

Working Paper

Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050

Öko-Institut Working Paper 3/2014

Friederike Hülsmann

Moritz Mottschall

Florian Hacker

Peter Kasten



Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg / Freiburg Head Office

Postfach / P.O. Box 17 71

79017 Freiburg. Deutschland / Germany

Tel.: +49 761 45295-0

Fax: +49 761 45295-288

Büro Darmstadt / Darmstadt Office

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland / Germany

Tel.: +49 6151 8191-0

Fax: +49 6151 8191-133

Büro Berlin / Berlin Office

Schicklerstraße 5-7

10179 Berlin. Deutschland / Germany

Tel.: +49 30 405085-0

Fax: +49 30 405085-388

info@oeko.de

www.oeko.de

Working Paper

Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050

Friederike Hülsmann

Moritz Mottschall

Florian Hacker

Peter Kasten

Working Paper 3/2014 Öko-Institut e.V.

August 2014

Download: <http://www.oeko.de/oekodoc/2105/2014-662-de.pdf>



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 3.0 Unported Lizenz. Öko-Institut e.V. [Jahr]

This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported. Oeko-Institut e.V. [year]

Die Working Paper Series des Öko-Instituts ist eine Sammlung wissenschaftlicher Beiträge aus der Forschungsarbeit des Öko-Instituts e.V. Sie präsentieren und diskutieren innovative Ansätze und Positionen der aktuellen Nachhaltigkeitsforschung. Die Serie ist offen für Arbeiten von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus anderen Forschungseinrichtungen. Die einzelnen Working Paper entstehen in einem sorgfältigen wissenschaftlichen Prozess ohne externes Peer Review.

Oeko-Institut's Working Paper Series is a collection of research articles written within the scope of the institute's research activities. The articles present and discuss innovative approaches and positions of current sustainability research. The series is open to work from researchers of other institutions. The Working Papers are produced in a scrupulous scientific process without external peer reviews.

Zusammenfassung

Im Verkehrssektor stellt die technische Effizienzsteigerung von Straßenfahrzeugen eine zentrale Möglichkeit zur Verringerung des Energieeinsatzes und der Treibhausgasemissionen dar. Für eine fundierte Abschätzung der verfügbaren Potenziale sind umfassende Informationen zu möglichen Effizienztechnologien, der Marktverfügbarkeit und der assoziierten Kosten erforderlich.

Im Rahmen des Projekts *eMobil 2050* wurde eine Technologiedatenbank für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge entwickelt, die es erlaubt, die Effizienzpotenziale sowie die damit verbundenen Zusatzkosten für konventionell und alternativ betriebene Fahrzeuge auf Basis von konkreten Einzeltechnologien bis zum Jahr 2050 darzustellen und anhand von Kostenkurven zu veranschaulichen. Die Datenbasis und die in diesem Kontext entwickelte Methode bilden eine wichtige Grundlage für die Abbildung möglicher Effizienzentwicklungen bei Straßenfahrzeugen für die kommenden Dekaden. Eine typische Anwendung sind beispielsweise Szenariobetrachtungen für den Verkehrssektor.

Die Technologiedatenbank berücksichtigt bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen unterschiedliche Fahrzeugkategorien und betrachtet für jede Fahrzeugkategorie jeweils alle denkbaren konventionellen und alternativen Antriebssysteme. Die Entwicklung der Datenbank erfolgte auf Basis einer umfassenden Literaturlauswertung sowie der Einbindung von Fachexperten aus Wissenschaft und Industrie.

Erste Anwendungen der Datenbank zeigen, dass sowohl bei Pkw als auch bei schweren Nutzfahrzeugen auch bei konventioneller Motorisierung noch erhebliche Effizienzpotenziale auf Basis bereits bekannter Technologien bestehen. Die Analysen verdeutlichen aber auch, dass alternative elektrische Antriebe ein darüber deutlich hinausgehendes Potenzial zur Minderung des Energieverbrauchs auf Fahrzeugebene ermöglichen. Deren Realisierbarkeit hängt jedoch sehr stark von deren weiterer Entwicklung von Technik und Kosten ab. Angesichts der frühen Marktphase von alternativen Antriebssystemen ist insbesondere die Entwicklung der Zusatzkosten mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Die Technologiedatenbank ist daher so angelegt, dass eine Variation der Kosten für die zentralen Komponenten des elektrischen Antriebs möglich ist.

Angesichts des langen Betrachtungszeitraums ist jedoch auch zu beachten, dass zukünftig weitere Innovationen im Fahrzeugbau zu erwarten sind. Die dargestellten Effizienzpotenziale und Kosten auf Basis heute bekannter Technologien sind unter diesem Gesichtspunkt für die längerfristige Perspektive daher eher als konservative Abschätzung einzuordnen.

Trotz der verbleibenden Unsicherheiten längerfristiger technologischer Entwicklungen stellt die entwickelte Technologiedatenbank ein wichtiges Werkzeug dar, um mögliche Effizienzentwicklungen im Bereich der Pkw und schweren Nutzfahrzeuge technologiebezogen herzuleiten und konkurrierende Technologien zu vergleichen. Die bestehende Datenbank stellt dabei eine Momentaufnahme auf Grundlage des aktuellen Stands des Wissens dar. Der Aufbau der Datenbank ermöglicht es jedoch, jederzeit diese an aktuelle Erkenntnisse oder neue Entwicklungen anzupassen bzw. unsichere Technologieentwicklungen anhand von mehreren alternativen Entwicklungspfaden in der Datenbank zu beschreiben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	10
1. Hintergrund und Zielstellung	13
2. Datengrundlage	14
2.1. Einleitung	14
2.2. Literatur	14
2.2.1. Hintergrund	14
2.2.2. Pkw	15
2.2.3. Schwere Nutzfahrzeuge	17
2.3. Fachworkshops & Experteninterviews	18
2.3.1. Hintergrund	18
2.3.2. Pkw	19
2.3.3. Schwere Nutzfahrzeuge	19
3. Methodisches Vorgehen	20
3.1. Übersicht	20
3.2. Betrachtete Fahrzeugkategorien	20
3.3. Definition Basisfahrzeuge	20
3.4. Ableitung von Kostenkurven	21
4. Technologiedatenbank Pkw	23
4.1. Übersicht	23
4.2. Antriebskonzepte	23
4.3. Basisfahrzeuge	24
4.4. Langfristige Entwicklung der Fahrzeugtechnologien	26
4.4.1. Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstands	27
4.4.2. Konventionelle Antriebstechnologien	27
4.4.3. Alternative Antriebstechnologien	29
4.4.4. Komponenten alternativer Antriebe	30
4.5. Ergebnisse: Energieverbrauch und Kosten auf Fahrzeugebene 2010 - 2050	39
4.5.1. Basisfahrzeuge 2010	39
4.5.2. Entwicklung des Energieverbrauchs und der Fahrzeugkosten bis zum Jahr 2050	40
4.5.3. Einordnung der Ergebnisse	47
5. Technologiedatenbank SNF	48

5.1.	Übersicht	48
5.2.	Antriebskonzepte	48
5.3.	Basisfahrzeuge	49
5.4.	Langfristige Entwicklung der Fahrzeugtechnologien	51
5.4.1.	Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstands	53
5.4.2.	Konventionelle Antriebstechnologien	53
5.4.3.	Alternative Antriebstechnologien	55
5.4.4.	Komponenten alternativer Antriebe	57
5.5.	Ergebnisse: Energieverbrauch und Kosten auf Fahrzeugebene 2010 – 2050	60
5.5.1.	Basisfahrzeuge 2010	60
5.5.2.	Entwicklung des Energieverbrauchs und der Fahrzeugkosten bis zum Jahr 2050	61
5.5.3.	Einordnung der Ergebnisse	68
6.	Fazit	69
7.	Literaturverzeichnis	71
8.	Anhang	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Methodisches Vorgehen	22
Abbildung 3-2:	Schematische Darstellung der Kostenkurven	23
Abbildung 4-1:	Kostenkurven für mittlere Benzin-Pkw	28
Abbildung 4-2:	Kostenkurven für mittlere Diesel-Pkw	29
Abbildung 4-3:	Übersicht verschiedener Studien zur Entwicklung der Lithium-Ionen Batteriekosten, 2010 – 2050	33
Abbildung 4-4:	Estimated fuel cell system costs	37
Abbildung 4-5:	Energieverbrauch eines mittleren Pkw differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario 1</i>	42
Abbildung 4-6:	Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und verbrennungsmotorischem Antriebskonzept 2010 und 2050, <i>Szenario 1</i>	42
Abbildung 4-7:	Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept 2010 und 2050, <i>Szenario 1</i>	43
Abbildung 4-8:	Investitionskosten eines mittleren Pkw (Verkaufspreise inkl. MwSt.) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario 1</i>	44
Abbildung 4-9:	Entwicklung des Energieverbrauchs differenziert nach Antriebskonzepten 2010 – 2050, <i>Szenario 2</i>	45
Abbildung 4-10:	Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und verbrennungsmotorischem Antriebskonzept 2010 und 2050, <i>Szenario 2</i>	46
Abbildung 4-11:	Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept 2010 und 2050, <i>Szenario 2</i>	46
Abbildung 4-12:	Investitionskosten eines mittleren Pkw (Verkaufspreise inkl. MwSt.) differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario 2</i> .	47
Abbildung 5-1:	Energieverluste eines schweren Lkw (~ 40 t zGG) mit 75 % Auslastung im Fernverkehr und im städtischen Verteilverkehr (Berechnungen: TU- Graz, basierend auf HBEFA Daten mit HDV-CO ₂ Testzyklen)	52
Abbildung 5-2:	Kostenkurven für Diesel-Lkw 3,5 - 7,5t	55
Abbildung 5-3:	Energieverbrauch eines Lkw 3,5 – 7,5 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	63
Abbildung 5-4:	Energieverbrauch eines LZ/SZ ≤ 40 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	63
Abbildung 5-5:	Energieverbrauch eines Linienbus differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	64
Abbildung 5-6:	Energieverbrauch konventioneller dieselbetriebener schwerer Nutzfahrzeuge differenziert nach Fahrzeugsegment 2010 und 2050, <i>Szenario</i>	65
Abbildung 5-7:	Investitionskosten eines Lkw 3,5 – 7,5 t in Euro (Verkaufspreise brutto) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	66
Abbildung 5-8:	Investitionskosten eines LZ/SZ ≤ 40 t in Euro (Verkaufspreise brutto) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	67
Abbildung 5-9:	Investitionskosten eines Linienbus in Euro (Verkaufspreise brutto) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Zuordnung der KBA Fahrzeugsegmente	25
Tabelle 4-2:	Fahrzeugspezifikationen, Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen der verbrennungsmotorischen Basisfahrzeuge (ICEV) im Jahr 2010	26
Tabelle 4-3:	Herstellerekosten der verbrennungsmotorischen Basisfahrzeuge (ICEV) im Jahr 2010	26
Tabelle 4-4:	Batteriesystem (20 kWh) - Leistungsfähigkeit und spezifische Kosten im Jahr 2010	31
Tabelle 4-5:	Batteriesystem (20 kWh) - Leistungsfähigkeit, 2020 – 2050	32
Tabelle 4-6:	Batteriesystem (20 kWh) - Spezifische Batteriekosten, 2020 – 2050	33
Tabelle 4-7:	Spezifische Batteriesystemkosten für verschiedene Batteriegrößen und Antriebssysteme, 2020 - 2050	34
Tabelle 4-8:	Veränderung der Energieverbrauchs sowie der Batteriekapazität und -kosten für zwei Varianten mit unterschiedlicher Reichweite bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum BEV im Jahr 2010.	35
Tabelle 4-9:	Elektromotor und Steuerung: Spezifische Kosten [€/kW]	35
Tabelle 4-10:	Kosten weiterer (hybrid) elektrischer Komponenten	36
Tabelle 4-11:	Brennstoffzellensystem – Wirkungsgrad, 2010 - 2050	37
Tabelle 4-12:	Brennstoffzellensystemkosten, 2010 - 2050	38
Tabelle 4-13:	Geschätzte Kosten für die Wasserstoffspeicherung	39
Tabelle 4-14:	Spezifischer Energieverbrauch für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Jahr 2010	39
Tabelle 4-15:	Investitionskosten in Euro (Verkaufspreise inkl. MwSt.) für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Jahr 2010	40
Tabelle 4-16:	Energieverbrauch eines mittleren Pkw differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario 1</i>	41
Tabelle 4-17:	Energieverbrauch eines mittleren Pkw differenziert nach Antriebskonzepten 2010 – 2050, <i>Szenario 2</i>	45
Tabelle 5-1:	Fahrleistungsanteile der Fahrzeugkategorien differenziert nach Straßenkategorie im Jahr 2010	50
Tabelle 5-2:	Fahrzeugspezifikationen, Energieverbrauch und Kosten der Basisfahrzeuge ICEV im Jahr 2010.	51
Tabelle 5-3:	Antriebstechnologien in verschiedenen Fahrzeugkategorien	55
Tabelle 5-4:	Übersicht über die elektrische Reichweite von schweren Nutzfahrzeugen als BEV und PHEV in Kilometern	56
Tabelle 5-5:	Spezifische Batteriekosten (Batteriesystem), 2020 – 2050	58
Tabelle 5-6:	Spezifische Kosten der Elektromotoren [€/kW]	59
Tabelle 5-7:	Spezifische Kosten von Steuerung und Leistungselektronik [€/kW]	59
Tabelle 5-8:	Absolute Kosten von der weiteren Komponenten [€]	60
Tabelle 5-9:	Spezifischer Energieverbrauch im Jahr 2010 differenziert nach Fahrzeugkategorie, Antriebskonzept und Betriebsart (konventionell / elektrisch)	61

Tabelle 5-10:	Investitionskosten in Euro (brutto) für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Jahr 2010	61
Tabelle 8-1:	Energieverbrauch eines Lkw 3,5 – 7,5 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	76
Tabelle 8-2:	Energieverbrauch eines LZ/SZ ≤ 40 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	76
Tabelle 8-3:	Energieverbrauch eines Linienbus differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, <i>Szenario</i>	76

1. Hintergrund und Zielstellung

Der Klimaschutz erfordert eine erhebliche Minderung der globalen Treibhausgasemissionen bis 2050. Zur Zielerreichung müssen die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden. Dies setzt einen bedeutenden Strukturwandel in allen energienachfragenden Sektoren voraus und erfordert eine frühzeitige Orientierung an den langfristigen Zielen. Insbesondere im Verkehrssektor stellt die notwendige Dekarbonisierung eine besondere Herausforderung dar, da einerseits weiterhin individuelle Mobilitätsbedürfnisse umfassend befriedigt und der notwendige Gütertransport sichergestellt werden sollen, gleichzeitig aber bislang eine sehr starke Bindung an fossile Energieträger beim Fahrzeugantrieb besteht.

Ein zentrales Element für die Minderung des Energieeinsatzes und der Treibhausgasemissionen des Verkehrs stellt die technische Effizienzsteigerung der Fahrzeuge dar. Diese umfasst sowohl die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs konventioneller verbrennungsmotorischer Fahrzeuge als auch den verstärkten Einsatz alternativer Antriebstechnologien. Um die zukünftigen Potenziale zur Minderung des Energieeinsatzes bei Fahrzeugen fundiert abbilden zu können, sind umfassende Informationen zu möglichen Effizienztechnologien, der Marktverfügbarkeit und der assoziierten Kosten erforderlich.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) geförderten Forschungsvorhaben *eMobil 2050* wurde eine umfassende Datenbank entwickelt, die es ermöglicht, Effizienzsteigerungspotenziale bei Personenkraftwagen (Pkw) und schweren Nutzfahrzeugen (SNF) für unterschiedliche Zeitpunkte und bis zum Jahr 2050 zu quantifizieren. Die hinterlegten Einzeltechnologien bilden die Grundlage, um für zuvor definierte Basisfahrzeuge mögliche Effizienzentwicklungen differenziert nach Fahrzeugkategorie und Antriebskonzept darzustellen und die zusätzlichen Investitionskosten zu quantifizieren. Die Technologiedatenbank ermöglicht es anhand von abgeleiteten Kostenkurven zu beurteilen, wie hoch die maximalen Energieeinsparpotenziale sind und wie sich die unterschiedlichen Effizienzniveaus auf die Rentabilität der Fahrzeuge auswirken.

Die Technologiedatenbank stellt im Kontext von Langfristszenarien für den Verkehr einen zentralen Bestandteil dar. So wird die Datenbank beispielsweise im Projekt *eMobil 2050* eingesetzt, um die Entwicklung von konventionellen und elektrischen Straßenfahrzeugen im Personen- und Güterverkehr bis zum Jahr 2050 abzubilden. Durch die Berücksichtigung der Zusatzkosten von Effizienztechnologien bildet die Datenbank ferner eine wichtige Grundlage für die Simulation der Fahrzeugneuzulassungen in den betrachteten Fahrzeugkategorien (Pkw / SNF).

Im Rahmen des Working Paper werden die wichtigsten Datenquellen, das gewählte methodische Vorgehen, die berücksichtigten Fahrzeugkonfigurationen und Effizienztechnologien sowie beispielhafte Anwendungen der Technologiedatenbank diskutiert. Kapitel 2 beschreibt zunächst die Datengrundlage für den Aufbau der Technologiedatenbank für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge. In Kapitel 3 wird auf die berücksichtigten Fahrzeugkategorien sowie die zugrundeliegenden Basisfahrzeuge eingegangen und das methodische Vorgehen näher beleuchtet. Daran anschließend folgt die konkrete Diskussion der jeweiligen Basisfahrzeuge sowie der möglichen Effizienztechnologien für die Fahrzeugplattform und der verschiedenen Antriebssysteme jeweils für Pkw (in Kapitel 4) und schwere Nutzfahrzeuge (in Kapitel 5). Abschließend werden im jeweiligen Kapitel sowohl für Pkw als auch für schwere Nutzfahrzeuge beispielhaft Anwendungen der Technologiedatenbank anhand möglicher Entwicklungen des Energieverbrauchs und der Kosten für unterschiedliche Fahrzeugkategorien und Antriebskonzepten bis 2050 dargestellt.

Das Fazit (Kapitel 6) fasst die wichtigsten Anwendungen der Technologiedatenbank sowie die Ergebnisse erster Analysen zusammen, diskutiert die Grenzen und Unsicherheiten der

vorliegenden Informationen und gibt einen Ausblick auf weitere Anwendungen und Anpassungsmöglichkeiten.

2. Datengrundlage

2.1. Einleitung

Der Kernbestandteil der Technologiedatenbank sind Informationen zu möglichen Effizienztechnologien am Fahrzeug. Für die nachgelagerten Analysen ist von besonderem Interesse, welcher Effizienzgewinn mit der jeweiligen Technologie und welche Zusatzkosten damit verbunden sind. Weiter ist von Bedeutung, zu welchem Zeitpunkt die Technologie voraussichtlich im Massenmarkt verfügbar ist und inwiefern sich Effizienztechnologien kombinieren lassen. Die Technologiedaten differenzieren nach konventionellen und alternativen Antriebsformen und unterscheiden zwischen Pkw und schweren Nutzfahrzeugen.

Die wichtigste Datengrundlage für den Aufbau der Technologiedatenbank stellt eine umfassende Literaturlauswertung dar. Insbesondere im Bereich der Pkw kann auf mehrere Studien zu den Potenzialen verbrennungsmotorischer und alternativ betriebener Fahrzeuge zurückgegriffen werden. Im Bereich der Nutzfahrzeuge wurden bisher deutlich weniger Studien veröffentlicht.

In Ergänzung zur Literaturlauswertung wurden zahlreiche Experteninterviews sowie zwei Fachworkshops zu den Bereichen Pkw und schwere Nutzfahrzeuge durchgeführt. Diese hatten zum Ziel, die Technologieannahmen der Datenbank zu validieren, das methodische Vorgehen zu diskutieren und insbesondere langfristige Entwicklungspotenziale, die in der Literatur wesentlich weniger stark thematisiert werden, sowie die Perspektiven alternativer Antriebe zu beleuchten.

2.2. Literatur

2.2.1. Hintergrund

Die Literatur, die als Grundlage für die Technologiedatenbank dient, setzt sich sowohl aus nationalen als auch internationalen Studien zusammen. Insbesondere im Bereich der Pkw sind mehrere Studien im Kontext der EU-Gesetzgebung zur Regulierung der CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen erschienen. Der Großteil der Studien fokussiert auf den Zeitraum bis 2030 und konzentriert sich auf die Optimierung konventionell betriebener Fahrzeuge, welche besonders detailreich diskutiert werden. Die Auswertung von Informationen zur Entwicklung alternativer Antriebstechnologien stellt jedoch einen weiteren Schwerpunkt der Technologiedatenbank dar, wofür ergänzende Studien herangezogen wurden.

Die Auswertungen im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge konzentrieren sich auf wenige Studien. Insbesondere bei alternativen Antriebstechnologien können jedoch Bezüge zu den Annahmen für Pkw hergestellt werden.

Einige Studien betrachten auch die Langfristperspektive bis 2050. Grundsätzlich nimmt der Detaillierungsgrad in den Studien jedoch mit der Erweiterung des Betrachtungshorizonts ab.

Im Folgenden werden die wichtigsten Studien zu Pkw und schwere Nutzfahrzeuge, die in die Technologiedatenbank eingegangen sind, vorgestellt und die jeweils berücksichtigten Informationen benannt.

2.2.2. Pkw

Folgende Studien bildeten die Grundlage für die Annahmen zu Fahrzeugkonfigurationen und Effizienztechnologien in der Technologiedatenbank für den Bereich Pkw.

Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars (2011)

Autoren: TNO, AEA, CE Delft et al.; Auftraggeber: DG Climate Action

Im Rahmen der bei Erstellung der Studie geplanten EU Regulierung zur Begrenzung von CO₂-Emissionen neuzugelassener Pkw werden in dieser Studie Pkw Technologieoptionen bis 2020 in Hinblick auf das CO₂ Minderungspotenzial und die Zusatzkosten evaluiert. Die Studie wurde im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet. Die ermittelten CO₂ Minderungspotenziale und Kosten der Effizienztechnologien basieren auf verschiedenen Quellen: Literaturrecherche, Fachwissen der einzelnen Projektpartner sowie die Beratung durch die Automobilindustrie, Zulieferer und weitere beteiligte Industrien. Die Methodik zur Entwicklung von Kostenkurven bezieht sich zum größten Teil auf die Studie TNO et al. (2006). Die Effizienztechnologien basieren auf Basisfahrzeugen des europäischen Marktes, an deren Kategorisierung nach Fahrzeuggrößenklassen sich auch das vorliegende Working Paper orientiert. Daher wird die Entwicklung der Effizienztechnologien und Kosten des Basisjahres 2002 der oben genannten TNO Studie an das Basisjahr 2010 für diese Studie angepasst werden.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Effizienztechnologien und Kosten bis 2020,
- Konzeptionelle Ansätze zur Entwicklung von Kostenkurven und Parametern.

An economic assessment of low carbon vehicles (2013)

Autoren: Ricardo-AEA, Cambridge Econometrics; Auftraggeber: European Climate Foundation

In dieser Studie werden zwei Szenarien für die Entwicklung von Pkw Technologien bis zum Jahr 2030 modelliert. Dafür wird das *Transport Policy Scoping Tool SULTAN* und das *Road Vehicle Cost and Efficiency Calculation Framework* von Ricardo-AEA angewandt. Die Technologiedatenbank, welche Energieeinsparpotenziale und Zusatzkosten für Pkw Technologien umfasst, basiert auf TNO (2011) und einer Einschätzung von zwei Arbeitsgruppen, bei denen Nissan, GE, die europäische Vereinigung von Automobilzulieferern (CLEPA) und der Verband der europäischen Hersteller für Akkumulatoren (Eurobat) beteiligt waren.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Effizienztechnologien und Kosten bis 2050,
- Alternative Antriebssysteme, Konfigurationen und Kosten bis 2030.

Transition to alternative vehicles and fuels (2013)

Autoren: National Research Council of the National Academies (NAS)

In diesem Bericht werden alternative Fahrzeug- und Kraftstofftechnologien vor dem Hintergrund untersucht die Nachfrage nach Mineralöl und die Treibhausgasemissionen um 80 % bis 2050 im Vergleich zum Jahr 2005 zu reduzieren. Dabei werden sowohl konventionelle als auch alternative Fahrzeugtechnologien betrachtet. Bei der Erarbeitung der Studie wurden Informationen von zahlreichen Experten aus Wissenschaft und Industrie einbezogen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Energieeinsparpotenziale und Kosten auf ein typisches mittelgroßes Fahrzeug der US Fahrzeugflotte beziehen.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie unter den genannten Einschränkungen berücksichtigt:

- Effizienztechnologien und Kosten bis 2050,
- Alternative Antriebssysteme, Konfigurationen und Kosten bis 2050.

Zur Einordnung der Komponenten der konventionellen und alternativen Basisfahrzeuge sowie für die Bestimmung der technologischen Perspektiven von Batterie- und Brennstoffzellensystemen sowie deren Kosten wurden als zentrale Referenzen die folgenden Studien hinzugezogen.

Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21) / (2011)

Autor: Peter Mock, DLR

In diesem Bericht werden Szenarien zur Marktdurchdringung von konventionellen und alternativen Fahrzeugtechnologien dargestellt, die mit dem Computermodell VECTOR 21 modelliert wurden. Dabei werden u. a. verschiedene Pkw Technologien und deren Komponenten diskutiert. Die gewählten Methoden zur Technikbewertung basieren dabei auf Analysen von Patenten, Publikationen, Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen, dem Konzept des Technologielebenszyklus und der S-Kurve sowie Abschätzungen von Technologiekosten anhand von Lernkurven, Top-down und Bottom-up Kostenmodellen und der Anwendung von Simulationsmodellen.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Konfiguration der Basisfahrzeuge und Kosten der Fahrzeugtechnologien,
- Aktuelle und zukünftige Entwicklung der Batterie- und Brennstoffzellensysteme.

Impacts of Electric Vehicles – Deliverable 2. Assessment of electric vehicles and battery technology (2011)

Autoren: ICF, Ecologic, CE Delft

Diese Studie, die von der Europäischen Kommission beauftragt wurde, untersucht die potenziellen Auswirkungen einer großräumigen Marktdurchdringung batterieelektrischer Pkw und leichter Nutzfahrzeuge in der EU. Die potenzielle Entwicklung der batterieelektrischen Fahrzeuge sowie der Batterietechnologie und -kosten wird dabei bis zum Jahr 2030 betrachtet und basiert auf Einschätzungen von Experten aus der Batterieindustrie, der Automobilindustrie und aus Forschungsinstituten.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Batterietechnologien und -kosten bis zum Jahr 2030,
- Entwicklung und Kosten anderer Komponenten des batterieelektrischen Fahrzeugs.

Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität (2012)

Autoren: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung

Die Technologie-Roadmap präsentiert einen Überblick über die zentralen Energiespeichertechnologien für batterieelektrische Fahrzeuge von 2011/12 bis 2030. Die in

diesem Zusammenhang identifizierten technologischen Entwicklungen und Herausforderungen der Energiespeichertechnologien basieren auf Marktstudien, Experteninterviews und Workshops.

Die vorliegende Studie bezieht sich auf die technologischen Entwicklungen und die Herausforderungen sowie auf die Kosten verschiedener Batterietechnologien.

2.2.3. Schwere Nutzfahrzeuge

Folgende Studien bildeten die Grundlage für die Annahmen zu Fahrzeugkonfigurationen und Effizienztechnologien in der Technologiedatenbank für den Bereich der schweren Nutzfahrzeuge.

Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy (2011)

Autoren: AEA, Ricardo; Auftraggeber: DG Climate Action

Im Rahmen einer Entwicklung möglicher Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen der schweren Nutzfahrzeuge, für die heute im Gegensatz zu den Pkw keine CO₂-Regulierung implementiert ist, gibt diese Studie einen umfassenden Überblick über den Markt für schwere Nutzfahrzeuge und deren Flotten in Europa, technische Optionen zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen sowie politische Maßnahmen zur Begrenzung der Emissionen.

Darüber hinaus wird in der Studie eine Szenarioanalyse bezüglich der CO₂-Emissionen durchgeführt, in der neben einem *Business-as-Usual Szenario* (BAU) ein *kosteneffizientes* und ein *ambitioniertes Szenario* erstellt wurden. Die Annahmen bezüglich des Effizienzpotenzials einzelner Maßnahmen für verschiedene Fahrzeugkategorien bzw. Nutzungsprofile und die damit verbundenen Kosten wurden vom Beratungsunternehmen Ricardo getroffen und basieren auf einer Recherche frei zugänglicher Informationen.

Die Studie wurde im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Effizienztechnologien und Kosten,
- Abschätzung zur zukünftigen Marktdurchdringung einzelne Technologien.

European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles (2011);

Autoren: TIAX LLC; Auftraggeber: ICCT

Ziel dieser vom International Council on Clean Transportation (ICCT) beauftragten Studie ist die Prüfung der Daten und Annahmen der oben genannten Studie von AEA und Ricardo AEA/ Ricardo (2011). Dafür wird ein Vergleich von Technologien für den Nutzfahrzeugmarkt in den USA und in der EU durchgeführt und maximale Minderungspotenziale für Neufahrzeuge für das Jahr 2020 quantifiziert. Die Grundlage bilden dabei Daten und Interviews mit Vertretern von US-amerikanischen Fahrzeug- und Motorenherstellern. Zur Bestimmung der gesamten Verbrauchsminderung werden die einzelnen Minderungspotenziale von TIAX multiplikativ verknüpft.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Effizienztechnologien und Kosten,
- Konfigurationen.

Zero emissions trucks – An overview of state-of-the-art technologies and their potential (2013);

Autoren: CE Delft, DLR; Auftraggeber: ICCT;

Diese Studie betrachtet den Einsatz von alternativen Antriebskonzepten wie elektrische Konfigurationen (batterieelektrisch, induktiv, induktiv) und Brennstoffzellenfahrzeuge für den Güterverkehr. Diese Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten werden als vielversprechende Lösung in den nächsten Dekaden bezeichnet. Neben einer State-of the-Art Analyse wird eine Kostenbetrachtung durchgeführt, Politikmaßnahmen betrachtet und eine Szenarioanalyse zur CO₂-Minderung durchgeführt. Als Datengrundlage dienen neben einer umfangreichen Literaturrecherche auch durchgeführte Expertengespräche.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- alternative Antriebskonzepte,
- spezifische Kosten für Fahrzeugkomponenten,
- Fahrzeugausgestaltung.

The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector (2011);

Autor: Enver Doruk Özdemir;

In dieser Dissertation wurde die zukünftige Rolle alternativer Kraftstoffe und Antriebskonzepte in Deutschland untersucht und dabei unter anderem die Kosten, der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen betrachtet. Dafür wurde anhand eines bottom-up Modells eine Szenarioanalyse durchgeführt. Als Datengrundlage für die Kostenberechnung wird in der Dissertation auf veröffentlichte Studien zurückgegriffen.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- spezifische Kosten von Fahrzeugkomponenten.

Factors and Considerations for Establishing a Fuel Efficiency Regulatory Program for Commercial Medium- and Heavy-Duty Vehicles (2010)

Auftraggeber: U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA);

Diese Studie unterstützte die Entwicklung eines Regulierungssystems zur Erhöhung der Energieeffizienz von Nutzfahrzeugen in den USA. Die in der Studie aufgeführten Daten zu Effizienzpotentialen und Kosten innermotorischer Maßnahme basieren auf einem Bericht von TIAX LCC.

Folgende Informationen werden in der vorliegenden Studie berücksichtigt:

- Effizienztechnologien und Kosten.

2.3. Fachworkshops & Experteninterviews

2.3.1. Hintergrund

Neben der Literaturlauswertung stellt die Beteiligung von Fachexperten aus dem Bereich der Fahrzeugeffizienztechnologien und der alternativen Antriebstechnologien die zweite zentrale

Informationsquelle im Rahmen der Entwicklung der Technologiedatenbank und des methodischen Vorgehens dar. Die Einbindung von Experten aus den Bereichen Pkw und schweren Nutzfahrzeugen hatte zum Ziel, die abgeleiteten Annahmen zu möglichen Technologieentwicklungen zu validieren und Erfahrungen aus der Praxis in die theoretischen Überlegungen mit einfließen zu lassen.

Neben Experteninterviews im Rahmen der Datensichtung und -aufbereitung sowie Methodenentwicklung stellte die Durchführung von zwei eintägigen Fachworkshops zu den Bereichen Pkw und schwere Nutzfahrzeuge ein zentrales Element bei der Entwicklung der Technologiedatenbank dar.

Ziel der beiden Fachworkshops war es, die weiteren Effizienzpotenziale von konventionellen Pkw, wie auch die Entwicklungspotenziale von alternativen Antriebsoptionen sowie die damit verbundenen Zusatzkosten für den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 vor dem Hintergrund plausibler Fahrzeugkonfigurationen zu diskutieren.

Die Anmerkungen der Experten zu den Technologieannahmen fanden Eingang in eine überarbeitete Fassung der Technologiedatenbank, die in den folgenden Kapiteln näher erläutert wird. Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass die in diesem Working Paper angenommenen Entwicklungen die Einschätzung der Autoren dieser Studie widerspiegeln und sich nicht zwangsläufig mit der Einschätzung aller beteiligten Fachexperten deckt. Unter Berücksichtigung des langfristigen Betrachtungszeitraums und den damit verbundenen Unsicherheiten stellen die Annahmen jedoch mögliche Entwicklungspfade dar, die von den Autoren als plausibel und konsistent eingeschätzt werden.

2.3.2. Pkw

Für den Workshop zu Pkw stellte ein im Vorfeld erarbeitetes Arbeitspapier die Diskussionsgrundlage dar, welches das methodische Vorgehen erläutert, Basisfahrzeuge für unterschiedliche Antriebsoptionen definiert und die Entwicklungsperspektiven unterschiedlicher Effizienz- und Antriebstechnologien diskutiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Effizienzpotenziale, die Wechselwirkung von Technologien, den Zeitpunkt der voraussichtlichen Marktverfügbarkeit und die mögliche Kostenentwicklung gerichtet. Die diskutierten Fahrzeugkonzepte umfassen konventionelle Otto-, Diesel- und Erdgas-Pkw sowie alternativ rein batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-In-Hybridfahrzeuge, Range-Extender- und Brennstoffzellenfahrzeuge.

Am Fachworkshop zu Pkw-Technologien waren Experten von Robert Bosch GmbH, TNO, FEV GmbH, Volkswagen AG, BMW Group, The International Council on Clean Transportation – ICCT und Daimler AG beteiligt.

2.3.3. Schwere Nutzfahrzeuge

Im Vergleich zu Pkw stellen sich die Voraussetzungen für die Diskussion der technologischen Entwicklungsmöglichkeiten bei schweren Nutzfahrzeugen deutlich schwieriger dar. Zum einen liegen wesentlich weniger Studien zur technischen Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen vor. Zum anderen ist das Spektrum an denkbaren alternativen Antriebsoptionen angesichts der Nutzungsanforderungen (u. a. Leistung und Reichweite der Fahrzeuge) deutlich eingeschränkt und befindet sich in einem teilweise noch sehr frühen Entwicklungsstadium. Ziel des Workshops war es daher unter anderem, die besonderen Anforderungen im Nutzfahrzeugbereich, wie auch die spezifischen Rahmenbedingungen der Fahrzeugentwicklung und -produktion in die Überlegungen zu denkbaren Fahrzeugkonfigurationen und möglichen langfristigen Entwicklungspfaden einfließen zu lassen. Hierzu konnten die beteiligten Experten wichtige Beiträge liefern, so dass ein im Vorfeld erstellter Vorschlag zur technologischen Entwicklung auf Grundlage der Anregungen im Nachgang

des Workshops angepasst wurde. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge wurden konventionelle Antriebsoptionen (Diesel, CNG/LNG, Dual Fuel) sowie als alternative Antriebsoptionen batterieelektrische (BEV, PHEV), Brennstoffzellenfahrzeuge und oberleitungsgebundene Fahrzeugvarianten betrachtet.

Am Fachworkshop zu Technologien im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge waren Experten von CE Delft, Ricardo, MAN AG, DLR – Institut für Fahrzeugkonzepte, Siemens AG, Daimler AG, Schmitz Cargobull AG, FEV Motorentchnik GmbH beteiligt.

3. Methodisches Vorgehen

3.1. Übersicht

In diesem Kapitel wird für die Kategorien Pkw und schwere Nutzfahrzeuge das methodische Vorgehen zur Ableitung von Kostenkurven erläutert, die es anschließend ermöglichen, das Minderungspotenziale im Energieverbrauch und die damit verbundenen Zusatzkosten für unterschiedliche Zeithorizonte darzustellen.

In diesem Kontext werden zunächst die betrachteten Fahrzeugkategorien sowie die Definition der Basisfahrzeuge erläutert. Anschließend werden die notwendigen Analyseschritte zur Ableitung von fahrzeugspezifischen Kostenkurven im Detail diskutiert. Die konkreten Technologie- und Kostenannahmen für die Bereiche Pkw und schwere Nutzfahrzeuge werden in den beiden darauf folgenden Kapiteln dargestellt.

3.2. Betrachtete Fahrzeugkategorien

Bei den betrachteten Fahrzeugkategorien werden zwischen unterschiedlichen Fahrzeuggrößen und Antriebskonzepten unterschieden und diese in 10-Jahresschritten bis 2050 dargestellt. Bei schweren Nutzfahrzeugen ist die Fahrzeugkonfiguration besonders stark an das jeweilige Einsatzprofil gekoppelt. Daher wird bei der Darstellung der schweren Nutzfahrzeuge in der Technologiedatenbank ein enger Bezug zwischen der Fahrzeuggröße, dem Einsatzprofil und den möglichen Antriebskonzepten hergestellt. So ist beispielsweise bei Lkw mit hoher Nutzlast, die im Fernverkehr eingesetzt werden, eine batterieelektrische Antriebsvariante angesichts der erforderlichen Reichweite eher unwahrscheinlich.

Im Bereich der Nutzfahrzeuge werden unterschiedliche Lkw-Größenklassen im Bereich eines zulässigen Gesamtgewichts von 3,5 bis 40 t sowie Linien- und Reisebusse berücksichtigt. Dabei werden sowohl konventionelle als auch unterschiedliche elektrische Antriebsvarianten betrachtet.

Im Bereich der Pkw werden vier Segmente von micro bis groß berücksichtigt und ebenfalls das gesamte Spektrum konventioneller und elektrischer Antriebsoptionen dargestellt.

3.3. Definition Basisfahrzeuge

Die definierten Basisfahrzeuge stellen in der Technologiedatenbank Ausgangsfahrzeuge dar, die den Stand der Technik für das Jahr 2010 beschreiben. Im Bereich der Pkw repräsentieren diese typische Neufahrzeuge der jeweiligen Größenklasse in Deutschland für die drei Kraftstoffarten Benzin, Diesel und Erdgas. Die Basisfahrzeuge bei den schweren Nutzfahrzeugen sind in den verschiedenen Größenklassen jeweils für ein spezifisches Einsatzprofil konfiguriert. Sie stellen die

Neuzulassungen im Jahr 2010 in Deutschland für die Kraftstoffarten Diesel und Erdgas dar. Bei Bussen wird zwischen dieselbetriebenen Linien- und Reisebussen unterschieden.

Weitere Details zu den einzelnen Fahrzeugkonfigurationen werden in Kapitel 4.3 für Pkw und in Kapitel 5.3 für Lkw beschrieben.

3.4. Ableitung von Kostenkurven

Für die Abschätzung des Energieverbrauchs und der Investitionskosten der verschiedenen Antriebskonzepte für die Jahre 2010 bis 2050 wurden Einzeltechnologien bezüglich ihrer Energieeffizienz und Zusatzkosten differenziert nach Fahrzeugkategorie analysiert. Diese Technologien sind in zwei Gruppen eingeteilt. Effizienztechnologien zur Minderung des Fahrwiderstands (Veränderungen an der Fahrzeugplattform) und Antriebstechnologien, die zum einen zur Effizienzsteigerung des konventionellen verbrennungsmotorischen Antriebs beitragen und zum anderen alternative Antriebskonzepte umfassen. Anhand eines modularen Ansatzes zur Ermittlung von Kostenkurven (ein funktionaler Zusammenhang zwischen Effizienzsteigerung und Zusatzkosten) wurden im Folgenden Technologien, die den Fahrwiderstand mindern, mit neuen konventionellen oder alternativen Antriebstechnologien kombiniert.

Zu jeder Einzeltechnologie liegen in der Technologiedatenbank folgende Informationen vor:

- Effizienzsteigerung des Energieverbrauch im Vergleich zum Basisfahrzeug [%]
- Zusatzkosten im Vergleich zum Basisfahrzeug [€, in 2010 Preisen]
- Beginn der Serienproduktion der Technologie [Jahr]

Die folgende Methodik wurde zur Ermittlung der Kostenkurven angewandt:

1. Die Effizienztechnologien wurden zunächst gemäß ihrer Kosteneffizienz sortiert. Dabei werden auch die Lernprozesse ab Beginn der Serienproduktion, die unter anderem sich in der höheren Effizienz im Produktionsprozess und geringeren Beschaffungskosten niederschlagen, in der Kostenentwicklung berücksichtigt. Es wird dabei in Anlehnung an die amerikanische Studie „Transition to alternative vehicles and fuels“ zwischen einer Kostendegression für die ersten 15 Jahre nach Beginn der Serienproduktion und einer geringeren Kostendegression für die kommenden Jahre unterschieden (NAS 2013).
2. Schließlich wird eine kumulierte Kostenkurve gebildet, indem die Effizienztechnologien, angefangen mit der kosteneffizientesten Technologie, sukzessive zum jeweiligen Basisfahrzeug hinzugefügt werden.
3. Das resultierende Energieeinsparpotenzial der kombinierten Effizienztechnologien wird in zwei Schritten berechnet:
 - a) Die Minderungspotenziale werden zunächst miteinander multipliziert.
 - b) Anschließend werden Korrekturfaktoren in der Berechnung der Minderungspotenziale angewendet, um Überschneidungen in der Wirksamkeit der Einzeltechnologien zu berücksichtigen. Die Anpassungen basieren auf den Korrekturfaktoren der TNO Studie (2011), welche linear mit dem Minderungspotenzial ansteigen.¹ Die Höhe der

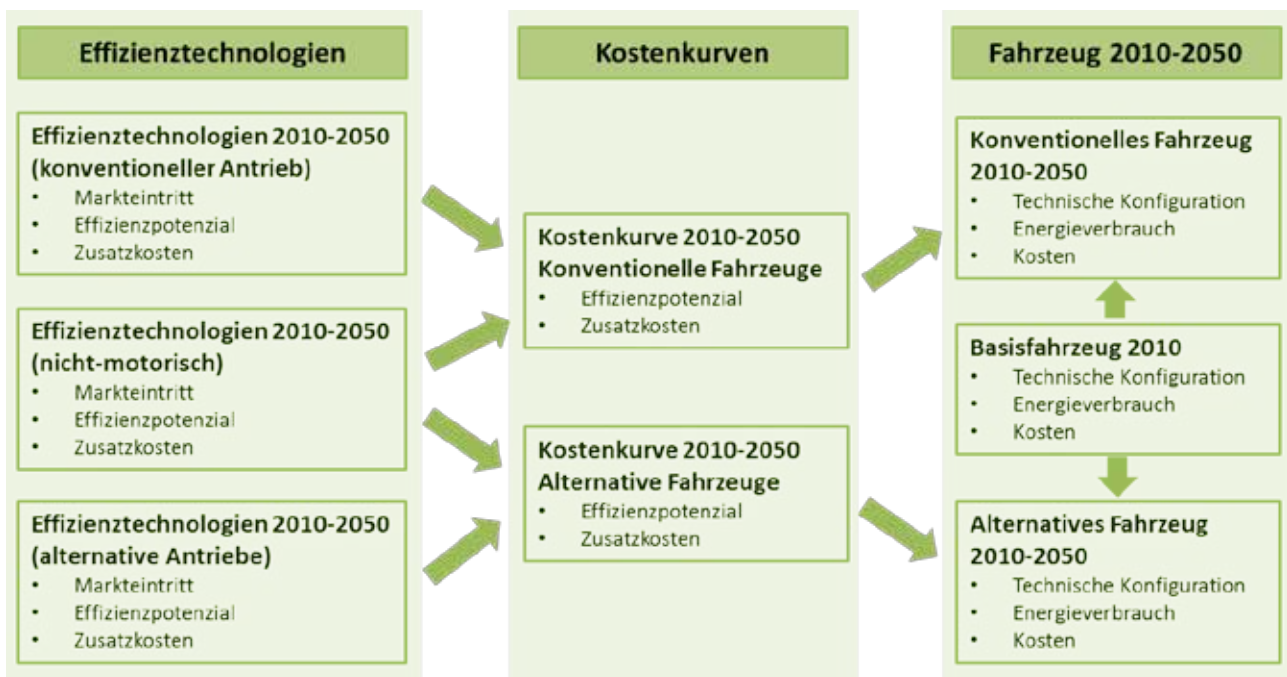
¹ Für Benzinfahrzeuge beträgt der Faktor 0,85 und für Diesel-Fahrzeugen 0,95.

Korrekturfaktoren hängt von der Anzahl der Einzeltechnologien ab und ist daher für Benzinfahrzeuge höher als für Dieselfahrzeuge (ika 2012). Die Faktoren in TNO (2011) wurden daher zusätzlich in Abhängigkeit von der Anzahl der Einzeltechnologien und für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte entsprechend angepasst.

4. Darüber hinaus lassen sich einige Technologien technisch nicht miteinander kombinieren, wie z. B. ein Doppelkupplungsgetriebe und ein automatisiertes Schaltgetriebe und sind daher in der Datenbank hinsichtlich einer Verknüpfung ausgeschlossen. Die Informationen über die Ausschließbarkeit der Pkw Technologien basieren auf Expertengesprächen und auf der TNO Studie (2012) über leichte Nutzfahrzeuge, die sich weitestgehend auf die Pkw Technologien übertragen lassen.

Einen Überblick über das methodische Vorgehen zur Ableitung kumulierter Kostenkurven gibt Abbildung 3-1. Motorische (konventionelle und alternative) sowie nicht-motorische Effizienztechnologien bilden unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen (z. B. Batteriepreisentwicklung, Verfügbarkeit einer bestimmten Effizienztechnologie in der Serienproduktion für das jeweilige Betrachtungsjahr) die Grundlage zur Entwicklung der Kostenkurven, anhand derer die mögliche Minderung des Energieverbrauchs und die assoziierten Kosten bestimmt werden können. Ausgehend von dem jeweiligen Basisfahrzeug des Jahres 2010 werden daraufhin die zusätzlichen Effizienztechnologien für konventionelle und alternative Fahrzeuge dem jeweiligen Antriebskonzept hinzugefügt und somit neue Fahrzeugkonfigurationen für die Jahre 2010 - 2050 gebildet.

Abbildung 3-1: Methodisches Vorgehen

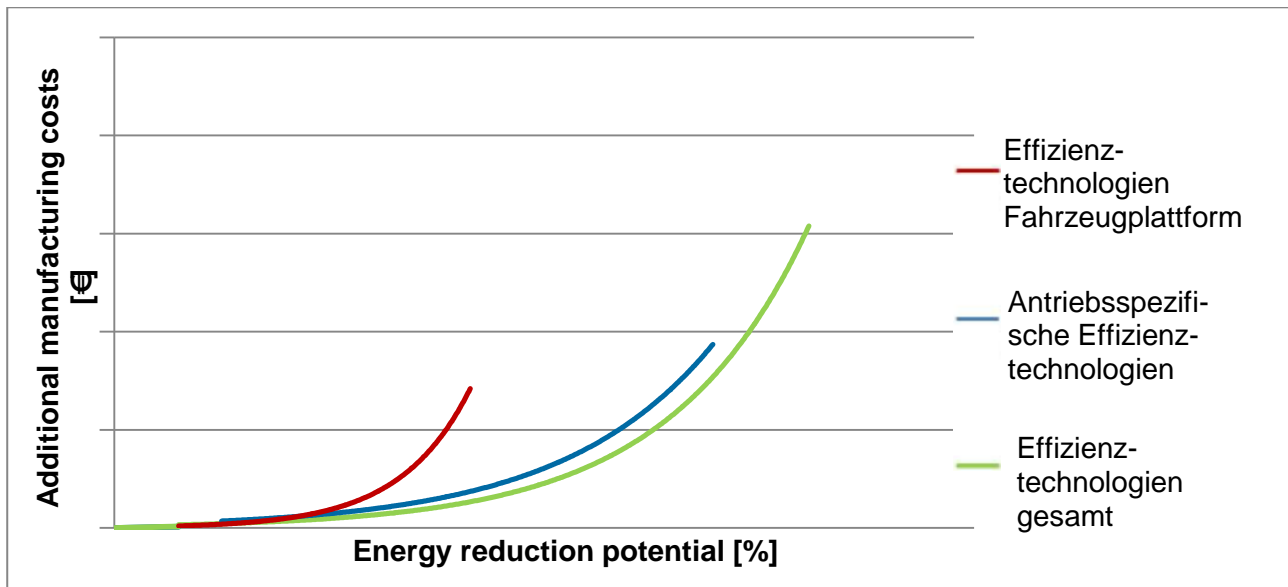


Quelle: eigene Darstellung

Die jeweils resultierenden Kostenkurven sind in Abbildung 3-2 schematisch dargestellt. Die Gesamtkostenkurve stellt die mögliche Minderung des Energieverbrauchs sowie die damit verbundenen zusätzlichen Herstellkosten für eine bestimmte Fahrzeugkategorie in einem

bestimmten Jahr dar. Die Gesamtkostenkurve ergibt sich aus der Kombination der kumulierten Effizienztechnologien – und damit Kostenkurven – für die Fahrzeugplattform und das Antriebssystem. Auf Basis der Gesamtkostenkurve kann der Einsatz an möglichen Technologien bis zum Jahr 2050 bestimmt werden. Jedes Antriebskonzept wird dabei grundsätzlich mit den gleichen oder ähnlichen Effizienztechnologien zur Minderung des Fahrwiderstandes verknüpft, so dass sich die unterschiedlichen Antriebskonzepte im Wesentlichen hinsichtlich der antriebsspezifischen Effizienztechnologien unterscheiden.

Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Kostenkurven



Quelle: eigene Darstellung

4. Technologiedatenbank Pkw

4.1. Übersicht

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die in der Technologiedatenbank berücksichtigten konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Bereich der Pkw gegeben und die zugrundeliegenden Basisfahrzeuge näher definiert. Anschließend werden konkrete Technologien zur Minderung des Energieverbrauchs bei Pkw für den Zeitraum bis 2050 diskutiert. Dabei werden sowohl Effizienztechnologien zur Minderung der Fahrwiderstände als auch antriebsspezifische Technologien beleuchtet. Ein besonderer Fokus wird dabei in einem separaten Abschnitt auf alternative Antriebssysteme gerichtet und die Einzelkomponenten sowie deren mögliche zukünftige Entwicklung beschrieben. Das Kapitel endet mit der Darstellung von zwei beispielhaften Anwendungen der Technologiedatenbank, die den Energieverbrauch und die Investitionskosten der verschiedenen Antriebskonzepte bis zum Jahr 2050 anhand von konkreten Kostenkurven für zwei Szenarien veranschaulichen.

4.2. Antriebskonzepte

In der Pkw-Technologiedatenbank werden insgesamt fünf Antriebskonzepte unterschieden.

- **Verbrennungsmotorische Fahrzeuge:** In der Technologiedatenbank werden konventionelle verbrennungsmotorische Fahrzeuge (ICEV) mit Diesel- und Otto-Motorisierung und differenziert

nach den Kraftstoffarten Diesel, Benzin und CNG² berücksichtigt. Zur Kategorie der verbrennungsmotorischen Pkw werden im Rahmen der hier angestellten Betrachtungen auch Hybridfahrzeuge (HEV) gerechnet, deren Batterien lediglich über regeneratives Bremsen oder den Verbrennungsmotor und nicht über eine externe Stromversorgung geladen werden. Die Hybridisierung des Antriebs wird in diesem Rahmen als Effizienztechnologie des verbrennungsmotorischen Pkw angesehen und daher nicht als zusätzliches Antriebskonzept konfiguriert, da Hybridfahrzeuge ausschließlich auf konventionellen Kraftstoffen basieren.

- **Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV):** Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb.
- **Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (PHEV):** Fahrzeuge mit Hybridantrieb, der über eine Möglichkeit der Batterieladung über das Stromnetz verfügt.
- **Elektrofahrzeuge mit Range Extender (REEV):** Fahrzeuge, die vorwiegend über eine Batterie, die über das Stromnetz geladen werden kann, mit Antriebsenergie versorgt werden, die aber auch eine Ladung der Batterie im Betrieb über einen Generator (Range Extender) ermöglichen.
- **Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV):** Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb, die die elektrische Antriebsenergie aus einer mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle im Fahrzeug beziehen.

4.3. Basisfahrzeuge

Die Basisfahrzeuge entsprechen den durchschnittlichen Eigenschaften von Neufahrzeugen in Deutschland im Jahr 2010. In Zusammenhang mit der Diskussion um zukünftigen Technologien oder alternative Antriebskonzepte dienen diese Fahrzeuge als Referenz. Die Konfiguration der Basisfahrzeuge basiert auf den Daten des KBA (Kraftfahrt-Bundesamt). Jedes KBA Fahrzeugsegment wird für die weiteren Berechnungen in der Datenbank den vier Fahrzeuggrößenklassen microcar, klein, mittel, groß zugeordnet (siehe Tabelle 4-1).

² Compressed natural gas.

Tabelle 4-1: Zuordnung der KBA Fahrzeugsegmente

KBA Fahrzeugsegmente	Technologiedatenbank
Microcar	microcar
Mini	klein
Kleinwagen	klein
Kompaktklasse	mittel
Mittelklasse	groß
Obere Mittelklasse	groß
Oberklasse	groß
Geländewagen	groß
Sportwagen	groß
Mini-Van	mittel
Großraum-Van	mittel
Utilities	mittel
Wohnmobile	andere
Sonstige	andere

Quelle: KBA (2010), eigene Zuordnung

Die gängigen KBA-Segmente wurden in der Datenbank in die Größenklassen klein, mittel und groß eingeteilt. Kleine Pkw entsprechen den KBA-Segmenten Mini und Kleinwagen, mittelgroße Pkw der Kompaktklasse und Vans sowie große Pkw der Mittelklasse, oberen Mittelklasse und Oberklasse. Zusätzlich zu den gängigen Fahrzeugklassen wurde die Kategorie Microcar eingefügt. Im Rahmen des Fachworkshops zu den Pkw-Technologien wurde von Seiten der Industrie angeregt, die zusätzliche Kategorie der Microcars zu berücksichtigen, da diesem Fahrzeugsegment, welches sowohl in Form eines konventionellen Benzinfahrzeugs als auch als BEV zukünftig denkbar ist, ein großes Potenzial in Städten zugerechnet wird. Microcars werden in der Datenbank daher als zusätzliche Pkw Kategorie konfiguriert, die leichter und effizienter als Minis ist, aber nicht nur für spezifische Anwendungen, sondern im Straßenverkehr ähnlich wie Minis eingesetzt werden können.

Die jeweiligen Energieverbräuche der Basisfahrzeuge beruhen auf dem Testzyklus NEFZ (Neuer Europäischen Fahrzyklus), welcher den Normverbrauch abbildet. Der reale Energieverbrauch kann sowohl für verbrennungsmotorische als auch alternative Antriebskonzepte davon abweichen. Dieser lag laut Analysen für konventionelle Fahrzeuge bei bis zu 23 % über dem Normverbrauch (ICCT 2012).

Die Basisfahrzeuge, die der Technologiedatenbank zugrunde liegen, sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Der Energieverbrauch nach NEFZ und die Fahrzeugmasse der ICEV im Jahr 2010 basieren auf den KBA Neuzulassungsdaten von 2010, während die Motorleistung auf Basis von NPE (2011) abgeleitet wurde.

Tabelle 4-2: Fahrzeugspezifikationen, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen der verbrennungsmotorischen Basisfahrzeuge (ICEV) im Jahr 2010

Fahrzeugklasse	Micro-car	Klein			Mittel			Groß		
		Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG
Kraftstoff	Benzin	Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG
Motorleistung [kW]	25	50	50	50	80	80	80	120	120	120
Fahrzeugmasse [kg]	800	1.089	1.114	1.089	1.407	1.507	1.407	1.677	1.705	1.677
Energieverbrauch (NEFZ) [l/100 km] / [kg/100km]	3,5	5,6	4,2	4,0	6,7	5,5	4,9	8,2	6,2	5,9
CO₂-Emissionen (NEFZ) [g/100km]	81	135	113	104	161	148	123	198	168	152

Quelle: u.a. KBA (2010), NPE (2011)

Die Herstellerkosten für den Antrieb mit Verbrennungsmotor (ICE) und die Fahrzeugplattform wurden auf Basis von NPE (2011) und Mock (2011) abgeleitet (siehe Tabelle 4-3). Die Kosten der Fahrzeugplattform – also die Kosten des Fahrzeugs ohne das Antriebssystem – werden auch für die alternativen Antriebskonzepte als Basis verwendet. Die Basisfahrzeuge entsprechen der Euro 5 Norm einschließlich der für entsprechende Abgasnachbehandlungstechnologien anfallenden Zusatzkosten.

Tabelle 4-3: Herstellerkosten der verbrennungsmotorischen Basisfahrzeuge (ICEV) im Jahr 2010

Fahrzeugklasse	Micro-car	Klein			Mittel			Groß		
		Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG
Kraftstoff	Benzin	Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG	Benzin	Diesel	CNG
Kosten – Tank [€]	110	125	125	2.000	150	150	2.500	175	175	3.100
Kosten – ICE [€]	1.800	2.500	2.900	2.500	4.700	5.400	4.700	5.500	6.500	5.500
Kosten – Fahrzeugplattform [€]	4.100	5.500	5.700	5.500	9.100	9.700	9.100	17.400	17.700	17.400
Gesamte Herstellerkosten [€]	6.010	8.125	8.725	10.000	13.950	15.250	16.300	23.075	24.375	26.000

Quelle: u.a. NPE (2011), Mock (2011)

4.4. Langfristige Entwicklung der Fahrzeugtechnologien

Im Folgenden werden die konventionellen und alternativen Effizienztechnologien sowie die Komponenten alternativer Antriebskonzepte und deren unterstellte langfristige Entwicklung hinsichtlich technologischem Potenzial und Kosten diskutiert. Die resultierenden Kostenkurven werden exemplarisch in Abschnitt 4.4.2 für die Kategorie der konventionellen verbrennungsmotorischen Pkw dargestellt.

Die Entwicklung von Pkw Fahrzeugtechnologien zur Minderung des Energieverbrauchs und die Entwicklung der Investitionskosten bis 2050 basiert zum einen auf einer Literaturrecherche (Abschnitt 2.2.2). Die getroffenen Annahmen und Ergebnisse der Technologiedatenbank wurden zudem in einem Fachworkshop und in mehreren Experteninterviews (Abschnitt 2.3.2) diskutiert und unter Berücksichtigung der Anregungen der beteiligten Experten überarbeitet. Dabei konnten auch zentrale Fragestellungen und Unsicherheiten über zukünftige technologische Entwicklungen ermittelt werden. Um diesen Unsicherheiten gerecht zu werden, ermöglicht der entwickelte Ansatz beispielsweise, elektrische Reichweiten oder den Einsatz von bestimmten Batterietechnologien zu variieren. Die Effizienzentwicklung der Antriebskonzepte basiert auf typischen Fahrzeugen mit - für das jeweilige Antriebskonzept - durchschnittlichen Konfigurationen.

4.4.1. Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstands

Die deutlichste Minderung des Energieverbrauchs kann durch die Reduktion der Fahrzeugmasse erreicht werden. Mit neuen Materialien wie z. B. Karbonfasern lässt sich bis 2050 das Fahrzeuggewicht um bis zu 40 % reduzieren und damit ein Minderungspotenzial des Energieverbrauchs von 27 % erzielen. Weitere Technologien, die den Fahrzeuwiderstand reduzieren, sind aerodynamische Verbesserungen und ein geringerer Rollwiderstand. Maßnahmen an der Fahrzeugplattform führen auch bei batterieelektrischen Pkw und Brennstoffzellenfahrzeugen zu geringeren Energieverbräuchen. Batterieelektrische Pkw mit großen Batterien profitieren überproportional von diesen Technologien, da aufgrund des geringeren Energieverbrauchs die Batteriekapazität und damit das Batteriegewicht reduziert werden kann (TNO 2011; ECF 2013; NAS 2013).

4.4.2. Konventionelle Antriebstechnologien

Technologien, die über ein großes Minderungspotenzial verfügen und bereits kurz- bis mittelfristig als marktfähig angesehen werden, sind beim Ottomotor motorische Verbesserungen, zum Beispiel durch Benzin-Direkteinspritzung nach dem Schichtbrennverfahren, Motor-Downsizing³ und die variable Nockenwellensteuerung. Für den Dieselantrieb lassen sich weniger Effizienztechnologien identifizieren. Dennoch gibt es auch mittelfristig noch Energieeinsparpotenziale durch einen effizienteren Verbrennungsprozess und durch Motor-Downsizing. Vollhybridisierung reduziert den Energieverbrauch bei beiden Antriebssystemen erheblich, ist aber kurz- und mittelfristig noch nicht kosteneffizient. Längerfristig kann durch verbessertes Thermomanagement, Abgasrückführung⁴, effizientere Nebenaggregate und durch die Vollhybridisierung der Energieverbrauch beim Benzinfahrzeug wesentlich reduziert werden. Die letzteren beiden Maßnahmen sind auch für Dieselfahrzeuge relevant (TNO 2011; ECF 2013; NAS 2013).

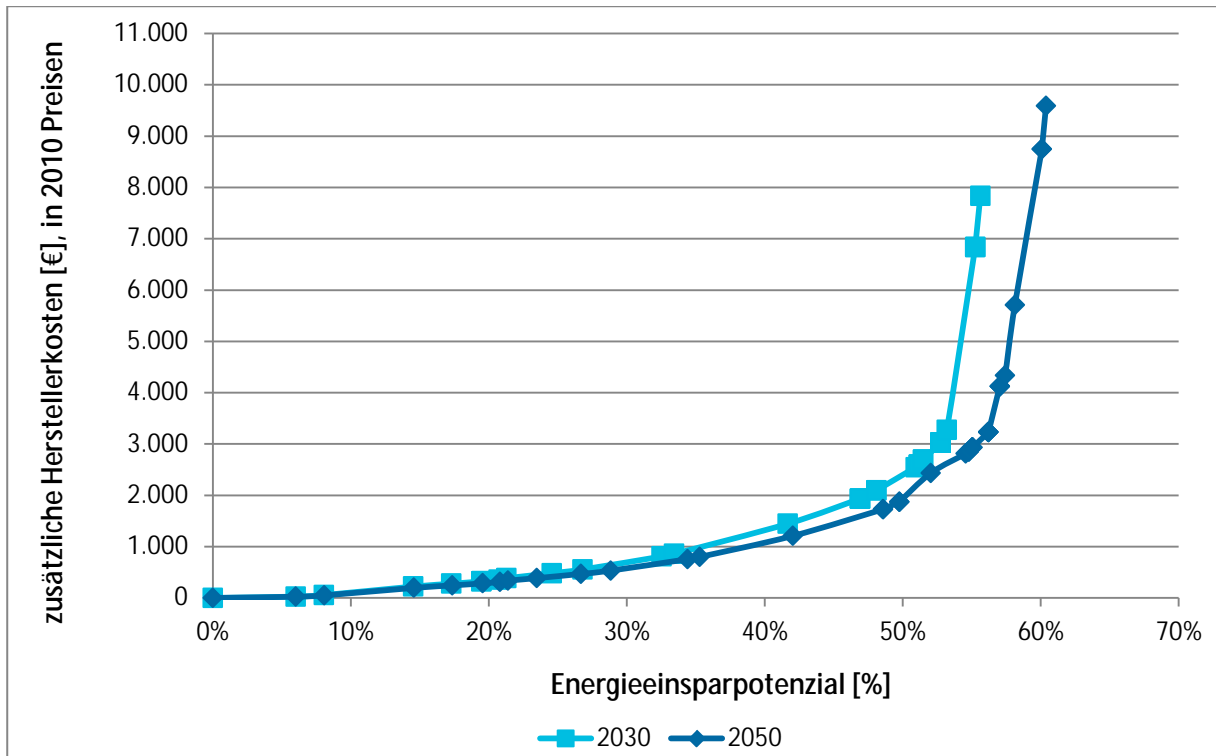
Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 zeigen beispielhaft die Kostenkurven für Benzin- und Dieselfahrzeuge, die unter Berücksichtigung der möglichen Effizienztechnologien und Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen Methodik bis zum Jahr 2030 und 2050 hergeleitet wurden. Es zeigt sich, dass das Minderungspotenzial im Energieverbrauch bei ähnlichen zusätzlichen Herstellernkosten im Jahr 2050 höher als 2030 ist. Gründe dafür sind Skaleneffekte und die sinkende Kosten der Fahrzeugkomponenten, vor allem der Effizienztechnologien, die sich u. a. durch Skaleneffekte und kostengünstigere Materialien und Produktionsprozesse ergeben. Nach 2030 sind weitere Technologien zur Effizienzsteigerung des Energieverbrauchs integrierbar, die neben der höheren Kosteneffizienz durch die genannten Effekte zur Verschiebung der Kurven zwischen 2030 und 2050 führen. Hinsichtlich der Kostenkurven für Benzinfahrzeuge zeigt sich, dass weitestgehend höhere Minderungspotenziale zu geringeren Kosten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen erreicht werden können, da eine größere Anzahl an Effizienztechnologien zur

³ Kleinerer Hubraum bei gleicher Leistung durch Abgasturbolader und Kompressor.

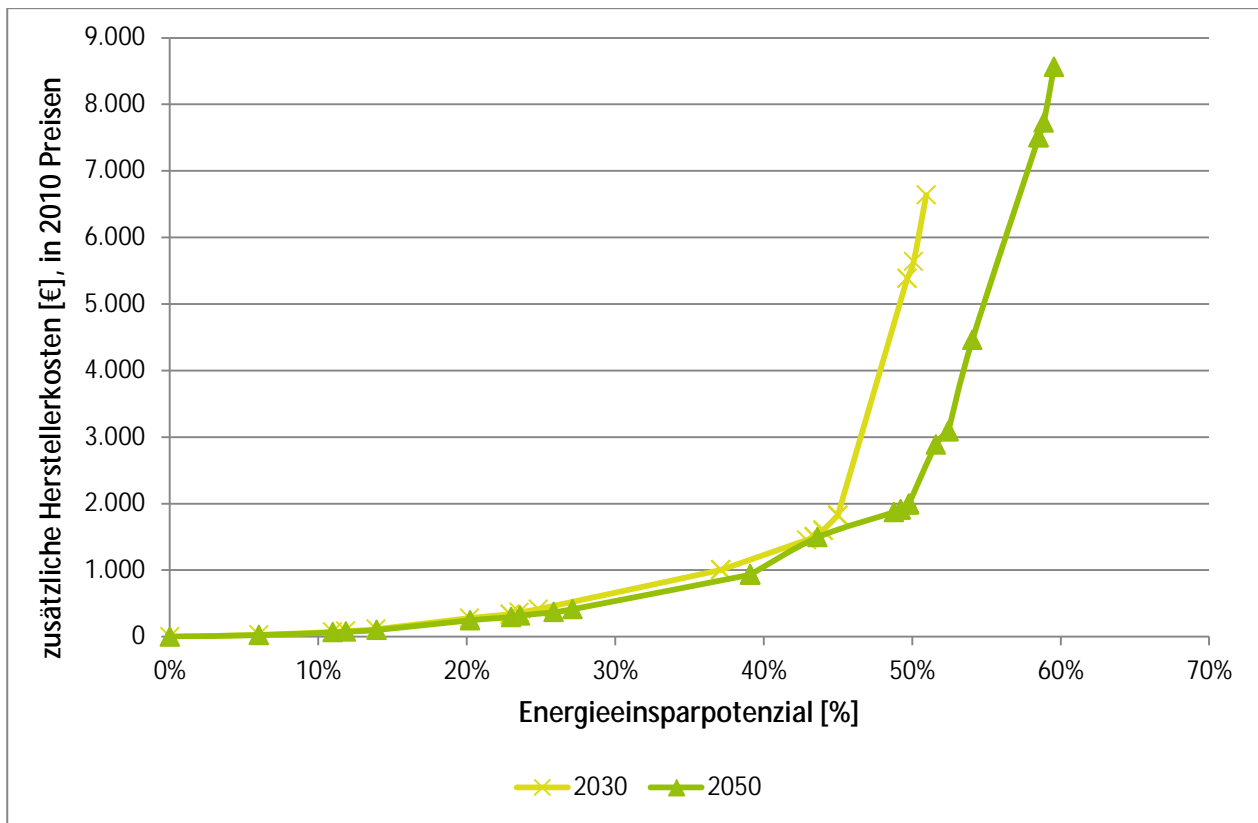
⁴ Bei Verbrennung im Teillastbetrieb werden Drosselverluste gemindert.

Verfügung steht. Mit der Vollhybridisierung steigt dann auch für die Dieselfahrzeuge das Minderungspotenzial an.

Abbildung 4-1: Kostenkurven für mittlere Benzin-Pkw



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 4-2: Kostenkurven für mittlere Diesel-Pkw

Quelle: eigene Darstellung

4.4.3. Alternative Antriebstechnologien

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Batterieelektrische Fahrzeuge verfügen über einen rein elektrischen Antrieb mit einem leistungsstarken elektrischen Motor. Im Vergleich zu den anderen hier diskutierten Fahrzeugtechnologien weist das BEV durch den effizienten Motor und regeneratives Bremsen den höchsten Tank-to-Wheel Wirkungsgrad auf. Die Herausforderung liegt vor allem bei der Batterietechnologie und der damit verbundenen eingeschränkten Reichweite und den hohen Batteriekosten. BEV werden voraussichtlich zunächst in verdichteten urbanen Räumen mit geringen Anforderungen an die Reichweite und als Minis und Kleinwagen vorrangig genutzt werden. Ob sie darüber hinaus zum Einsatz kommen, hängt u. a. von der Ladeinfrastruktur ab.

Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (PHEV)

Das Plug-In-Hybridfahrzeug hat einen konventionellen und elektrischen Antriebsstrang sowie einen Benzin- oder Dieseltank und eine Batterie zur elektrischen Energiespeicherung. Der PHEV kann mit seriellem Hybridantrieb (siehe REEV) oder als Parallelhybrid konfiguriert werden. Als Parallelhybrid können die beiden Antriebe beim Fahren kombiniert oder getrennt eingesetzt werden. Der Verbrennungsmotor unterstützt den Elektromotor, sobald die Batteriekapazität erschöpft ist oder eine höhere Leistung benötigt wird. Im Vergleich zum BEV ist die elektrische Reichweite des PHEV wesentlich geringer und an durchschnittliche Tagesgänge angepasst. Die benötigte Batteriekapazität ist geringer und die Batteriekonfiguration leistungsorientierter ausgerichtet (IEA 2011). Der Energieverbrauch im rein elektrischen Fahrmodus liegt im Bereich des BEV und der Verbrauch im konventionellen hybriden Fahrmodus im Bereich des HEV (Vollhybrid) (NAS 2013). Aufgrund des höheren Batteriegewichts beim PHEV gegenüber dem HEV

kann der konventionelle Energieverbrauch geringfügig über dem des HEV liegen. Insgesamt ist der Tank-to-Wheel Gesamtwirkungsgrad gegenüber dem BEV geringer, da nur ein Teil der Fahrleistung im elektrischen Modus erfolgt, aber wesentlich höher im Vergleich zum HEV.

Elektrofahrzeuge mit Range Extender (REEV)

Das Elektrofahrzeug mit Range Extender fährt überwiegend im elektrischen Modus, da es eine größere Batterie als das PHEV hat. Der Verbrennungsmotor wird nur dann eingesetzt, wenn die Batteriekapazität erschöpft ist. Das REEV hat einen seriellen Hybridantrieb und wird daher vollständig über den elektrischen Motor angetrieben. In der Regel ist die elektrische Reichweite höher im Vergleich zum PHEV und geringer gegenüber dem BEV. Im konventionellen hybriden Fahrmodus verbraucht das REEV mehr als das PHEV und verbrennungsmotorische Fahrzeuge. Insgesamt ist der durchschnittliche Energieverbrauch auch vom Nutzungsprofil abhängig. Sofern beim Range Extender der Verbrennungsmotor kaum eingesetzt wird, ist dieser sehr sparsam und kann mit dem BEV verglichen werden.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

Das Antriebssystem der Brennstoffzellenfahrzeuge besteht im Wesentlichen aus einem elektrischen Motor, einem Brennstoffzellensystem, einem Wasserstofftank und einer kleinen Batterie zur Zwischenspeicherung elektrischer Energie. Brennstoffzellensysteme produzieren Strom aus mitgeführtem Wasserstoff und Sauerstoff aus der Umgebungsluft und treiben damit den elektrischen Motor an. Im Vergleich zum batterieelektrischen Pkw können FCEV über größere Distanzen fahren und der Tank kann schneller aufgefüllt werden. Demgegenüber ist die Fahrzeugkonfiguration aufgrund der schweren Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks anspruchsvoll, die Kosten der Komponenten sind heute noch sehr hoch und die Haltbarkeit der Brennstoffzelle bisher eingeschränkt (Pollet 2012). Der Well-to-Wheel Wirkungsgrad von FCEV fällt durch die Rückverstromung von Wasserstoff im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen ungünstiger aus.

4.4.4. Komponenten alternativer Antriebe

In diesem Abschnitt werden die technologischen Potenziale sowie die Kosten der Batterietechnologien und Brennstoffzellensysteme als zentrale Komponenten alternativer Antriebssysteme näher diskutiert. Des Weiteren wird auf die Komponenten Elektromotor und Motorsteuerung, notwendige Veränderungen am Antriebsstrang und den Wasserstofftank eingegangen. Neben der allgemeinen Diskussion werden jeweils die für die Technologiedatenbank getroffenen Annahmen zur möglichen Entwicklung der Komponenten bis zum Jahr 2050 aufgeführt.

Batterietechnologie

Die Entwicklung elektrischer Fahrzeuge ist in hohem Maße abhängig von der technischen Entwicklung der Batterietechnologien. Entscheidende Größen sind hierbei die Energiedichte, die spezifische Leistung, die Zyklenfestigkeit, die Haltbarkeit, die Temperaturempfindlichkeit, Sicherheitsaspekte, die Entladungstiefe sowie die Lade- und Entladeeffizienz.

Die Konkurrenzfähigkeit, vor allem von rein batterieelektrischen Fahrzeugen, hängt im Wesentlichen von der Entwicklung der Energiedichte, die sich direkt auf die elektrische Reichweite auswirkt, und den spezifischen Kosten pro Einheit Energiegehalt ab. Daneben beeinflusst auch die Entladetiefe der Batterie die elektrische Reichweite, da z. B. mit einer relativ geringen Entladetiefe die nutzbare Kapazität reduziert wird. Darüber hinaus sind die Gewährleistung der Sicherheit und eine kalendarische Haltbarkeit von mindestens 8 - 10 Jahren sowie eine Mindestanzahl der Lade- und Entladezyklen von ca. 1.000 bei BEV und ca. 2.000 - 2.500 bei Hybridfahrzeugen in Bezug auf

die Batteriehaltbarkeit zentrale Voraussetzungen. Der Einfluss von niedrigen Temperaturen sollte auch berücksichtigt werden, da es in diesem Zusammenhang z. B. durch Selbstentladung zu einer hohen Diskrepanz zwischen Norm- und Realverbrauch kommen kann.

Status quo

Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung sind Lithium-Ionen Batterien der Stand der Technik und werden vermehrt im Automobilbau eingesetzt. Sie haben sich gegenüber anderen Batterietechnologien wie z. B. Nickel-Cadmium, Nickel-Metallhydrid und Natrium-Nickelchlorid Batterien (ZEBRA) durchgesetzt, da sie eine wesentlich höhere Energiedichte aufweisen und somit eine höhere Kapazität bei gleichem Batteriegewicht und damit eine größere elektrische Reichweite ermöglichen. Lithium-Ionen Batterien werden kurz- und mittelfristig die vorherrschende Technologie für batterieelektrische Fahrzeuge darstellen (ISI 2012; NAS 2013).

Der Einsatz von Batterietechnologien im Automobilbau hängt aber auch von der Antriebstechnologie ab. Bei PHEV spielt auch die spezifische Leistung eine entscheidende Rolle bei der Wahl der Batterietechnologie.

In Tabelle 4-4 werden die Annahmen über die Leistungsfähigkeit und die Kosten für Lithium-Ionen Batteriesysteme im Jahr 2010, die in die Technologiedatenbank eingeflossen sind, aufgeführt. Die Batteriekosten wurden auf Basis einer 20 kWh Batterie berechnet und ergeben sich aus einer umfassenden Recherche zu Batteriekosten (siehe Abbildung 4-3). Häufig werden Metall-Oxid-Kathoden eingesetzt, da diese eine hohe Stabilität und Lebensdauer, eine hohe Energiedichte und geringe Ladeverluste aufweisen. Neben Lithiumnickelkobalt und Lithiumtitanat als Kathodenmaterial sind Eisenphosphat-Kathoden eine weitere Alternative, die im Vergleich zu Metall-Oxid-Kathoden geringere Kosten und eine höhere Leistungsdichte, aber eine geringere Energiedichte haben. Als Anodenmaterial wird zumeist Graphit verwendet. Alternativ werden Silicon Anoden erforscht, da diese eine wesentlich höhere Energiedichte zu ähnlichen Kosten im Vergleich zu Graphit Anoden besitzen, aber diese Kapazitäten nur genutzt werden können, wenn mit der Kathode die entsprechende Kapazität erreicht wird (ISI 2012; e-Mobil BW 2011).

Tabelle 4-4: Batteriesystem (20 kWh) - Leistungsfähigkeit und spezifische Kosten im Jahr 2010

Batterie-technologie	Energiedichte [Wh/kg]	Spezifische Leistung [W/kg]	Entladetiefe [%]	Temperaturbereich [°C]	Anzahl Zyklen [#]	Haltbarkeit [Jahre]	Spezifische Batteriekosten [€/kWh]
Lithium-Ionen	105	400	80	-25°C, +50°C	2.500-3.500	10	590

Quelle: u.a. ISI (2012)

Technologische Perspektive

Hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen von Batterien werden alternative Kathoden- und Anodenmaterialien von Lithium-Ionen Batterien sowie post-Lithium Batterietechnologien wie Lithium-Schwefel und Lithium-Luft Batterien diskutiert. Lithium-Schwefel Batterien haben den Vorteil, dass sie eine bis zu dreimal höhere Energiedichte im Vergleich zu den aktuell genutzten Lithium-Ionen Batterien besitzen. Risiken bestehen bezüglich Selbstentladung und Sicherheit. Mit der Einführung dieser Batterietechnologie ist bis 2025 - 2030 zu rechnen. Eine weitere Batterietechnologie, die ein hohes Potenzial für hohe Energiedichten hat, aber deren Entwicklung

hinsichtlich Haltbarkeit und Sicherheit noch sehr unsicher ist, sind Lithium-Luft Batterien. Die Markteinführung im Automobilbau wird erst für nach 2030 prognostiziert (CE Delft 2011; ISI 2012).

Die Annahmen, die zur mittel- und langfristigen Entwicklung der technischen Eigenschaften von Batterietechnologien getroffen wurden, sind in Tabelle 4-5 dargestellt (Faaij 2012; CE Delft 2011; ISI 2012). Für das Jahr 2040 werden die Werte zur Leistungsfähigkeit und zu den Kosten von 2030 und 2050 verwendet und interpoliert, da für das Jahr 2040 wenig Literatur zur Diskussion der Kostenentwicklung vorliegt.

Tabelle 4-5: Batteriesystem (20 kWh) - Leistungsfähigkeit, 2020 – 2050

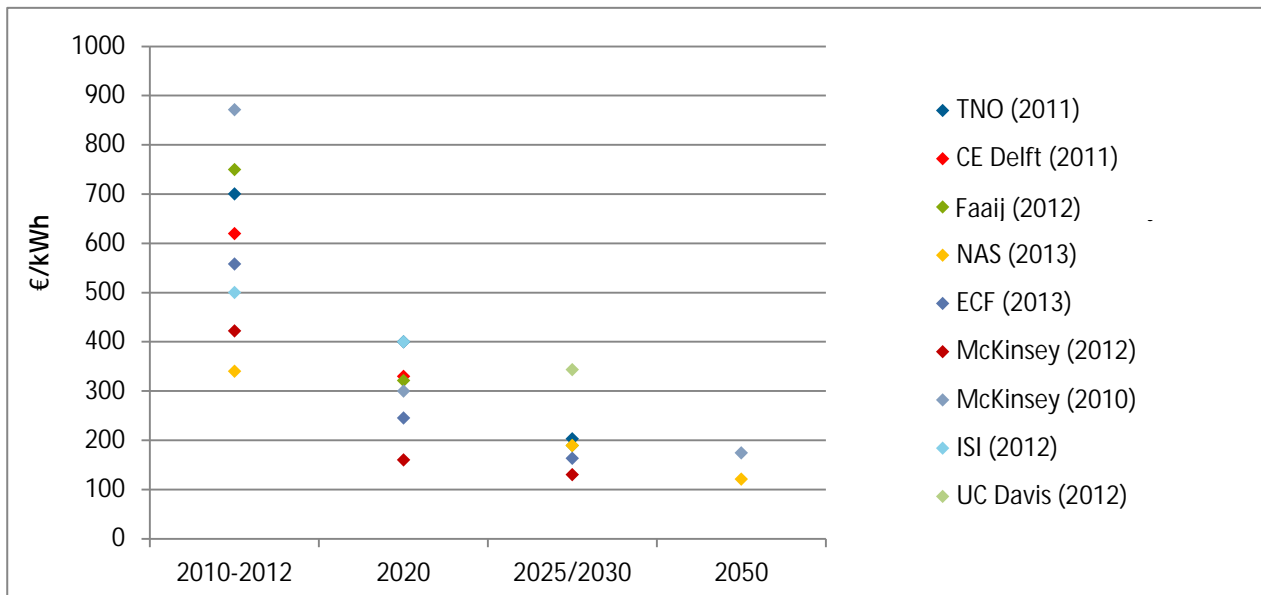
Batterie-technologie	Energiedichte [Wh/kg]				Spezifische Leistung [W/kg]				Entladetiefe [%]			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Jahr												
Lithium-Ionen	105	150	168	185	420	480	480	480	80	88	89	90
post-Lithium		360	393	425		400	400	400		93	94	95

Quelle: Faaij (2012), CE Delft (2011), ISI (2012)

Da der Anteil der Zellkosten an den Kosten des Batteriesystems nach NAS (2013) ca. 80 % beträgt und die Materialkosten der Zellen ungefähr 60 - 80 % ausmachen, kann die Reduktion der Batteriekosten vor allem durch eine geringere Anzahl an Zellen und durch ein günstigeres Material erreicht werden. Des Weiteren wird mit einer Kostenreduktion von 30-40 % durch Skaleneffekte gerechnet (ISI 2012).

Während bei Lithium-Ionen Batterien langfristig davon ausgegangen wird, dass der Materialeinsatz in den Zellen reduziert oder durch alternative Kathoden- und Anodenmaterialien optimiert wird, können mit post-Lithium Batterietechnologien vor allem die Zellen aufgrund der hohen Energiedichte reduziert werden. Die Kosten für post-Lithium-Batterien werden im Jahr 2030 voraussichtlich noch relativ hoch sein, aber bis zum Jahr 2050 auf ein ähnliches Niveau sinken, welches für Lithium-Ionen Batterie geschätzt wird (CCC 2012). In der nachfolgenden Abbildung ist die mögliche Entwicklung der Lithium-Ionen Batteriekosten auf Basis unterschiedlicher Studien dargestellt. Anhand der Bandbreite der Batteriekosten, die aus den verschiedenen Studien ermittelt wurden, wird deutlich, wie unsicher die zukünftige Entwicklung der Batteriekosten ist. Diese hängt von verschiedenen Faktoren, insbesondere der Weiterentwicklung der technologischen Eigenschaften der post-Lithium Batterien, der Kostenentwicklung der Batteriesysteme, welche neben anderen Faktoren wie Rohstoffpreise wesentlich von der Nachfrage nach batterieelektrischen Fahrzeugen beeinflusst wird, ab.

Abbildung 4-3: Übersicht verschiedener Studien zur Entwicklung der Lithium-Ionen Batteriekosten, 2010 – 2050



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 4-6 sind die Annahmen zu den spezifischen Batteriekosten für zwei verschiedene Batterietechnologien, die in der Technologiedatenbank berücksichtigt werden, bis zum Jahr 2050 aufgeführt. Die Kosten sind für eine 20 kWh Batterie angegeben, welche typischerweise bei BEV eingesetzt wird.

Tabelle 4-6: Batteriesystem (20 kWh) - Spezifische Batteriekosten, 2020 – 2050

Batterietechnologie	Spezifische Batteriekosten [€/kWh]			
	2020	2030	2040	2050
Lithium-Ionen	320	190	170	150
post-Lithium		300	220	150

Quelle: u.a. NAS (2013), McKinsey (2010)

Bei kleineren Batteriegrößen, wie sie in PHEV und REEV zu finden sind, können die Batteriekosten aus Tabelle 4-6 nicht in gleicher Höhe übernommen werden, da der Fixkostenanteil und die Anforderungen an die Leistungsdichte höher sind als bei BEV. Die Zellkosten machen bei einem PHEV ca. 60 - 70 % der Kosten des Gesamtsystems aus, während dies bei einer Batterie für BEV mit höherer Kapazität 80 % sind. Daher wurden die Batteriekosten für die verschiedenen Batteriegrößen und Antriebstechnologien differenziert anhand von Skalierungsfaktoren berechnet (CARB 2007). Die ermittelten Kostenverhältnisse zwischen Batteriesystemen von BEV und PHEV in Tabelle 4-7 lassen sich auch in anderen Studien finden (ECF 2013; IEA 2011).

Tabelle 4-7: Spezifische Batteriesystemkosten für verschiedene Batteriegrößen und Antriebssysteme, 2020 - 2050

Antriebstechnologie	Kapazität [kWh]	Spezifische Batteriekosten [€/kWh]			
		2020	2030	2040	2050
BEV	27	282	167	150	132
PHEV	9	448	266	238	210
REEV	11	411	244	219	193
FCEV	2	842	500	447	395

Quelle: eigene Berechnung nach CARB (2007)

Bei der Berechnung der gesamten Batteriekosten ist die Wechselwirkung im Fahrzeug zwischen Batteriegewicht, Kapazität und Energieverbrauch zu berücksichtigen, d. h. dass sich beim Einsatz verbesserter Batterietechnologien mit einer höheren Energiedichte bei gleich bleibender Kapazität das Batteriegewicht reduziert. Als Folge des reduzierten Batteriegewicht sinken der Energieverbrauch des Fahrzeugs und somit die Anforderungen an die Kapazität bei gleich bleibender elektrischer Reichweite und als Ergebnis die gesamten Batteriekosten. Dieser Zusammenhang wird in der Technologiedatenbank bei der Konfiguration von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb berücksichtigt.

In Tabelle 4-8 werden die Batteriekapazität und -kosten sowie der Energieverbrauch eines mittelgroßen BEV bis 2050 dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Fahrzeugkonfigurationen betrachtet. Ab dem Jahr 2020 wird angenommen, dass bei beiden Varianten die Batterietechnologien mit den geringsten gesamten Batteriekosten und alle Effizienztechnologien, die zu dem jeweiligen Zeitpunkt technisch möglich sind, zum Einsatz kommen. Variante 1 und 2 unterscheiden sich in der elektrischen Reichweite voneinander. In Variante 1 wird eine Batterie mit einer elektrischen Reichweite von 150 km und in Variante 2 mit 400 km Reichweite eingesetzt. Als Ergebnis sinken bei beiden Varianten bis zum Jahr 2050 die Batteriekosten und der Energieverbrauch auf etwas mehr als ein Drittel im Vergleich zum Jahr 2020, wobei die absoluten Batteriekosten der zweiten Variante insgesamt fast doppelt so hoch sind verglichen mit Variante 1. Aufgrund des höheren Batteriegewichts ist der spezifische Energieverbrauch bei Variante 2 etwas höher als bei Variante 1.

Tabelle 4-8: Veränderung der Energieverbrauchs sowie der Batteriekapazität und -kosten für zwei Varianten mit unterschiedlicher Reichweite bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum BEV im Jahr 2010.

BEV - mittel	BEV	Variante 1 (150 km)			Variante 2 (400 km)		
Szenarioannahmen	150 km elektr. Reichweite	150 km elektr. Reichweite			400 km elektr. Reichweite		
Jahr	2010	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Batteriekapazität	27,9	23,0	22,0	17,3	70,9	58,9	47,5
Batteriekosten	14300	6900	4000	2700	13300	7500	4900
Spezifischer Energieverbrauch [kWh/100 km]	18,6	15,3	14,7	11,5	17,7	16,3	11,9

Quelle: eigene Berechnung

Elektromotor und Steuerung

Die hohe Attraktivität des elektrischen Antriebs steht in enger Verbindung zu zentralen Eigenschaften des Elektromotors. Aufgrund seines hohen Wirkungsgrads von 90 bis 95 % ist der Elektromotor dem Verbrennungsmotor mit 30 bis 40 % Wirkungsgrad in hohem Maße überlegen (TAB 2012). Die permanentmagneterregte Synchronmaschine, welche unter die Kategorie der Drehstrommotoren fällt, ist derzeit die am häufigsten eingesetzte Elektromaschine. Sie weist eine hohe Leistungsdichte auf und befindet sich am oberen Rand der Wirkungsgrade von Elektromotoren. Aufgrund der bereits hohen Wirkungsgrade wird hier eine geringe weitere Effizienzsteigerung von maximal 2,5 % bis zum Jahr 2050 prognostiziert (NAS 2013). Das Steuerungselement koordiniert die Energiespeicherung, die Antriebssysteme und die Schnittstelle dazwischen, insbesondere bei hybriden Antriebssystemen.

Für einen 80 kW Elektromotor einschließlich Steuerung werden in der Technologiendatenbank spezifische Kosten für 2010 angesetzt, die aus den gesamten Motorkosten der Studie Mock (2011) berechnet wurden. Die Kosten des Elektromotors und der Steuerung sinken langfristig (CE Delft 2011). Die Kostendegression lässt sich auf ein besseres Design, eine effizientere Herstellung und kleinere Motoren, die benötigt werden, zurückführen (NAS 2013). Tabelle 4-9 zeigt die unterstellte Entwicklung der Kosten des Elektromotors und der Steuerung bis 2050, die in der Technologiendatenbank verwendet werden.

Tabelle 4-9: Elektromotor und Steuerung: Spezifische Kosten [€/kW]

	2010	2020	2030	2040	2050
Elektromotor und Steuerung [80 kW]	25	24	23	21	20

Quelle: NAS (2013), Mock (2011)

Weitere (hybrid) elektrische Komponenten

Neben dem Elektromotor und der Batterie gibt es weitere Komponenten des elektrischen Antriebs, die Leistungselektronik, Lenkungs- und Bremssysteme und weitere Nebenaggregate sowie speziell für Hybridfahrzeuge ein Getriebe zur Zusammenführung von elektrischem und konventionellem Antrieb. Die Leistungselektronik wandelt den Gleichstrom aus der Batterie in Wechselstrom für den Antriebsmotor um. Sie muss auf maximale Ströme ausgelegt sein und besteht aus einem Wechselrichter (Inverter) und Gleichspannungswandler. Für die Nebenaggregate muss Energie durch beispielsweise Hilfsmotoren bereitgestellt werden. Insbesondere für die Klimatisierung beim elektrischen Antriebssystem müssen Heiz- und Kühlelemente wie z. B. eine Wärmepumpe oder ein elektrischer Hochvolt-Klimakompressor eingebaut werden (e-Mobil BW 2011).

Die in der Technologiedatenbank angenommenen Kosten für das hybrid elektrische System des PHEV, REEV und FCEV und das rein elektrische System basieren für das Jahr 2010 auf der Studie Mock (2011) und einer Arbeit im Rahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität und werden in Tabelle 4-10 für einen Pkw der mittleren Größenklasse aufgeführt. Bis zum Jahr 2030 wird eine Kostendegression pro Dekade von rund 10 %, für den Zeitraum von 2030 bis 2050 von rund 5 % unterstellt.

Tabelle 4-10: Kosten weiterer (hybrid) elektrischer Komponenten

	2010	2020	2030	2040	2050
EV und HEV Komponenten [€]	2,600	2,328	2,084	1,978	1,877

Quelle: u.a. Mock (2011) und eigene Berechnung

Brennstoffzellensystem

Brennstoffzellensysteme bestehen aus einem Brennstoffzellenstack und einem Managementsystem für das Betanken des Brennstoffzellenstacks mit Wasserstoff. Mit dem Brennstoffzellensystem wird elektrische Energie erzeugt, welche dann vom Elektromotor für den Antrieb genutzt wird. Die am häufigsten eingesetzte Art von Brennstoffzelle ist die Proton Exchange Membran (PEM), welche im Niedrigtemperaturbereich arbeitet. Brennstoffzellen sind galvanische Zellen, in deren Kammern kontinuierlich Brennstoffe und Oxidationsmittel eingeleitet und die Reaktionsprodukte abgeführt werden. Zusätzlich wird ein aufwendiges und schweres Zubehör benötigt, welches unter anderem aus Kompressoren, Kühlmittel, Wärmeübertrager und Befeuchtermodul besteht und ca. 30 % der im System erzeugten Energie verbraucht (e-Mobil BW 2011).

Die Entwicklung von Brennstoffzellen ist vor allem abhängig von der spezifischen Leistung, der Haltbarkeit des Stacks und insbesondere von den Kosten, die im Jahr 2010 noch bei über 100.000 € für einen Pkw der mittleren Größenklasse lagen. Der Wirkungsgrad von Brennstoffzellensystemen ist im Vergleich zum konventionellen verbrennungsmotorischen Antriebssystem höher und kann durch die Kombination mit Batteriesystemen noch gesteigert werden. Die Haltbarkeit von Brennstoffzellensystemen liegt derzeit bei ca. 2.000 Stunden und die elektrische Reichweite bei ungefähr 400 km (Mercedes-Benz B-Class F-CELL). Die Forschung und Entwicklung im Bereich der Brennstoffzellensysteme konzentriert sich überwiegend auf Kostenreduktionen. Dennoch sind Effizienzsteigerungen bis 2050 aufgrund eines verbesserten Wasserstoff- und Sauerstoffmanagements und effizienteren Elektrodenstrukturen sowie durch ein

vereinfachtes BOP (Balance of plant) Design möglich. Die in der Technologiedatenbank angenommene Effizienzsteigerung des Brennstoffzellensystems bis zum Jahr 2050 ist in Tabelle 4-11 dargestellt (NAS 2013).

Tabelle 4-11: Brennstoffzellensystem – Wirkungsgrad, 2010 - 2050

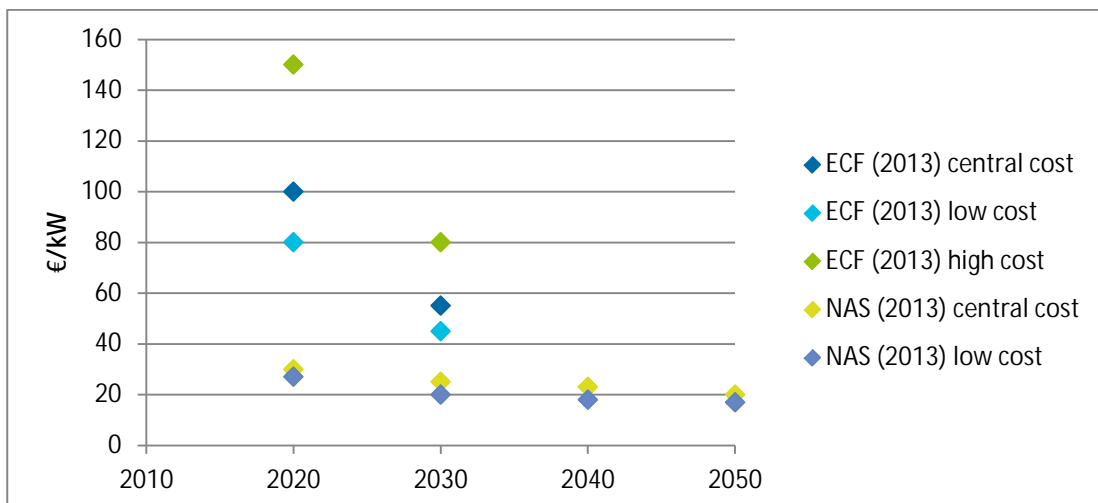
	2010	2020	2030	2050
Wirkungsgrad [%]	53	54	56	61

Quelle: NAS (2013)

Die Kosten von Brennstoffzellensystemen belaufen sich auf rund 75 % der gesamten Kosten eines FCEV. Sie hängen entscheidend vom eingesetzten Katalysatormaterial ab, welches derzeit das Edelmetall Platin ist. In NAS (2013) wird darauf hingewiesen, dass mit neuen Platin-Legierungen zukünftig der Gebrauch von Platin auf 10 g reduziert werden kann und somit die Materialkosten sinken. Darüber hinaus werden Alternativen zu Platin wie z. B. Kobalt und Kobaltoxid-Nanopartikel, die sich aber noch in der Entwicklungsphase befinden, diskutiert (Sasaki 2012).

Den beiden Studien NAS (2013) und ECF (2013) zufolge können die zukünftigen Kosten von Brennstoffzellensystemen auf ein verhältnismäßig niedriges Niveau sinken (siehe Abbildung 4-4). Die ECF Studie wurde für den europäischen und die NAS Studie für den amerikanischen Markt konzipiert. In McKinsey (2010) wurden die spezifischen Kosten in Abhängigkeit von den Stückzahlen angegeben: 500 €/kW für 1.000, 110 €/kW für 100.000 und 43 €/kW für 1.000.000 produzierte Einheiten.

Abbildung 4-4: Estimated fuel cell system costs



Quelle: eigene Darstellung

Da die Brennstoffzellenkosten auch im Jahr 2013 noch sehr hoch waren, wurde zusätzlich eine Expertenbefragung durchgeführt und folgenden Annahmen zur Entwicklung der Brennstoffzellenkosten in der Technologiedatenbank getroffen (siehe Tabelle 4-12). Dabei wird von produzierten Stückzahlen von 1.000.000 im Jahr 2050 ausgegangen. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass gerade beim Brennstoffzellensystem große Unsicherheiten bezüglich

der Kostenentwicklung bestehen. Beispielsweise hängt die Kostenentwicklung des Katalysatormaterials stark von der Verfügbarkeit der Edelmetalle am Weltmarkt ab. Darüber hinaus ist die Entwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge auch eng an den Ausbau einer Infrastruktur von Wasserstoff-Tankstellen gekoppelt. Die dargestellte Kostenentwicklung bildet daher nur eine unter vielen möglichen Entwicklungen ab.

Tabelle 4-12: Brennstoffzellensystemkosten, 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2050
Spezifische Kosten [€/kW]	880	150	80	43

Quelle: NAS (2013), ECF (2013), McKinsey (2010)

Wasserstofftank

Wasserstoff kann als verdichtetes Gas mit Kompressoren oder in flüssiger Form durch Kühlen und Verdichten im Fahrzeug gespeichert werden. Mit Wasserstoffspeicherung lässt sich im Vergleich zu den anderen Speichertechnologien die höchste gravimetrische Energiedichte erzielen, während die volumetrische Energiedichte eher gering ist (Wenger 2009). Die zentralen Herausforderungen sind die Kapazität, der hohe Druck und die hohen Kosten. Die Kosten des Tanks sind im Wesentlichen abhängig von den Materialkosten. Häufig werden Karbonfasern verwendet, welche einen Hauptbestandteil des Tanks ausmachen.

Das Volumen und die Kosten des Wasserstofftanks begrenzen die Kapazität und somit die elektrische Reichweite. Die Speichertechnologie wurde von 350 bar in der Vergangenheit auf 700 bar Speichersysteme erhöht und karbonfaserverstärkte Komposit-Materialien eingesetzt, ohne den Tank vergrößern zu müssen. Der Tankvorgang dauert in etwa so lange wie bei einem konventionellen Fahrzeug (McKinsey 2010; NAS 2013).

Mit Flüssiggasspeicherung lässt sich mehr Wasserstoff speichern als mit Druckgasspeicherung. Dabei ist zu beachten, dass bis zu 30 % der zur Verfügung stehenden Energie zur Wasserstoffverflüssigung benötigt wird. Aus Sicherheitsgründen wird eine zusätzliche Isolierung in den Tanks eingebaut, welche die Kapazität wiederum verringert. Flüssiggasspeicherung kann als Übergangstechnologie mittelfristig eine mögliche Alternative zur Druckspeichertechnologie sein. Falls sich langfristig Pipelines zur Wasserstoffversorgung durchsetzen, werden Druckgastanks am Markt voraussichtlich die meist genutzte Technologie sein. Daher wird in der Technologiedatenbank nur eine Technologie, nämlich die der Druckgasspeicherung, berücksichtigt.

Die Kostenentwicklung der Druckgastanks hängt hauptsächlich davon ab, inwiefern sich der Druck und die volumetrische Kapazität weiter steigern lassen und ob neue Materialien für den Tank entwickelt werden. Zukünftige Energieeffizienzgewinne und dadurch verringerte Kapazitätsanforderungen durch beispielsweise einen verringerten Fahrwiderstand würden Expertenaussagen im Rahmen des Workshops zu Pkw Technologien zufolge eher nicht dafür eingesetzt, die Menge an benötigten Wasserstoff zu verringern, sondern vermutlich genutzt, um die Reichweite der Fahrzeuge weiter zu erhöhen.

Folgende Annahmen wurden für die Entwicklung der Kosten von Druckgastanks in der Technologiedatenbank getroffen (siehe Tabelle 4-13).

Tabelle 4-13: Geschätzte Kosten für die Wasserstoffspeicherung

	2010	2020	2030	2050
Druckgastanks [€/kWh]	59	20	14	13

Quelle: NAS (2013)

4.5. Ergebnisse: Energieverbrauch und Kosten auf Fahrzeugebene 2010 - 2050

Im Folgenden werden zwei Szenarien präsentiert, die zwei mögliche Entwicklungen des Energieverbrauchs und der Investitionskosten für die zuvor diskutierten Antriebskonzepte bis zum Jahr 2050 auf Basis der Pkw Technologiedatenbank darstellen. In einem ersten Schritt werden die Basisfahrzeuge für das Jahr 2010 hinsichtlich ihres Energieverbrauchs und der Investitionskosten aufgeführt. Daran anschließend wird das erste *Szenario*, welche sich weitestgehend am *Trendszenario* von TREMOD (IFEU 2014) orientiert, und das zweite *Szenario*, das eine progressivere Entwicklung der Effizienzsteigerung bis zum Jahr 2050 auf Basis der berücksichtigten Technologien darstellt, beschrieben.

4.5.1. Basisfahrzeuge 2010

Neben den bereits in Kapitel 4.3 beschriebenen verbrennungsmotorischen Basisfahrzeugen für Benzin, Diesel und CNG sind in Tabelle 4-14 die angenommenen Energieverbräuche der alternativen Antriebssysteme im Jahr 2010 dargestellt. Die Verbräuche wurden für bestimmte Reichweiten berechnet. Beim BEV wird beispielhaft eine elektrische Reichweite von 150 km im Jahr 2010 angenommen, beim PHEV eine Reichweite von 50 km und beim REEV von 100 km. Der Energieverbrauch des PHEV und REEV ergibt sich durch den elektrischen und konventionellen Anteil. Hier wird ein elektrischer Fahranteil von 75 % für den PHEV und von 90 % für den REEV angenommen. Beide Antriebskonzepte verwenden entweder Benzin oder Diesel als konventionellen Kraftstoff.

Tabelle 4-14: Spezifischer Energieverbrauch für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Jahr 2010

	ICEV (Benzin, CNG)	ICEV (Diesel)	BEV - 150 km (130 km microcar)	PHEV (Benzin) - 50 km	REEV (Benzin) - 100 km	PHEV (Diesel) - 50 km	REEV (Diesel) - 100 km	FCEV
	[MJ/km] nach NEFZ							
microcar	1,08		0,46					
klein	1,80	1,49	0,55	0,82	0,62	0,75	0,61	0,95
mittel	2,14	1,95	0,67	1,00	0,76	0,95	0,75	1,19
groß	2,64	2,21	0,77	1,15	0,87	1,06	0,85	1,43

Quelle: KBA (2010), Herstellerangaben alternativer Antriebskonzepte, eigene Berechnungen

Entsprechend den Angaben zum Energieverbrauch sind in Tabelle 4-15 die Investitionskosten aufgeführt. Insbesondere die Batteriekosten haben im Jahr 2010 einen hohen Anteil an den gesamten Kosten der alternativen Antriebskonzepte, ausgenommen das FCEV, bei welchem die Kosten des Brennstoffzellensystems die Hauptkosten darstellen. BEV und REEV sind daher besonders kostenintensiv, letzteres aufgrund der relativ hohen Reichweite von 100 km und des doppelten Antriebssystems.

Tabelle 4-15: Investitionskosten in Euro (Verkaufspreise inkl. MwSt.) für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Jahr 2010

	ICEV (Benzin)	ICEV (CNG)	ICEV (Diesel)	BEV - 150 km (130 km microcar)	PHEV (Benzin) - 50 km	REEV (Benzin) - 100 km	PHEV (Diesel) - 50 km	REEV (Diesel) - 100 km	FCEV
	[€]								
microcar	9.600			28.500					
klein	13.100	16.100	13.900	36.900	27.200	33.800	27.600	33.900	107.000
mittel	22.400	26.200	24.500	48.400	37.900	45.200	38.200	45.200	157.300
groß	37.100	41.700	39.100	69.000	57.700	65.400	58.500	65.800	209.600

Quelle: u. a. NPE (2011), Mock (2011), CE Delft (2011), eigene Berechnungen

4.5.2. Entwicklung des Energieverbrauchs und der Fahrzeugkosten bis zum Jahr 2050

Die Entwicklung des Energieverbrauchs und der Investitionskosten wird für zwei verschiedene Szenarien dargestellt. Die Effizienzentwicklung beider Szenarien orientiert sich bis zum Jahr 2020 an den gesetzlichen Rahmenbedingungen. In diesem Zusammenhang ist die Begrenzung der CO₂-Emission der neuzugelassenen Pkw durch die Europäische Union zu nennen, welche bis 2021 einen Zielwert von 95 g CO₂/km vorgibt. Für die folgenden Jahrzehnte bis 2050 werden unterschiedliche Entwicklungen in den beiden Szenarien angenommen.

Szenario 1 orientiert sich an der Entwicklung der Effizienzsteigerung im *Trendszenario* von TREMOD 5.41.⁵ Bis zum Jahr 2030 wird der Energieverbrauch für die verbrennungsmotorischen Pkw an die Entwicklung der TREMOD Daten angepasst und die dazugehörigen Investitionskosten der vorliegenden Technologiedatenbank entnommen. Die Effizienzsteigerungen der Jahre 2020 bis 2030 von jährlich 1,2 % wird linear für die konventionellen Pkw bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben (IFEU 2012). Für die Entwicklung der alternativen Antriebskonzepte werden die zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Effizienztechnologien, die bei den konventionellen Antriebskonzepten eingesetzt werden, soweit möglich ebenfalls übernommen oder angepasst an die jeweilige Antriebstechnik bei den alternativen Antriebskonzepten verwendet.

Für mittlere Benzinfahrzeuge ergibt sich somit eine Effizienzsteigerung von 29 % in 2020, 39 % in 2030, 46 % in 2040 und 54 % in 2050 sowie für mittlere Dieselfahrzeuge von 24 % in 2020, 34 % in 2030, 41 % in 2040 und 48 % in 2050 im Vergleich zum Basisjahr 2010. Die entsprechenden Energieverbräuche sind in Tabelle 4-16 aufgeführt. Die höheren Effizienzpotenziale bei Benzinfahrzeugen resultieren ab 2030 in einem ähnlich hohen Energieverbrauch der Benzinfahrzeuge im Vergleich zur Diesel-Variante.⁶ Die alternativen Antriebskonzepte, PHEV und REEV, die in der Tabelle angegeben sind, werden konventionell mit Benzin und elektrisch betrieben. Der konventionelle Energieverbrauch des PHEV zeigt bis 2050 einen ähnlichen Verlauf wie der des Benzinfahrzeugs, da die meisten Effizienztechnologien ähnliche verbrauchsmindernde Wirkungen wie beim Benzinfahrzeug haben. Demgegenüber liegt der REEV in seinem

⁵ Information zur Entwicklung des Energieverbrauchs nach Tremod 5.41 basieren auf persönlicher Kommunikation mit Nadja Richter vom Umweltbundesamt (März 2014).

⁶ Diese Annäherung beim Energieverbrauch zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen lässt sich mit der Zuordnung der KBA (Kraftfahrtbundesamt) Segmente zu den Größenklassen klein, mittel, groß erklären (siehe Hülsmann et al. 2014). Mini- und Großraum-Vans sowie Utilities sind der mittleren Größenklasse zugeordnet und der Unterschied zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen in diesen Segmenten ist geringer verglichen mit den anderen Segmenten. Daher unterscheidet sich der Energieverbrauch zwischen den mittleren Benzin- und Dieselfahrzeugen bereits im Jahr 2010 weniger stark als bei den kleinen und großen Pkw, deren Energieverbrauch sich aber auch bis zum Jahr 2050 annähert.

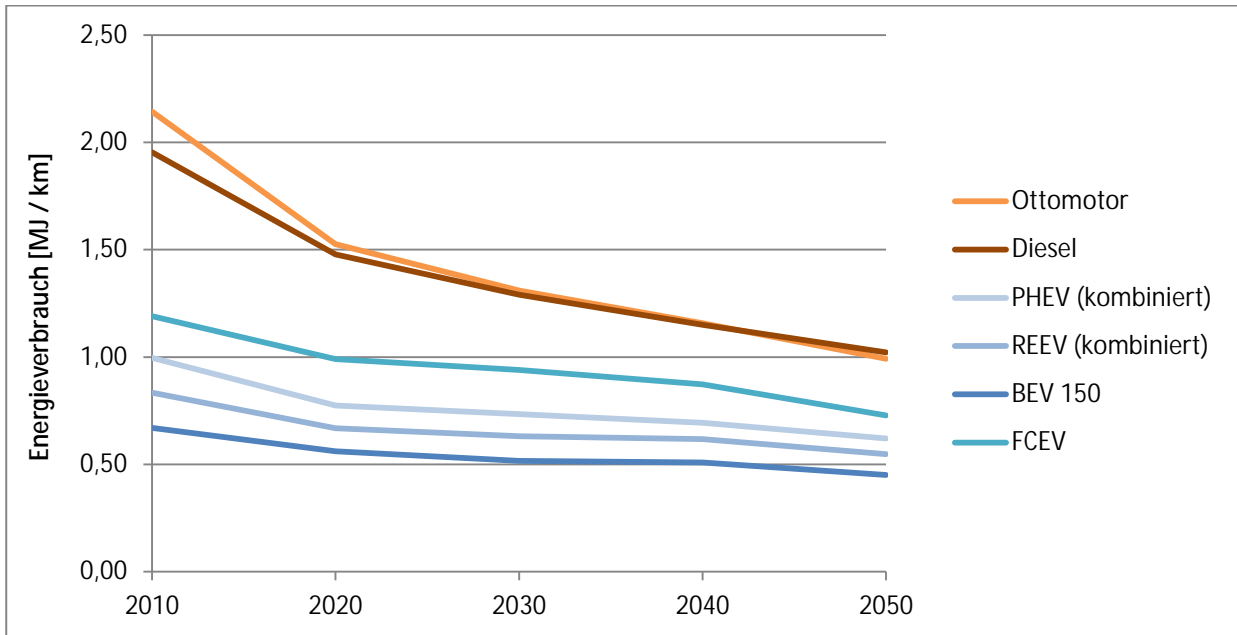
konventionellen Verbrauch über dem des Benzinfahrzeugs und des PHEV. Das lässt sich zum einen mit der größeren und daher schwereren Batterie des REEV von 100 km Reichweite verglichen mit dem PHEV, bei welchem eine Batterie von 50 km Reichweite angenommen wurde, erklären. Zum anderen hat der REEV einen seriellen Hybridantrieb mit einem im Vergleich zum PHEV kleineren Motor und verzeichnet daher Verluste bei der Energieübertragung vom Verbrennungsmotor zum Elektromotor. Der elektrische Energieverbrauch des BEV, PHEV und REEV sowie FCEV sinkt über die Zeit aufgrund von Effizienztechnologien, die den Fahrwiderstand reduzieren und eines zunehmend leicht effizienteren Elektromotors. Zur Darstellung des gesamten Energieverbrauchs (elektrisch und konventionell) in Abbildung 4-5 wurde auch hier beim PHEV ein elektrischer Fahranteil von 75 % und beim REEV ein elektrischer Fahranteil von 90 % angenommen. Für Pkw der Fahrzeugsegmente klein und groß werden ähnliche Energieeinsparungen wie für mittelgroße Pkw bis 2050 hergeleitet (siehe Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7). Ab dem Jahr 2050 wird angenommen, dass Microcars ausschließlich elektrisch betrieben werden.

Tabelle 4-16: Energieverbrauch eines mittleren Pkw differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario 1

	Otto- motor	Diesel	BEV 150	PHEV (konv.)	REEV (konv.)	PHEV (elektr.)	REEV (elektr.)	FCEV
2010	2,14	1,95	0,67	1,97	2,31	0,67	0,67	1,19
2020	1,53	1,48	0,56	1,40	1,64	0,56	0,56	0,99
2030	1,31	1,29	0,52	1,32	1,59	0,54	0,53	0,94
2040	1,16	1,15	0,51	1,18	1,51	0,53	0,52	0,87
2050	0,99	1,02	0,45	1,07	1,35	0,47	0,46	0,73

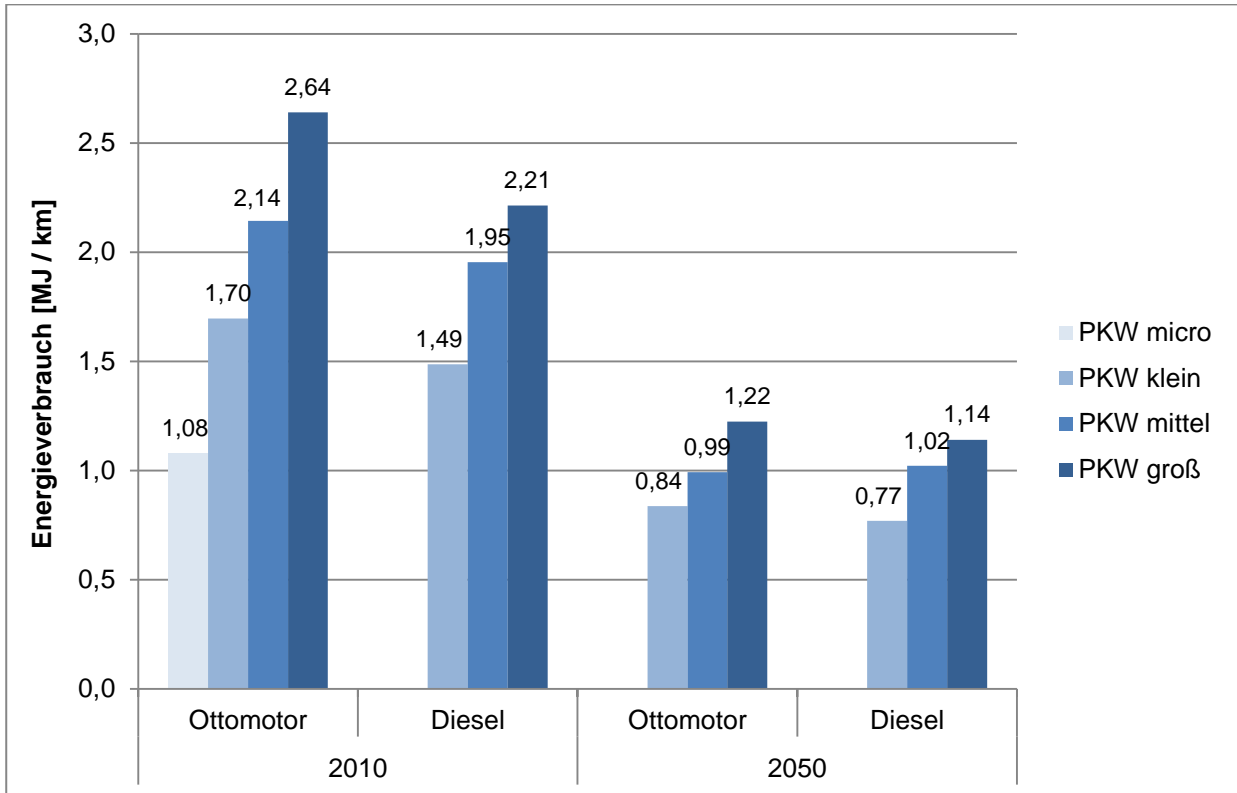
Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 4-5: Energieverbrauch eines mittleren Pkw differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario 1⁷



Quelle: eigene Darstellung

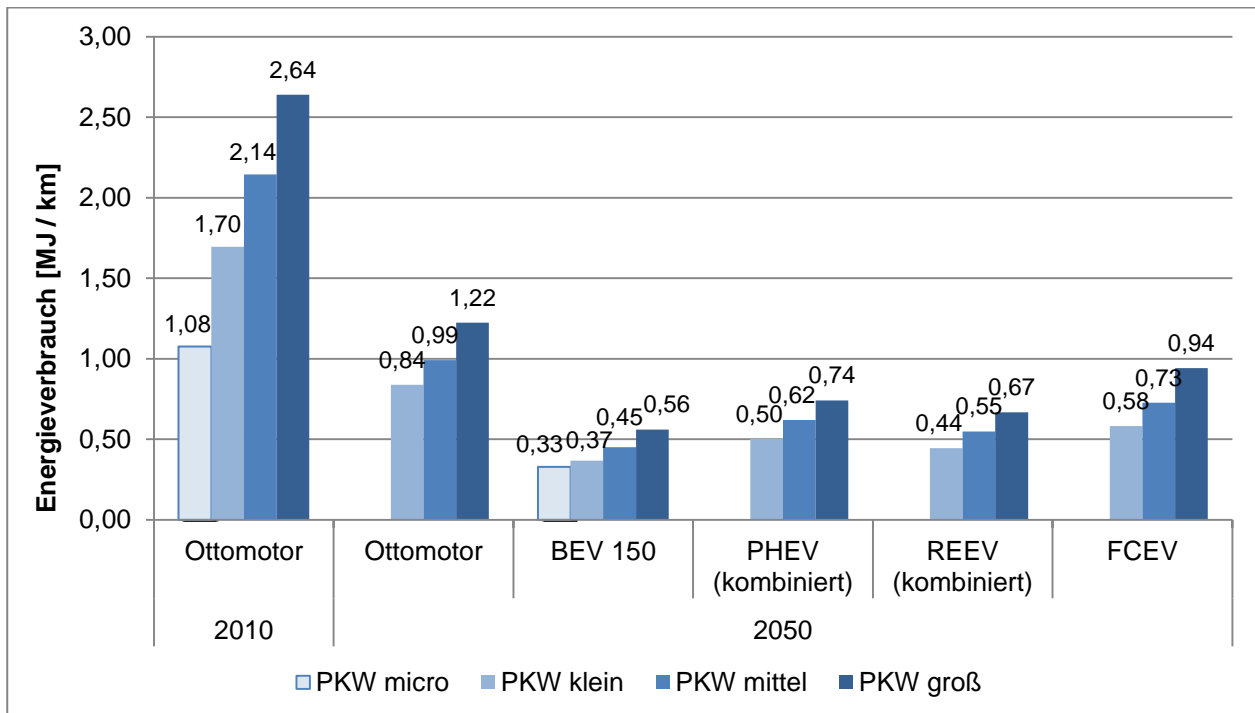
Abbildung 4-6: Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und verbrennungsmotorischem Antriebskonzept 2010 und 2050, Szenario 1



Quelle: eigene Darstellung

⁷ PHEV (kombiniert) und REEV (kombiniert) entsprechen dem kombinierten Energieverbrauch - elektrisch und konventionell.

Abbildung 4-7: Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept 2010 und 2050, Szenario 1⁸

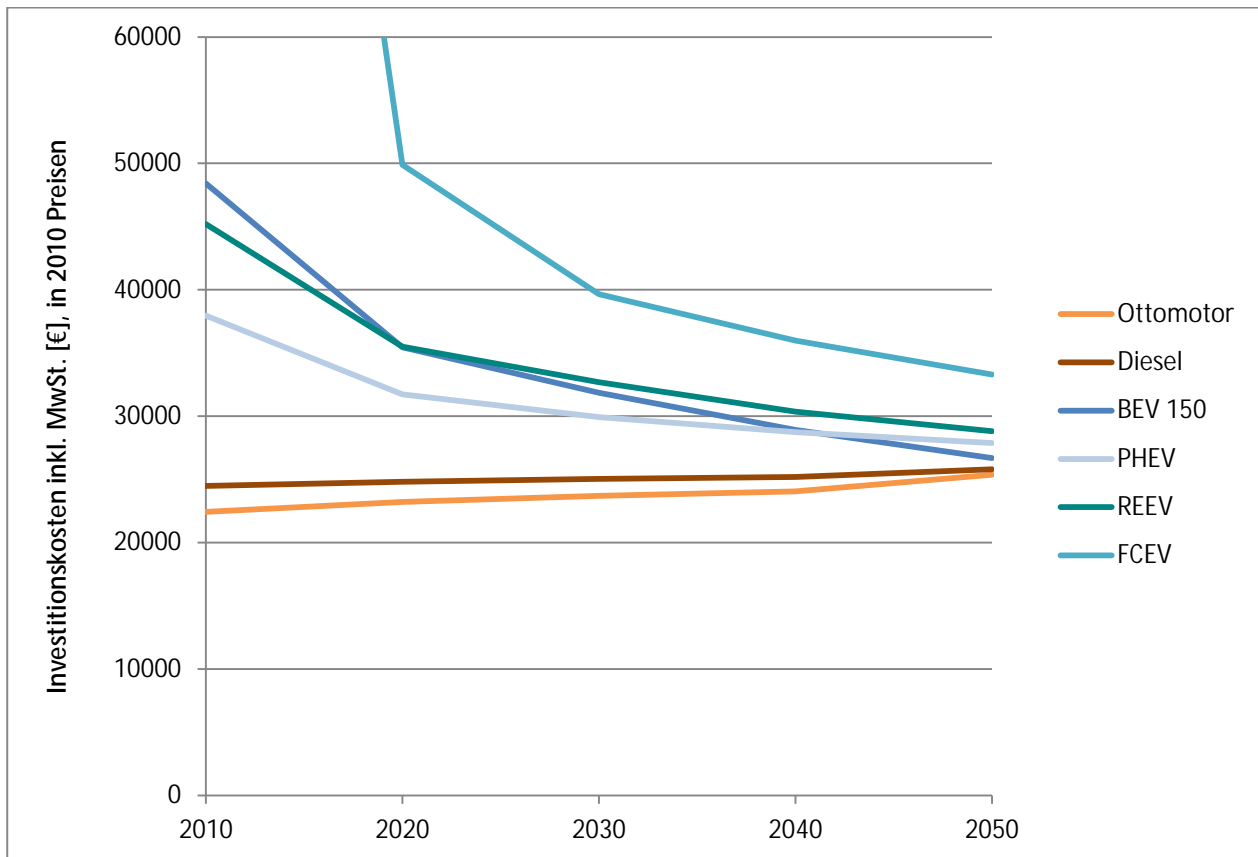


Quelle: eigene Darstellung

Gemäß den in der Technologiedatenbank getroffenen Annahmen steigen die gesamten Investitionskosten inklusive Markup und Mehrwertsteuer für die verbrennungsmotorischen Pkw, Benzin und Diesel, jährlich aufgrund der angenommenen Effizienztechnologien, während die Fahrkosten pro Kilometer aufgrund des reduzierten Energieverbrauchs sinken. Die Betriebskosten wurden in dieser Studie jedoch nicht näher betrachtet. Die Investitionskosten der alternativen Antriebskonzepte sinken jährlich aufgrund höherer Stückzahlen und technologischer Verbesserung. Die Investitionskosten des REEV und PHEV liegen im Jahr 2050 allerdings noch höher als die der verbrennungsmotorischen Pkw, da aufgrund der konventionellen Effizienztechnologien zusätzliche Kosten jährlich entstehen. Eine Konfiguration des PHEV und REEV mit weniger konventionellen Effizienztechnologien wäre auch denkbar, da in diesem Fall der Energieverbrauch weiterhin geringer im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Pkw ist, die Investitionskosten jedoch sinken. Effizientere Batterien und ein geringerer Bedarf an Batteriekapazität durch Gewichtsreduktion führen dazu, dass die Investitionskosten des BEV sich am stärksten reduzieren. Die Kosten des FCEV sinken über die Zeit zwar am meisten, liegen dennoch höher als bei den anderen Antriebskonzepten (siehe Abbildung 4-8).

⁸ PHEV (kombiniert) und REEV (kombiniert) entsprechen dem kombinierten Energieverbrauch - elektrisch und konventionell.

Abbildung 4-8: Investitionskosten eines mittleren Pkw (Verkaufspreise inkl. MwSt.) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario 1



Quelle: eigene Darstellung

Szenario 2 stellt einen progressiveren Verlauf des Energieverbrauchs hinsichtlich der erzielten Energieeffizienz nach 2020 im Vergleich zu *Szenario 1* dar. In dieser Beispielanwendung der Technologiedatenbank wird bis zum Jahr 2030 eine Verschärfung der CO₂-Zielwerte auf 65 g CO₂/km für Pkw angenommen. Daraus ergibt sich eine Effizienzsteigerung von 40 % der Benzinfahrzeuge und 35 % der Dieselfahrzeuge im Vergleich zum Jahr 2010. In diesem Zusammenhang kommen Technologien zur Verbesserung der Effizienz des Verbrennungsmotors und des Getriebes als auch zur Reduzierung des Fahrwiderstands zum Einsatz. Darüber hinaus werden weitere Effizienzsteigerungen durch starke Gewichtsreduktion und Vollhybridisierung der verbrennungsmotorischen Pkw berücksichtigt. Im Jahr 2050 ergibt sich daher ein Minderungspotenzial von 60% für Pkw mit Ottomotor und von 58 % für Pkw mit Dieselantrieb (siehe Tabelle 4-17 und Abbildung 4-9).

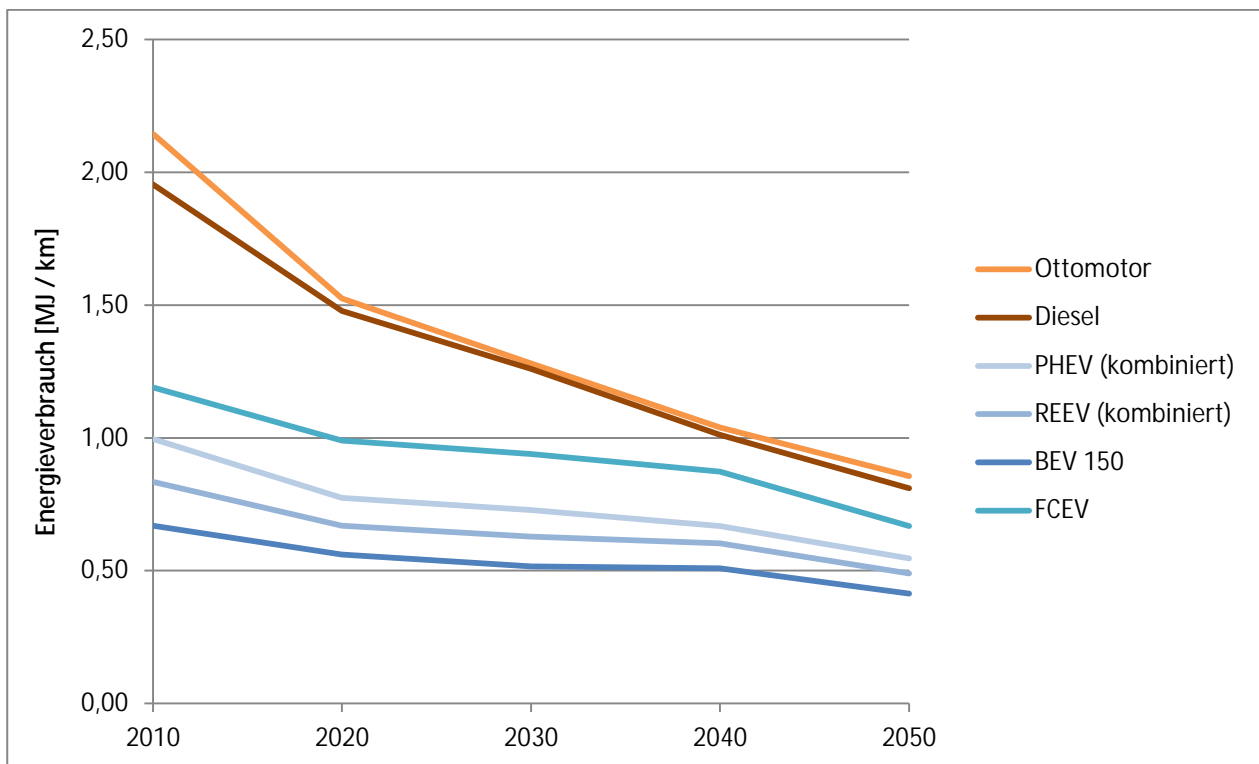
Der Energieverbrauch der alternativen Antriebskonzepte zeigt einen ähnlichen Verlauf wie in *Szenario 1* bis 2050. Dieser sinkt in *Szenario 2* vor allem durch den Einsatz von zusätzlichen Technologien, die den Fahrwiderstand reduzieren, ein wenig stärker als in *Szenario 1*.

Für Pkw der Fahrzeugsegmente klein und groß werden ähnliche Energieeinsparungen wie für mittelgroße Pkw bis 2050 hergeleitet (siehe Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11). Der Energieverbrauch der micro und kleinen BEV nähert sich im Jahr 2050 an, da kleine Pkw aufgrund der Veränderungen an der Fahrzeugplattform Microcars immer ähnlicher werden (siehe Abbildung 4-11).

Tabelle 4-17: Energieverbrauch eines mittleren Pkw differenziert nach Antriebskonzepten 2010 – 2050, Szenario 2

	Otto- motor	Diesel	BEV 150	PHEV (konv.)	REEV (konv.)	PHEV (elektr.)	REEV (elektr.)	FCEV
2010	2,14	1,95	0,67	1,97	2,31	0,67	0,67	1,19
2020	1,53	1,48	0,56	1,40	1,64	0,56	0,56	0,99
2030	1,28	1,26	0,52	1,30	1,56	0,54	0,53	0,94
2040	1,04	1,01	0,51	1,08	1,37	0,53	0,52	0,87
2050	0,86	0,81	0,41	0,89	1,11	0,43	0,42	0,67

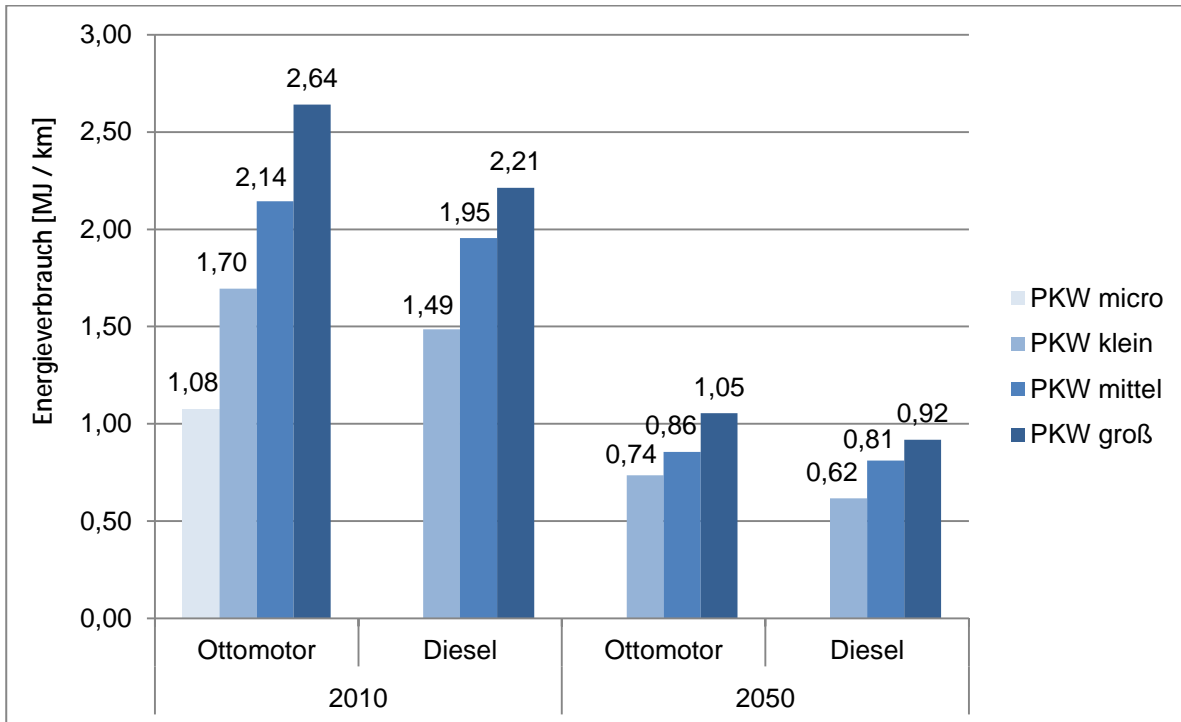
Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 4-9: Entwicklung des Energieverbrauchs differenziert nach Antriebskonzepten 2010 – 2050, Szenario 2⁹

Quelle: eigene Darstellung

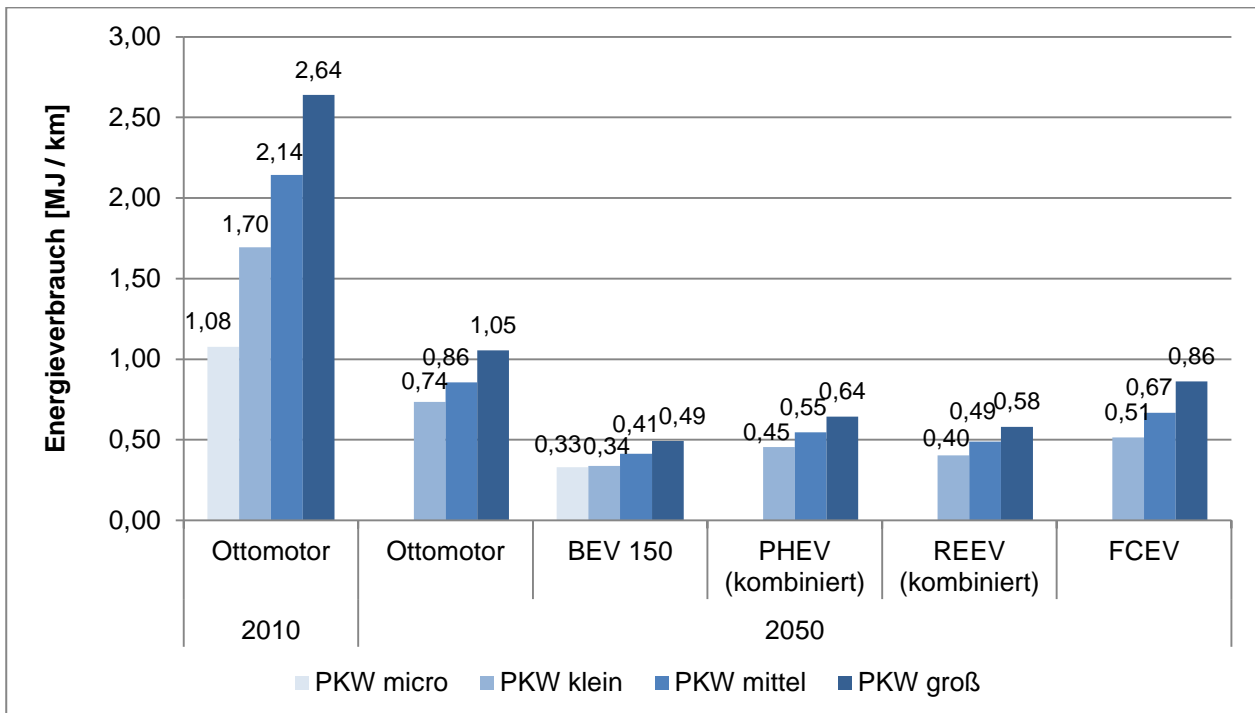
⁹ PHEV (kombiniert) und REEV (kombiniert) entsprechen dem kombinierten Energieverbrauch - elektrisch und konventionell.

Abbildung 4-10: Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und verbrennungsmotorischem Antriebskonzept 2010 und 2050, Szenario 2



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 4-11: Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept 2010 und 2050, Szenario 2¹⁰

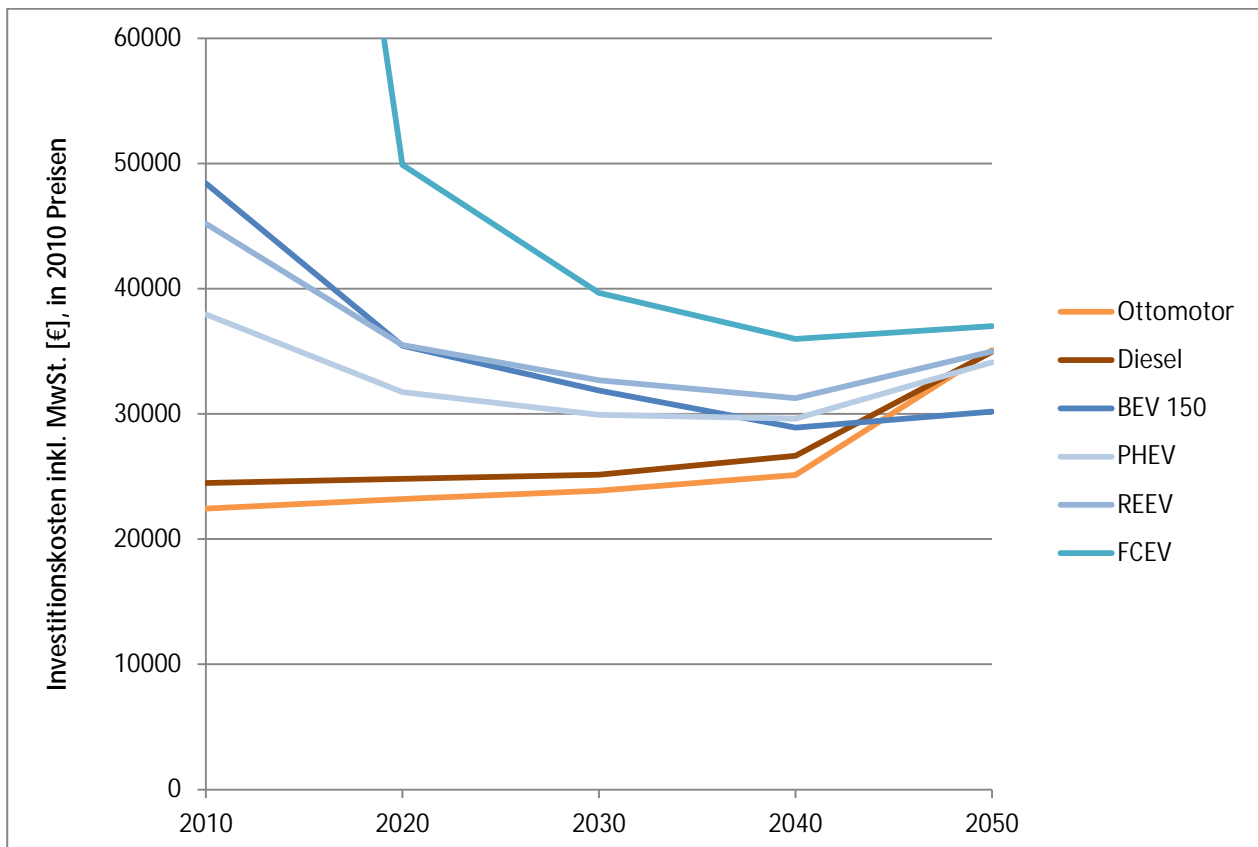


Quelle: eigene Darstellung

¹⁰ PHEV (kombiniert) und REEV (kombiniert) entsprechen dem kombinierten Energieverbrauch - elektrisch und konventionell.

Die Investitionskosten für *Szenario 2* sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Im Jahr 2050 sind die Kosten für verbrennungsmotorische Pkw um rund 10.000 € höher als in *Szenario 1*. Dies lässt sich im Wesentlichen auf die enorme Gewichtsreduktion mit teuren Materialien und die Vollhybridisierung zurückführen. Die Investitionskosten des PHEV, REEV und HEV weisen im Jahr 2050 ein ähnliches Niveau auf, während die Kosten des PHEV und REEV in *Szenario 1* noch eindeutig über denen des verbrennungsmotorischen Pkw liegen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass hybride Komponenten im PHEV und REEV nicht zusätzlich eingesetzt werden, da es sich bei diesen Antriebskonzepten bereits um Hybridantriebe handelt. Im Vergleich zum HEV und den alternativen Antriebskonzepten fallen für das BEV die geringsten Investitionskosten im Jahr 2050 an. Effizientere Batterien und ein geringerer Bedarf an Batteriekapazität durch die Reduzierung des Fahrwiderstands sind ein wesentlicher Grund. Die enormen Kosten der Effizienztechnologie zur Reduzierung des Fahrwiderstands führen dazu, dass die Kosten des BEV von 2040 bis 2050 leicht steigen. Das Brennstoffzellenfahrzeug weist auch in diesem Szenario die höchsten Investitionskosten im Jahr 2050 auf.

Abbildung 4-12: Investitionskosten eines mittleren Pkw (Verkaufspreise inkl. MwSt.) differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario 2.



Quelle: eigene Darstellung

4.5.3. Einordnung der Ergebnisse

Insgesamt sollte bei der Interpretation der dargestellten Ergebnisse berücksichtigt werden, dass Unsicherheiten bestehen. Dies betrifft vor allem die Entwicklung der Batterietechnologien und Brennstoffzellensysteme, aber auch die Kostenentwicklung der Effizienztechnologien bis 2050. Inwiefern sich die technologischen Eigenschaften der post-Lithium Batterien weiterentwickeln und

zu welchen Kosten diese für den mobilen Einsatz zukünftig verfügbar sind, hängt von vielen Faktoren, wie z. B. der Verfügbarkeit von Edelmetallen am Weltmarkt und infrastrukturellen Voraussetzungen zur Batterieladung ab. Darüber hinaus ist es möglich, dass weitere Effizienztechnologien und Antriebskonzepte, die bisher nicht vollstellbar sind, entwickelt werden. Zudem bestehen Unsicherheiten bezüglich der Korrekturfaktoren, die multiplikativ miteinander verknüpfte Minderungspotenziale mehrerer Technologien abmindern. Gerade bei Technologien, die noch in der Entwicklung sind, lassen sich die Korrekturfaktoren nur abschätzen.

Vor diesem Hintergrund wird mit den beiden Szenarien aufgezeigt, wie mögliche Entwicklungen zur Energieeinsparung unter bestimmten Bedingungen bis 2050 aussehen können. Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen in der Technologiedatenbank geht dabei die Energieeinsparung für die verbrennungsmotorischen Antriebskonzepte mit Zusatzkosten einher, die vor allem für die letzten rund 5 - 10 % bis zum maximalen Minderungspotenzial sehr hoch sind. Auf die Kosten der alternativen Antriebskonzepte wirken sich Effizienztechnologien, die den Fahrwiderstand beeinflussen, zum Teil positiv aus. Zusammen mit den angenommenen reduzierten Batteriekosten und Effizienzanforderungen für verbrennungsmotorische Pkw sind BEV mit einer Reichweite von 150 km im Jahr 2050 mindestens konkurrenzfähig mit verbrennungsmotorischen Antriebskonzepten und haben darüber hinaus weitaus geringere Betriebskosten. PHEV und REEV haben einen geringeren Energieverbrauch verglichen mit den verbrennungsmotorischen Pkw im Jahr 2050 in beiden Szenarien. Die Investitionskosten könnten für diese beiden alternativen Antriebskonzepte jedoch weitaus geringer ausfallen, wenn nicht alle verbrennungsmotorischen Effizienztechnologien berücksichtigt werden. Brennstoffzellenfahrzeuge verzeichnen die größten Veränderungen hinsichtlich der Kosten in beiden Szenarien, bleiben aber teurer als die anderen alternativen und verbrennungsmotorischen Antriebskonzepte.

5. Technologiedatenbank SNF

5.1. Übersicht

Analog zu Kapitel 4 wird im Folgenden ein Überblick über die in der Technologiedatenbank berücksichtigten konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge gegeben und die zugrundeliegenden Basisfahrzeuge näher definiert. Die Effizienztechnologien unterscheiden entsprechend des Vorgehens für Pkw zwischen Maßnahmen, die unabhängig von der Motorisierung umgesetzt werden können, und antriebsspezifischen Technologien. Auch bei schweren Nutzfahrzeugen wird bei der Diskussion ein besonderes Augenmerk auf mögliche alternative Antriebskonzepte und deren Ausgestaltung gerichtet. Abschließend wird an einem beispielhaften *Szenario* veranschaulicht, welche Kostenkurven sich für die Effizienzentwicklung von schweren Nutzfahrzeugen auf Basis der Technologiedatenbank bis 2050 ergeben.

5.2. Antriebskonzepte

In der Technologiedatenbank für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) werden fünf Antriebskonzepte unterschieden, welche jedoch nicht zwangsläufig in allen betrachteten Fahrzeugkategorien zum Einsatz kommen.

- **Verbrennungsmotorische Fahrzeuge:** In der Technologiedatenbank werden konventionelle verbrennungsmotorische Fahrzeuge (ICEV) mit Diesel- und Otto-Motorisierung und differenziert nach den Kraftstoffarten Diesel und CNG berücksichtigt. Zur Kategorie der konventionellen SNF (Diesel, CNG) gehören auch Hybridfahrzeuge. Hybrid elektrisches Fahren wird hier als

Effizienztechnologie des konventionellen SNF angesehen und daher nicht als zusätzliches Antriebskonzept konfiguriert, da Hybridfahrzeuge ausschließlich auf konventionellen Kraftstoffen basieren.

- **Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV):** Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb.
- **Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (PHEV):** Fahrzeuge mit Hybridantrieb, der über eine Möglichkeit der Batterieladung über das Stromnetz verfügt.
- **Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV):** Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb, die die elektrische Antriebsenergie aus einer mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle im Fahrzeug beziehen.
- **Oberleitungsgebundene Fahrzeuge (OC-GIV)¹¹:** Fahrzeuge mit (teil-)elektrischem Antrieb, die die elektrische Antriebsenergie über die direkte Stromabnahme von einer Oberleitung während des Fahrzeugbetriebs beziehen. Bei Hybridkonzepten besteht ferner die Möglichkeit bei fehlender Oberleitung den Antrieb temporär durch einen konventionellen Verbrennungsmotor bereitzustellen.

Die fünf dargestellten Antriebskonzepte eignen sich aufgrund unterschiedlicher Nutzungsarten jedoch nicht für alle berücksichtigten Fahrzeugkategorien. Bei Fahrzeugen mit hohen spezifischen Energieverbräuchen und hohen Fahrleistungen stellt beispielsweise eine batterieelektrische Konfiguration aufgrund der in diesem Fall benötigten Größe der Energiespeicher keine geeignete Option dar. Ebenso ist eine Elektrifizierung des gesamten Straßennetzes für den Betrieb von Oberleitungsfahrzeugen aufgrund der hohen Infrastrukturkosten unwahrscheinlich. Oberleitungsgebundene Fahrzeuge spielen deshalb lediglich in den Fahrzeugkategorien eine Rolle, in denen regelmäßig ein Großteil der Fahrleistung auf den Bundesautobahnen erbracht wird. Eine Übersicht der berücksichtigten Antriebskonzepte je Fahrzeugkategorie wird in Tabelle 5-3 gegeben.

5.3. Basisfahrzeuge

Die im Folgenden dargestellten Basisfahrzeuge bilden typische Fahrzeugkonfigurationen für die jeweiligen Anwendungsfälle im Jahr 2010 ab und dienen als Ausgangspunkt für die Ableitung möglicher zukünftiger Konfigurationen. In der Technologiedatenbank für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) wird zwischen Lastkraftwagen, Linien- und Reisebussen unterschieden. Lastkraftwagen werden anhand des zulässigen Gesamtgewichts (zGG) in drei weitere Klassen unterschieden, so dass insgesamt folgende sechs Fahrzeugtypen in der Technologiedatenbank berücksichtigt werden.

- Lkw $\leq 7,5$ t,
- Lkw $> 7,5$ -12 t,
- Lkw > 12 t,
- Lastzug/Sattelzug ≤ 40 t,
- Linienbus und
- Reisebus.

¹¹ OC-GIV: overhead catenary grid-integrated vehicle

Der Kraftstoffverbrauch und auch die Maßnahmenwirkung einzelner Technologien hängen innerhalb einer Größenklasse stark vom Einsatzprofil ab. Der innerstädtische Verteilverkehr ist beispielsweise gekennzeichnet von niedrigen Geschwindigkeiten und einer hohen Anzahl von Stopps. Im Güterfernverkehr hingegen überwiegt eine kontinuierliche Fahrt mit hohen Geschwindigkeiten. Zudem existieren bei schweren Nutzfahrzeugen eine Vielzahl an unterschiedlichen Konfigurationsmöglichkeiten der Fahrzeuge z. B. hinsichtlich der Fahrerkabine oder der Aufbauten, weshalb es derzeit auch keinen einheitlichen Standard zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauches gibt.

Vereinfachend wird den oben genannten Nutzfahrzeugen für den Güterverkehr in der Technologiedatenbank ein konkretes Nutzungsprofil zugeordnet. Die Lkw mit einem zGG bis 12 t werden dem städtischen Verteilverkehr, die Lkw > 12 t dem regionalen Verkehr und die Last- und Sattelzüge dem Fernverkehr zugerechnet. Diese Zuordnung orientiert sich an den Basisfahrzeugen der Studie „European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles“ (TIAX 2011). Die gewählte Zuordnung entspricht zudem zu einem großen Teil den Annahmen zu den Haupteinsatzbereichen in AEA/Ricardo (2011)¹². In der Praxis werden hingegen auch Lkw mit einem zGG deutlich über 12 t im städtischem Verteilverkehr eingesetzt bzw. findet auch Fernverkehr mit deutlich kleineren Fahrzeugen statt. Tabelle 5-1 verdeutlicht dies auf Basis einer Auswertung der Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) aus dem TREMOD-Modell. Für alle Solo-Lkw wird im TREMOD-Modell ungefähr ein Drittmix auf die Straßenkategorien Autobahn, Außerortsstraßen und Innerortsstraßen unterstellt. Bei den Last- und Sattelzügen hingegen werden demnach rund zwei Drittel der Fahrleistung auf Autobahnen und ein weiteres Viertel auf Außerortsstraßen erbracht. Laut TREMOD (Version 5.4) wird mit rund 92 % der Großteil der Güterverkehrsleistung (Tonnenkilometer) mit Fahrzeugen der Kategorie Lastzug/Sattelzug ≤ 40 t erbracht. Demzufolge scheint die in der vorliegenden Studie gewählte vereinfachte Herangehensweise vertretbar.

Tabelle 5-1: Fahrleistungsanteile der Fahrzeugkategorien differenziert nach Straßenkategorie im Jahr 2010

	AB [%]	AO [%]	IO [%]
Lkw ≤ 7,5 t	31%	34%	35%
Lkw > 7,5 t – 12 t	30%	34%	36%
Lkw > 12 t	31%	34%	35%
Lastzug/ Sattelzug ≤ 40 t	68%	24%	8%
Linienbus	6%	35%	59%
Reisebus	35%	54%	11%

Quelle: TREMOD v. 5.4

Tabelle 5-2 führt die Fahrzeugspezifikationen wie Motorleistung, Gesamtkosten und Energieverbrauch auf. Für die Kraftstoffverbräuche der dieselbetriebenen Basisfahrzeuge wurde auf die Angaben im TREMOD-Modell (v. 5.25) zu Neuzulassungen aus dem Jahr 2010 zurückgegriffen¹³. Für die erdgasbetriebenen Fahrzeuge wurde entsprechend der Empfehlungen aus dem Fachworkshops von einem um 10 % höheren Energieverbrauch ausgegangen (SNF-Workshop 2013). Die Gesamtkosten der Basisfahrzeuge (Diesel) wurden aus Lastauto Omnibus-

¹² Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy

¹³ Bei den Linienbussen entspricht der Verbrauch den in 2009 neu zugelassenen Fahrzeugen.

Katalog (2011) abgeleitet. In der darin enthaltenen Fahrzeugkostenrechnung auf Basis der DEKRA-CARCOST-Datenbank werden Kaufpreise netto in Euro dargestellt (Marktpreis Minimum und Maximum, abhängig von Ausstattung, ohne MwSt.), anhand derer die mittleren, in Tabelle 5-2 aufgeführten, Kosten abgeleitet wurden. Die aufgeführten Kosten beinhalten die Aufbauten und/oder Anhänger und stehen stets für eine Beispielkonfiguration. Bei den Linienbussen wurden die drei in TREMOD enthaltenen Größenklassen zusammengefasst, die Fahrzeugkategorie stellt somit eine Mischform aus Kleinbussen, Standardbussen und Gelenkbussen dar, entsprechen aber in der Konfiguration am ehesten den 12 m-Standardbussen.

Tabelle 5-2: Fahrzeugspezifikationen, Energieverbrauch und Kosten der Basisfahrzeuge ICEV im Jahr 2010.

	Lkw ≤ 7,5 t	Lkw >7,5 t –12 t	Lkw > 12 t	Lastzug/ Sattelzug ≤ 40 t	Linienbus	Reisebus
Kraftstoff	Diesel/ CNG	Diesel/ CNG	Diesel/ CNG	Diesel/ CNG	Diesel/ CNG	Diesel/ CNG
Motorleistung [kW]	110	130	200	320	220	320
Energieverbrauch Diesel [l/100 km]	12,3	17,5	25,8	30,3	41,2	29,8
Energieverbrauch CNG [kg/100 km]	10,8	15,2	22,4	26,4	35,8	26,0
Gesamtkosten (Diesel- variante) [€2010]	40.000	50.000	65.000	102.000	250.000	270.000

Quelle: u.a. eigene Berechnungen, Lastauto Omnibus-Katalog (2011); TREMOD 5.25

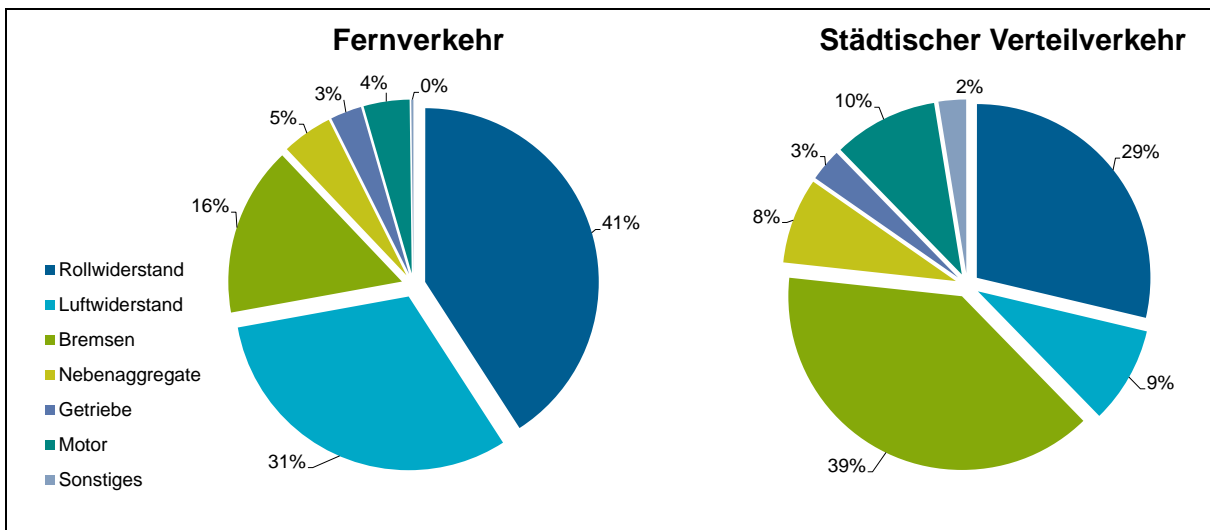
5.4. Langfristige Entwicklung der Fahrzeugtechnologien

In der Technologiedatenbank werden Effizienztechnologien für schwere Nutzfahrzeuge mit ihren Energieeinsparpotenzialen, Kosten und dem Zeitpunkt des voraussichtlichen Markteintritts aufgeführt, um daraus Kostenkurven abzuleiten (vgl. Kapitel 3). Die in der Technologiedatenbank enthaltenen Effizienzmaßnahmen für schwere Nutzfahrzeuge und deren Minderungspotenziale, Kosten und mögliche Markteinführung basieren im Wesentlichen auf Literaturangaben. Hauptquelle stellen die Studien *“Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy”* (AEA/Ricardo 2011) und *“European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles”* (TIAX 2011) dar, die Minderungspotenziale für verschiedene Fahrzeugkategorien bzw. Einsatzprofile beinhalten. Weiterhin wurden die getroffenen Annahmen und Zwischenergebnisse im Rahmen eines Fachworkshops zu Lkw-Technologien (vgl. Kapitel 2.3.3) mit Vertretern der Fahrzeug- und Komponentenhersteller sowie aus dem Bereich Forschung und Wissenschaft diskutiert und im Anschluss teilweise überarbeitet (SNF-Workshop 2013). Darüber hinaus wurden telefonische Experteninterviews durchgeführt, um Unsicherheiten auszuräumen und den teilweise nicht einheitlichen Einschätzungen der Experten gerecht zu werden.

Die in der Technologiedatenbank betrachteten Effizienztechnologien zur Reduktion der Fahrwiderstände adressieren eine Verbesserung der Aerodynamik, eine Verringerung der Rollwiderstände und die Verringerung des Fahrzeuggewichts. Diese Effizienztechnologien können unabhängig vom Antriebssystem eingesetzt werden (siehe Kapitel 5.4.1). Effizienzmaßnahmen am konventionellen Antriebsstrang umfassen u. a. innermotorische Maßnahmen zur Erhöhung des Motorwirkungsgrades, Optimierung der Nebenaggregate und verschiedene Formen einer Hybridisierung (siehe Kapitel 5.4.2).

Die Höhe des Minderungspotenzials verschiedener Effizienztechnologien hängt stark mit dem Einsatzprofil eines Fahrzeuges zusammen. Abhängig vom Einsatzprofil schwerer Nutzfahrzeuge besitzen unterschiedliche Faktoren einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Abbildung 5-1 verdeutlicht dies am Beispiel eines Last-/Sattelzugs¹⁴ auf Basis von Berechnung der TU Graz (Hausberger 2013). Dargestellt ist die Verteilung der Verluste der vom Motor bereitgestellten Energie. Der Anteil des Luftwiderstands beträgt beim Fernverkehr aufgrund der hohen Geschwindigkeiten über 30 %, im städtischen Verteilverkehr dagegen nur etwa 9 %. Maßnahmen zur Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften haben demzufolge im Verteilverkehr deutlich geringere Einsparpotenziale als im Fernverkehr. Auf der anderen Seite geht im städtischen Verteilverkehr mit rund 40 % ein sehr großer Anteil der Energie bei Bremsvorgängen verloren, welche durch eine Hybridisierung mit Rekuperation teilweise zurückgewonnen werden kann. Die prozentuale Einsparung durch Rekuperation fällt im Fernverkehr deutlich geringer aus als im Verteilverkehr. Dennoch kann die jährliche Gesamteinsparung an Kraftstoff aufgrund der höheren Fahrleistung im Fernverkehr größer als im Verteilverkehr ausfallen.

Abbildung 5-1: Energieverluste eines schweren Lkw (~ 40 t zGG) mit 75 % Auslastung im Fernverkehr und im städtischen Verteilverkehr (Berechnungen: TU-Graz, basierend auf HBEFA Daten mit HDV-CO₂ Testzyklen)



Quelle: Hausberger (2013)

Durch den durchgeführten Fachworkshop wurde deutlich, dass es aus heutiger Perspektive eine Reihe von Hemmnissen gibt, Effizienztechnologien zu implementieren, da diese nicht allein durch Fahrzeugkosten getrieben sind. So stellt bspw. schon ein geringer Nutzlastverlust durch Effizienzmaßnahmen für viele Fahrzeugbetreiber ein Ausschlusskriterium dar (SNF-Workshop 2013). In der Technologiedatenbank konnte nicht auf all diese Hemmnisse eingegangen werden. Stattdessen wurde davon ausgegangen, dass zukünftig politische Lösungen umgesetzt werden, um diese Hemmnisse zu beseitigen. Ein aktuelles Beispiel für eine politische Lösung zur Beseitigung von Nutzungsrestriktionen durch Effizienztechnologie stellt ein aktueller Vorschlag der EU-Kommission dar (EU Kommission 2013). Der Vorschlag sieht vor, bei bestimmten Fahrzeugen die zulässige Fahrzeuglänge bzw. das zulässige Fahrzeuggewicht zu erhöhen, um einen Verlust

¹⁴ Berechnungen der TU-Graz, basierend auf HBEFA Daten mit HDV-CO₂ Testzyklen; Auslastung: 75 %,

von Laderaum und Nutzlast durch Maßnahmen zur Verringerung des Luftwiderstands durch aerodynamische Heckklappen oder der Hybridisierung des Antriebsstranges zu vermeiden.

5.4.1. Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstands

In den Fahrzeugkategorien **Lkw $\leq 7,5 t$** und **Lkw $> 7,5 t - 12 t$** , welche den städtischen Verteilverkehr repräsentieren, liegen die größten Einsparpotenziale bei Maßnahmen zur Verringerung des Rollwiderstandes. Darunter fallen beispielsweise Leichtlaufreifen, Super-Single-Bereifung an den Hinterachsen und die automatische Reifendruckanpassung. Für diese Maßnahmen werden in der Datenbasis Einsparungen von rund 5 % veranschlagt. Weitere Effizienzpotenziale können mit Leichtbau-Maßnahmen zur Verringerung des Fahrzeuggewichts erschlossen werden, welche in der Technologiedatenbank mit moderaten Einsparpotenzialen von rund 2 % veranschlagt werden.

Aufgrund der höheren Geschwindigkeiten im regionalen Verkehr, welcher in der Technologiedatenbank durch die Fahrzeugkategorie **Lkw $> 12 t$** abgebildet wird, besitzen in dieser Kategorie neben den beschriebenen Maßnahmen auch Maßnahmen zur Verringerung des Luftwiderstandes eine größere Bedeutung. Die dafür veranschlagte Verbrauchsminderung liegt bei über 10 %. Zudem ist das Einsparpotenzial durch eine Verringerung des Rollwiderstandes in dieser Fahrzeugkategorie etwas höher als bei den Fahrzeugen des städtischen Verteilverkehrs. Ähnliches gilt auch für die Kategorie **Lastzug/Sattelzug $\leq 40 t$** , welche den Güterfernverkehr repräsentiert. Die Einsparpotenziale im Bereich Rollwiderstand fallen sogar noch etwas größer aus als im Regionalverkehr.

Dagegen werden in der Kategorie **Linienbus** die größten Einsparungen durch Leichtbaumaßnahmen erzielt (6 %). Bei **Reisebussen** entsprechen die Minderungspotenziale durch Effizienztechnologien zur Reduzierung der Fahrwiderstände im Wesentlichen denen im regionalen Verkehr, lediglich für eine Verringerung des Luftwiderstandes werden kaum weitere Potentiale gesehen.

Maßnahmen an der Fahrzeugplattform führen auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen zu geringeren Energieverbräuchen. Da für diese Fahrzeuge in der Technologiedatenbank eine fixe Reichweite vorgegeben ist, reduziert sich durch die entstehenden Verbrauchsminderungen die benötigte Batteriegröße und damit das Batteriegewicht. Das Mindergewicht der Batterie führt in diesem Fall zu einer weiteren Energieeinsparung, batterieelektrische Fahrzeuge profitieren deshalb überproportional von konventionellen Effizienztechnologien.

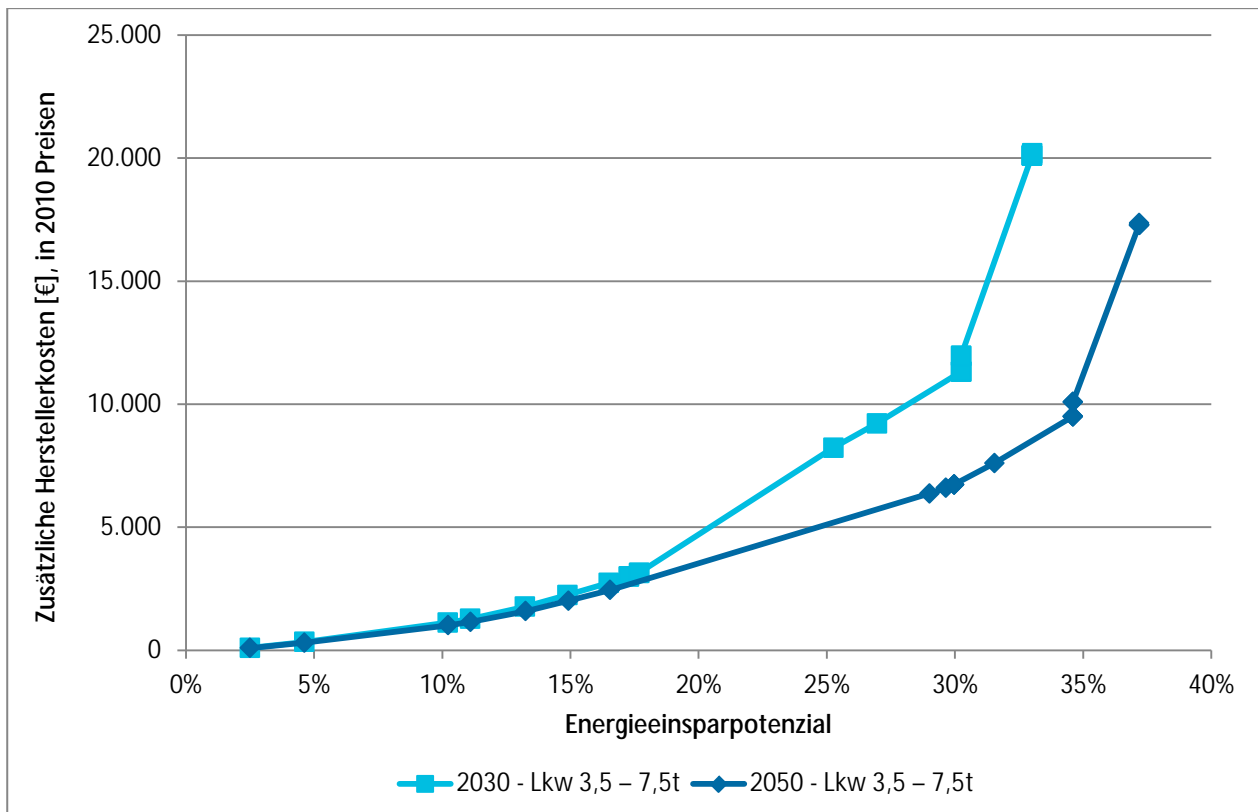
5.4.2. Konventionelle Antriebstechnologien

Schwere Nutzfahrzeugen werden überwiegend mit Dieselmotor betrieben, welche heute bereits einen relativ hohen Wirkungsgrad aufweisen. Dennoch werden auch bei diesen Motoren noch innermotorische Effizienzmaßnahmen wie z. B. höhere Zylinderdrücke und höhere Drücke bei der Einspritzung gesehen, welche mittelfristig den Gesamtwirkungsgrad des Motors um einige Prozentpunkte erhöhen könnten. Moderne Dieselmotoren liegen im Bestpunkt heute bereits bei einem Wirkungsgrad von 45 %, dieser könnte langfristig auf über 48 % steigen. Daneben bieten eine Reihe von Konzepten zur Hybridisierung teilweise hohe Einsparpotenziale. Besonders hoch fällt das relative Einsparpotenzial durch eine Vollhybridisierung bei Fahrprofilen mit einer hohen Anzahl Stopps und sehr häufigen Beschleunigen bzw. Verzögern wie bspw. bei Linienbussen oder im städtischen Verteilverkehr aus. Im Praxiseinsatz von Hybridbussen konnten nach ersten Schwierigkeiten Einsparpotenziale von über 20 % realisiert werden (HC/ Öko-Institut/ TU-Berlin 2013; 2014). Trotz der niedrigeren prozentualen Minderung im Güterfernverkehr von rund 7 %

dürfte sich mittelfristig die Hybridisierung auch dort durchsetzen, da die hohen Fahrleistungen zu größeren absoluten Kraftstoffeinsparungen führen (SNF-Workshop 2013). Besonders kosteneffizient sind elektronische Systeme zur Unterstützung einer effizienten Fahrweise, welche bspw. die Verkehrssituation sowie die Topographie berücksichtigt, eine Elektrifizierung der Nebenaggregate und die bedarfsgerechte Steuerung der Kompressoren. Technologien zur Energierückgewinnung aus dem Abgas dürften bei zunehmendem Motorwirkungsgrad niedrigere Einsparpotenziale bei relativ hohen Kosten aufweisen.

In Hinblick auf den Fahrzeugeinsatz stellt sich der konventionelle Dieselantrieb insbesondere im Güterfernverkehr unter den aktuellen Rahmenbedingungen als besonders vorteilhaft dar. Große Tanks und die hohe Energiedichte des Kraftstoffs ermöglichen bei Last- und Sattelzügen Reichweiten von bis zu 3.000 km je Tankfüllung. Dies ermöglicht es, die Kraftstoffkosten durch die geeignete Wahl der Tankstelle (z. B. an eigenen Betriebstankstellen bzw. in EU-Ländern mit geringen Kraftstoffsteuern) zu minimieren. Den Teilnehmern des Workshops zu Folge könnte daher eine geringe Reichweite von Alternativtechnologien ein großes Hemmnis für deren Markteinführung darstellen, welchem jedoch durch eine Harmonisierung der europäischen Kraftstoffkosten entgegengewirkt werden könnte.

Abbildung 5-2 zeigt Kostenkurven für die Jahre 2030 und 2050 am Beispiel der Fahrzeugkategorie Diesel-Lkw 3,5 - 7,5t. Aus der Abbildung wird deutlich, dass mit zunehmender Fahrzeugeffizienz die Erschließung weiterer Potentiale zu höheren Kosten führt, da dann auch weniger kosteneffiziente Maßnahmen berücksichtigt sind. Das maximal erzielbare Energieeinsparpotenzial steigt bis zum Jahr 2050 gegenüber 2030 weiter an, wobei die dafür notwendigen zusätzlichen Herstellungskosten sinken. Eine Unsicherheit ist in eben dieser Kostenentwicklung zu sehen, da die veranschlagte Batteriepreisentwicklung (bei der Hybridisierung) und die veranschlagte Kostendegression bei den weiteren Effizienztechnologien einen Massenmarkt voraussetzen. Weiterhin können sich bei den schweren Nutzfahrzeugen aufgrund der im Vergleich zu den Pkw geringen Absatzzahlen höhere Entwicklungs- und Werkzeugkosten bezogen auf ein Fahrzeug ergeben, die in der Kostenkurve nicht abgebildet sind. Auf der anderen Seite sind lediglich heute bekannte Effizienzmaßnahmen berücksichtigt, zukünftig könnten die Potentiale möglicherweise durch neuartige und kostengünstigere Effizienzmaßnahmen erschlossen werden, welche in den dargestellten Kostenkurven nicht berücksichtigt sind.

Abbildung 5-2: Kostenkurven für Diesel-Lkw 3,5 - 7,5t

Quelle: eigene Darstellung

5.4.3. Alternative Antriebstechnologien

Die berücksichtigten alternativen Antriebstechnologien entsprechen mit Ausnahme der oberleitungsgebundenen Fahrzeuge (OV-GIV) weitestgehend den in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Antriebskonzepten. Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über die in den Szenarien und Sensitivitätsanalysen betrachteten alternativen Antriebstechnologien für die gewählten Fahrzeugkategorien. Eine bei den Pkw nicht betrachtete Technologie stellt der elektrische Betrieb von Fahrzeugen mittels Stromversorgung über eine Oberleitung dar (OC-GIV), die bei den Last- und Sattelzügen sowie den Reisebussen betrachtet wird.

Tabelle 5-3: Antriebstechnologien in verschiedenen Fahrzeugkategorien

	ICEV (Diesel)	ICEV (CNG)	PHEV	BEV	FCEV	OC-GIV
Lkw 3,5 – 7,5t	x	x	x	x	x	
Lkw >7,5 -12 t	x	x	x	x	x	
LKW > 12 t	x	x	x	x	x	
LZ/SZ ≤ 40 t	x	x	x		x	x
Linienbus	x	x	x	x	x	
Reisebus	x	x	x		x	x

Quelle: eigene Darstellung

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Unter Energieeffizienzgesichtspunkten stellt der batterieelektrische Antrieb prinzipiell auch bei Nutzfahrzeugen eine attraktive Option dar. Mit zunehmender Fahrzeuggröße und Tagesfahrleistungen werden jedoch für die technische Umsetzbarkeit Anforderungen an die Batterietechnologie gestellt, die auch mittelfristig nicht erfüllt werden können. Bei Nutzfahrzeugen mit geringerer Fahrleistung ergibt sich jedoch im Vergleich zu Pkw der Vorteil, dass die Fahrzeuge zu einem großen Teil nicht auf eine öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen sind, da sie auf eigenen Betriebshöfen abgestellt werden (KID 2010). Der Einsatz könnte demnach zumindest teilweise auch unabhängig vom Ausbauerfolg der öffentlichen Ladeinfrastruktur erfolgen.

In der Technologiedatenbank werden die Fahrzeugkategorien Lkw $\leq 7,5$ t, Lkw $> 7,5 - 12$ t und Linienbusse als BEV betrachtet, da für diese Anwendungen eine ausreichende Reichweite erzielt werden kann. Bei Linienbussen wird davon ausgegangen, dass die Reichweite durch Zwischenladen im Tagesverlauf (z. B. an den Endhaltestellen) vergrößert wird. In den Kategorien Lkw > 12 t, Lastzug/ Sattelzug ≤ 40 t und Reisebus würde ein BEV eine zu große Batterie benötigen was kostenseitig nicht darstellbar wäre und zu einem erheblichen Zusatzgewicht – und damit ggf. Nutzlastverlust – führen würde, weshalb diese Kategorien nicht als BEV betrachtet werden.

Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die in der Technologiedatenbank für die verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen veranschlagten elektrischen Reichweiten.

Tabelle 5-4: Übersicht über die elektrische Reichweite von schweren Nutzfahrzeugen als BEV und PHEV in Kilometern

	BEV	PHEV
Lkw $\leq 7,5$ t,	150	100
Lkw $> 7,5$ t – 12 t,	150	100
Lkw > 12 t,		100
Lastzug/ Sattelzug ≤ 40 t		20
Linienbus	100	20
Reisebus		20

Quelle: eigene Annahmen

Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (PHEV)

Das Plug-in-Hybridfahrzeug wird in der Technologiedatenbank für schwere Nutzfahrzeuge mit einem konventionellen und elektrischen Antriebsstrang sowie einem Dieseltank und einer Batterie als Speichertechnologien berücksichtigt.

Im Vergleich zu BEV ist die elektrische Reichweite von PHEV in den Fahrzeugklassen Lkw $\leq 7,5$ t und Lkw $> 7,5$ t – 12 t wesentlich geringer und an durchschnittliche Tagesgänge angepasst. In den Fahrzeugkategorien Last-/Sattelzug ≤ 40 t, Linienbus und Reisebus liegt die elektrische Reichweite bei lediglich 20 km. Diese Fahrzeuge erbringen den Großteil der Fahrleistung im Dieselmotorbetrieb, sollen aber die Möglichkeit besitzen rein elektrisch in emissionsfreien Innenstädten betrieben zu werden. Die benötigte Batteriekapazität ist geringer als bei BEV und die Batteriekonfiguration leistungsorientierter ausgerichtet. Der Energieverbrauch im rein elektrischen Fahrmodus liegt im Bereich des BEV und der Verbrauch im konventionellen hybriden Fahrmodus im Bereich des HEV (Vollhybrid). Aufgrund des höheren Batteriegewichts beim PHEV gegenüber dem HEV kann der

konventionelle Energieverbrauch geringfügig über dem des HEV liegen. Insgesamt ist der Tank-to-Wheel Wirkungsgrad geringer gegenüber dem BEV, aber wesentlich höher im Vergleich zum HEV.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

Das Antriebssystem der Brennstoffzellenfahrzeuge bei schweren Nutzfahrzeugen entspricht im Wesentlichen der Ausgestaltung bei Pkw ist jedoch an die höheren Leistungsanforderungen angepasst. Es besteht aus einem elektrischen Motor, einem Brennstoffzellensystem, einem Wasserstofftank sowie einer Batterie. Brennstoffzellensysteme produzieren Strom mit dem Wasserstoff und dem Sauerstoff aus der Luft und treiben damit den elektrischen Motor an. Der Vorteil liegt gegenüber BEV in größerer Reichweiten und schnellerer Tankvorgänge. Allerdings führen die Komponenten zu hohen Kosten und die Haltbarkeit der Brennstoffzelle ist bisher eingeschränkt (Pollet 2012). Der well-to-wheel Wirkungsgrad von FCEV wird als geringer gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen eingeschätzt. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge mit hoher Jahresfahrleistung stellt zudem die eingeschränkte Lebensdauer der Brennstoffzelle ein Hemmnis für die Markteinführung dar.

Oberleitungsgebundene Fahrzeuge (OC-GIV)

Oberleitungsfahrzeuge verfügen ebenfalls über einen elektrischen Antrieb und werden auch als *Trolley-Trucks* und *-Busse* bezeichnet. Die elektrische Energie wird dabei mittels eines Stromabnehmers von einer über der Fahrbahn installierten Oberleitung bezogen. Bei den O-Bussen ist dies eine erprobte Technologie, bei anderen Fahrzeugkategorien findet derzeit keine relevante Anwendung statt. Oberleitungs-Lkw befinden sich derzeit jedoch im Praxistest (Siemens 2012).

In der Technologiedatenbank sind OC-GIV als Hybridfahrzeuge ausgestaltet und besitzen neben dem Elektroantrieb einen vollwertigen Dieselantrieb, so dass ein oberleitungsfreies Fahren möglich ist. Zudem sind sie mit einer Batterie als Energiespeicher ausgestattet, so dass auch ohne Verbindung zur Oberleitung Rekuperation durchgeführt werden kann. Grundsätzlich wäre auch eine Konfiguration ohne Energiespeicher denkbar, wodurch die Fahrzeugkosten niedriger ausfallen würden. Dies scheint jedoch wenig plausibel, da in diesem Fall im konventionellen Betrieb keine Rekuperation durchgeführt werden könnte, obwohl mit dem vorhandenen elektrischen Antriebsstrang bereits Großteile der Voraussetzungen dafür erfüllt wären. Aufgrund hoher Investitionskosten auf Seite der Infrastruktur ist davon auszugehen, dass lediglich die besonders relevanten Bundesautobahnen mit einer Oberleitung ausgestattet werden (SRU 2012). In der Technologiedatenbank werden deshalb lediglich die beiden Fahrzeugkategorien Lastzug/Sattelzug ≤ 40 t und Reisebus, die regelmäßig hohe Fahrleistungen auf Autobahnen erbringen, als OC-GIV dargestellt.

Vorteile der OC-GIV sind der niedrigen Tank-To-Wheel Energieverbrauch im elektrischem Betrieb und die Möglichkeit durch elektrisches Bremsen zurückgewonnene elektrische Energie zwischen zu speichern oder direkt zurück ins Netz zu speisen. Im konventionellen Betrieb wird in der Technologiedatenbank von einem den vollhybridisierten Fahrzeugen entsprechendem Kraftstoffverbrauch ausgegangen.

5.4.4. Komponenten alternativer Antriebe

Die technologischen Potenziale und die Kosten der Batterietechnologien und Brennstoffzellensysteme sowie von Elektromotor und Steuerung, Antriebsstrang und Wasserstofftank wurden bereits in Kapitel 4.4.4 ausführlich diskutiert. Grundsätzlich werden entsprechende Entwicklungen auch bei den schweren Nutzfahrzeugen angenommen. Dieser Abschnitt zeigt die Bereiche auf, bei denen von einer abweichenden Entwicklung ausgegangen

werden kann und führt die für die Technologiedatenbank getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Komponenten bis zum Jahr 2050 auf.

Batterietechnologie

Das Vorgehen und die Annahmen hinsichtlich der Batterieentwicklung bei schweren Nutzfahrzeugen entsprechen bis auf die Batteriekosten im Wesentlichen dem Vorgehen für Pkw in Kapitel 4.4.4. Allerdings wurde beim Fachworkshop deutlich, dass für schwer Nutzfahrzeuge mit deutlich höheren Kosten zu rechnen ist. Während bei Pkw Batteriekosten in 2010 in Höhe von 590 €/kWh veranschlagt wurden (20 kWh Batterie) betragen diese für den Nutzfahrzeugsbereich etwa 1.000 €/kWh. Ein Grund dafür ist bspw. in aufwendigen Batterietests bei gleichzeitig geringer Anzahl abgesetzter Fahrzeuge zu sehen. In der Technologiedatenbank wurde dies berücksichtigt, indem die relativen Mehrkosten auch in den Jahren 2020 – 2050 aufgeschlagen wurden. Eine Unterscheidung der spezifischen Kosten für Batterien unterschiedlicher Größe wurde im Gegensatz zu den Pkw aufgrund der ohnehin großen Unsicherheit bei schweren Nutzfahrzeugen nicht durchgeführt. Demnach ergeben sich für die Batteriekosten bei schweren Nutzfahrzeugen die in Tabelle 5-5 dargestellten Werte.

Tabelle 5-5: Spezifische Batteriekosten (Batteriesystem), 2020 – 2050

Batterietechnologie	Spezifische Batteriekosten [€/kWh]			
	2020	2030	2040	2050
Lithium-Ionen	540	320	290	250
post-Lithium		500	380	250

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von u.a. LNF Workshop (2013), ISI (2012)

Bei gleichbleibender elektrischer Reichweite reduziert sich durch eine verbesserte Batterietechnologie mit einer höheren Energiedichte das Batteriegewicht. Dies führt zu einem niedrigeren Energieverbrauch wodurch die Kapazität der Batterie bei gleichbleibender Reichweite kleiner ausfallen kann. Dieser Zusammenhang wird in der Technologiedatenbank bei der Berechnung der Batteriekosten berücksichtigt. Unberücksichtigt bleibt hingegen die Abnahme der Batteriekapazität während der Lebensdauer der Fahrzeuge. Bei schweren Nutzfahrzeugen dürfte die Kapazität bei einer Lebensdauer von 8 Jahren auf rund 80 % am Ende der Nutzungsdauer fallen, wodurch die Reichweite entsprechend zurückgeht (SNF Workshop 2013).

Elektromotor

Bei den schweren Nutzfahrzeugen wird in der Technologiedatenbank analog zu den Pkw hinsichtlich des Wirkungsgrades eine weitere geringe Steigerung von 2,5 % bis zum Jahr 2050 unterstellt.

Die spezifischen Kosten für den Elektromotor im Basisjahr 2010 wurden Özdemir (2011) entnommen und in €₂₀₁₀/kW umgerechnet (siehe Tabelle 5-6). Hinsichtlich der Kosten ist bei schweren Nutzfahrzeugen weniger die Motorleistung als das Drehmoment (oder auch direkt die Stromstärke) der elektrischen Maschine entscheidend. Da sich die herangezogenen spezifischen Kosten auf die Motorleistung beziehen, ist die Kostenberechnung mit Unsicherheiten verbunden. Die Kosten eines Elektromotors sind stark von der Menge und den Kosten der Hauptwerkstoffen (Kupfer, Permanentmagnet, Eisen) abhängig. Da die geforderte Leistung von unterschiedlich großen Maschinen erbracht werden kann, können sich die Kosten abhängig von der Ausführung deutlich unterscheiden. Aufgrund dieser Unsicherheiten wurde in der Technologiedatenbank

gegenüber Özdemir (2011) ein Aufschlag von 25 % veranschlagt. Aufgrund des relativ geringen Anteils der Kosten des Elektromotors an den Gesamtkosten (bspw. rund 1 - 2 % bei Hybridfahrzeugen in 2010) erscheint dieses Vorgehen vertretbar.

Die Kosten des Elektromotors und der Steuerung sinken langfristig (CE Delft 2011). Die Kostendegression lässt sich auf ein besseres Design, eine effizientere Herstellung und kleinere Motoren, die benötigt werden, zurückführen (NAS 2013).

Tabelle 5-6: Spezifische Kosten der Elektromotoren [€/kW]

	2010	2020	2030	2040	2050
Elektromotor	24	23	22	21	20

Quelle: Özdemir (2011); eigene Berechnungen

Weitere (hybrid) elektrische Komponenten

Zu den weiteren Komponenten des elektrischen Antriebs bei HEV, PHEV und BEV zählen die Leistungselektronik, Steuerung, Lenkungs- und Bremssysteme und weitere Nebenaggregate sowie speziell für Hybridfahrzeuge ein Getriebe zur Zusammenführung von elektrischem und konventionellem Antrieb.

Verglichen mit den Pkw ist bei Anwendungen im Nutzfahrzeugsbereich mit einem höheren Spannungsniveau von 750 bis 900 V (Pkw: 400 V) zu rechnen, was eine leistungsfähigere und teurere Leistungselektronik voraussetzt. Die in der Technologiedatenbank veranschlagten spezifischen Kosten basieren für das Jahr 2010 auf Özdemir (2011) und sind für Fahrzeuge mit Wechselrichter (BEV, PHEV, OC-GIV) und ohne Wechselrichter (HEV, FCEV) in Tabelle 5-7 aufgeführt.

Tabelle 5-7: Spezifische Kosten von Steuerung und Leistungselektronik [€/kW]

	2010	2020	2030	2040	2050
mit Wechselrichter	26	23	21	20	19
ohne Wechselrichter	19	17	16	15	14

Quelle: Özdemir (2011); eigene Berechnungen

Daneben werden in der Technologiedatenbank für die schweren Nutzfahrzeuge weitere Komponenten wie bspw. Hilfsmotoren für die Nebenaggregate, Heizung, Lüftung, Klimatechnik (HVAC; Heating, Ventilation and Air Conditioning) und Wärmepumpe sowie bei Hybridfahrzeugen ein Getriebe zur Zusammenführung von elektrischem und konventionellem Antrieb berücksichtigt. Die Kosten für das Jahr 2010 orientieren sich dabei an denen der großen Pkw aus Mock (2011) und sind in Tabelle 5-8 aufgeführt. Bis zum Jahr 2030 wird eine Kostendegression pro Dekade von rund 10 %, für den Zeitraum von 2030 bis 2050 von rund 5 % unterstellt.

Tabelle 5-8: Absolute Kosten von der weiteren Komponenten [€]

	2010	2020	2030	2040	2050
Kosten in €	3.300	2.955	2.645	2.511	2.382

Quelle: Mock (2011); eigene Berechnungen

Brennstoffzellensystem & Wasserstofftank

In der Technologiedatenbank wird bei der Entwicklung von Kosten und Effizienz der Brennstoffzellensysteme nicht zwischen Pkw und schweren Nutzfahrzeugen unterschieden. Auch die Kostenannahmen zu den Wasserstofftanks entsprechen denen der Pkw und sind in Abschnitt 4.4.4 in Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13 dokumentiert.

Oberleitungsgebundener elektrischer Antrieb

Die in der Technologiedatenbank abgebildeten Oberleitungsfahrzeuge entsprechen bei den vorhandenen Komponenten im Wesentlichen den HEV bzw. PHEV, wobei sie darüber hinaus über einen Stromabnehmer und entsprechende Messtechnik zur Detektierung der Fahrleitung verfügen, die ein automatisiertes Anbügeln und aktives Nachführen des Stromabnehmers ermöglicht.

Da die Technik sich derzeit erst im Testeinsatz befindet, handelt es sich bei den unterstellten Kosten um Expertenschätzungen aus dem Fachworkshop. Mittelfristig können demnach Zusatzkosten durch den Stromabnehmer von 10.000 bis 15.000 € erwartet werden (SNF-Workshop 2013). In der Technologiedatenbank werden für das Jahr 2020 Kosten in Höhe von 15.000 € unterstellt, die dann ab 2030 auf 10.000 € sinken. Die Kosten für den Aufbau der Infrastruktur werden in der Technologiedatenbank nicht berücksichtigt, da diese nur Veränderungen am Fahrzeug berücksichtigt. Grundsätzlich sind die Kosten für den Aufbau und Unterhalt der Infrastruktur für den oberleitungsgebundenen Verkehr jedoch voraussichtlich mit erheblichen Kosten verbunden.

5.5. Ergebnisse: Energieverbrauch und Kosten auf Fahrzeugebene 2010 – 2050

Im Folgenden wird anhand eines beispielhaften Szenarios dargestellt, wie sich die Entwicklungen des Energieverbrauchs und der Investitionskosten für jedes Antriebskonzept bis zum Jahr 2050 darstellen kann. In einem ersten Schritt werden die Basisfahrzeuge für das Jahr 2010 hinsichtlich ihres Energieverbrauchs und der Investitionskosten aufgeführt, gefolgt von einem am Trendszenario von TREMOD (IFEU 2011) angelehnten Szenario für die Entwicklung bis zum Jahr 2050.

5.5.1. Basisfahrzeuge 2010

Tabelle 5-9 zeigt die spezifischen Energieverbräuche der in der Technologiedatenbank dargestellten Fahrzeugkategorien und Antriebssysteme. Für PHEV und OC-GIV ist jeweils der Verbrauch im konventionellen Betrieb (Diesel) und im elektrischen Betrieb aufgeführt. Die höchsten Energieverbräuche besitzen CNG-Fahrzeuge. Dieselfahrzeuge sind als Basisfahrzeug 2010 nicht hybridisiert, der Verbrauch liegt bei 10 % unter dem der Erdgasfahrzeuge mit Ottomotor. Im konventionellen Betrieb verringert sich der Energieverbrauch bei PHEV und OC-GIV gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb, da PHEV und OC-GIV durch die Hybridisierung die Möglichkeit zur Rekuperation besitzen. Besonders hoch ist die Verbrauchsminderung aufgrund der unterstellten Fahrprofile bei Linienbussen (- 20%). Der Energieverbrauch von FCEV ist noch etwas geringer, da diese durch einen Energiespeicher sowohl von der Rekuperation als auch vom im

Vergleich zum Dieselmotor höheren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs profitieren. Fahrzeuge die rein elektrisch fahren können (BEV, PHEV, OC-GIV) haben in diesem Betriebsmodus den mit Abstand niedrigsten spezifischen Endenergieverbrauch.

Tabelle 5-9: Spezifischer Energieverbrauch im Jahr 2010 differenziert nach Fahrzeugkategorie, Antriebskonzept und Betriebsart (konventionell / elektrisch)

	ICEV (Diesel)	ICEV (CNG)	PHEV (konv.)	PHEV (elektrisch)	BEV	FCEV	OC-GIV (konv.)	OC-GIV (elektrisch)
	[MJ/km]							
Lkw 3,5 – 7,5t	4,4	4,8	4,0	2,0	2,0	3,6		
Lkw > 7,5 -12 t	6,2	6,9	5,7	2,9	2,9	5,1		
LKW > 12 t	9,2	10,1	8,4	4,0	4,1	7,4		
LZ/SZ ≤ 40 t	10,8	11,9	10,1	4,6		9,1	10,1	4,5
Linienbus	14,7	16,2	11,8	5,4	5,8	10,6		
Reisebus	10,7	11,7	9,6	4,3		8,6	9,6	4,3

Quelle: eigene Berechnungen, LNF Workshop (2013), TREMOD 5.25

Die gesamten Fahrzeugkosten (brutto) für die Basisfahrzeuge in 2010 sind in Tabelle 5-10 aufgeführt. Besonders relevant sind dabei die Batteriekosten und die Kosten des Brennstoffzellensystems bei den alternativen Antriebskonzepten. Dabei sind in der Kostenberechnung die in Tabelle 5-4 aufgeführten Reichweiten zur Berechnung der Batteriekapazität unterstellt. Die Kosten für die alternativen Antriebkonzepte sind für das Jahr 2010 eher von theoretischer Natur, da sie sich teilweise noch im Vorserienstatus oder in der Entwicklung befinden. Die Mehrkosten bei den Erdgasfahrzeugen sind auf den Erdgastank zurückzuführen.

Tabelle 5-10: Investitionskosten in Euro (brutto) für die konventionellen und alternativen Antriebskonzepte im Jahr 2010

	ICEV (Diesel)	ICEV (CNG)	PHEV	BEV	FCEV	OC-GIV
	[€]					
Lkw 3,5 – 7,5t	40.000	47.374	179.103	188.261	203.718	
Lkw > 7,5 -12 t	50.000	60.681	249.616	266.427	248.307	
LKW > 12 t	65.000	80.616	344.567	364.745	318.089	
LZ/SZ ≤ 40 t	102.000	135.567	188.210		696.070	168.644
Linienbus	250.000	288.647	339.661	536.137	564.746	
Reisebus	270.000	313.607	352.574		852.595	336.060

Quelle: eigene Berechnungen

5.5.2. Entwicklung des Energieverbrauchs und der Fahrzeugkosten bis zum Jahr 2050

Anhand eines Szenarios wird im Folgenden eine mögliche Entwicklung bis zum Jahr 2050 dargestellt. Dabei werden bis zum Jahr 2030 dem Trendszenario aus dem TREMOD-Modell

folgend bis zum Jahr 2020 Effizienzsteigerungen von 8 % und bis 2030 von 20 % unterstellt (IFEU 2011). Für den Zeitraum nach 2030, welcher in TREMOD nicht betrachtet wird, werden weitere Effizienzsteigerungen veranschlagt. Im hier dargestellten *Szenario* wird für das Jahr 2040 von einem um 30 % niedrigerem spezifischen Energieverbrauch gegenüber 2010 ausgegangen, im Jahr 2050 beträgt die Effizienzsteigerung 40 % gegenüber dem Ausgangsjahr.

Der Vergleich mit anderen Studien zeigt, dass die unterstellte Reduktion des Energieverbrauchs der konventionellen Fahrzeuge durchaus als realisierbar eingeschätzt werden kann. In der TIAX Studie werden sowohl für den städtischen Verteilverkehr als auch den Güterfernverkehr bspw. Einsparpotenziale von rund 45 % dargestellt, wobei der Zeithorizont mit dem Jahr 2020 deutlich kürzer ist als im betrachteten *Szenario*. Bei den Bussen werden mit rund 40 % etwas geringere Einsparpotenziale gesehen (TIAX 2011). In einem Vortrag im Rahmen eines Workshops der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung wurde von einem Vertreter des Verband der Automobilindustrie (VDA) Einsparpotenziale von rund 30 % bis 2030 für Sattelschlepper aufgezeigt (Schuckert 2012). Vor diesem Hintergrund scheint das Fortschreiben der Fahrzeugeffizienz auf bis zu 40 % bis 2050 im hier dargestellten *Szenario* realisierbar.

Teilweise liegen die aus der Technologiedatenbank hervorgehenden maximal erzielbaren Einsparpotenziale unter der im *Szenario* veranschlagten Verbrauchsminderung (bspw. bei Last-/Sattelzug ≤ 40 t). In diesem Fall wurden die maximalen Potentiale aus der Technologiedatenbank veranschlagt. Dies hat zur Folge, dass auch sehr teure Maßnahmen mit geringem Einsparpotenzial enthalten sind.

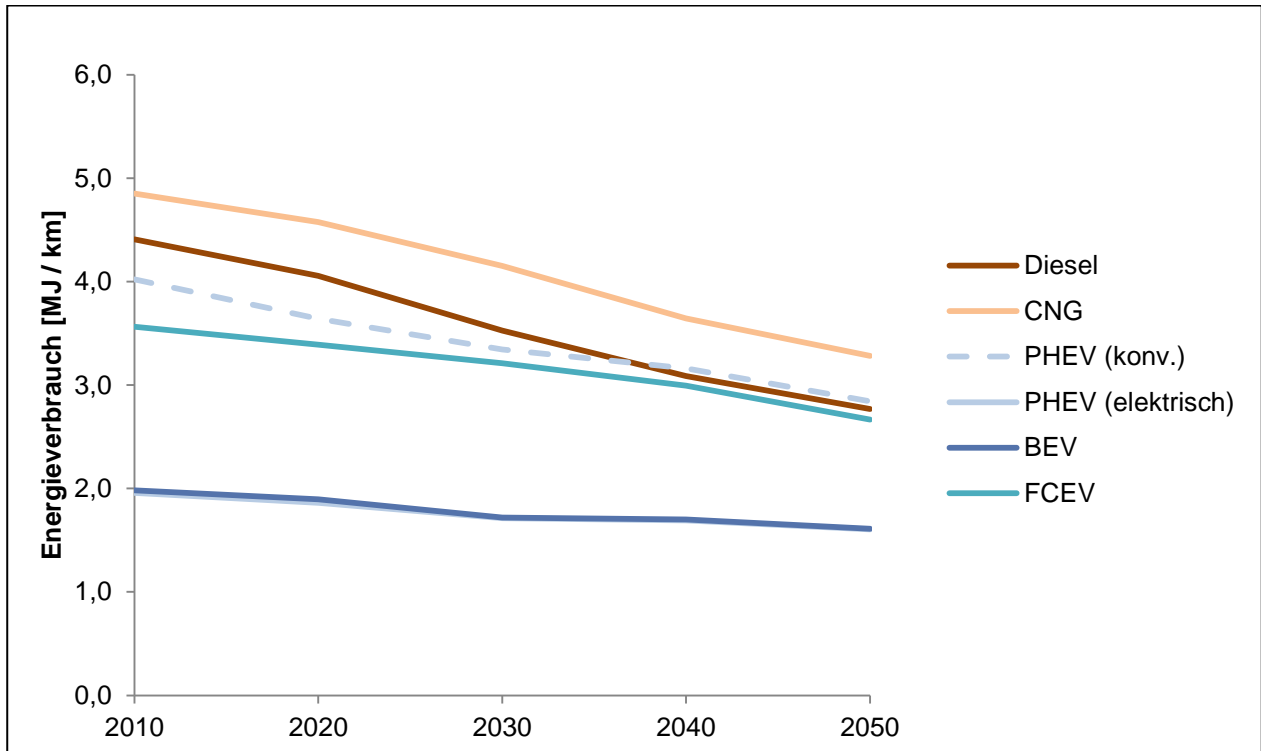
Bei Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten sind jeweils die zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden, auch bei den konventionellen Fahrzeugen eingesetzten Effizienztechnologien, berücksichtigt, sofern dies das Antriebskonzept zulässt. Die spezifischen Endenergieverbräuche sind in Abbildung 5-3, Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 beispielhaft für kleine Lkw im städtischem Verteilverkehr (Lkw 3,5 – 7,5 t); Last und Sattelzüge im Güterfernverkehr (LZ/SZ ≤ 40 t) und Linienbusse dargestellt.¹⁵ Für PHEV und OC-GIV sind jeweils die Energieverbräuche im konventionellen Betrieb (Diesel) und elektrischen Betrieb aufgeführt.

Der Energieverbrauch von Dieselfahrzeugen nähert sich dabei zunehmend dem Verbrauch von PHEV im konventionellen Betrieb an, da diese die unterstellten Effizienzsteigerungen ebenfalls durch eine Hybridisierung erreichen, wodurch sich die Antriebskonzepte schließlich lediglich durch die Größe der Batterie unterscheiden. Das höhere Batteriegewicht führt ab 2040 zu einem leicht erhöhtem Verbrauch der PHEV gegenüber hybridisierten Dieselfahrzeugen (HEV).

Der Energieverbrauch von BEV, PHEV und OC-GIV sowie FCEV sinkt über die Zeit aufgrund von Effizienztechnologien, die den Fahrwiderstand reduzieren und eines effizienteren Elektromotors.

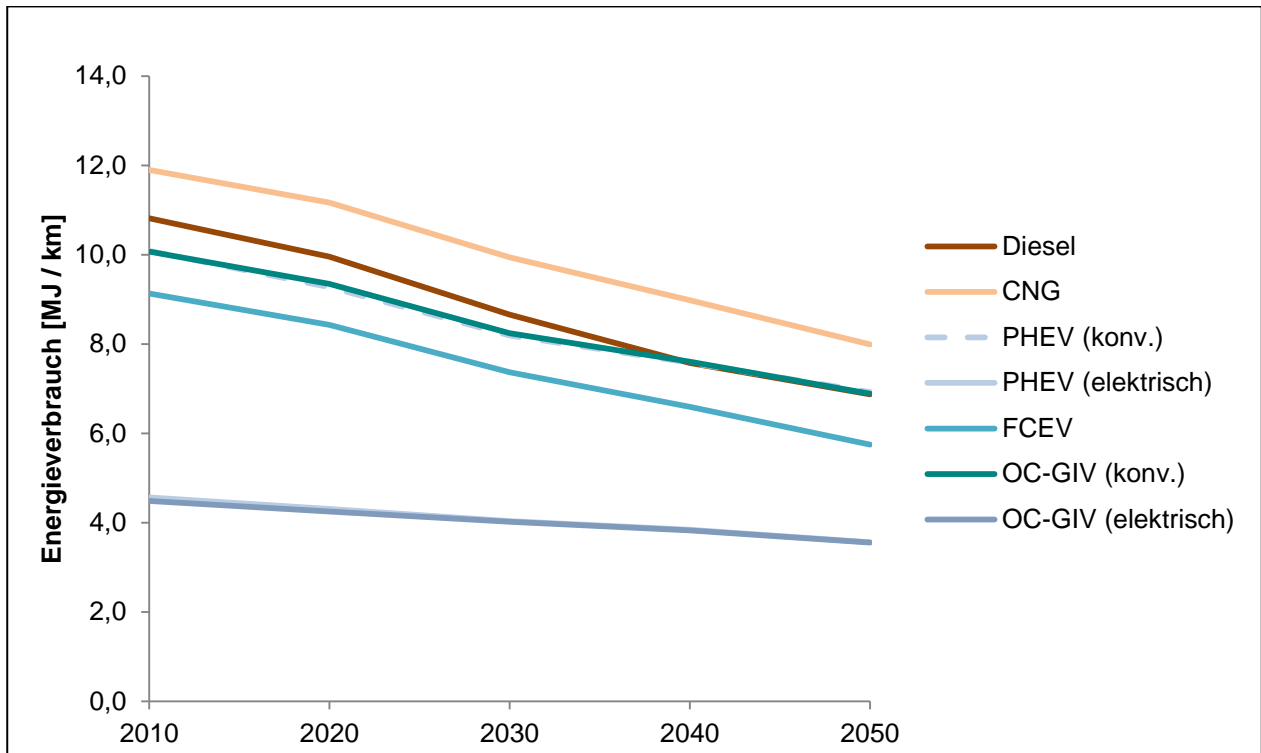
¹⁵ Die Datentabellen befinden sich in Tabelle 8-1, Tabelle 8-2 und Tabelle 8-3 im Anhang.

Abbildung 5-3: Energieverbrauch eines Lkw 3,5 – 7,5 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario



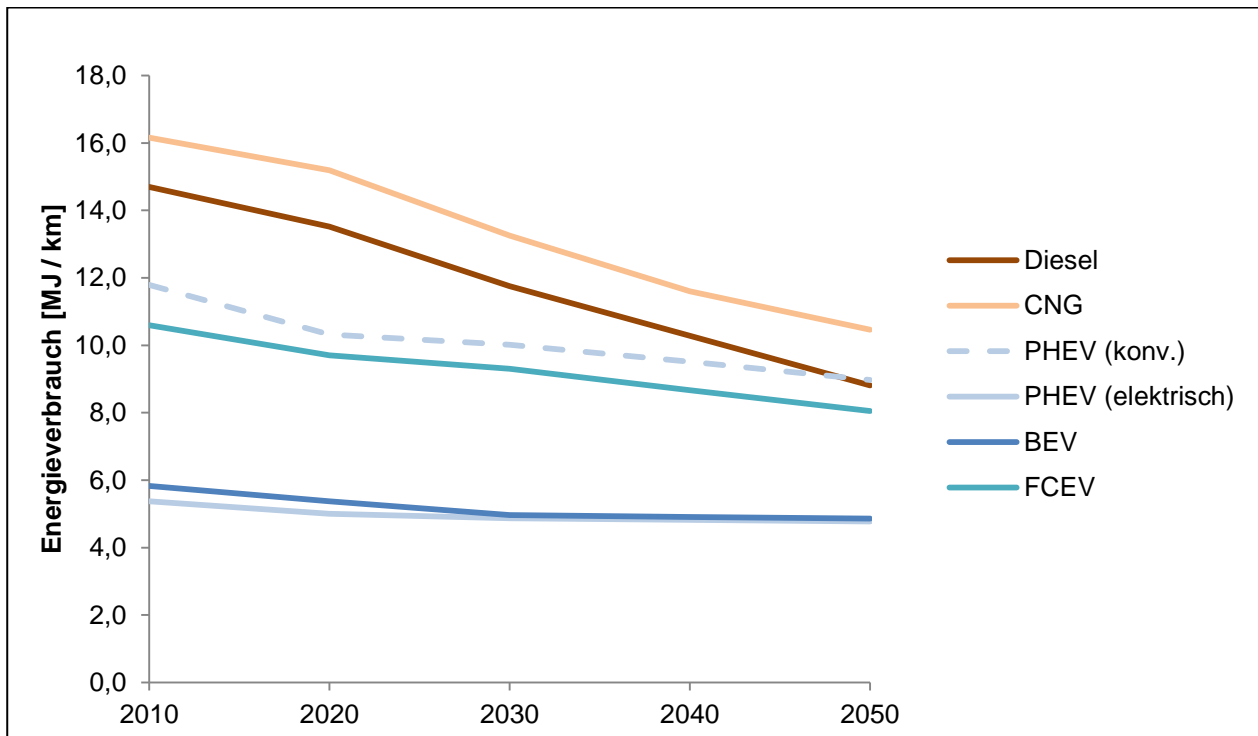
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5-4: Energieverbrauch eines LZ/SZ ≤ 40 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario



Quelle: eigene Darstellung

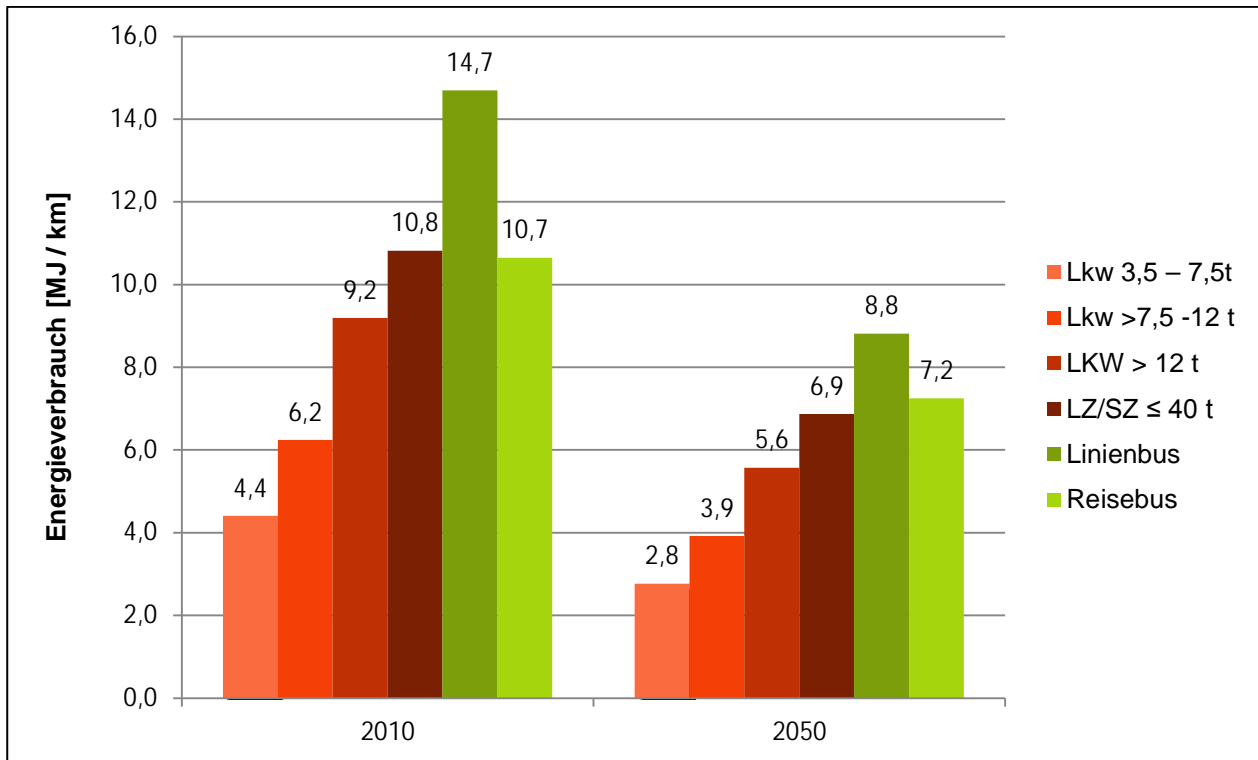
Abbildung 5-5: Energieverbrauch eines Linienbus differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario



Quelle: eigene Darstellung

Die nachfolgende Abbildung zeigt für alle betrachteten Fahrzeugkategorien den Energieverbrauch der Dieselvarianten in 2010 und 2050. Die sehr deutlichen Verbrauchsminderungen sind auf eine Reihe von Maßnahmen am Antriebsstrang sowie Maßnahmen zur Verringerung der Fahrwiderstände zurückzuführen. Alle betrachteten Kategorien sind im Jahr 2050 als Hybridvariante ausgestaltet.

Abbildung 5-6: Energieverbrauch konventioneller dieselbetriebener schwerer Nutzfahrzeuge differenziert nach Fahrzeugsegment 2010 und 2050, Szenario



Quelle: eigene Darstellung

Neben dem Einfluss auf den Energieverbrauch sind die unterstellten Effizienzmaßnahmen mit zusätzlichen Kosten verbunden. Zur Verdeutlichung werden die Investitionskosten (brutto) für die oben dargestellten Fahrzeugkategorien (Lkw 3,5 – 7,5 t, LZ/SZ ≤ 40 t und Linienbusse) in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 5-7, Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9). Alle Kosten sind in €₂₀₁₀ angegeben.

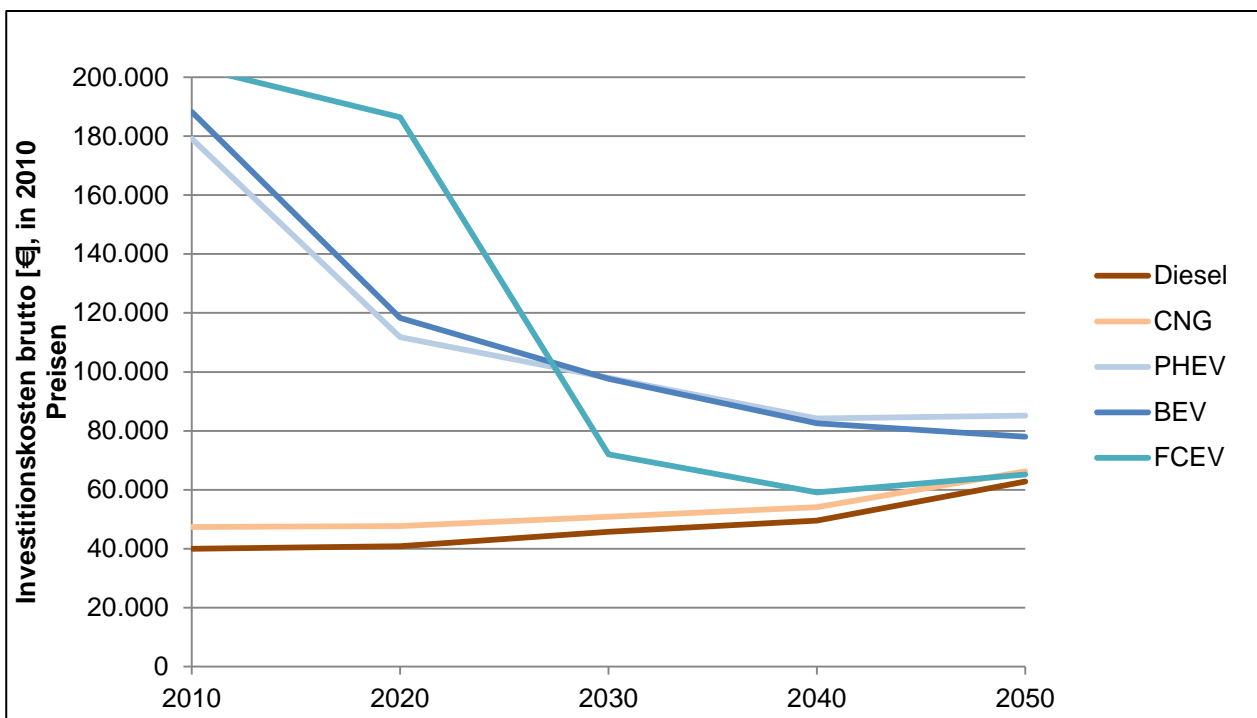
Gemäß den in der Technologiedatenbank getroffenen Annahmen steigen die gesamten Investitionskosten inklusive Markup für die verbrennungsmotorischen Fahrzeuge aufgrund der unterstellten Effizienztechnologien kontinuierlich. Die Fahrkosten pro Kilometer reduzieren sich dagegen aufgrund des niedrigeren Energieverbrauchs. Die Investitionskosten der alternativen Antriebskonzepte sinken im Zeitverlauf aufgrund höherer Stückzahlen und technologischer Verbesserung. Bei Dieselfahrzeugen in der Kategorie Lkw 3,5 – 7,5 t steigen die Kosten von 2010 bis 2050 um fast 60 % (s. Abbildung 5-7).

Für das Jahr 2010 und 2020 liegen die Kosten bei BEV und FCEV deutlich über den Kosten für Dieselfahrzeuge. In der Fahrzeugkategorie Lkw 3,5 – 7,5 t betragen sie in 2010 etwa das Fünffache der Kosten eines konventionellen Fahrzeugs. PHEV sind in dieser Kategorie unwesentlich günstiger, obwohl die elektrische Reichweite mit 100 km gegenüber 150 km bei BEV rund ein Drittel niedriger veranschlagt ist. Dies begründet sich mit der niedrigeren Entladungstiefe bei PHEV und der damit relativ hohen erforderlichen Batteriekapazität. In der Praxis werden diese Konfigurationen jedoch nicht am Markt angeboten. Bis zum Jahr 2050 nähern sich die Kosten der verschiedenen Antriebskonzepte zwar an, dennoch liegen BEV und PHEV noch rund ein Viertel über den Kosten für Dieselfahrzeuge (HEV). Auf Grundlage der Technologieannahmen sind die Investitionskosten bei Lkw 3,5 – 7,5 t für die Variante mit Brennstoffzellensystem (FCEV) in 2050

auf dem Niveau der Dieselfahrzeuge. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass insbesondere die langfristige Kostenentwicklung von Brennstoffzellensystemen mit hohen Unsicherheiten verbunden ist und in diesem *Szenario* eine relativ optimistische Entwicklung unterstellt ist. Eine grundsätzliche Bewertung der alternativen Antriebstechnologien lässt sich daher auf Grundlage dieser Ergebnisse nicht ableiten.

Grundsätzlich wäre auch eine Konfiguration von BEV, PHEV und FCEV ohne weitere aufwendige Effizienztechnologien (Maßnahmen am Antriebsstrang, Reduzierung der Fahrwiderstände) denkbar, da auch ohne deren Berücksichtigung weiterhin ein Effizienzvorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen bestünde, sich die Kosten jedoch verringern würden.

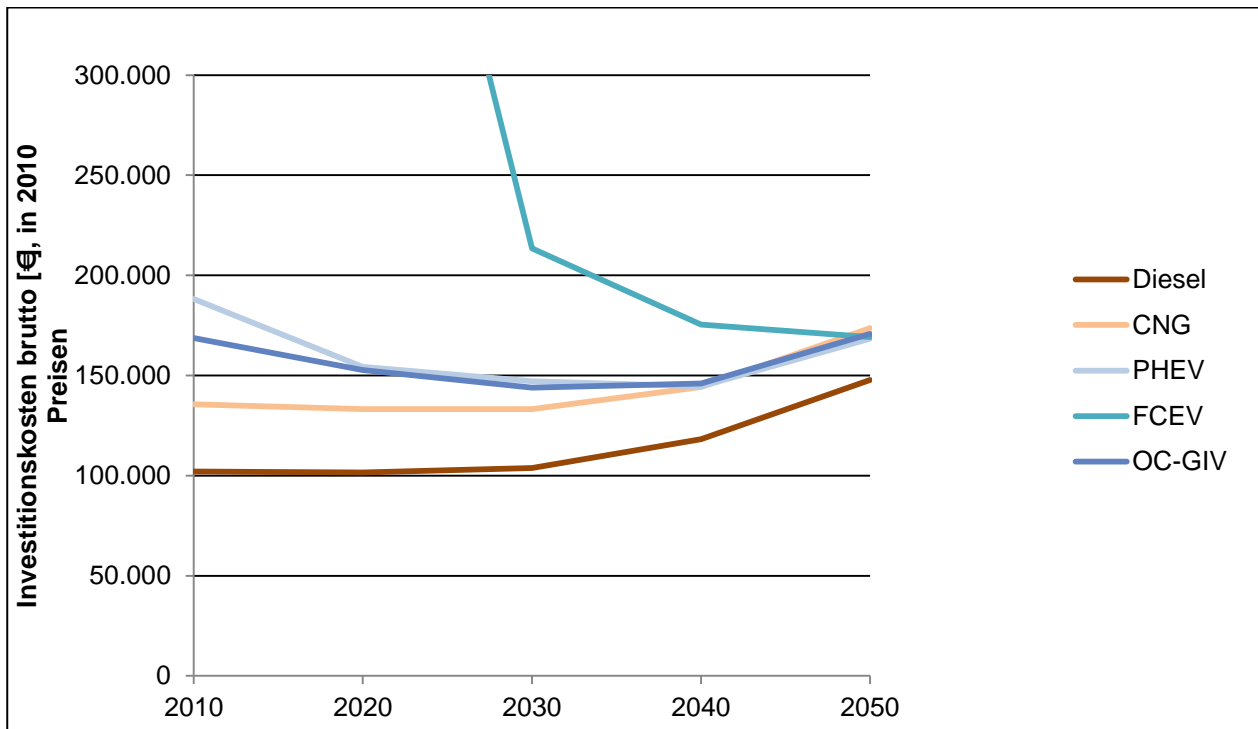
Abbildung 5-7: Investitionskosten eines Lkw 3,5 – 7,5 t in Euro (Verkaufspreise brutto) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario



Quelle: eigene Darstellung

Bei Last- und Sattelzügen zeigt sich ein ähnliches Bild. Aufgrund des hohen Batteriegewichtes und der hohen Kosten wird diese Kategorie nicht als BEV konfiguriert dargestellt. Für 2010 würden sich in diesem Fall Batteriekosten in Höhe von über einer Millionen Euro bei einem Zusatzgewicht von über 10 Tonnen ergeben. Ähnlich wie bei Lkw 3,5 – 7,5 t bleiben konventionelle Dieselfahrzeuge in dieser Kategorie auch bis 2050 das kostengünstigste Antriebskonzept.

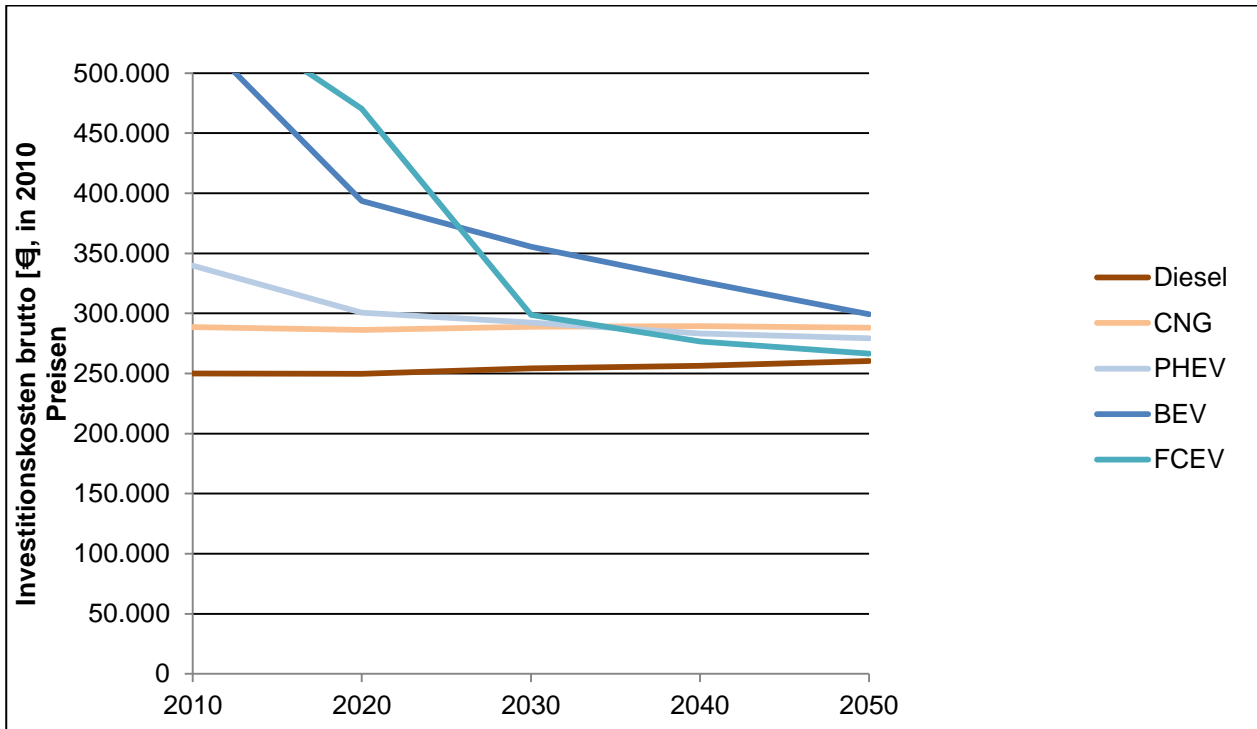
Abbildung 5-8: Investitionskosten eines LZ/SZ ≤ 40 t in Euro (Verkaufspreise brutto) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario



Quelle: eigene Darstellung

Bei Linienbussen steigen die Kosten bis 2050 bei den konventionellen Fahrzeugvarianten am geringsten an. Dies ist darin begründet, dass für diese Kategorie mit besonders hohen Einsparungen durch eine Hybridisierung gerechnet wird. Um die im Szenario unterstellte Verbrauchsreduktion von -40 % zu erreichen sind deshalb neben der Hybridisierung nur relativ kostengünstige Maßnahmen zur Zielerreichung notwendig. Die Kosten der Hybridisierung hingegen fallen gemäß den Technologieannahmen stark durch die unterstellte Batteriepreisentwicklung. Im Jahr 2050 sind in dieser Fahrzeugkategorie die höchsten Kosten bei BEV anzufinden. Dieselfahrzeuge (HEV) und FCEV besitzen – unter Berücksichtigung der oben erwähnten Unsicherheiten – die geringsten Investitionskosten.

Abbildung 5-9: Investitionskosten eines Linienbus in Euro (Verkaufspreise brutto) nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario



Quelle: eigene Darstellung

5.5.3. Einordnung der Ergebnisse

Bei der Bewertung der Ergebnisse müssen auch bei den schweren Nutzfahrzeugen die in Kapitel 4.5 beschriebenen Unsicherheiten, insbesondere hinsichtlich der Kostenentwicklung von Batterien und Brennstoffzellensystemen berücksichtigt werden. Im hier dargestellten *Szenario* sind Annahmen zu deren Entwicklung hinterlegt, die insbesondere mit Blick auf die Kosten eine von mehreren möglichen Entwicklungen darstellt. Grundsätzlich steigt die Unsicherheit der Technologieannahmen mit zunehmender Marktferne der betrachteten Technologien und mit zunehmender Entfernung des betrachteten Zeitpunkts.

Andererseits gilt auch für schwere Nutzfahrzeuge, dass auch im Zeitverlauf mit weiteren technischen Innovationen zu rechnen ist, die nicht nur bestehende Konzepte weiter optimieren, sondern gänzlich neue Ansätze zur Marktreife bringen und somit weitere Effizienzsteigerungen ermöglichen oder die dargestellte Minderung des Energieverbrauchs zu geringeren Kosten realisieren lassen.

Auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstands lassen sich anhand des dargestellten *Szenarios* einige grundsätzliche Erkenntnisse festhalten. So können alle betrachteten Fahrzeugkategorien auch mit konventionellem verbrennungsmotorischem Antrieb ihre Energieeffizienz in den nächsten Jahrzehnten noch deutlich steigern. Jedoch bleibt auch langfristig der elektrische Antrieb die mit Abstand energieeffizienteste Antriebsvariante. Die batterieelektrische Variante kommt jedoch nicht für alle Kategorien im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge in Frage. Die Investitionskosten steigen mit zunehmender Effizienz der Fahrzeuge an. Die Differenz zwischen konventionellen und alternativen Antriebsvarianten verringert sich jedoch mit der Zeit deutlich. Ob alternative Antriebssystem das Niveau konventioneller Antriebe langfristig erreichen, ist unsicher. Gerade im Nutzfahrzeugbereich spielen jedoch angesichts der hohen Fahrleistung die Gesamtkosten der Fahrzeugnutzung eine bedeutende Rolle, wodurch sich abhängig von den Energiepreisen ein

vorteilhafteres Bild ergeben kann, da alternativen Antriebskonzepte deutlich niedrigere Energieverbräuche als konventionelle Fahrzeuge besitzen. Ferner sind für einen ganzheitlichen Kostenvergleich der Antriebssysteme jedoch auch teilweise erhebliche Zusatzkosten für die notwendige Versorgungsinfrastruktur (beispielsweise für oberleitungsgebundene Fahrzeuge) zu berücksichtigen.

6. Fazit

Die Technologiedatenbank für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge wurde entwickelt, um die technischen Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz für unterschiedliche Antriebsoptionen sowie die damit verbundenen Zusatzkosten auf Basis von konkreten Einzeltechnologien zu quantifizieren. Die Datenbasis bildet damit ein zentrales Element für die Darstellung der Effizienzpotenziale von Straßenfahrzeugen für die kommenden Dekaden, wie beispielsweise im Rahmen von Szenariobetrachtungen.

Die Datenbasis berücksichtigt in allen Fahrzeugkategorien sowohl konventionelle als auch alle, in der jeweiligen Anwendung denkbaren, alternativen Antriebskonzepte. Die Annahmen zu den Eigenschaften der möglichen Effizienztechnologien hinsichtlich des Beitrags zur Effizienzsteigerung, den möglichen Wechselwirkungen mit anderen Effizienztechnologien, dem möglichen Markteintritt und den technologiespezifischen Zusatzkosten sind Ergebnis einer umfassenden Literaturlauswertung sowie der Einbindung von Experten aus Wissenschaft und Industrie im Rahmen von Interviews und Fachworkshops. Die Technologiedatenbank ermöglicht es, ausgehend von Basisfahrzeugen, die den aktuellen Stand der Technik bei Neufahrzeugen repräsentieren, mögliche Entwicklungen für konventionelle als auch alternative Fahrzeugvarianten bis zum Jahr 2050 auf Grundlage von konkreten Einzeltechnologien abzubilden. Die Basis für diese Analysen bilden sogenannte Kostenkurven, die das Potenzial zur Minderung des Energieverbrauchs im Kontext der damit verbundenen Zusatzkosten für einen bestimmten Zeitpunkt darstellen. Die fahrzeuggrößen- und antriebsspezifischen Kostenkurven berücksichtigen die unterschiedliche Kosteneffizienz der Technologien durch eine entsprechende Reihung sowie Annahmen zur Verfügbarkeit entsprechend des unterstellten Markteintritts. Kostenseitig wird ab dem angenommenen Zeitpunkt des Markteintritts eine Kostendegression der Technologie, die durch Skaleneffekte und teilweise innovative Weiterentwicklungen der Technologie entstehen, in den Folgejahren unterstellt. Ferner werden bei der Ermittlung der Gesamteffizienz mögliche Wechselwirkungen und sich ausschließende Kombinationen von Technologien berücksichtigt.

Die Anwendung der Technologiedatenbank anhand der dargestellten beispielhaften Szenarien zeigt, dass sowohl bei Pkw als auch bei schweren Nutzfahrzeugen auch bei konventioneller Motorisierung bis zum Jahr 2050 auf Basis bekannter Effizienztechnologien der Energieverbrauch noch erheblich im Vergleich zum Jahr 2010 reduziert werden kann. Dabei können sowohl motorische als auch nicht-motorische Maßnahmen einen bedeutenden Beitrag leisten. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass alternative Antriebssysteme eine deutlich höhere Energieeffizienz (Tank-to-Wheel) erreichen können, die durch konventionelle Fahrzeuge auch bei maximalem Einsatz von Effizienztechnologien nicht erreicht werden kann. Die höchste Energieeffizienz erreichen rein elektrisch betriebene Systeme, aber auch teil-elektrische Konzepte sowie Brennstoffzellenfahrzeuge haben deutliche Vorteile bezüglich des fahrzeugseitigen Energieverbrauchs gegenüber verbrennungsmotorischen Vergleichsvarianten. Grundsätzlich können alternative Fahrzeugkonzepte dabei neben der höheren Effizienz des elektrischen Antriebssystems zudem von nicht-motorischen Effizienzmaßnahmen profitieren, die auch bei konventionellen Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Teilweise wirken sich diese durch Sekundäreffekte bei alternativen Antriebsvarianten sogar noch vorteilhafter auf die Gesamteffizienz aus. So sinkt beispielsweise bei einem batterieelektrischen Fahrzeug durch nicht-

motorische Effizienzmaßnahmen (z. B. Leichtbau) der Energieverbrauch, so dass die Batteriekapazität bei gleichbleibender Reichweite reduziert werden kann, wodurch wiederum das Fahrzeuggewicht weiter sinkt und somit der Energieverbrauch des Fahrzeugs weiter reduziert werden kann.

Während die Effizienzpotenziale der berücksichtigten kurz- und mittelfristig einsetzbaren Maßnahmen auf Basis der Technologiedatenbank relativ gut abgeschätzt werden können, da diese teilweise bereits heute in Fahrzeugen erprobt werden oder deren Wirkung simuliert werden kann, ist die Kostenentwicklung der Effizienztechnologien mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Insbesondere mit zunehmendem Zeithorizont und der Anzahl der berücksichtigten Technologien nimmt die Unsicherheit der ermittelten Effizienzpotenziale und insbesondere der assoziierten Kosten zu und damit die Aussagekraft der Technologiedatenbank ab. Die Kostenentwicklung der verbrennungsmotorischen und nicht-motorischen Technologien ist sehr stark von dem Zeitpunkt des Markteintritts und möglicher Skaleneffekte in der Serienproduktion abhängig. In der Vergangenheit konnten Effizienztechnologien nach ihrer Markteinführung teilweise erhebliche Kostensenkungen erzielen. In welcher Größenordnung diese Skaleneffekte auch bei Maßnahmen zum Tragen kommen, die eine umfassende Veränderung im Fahrzeugaufbau und der Produktionsprozesse erfordern und bis wann diese realisiert werden können, kann daher nur abgeschätzt werden. In der Technologiedatenbank wurde versucht, diesem Umstand durch die Berücksichtigung einer moderaten zum Teil technologieunspezifischen Kostendegression Rechnung zu tragen. In noch stärkerem Maße gelten diese Einschränkungen in Bezug auf alternative Antriebssysteme. Deren Zusatzkosten werden maßgeblich von den Kosten von Batterie- und Brennstoffzellensystemen bestimmt. Beide Technologien befinden sich jedoch in einer sehr frühen Marktphase bzw. noch vor dem Markteintritt und sind gleichzeitig mit tiefgreifenden Veränderungen in der Wertschöpfung, von Produktionsprozessen und im Ressourceneinsatz verbunden. Die längerfristige Kostenentwicklung ist daher mit deutlich größeren Unsicherheiten verbunden und gleichzeitig stehen Marktentwicklung und Kostendegression in enger Wechselwirkung. Die Technologiedatenbank ist daher für alternative Antriebe so angelegt, dass für die Kostenentwicklung von Traktionsbatterie und Brennstoffzelle unterschiedliche Szenarien zugrunde gelegt werden können, um den Einfluss unterschiedlicher denkbarer Entwicklungen auf die Gesamtkosten abzubilden.

Die Annahmen zur Markteinführung als auch zu den Kosten von Effizienztechnologien in der Technologiedatenbank berücksichtigen Unterschiede in den Märkten für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge. So wird dem Umstand, dass sich der Nutzfahrzeugmarkt durch wesentlich geringere Stückzahlen sowie durch eine stärkere Orientierung an Wirtschaftlichkeitskriterien auszeichnet in der Form Rechnung getragen, dass insbesondere bei alternativen Antriebssystemen ein späterer Markteintritt und tendenziell höhere Zusatzkosten als bei Pkw unterstellt werden, da Entwicklungskosten für neue Technologien sich auf eine geringere Zahl an produzierten Fahrzeugen verteilt bzw. Entwicklungen aus dem Bereich der Pkw erst zu einem späteren Zeitpunkt im Nutzfahrzeugbereich adaptiert werden.

Grundsätzlich ist jedoch angesichts des langfristigen Betrachtungszeitraums auch zu beachten, dass die Technologiedatenbank zwar mögliche Entwicklungen bis 2050 abbildet, dabei aber nur Technologien berücksichtigt, die heute bereits in der Anwendung oder der Entwicklung sind. Wahrscheinlich ist, dass aber auch in den kommenden Dekaden weitere Innovationen im Bereich der Effizienztechnologien die Marktreife erlangen, die heute noch nicht bekannt sind oder sich noch im Bereich der Grundlagenforschung befinden. Dies kann in Konsequenz perspektivisch zu höheren Effizienzpotenzialen oder auch zu einer kosteneffizienteren Erreichung der dargestellten Energieverbrauchsminderungen führen. Unter Berücksichtigung dieses Aspekts sind die Annahmen der Technologiedatenbank als eher konservative Abschätzung der, insbesondere längerfristigen, Potenziale zu verstehen.

Kosten, die mit dem Betrieb der Fahrzeuge, aber auch mit der Anpassung der Infrastruktur verbunden sind, können zwar vor allem hinsichtlich alternativer Antriebe von großer Bedeutung für die Betrachtung der Gesamtkosten sein, sie sind jedoch nicht Bestandteil der Technologiedatenbank, die sich auf die Investitionskosten für technologische Anpassungen zur Effizienzsteigerung am Fahrzeug beschränkt.

Die Technologiedatenbank und die zugrunde liegende Methode sind weniger als ein Endergebnis sondern eher als eine Daten- und Methodengrundlage für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten zu verstehen, die es beispielsweise erlaubt, im Rahmen von Szenarioanalysen mögliche Entwicklungen des Fahrzeugbestands und seiner Energieeffizienz unter Berücksichtigung von technischen Eigenschaften und Kostenaspekten der Fahrzeuge zu simulieren. Durch die gewählte Methode, die eine kostenoptimierte Reihung der Technologien sowie mögliche Markteintrittspunkte berücksichtigt, ist im Rahmen des grundsätzlichen Detaillierungsgrads der Datenbank eine möglichst realitätsnahe Simulation des Technologieeinsatzes gewährleistet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die implementierten Technologieannahmen eine Momentaufnahme auf Basis des aktuellen Stands des Wissens darstellen. Der Aufbau der Technologiedatenbank ermöglicht es, die Datenbank jederzeit an aktuelle Erkenntnisse oder Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugtechnik anzupassen sowie insbesondere für alternative Antriebskomponenten im Rahmen von Sensitivitätsanalysen unterschiedliche Entwicklungspfade, beispielsweise für Batterie- und Brennstoffzellenkosten, zu hinterlegen.

7. Literaturverzeichnis

- AEA/Ricardo 2011 Hill, N.; Finnegan, S.; Norris, J.; (AEA), Stephen Finnegan (AEA), John Norris (AEA), Brannigan, B.; Wynn, D. (AEA); Baker, H. (Ricardo); Skinner, I. (AEA Associate /TEPR): Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy; ED46904 Final Report - Issue Number 4; Februar 2011 Didcot
- CARB 2007 California Air Resources Board; Kalhammer, F.R. et al.: Status and prospects for zero emissions vehicle technology – Report of the ARB independent expert panel 2007. Sacramento 2007.
- CCC 2012 Element Energy Limited (2012): Cost and performance of EV batteries, Final report for The Committee on Climate Change.
- CE Delft 2011 ICF, Ecologic, CE Delft (2011): Impacts of Electric Vehicles – Deliverable 2. Assessment of electric vehicles and battery technology, Delft.
- ECF 2013 Ricardo-AEA and Cambridge Econometrics (2013): An economic assessment of low carbon vehicles.
- e-Mobil BW 2011 Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH (2011): Strukturstudie BW^e Mobil 2011.
- EU Kommission 2013 Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic"; Brussels, 15.4.2013 COM(2013) 195 final 2013/0105 (COD); http://ec.europa.eu/transport/modes/road/weights-and-dimensions_en.htm abgerufen am 20.01.2014

- Faaij 2012 Gerssen-Gondelach, S.J. and Faaij, A.P.C. (2012): Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term, Journal of Power Sources 212 (2012) 111e129.
- FEV/ICCT 2012 FEV, International Council for Clean Transportation (2012): Light-Duty Vehicle Technology Cost Analysis – European Vehicle Market, Additional Case Studies (Phase 2).
- GM 2009 General Motors Corporation, Fuel Displacement & CO2 Benefits of Vehicle Electrification, available at: <http://www.epa.gov/air/caaac/mstrs/may2009/gm.pdf>, accessed 14 April 2013
- Hausberger 2013 Prof. Hausberger; S. (TU Graz): Persönliche Mitteilung vom 05.06.2013 zu Berechnungen der TU-Graz hinsichtlich der Motorleistung von schweren Nutzfahrzeugen, basierend auf HBEFA Daten mit HDV-CO₂ Testzyklen.
- HC/ ÖKO/ TUB 2013 Kappus, J.; Klußmann, A. (Hamburg-Consult GmbH); Mottschall, M.; Schmied, M. (Öko-Institut e.V.); Prof. Hecht, M.; Eschweiler, P. (TU Berlin, Fakultät V – Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge): Schlussbericht „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr“; Berlin/ Hamburg 2013
- HC/ ÖKO/ TUB 2014 Kappus, J.; Klußmann, A. (Hamburg-Consult GmbH); Mottschall, M.; (Öko-Institut e.V.); Prof. Hecht, M.; Eschweiler, P. (TU Berlin, Fakultät V – Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge): Broschüre „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr - Ergebnisse des Forschungsprojektes. Derzeit unveröffentlicht.
- ICCT 2011 ICCT (2011): Vehicle Electrification Policy Study - technology status, task report 1.
- ICCT 2012 ICCT (2012): Discrepancies between type approval and “real-world” fuel consumption and CO2 values. Assessment for 2001-2011 European passenger cars.
- IEA 2011 International Energy Agency (2011): Technology Roadmap. Electric and plug-in hybrid electric vehicles.
- IFEU 2011 Knörr, W.; Dünnebeil, F.; Lambrecht, U.; Schacht, A.: „Aktualisierung “Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoff-emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO, Version 5.2) für die Emissionsberichtserstattung 2012 (Berichtsperiode 1990-2010)“ – Endbericht; Heidelberg, 30.11.2011.
- IFEU 2012 Knörr, W., Heidt, C., Schacht, A.(2012): Aktualisierung “Daten - und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“(TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011), Endbericht, im Auftrag des Umweltbundesamtes, IFEU, Heidelberg.

ika 2012	ika RWTH Aachen (2012): Aktuell: 5. Fortschreibung des Luftreinhalteplans, Aktuell: 5. Fortschreibung des Luftreinhalteplans, Aachen.
ISI 2012	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2012): Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, Karlsruhe.
JRC 2010	G. Mellios, S. Hausberger, M. Keller, C. Samaras, L. Ntziachristos (2010): Parameterisation of fuel consumption and CO ₂ emissions of passenger cars and light commercial vehicles for modelling purposes, JRC.
KBA 2010	Kraftfahrt-Bundesamt (2010): Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen, Jahr 2010, FZ 14.
KID 2010	Wermuth, J. et al. 2012. Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KID 2010) – Schlussbericht
Lastauto Omnibus-Katalog 2011	EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH; Lastauto Omnibus-Katalog 2011; August 2010; Kaiserslautern
McKinsey 2010	McKinsey (2010): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles
McKinsey 2012	McKinsey (2012): Battery technology charges ahead, McKinsey Quarterly.
Mock 2011	Mock, P. (2011): Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO ₂ Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21). DLR.
NAS 2013	Committee on Transitions to Alternative Vehicles and Fuels; Board on Energy and Environmental Systems; Division on Engineering and Physical Sciences; National Research Council (2013): Transitions to Alternative Vehicles and Fuels.
NHTSA 2010	National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA): "Factors and Considerations for Establishing a Fuel Efficiency Regulatory Program for Commercial Medium- and Heavy-Duty Vehicles"; Oktober 2010
NPE 2011	Nationale Plattform Elektromobilität (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang.
NREL 2012	National Renewable Energy Laboratory (2012): National Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration Final Report.
ÖKO 2009	Öko-Institut e.V. / DLR: Renewability – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Teil 1: Methodik und Datenbasis. Endbericht, Berlin 2009
Özdemir 2011	Özdemir, E. D.; The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector; Dissertation der Universität Stuttgart; Stuttgart 2011.
Pollet 2012	Pollet, B.G., Staffel, I. and Shang, J.S. (2012): Current status hybrid battery fuel cell market prospects, Electrochimica Acta 84 (2012) 235– 249.

- Ricardo 2012 Ricardo Inc. (2012): Project Report Analysis of Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of Light Duty Vehicle Technologies in the European Union for 2020–2025.
- Sasaki 2012 Sasaki, K. et al. (2012): Highly stable Pt monolayer on PdAu nanoparticle electrocatalysts for the oxygen reduction reaction, *Nature Communications* 3, 1115.
- Schuckert 2012 Schuckert, M. (Daimler): „Antriebsstrategien für die Zukunft“, MKS-Workshop Straße, 15. Mai 2012 <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-referentenmaterialien-veranstaltung4-strasse.pdf?blob=publicationFile>
- SGL 2013 SGL Automotive Carbon Fibers, available at: <http://www.sglacf.com/>, accessed 14 April 2013.
- Siemens 2012 ENUBA - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen; Schlussbericht der Siemens AG; Version vom 31.08.2012; FKZ: 16EM0077; August 2012
- SNF-Workshop 2013 Im Rahmen des Projektes *eMobil 2050* durchgeführter Fachworkshop zu schweren Nutzfahrzeugen (vgl. Abschnitt 2.3); Berlin 2013.
- SRU 2012 Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt; Juni 2012.
- TAB 2012 TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2012): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt, Innovationsreport.
- TIAX 2011 Law, K. et al.: “European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles”; TIAX LLC; Reference No. D5625; Dezember 2011 Cupertino.
- TNO 2006 TNO, IEEP, LAT (2006): Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-emissions from passenger cars, Contract nr. SI2.408212, Delft.
- TNO 2010 Ligterink, N.E. and B. Bos (2010) CO₂ uitstoot van personenwagens in norm en praktijk – analyse van gegevens van zakelijke rijders [*Passenger cars CO₂ emission in test and practice – analysis based on bussiness drivers*], TNO-report MON-RPT-2010-00114, TNO. Delft (in Dutch).
- TNO 2011 TNO, AEA, CE Delft, Ökopol, TML, Ricardo, IHS Global Insight (2011): Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars, Service request #1 for Framework Contract on Vehicle Emissions, Final Report, Framework Contract No ENV.C.3./FRA/2009/0043, Delft..
- TNO 2012 TNO, AEA, CE Delft, Ökopol, TML, Ricardo, IHS Global Insight (2012): Support for the revision of regulation on CO₂ emissions from light commercial vehicles, Service request #3 for Framework Contract on Vehicle Emissions, Final Report, Framework Contract No ENV.C.3./FRA/2009/0043, Delft.

- UC Davis 2012 Burke, A. and Zhao, H. (2012): Energy Saving and Cost Projections for Advanced Hybrid, Battery Electric, and Fuel Cell Vehicles in 2015-2030.
- Wenger 2009 Wenger, D. 2009: Metallhydridspeicher zur Wasserstoffversorgung und Kühlung von Brennstoffzellenfahrzeugen, Dissertation, Technische Universität München.

8. Anhang

Tabelle 8-1: Energieverbrauch eines Lkw 3,5 – 7,5 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario

Lkw 3,5 – 7,5t	ICEV (Diesel)	ICEV (CNG)	PHEV (konv.)	PHEV (elektrisch)	BEV	FCEV
[MJ/km]						
2010	4,4	4,8	4,0	2,0	2,0	3,6
2020	4,1	4,6	3,6	1,9	1,9	3,4
2030	3,5	4,2	3,3	1,7	1,7	3,2
2040	3,1	3,6	3,2	1,7	1,7	3,0
2050	2,8	3,3	2,8	1,6	1,6	2,7

Tabelle 8-2: Energieverbrauch eines LZ/SZ ≤ 40 t differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario

LZ/SZ ≤ 40 t	ICEV (Diesel)	ICEV (CNG)	PHEV (konv.)	PHEV (elektrisch)	FCEV	OC-GIV (konv.)	OC-GIV (elektrisch)
[MJ/km]							
2010	10,8	11,9	10,1	4,6	9,1	10,1	4,5
2020	10,0	11,2	9,3	4,3	8,4	9,3	4,2
2030	8,7	9,9	8,2	4,0	7,4	8,2	4,0
2040	7,6	9,0	7,6	3,8	6,6	7,6	3,8
2050	6,9	8,0	6,9	3,6	5,7	6,9	3,6

Tabelle 8-3: Energieverbrauch eines Linienbus differenziert nach Antriebskonzept 2010 – 2050, Szenario

Linienbus	ICEV (Diesel)	ICEV (CNG)	PHEV (konv.)	PHEV (elektrisch)	BEV	FCEV
[MJ/km]						
2010	14,7	16,2	11,8	5,4	5,8	10,6
2020	13,5	15,2	10,3	5,0	5,4	9,7
2030	11,8	13,3	10,0	4,9	5,0	9,3
2040	10,3	11,6	9,5	4,8	4,9	8,7
2050	8,8	10,5	9,0	4,8	4,9	8,1