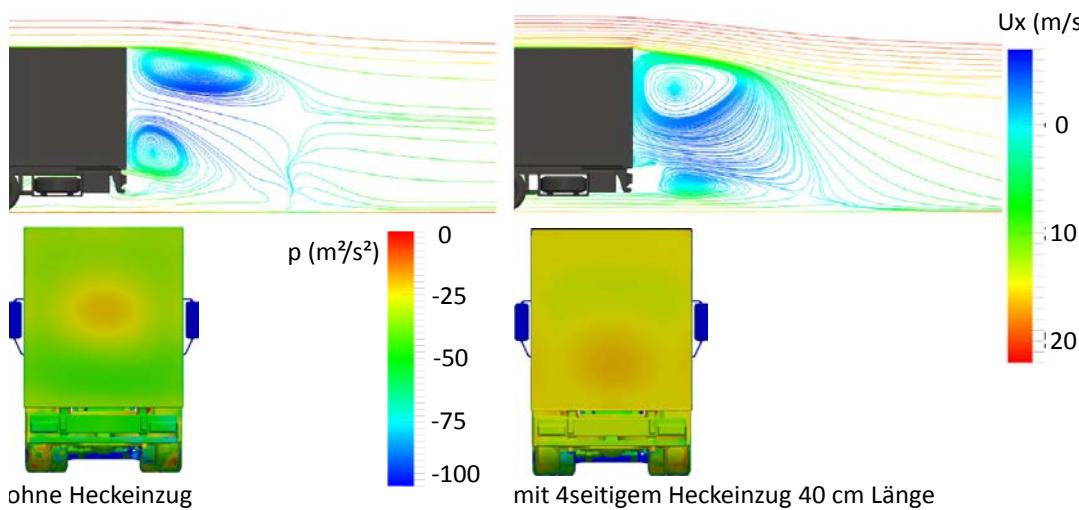


Quelle: (Saltzman, 1999 S. 5)

Aktuelle Forschung

An den aerodynamischen Verbesserungsmöglichkeiten von Nfz hat sich seit der ersten Untersuchung 1954 nicht viel geändert: runde Anströmradien; an allen Seiten eine glatte Außenhaut ohne Anbauteile, auch unten; alle Lücken im Strömungskörper abgedeckt (Lücke Kabine-Auflieger, Aufliegerseite, Fahrzeug-Unterboden); und wenn möglich Maßnahmen gegen die scharfe hintere Abrisskante. Allerdings können diese Maßnahmen, z. B. Luftleitbleche oder Heckeneinüge, aufgrund der gesetzlichen Längen- und Höhenbeschränkung des Gesamtfahrzeugs nicht verbaut werden, dadurch würde der Laderaum reduziert. Die Wirkung eines Heckeneinzugs beruht auf der Verminderung der Luftwirbelgeschwindigkeit nach dem Strömungsabriss am Heck, durch die ein Unterdruckgebiet entsteht, welches eine rückwärts gerichtete Kraft erzeugt, die vom Fahrzeug zusätzlich überwunden werden muss. Zur Verdeutlichung siehe Abbildung 62.

Abbildung 62 Luftwirbelgeschwindigkeit ($o.$) und Druckverteilung ($u.$) am Aufliegerheck



Quelle: (Devesa, 2011 S. 46,47)

Die neuere Forschung stützt sich auf verfeinerte Mess- und Simulationsmethoden und strebt an, praxistaugliche Verbesserungen innerhalb der Grenzen zu schaffen, die durch Größenbeschränkungen und Alltagsgebrauch gegeben sind. Es gibt nämlich Probleme, die mit aerodynamischen Verbesserungen verbunden sind, hier einige Beispiele:

- ▶ der schon erwähnte Laderaumverlust bei vorderen, hinteren oder oberen Anbauten;
- ▶ Komforteinbußen für den Fahrer, wenn seine bisher kubische Wohnkabine bei gleichbleibender Länge strömungsgünstig abgerundet wird;
- ▶ das Schadensrisiko von Seitenverkleidungen während der ruppigen Ladearbeiten per Stapler;
- ▶ die Pflicht zu Rückspiegeln, was kleine Kameras bisher verhindert;
- ▶ dünnwandige Verkleidungsteile, die bei hoher Geschwindigkeit flattern;

Daher werden in aufwändiger Kleinarbeit mit Messung und Simulation geringe Luftwiderstandsreduktionen an einzelnen Bauteilen geschaffen, die in Summe viel ausmachen. Mit CFD wird bereits die Durchströmung des Motorraums und des Fahrzeugchassis simuliert, die Abweichung zum vereinfachten Windkanalmodell 1:2.5 beträgt unter 2 % (Heinzelmann, 2012 S. 52 table 4).

Messung des Luftwiderstandes mittels Konstantfahrten

Bei der Recherche von c_w -Werten ist auf das Messverfahren und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu achten. Am IVT werden Konstantfahrmessungen durchgeführt, in 2011 wurde für das ICCT und den VDA die Wiederholbarkeit dieses Messverfahrens untersucht (Hausberger, 2011). Eines der gemessenen Aufliegerpaare standard/optimiert ist in Abbildung 63 gezeigt:

Abbildung 63 MB Actros 1 MP 3 mit Standardauflieger (l.) und optimiertem Auflieger (r.)



Quelle: (Hausberger, 2011 S. 7)

Die Verbesserungen am rechten Fahrzeug sind: eine straffer gespannte Aufliegerplane ohne abstehende Gurtschlösser, die seitliche Abdeckung auch der Aufliegerräder und ein korrekt eingestellter Dachspoiler der Zugmaschine. Der c_w -Wert sinkt von **links 0,69 auf rechts 0,66** (Hausberger, 2011 S. 23 table 5). Diese Werte wurden mittels Konstantfahrt auf einer Teststrecke gemessen. Das Verfahren ist in (Hausberger, 2012 S. 13 ff.) näher beschrieben und wird im Folgeprojekt (Casana, 2012) vom IVT und den Projektpartnern TÜV Nord, TNO und HS DAC mit Unterstützung der ACEA weiter ausgearbeitet. Das Ziel ist die Erarbeitung einer verbindlichen Luftwiderstands-Messnorm für die kommende EU-weite CO₂-Kennzeichnung von Nutzfahrzeugen. Dafür wie auch für dieses Projekt ist der c_w -Wert eine Eingabegröße für die Längsdynamiksimulation des Energieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes.

Der Hauptunterschied der Konstantfahrmessung zu Windkanaltests ist, dass die Fahrwiderstände am echten Fahrzeug während der Fahrt mit realen Umwelteinflüssen wie leichtem Wind gemessen werden. Im Windkanal gibt es entweder keine drehenden Räder auf bewegtem Boden oder ein Messfahrzeug in Echtgröße, Laufband-Windkanäle gibt es noch nicht in Lkw-Größe. Die Unterschiede im Windkanal zwischen Stillstand und bewegtem Boden wurden unter anderem am Modell eines einzelnen Rades im Radkasten untersucht (Söderblom, 2012) und sind bei den zehn Rädern eines Sattelfahrzeugs nicht zu vernachlässigen, wenn auch noch nicht genau bezifferbar. Bei Ausrolltests werden die Reibungsverluste des leer drehenden Hinterachsdifferentials mitgemessen, außerdem ist diese Methode für sehr schwere Fahrzeuge aufgrund der benötigten Streckenlänge nicht geeignet. Ein handelsüblicher Sattelzug rollt bei einem Leergewicht von 14.5 t in der Ebene ca. 2.5 km von 90 bis 15 km/h, was nicht auf allen Teststrecken auf einer Bahn möglich ist und zu einer Teilung in oberen und unteren Geschwindigkeitsbereich führen würde.

Daher wird die Konstantfahrmessung auf der Teststrecke die realitätsnächsten c_w -Werte liefern.

Busse

Die bereits genannten Maßnahmen zur Senkung des Luftwiderstandes lassen sich an Bussen wesentlich leichter umsetzen, weil diese aus einem Stück bestehen und somit die Anforderungen an einen geschlossenen Strömungskörper besser erfüllen als ein zusammengesetzter Lastzug. Zur Aerodynamikforschung an Bussen gibt es weniger Quellen als zu Lkw. Die Ergebnisse aus einer Windkanalmessung des Herstellers Prevost an einem 1:10 Modell des 18 m-Gelenkreisebusses H5-60 sind hier beispielhaft angegeben (Cooper, 2004 S. 24 table 3):

Standardbus: $c_w = 0,38$; ohne Rückspiegel: $c_w = 0,32$; strömungsgünstigere Front, Heckeneinzug: $c_w = 0,29$

Verringerung des Luftwiderstands durch einzelne Maßnahmen

In der folgenden Tabelle werden die Minimal- und Maximalwerte für die relative und absolute c_w -Wert-Verringerung aus der Literatur angegeben. Bei der Interpretation ist wichtig, dass die relativen und absoluten Werte nicht voneinander abhängen, sondern lediglich die jeweiligen Grenzen angeben, die in der Literatur zu finden sind. Sie können auch nicht zu einer Gesamt-Verringerung addiert werden, z. B. hat eine seitliche Aufliegerverkleidung alleine einen anderen Effekt als zusammen mit einem Heckeneinzug und umgekehrt. Ebenfalls kann es passieren, dass eine aerodynamische Maßnahme an einem Fahrzeug den c_w -Wert verringert und am anderen erhöht, abhängig von der jeweiligen Karosserieform.

Tabelle 17 Minimal- und Maximalwerte zur c_w -Wert-Verringerung aus der Literatur

	Δc_w in %		Δc_w (absolut)		Quellen	
	min.	max.	min.	max.		
Sattelzugmaschine						
<u>Grundbauform</u>						
abgerundete Kurzhaube 0,5 m	-0,7				1 S.61	
abgerundete Verlängerung komplette Front 0,5 m	-4,0				1 S.61	
<u>Kabine</u>						
Kühlluft einlass an Front (teil-)verschließen			-0,0001		2 S.3	
Rückspiegel weglassen	-4,0				3 S.16	
Oberes Windleitblech auf Kabinendach			-0,0717		2 S.3	
Seitliche Windleitbleche hinten an Kabine			-0,0415		2 S.3	
<u>Fahrgestell</u>						
Seitliche Tankverkleidung			-0,0265		2 S.3	
Durchgehende Kotflügel			-0,0049		2 S.3	
Vorschub der Sattelkupplung bei hoher Geschwindigkeit (Verkleinerung Lücke Kabine - Auflieger)			-0,0163		2 S.3	
<u>Unterseite</u>						
Unterbodenverkleidung	-4,0				3 S.67	
Auflieger						
<u>Vorderseite</u>						
Abgerundeter Aufsatz vordere obere Aufliegerkante			-0,0369	-0,0335	2 S.4	
<u>Unterseite</u>						
Seitliche Verkleidung unten an Auflieger	-17,0	-5,0	-0,0790	-0,0280	2 S.4, 3 S.35, 3 S.50, 4, 7 S.9-10, 8 S.4.44	
Abdeckung der Aufliegerräder				-0,0078	2 S.4	
Verkleidung der Aufliegerachsen				-0,0145	2 S.4	
Stromlinienförmige Abdeckung Unterboden	-12,0	-6,0		-0,0494	3 S.35, 9 S.51	
<u>Hinterseite</u>						
Luftleitschlitz an hinterer Aufliegerkante gegen Strömungsabriss		-20,0			10	
Heckeinzug (laderampentauglich)	-14,0	-6,0	-0,0524	-0,0340	1 S.61, 3 S.35, 3 S.50, 7 S.9-10,	
Aufblasbarer Heckeinzug		-14,0		-0,0438	2 S.4, 3 S.50	
Sattelzug						
Glatte Radkappen				-0,0020	2 S.3	
Verteiler-Lkw und Transporter						
Kantenradius des Aufbaus, 8 cm	-25,0	-7,0		-0,0580	5, 6	
Seitenverkleidung		-3,0			6	
Sonnenblende weglassen		-3,0			6	
Korrekte Position oberes Windleitblech		-3,0		-0,0129	5	

Zuordnung der Quellennummer:

- 1] (Devesa, 2011)
- 2] (Leuschen, 2006)
- 3] (TMA, 2007)
- 4] (van Raemdonck, 2011)
- 5] (Unruh, 2011-05)
- 6] (Unruh, 2011-08)
- 7] (Cooper, 2012)
- 8] (Kromer, 2009)
- 9] (Storms, 2006)
- 10] (van Straaten, 2007)

Familienbildung von Karosserieformen

Weiter untersucht werden sollen diese Fahrzeugklassen: Sattelzug Fernverkehr, Bus Überlandverkehr, Lastkraftwagen Verteilverkehr. Für jede Fahrzeugklasse wird folgende Abstufung im c_w -Wert der Karosserieform vorgeschlagen:

- 1) Standardaufbau: ein durchschnittlicher Aufbau, wie er aktuell bei Fuhrunternehmen verwendet wird. Dieser c_w -Wert von Sattelzügen läge beispielsweise bei 0,7.
- 2a) Optimierter Aufbau: Verwendung aller aerodynamischen Anbauteile, die serienmäßig verfügbar und gesetzlich erlaubt sind. Je nach zugehörigen Kosten können die Anbauteile in der Simulation schrittweise nach steigenden Gesamtsystemkosten zugefügt werden. Schrittweiten sind dabei nach Kenntnis der Kosten der Einzelmaßnahmen zu definieren.
- 2b) Optimierter Aufbau, für den geringfügige Änderungen der Vorschriften nötig sind: Verwendung aller aerodynamischen Anbauteile, die serienmäßig verfügbar und gesetzlich erlaubt sind; zusätzlich solche Anbauteile, die bei leichten Änderungen der Gesetzesvorgaben verwendet werden könnten. Für Sattelzüge schließt dies einen Heckeneinzug 0,5 m oder hintere Windleitbleche, und die Verwendung von Rückfahrkameras ein.
- 3) Optimierter Aufbau, für den umfassende Änderungen der Vorschriften nötig sind: Neukonstruktion des Fahrzeugaufbaus unter den Prämissen gleichbleibender Laderaumlänge und -höhe sowie bestmöglich Aerodynamik. Dafür wären beispielsweise nötig: die Laderaumlänge und -höhe auf den aktuellen Wert beschränken, die Fahrzeughänge von 16,5 auf min. 18,5 m und die Fahrzeughöhe von 4 auf ca. 4,3 m vergrößern. Damit werden diese Maßnahmen möglich: verlängerte, runde Fahrzeugfront; verlängertes Heck mit Einzug; Verwendung eines Buckelaufieurs („Teardrop-Trailer“). Buckelaufleger fahren in England bereits, weil die dortige Höhenbeschränkung die Durchfahrthöhe der Brücken ist; MAN hat mit dem Concept S eine Sattelzugstudie für den aerodynamischen Bestfall vorgestellt.

Die absoluten c_w -Werte der einzelnen Fälle, mit denen die Simulation bedatet wird, sind noch nicht bekannt und werden im nächsten Schritt in Zusammenarbeit mit der Industrie festgelegt. Aus anderen Projekten gibt es bestehende Kontakte zu den Lkw-Herstellern Mercedes Benz und DAF, zu den Aufliegerherstellern Krone und Schmitz Cargobull sowie zur Firma Ephicas. Diese ist ein Spin-Off der TU Delft, stellt Seitenverkleidungen für Sattelzüge her und hat Kompetenz bei Heckeneinzügen und Luftleitblechen.

Möglich sind Messungen zu den Karosserieformen 1) bis 3). Welche Fahrzeugtypen für welche aerodynamischen Fälle gemessen werden, wird im weiteren Verlauf dieses und des EU-Projektes geplant.

Anhang: Literaturverzeichnis

- Casana F. (head of unit) Contract: Development and validation of a methodology for monitoring and certification of green-house gas emissions from heavy duty vehicles through vehicle simulation [Online]. - European Commission, Directorate-General for Climate Action, SRD.2- Finance, 28. Mar 2012. - http://ec.europa.eu/clima/tenders/2012/098391/index_en.htm. - PDF download. - Tender ref. no. CLIMA.C.2/SER/2012/0004.
- Cooper K. Commercial Vehicle Aerodynamic Drag Reduction: Historical Perspective as a Guide [Buchabschnitt] // The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains / Buchverf. McCallen E. et al.. - Berlin : Springer, 2004. - ISBN 9783540220886.
- Cooper K. Wind Tunnel and Track Tests of Class 8 Tractors Pulling Single and Tandem Trailers Fitted with Side Skirts and Boat-tails [Artikel] // SAE transactions. - Warrendale : Society of Automotive Engineers, 2012. - 2: Journal of commercial vehicles. - 1 : Bd. 5. - S. 1-17. - DOI 10.4271/2012-01-0104. - ISSN 0096-736X.
- Devesa A., Indinger, T. Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen [Bericht] / FluiDyna GmbH. - Berlin : Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), 2011. - FAT Schriftenreihe Nr. 237, <http://www.vda.de/de/downloads/1053>. - ISSN 2192-7863.
- Drewitz H. Was lohnt sich - was lohnt sich nicht? Kraftstoffeinsparung durch strömungsverbessernde Verkleidungen am Lkw [Artikel] // Nutzfahrzeug / Hrsg. (BASt) Bundesanstalt für Straßenwesen. - Würzburg : Vogel, 1977. - 10 : Bd. 29. - S. 65-68. - ITRD no. D308372 (<http://trid.trb.org>).
- Götz H. Die Aerodynamik des Nutzfahrzeuges. Massnahmen zur Kraftstoffeinsparung [Artikel] // Verein Deutscher Ingenieure: Fortschrittsberichte der VDI- Zeitschriften. - Düsseldorf : VDI-Verlag, 1978. - 12: Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik. - 31. - ITRD no. D308371 (<http://trid.trb.org>). - ISSN 0178-9449.
- Hau E. Über den Luftwiderstand von Fernlastzügen. Ergebnisse aus Modellmessungen im Windkanal [Artikel] // Verein Deutscher Ingenieure: Fortschrittsberichte der VDI- Zeitschriften. - Düsseldorf : VDI-Verlag, 1978. - 12: Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik. - 31. - S. 199-210. - ITRD no. D308371 (<http://trid.trb.org>). - ISSN 0178-9449.
- Hausberger S. et al. Evaluation of fuel efficiency improvements in the Heavy-Duty Vehicle (HDV) sector from improved trailer and tire designs by application of a new test procedure [Bericht] : Final Report / Institute for ICE and Thermodynamics. - Graz : TU Graz, 2011. - report no. I-24/2011 Hb-Em 18/11/679.
- Hausberger S. et al. Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles - LOT 2 [Bericht] : Final Report / Institute for ICE and Thermodynamics ; TU Graz. - Brussels : EU Commission, Directorate General Climate Action, 2012. - S. 210. - http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_2011_01_09_en.pdf. - contract no. 070307/2009/548300/SER/C3.
- Heinzelmann B. et al. Experimental and Numerical Investigation of the Under Hood Flow with Heat Transfer for a Scaled Tractor-Trailer [Artikel] // SAE transactions. - Warrendale : Society of Automotive Engineers, 2012. - 2: Journal of commercial vehicles. - 1 : Bd. 5. - S. 42-56. - DOI 10.4271/2012-01-0107. - ISSN 0096-736X.
- Kromer M. et al. Assessment of Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles [Bericht] : Final Report / TIAX LLC. - Washington : National Academy of Sciences, 2009. - TIAX Case D0506.
- Leuschen J., Cooper, K. Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag- Reducing Devices for Tractor-Trailers [PDF document]. - Warrendale : SAE ; National Research Council and Freight Wing Inc., 2006. - http://www.freightwing.com/docs/NRC_Wind_Tunnel_Test_SAE_Paper.pdf. - SAE paper no. 06CV-222.
- Lissaman P. (ed.). Reduction of the aerodynamic drag of trucks [Konferenz] // Proceedings of the Conference/Workshop held at California Institute of Technology. - Arlington : National Science Foundation, 1974. - S. 190. - OCLC no. 2577168 (<http://worldcat.org>).
- Muirhead V. An investigation of drag reduction for tractor trailer vehicles [Bericht] : Final Report / University of Kansas Center for Research. - Washington : NASA, 1978. - S. 61. - report no. NASA-CR-144877 (<http://ntrs.nasa.gov>).
- Peterson R. Drag Reduction Obtained by the Addition of a Boattail to a Box Shaped Vehicle [Bericht] / California Polytechnic State University. - Washington : NASA, 1981. - S. 32. - report no. NASA-CR-163113 (<http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/DTRS>).
- Saltzman E. et al. A Reassessment of Heavy-Duty Truck Aerodynamic Design Features and Priorities [Bericht] / Dryden Flight Research Center. - Washington : NASA, 1999. - S. 36. - report no. NASA/TP-1999-206574 (<http://ntrs.nasa.gov>).
- Saltzman E. et al. Drag reduction obtained by rounding vertical corners on a box-shaped ground vehicle [Bericht] / Dryden Flight Research Center. - Washington : NASA, 1974-05. - S. 20. - report no. NASA-TM-X-56023 (<http://ntrs.nasa.gov>).

- Saltzman E. et al. Drag reductions obtained by modifying a box-shaped ground vehicle [Bericht] / Dryden Flight Research Center. - Washington : NASA, 1974-10. - S. 29. - report no. NASA-TM-X-56027 (<http://ntrs.nasa.gov>).
- Sherwood A. A study of the wind resistance of tractors and truck-trailers [Bericht] / Wind Tunnel Operations Dept. and Trailmobile Inc. ; College of Engineering. - College Park : University of Maryland, 1954. - S. 92. - OCLC 489236172 (<http://worldcat.org>).
- Söderblom D. et al. Experimental and Numerical Investigation of Wheel Housing Aerodynamics on Heavy Trucks [Artikel] // SAE transactions. - Warrendale : Society of Automotive Engineers, 2012. - 2: Journal of commercial vehicles. - 1 : Bd. 5. - S. 29-41. - DOI 10.4271/2012-01-0106. - ISSN 0096-736X.
- Storms B. et al. A Summary of the Experimental Results for a Generic Tractor-Trailer in the Ames Research Center 7- by 10-Foot and 12-Foot Wind Tunnels [Bericht] : Technical Memorandum / AerospaceComputing, Inc.. - Wahington D. C. : NASA, 2006. - S. 58. - NASA/TM-2006-213489 (<http://ntrs.nasa.gov>).
- TMA Test, Evaluation, and Demonstration of Practical Devices/Systems to Reduce Aerodynamic Drag of Tractor/Semitrailer Combination Unit Trucks [Bericht] : Final Report / Aerodynamic Consortium ; Truck Manufacturers Association. - Morgantown : National Energy Technology Laboratory, 2007. - S. 77. - Contract no. DE-FC26-04NT42117, DOI 10.2172/926158.
- Unruh R. Überraschung im Windkanal [Artikel] // KFZ-Anzeiger. - Krefeld : Stünings Medien, 2011-08. - 9 : Bd. 64. - S. 8-11. - http://www2.spier.de/fileadmin/media/Pressemitteilungen/Athlet_Thermo-Überraschung_im_Windkanal_in_KFZ-Anzeiger_9-2011.pdf. - ISSN 0341-9681.
- Unruh R. Wind channel measurement of refrigerator bodies [Artikel] // lastauto omnibus. - Stuttgart : EuroTransportMedia, 2011-05. - 6 : Bd. 88. - S. 42 ff.. - ISSN 0023-866X.
- van Raemdonck G. Summary of obtained results of aerodynamic add-ons for trailers [PDF document]. - Delft : Faculty of Aerospace Engineering – TU Delft, 2011. - author's e-mail: gandert.vanraemdonck@ephicas.eu.
- van Straaten M. Computational and experimental investigation on base drag reduction of a generic transportation system by guiding vanes [Bericht] : Master thesis / Aerodynamics group ; Faculty of Aerospace Engineering. - Delft : Delft University of Technology, 2007.

5.8 CFD Simulation von aerodynamischen Maßnahmen

Arbeit der ses-tec OG, Graz, D. Jajcevic und W. Lang, 6/2014

Aerodynamische Untersuchungen eines Sattelschleppers mithilfe von CFD

Einleitung

Während des letzten Jahrzehnts sind Simulationen mit Computational Fluid Dynamics (CFD) zu einem wichtigen Werkzeug im Forschungs- und Entwicklungsprozess geworden. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft die Rechenkapazitäten moderner Computer weiterhin steigen, während auf der anderen Seite die Kosten signifikant abnehmen werden. Aus diesem Grund werden numerische Simulationen in Zukunft einen immer wichtigeren Beitrag zur Lösung von technischen Problemen liefern.

Die Verfügbarkeit von Ressourcen und der zunehmende Lkw-Verkehr beeinflussen die Entwicklung der neuen Lkw-Generationen und stellen Umweltfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund. Die Fahrzeugaerodynamik ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich verbessert worden, dennoch gibt es einiges an Potenzial, das noch nicht ausgenutzt wurde. [FAT, 2011] berichtet über die Potenziale in Bezug auf die aerodynamischen Verbesserungen eines Sattelschleppers. Die Autoren zeigen, dass eine Änderung der Lkw-Komponenten, wie z. B. Frontverlängerungen, Dacheinzüge und Heckklappen, eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von bis zu 4 % ermöglichen. [Daimler, 2012] zeigte mit der Designstudie eines aerodynamisch verbesserten Aufliegers, dass es möglich ist, durch verschiedenste Maßnahmen (Heckeinzug, Seitenverkleidung, ...) eine Reduktionen des Luftwiderstands von 18 % und des Kraftstoffverbrauchs von 4,5 % zu erreichen.

Die Abschätzung des Luftwiderstandes mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (CFD) wird bereits erfolgreich in fast allen Großunternehmen durchgeführt siehe z. B. [FAT, 2011] [FAT, 2012] [Islam, 2009] [Clasen, 2008] [Singh, 2008]. Da Messungen in der Regel sehr teuer und zeitaufwändig sind und in manchen Fällen auch die Windkanalgröße einen limitierenden Faktor darstellt, ist die Vorgehensweise, Veränderungen des Luftwiderstandsbeiwertes (c_w) mithilfe der Simulation zu bestimmen, weitläufig akzeptiert. Zurzeit gibt es mehrere kommerzielle und Open-Source-CFD-Pakete, z. B. ANSYS CFX und Fluent, AVL-Fire Star-CD, Power Flow oder OpenFOAM, die in der Lage sind, den Luftwiderstandsbeiwert c_w virtuell zu bestimmen.

Hintergrund dieses Projektes ist es, Empfehlungen für Spediteure abzugeben, inwieweit durch Anbauteile am Auflieger der Luftwiderstandsbeiwert von Sattelzügen reduziert werden kann. Der Fokus dabei stand jedoch nicht auf der Erstellung von strömungstechnisch optimierten Varianten. Vielmehr wurde versucht, die Geometrie so zu gestalten, dass sie die am Markt bereits verfügbaren aerodynamischen Anbauteile widerspiegelt.

Als Referenzfahrzeug wurde die generische Sattelschleppergeometrie der FAT gewählt. Das verwendete Simulationssetup und die Randbedingungen wurden aus den früheren Arbeiten der CFD Arbeitsgruppe der ACEA entnommen. An die vorhandene Basisgeometrie des FAT-Lkw wurden dann ein Heckeinzug sowie eine Seitenverkleidung angebracht. Leider war zu Beginn des Projekts kein Hersteller solcher Anbauteile verfügbar, weshalb versucht wurde, die Anbauteile anhand von Skizzen und Bildern nachzubilden. Zusätzlich zur Simulation des Heckeinzugs sowie der Seitenverkleidung wurde noch der Einfluss der Randbedingungen, im speziellen die drehenden Räder und der sich bewegende Boden, auf den c_w -Wert untersucht. Als letzte Variante wurde der Einfluss eines repräsentativen Seitenwinds von 3 ° auf den Sattelzug untersucht.

Geometrievarianten und Simulationseinstellungen

Als Referenzfahrzeug für dieses Projekt wurde die FAT-Sattelschleppergeometrie verwendet. Da für das Projekt leider kein Hersteller von aerodynamischen Anbauteilen für Lkw verfügbar war, wurden die Anbauteile anhand von Skizzen und Abbildungen nachgebildet. An der FAT-Geometrie wurden folgende Modifikationen durchgeführt:

- ▶ Anbringen eines Heckeinzuges (50 cm);
- ▶ Durchgehende Seitenverkleidung, vom Aufliegerheck bis kurz hinter der Hinterachse der Zugmaschine.

Dargestellt sind diese Modifikationen in Abbildung 1 und 2, in blau ist der Heckeinzug und in Rot die angebrachte Seitenverkleidung eingefärbt. Der 50 cm lange Heckeinzug wurde an drei Seiten ausgeführt (oben, links und rechts).

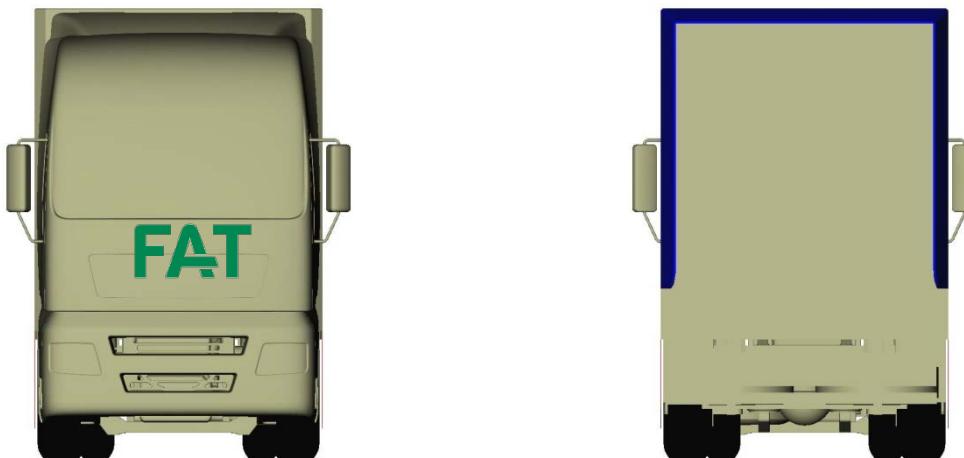


Abbildung 1: Vorder- und Hinteransicht des modifizierten FAT-Lkw

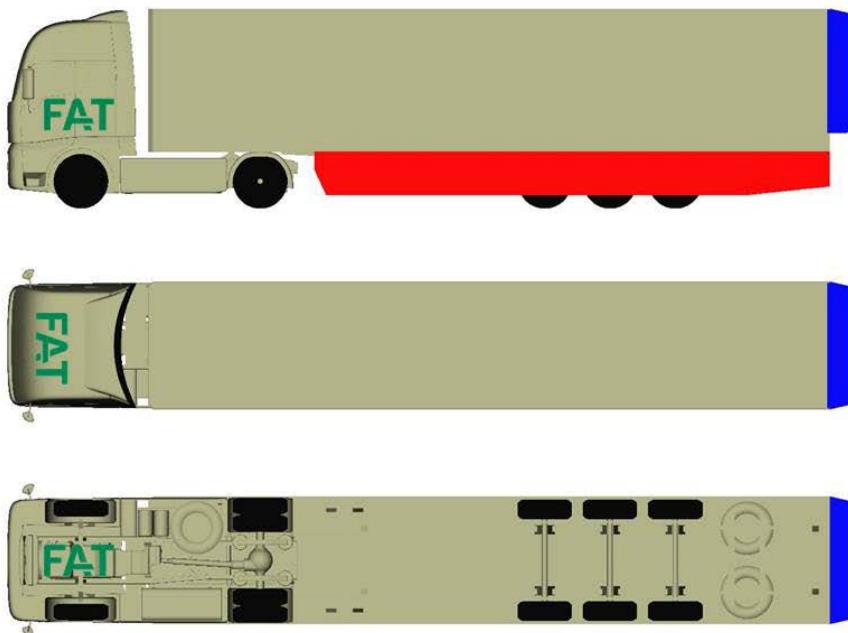


Abbildung 2: Ober-, Unter- und Seitenansicht des modifizierten FAT-Lkw

Die für diese Arbeit durchgeführten Simulationsvarianten sind nun folgende:

- ▶ FAT-Geometrie (Referenz). Räder drehend, Boden bewegt.
- ▶ Variante 1: FAT-Geometrie mit Seitenverkleidung und Heckeinzug. Räder drehend, Boden bewegt.
- ▶ Variante 2: FAT-Geometrie mit Seitenverkleidung und Heckeinzug. Räder und Boden stehend
- ▶ Variante 3: FAT-Geometrie mit Seitenverkleidung und Heckeinzug. Seitenwind 3 °. Räder drehend, Boden bewegt.

Die Simulationseinstellungen und die Randbedingungen der Variantenberechnung des Lkw sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die wichtigsten thermophysikalischen Stoffdaten und die verwendeten Startbedingungen.

Tabelle 1: Simulationseinstellungen

Nr.	Beschreibung	Eingabewert
1	Simulationstyp	Steady
2	Turbulenzmodell	k-ε Realizable
3	Wandfunktion	Non-Equilibrium

Tabelle 2: Randbedingungen

Nr.	Randbedingung	FAT-Geometrie	Variante 1	Variante 2	Variante 3
1	Einlass (Geschwindigkeit)	90 [km/h]	90 [km/h]	90 [km/h]	90 [km/h]
2	Auslass (Druck)	101325 [Pa]	101325 [Pa]	101325 [Pa]	101325 [Pa]
3	Turbulenz-Grad am Einlass	1 [%]	1 [%]	1 [%]	1 [%]
4	Charakteristische Länge am Einlass für die Turbulenz	10 [mm]	10 [mm]	10 [mm]	10 [mm]
5	Charakteristische Länge am Einlass für die Turbulenz	10 [mm]	10 [mm]	10 [mm]	10 [mm]
6	Anströmwinkel	0 [°]	0 [°]	0 [°]	3 [°]
7	Geschwindigkeit – Räder	drehend	drehend	stehend	drehend
8	Geschwindigkeit – Boden	90 [km/h]	90 [km/h]	0 [km/h]	90 [km/h]

Tabelle 3: Startbedingungen und thermophysikalische Stoffdaten

Nr.	Beschreibung	Wert
1	Dichte	1,184 [kg/m³]
2	Viskosität	1,49x10-5 [m²/s]
3	Initialisierungsdruck	101325 [Pa]
4	Initialisierungsgeschwindigkeit	0 [m/s]

Zum Starten der Berechnung wird ein sehr grobes Netz von zirka 10 Mio. Zellen erstellt, um ein erstes Strömungsfeld zu erhalten, welches für die Initialisierung der weiteren Simulationen verwendet wird. Dieses Strömungsfeld wird dann auf das feine Netz gemappt und ermöglicht dadurch eine schnellere Konvergenz der Simulation. Die Simulationseinstellungen für alle nachfolgenden Berechnungen orientieren sich an den Werten in Tabelle 1 – 3.

Das Berechnungsnetz wurde anhand der Vorgaben der ACEA-Arbeitsgruppe erstellt. Abbildung 3 zeigt einen Schnitt in der xz-Ebene durch das erstellte Rechennetz. Detail A zeigt einen Ausschnitt beim Heckenein zug, um die verwendete Randschichtauflösung zu visualisieren.

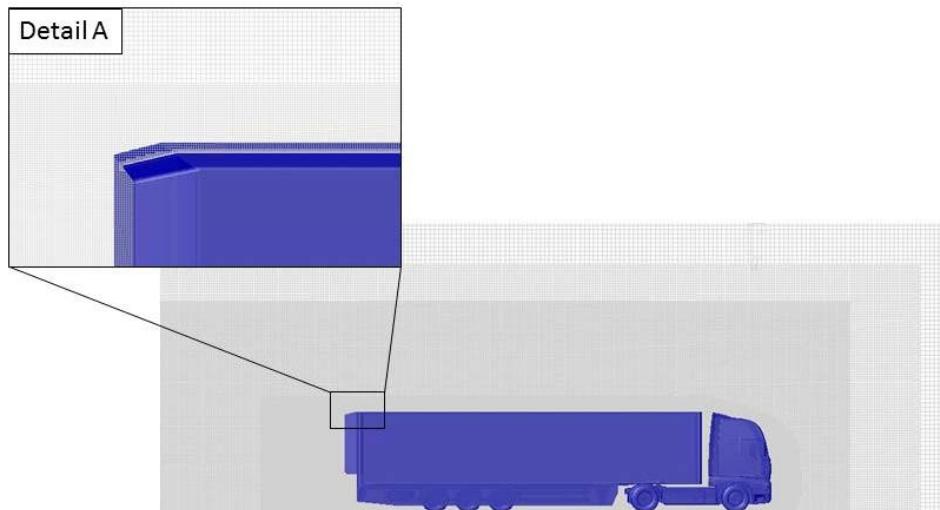


Abbildung 3: Berechnungsnetz

Detaillierte Vernetzungseinstellungen und eine Beschreibung der Vernetzungsstrategie sind dem Bericht [ses-Tec, 2013] zu entnehmen.

Ergebnisse und Diskussion

Das Ziel des Projektes war die Vorhersage des Luftwiderstandsbeiwertes von verschiedenen beschriebenen Lkw-Konfigurationen. Der Widerstandsbeiwert lässt sich dabei durch folgende Gleichung beschreiben:

$$c_w = \frac{2F_D}{\rho v^2 A} \quad (1)$$

Dabei repräsentiert F_D die Widerstandskraft, ρ die Dichte der Luft, v entspricht der Anströmgeschwindigkeit und A ist die Referenzfläche.

Abbildung 4 vergleicht in einem Schnitt in der xy-Ebene die x-Geschwindigkeit der FAT-Geometrie mit der Geometrie der Variante 1 (mit Heckeinzug und Seitenverkleidung). Deutlich zu erkennen ist, die stärker ausgebildete Rezirkulationszone bei der FAT-Geometrie im Vergleich zur Variante 1.

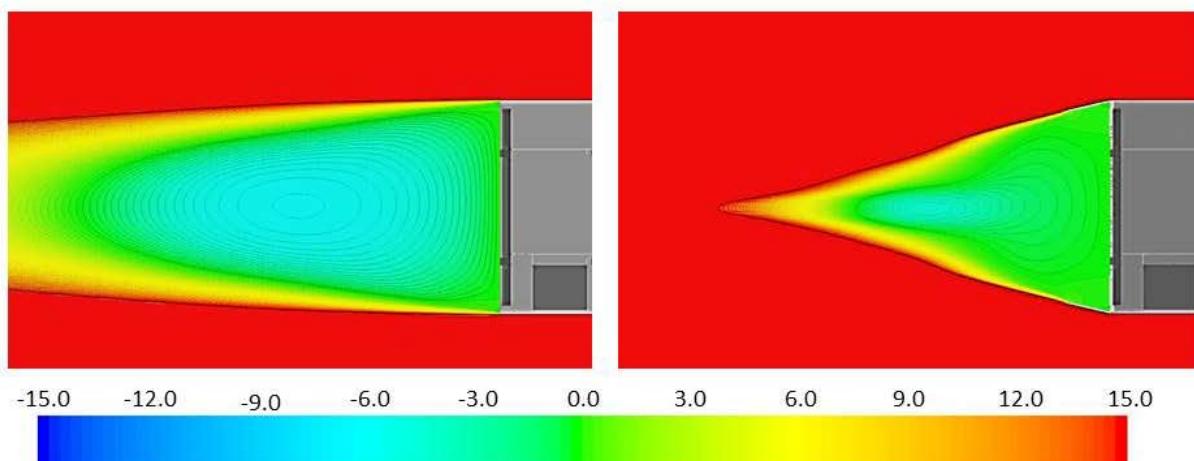


Abbildung 4: Vergleich der x-Geschwindigkeiten; links: FAT-Geometrie; rechts: Variante 1

Abbildung 5 stellt die Referenzgeometrie (FAT-Geometrie bei 0° Schräganströmung) im Vergleich zu der in Variante 1 gerechneten Geometrie dar. Es zeigt sich, dass sich in dem simulierten Fall die Seitenverkleidung und der Heckeneinzug positiv auf den Widerstandsbeiwert auswirken. Dieser Trend entspricht dem erwarteten Ergebnis. Obwohl für die verwendeten aerodynamischen Anbauteile keine detaillierten Herstellergeometrien vorhanden waren, zeigt sich doch deutlich der positive Effekt dieser Maßnahmen (-7,29 % c_w).

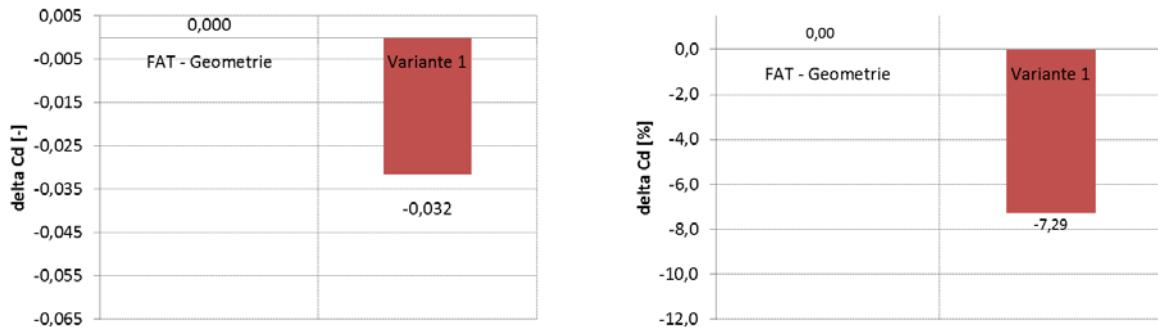


Abbildung 5: Vergleich der Widerstandsbeiwerte FAT – Geometrie vs. Variante 1 (C_d ist c_w)

In Abbildung 6 sind die Widerstandsbeiwerte der Variante 1 und der Variante 2 gegenüber gestellt, bezogen wurden die Werte auf die Referenzgeometrie. In Variante 2 wurden der Boden sowie die Räder des Lkw nicht bewegt, hier zeigt sich eine weitere Reduktion des c_w -Wertes im Vergleich zur Variante 1 von -4,1 %.

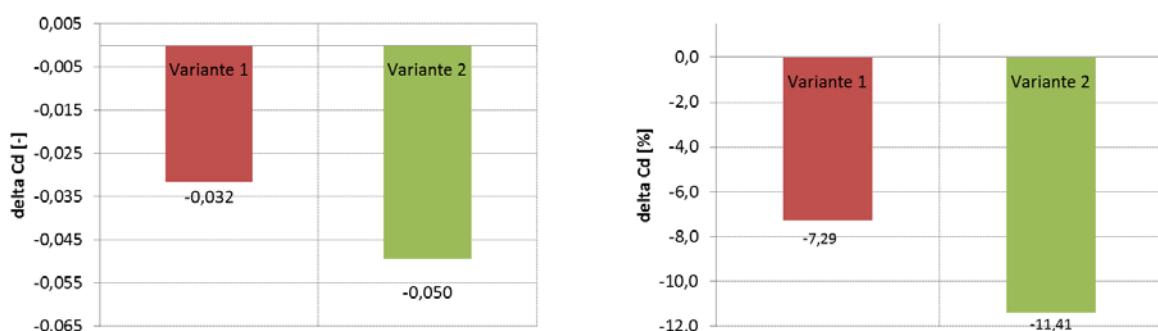


Abbildung 6: Vergleich der Widerstandsbeiwerte Variante 1 vs. Variante 2 (C_d ist c_w)

Abbildung 7 stellt einen Vergleich der Widerstandsbeiwerte bei Schräganströmung von 3° dar (Werte für FAT-Geometrie unter 3° Schräganströmung siehe [ses-Tec, 2013]). Es zeigt sich, dass der Widerstandswert sich durch Anbringen der Anbauteile um 8,5 % senken lässt. Im Vergleich zur Anströmung unter 0° ist das eine weitere Reduktion um 1,3 %.

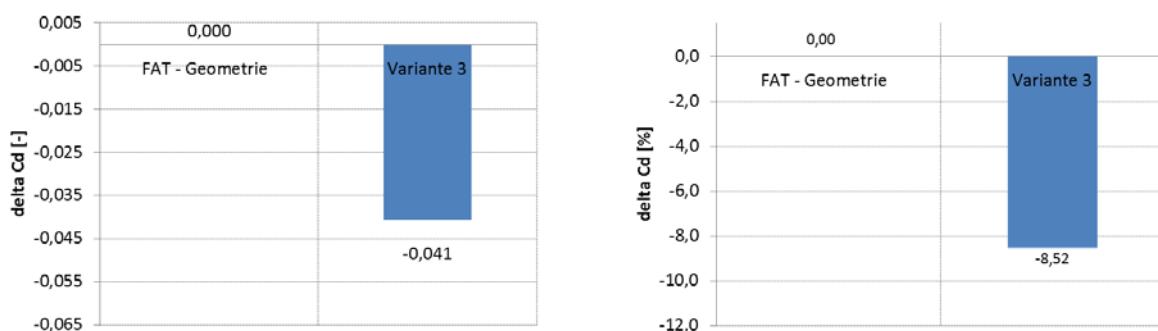


Abbildung 7: Vergleich der Widerstandsbeiwerte der Referenzgeometrie und der Variante 3 unter Schräganströmung von 3° (C_d ist c_w)

Referenzen

- FAT (2011): Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., FAT Schriftenreihe FAT-237
- Daimler (2012): Der Mercedes-Benz Aerodynamics Trailer, <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1608998-49-1609004-1-0-0-1609343-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html>
- FAT (2012): Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen, Stand des Wissens, Forschungsvereinigung Automobletechnik E.V., FAT Schriftenreihe FAT-241
- Islam (2009): Islam M. et al., Application of Detached–Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development, SAE 2009-01-0333, 2009
- Clasen (2008): Clasen D. et al., Evaluation of Aerodynamic Noise Propagation, OpenSource CFD 2008 International Conference, Berlin, 5th December 2008
- Singh (2008): Singh R., CFD Simulation of NASCAR Racing Car Aerodynamics, SAE Technical Paper 2008-01-0659, 2008, doi:10.4271/2008-01-0659
- ses-Tec (2013): Jajcevic D. et al., Estimation of drag force coefficient of a semi-trailer truck, ses-Tec, Graz 2013

5.9 Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen für verschiedene Betrachtungszeiträume

Die Ergebnisse der Fahrzeugklasse Sattelzug 40 t im Fernverkehr sind im Hauptteil des Berichts in Kap. 2.6.1 abgebildet. Nachfolgend sind ergänzend die Ergebnisse für den Sattelzug 40 t im Regionalverkehr, Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferverkehr und Solo-Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus abgebildet.

Abbildung 64 Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Sattelzug 40 t im Regionalverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

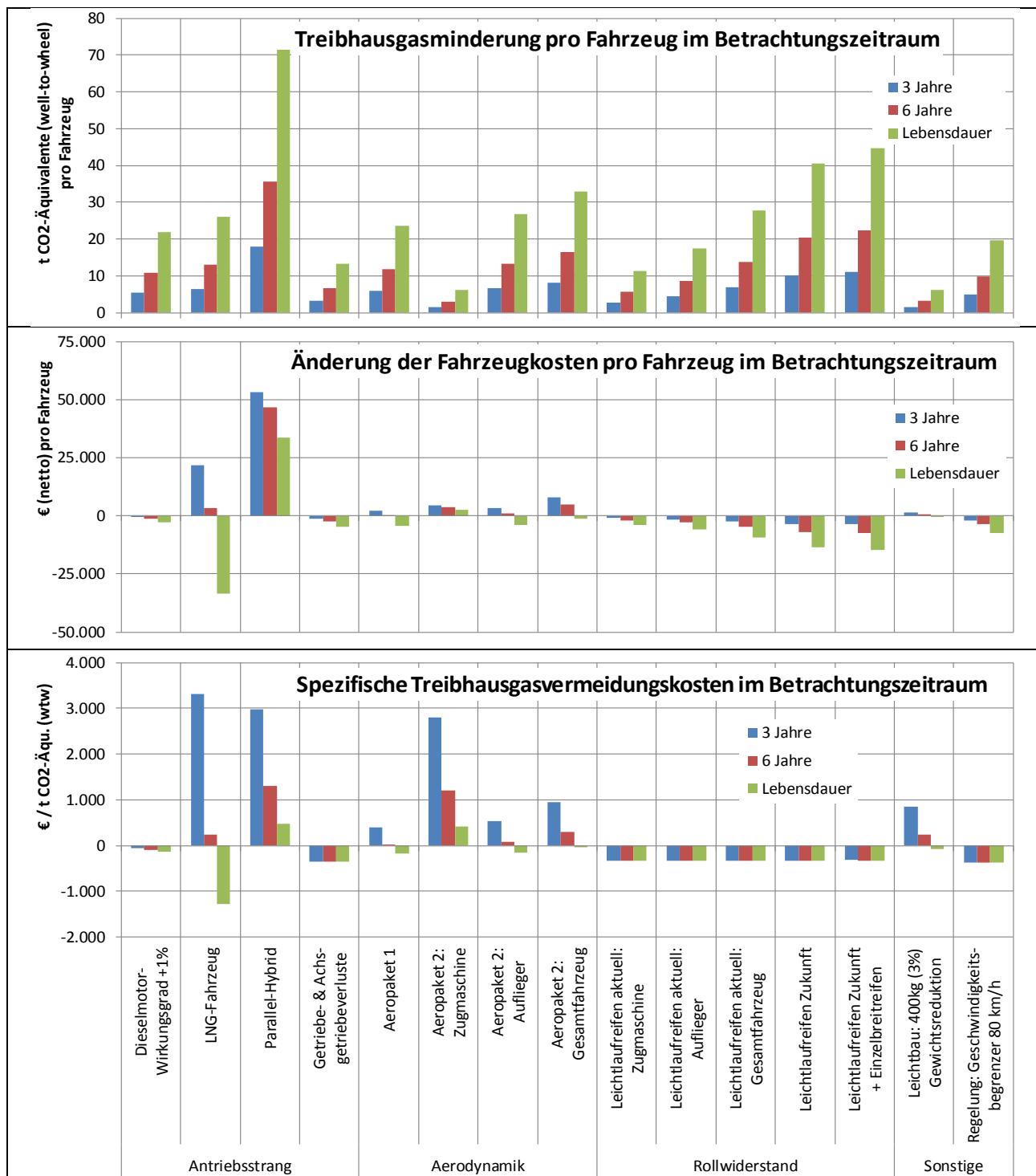


Abbildung 65 Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume

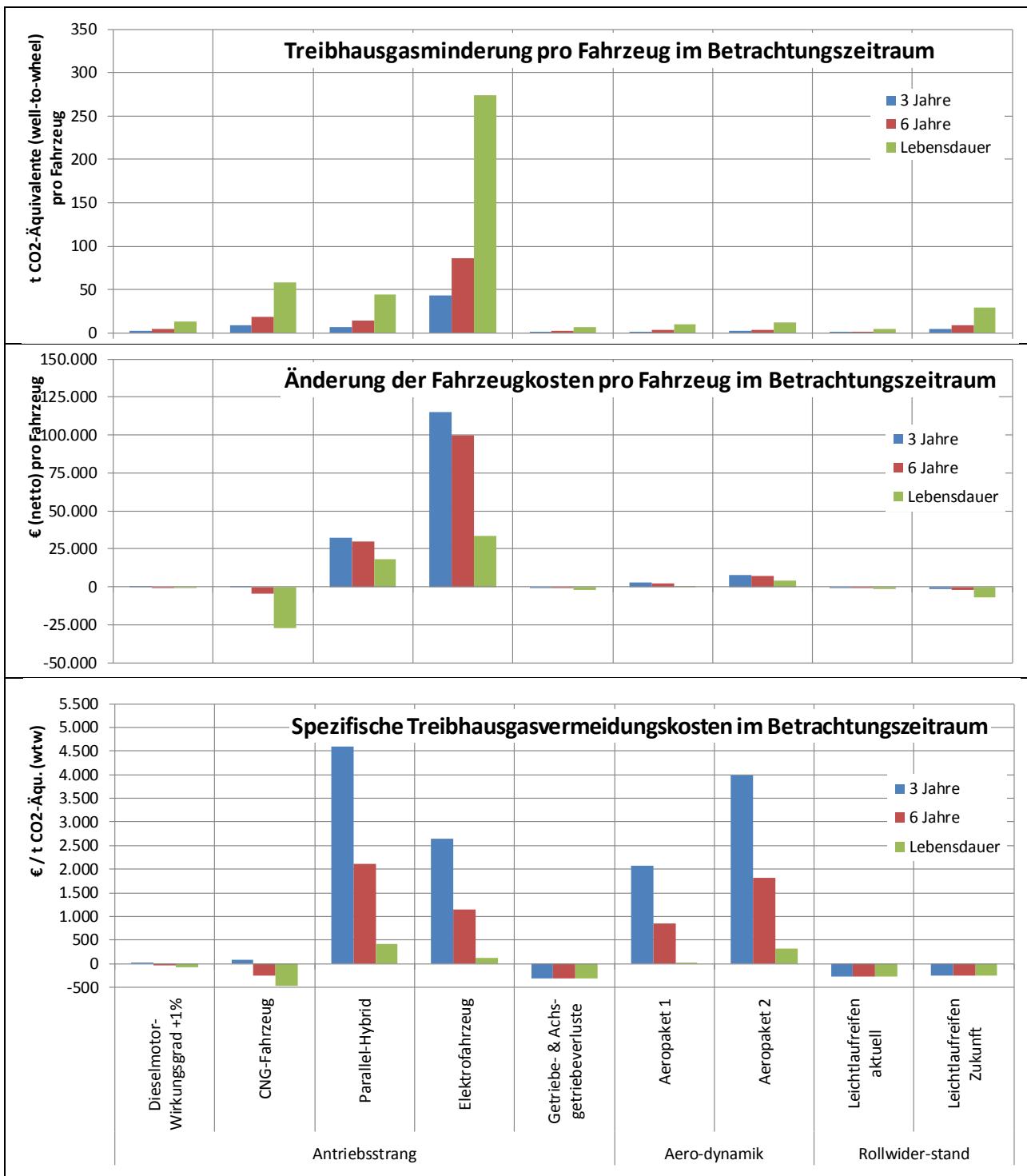
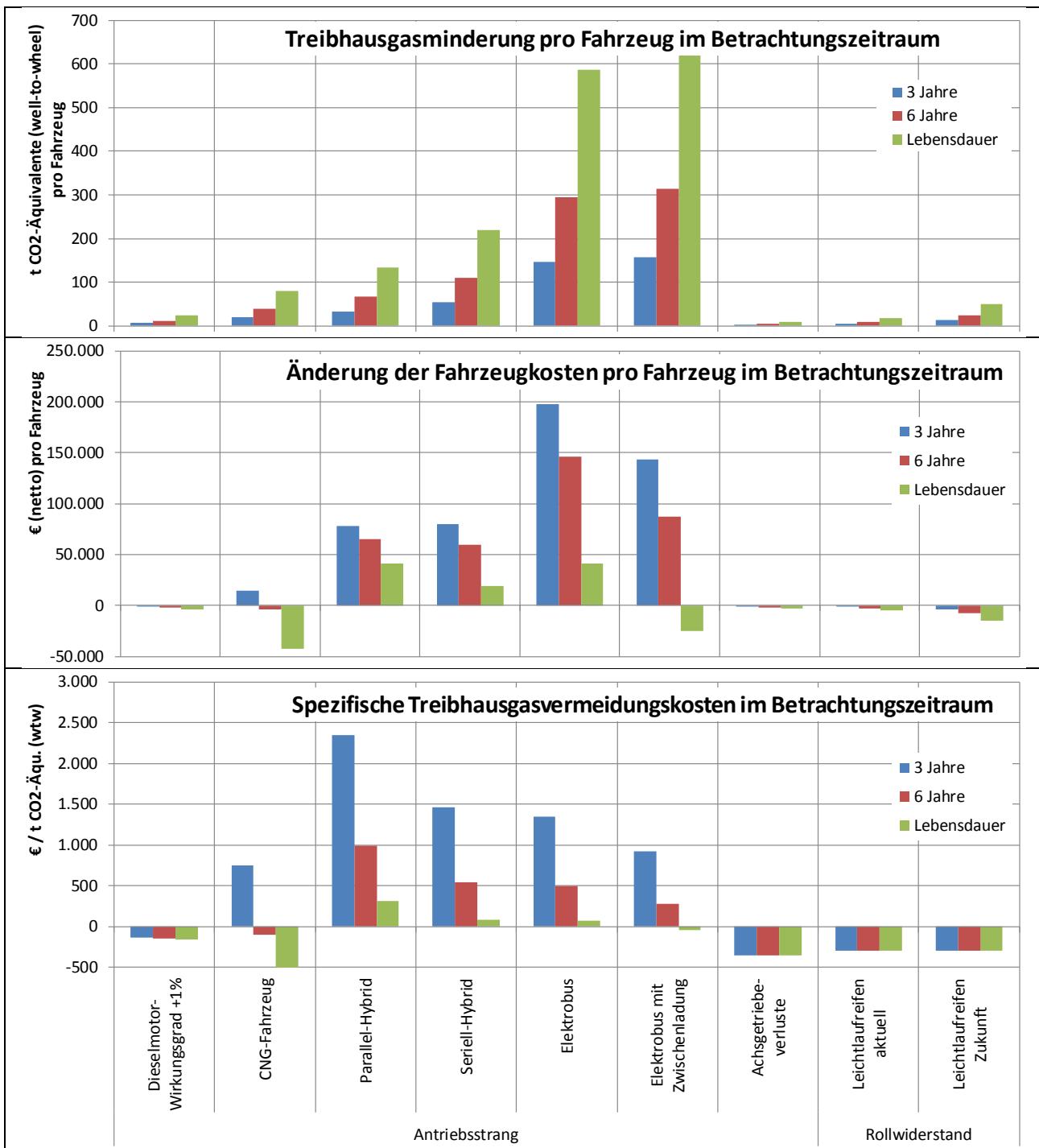


Abbildung 66 Treibhausgasminderungspotenziale, Änderung der Fahrzeugkosten und daraus resultierende Treibhausgasvermeidungskosten der Einzelmaßnahmen beim Solo-Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus für verschiedene Betrachtungszeiträume



5.10 Kostenkurven der Grenzvermeidungskosten und kumulierten Vermeidungskosten

Die Kostenkurven für die Fahrzeugklasse Sattelzug 40 t im Fernverkehr sind im Hauptteil des Berichts in Kapitel 2.6.3 abgebildet.

Nachfolgend sind ergänzend die Kostenkurven für den Sattelzug 40 t im Regionalverkehr, Solo-Lkw 12 t im städtischen Lieferverkehr sowie für den Solo-Stadtbus 18 t im städtischen Fahrzyklus abgebildet. Beim Stadtbus wurde auf die Darstellung für einen rein batterieelektrischen Bus verzichtet, da die Ergebnisse sich nur wenig vom Elektrobus mit Zwischenladung unterscheiden.

Abbildung 67 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Regionalverkehr

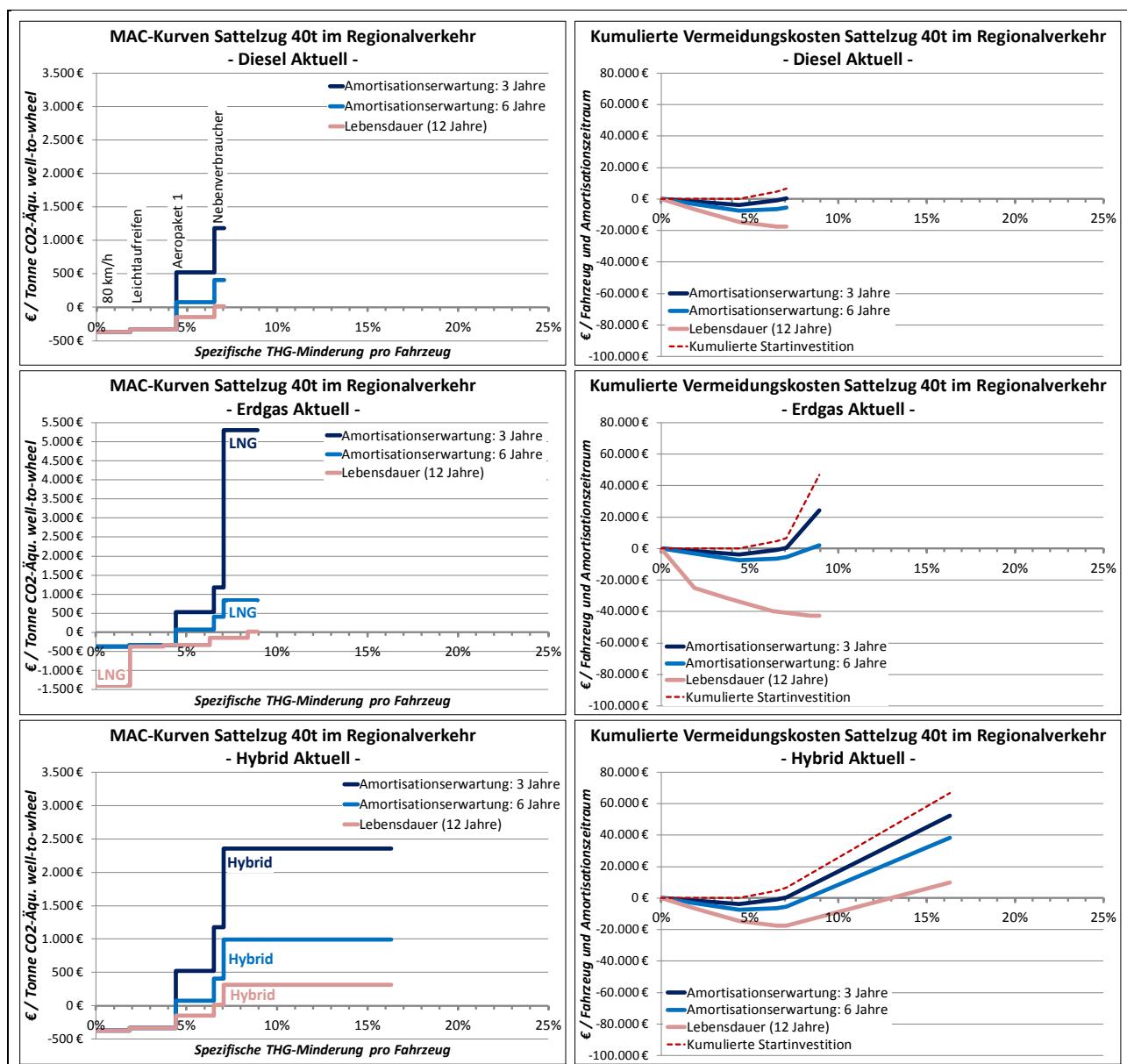


Abbildung 68 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Sattelzug im Regionalverkehr

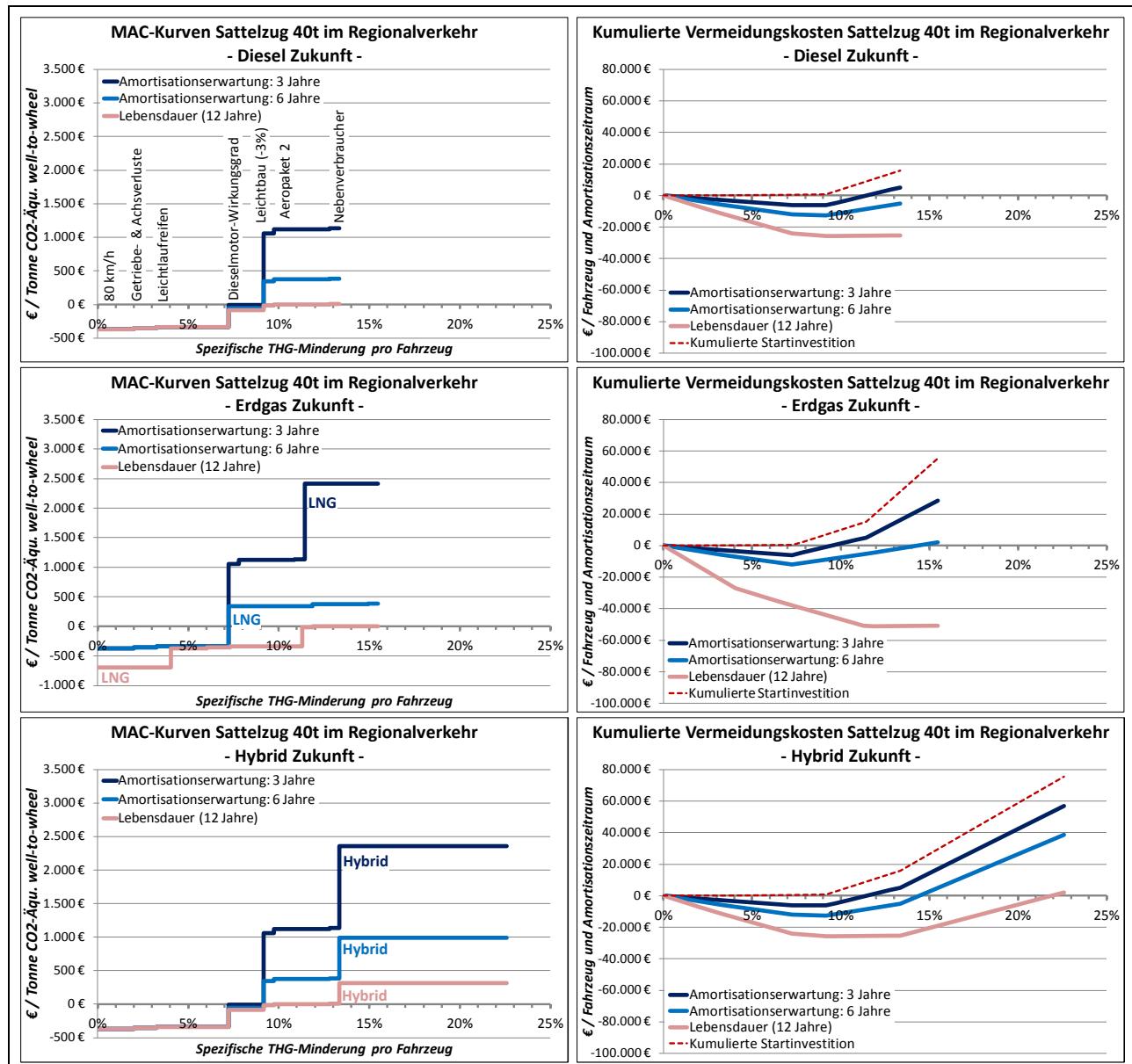


Abbildung 69 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Solo-Lkw im städtischen Lieferverkehr

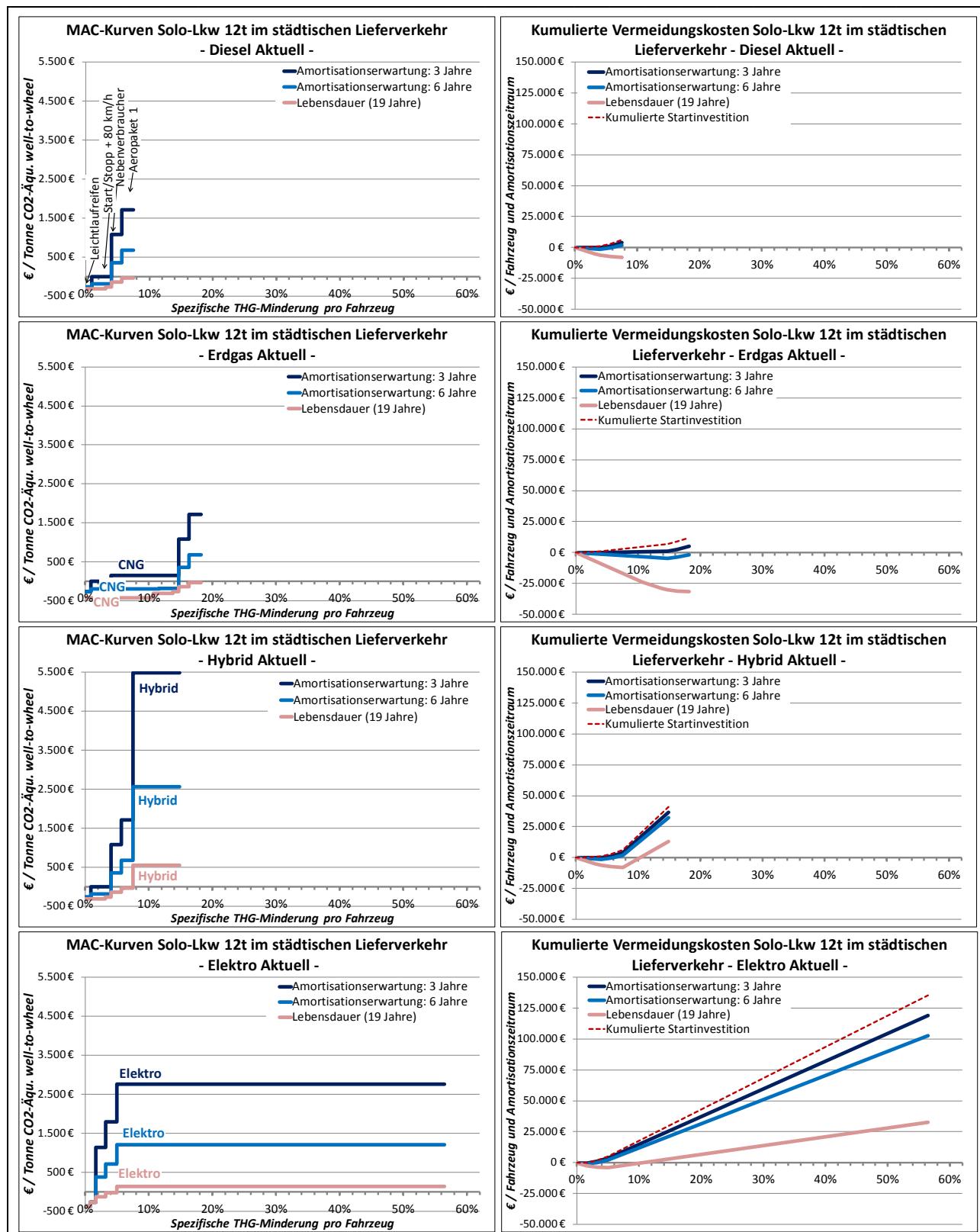


Abbildung 70 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Solo-Lkw im städtischen Lieferverkehr

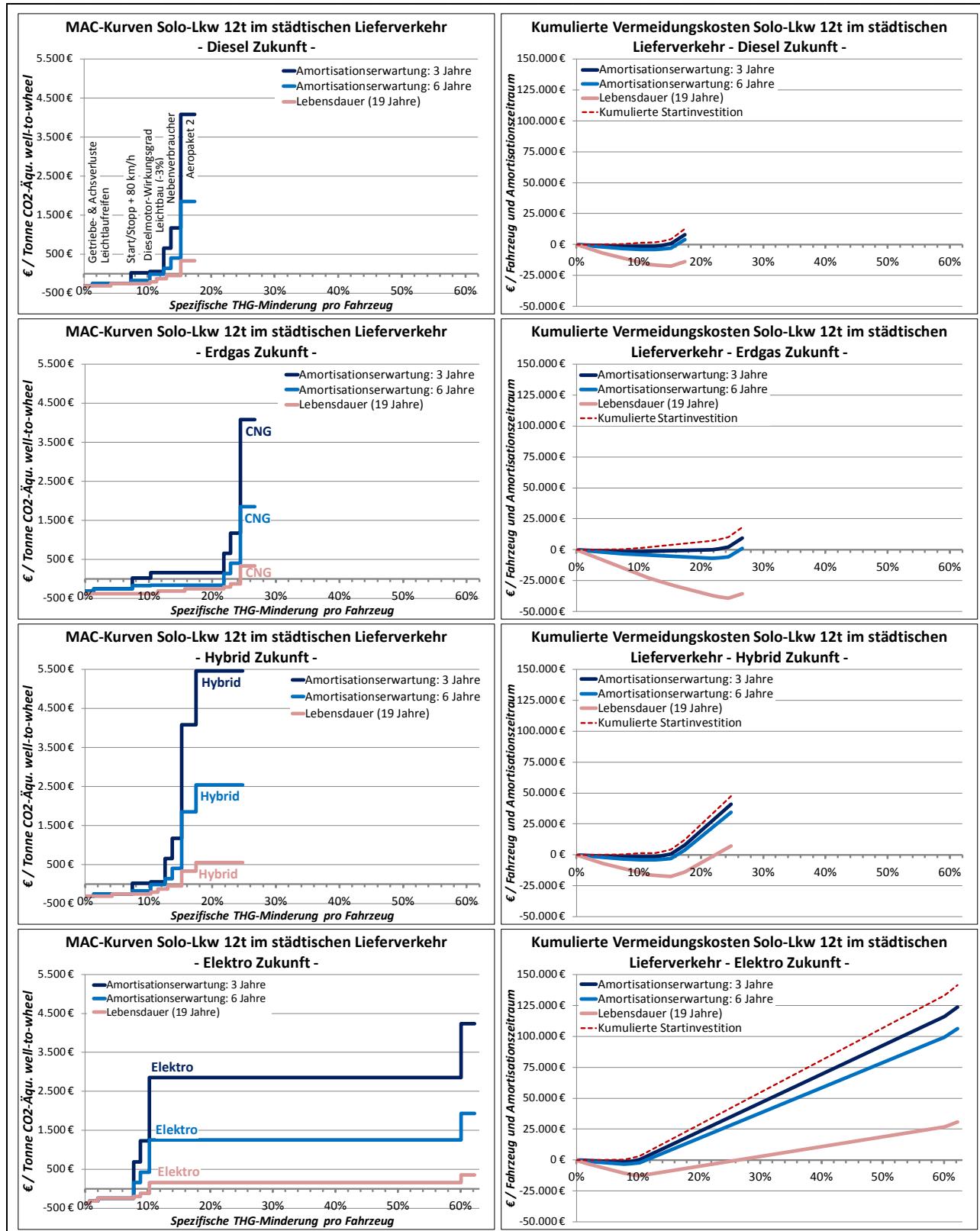


Abbildung 71 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete A (aktuell verfügbare Technologien) beim Stadtbus im städtischen Fahrzyklus

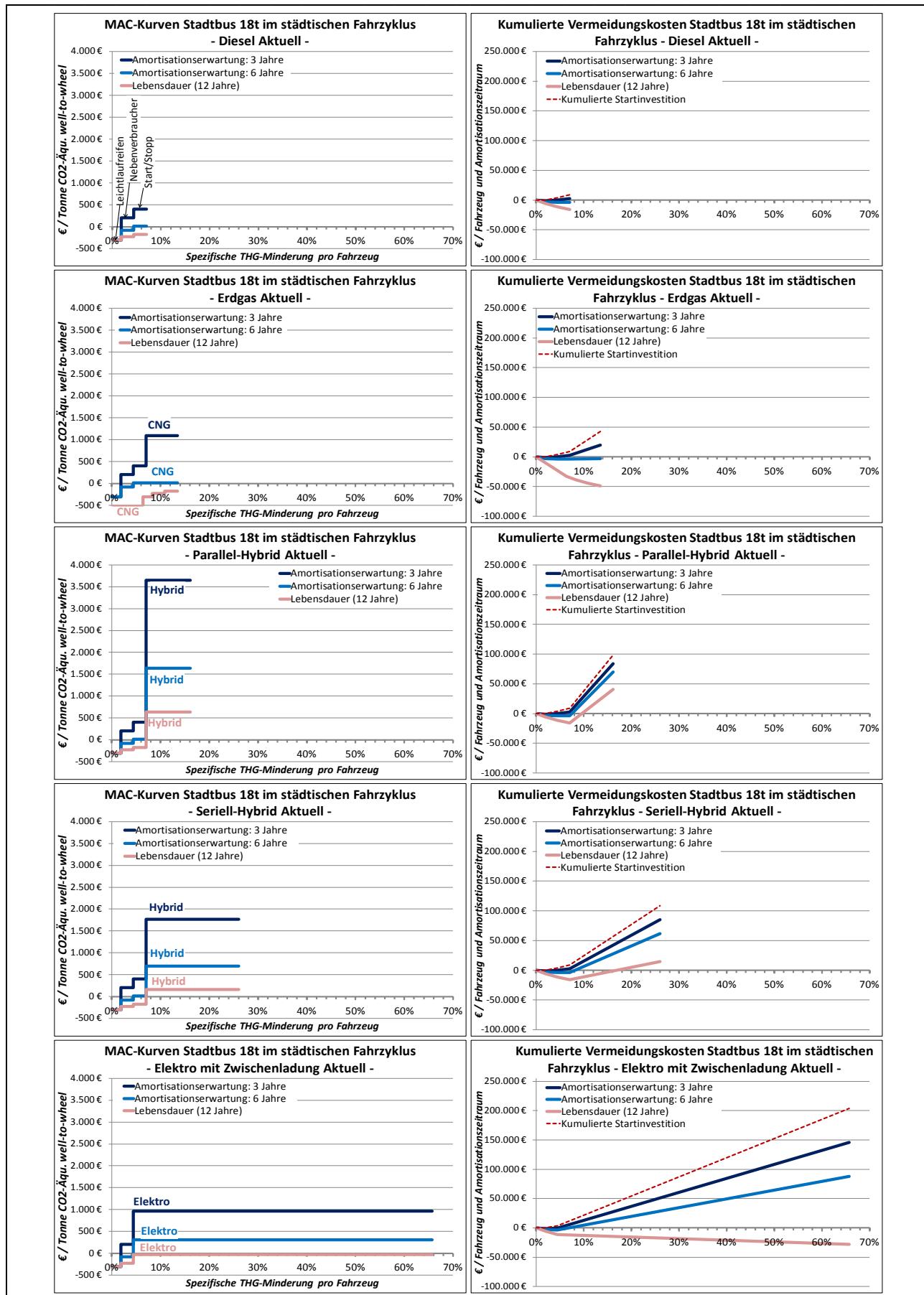
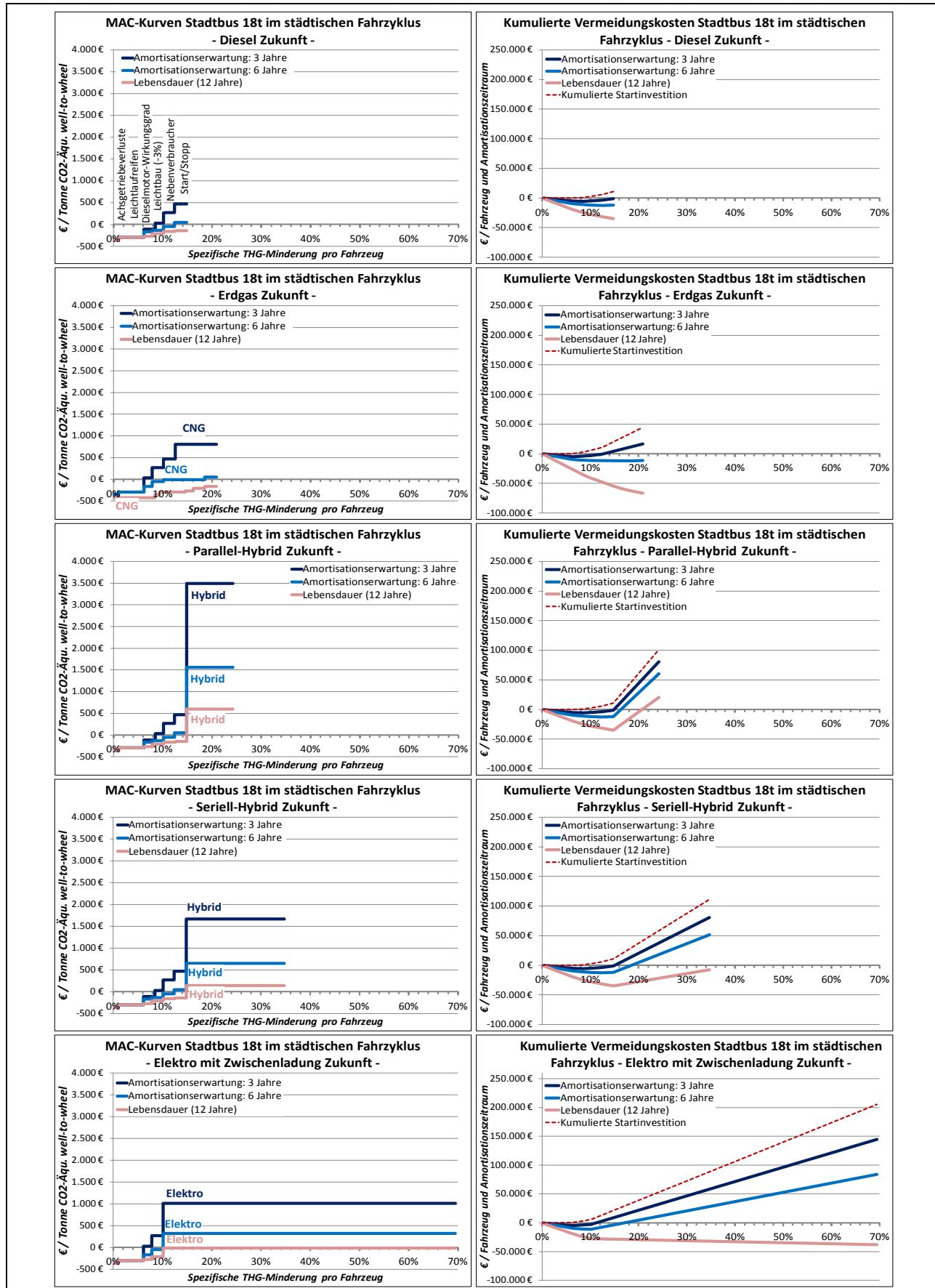


Abbildung 72 MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten der Maßnahmenpakete B (in absehbarer Zukunft verfügbare Technologien) beim Stadtbus im städtischen Fahrzyklus



5.11 Rückmeldung der Industrie

Am 3.11.2014 fand beim Umweltbundesamt in Dessau die Abschlussbesprechung statt, mit Teilnehmern von Nutzfahrzeugherrstellern, Anhänger-/Aufbauherstellern, Forschungseinrichtungen, Herstellerverbänden und Bundesministerien. Die Ergebnisse des Projektes, welche die Teilnehmer vorab als Berichtsentwurf bekommen hatten, wurden vorgestellt und ausführlich diskutiert. Es wurde darum gebeten, die Ergebnisse mit den eigenen Zahlen und Erfahrungswerten abzugleichen und ggf. eine Rückmeldung mit Änderungsvorschlägen zu geben. Die gesammelten Rückmeldungen mehrerer Hersteller sind in Abstimmung mit dem Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA, Ansprechpartner Thomas Fabian, fabian@vda.de) nachfolgend dargestellt.

5.11.1 Randbedingungen der Studie

Amortisationsdauer, mittl. Jahresfahrleistung abhängig von Amortisationsdauer, Berücksichtigung Teiletausch, Lebensdauer Fahrzeuge, max. Lebensdauerfahrleistung.

Annahme/Wert im Berichtsentwurf	Zahlenwert ifeu/TUG	Herstellerseitige Anmerkung, Korrekturvorschlag
3 Jahre = übliche Amortisationserwartung der Fahrzeuggbetreiber	3 Jahre kleinstte Einheit	Stark Segmentabhängig, z.B.: Fernverkehr: 1 bis 1,5 Jahre
Sattelzug. Seitenverkleidungen und Heckeneinheiten sind beschädigungskritisch und erfordern Wartungsaufwand, dieses hat Einfluss auf die Amortisationsdauer		Herstellererfahrungen, Kunden-aussagen
Die gewählten Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Erst-Nutzungsdauer der Fahrzeuge (+/-3 Jahre) sind insgesamt realistisch, tendenziell eher noch kürzer.		
...bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist lt. [Fleetnews, 2010] meist kein Batterietausch erforderlich	meist kein	mindestens ein Batterietausch erforderlich
Stadtbus Jahresfahrleistung	50.000 km	60.000 km (bei 12 Jahre Fahrzeug-lebensdauer)

5.11.2 Simulation der Sparpotentiale

Eingabedaten (technische Kennwerte, Maschinengrößen ...), simulierte Reduktionspotentiale, Aufteilung der Maßnahmenpakete in aktuell/zukünftig.

Annahme/Wert im Berichtsentwurf	Zahlenwert ifeu/TUG	Herstellerseitige Anmerkung, Korrekturvorschlag
Sattelzug, Aeropaket 1. Auflieger sollte nur Seitenverkleidungen und Heckeneinzug umfassen, Unterbodenverkleidungen sind aufgrund des hohen Beschädigungsrisikos und der geringen Wirkung nicht realistisch und auch nicht kurzfristig serienmäßig verfügbar		Herstellererfahrung
Sattelzug. Reduktion Cw-Wert Seitenverkleidung Auflieger	4 %	10 %; Design of Low Drag Bluff Road Vehicles, Dissertation G. van Raemdonck, TU Delft, 2012
Parallelhybrid für Sattelzug 40t / Fernverkehr: Auslegung Hybridsystem	EM 75 kW	> 100 kW, EM 120 kW
Parallelhybrid für Sattelzug 40t / Fernverkehr: Erzielbare Einsparungen	3 %	4...5 % (unter Berücksichtigung der erhöhten E-Maschinenleistung und zusätzlicher Hybridfunktionalität)

5.11.3 Kosten

Einzelkosten der Maßnahmen, Bandbreite und Unsicherheit der Kostenangaben.

Annahme/Wert im Berichtsentwurf	Zahlenwert ifeu/TUG	Herstellerseitige Anmerkung, Korrekturvorschlag
Sattelzug, Aeropaket 1	2100 €	4.500 €, Herstellererfahrungswert, - berechnungsergebnis
Variable Wasserpumpe	+75 € Zusatz- Invest	Verkaufspreis min 4 mal so hoch
Leichtlauf Motor-/Getriebeöl und Energiesparreifen	+20 €	Mehrpreis von Hersteller zu Hersteller sehr unterschiedlich. Mehrpreis tritt wiederholend auf.
Aeropaket 1. Auflieger deutlich zu günstig bewertet (Korrekturvorschlag beinhaltet nur Seitenverkleidungen und Heckeneinzug)	2100€	4500€; Herstellerpreisangaben
Aeropaket 2. Auflieger deutlich zu günstig bewertet	2400€	6000€; Herstellerpreisangaben; Unterbodenverkleidung Schätzung
zusätzliche Anschaffungskosten Parallel-Hybrid pro Fzg beim Sattelzug 40t	50 TEUR	40 TEUR
zusätzliche Anschaffungskosten Start-Stopp-Automatik beim Stadtbus 18t	940 EUR	4 – 6 TEUR
zusätzliche Anschaffungskosten Elektrobus mit Zwischenladung inkl. anteilig Infrastruktur	250 TEUR	180 – 220 TEUR
zusätzliche Anschaffungskosten LNG-Fahrzeug	50 TEUR	30 - 40 TEUR

5.11.4 Sonstiges

Kommentare/Ergänzungsvorschläge zu sonstigen Themen

Annahme/Wert im Berichtsentwurf	Zahlenwert ifeu/TUG	Herstellerseitige Anmerkung, Korrekturvorschlag
In der Amortisationsrechnung fehlt der Einfluss des Zusatzgewichts durch aerodynamische Maßnahmen (Heckklappen und Seitenverkleidungen ca. 200 kg)	0	200kg; von Hersteller geschätzte Werte (Gewicht Heckklappen ca. 60kg, Seitenverkleidungen ca. 140 kg)
Der einzige Verbrauchsvorteil, den Hybridfahrzeuge gegenüber Standardfahrzeugen haben, ist die Möglichkeit, einen Teil der Bremsarbeit zurückzugewinnen (Nutzbremsung, Rekuperation).		Ein wesentlicher Verbrauchsvorteil, den Hybridfahrzeuge gegenüber Standardfahrzeugen haben, ist die Möglichkeit, einen Teil der Bremsarbeit zurückzugewinnen (Nutzbremsung, Rekuperation).