

TEXTE

32/2015

# Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgas- minderung bei schweren Nutzfahrzeugen

Kurzfassung



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**

## **Kurzfassung**

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 Minderungen 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 .....	8
Tabellenverzeichnis.....	8
1 Hintergrund und Zielstellung .....	9
2 Energiespar- und Treibhausgasminderungspotenziale bei schweren Nutzfahrzeugen .....	9
2.1 Untersuchte Fahrzeugklassen.....	9
2.2 Eingesetztes Modell zur Ermittlung des Endenergieverbrauchs der Fahrzeuge (VECTO).....	10
2.3 Auswahl energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien.....	11
2.4 Energiespar- und Treibhausgasreduktionspotenziale .....	11
3 Kosten der untersuchten Maßnahmen zur Treibhausgasminderung .....	15
3.1 Technologiespezifische Zusatzkosten für die Fahrzeugbetreiber .....	15
3.2 Änderung der gesamten Fahrzeugkosten .....	16
3.3 Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung .....	18
4 Strategien zur Förderung der Einführung und Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen .....	22
4.1 Hemmnisse für die Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Technologien .....	22
4.2 Maßnahmen zur Förderung des Technologieeinsatzes und der Verbreitung.....	23

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Rechenschema von VECTO für die Ermittlung des Motorbetriebspunktes und die Interpolation des Kraftstoffverbrauches .....	10
Abbildung 2	Sattelzug auf Long Haul Cycle (Fernverkehr), Einzelmaßnahmen .....	11
Abbildung 3	Potenziale der Maßnahmenpakete beim Sattelzug auf dem Long Haul (Fernverkehr) und Regional Delivery (regionaler Verteiler) Zyklus .....	12
Abbildung 4	Potenziale der Maßnahmenpakete beim Verteiler-Lkw und Stadtbus .....	14
Abbildung 5	Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Sattelzug 40 t .....	16
Abbildung 6	<b>Änderung der Fahrzeugkosten eines Sattelzugs 40 t im Fernverkehr in drei Jahren</b> .....	17
Abbildung 7	Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten der Maßnahmen bei einem Sattelzug 40 t im Fernverkehr für verschiedene Betrachtungszeiträume .....	19
Abbildung 8	MAC-Kurven und kumulierte Vermeidungskosten des Maßnahmenpakets Diesel B beim Sattelzug im Fernverkehr .....	20
Abbildung 9	Roadmap zur Förderung einer Verbreitung von Effizienz-Technologien im Nfz-Markt .....	25

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Mittlere Amortisationszeiten von Hybrid- und Elektrofahrzeugen in den Szenarien .....	18
Tabelle 2	Anteilige Treibhausgasminderungspotenziale der Maßnahmenpakete durch Maßnahmen mit im jeweiligen Betrachtungszeitraum negativen Vermeidungskosten .....	21

## 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 treibhausgasmindernder Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen untersucht.

## 2 Energiespar- und Treibhausgasreduzierungspotenziale bei schweren Nutzfahrzeugen

### 2.1 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Anteil dieser Fahrzeugklasse gering. Sie kann jedoch als repräsentativ für den Großteil der 4x2 und 6x2 Solo-Lkw gesehen werden (ca. 22 % CO<sub>2</sub>-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 % CO<sub>2</sub>-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.

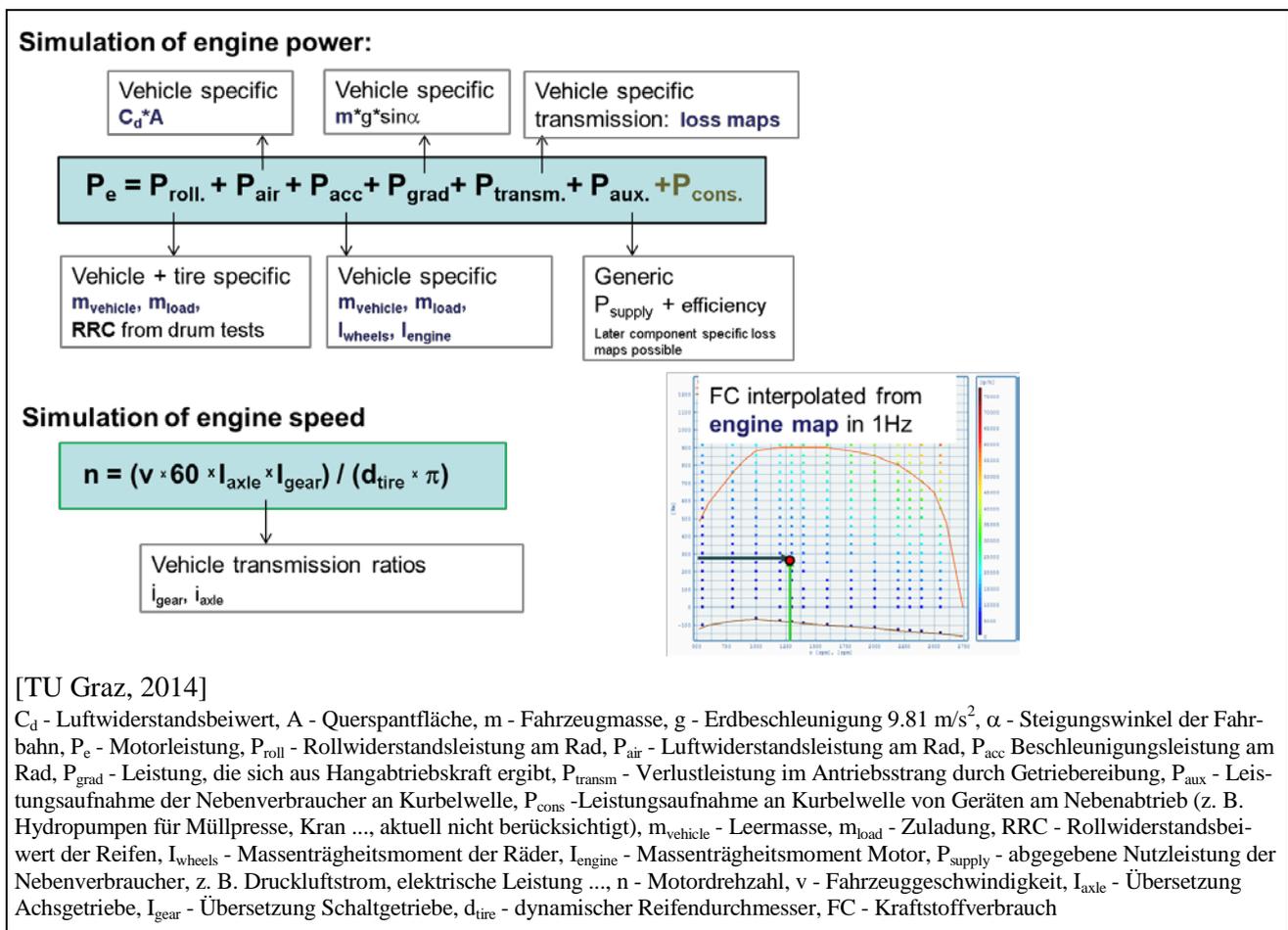
## 2.2 Eingesetztes Modell zur Ermittlung des Endenergieverbrauchs der Fahrzeuge (VECTO)

Aufgrund der großen Variantenvielfalt bei schweren Nutzfahrzeugen ist es zu aufwändig und teuer, Endenergieverbrauch und direkte CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Rechengema von VECTO für die Ermittlung des Motorbetriebspunktes und die Interpolation des Kraftstoffverbrauches



### 2.3 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 tiefgehenden 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.

### 2.4 Energiespar- und Treibhausgasreduktionspotenziale

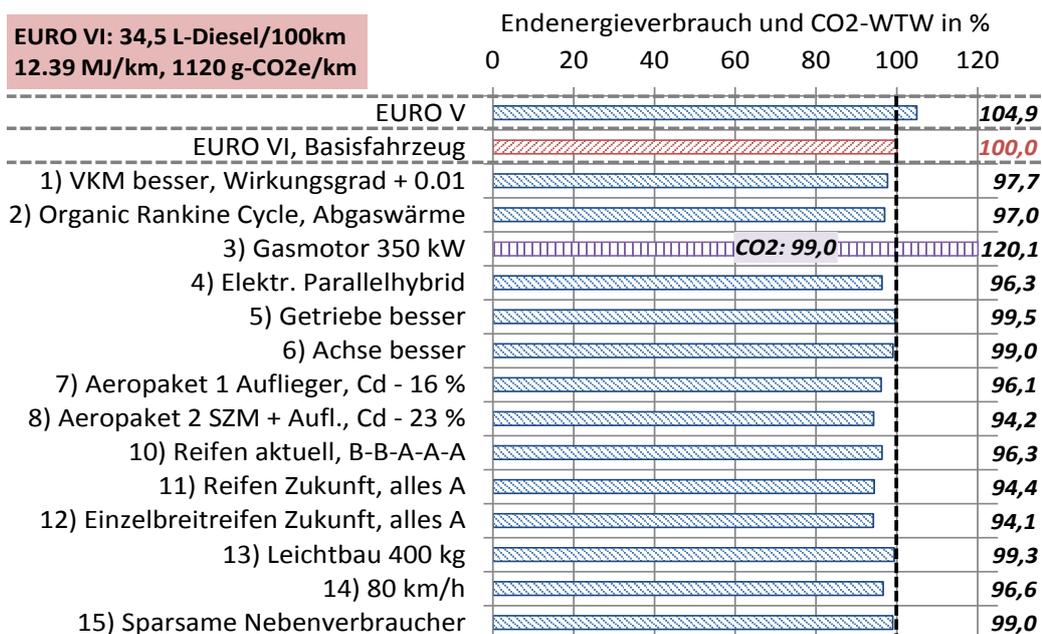
Für die ausgewählten technologischen Maßnahmen wurden standardisierte, miteinander vergleichbare Endenergie-Einsparpotenziale gegenüber aktuellen Referenzfahrzeugen (Stand der Technik bei EUR V und Euro VI) simuliert. Grundlage für die Simulation der Energieverbräuche von Referenzfahrzeugen und Potenziale 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 CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e) 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 (CO<sub>2</sub>-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 Heckenzug 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 Fahrzeugabmessungen und Rückfahrkameras.

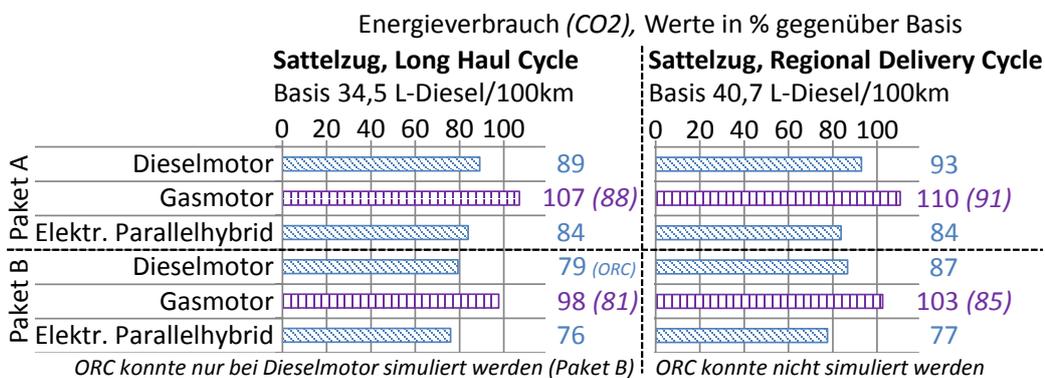
Entsprechende Maßnahmenpakete A und B wurden für jedes der untersuchten Antriebskonzepte (Diesel, Gas, Hybrid, Elektro) in den untersuchten Fahrzeugklassen definiert.

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 Fernverkehrszyklus 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-CO<sub>2</sub>e/MJ<sub>therm</sub> 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 (CO<sub>2</sub>-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 Abgaswärmenutzung 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 CO<sub>2e</sub>/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 Heckenzug 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 %.

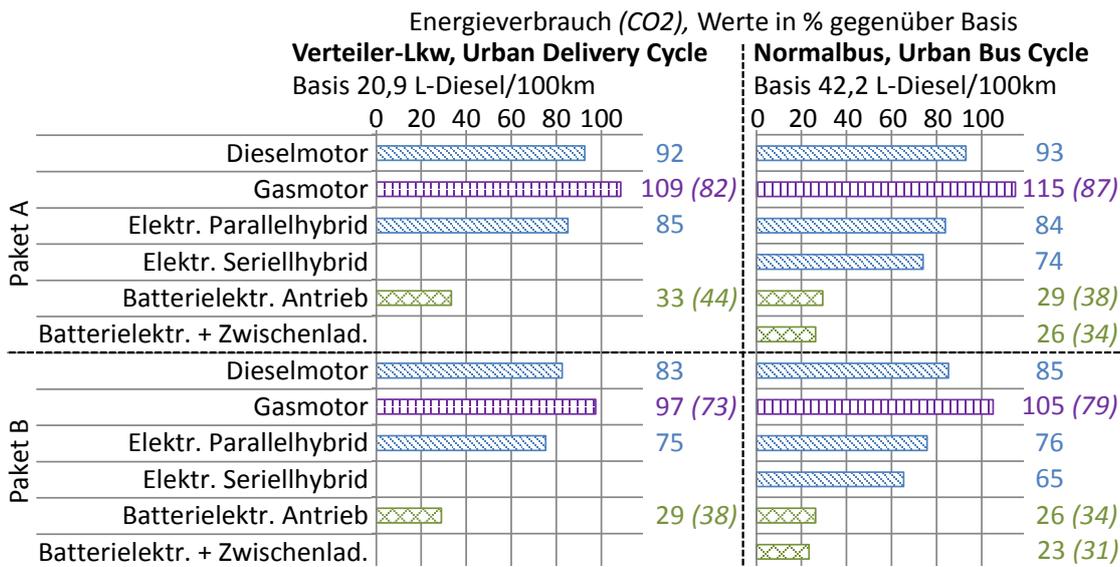
Deutlich höhere Reduktionspotenziale bietet der batterieelektrische Antrieb mit 67 % Endenergieverbrauchsreduktion und 56 % Treibhausgasminderung. Hier zeigt sich der prinzipielle Vorteil von Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Während die Umwandlung von Treibstoff in Bewegungsenergie 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 CO<sub>2e</sub>/MJ<sub>el</sub> deutlich höher als bei Diesel und Erdgas. Durch den ca. doppelt so hohen Wirkungsgrad von Elektromaschinen gegenüber Verbrennungsmotoren und die Möglichkeit zur Energierückgewinnung (als Nutzbremse 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 Seriellhybrid 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 Fahrgastraums.

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 (CO<sub>2</sub>-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 Reduktionspotential 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 Treibhausgasreduzierung

Wesentliche Voraussetzung für eine Verbreitung energiesparender und treibhausgasreduzierender 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 Reduzierungen 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.

#### 3.1 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.

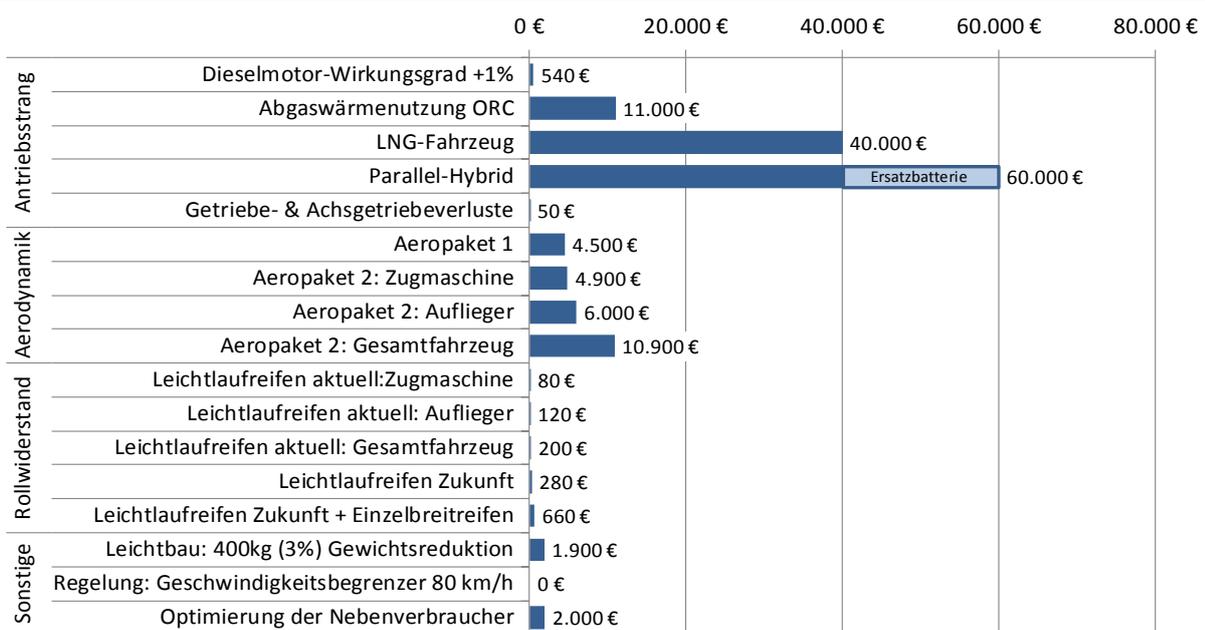
Bei einem **Sattelzug mit 40 t** zulässigem Gesamtgewicht (vgl. Abbildung) bewegen sich die mittleren zusätzlichen Anschaffungskosten für die ausgewählten Technologiebündel aktuell zwischen 0 und ca. 60.000 Euro und können damit die gesamten Anschaffungskosten für einen Sattelzug um mehr als 50 % erhöhen.

- ▶ 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 Abgaswärmenutzung (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.

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 Elektrobuse 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.

Abbildung 5 Zusätzliche Anschaffungskosten pro Fahrzeug beim Sattelzug 40 t



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).

### 3.2 Änderung der gesamten Fahrzeugkosten

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.

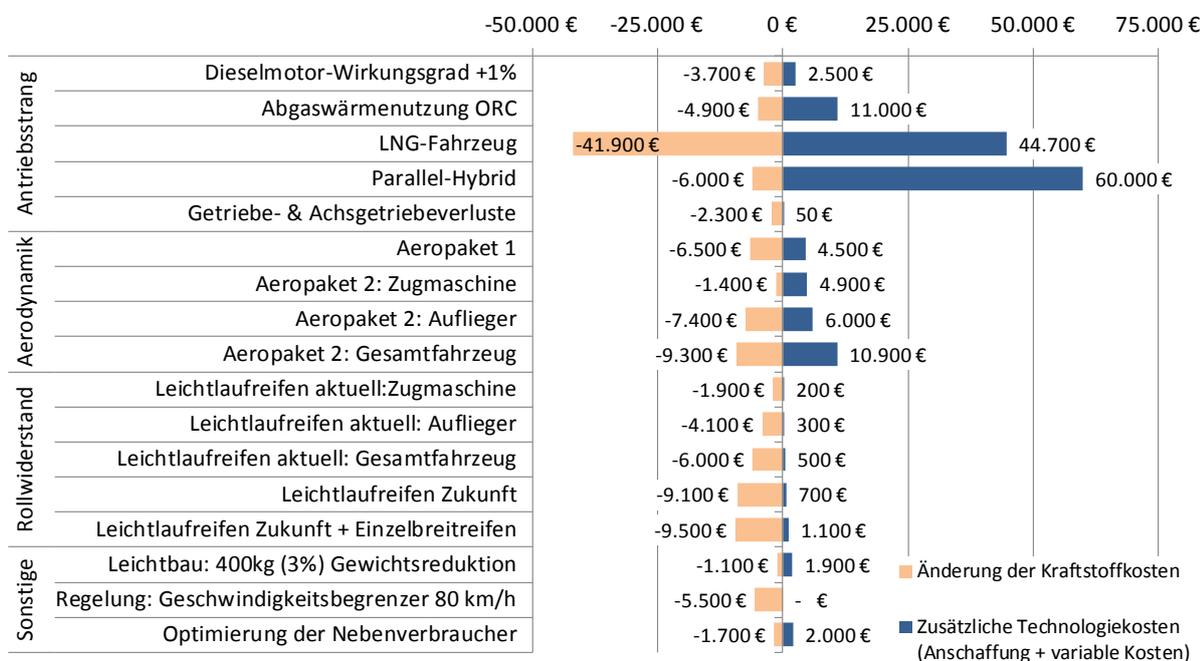
**Sattelzüge mit 40 t** zGG fahren zu einem großen Teil im mehrtägigen Fernverkehr. Vielfach sind Fahrzeuge dieser Größenklasse aber auch oder sogar überwiegend im regionalen Verteilerverkehr aktiv. Daher wurden in den Potenzial- und Kostenanalysen beide Einsatzzwecke untersucht. Abbildung 6 zeigt die 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 alternati-

ven Antriebskonzepte (LNG, Parallelhybrid), Abgaswärmenutzung 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 Fahrzeuglebensdauer.

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

### 3.3 Kosteneffizienz zur Treibhausgasminderung

Die Treibhausgasvermeidungskosten zeigen, zu welchen Kosten die Treibhausgasemissionen um 1 Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalente verringert werden können (Euro / Tonne CO<sub>2</sub>e). 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 Unternehmen und an den Fahrzeugkauf geknüpfte Amortisationserwartungen. Deshalb erfolgte eine Berechnung spezifischer Treibhausgasvermeidungskosten für die untersuchten Maßnahmen für verschiedene Zeiträume.

**Kosteneffizienz der Einzelmaßnahmen**

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 CO<sub>2</sub>e. 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 <sub>2</sub> -Äqu.	6 Jahre	Euro / t CO <sub>2</sub> -Äqu.	Lebensdauer (8 Jahre)	Euro / t CO <sub>2</sub> -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	Abgaswärmenutzung ORC	457 €	Leichtbau	-47 €	Leichtbau	-128 €
15	Erdgasfahrzeug (LNG)	617 €	Abgaswärmenutzung ORC	48 €	Abgaswärmenutzung 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**

Für die in den Potenzialanalysen definierten Maßnahmenpakete erfolgten verschiedene Kostenanalysen

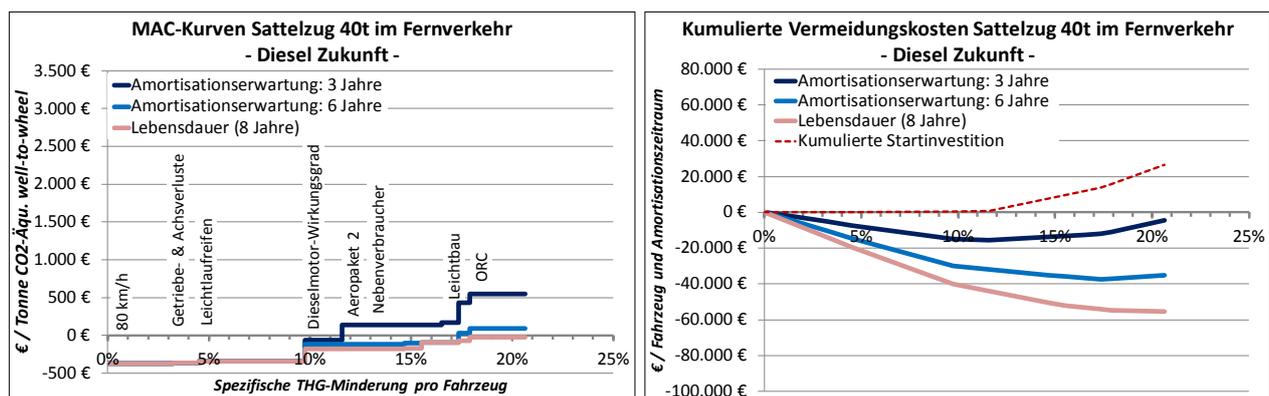
- ▶ Mittlere Treibhausgasvermeidungskosten der Maßnahmenpakete wurden über die kombinierten Treibhausgasminderungspotenziale sowie Fahrzeugkostenänderungen der enthaltenen Maßnahmen ermittelt.
- ▶ Für jedes Paket wurden MAC-Kurven (Marginal Abatement Costs - Grenzkosten zur Treibhausgasminde- rung) abgeleitet.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

MAC-Kurven zeigen, zu welchen Grenzkosten welche zusätzlichen Emissionsminderungen bei einem be- trachteten System (z.B. Lkw-Maßnahmen) möglich sind. Dazu wurden die Maßnahmen in den Paketen nach ihrer individuellen Kosteneffizienz (Grenzkosten in €/ t CO<sub>2</sub>e) sortiert und ausgehend von der kosteneffi- zientesten Maßnahme kombiniert. Für jede hinzukommende Maßnahme wurden das zusätzliche Treibhaus- gasminderungspotenzial 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 Kostenersparnis 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 Jah- ren bis 21 Prozent über die mittlere Fahrzeuglebensdauer möglich. Die maximale kumulierte Kostenminde- rung 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 insge- samt um 4.000 Euro reduzieren, da die Kosteneinsparungen der Maßnahmen mit negativen Vermeidungskos- ten 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 Kostenersparnisse 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.

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 Lieferverkehr	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%

Daran zeigt sich die Bedeutung der Amortisationserwartungen bei den Fahrzeugbetreibern für die Bewertung von Maßnahmen und somit für die Realisierbarkeit von Minderungspotenzialen durch energiesparende und treibhausgasmindernde 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 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.

### 4.1 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 Fernverkehr 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 Fahrzeugbetreiber.

## 4.2 Maßnahmen zur Förderung des Technologieeinsatzes und der Verbreitung

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 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.

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 CO<sub>2</sub>-

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 CO<sub>2</sub>-Zertifizierung von Nutzfahrzeugen bzw. Einzeltechnologien, um die Informationen zum Einsparpotenzial transparent und verständlich darzustellen. Für neue Nutzfahrzeuge sollte eine verpflichtende Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-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 vor allem für kleinere Unternehmen ein erheblicher Aufwand. Herstellerunabhängige Effizienzberater können Fuhrunternehmen bei der Anschaffung effizienter Fahrzeuge unterstützen. Ebenso kann den Beratern die Aufgabe zukommen, 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 finanzierter Förderung ist auch ein privates Sprintspar-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 in der Roadmap. Die Integration alternativer Antriebe in den Markt erfordert umfangreiche Maßnahmen. 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 kein passendes Service-Netzwerk 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 Fahrzeugbetreiber 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 CO<sub>2</sub>-Regulierung für Nutzfahrzeuge angestrebt werden.

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

