

Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Prof. Dr. Ing. A. Voß

IER

Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy - Institut d'économie énergétique et d'utilisation rationnelle de l'énergie

Endbericht

Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität

M. Blesl, D. Bruchof, N. Hartmann, D.
Özdemir, U. Fahl, L. Eltrop, A. Voß

Dezember 2009

Kurzfassung

Das Bedürfnis unserer Gesellschaft nach individueller Mobilität hat in den vergangenen Jahrzehnten stetig zugenommen, wobei Verbrennungsmotoren auf Basis der Ölprodukte Benzin und Diesel bislang die dominanten Antriebsvarianten darstellen. Aufgrund der Endlichkeit der Ressource Rohöl sowie der bei ihrem Einsatz entstehenden Treibhausgas- und Schadstoffemissionen werden elektrische Hybridantriebe und rein elektrische Antriebssysteme in vielerlei Hinsicht als vielversprechende Alternative gehandelt, um auch in Zukunft individuelle Mobilität auf ökonomisch und ökologisch vertretbare Weise bereit stellen zu können (Tabelle 1). Die vorliegende Studie soll dazu dienen, eine objektive Bewertung elektromobiler Antriebskonzepte bezüglich ihrer derzeitigen und zukünftigen Kosten, Emissionen und ihres Kraftstoffverbrauchs bei Einsatz im PKW-Bereich vorzunehmen.

Tabelle 1: Übersicht der betrachteten elektromobilen Antriebskonzepte

Technologie	Kraftstoff	Energiespeicher	Antriebsmaschine	Eigenschaften
Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)	Strom	Batterie	E-Motor	Fahrzeugantrieb mit Strom aus Batterie über E-Motor
Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (FCEV)	Wasserstoff	Wasserstoffspeicher (gasförmig bei 700 bar oder flüssig bei -253°C)	E-Motor	Stromerzeugung zum Fahrzeugantrieb aus Wasserstoff über Brennstoffzelle
Brennstoffzellen-Hybrid-Elektrofahrzeug (FCHEV)	Wasserstoff	Wasserstoffspeicher (gasförmig bei 700 bar oder flüssig bei -253°C) Batterie	E-Motor	wie FCEV, Batterie zur Stromzwischen-speicherung, um dynam. Trägheit der FC auszugleichen
Voll-Hybridfahrzeug (HEV _{full})	Benzin (Diesel)	Kraftstofftank Batterie	Verbrennungsmotor E-Motor	Start-Stopp-Funktion, Boosten, Rekuperation von Bremsenergie, rein elektr. Fahren möglich
Mild-Hybridfahrzeug (HEV _{mild})	Benzin (Diesel)	Kraftstofftank Batterie	Verbrennungsmotor E-Motor	Start-Stopp-Funktion, Boosten, Rekuperation von Bremsenergie möglich
Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV)	Benzin (Diesel) Strom	Kraftstofftank Batterie	Verbrennungsmotor E-Motor	Verbrennungsmotor dient als Range-Extender

Dazu wurden die verschiedenen elektrischen und hybrid-elektrischen Antriebskonzepte zunächst technisch beschrieben und anschließend einer vergleichenden Bewertung bezüglich ihrer heutigen und zukünftigen Investitionskosten, Mobilitätskosten, Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen und CO₂-Vermeidungskosten im Vergleich zu konventionellen Referenzfahrzeugen unterzogen. Die Betrachtung wurde jeweils für unterschiedliche Nutzerprofile und Fahrzeugklassen durchgeführt.

Im Ergebnis erwies sich unabhängig vom Nutzerprofil keine der diskutierten Antriebsalternativen für den heutigen Zeitpunkt als wirtschaftlich gegenüber dem jeweiligen konventionellen Referenzfahrzeug. Bis zum Jahr 2030 reduzieren sich die Investitionskosten einzelner Antriebsalternativen aufgrund von sinkenden spezifischen Kosten bei Schlüsselkomponenten wie Batterie und Brennstoffzelle soweit, dass die Mobilitätskosten in Nutzerprofilen mit hoher Jahresfahrleistung teilweise die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit erreichen können (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich der betrachteten Antriebsalternativen in der Mittelklasse im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung

	Investitionskosten [1000 EUR]	Mobilitätskosten [EURct/km]	WtT-Emissionen [g/km]	TtW-Emissionen [g/km]	WtW-Emissionen [g/km]	CO ₂ - Vermeidungskosten [EUR/t]
Referenzfahrzeug (Diesel)	20.5	18 - 59	21 - 25	110 - 130	130 - 155	-
Batterie-Elektrofahrzeug	25.4	19 - 68	42 - 50	0	42 - 50	138 - 804
Brennstoffzellen- Elektrofahrzeug	22.1	19 - 61	104 - 122	0	104 - 122	514 - 1744
Brennstoffzellen-Hybrid- Elektrofahrzeug	22.5	19 - 62	95 - 112	0	95 - 112	561 - 656
Voll-Hybridfahrzeug	21.3	19 - 61	18 - 20	104 - 120	122 - 140	1182 - 1684
Mild-Hybridfahrzeug	20.7	19 - 60	19 - 22	111 - 131	129 - 153	8815 - 11423
Plug-In-Hybridfahrzeug	23.0	18 - 62	29 - 36	18 - 54	53 - 83	131 - 321

Anhand von Sensitivitätsanalysen wurde deutlich, dass die Ergebnisse in hohem Maße von den Annahmen zur Entwicklung der Kraftstoffkosten für Benzin, Diesel, Strom und Wasserstoff sowie der zukünftigen Besteuerung dieser Energieträger abhängen. Außerdem bilden die technische Weiterentwicklung und Kostenreduktion einzelner Schlüsselkomponenten, wie z. B. der Batterie oder der Brennstoffzelle, einen wichtigen Einflussfaktor auf die zukünftigen Mobilitätskosten.

Bei den Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen wiesen alle elektromobilen Antriebskonzepte schon für den heutigen Zeitpunkt niedrigere Werte auf als die jeweiligen Referenzfahrzeuge. Die zukünftigen Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen und damit auch die resultierenden CO₂-Vermeidungskosten gegenüber dem jeweiligen Referenzfahrzeug hängen insbesondere bei Einsatz von Strom und Wasserstoff als Kraftstoff stark von den unterstellten Well-to-Tank-Emissionen in der Kraftstoffherstellung ab.

Den Abschluss der Studie bildete die Diskussion weiterer Fragestellungen, die sich im Zusammenhang mit einer Einführung elektromobiler Antriebe im PKW-Verkehr ergeben. So erfordert der Einsatz von Strom und Wasserstoff im PKW-Verkehr zunächst den Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur für Erzeugung, Transport und Verteilung dieser Kraftstoffe, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Des Weiteren wurde das mögliche Potenzial von Elektrofahrzeugen zur Lastregelung überschlägig diskutiert. Dabei wurde deutlich, dass Elektromobilität grundsätzlich die Möglichkeit bietet, ineffizienten Kraftwerksbetrieb durch Einsatz zur Sekundärregelung zu verringern und die Integration fluktuierender erneuerbarer Energieerzeugung in das Stromnetz zu verbessern.

Abstract

Im Rahmen dieser Studie wird untersucht, inwiefern die verschiedenen denkbaren Antriebsvarianten aus dem Bereich der Elektromobilität einen ökonomisch und ökologisch sinnvollen Beitrag zur Senkung der Erdölabhängigkeit und zur Reduzierung der Emissionen des Verkehrssektors leisten können. Die Studie beginnt zunächst mit einer technischen Beschreibung der verschiedenen Varianten elektrischer und hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe im PKW-Bereich. Anschließend folgt eine Analyse der derzeitigen spezifischen Kosten einzelner Antriebskomponenten, sowie des jeweiligen mittel- bis langfristigen Potenzials zur Kostenreduktion. Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Mobilitätskosten der einzelnen elektromobilen Antriebsalternativen für verschiedene Nutzerprofile und Fahrzeugklassen ermittelt und durch den Vergleich mit konventionellen Referenzfahrzeugen bewertet. Des Weiteren werden auch die heutigen und zukünftigen Emissionen der einzelnen Antriebsalternativen im Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel) und bei der Kraftstoffherstellung (Well-to-Tank) sowie die resultierenden CO₂-Vermeidungskosten in Relation zum Referenzfahrzeug für verschiedene Nutzerprofile verglichen. Weitere Aspekte der Elektromobilität, die im Rahmen dieser Studie diskutiert werden, sind Infrastrukturanforderungen, die sich bei der Nutzung von Strom und Wasserstoff als Kraftstoff im PKW-Verkehr ergeben, sowie die Potenziale der Nutzung Batterie betriebener Elektrofahrzeuge zu Lastmanagement und Primärregelung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Technische Beschreibung verschiedener Varianten elektrischer Mobilität	2
2.1	Batterie gestützte Elektrofahrzeuge	2
2.1.1	<i>Elektromotor</i>	2
2.1.2	<i>Batterie</i>	3
2.2	Brennstoffzellen gestützte Elektrofahrzeuge	6
2.2.1	<i>Brennstoffzelle</i>	6
2.2.2	<i>Reformer</i>	8
2.2.3	<i>Speicher</i>	8
2.3	Hybridfahrzeuge	9
2.3.1	<i>Übersicht verschiedener Varianten von Hybridfahrzeugen</i>	9
2.3.2	<i>Anordnungsvarianten der einzelnen Antriebskomponenten</i>	11
2.3.3	<i>Betriebszustände von Hybridfahrzeugen</i>	12
2.4	Alternative mobile Energiespeicherkonzepte	17
3	Ökonomische und technische Analyse verschiedener elektrischer und hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe im PKW-Bereich	19
3.1	Verbrennungsmotor, Getriebe und Kraftstofftank	19
3.2	Brennstoffzelle	21
3.3	Wasserstoffspeicher	23
3.4	Batterie	24
3.5	Elektromotor und Steuerung	26
3.6	DC/DC- und AC/DC-Wandler	27
4	Vergleich und Bewertung der elektrischen und hybrid-elektrischen Antriebskonzepte ..	28
4.1	Vergleich der resultierenden Fahrzeuginvestitionskosten	28
4.2	Vergleich der resultierenden Fahrzeugmassen	31
4.3	Spezifische Kraftstoffverbräuche der einzelnen Fahrzeugantriebe	32
4.4	Mobilitätskosten	34
4.4.1	<i>Heutige Mobilitätskosten</i>	35
4.4.2	<i>Mobilitätskosten im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung</i>	37
4.4.3	<i>Mobilitätskosten im Jahr 2030 bei hohem Ölpreis</i>	40
4.4.4	<i>Variation der spezifischen Kosten von Schlüsselkomponenten</i>	43
4.5	Well-to-Wheel-CO ₂ -Emissionen	44
4.5.1	<i>Heutige Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen</i>	45
4.5.2	<i>Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen im Jahr 2030</i>	46
4.6	CO ₂ -Vermeidungskosten	47
5	Weitere Aspekte der Elektromobilität	52
5.1	Elektrische Ladetechnologien und Infrastruktur	52
5.1.1	<i>Direktionales Laden über Anschlüsse im Wohnbereich</i>	52
5.1.2	<i>Bidirektionales Laden</i>	54
5.1.3	<i>Schnellladefähige Systeme</i>	56
5.1.4	<i>Akkumulator-Wechselstationen</i>	57
5.2	Wasserstoffinfrastruktur	58
5.3	Potenzial der Elektromobilität zur Lastregelung	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	64
7	Literatur	66
8	Anhang	72
8.1	Anteile einzelner Komponenten an der Gesamt-Investitionskosten der verschiedenen Antriebsalternativen	72

8.2	Anteile einzelner Komponenten an der Gesamt-Fahrzeugmasse bei den verschiedenen Antriebsalternativen	73
8.3	Derzeitige und zukünftige Mobilitätskosten der verschiedenen Antriebsalternativen	75
8.4	Derzeitige und zukünftige Well-to-Wheel-CO ₂ -Emissionen der verschiedenen Antriebsalternativen	77
8.5	Derzeitige und zukünftige CO ₂ -Vermeidungskosten der verschiedenen Antriebsalternativen	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Aktuelle Kenngrößen verschiedener Batteriesysteme	4
Tabelle 2-2: Übersicht verschiedener Brennstoffzellentypen /Stan 2005/, /IEA 2005/	7
Tabelle 2-3: Vergleich typischer Eigenschaften verschiedener Hybridantriebskonzepte /IEA 2007/, /Hybrid-Autos 2009/	10
Tabelle 2-4: Vergleich der Eigenschaften von Pb-Batterie und Supercap /Heinemann 2006/	18
Tabelle 3-1: Betrachtete Fahrzeugantriebe und Antriebskomponenten	19
Tabelle 3-2: Kosten und CO ₂ -Einsparpotenzial verschiedener technischer Optionen bei Benzin- und Dieselmotoren /IEA 2008/, /EIA 2006/, /Mc Kinsey 2006/, /Wuppertal Institut 2006/, /TNO 2006/	20
Tabelle 3-3: Kostenanteile der Brennstoffzelle /Tsuchiya und Kobayashi 2004/, /IEA 2005/ ..	22
Tabelle 4-1: Übersicht der betrachteten Antriebstechnologien je Fahrzeugklasse	28
Tabelle 4-2: Übersicht der derzeitigen spezifischen Kosten für Fahrzeugkomponente	29
Tabelle 4-3: Übersicht der zukünftigen spezifischen Kosten für Fahrzeugkomponente	29
Tabelle 4-4: Übersicht der spezifischen Massen für Fahrzeugkomponente	31
Tabelle 4-5: Derzeitige Energieverbräuche (MJ/km) von Kleinstwagen bzw Mittelklassewagen	33
Tabelle 4-6: Zukünftige Energieverbräuche (MJ/km) von Kleinstwagen bzw Mittelklassewagen	33
Tabelle 4-7: Übersicht der betrachteten Nutzerprofile	34
Tabelle 4-8: Angenommene Kraftstoffpreise	35
Tabelle 4-9: Vergleich Mobilitätskosten in Prozent des Referenzfahrzeugs des jeweiligen Profils	42
Tabelle 4-10: Angenommene CO ₂ -Emissionen der Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank) /Concawe 2007a/, /UBA 2009/	45
Tabelle 5-1: Derzeitige Kosten und THG-Emissionen bei der Wasserstoffherstellung /Gül 2008/, /Concawe 2007/	59
Tabelle 6-1: Vergleich der betrachteten Antriebsalternativen in der Mittelklasse im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Darstellung einer permanent erregten Synchronmaschine /Hybrid-Autos 2009/	3
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung einer Batterie während der Entladung	4
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung einer Wasserstoff-Brennstoffzelle /Wickimedia 2009/	7
Abbildung 2-4:	Schematische Darstellung eines Parallel-Hybridantriebs /IPTS 2005/	11
Abbildung 2-5:	Schematische Darstellung eines seriellen Hybridantriebs /IPTS 2005/	12
Abbildung 2-6:	Schematische Darstellung eines Powersplit-Hybridantriebs /IPTS 2005/, /Hybrid-Auto 2009/	12
Abbildung 2-7:	Konventioneller Fahrmodus bei verschiedenen Hybridvarianten	13
Abbildung 2-8:	Rein elektrischer Fahrmodus bei verschiedenen Hybridvarianten	14
Abbildung 2-9:	Betriebszustand Boosten bei verschiedenen Hybridvarianten	15
Abbildung 2-10:	Rekuperation von Bremsenergie bei verschiedenen Hybridvarianten	16
Abbildung 2-11:	Lastpunktanhebung bei verschiedenen Hybridvarianten	17
Abbildung 3-1:	Derzeitige und zukünftige spezifische Kosten von Brennstoffzellen /IEA 2005/, /Concawe 2007/, /Gül 2008/, /NREL 2005/	21
Abbildung 3-2:	Nahansicht der zukünftigen spezifischen Kosten von Brennstoffzellen /IEA 2005/, /Concawe 2007/, /Gül 2008/	22
Abbildung 3-3:	Derzeitige und zukünftige spezifische Kosten von Wasserstoffspeicher /IEA 2005/, /Concawe 2007/	23
Abbildung 3-4:	Derzeitige und zukünftige Kosten von Li-Ion-Batterien /BCG 2009/, /Winter 2008/, /Mock, Schmid 2008/, /Schuster 2009/, /Stan 2005/, /Agentur für Erneuerbare Energien 2009/, /Joseph et al. 2006/, /Sauer 2007/, /Jakubek, Schweiger 2008/, /Centurion 2009/, /IEA2007/, /IEA 2008/	25
Abbildung 3-5:	Derzeitige und zukünftige gravimetrische Energiedichten von Li-Ion-Batterien /Winter 2008/, /Mock, Schmid 2009/, /Schuster 2009/, /Stan 2005/, /Joseph et al. 2006/, /Sauer 2007/, /Jakubek, Schweiger 2008/, /ATZelectronic 2009/, /Naunin 2007/, /IEA 2007/	26
Abbildung 3-6:	Derzeitige und zukünftige spezifische Kosten von Elektromotoren /IEA 2005/, /Concawe 2007/, IPTS 2005/, /Graham 2001/	27
Abbildung 4-1:	Vergleich der aktuellen und zukünftigen Investitionskosten der unterschiedlichen Antriebe	30
Abbildung 4-2:	Derzeitige und zukünftige Fahrzeugmassenvergleich für verschiedene Antriebe	32
Abbildung 4-3:	Derzeitige Mobilitätskosten Kleinwagen [EURct/km]	36
Abbildung 4-4:	Derzeitige Mobilitätskosten Mittelklassewagen [EURct/km]	37
Abbildung 4-5:	Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 ohne Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]	38
Abbildung 4-6:	Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 mit Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]	38
Abbildung 4-7:	Mobilitätskosten Mittelklassewagen im Jahr 2030 ohne Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]	39
Abbildung 4-8:	Mobilitätskosten Mittelklassewagen im Jahr 2030 mit Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]	40
Abbildung 4-9:	Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 ohne Kraftstoffsteuern bei hohem Ölpreis [EURct/km]	41
Abbildung 4-10:	Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 mit Kraftstoffsteuern bei hohem Ölpreis [EURct/km]	41

Abbildung 4-11:	Parametervariation der spezifischen Brennstoffzellenkosten	43
Abbildung 4-12:	Parametervariation der spezifischen Batteriekosten	44
Abbildung 4-13:	Aktuelle Well-to-Wheel-CO ₂ -Emissionen bei Kleinstwagen [g/km]	46
Abbildung 4-14:	Well-to-Wheel-CO ₂ -Emissionen im Jahr 2030 bei Kleinstwagen [g/km].	47
Abbildung 4-15:	Heutige CO ₂ -Vermeidungskosten bei Kleinstwagen [EUR/t]	48
Abbildung 4-16:	Heutige CO ₂ -Vermeidungskosten bei Mittelklassewagen [EUR/t]	49
Abbildung 4-17:	CO ₂ -Vermeidungskosten im Jahr 2030 bei Kleinstwagen [EUR/t]	50
Abbildung 4-18:	CO ₂ -Vermeidungskosten im Jahr 2030 bei Mittelklassewagen [EUR/t] ..	51
Abbildung 5-1:	Netzlasterlauf in Deutschland über einen Zeitraum von einer Woche /UCTE 2009/	54
Abbildung 5-2:	Vereinfachte Darstellung des Vehicle to Grid (V2G) – Konzepts /UDEL 2009/	55
Abbildung 5-3:	Übersicht verschiedener Transport- und Verteilungsoptionen für Wasserstoff.....	59

1 Einleitung

Das Bedürfnis unserer Gesellschaft nach individueller Mobilität hat in den vergangenen Jahrzehnten stetig zugenommen. Bislang stellen dabei Verbrennungsmotoren auf Basis der Ölprodukte Benzin und Diesel die dominanten Antriebsvarianten dar. Die Endlichkeit der Ressource Rohöl sowie die bei ihrem Einsatz entstehenden Treibhausgas- und Schadstoffemissionen machen jedoch mittel- bis langfristig ein Umdenken erforderlich, um auch in Zukunft Mobilität auf ökonomisch und ökologisch vertretbare Weise bereitstellen zu können. Hier bieten elektrische Hybridantriebe und rein elektrische Antriebssysteme in vielerlei Hinsicht eine vielversprechende Alternative.

Inwiefern die verschiedenen denkbaren Antriebsvarianten aus dem Bereich der Elektromobilität einen ökonomisch und ökologisch sinnvollen Beitrag zur Senkung der Erdölabhängigkeit und zur Reduzierung der Emissionen des Verkehrssektors leisten können, wird derzeit kontrovers diskutiert. Die vorliegende Studie soll dazu dienen, eine objektive Bewertung der elektrischen und teilelektrischen Antriebsvarianten bezüglich ihrer derzeitigen und zukünftigen Kosten, Emissionen und ihres Kraftstoffverbrauchs bei Einsatz im PKW-Bereich vorzunehmen.

Die Studie beginnt zunächst mit einer technischen Beschreibung der verschiedenen Varianten elektrischer und hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe im PKW-Bereich. Anschließend folgt eine Analyse der derzeitigen Kosten einzelner Antriebskomponenten, sowie des jeweiligen mittel- bis langfristigen Potenzials zur Kostenreduktion. Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Mobilitätskosten der einzelnen elektromobilen Antriebsalternativen für verschiedene Nutzerprofile ermittelt und bewertet. Grundlage der Bewertung ist dabei jeweils der Vergleich mit einem konventionellen PKW mit Otto- oder Dieselmotor und vergleichbarer Ausstattung. Neben den Mobilitätskosten werden auch die CO₂-Emissionen der einzelnen Antriebsalternativen im Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel) und bei der Kraftstoffherstellung (Well-to-Tank) sowie die resultierenden CO₂-Vermeidungskosten in Relation zum Referenzfahrzeug für verschiedene Nutzerprofile verglichen.

Weitere Aspekte der Elektromobilität, die im Rahmen dieser Studie diskutiert werden, sind Infrastrukturanforderungen, die sich bei der Nutzung von Strom und Wasserstoff als Kraftstoff im PKW-Verkehr ergeben, sowie die Potenziale der Nutzung Batterie betriebener Elektrofahrzeuge zu Lastmanagement und Primärregelung.

2 Technische Beschreibung verschiedener Varianten elektrischer Mobilität

Die technische Beschreibung der verschiedenen Varianten elektrischer Mobilität gibt einen Überblick über die am häufigsten diskutierten alternativen Fahrzeuge zu den herkömmlichen Verbrennungsfahrzeugen. Zunächst werden die Batterie gestützten Elektrofahrzeuge (vgl. Kapitel 2.1) näher erläutert, bevor die Brennstoffzellen gestützten Elektrofahrzeuge (Kapitel 2.2) beschrieben werden. Darauf folgend werden die derzeit am häufigsten eingesetzte Form, das Hybridfahrzeug (vgl. Kapitel 2.3) aufgezeigt und zuletzt noch Alternative mobile Energiespeicherkonzepte (Kapitel 2.4) dargestellt.

2.1 Batterie gestützte Elektrofahrzeuge

Batterie gestützte Elektrofahrzeuge basieren im Wesentlichen auf einem Elektromotor (E-Motor) als Antriebsmaschine in Kombination mit einem elektrochemischen Energiespeicher (Batterie). Ein Leistungssteller dient dazu, die Fahrpedalstellung in entsprechende Strom- und Spannungswerte am E-Motor umzuwandeln, um so die gewünschte Fahrgeschwindigkeit bzw. Beschleunigung einzustellen. Die im Folgenden beschriebenen Antriebskomponenten des Batterie gestützten Elektrofahrzeugs kommen teilweise auch bei anderen Varianten elektrischer Mobilität zum Einsatz (Brennstoffzellenfahrzeug, Hybridfahrzeug), sodass an entsprechender Stelle auf eine erneute detaillierte Beschreibung dieser Komponenten verzichtet wird.

2.1.1 Elektromotor

Der Elektromotor dient allgemein zur Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie. Dabei wird das Prinzip der elektromagnetischen Induktion genutzt, welches besagt, dass ein Strom durchflossener Leiter in einem Magnetfeld eine Kraft erfährt. Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor steht das maximale Drehmoment beim E-Motor von Beginn an zur Verfügung und nimmt bei höheren Drehzahlen ab. Weitere Vorteile sind die kurzfristige Überlastbarkeit des E-Motors, die eine leistungsschwächere Dimensionierung als bei konventionellen Motoren ermöglicht, sowie sein hoher Wirkungsgrad. Überdies lässt sich die E-Maschine bei umgekehrter Betriebsweise auch als Generator betreiben und kann auf diese Weise überschüssige mechanische Energie in elektrische Energie wandeln. So lässt sich z. B. die beim Bremsen des Fahrzeugs anfallende überschüssige Energie rekuperieren und zur Aufladung der Batterie nutzen.

Grundsätzlich wird zwischen Gleichstrommotoren, bei denen sich die Lage des Magnetfelds nicht ändert, sowie Wechsel- und Drehstrommotoren, bei denen sich das Magnetfeld dreht unterschieden. Gleichstrommotoren (GSM) haben den Vorteil, dass sich ihre Drehzahl mit geringem Steuerungsaufwand regeln lässt. Der vergleichsweise hohe Wartungsaufwand sowie die Erfordernis eines kostenintensiven und schweren Kommutators zur Stromrichtungsumkehr sind jedoch die Hauptgründe, weshalb GSM für mobile Anwendungen praktisch nicht zum Einsatz kommen. Bei den Dreh- und Wechselstrommotoren existieren mehrere

Varianten wie Asynchronmaschine (AM), permanent erregte Synchronmaschine (PMSM), geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) und Transversalflussmaschine (TFM). Die PMSM stellt jedoch bei mobilen Anwendungen die mit Abstand am weitesten verbreitete Variante dar. Ihre Vorteile liegen vor allem in ihrem hohen Wirkungsgrad von über 90 %, der einfachen Regelbarkeit sowie in der hohen massenspezifischen Leistungsdichte (1 kW/kg) und Drehmomentdichte (5 Nm/kg). Sie bestehen aus einem beweglichen Rotor, der die Permanentmagnete trägt und einem unbeweglichen Stator, auf dem sich mehrere stromdurchflossene Kupferwindungen befinden (Abbildung 2-1). Je nach Anordnung von Rotor und Stator wird zwischen Innenläufer- und Außenläufermaschinen unterschieden. Erstere eignen sich besonders für Radnabenmotoren, bei denen die Kraft außen abgegriffen wird, wohingegen letztere zum Einsatz kommen, wenn der E-Motor auf eine Welle wirken soll /Stan 2005/, /IPTS 2005/.

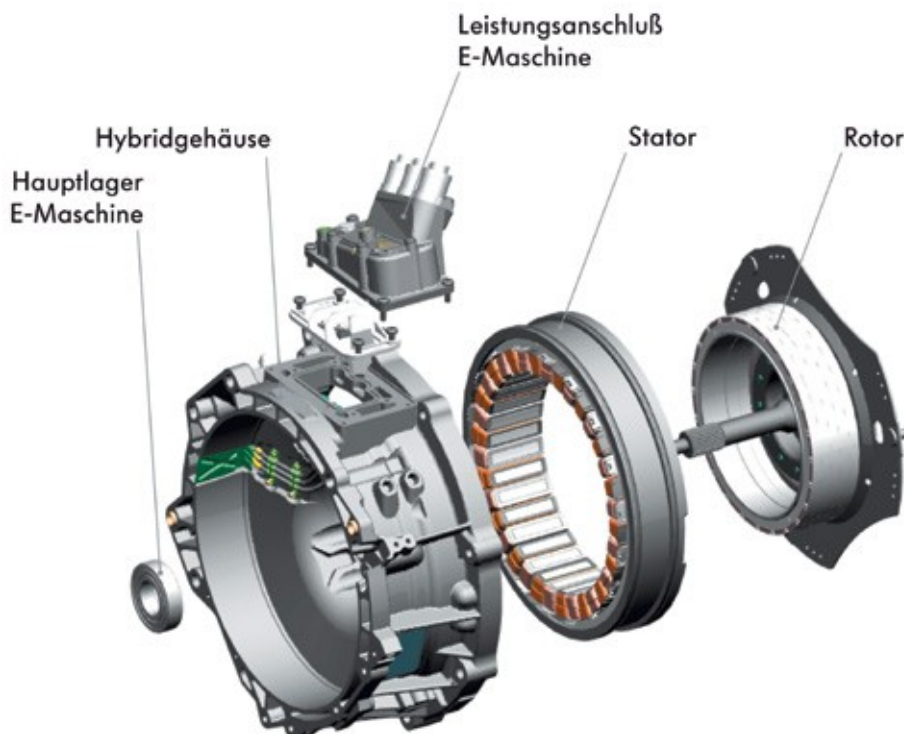


Abbildung 2-1: Darstellung einer permanent erregten Synchronmaschine /Hybrid-Autos 2009/

2.1.2 Batterie

Die Batterie ist ein elektrochemischer Energiespeicher, bei dessen Entladung chemisch gespeicherte Energie über eine elektrochemische Redoxreaktion in elektrische Energie umgewandelt wird. Bei geeigneter Paarung von Anoden- und Kathodenmaterial findet an der Anode eine Stoffoxidation statt (Abbildung 2-2). Die freiwerdenden Elektronen wandern über einen elektrischen Verbraucher zur Kathode und führen dort zu einer Stoffreduktion. Gleichzeitig kommt es über den Ionenstrom durch einen Ionen leitenden Elektrolyten zu einem Ladungsausgleich zwischen Kathode und Anode. Bei Akkumulatoren sind diese Reaktionen umkehrbar (reversibel), sodass die Batterie bei Zufuhr elektrischer Energie wieder aufgeladen werden kann.

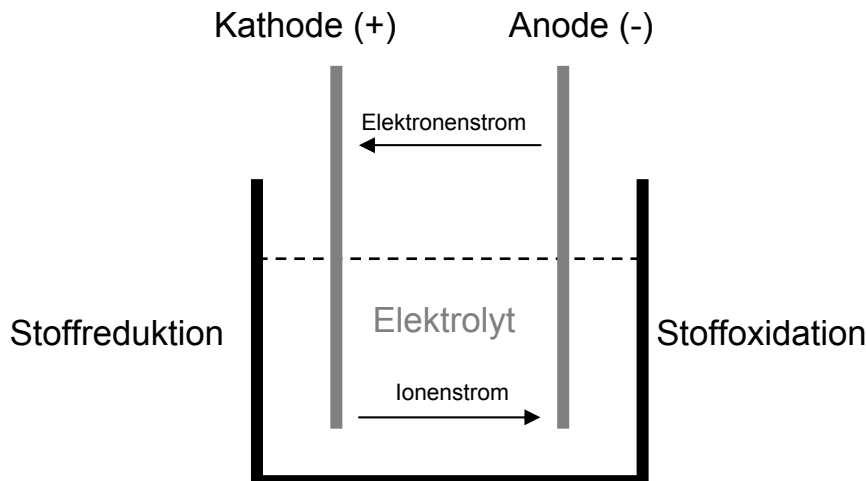


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung einer Batterie während der Entladung

Für einen Einsatz als mobiler Energiespeicher im Fahrzeug muss die Batterie eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Dazu zählen /Krüger 2002/:

- hohe Energiedichte zur Ermöglichung großer Reichweiten
- hohes Leistungsvermögen zur Anpassung an unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten
- guter Ladewirkungsgrad, möglichst verbunden mit einer Schnellladefähigkeit
- ausreichende mechanische Stabilität
- Belastbarkeit bezüglich hoher und tiefer Temperaturen
- lange Lebensdauer

Die älteste wieder aufladbare Batterievariante ist die Blei-Säure Batterie (Pb-PbO_2), die zurzeit in fast allen Fahrzeugen als Starterbatterie eingesetzt wird. Sie zeichnet sich aufgrund ihres fortgeschrittenen Entwicklungsstands durch eine hohe Verfügbarkeit am Markt sowie einen vergleichsweise niedrigen Preis aus. Aufgrund ihrer niedrigen massenspezifischen Energiedichte (Tabelle 2-1) sowie der fehlenden Schnellladefähigkeit eignet sie sich jedoch nicht als mobiler Speicher für Batterie gestützte Elektroantriebe.

Tabelle 2-1: Aktuelle Kenngrößen verschiedener Batteriesysteme

System	Pb-PbO ₂	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br ₂	Na-NiCl ₂	NA-S	Li-Ion
Betriebstemperatur [°C]	0...45	-20...50	-40...50	20...40	300...350	300...350	-40...60
Energiedichte bei 2 h Entladung [Wh/kg]	20...30	40...55	50...80	50...70	80...100	90...120	90...140
Zellspannung [V]	2,1	1,35	1,35	1,79	2,58	2,08	3,6

Die Nickel-Cadmium Batterie (Ni-Cd) gehört ebenfalls zu den ältesten wieder aufladbaren Batterietypen, verschwindet jedoch in den letzten Jahren aufgrund der toxischen und kanzer-

genen Eigenschaften von Cadmium wieder vom Markt. Derzeit stellt die Nickel-Metallhydrid (Ni-MH) Batterie die am stärksten genutzte Batterie für elektromobile Fahrzeuganwendungen dar (z. B. Toyota Prius Hybrid). Ihre Vorteile liegen in einer akzeptablen Energiedichte sowie einer hohen Anzahl erreichbarer Ladezyklen bei fehlendem Memory-Effekt.

Für die Zukunft wird jedoch ein weit größeres Potenzial in der Lithium-Ionen Batterie gesehen. Als weltweit erster Mobilhersteller verwendet Mercedes Benz die Lithium-Ionen Batterie ab 2009 serienmäßig im S 400 BlueHybrid. Neben der im Vergleich zur Ni-MH Batterie deutlich höheren Energiedichte der Li-Ion Batterie (Tabelle 2-1) zählen die folgenden Punkte zu ihren weiteren positiven Eigenschaften:

- kein Memory Effekt
- keine Verwendung toxischer Substanzen
- 40 % kleiner und nur etwa halb so schwer wie vergleichbare Ni-MH Batterien,
- derzeit bis zu 1000 Ladezyklen
- Verwendung preislich unkritischer Rohstoffe

Dem stehen jedoch derzeit noch eine Reihe von Problemen entgegen, die es durch konsequente Weiterentwicklung dieser Technologie zu lösen gilt. Dazu zählen:

- extreme Empfindlichkeit gegenüber Überladung,
- mögliche Selbstzündung bei zu starker/schneller Entladung/Ladung
- empfindlich gegenüber Tiefentladung,
- momentan noch zu teuer

Eine vielversprechende Weiterentwicklung der Li-Ion Batterie ist die Lithium-Polymer Batterie (Li-Po), die statt eines flüssigen Elektrolyten einen Elektrolyten auf Polymerbasis verwendet. Energie- und Leistungsdichte lassen sich so nochmals steigern. Des Weiteren kann sie mit dem flexiblen Polymer als Elektrolyt quasi jede Form annehmen. Auf diese Weise ist es heute möglich, dünne Folienbatterien mit einer Schichtstärke von nur noch 100 bis 500 μm herzustellen /Stan 2005/, /NREL 2009/, /Möller 2009/.

Elektrofahrzeuge sind bislang kaum in signifikantem Umfang zum Einsatz kommen. Der entscheidende Faktor für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen sind die Batterien, die allerdings zuerst noch weiterentwickelt werden müssen. Als Hindernisse sind hier vor allem ihre derzeit hohen Kosten (vgl. Kapitel 3.4), die niedrige Energiedichte sowie der daraus resultierende große Platzbedarf zu nennen. Sie führen dazu, dass der Einsatzschwerpunkt für Batterie betriebene Elektrofahrzeuge vornehmlich auf Kurzstrecken gesehen wird. Ein weiterer entscheidender Nachteil gegenüber Verbrennungsmotoren ist die lange Aufladezeit für Batterien von meist mehreren Stunden, die mit einer konventionellen Fahrzeugbetankung nicht konkurrieren kann. Mithilfe von Schnellladesystemen lässt sich diese Zeit bei einigen Batterievarianten zwar deutlich reduzieren, jedoch ist damit zumeist auch eine Abnahme der Lebensdauer verbunden.

2.2 Brennstoffzellen gestützte Elektrofahrzeuge

Bei Brennstoffzellenantrieben wird die elektrische Energie zum Antrieb des E-Motors im Fahrzeug durch chemische Umwandlung eines anderen Energieträgers, z. B. Wasserstoff, Erdgas, Methanol oder sonstige Kohlenwasserstoffverbindungen, erzeugt. Der Hauptvorteil gegenüber Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen besteht in der höheren gravimetrischen bzw. volumetrischen Speicherdichte dieser Energieträger, wodurch die Reichweite des Fahrzeugs deutlich steigt. Auch der Nachteil der langen Aufladezeiten von Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen besteht nicht. Nachfolgend werden die wichtigsten Komponenten des Brennstoffzellenantriebs genauer erläutert.

2.2.1 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle wandelt in einem elektrochemischen Prozess den chemischen Energieinhalt eines Brennstoffs direkt in elektrische Energie um. Im Gegensatz zur Umwandlung des Brennstoffs in einem Wärmekraftprozess unterliegt die Brennstoffzelle nicht dem Carnot-Wirkungsgrad, weshalb oft auch von einer kalten Verbrennung gesprochen wird. Dies ermöglicht besonders hohe Wirkungsgrade der Stromerzeugung in der Größenordnung von maximal 60 – 70 % /IEA 2005/. Die wesentlichen Elemente einer Brennstoffzelle sind Anode, Kathode und ein dazwischen liegender Elektrolyt (Abbildung 2-3). Der Wasserstoff wird an der Anode ionisiert. Die positiv geladenen H^+ -Ionen wandern durch den für Ionen durchlässigen Elektrolyten zur Kathode, während die Elektronen über einen elektrischen Verbraucher dorthin wandern. Der an der Kathode zugeführte Sauerstoff wird zunächst unter Aufnahme der Elektronen reduziert und reagiert dann mit den H^+ -Ionen zu Wasser.

Entsprechend ihrer Betriebstemperatur werden Brennstoffzellen in Niedertemperatur-, Mitteltemperatur- und Hochtemperaturbrennstoffzellen eingeteilt (Tabelle 2-2). Weitere Unterscheidungsmerkmale sind der eingesetzte Elektrolyt sowie die eingesetzten Reaktionsstoffe (z. B. Wasserstoff/Erdgas/Methanol bzw. Sauerstoff/Luft).

Besonders geeignet für mobile Anwendungen erscheint aus heutiger Sicht die Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). Neben der niedrigen Betriebstemperatur von 20 – 120 °C zeichnet sie sich vor allem durch ihr flexibles Betriebsverhalten sowie eine hohe Leistungsdichte von bis zu 3 kW/m² aus /IEA 2005/. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die Möglichkeit, anstelle von reinem Sauerstoff den Sauerstoff aus einer Luftströmung zu nutzen.

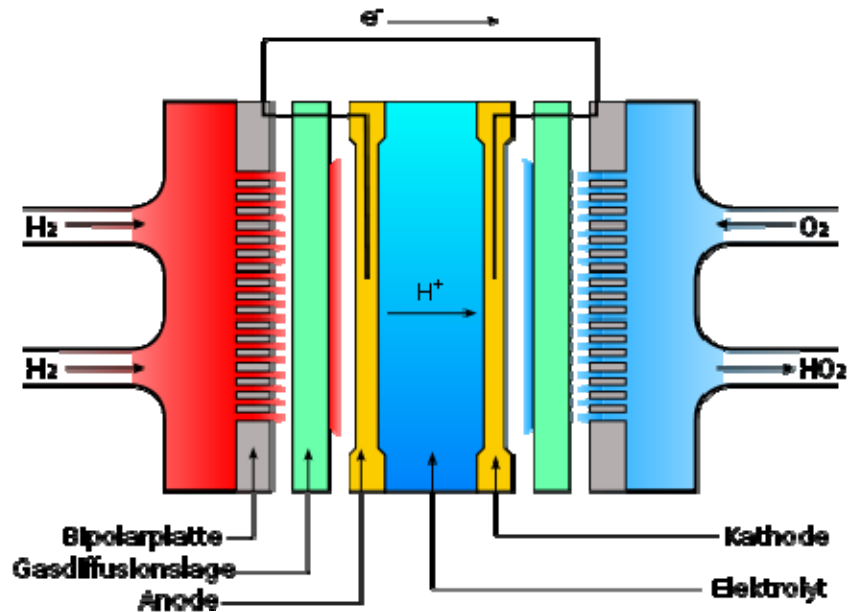


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Wasserstoff-Brennstoffzelle /Wikimedia 2009/

Tabelle 2-2: Übersicht verschiedener Brennstoffzellentypen /Stan 2005/, /IEA 2005/

Typ	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Besonderheiten	Anwendungen
Niedertemperaturbrennstoffzellen				
Alkaline Fuel Cell (AFC)	Wässrige Kalilauge	60 – 200°C	Hoher Wirkungsgrad, aber nur für reinen Wasserstoff und Sauerstoff geeignet	Raumfahrt, Verteidigungstechnik
Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Protonenleitende Polymermembran	20 – 120°C	Sehr flexibles Betriebsverhalten, hohe Leistungsdichte	Fahrzeuge, dezentrale Stromerzeugung (kleinere Anlagen)
Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)	Protonenleitende Polymermembran	90 – 120°C	Direkte Umwandlung von Methanol, niedriger Wirkungsgrad	Portable Anwendungen wie Mobiltelefon, Computer
Mitteltemperaturbrennstoffzellen				
Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Phosphorsäure	160 – 220°C	Begrenzter Wirkungsgrad, Korrosionsprobleme	Dezentrale Stromerzeugung, KWK
Hochtemperaturbrennstoffzellen				
Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Geschmolzene Karbonate	600 – 650°C	Komplexe Prozessführung, Korrosionsprobleme	Zentrale und dezentrale Stromerzeugung, KWK
Solid Oxide Fuel Cell	Festes Zirkoxid	850 – 1000°C	Direkte Verstromung von Erdgas, Keramiktechnologie (hohe Temperaturen)	Zentrale und dezentrale Stromerzeugung, KWK

Die Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) arbeitet ebenfalls in einem für mobile Anwendungen akzeptablen Temperaturbereich. Der Vorteil der direkten Nutzung von Methanol liegt

vor allem in der im Vergleich zu Wasserstoff wesentlich höheren Energiedichte von Methanol, was die Speicherung im Fahrzeug erleichtert. Aufgrund der geringeren Leistungsdichte von DMFCs im Vergleich zu PEMFCs und wegen des niedrigen Wirkungsgrads von derzeit maximal 37 % /IEA 2005/ scheint der Einsatz in Straßenverkehrsfahrzeugen dennoch problematisch. Bei allen weiteren Untersuchungen zu Brennstoffzellen betriebenen Elektrofahrzeugen wird im Rahmen der vorliegenden Studie daher stets vom Einsatz der PEMFC ausgegangen.

2.2.2 Reformer

Ein entscheidender Nachteil der Nutzung Wasserstoff betriebener Brennstoffzellen ist die niedrige Energiedichte von Wasserstoff, die eine technisch und ökonomisch aufwendige Speicherung im Fahrzeug erforderlich macht (siehe Kap. 2.2.3). Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, ist die Speicherung des Wasserstoffs in chemisch gebundener Form, z. B. in Erdgas oder Methanol. Der Wasserstoff wird dann im Reformer durch Dampfreformierung dieses Energieträgers gewonnen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass gerade in der Markteinführungsphase von Brennstoffzellenfahrzeugen, während der noch keine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut worden ist, auf bestehende Kraftstoffinfrastrukturen zurückgegriffen werden kann. Aufgrund der hohen Kosten für mobile Reformereinheiten und wegen der zusätzlichen Umwandlungsverluste konzentrieren sich derzeit jedoch nahezu alle Forschungsaktivitäten in Bezug auf Brennstoffzellenfahrzeuge auf eine Speicherung von reinem Wasserstoff im Fahrzeug /TAB 2006/.

2.2.3 Speicher

Aufgrund der niedrigen Energiedichte von Wasserstoff bei Umgebungstemperatur und Druck stellt seine Speicherung im Fahrzeug eine große Herausforderung dar. Derzeit werden vor allem die gasförmige Speicherung in Druckbehältern sowie die flüssige Speicherung in Kryo-gebehältern angewandt.

Bei der gasförmigen Speicherung in mobilen Anwendungen werden heute üblicherweise zylinderförmige Druckbehälter in Faserverbundbauweise (Edelstahl- oder Aluminiumgrundkörper mit Glas- oder Kohlenstofffaser-Umwicklung) verwendet. Dabei lassen sich derzeit Speicherdrücke von bis zu 350 bar erreichen, was einer massenspezifischen Speicherdichte von $89,6 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ entspricht. Speicherdrücke von 700 bar befinden sich jedoch bereits in der Erprobungsphase /Ragwitz et al. 2003/, /Krüger 2002/, /IEA 2005/.

Die Flüssigspeicherung von Wasserstoff erfolgt bei -253 °C in superisolierten Behältern, um Abdampfverluste durch Wärmeeintrag zu reduzieren. Die dabei angewandte Hochleistungs-Vakuum-Isolationstechnik basiert auf der Kombination einer metallischen Innenauskleidung aus Aluminium oder Kupfer mit einer Kohlenstoff- oder glasfaserverstärkten Kunststoffummantelung außerhalb. Die so erreichbare Speicherdichte liegt mit etwa $105 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ über der aktuellen Speicherdichte des gasförmigen Speicherkonzepts. Jedoch sind nach derzeitigem Entwicklungsstand pro Tag Abdampfverluste von 1,7 – 3 % des Speicherinhalts in Kauf zu nehmen /Ragwitz et al. 2003/, /Krüger 2002/.

Eine alternative Speichermethode für Wasserstoff ist die Speicherung in Metallhydriden, bei der die Wasserstoffatome unter Abgabe von Adsorptionswärme in speziellen Metalllegierungen eingelagert werden. Die Freisetzung des gebundenen Wasserstoffs erfordert eine erneute Wärmezufuhr. Den entscheidenden Nachteil dieser Methode stellt die hohe Masse des Metallspeichers dar, der die derzeit erreichbare Speicherdichte auf $10 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ begrenzt. Für die Zukunft werden maximale Speicherdichten von $20 - 25 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ erwartet /Ragwitz et al. 2003/, /Krüger 2002/.

Ebenfalls noch in der Entwicklungsphase befindet sich die Nanofaserspeichertechnik, bei der sich die Wasserstoffmoleküle ähnlich wie bei der Metallhydridspeicherung in mehreren Lagen an Graphit- oder Kohlenstofffasern anlagern. In Laborversuchen ließen sich bereits Speicherdichten von $200 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ bei Kohlenstoff-Nanofasern und $430 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ bei Graphit-Nanofasern realisieren, von einer kommerziellen großtechnischen Anwendung ist diese Technologie jedoch zurzeit noch weit entfernt.

2.3 Hybridfahrzeuge

Laut UN Definition aus dem Jahre 2003 werden Hybridantriebe allgemein definiert als Antriebe, bei denen mindestens zwei verschiedene Energiewandler (z. B. Verbrennungsmotor und Elektromotor) und zwei verschiedene Energiespeicher (z. B. Kraftstofftank und Batterie) vorhanden sind und zum Antrieb des Fahrzeugs beitragen /Braess 2007/. Ziel der Kombination zweier Antriebssysteme ist es, die systembedingten Schwächen der Einzelsysteme zu kompensieren und so eine Reduzierung von Energieverbrauch und Emissionen zu erreichen. In Abhängigkeit vom Grad der Hybridisierung lassen sich verschiedene Varianten von Hybridfahrzeugen unterscheiden. Diese werden im folgenden Kapitel 2.3.1 erläutert. Anschließend folgt ein Überblick über verschiedene Anordnungsvarianten der einzelnen Hybridantriebskomponenten im Fahrzeug (Kapitel 2.3.2) sowie eine Beschreibung typischer Betriebszustände (Kapitel 2.3.3).

2.3.1 Übersicht verschiedener Varianten von Hybridfahrzeugen

Der Mikro-Hybrid stellt die einfachste Form des Hybridantriebs dar und umfasst lediglich eine Start-Stopp-Automatik sowie bei einigen Varianten die Möglichkeit zur Rekuperation von Bremsenergie. Lichtmaschine und Anlasser werden hier durch einen Startergenerator ersetzt, der über einen Riemen mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist. Der Verbrennungsmotor wird automatisch abgeschaltet, wenn das Fahrzeug steht oder sich im Leerlauf befindet. Bei Betätigung des Kupplungspedals wird der Verbrennungsmotor mithilfe des Riemen-Starter-Generators wieder in Betrieb gesetzt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die beim Bremsen freiwerdende Energie zurückzugewinnen und zum Laden der Batterie einzusetzen. Insgesamt lassen sich auf diese Weise Verbrauchseinsparungen von $5 - 10 \%$ realisieren. Gemäß der oben genannten UN Definition darf der Mikro-Hybrid streng genommen nicht zu den Hybridantrieben gezählt werden, da der Startergenerator nicht als eigene Antriebsmaschine fungiert, sondern nur zum Anlassen des Verbrennungsmotors dient.

Der Mild-Hybrid verfügt über einen wesentlich leistungsfähigeren Elektromotor (ca. 10 - 15 kW gegenüber ca. 2 - 3 kW). Dieser wird in bestimmten Lastbereichen zur Unterstützung des Verbrennungsmotors eingesetzt. Wie bei allen weiteren Hybridvarianten kann auch beim Mild-Hybrid der Elektromotor während des Bremsens oder im Schiebetrieb als Generator zur Rekuperation von Bremsenergie eingesetzt werden. Eine Start-Stopp-Funktion ist ebenfalls bei allen Varianten integriert. Der Verbrauchsvorteil des Mild-Hybrids liegt in der Regel bei 10 – 15 %.

Im Gegensatz zum Mild-Hybrid, bei dem der Elektromotor lediglich additiv zur Unterstützung des Verbrennungsmotors eingesetzt wird, ist es beim Voll-Hybrid möglich, zeitweise rein elektrisch zu fahren. Dies erfordert in der Regel eine höhere Leistung des Elektromotors sowie eine größere Batteriekapazität.

Während bei den bisher geschilderten Hybridvarianten die Stromerzeugung ausschließlich intern durch Rekuperation von Bremsenergie bzw. durch den Betrieb des Verbrennungsmotors mit Lastpunktanhebung erzeugt wird (vgl. Kapitel 2.3.3), zeichnet sich der Plug-In-Hybrid dadurch aus, dass seine Batterie auch an einer externen Stromquelle aufgeladen werden kann. Die Speicherkapazität der Batterie wird nochmals erhöht, um den Aktionsradius im lokal emissionsfreien und effizienten Elektromodus zu vergrößern. Liegt die durchschnittliche Tagesfahrleistung des Fahrzeugnutzers unterhalb der maximalen elektrischen Reichweite, kann der Plug-In-Hybrid praktisch als Elektroauto interpretiert werden, bei dem der Verbrennungsmotor lediglich in Ausnahmesituationen als Range Extender zum Einsatz kommt. In der folgenden Tabelle werden die Eigenschaften verschiedener Hybridantriebsvarianten aufgezeigt.

Tabelle 2-3: Vergleich typischer Eigenschaften verschiedener Hybridantriebskonzepte /IEA 2007/, /Hybrid-Autos 2009/

	Einheit	Mikro	Mild	Voll	Plug-in
Funktionalität	-	Start-Stopp, Rekuperation	Start-Stopp, Rekuperation, Boosten	Start-Stopp, Rekuperation, Boosten, rein elektrisches Fahren	Start-Stopp, Rekuperation, Boosten, rein elektrisches Fahren, externe Batterieaufladung
Leistung E-Motor	kW	< 6	<13	20 – 100	< 80
Bordspannung	V	12	12 - 42	> 150	> 200
Verbrauchseinsparung	%	5 - 10	10 - 15	> 20	Abhängig vom Anteil der externen Aufladung
Fahrzeugbeispiele (*Prototypen/Studien)	-	BMW 1er Start Stop Automatik; Citroen C3 Start & Stop	Honda Civic IMA 2006; Honda CR-Z 2007	Toyota Prius 2006, Lexus RX450h 2008	Chevrolet Volt Concept 2007*; Toyota Prius PHV 2008*; Volkswagen TwinDrive 2008*

Eine alternative Methode zur Klassifizierung von Hybridantrieben bietet der Hybridisierungsgrad Hr , der das Verhältnis aus elektrischer Antriebsleistung zu Gesamtantriebsleistung repräsentiert Gleichung (2-1).

$$Hr = \frac{\text{Leistung } E - \text{Motor}}{\text{Leistung } E - \text{Motor} + \text{Leistung Verbrennungsmotor}} \quad (2-1)$$

Dabei gilt die folgende Einteilung /Stan 2005/, /TAB 2006/:

- Mild Hybrid: $Hr < 0.23$
- Semi-Hybrid: $0.23 \leq Hr \leq 0.38$
- Full-Hybrid: $0.38 < Hr$

2.3.2 Anordnungsvarianten der einzelnen Antriebskomponenten

Abhängig von der Anordnung der einzelnen Antriebskomponenten werden bei Hybridfahrzeugen mehrere Varianten unterschieden. Beim Parallel-Hybrid sind die Antriebskomponenten entsprechend Abbildung 2-4 angeordnet. Sowohl Verbrennungsmotor als auch E-Motor sind mechanisch mit der Antriebsachse gekoppelt und können diese entweder jeweils alleine oder gemeinsam antreiben. Je nach Betriebszustand arbeitet die E-Maschine auch als Generator und lädt mit überschüssiger Energie die Batterie.

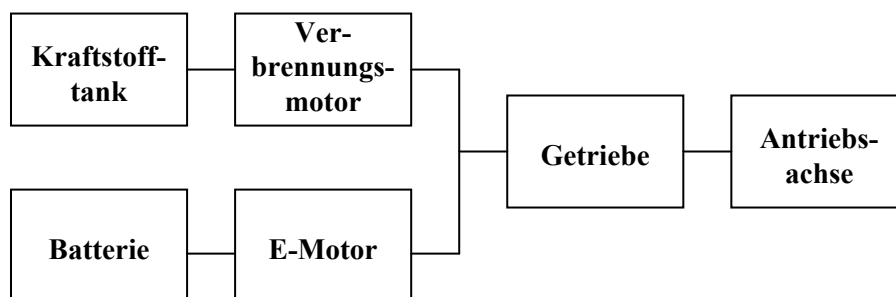


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Parallel-Hybridantriebs /IPTS 2005/

Beim seriellen Hybrid sind die einzelnen Antriebskomponenten in Reihe geschaltet (Abbildung 2-5). Der Verbrennungsmotor besitzt hierbei keine mechanische Verbindung zur Antriebsachse mehr, sondern treibt lediglich einen Generator an. Den eigentlichen Antrieb leistet der E-Motor, der seine elektrische Energie entweder vom Generator oder von der Batterie oder von beiden gleichzeitig erhält. Im Gegensatz zum parallelen Hybrid muss der E-Motor somit größer dimensioniert werden, da er unabhängig vom Betriebszustand immer allein die volle Antriebsleistung bereitstellt. Angewandt wird das Konzept des seriellen Hybridantriebs daher in erster Linie bei Plug-In-Hybridfahrzeugen, die größtenteils im rein elektrischen Antriebsmodus arbeiten.

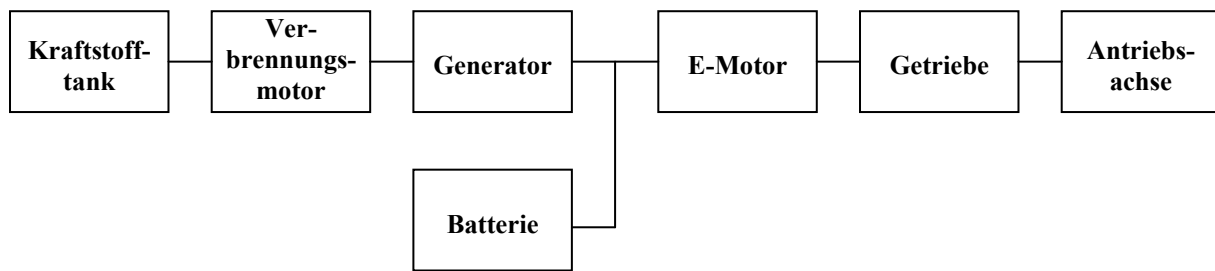


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines seriellen Hybridantriebs /IPTS 2005/

Neben den beiden genannten Hybridvarianten existieren noch eine Reihe von Mischhybrid-Varianten, die eine Kombination dieser beiden darstellen. Als Beispiel sei hier der leistungsverzweigte (Powersplit) Hybridantrieb dargestellt, der auch beim Toyota Prius zum Einsatz kommt (Abbildung 2-6). Das vom Verbrennungsmotor erzeugte Antriebsmoment wird hierbei stets aufgesplittet. Ein Teil wird direkt über die mechanische Verbindung zur Antriebsachse geleitet. Der andere Teil wird zum Betrieb eines Generators verwendet, dessen erzeugte elektrische Energie entweder zum Antrieb des E-Motors oder zum Laden der Batterie eingesetzt wird.

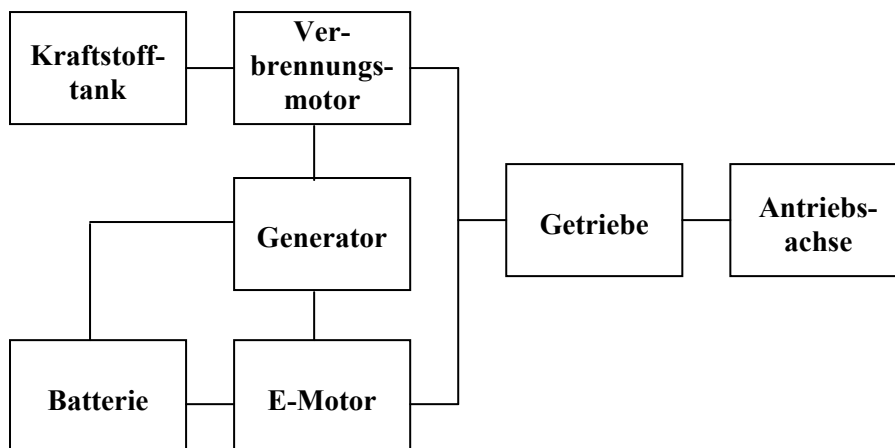


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung eines Powersplit-Hybridantriebs /IPTS 2005/, /Hybrid-Auto 2009/

2.3.3 Betriebszustände von Hybridfahrzeugen

Generell wird der Verbrennungsmotor bei Hybridfahrzeugen häufig nach dem Atkinson Zyklus betrieben. Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt in der variablen Ventilsteuerung, die es ermöglicht, die Einlassventile sehr spät zu schließen. Dadurch können im Gegensatz zum konventionellen Ottoprozess unterschiedliche Kompressions- und Expansionsverhältnisse erreicht werden. Während das Kompressionsverhältnis technischen Grenzen unterliegt, lässt sich das Expansionsverhältnis und damit auch die vom Kolben verrichtete Arbeit auf diese Weise steigern. Angewandt wird das Atkinson-Verfahren z. B. beim Toyota Prius der ersten und zweiten Generation, bei dem ein Expansionsverhältnis von 13:1 bei einem Kompressionsverhältnis von 7:1 erzielt wird. Hauptnachteil des Atkinson-Verfahrens ist das geringere Drehmoment des Motors im niedrigen Drehzahlbereich, das sich bei Hybridantrieben jedoch

durch das zusätzliche Antriebsmoment des E-Motors kompensieren lässt /Hybrid-Autos 2009/, /IEA 2007/.

Im Folgenden wird das Zusammenspiel der beiden Antriebe Verbrennungsmotor und E-Motor in verschiedenen Betriebszuständen erläutert.

Konventionell

Im konventionellen Fahrmodus wird die benötigte Antriebsenergie durch den Verbrennungsmotor bereitgestellt (Abbildung 2-7). Beim parallelen Hybridantrieb geschieht dies durch direkte mechanische Kraftübertragung über das Getriebe an die Antriebsachse. Da diese direkte Verbindung mit der Antriebsachse beim seriellen Antrieb nicht existiert, treibt der Verbrennungsmotor hier zunächst den Generator an. Mit dem erzeugten Strom wird der Elektromotor angetrieben, der die eigentliche Antriebsmaschine darstellt. Beim Powersplit-Hybrid wird das Antriebsmoment des Verbrennungsmotors teilweise direkt und teilweise durch zweimalige Umwandlung in Generator und E-Maschine zur Antriebsachse geleitet.

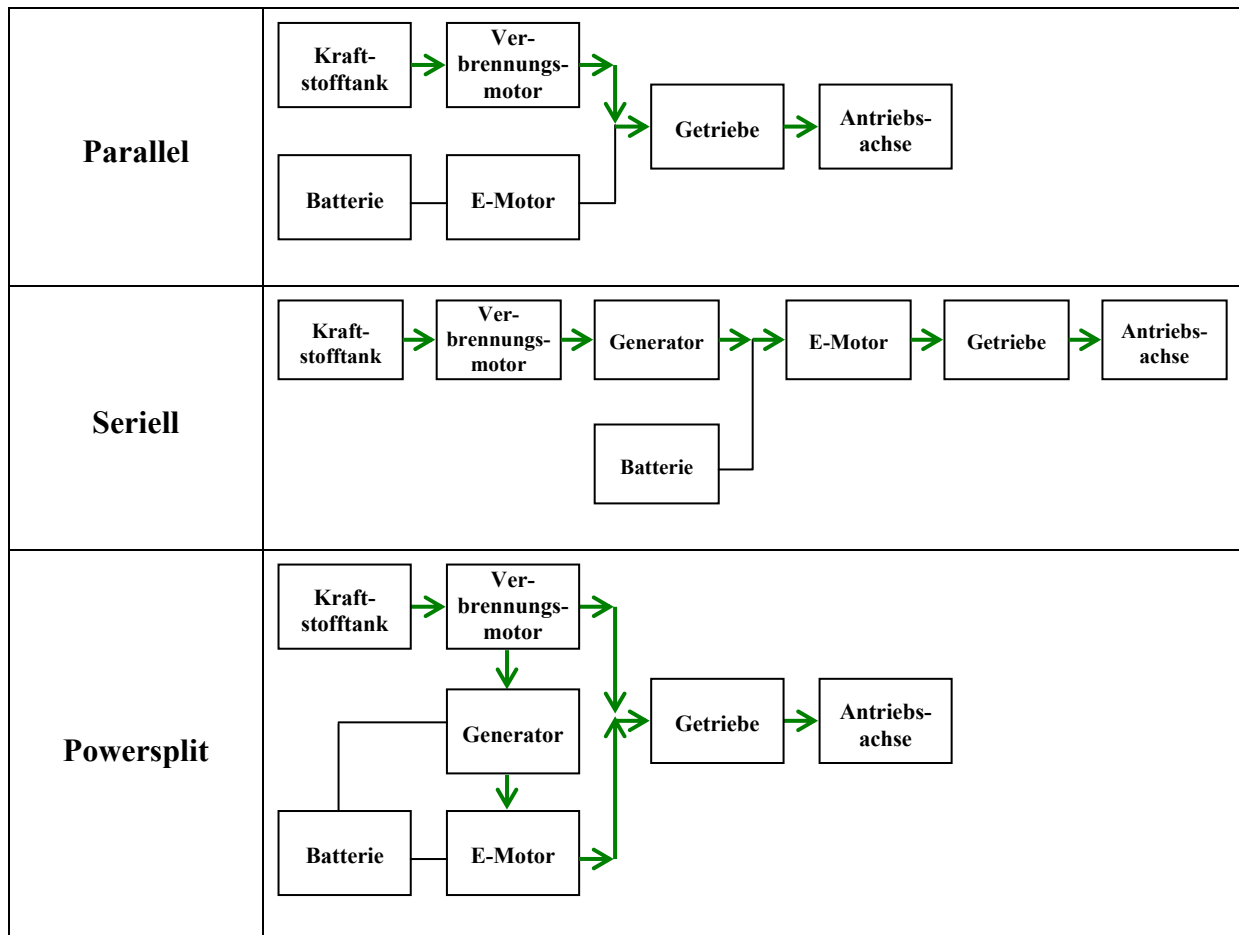


Abbildung 2-7: Konventioneller Fahrmodus bei verschiedenen Hybridvarianten

Rein elektrisches Fahren

Beim rein elektrischen Fahren ist der Verbrennungsmotor ausgeschaltet (Abbildung 2-8). Der E-Motor treibt das Fahrzeug alleine an und erhält seine elektrische Energie aus der Batterie.

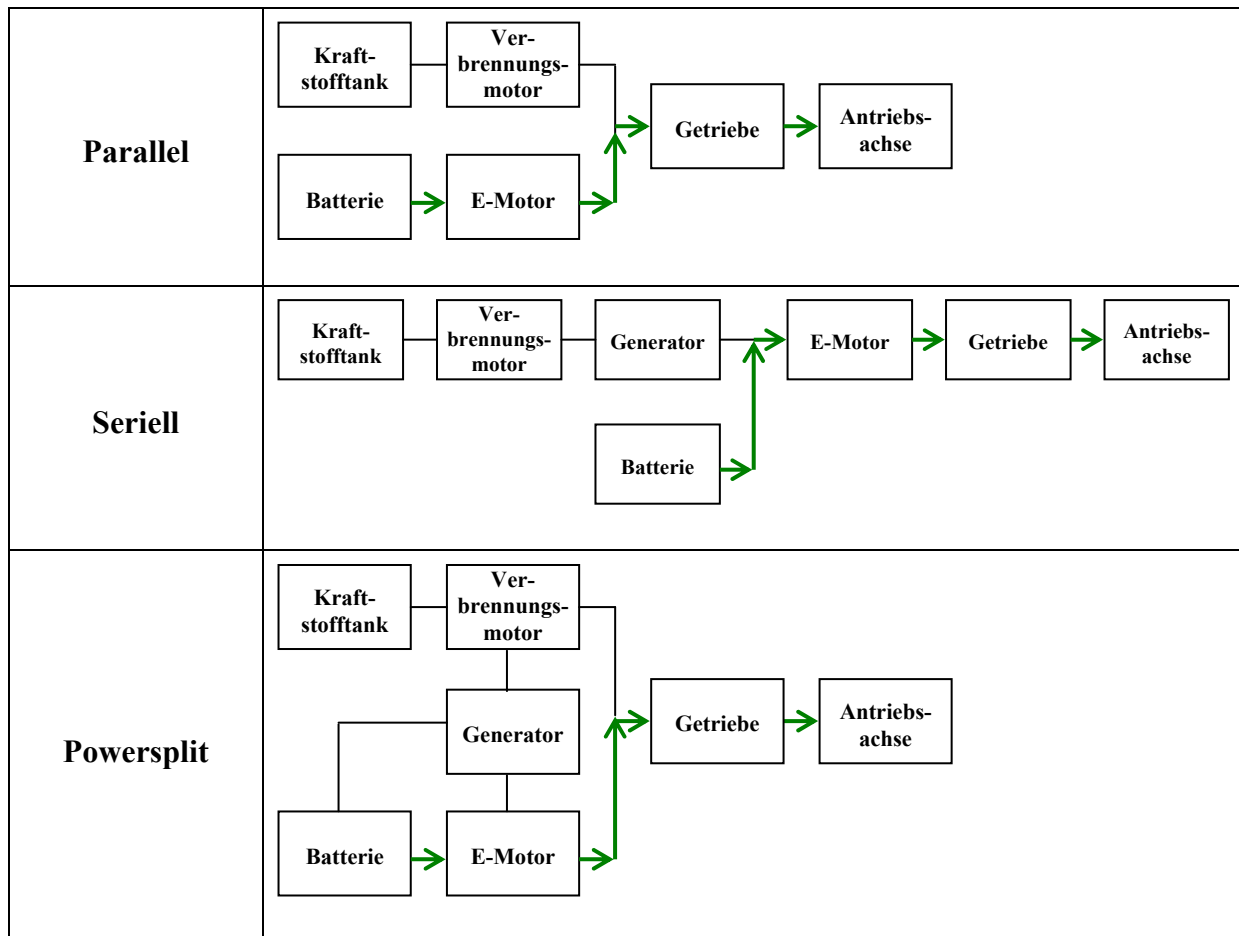


Abbildung 2-8: Rein elektrischer Fahrmodus bei verschiedenen Hybridvarianten

Boosten

Im Betriebszustand Boosten treiben Verbrennungsmotor und Elektromotor das Fahrzeug gemeinsam an. Während beim Parallelhybrid die elektrische Energie zum Antrieb des E-Motors aus der Batterie kommt, wird sie bei seriellern und Powersplit-Hybrid zusätzlich durch die Kombination Verbrennungsmotor und Generator erzeugt (Abbildung 2-9).

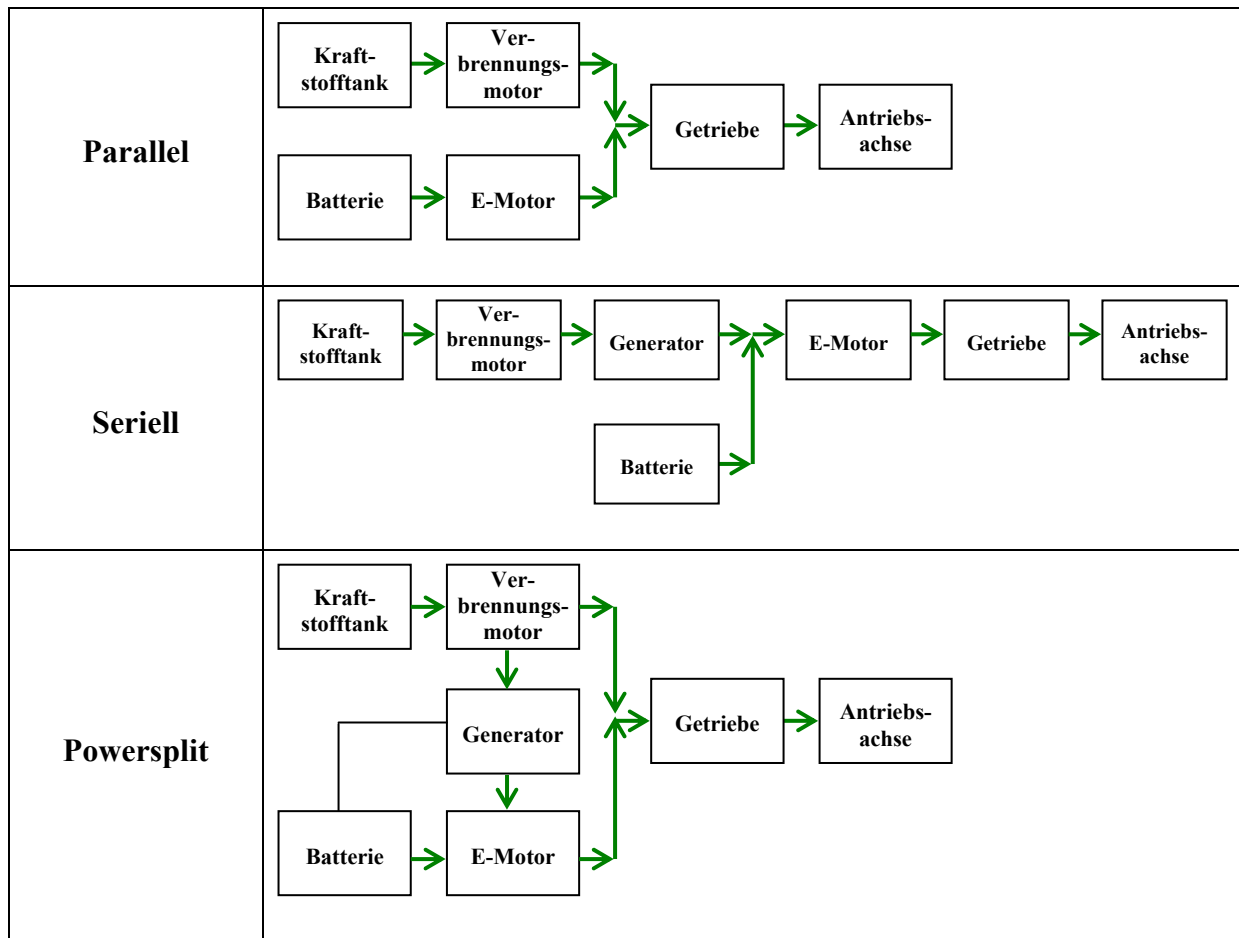


Abbildung 2-9: Betriebszustand Boosten bei verschiedenen Hybridvarianten

Rekuperation

Während des Rekuperationsbetriebs wird überschüssige Bremsenergie zurückgewonnen und zur Aufladung der Batterie eingesetzt (Abbildung 2-10). Bei allen Hybridvarianten übernimmt dabei der E-Motor die Funktion eines Generators.

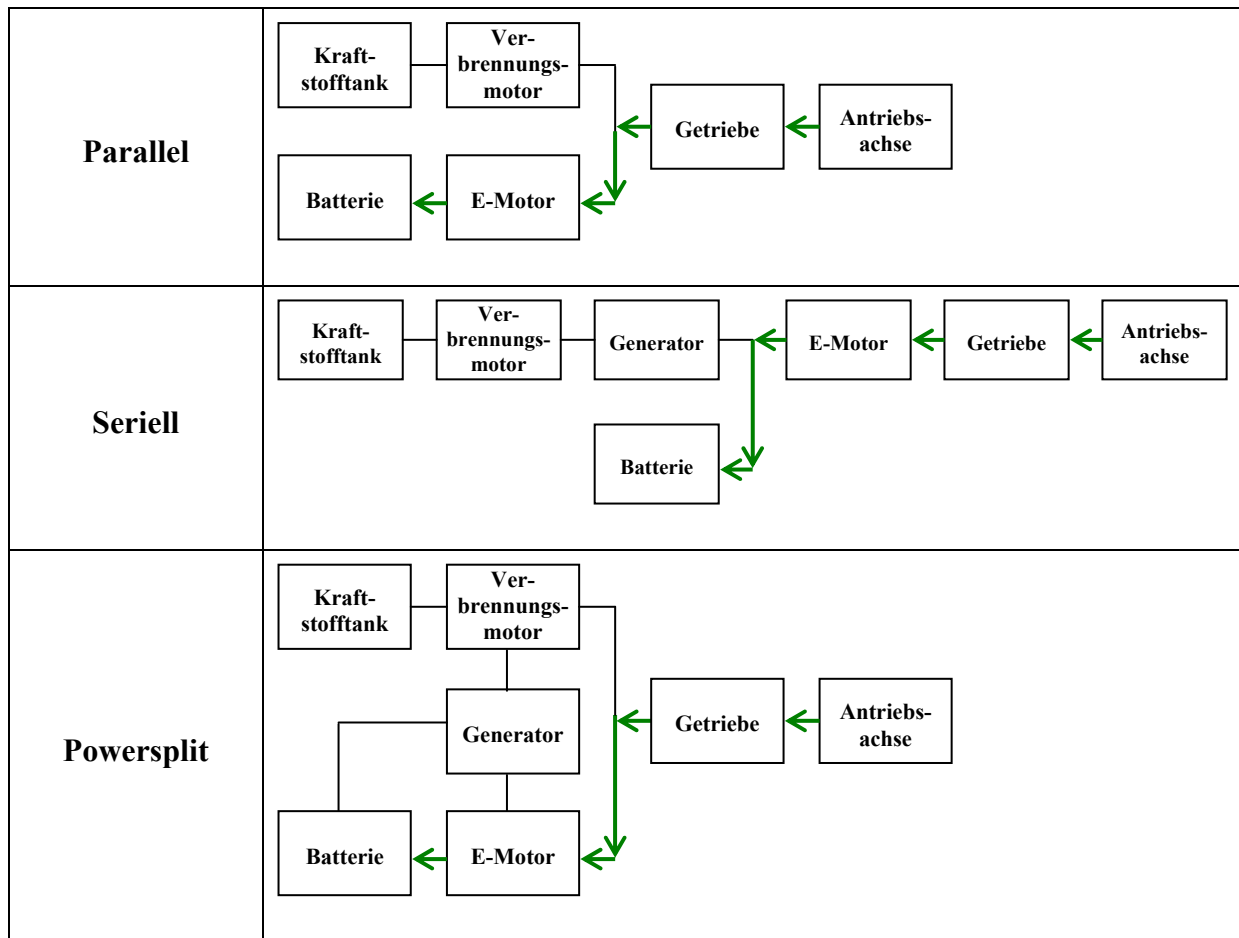


Abbildung 2-10: Rekuperation von Bremsenergie bei verschiedenen Hybridvarianten

Lastpunktanhebung

Stellt der Verbrennungsmotor mehr Leistung bereit, als zum Antrieb des Fahrzeugs erforderlich ist, spricht man von Lastpunktanhebung (Abbildung 2-11). Die überschüssige Leistung wird zum Aufladen der Batterie über den Generator eingesetzt. Beim Parallelhybrid übernimmt der E-Motor die Funktion des Generators. Vorteil dieser Betriebsmethode ist die Ausnutzung des höheren Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors bei hohen Lasten.

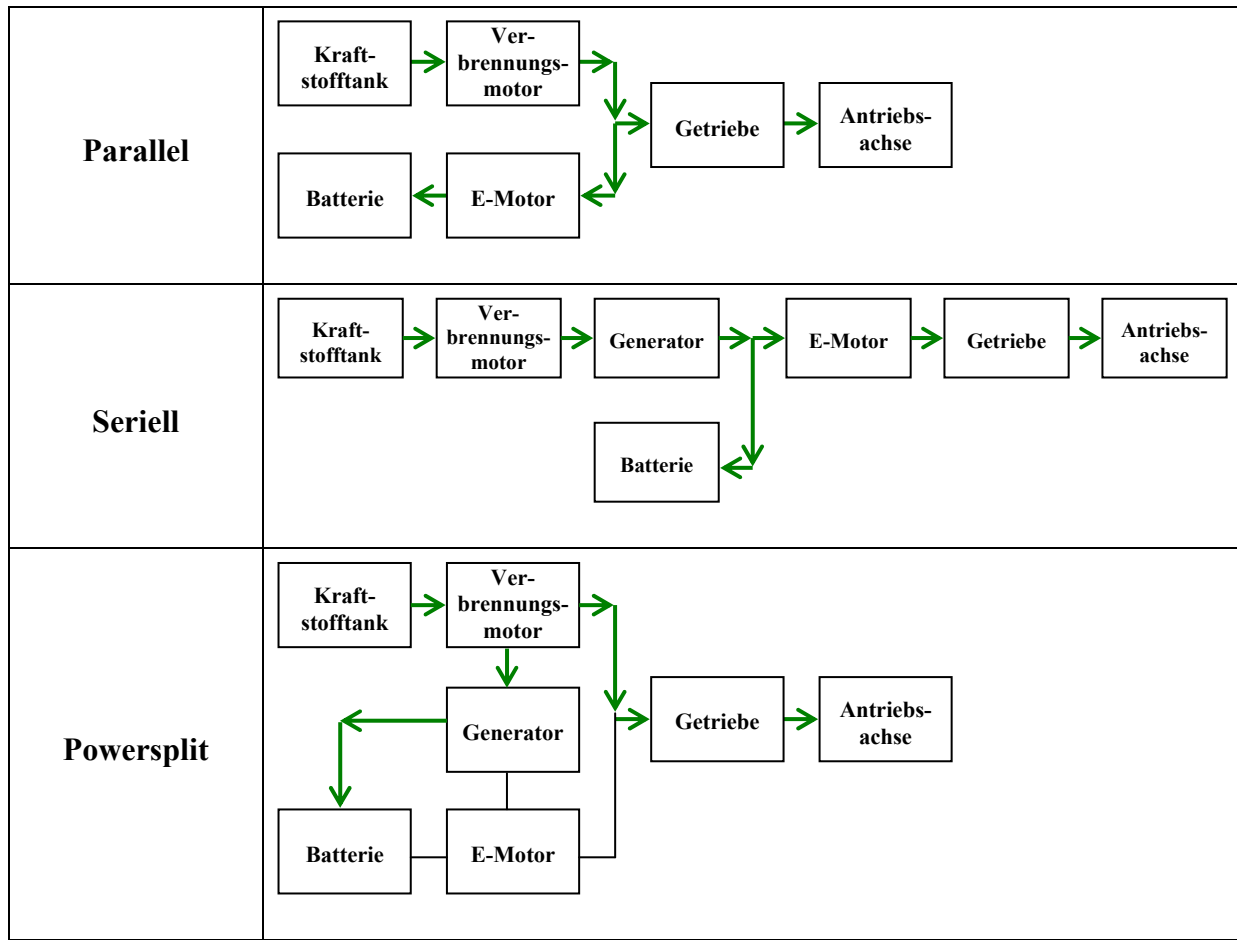


Abbildung 2-11: Lastpunktanhebung bei verschiedenen Hybridvarianten

2.4 Alternative mobile Energiespeicherkonzepte

Neben der Methode der chemischen Speicherung elektrischer Energie in einer Batterie existiert noch eine Reihe alternativer Speicherkonzepte, die für die mobile Anwendung im Fahrzeug geeignet sein können. Supercaps, auch Ultracaps oder Doppelschichtkondensatoren genannt, stellen eine spezielle Art von Kondensatoren dar. Sie bestehen aus zwei Elektroden, die mit einem Elektrolyten benetzt werden. Bei Anlegung einer Spannung sammeln sich Ionen aus dem Elektrolyten an den Grenzflächen der Elektroden und laden diese auf. Besonderer Vorteil der Supercaps ist ihre hohe Leistungsdichte von derzeit bis zu 1000 W/kg, die damit deutlich größer als bei allen heutigen Batterietypen ausfällt (Tabelle 2-4). Dem entgegen steht jedoch die niedrige Energiedichte von nur etwa 2 Wh/kg. Als alleiniger Energiespeicher für elektrische und hybridelektrische Fahrzeugantriebe scheinen Supercaps daher nicht geeignet. Jedoch lassen sie sich insbesondere bei Hybridantrieben sehr gut additiv in Kombination mit einer Batterie nutzen, um die beim regenerativen Bremsen kurzfristig anfallenden hohen Ladeleistungen aufzunehmen und bei der anschließenden Beschleunigung wieder freizusetzen /Heinemann 2006/, /IPTs 2005/.

Tabelle 2-4: Vergleich der Eigenschaften von Pb-Batterie und Supercap /Heinemann 2006/

	Pb-Batterie	Supercap
Pos. Elektrode	Pb/PbSO ₄	C
Neg. Elektrode	PbO ₂ /PbSO ₄	C
Elektrolyt	H ₂ SO ₄	Organisch
Speicherprinzip	elektrochemisch	Elektrostatisch
Zellspannung	2 V	2.3
Energiedichte	40 Wh/kg	2 Wh/kg
Leistungsdichte	150 W/kg	1000 W/kg

Eine weitere Variante zur kurzzeitigen Energiespeicherung im Fahrzeug stellen sogenannte Flywheels dar. Sie bestehen aus einer rotierenden Masse, mit deren Hilfe Energie in kinetischer Form gespeichert wird. Während der Speicherladung wird ein Schwungrad durch einen E-Motor in Rotation versetzt. Zur Speicherentladung arbeitet der E-Motor als Generator und wandelt die kinetische Energie zurück in elektrische Energie. Der Wirkungsgrad eines solchen Systems liegt bei bis zu 98 %. Die Speicherkapazität des Flywheels hängt in erster Linie von der Dichte und Festigkeit des Materials. Bei Einsatz von Stahl lässt sich eine theoretische Speicherdichte von bis zu 50 Wh/kg erreichen, mit Kevlar basierten Kohlefaserverbundwerkstoffen wurden bereits 200 Wh/kg erzielt. Die maximale Ladeleistung hängt allein von der Leistung der als E-Motor bzw. Generator eingesetzten Maschine ab. Ähnlich wie Supercaps eignen sie sich daher besonders zur Aufnahme kurzfristiger hoher Leistungen wie beim regenerativen Bremsen / IPTS 2005/.

3 Ökonomische und technische Analyse verschiedener elektrischer und hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe im PKW-Bereich

Im Folgenden werden die derzeitigen sowie die bis zum Jahr 2030 erreichbaren Kosten der verschiedenen Varianten elektrischer und hybrid-elektrischer Antriebe im Pkw-Bereich analysiert. Um die Ergebnisse der Analyse anschließend bewerten zu können, werden zusätzlich die Kosten eines konventionellen Referenzfahrzeuges mit Otto- bzw. Dieselmotor betrachtet. Zunächst werden die spezifischen Kosten der Hauptantriebskomponenten der verschiedenen Antriebssysteme im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche einzeln ermittelt. Grundsätzlich sind alle Kostenangaben in dieser Studie, sofern nicht anders gekennzeichnet, in EUR₂₀₀₇ ausgewiesen. Neben den Kosten werden je nach Antriebskomponente auch unterschiedliche technische Parameter wie Masse, Leistungs- oder Energiedichte betrachtet, die für die Auslegung der Fahrzeugantriebe von Bedeutung sind. Einen Überblick über die betrachteten Antriebsalternativen sowie die jeweils betrachteten Antriebskomponenten gibt Tabelle 3-1. Anschließend werden mithilfe der spezifischen Kosten die resultierenden Gesamt-Investitionskosten für zwei repräsentative Fahrzeugtypen (Kleinstwagen, Mittelklassewagen) ermittelt.

Tabelle 3-1: Betrachtete Fahrzeugantriebe und Antriebskomponenten

	Konventionelles Fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Verbrennungsmotor	X				X	X	X
Getriebe	X				X	X	
Benzin-/Dieseltank	X				X	X	X
Brennstoffzelle			X	X			
H2-Speicher			X	X			
Batterie		X		X	X	X	X
E-Motor		X	X	X	X	X	X
E-Motorsteuerung		X	X	X	X	X	X
DC/DC-Wandler		X		X	X	X	X
AC/DC-Wandler		X					X

BEV (Batterie gestützte Elektrofahrzeug); FCEV (Brennstoffzellen gestützte Elektrofahrzeug); FCHEV (Brennstoffzellen gestützte Hybridfahrzeug); HEV (Hybridfahrzeug); PHEV (Plug-In-Hybridfahrzeug)

3.1 Verbrennungsmotor, Getriebe und Kraftstofftank

Verbrennungsmotoren kommen sowohl beim konventionellen Referenzfahrzeug als auch bei den Hybridvarianten HEV_{Full}, HEV_{Mild} und PHEV als Antriebsmaschine zum Einsatz. Während für die Hybridvarianten stets der Einsatz eines Ottomotors angenommen wird, werden beim Referenzfahrzeug sowohl Ottomotor als auch Dieselmotor betrachtet. Grundsätzlich

unterscheiden sich Otto- und Dieselmotoren deutlich bezüglich ihrer spezifischen Kosten. Bei heutigen nicht aufgeladenen Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung betragen sie üblicherweise ca. 30 EUR/kW. Demgegenüber liegen die spezifischen Kosten heutiger Dieselmotoren bei ca. 52,4 EUR/kW /Concawe 2007/. In den genannten Kosten sind die Kosten für das Getriebe bereits enthalten. Die Mehrkosten bei Dieselmotoren ergeben sich aus der höheren Komplexität. Zusätzliche Kostenkomponenten im Vergleich zum Ottomotor sind beispielsweise Einspritzsystem, Abgasturbolader und Systeme zur Abgasnachbehandlung (z. B. NO_x-Katalysator, Partikelfilter).

Die zukünftige Entwicklung der spezifischen Kosten von Verbrennungsmotoren wird durch zwei wesentliche Faktoren bestimmt. Zum einen gilt es, den spezifischen Kraftstoffverbrauch weiter zu senken, um somit die CO₂-Emissionen zu reduzieren und künftige CO₂-Emissionsstandards, wie das von der EU vorgegebene Limit von 120 g/km für den Durchschnitt aller Neufahrzeuge im Jahr 2015, einzuhalten. Gleichzeitig erfordert die Einführung verschärfter Grenzwerte für sonstige Schadstoffemissionen im Zuge der EU-Abgasnormen Euro 5 und Euro 6 zusätzliche Aufwendungen für Abgasnachbehandlungssysteme, sofern die geforderten Grenzwerte nicht allein durch innermotorische Maßnahmen eingehalten werden können. Für die Umsetzung dieser Ziele existieren eine Vielzahl technischer Optionen mit jeweils unterschiedlichen Kosten und CO₂-Einsparpotenzialen (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Kosten und CO₂-Einsparpotenzial verschiedener technischer Optionen bei Benzin- und Dieselmotoren der Mittelklasse /IEA 2008/, /EIA 2006/, /Mc Kinsey 2006/, /Wuppertal Institut 2006/, /TNO 2006/

	Maßnahme	Benziner		Diesel	
		Einsparpotenzial	Kosten [EUR]	Einsparpotenzial	Kosten [EUR]
Motor	Reduzierung Motorreibungsverluste	2% - 6.5%	25 - 177	2% - 6.5%	25 - 177
	Direkteinspritzung	3-5%	200 - 300		
	Entdrosselung durch Abgasrückführung	5%			
	Downsizing + Turboaufladung	7% - 12%	300 - 450	3% - 7%	150 - 300
	Variable Ventilsteuerung	5% - 8%	200 - 750		
	Zylinderabschaltung	4.5 - 5%	250 - 500	4.5%	250
	Variables Verdichtungsverhältnis	4.0%	300 - 600		
	Optimierter Kühlkreislauf	0.3 - 1.5%	10 - 35	0.3 - 1.5%	10 - 35
	Optimierter Kühlkreislauf + elektr. Pumpe	1% - 3%	50 - 150	1% - 3%	50 - 150
Getriebe	Optimierte Getriebeübersetzung	1.5%	60	1.5%	60
	5 und 6-Gang Automatikgetriebe, kontinuierlich variable Überetzung	6.5 - 10%	435 - 615	6.5 - 10%	435 - 615
	Doppelkupplungsgetriebe	5%	700	5%	700
Karosserie	Verbesserte Aerodynamik	1.5%	75	1.5%	75
	Gewichtsreduzierung	1% - 5.8%	28 - 294	1% - 5.8%	28 - 294
Sonstige	Rollwiderstand reduzierte Reifen	2%	30	2%	30
		2 - 6%	30 - 135	2 - 6%	30 - 135
	Elektr. Servolenkung	2.5%	100	2.5%	100
	Start-Stopp-Automatik	3% - 10%	250	3% - 10%	250
	NO _x - Abgasreinigung			+1%	350 - 500

Eine weitere Kostenkomponente bei Fahrzeugantrieben mit Verbrennungsmotor ist der Kraftstofftank. Die Kosten eines Tanks mit 50 l Fassungsvermögen betragen ca. 125 EUR bei einer Masse im leeren Zustand von ca. 15 kg /Concawe 2007/.

3.2 Brennstoffzelle

Die spezifischen Kosten der Brennstoffzelle sind in Abbildung 3-1 dargestellt. Die blauen Dreiecke zeigen Literaturwerte für verschiedene Zeitintervalle und die grauen Punkte repräsentieren dabei US-amerikanische Zielwerte des Department of Energy (DOE). Die Abbildung verdeutlicht, dass die von Seiten des DOE vorgegebenen Ziele nach allgemeiner Einschätzung nicht zu erreichen sein werden. Angenommen wird aber, dass die Ziele mit einer 20-jährigen Verspätung erfüllt werden können.

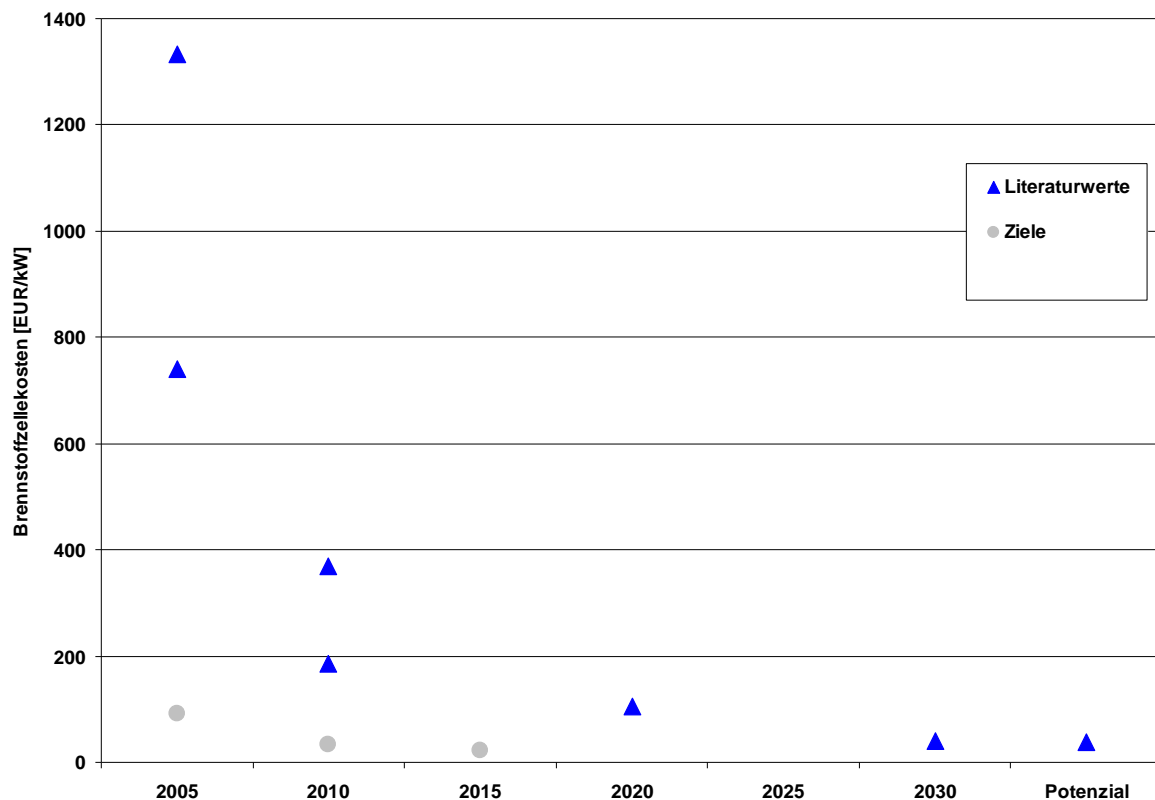


Abbildung 3-1: Derzeitige und zukünftige spezifische Kosten von Brennstoffzellen /IEA 2005/, /Concawe 2007/, /Gül 2008/, /NREL 2005/

Abbildung 3-2 veranschaulicht zukünftige spezifische Kosten von Brennstoffzellen. Aus der Abbildung lässt sich vermuten, dass mögliche Mindestkosten (floor costs) im Bereich von 20 bis 60 EUR/kWh liegen werden.

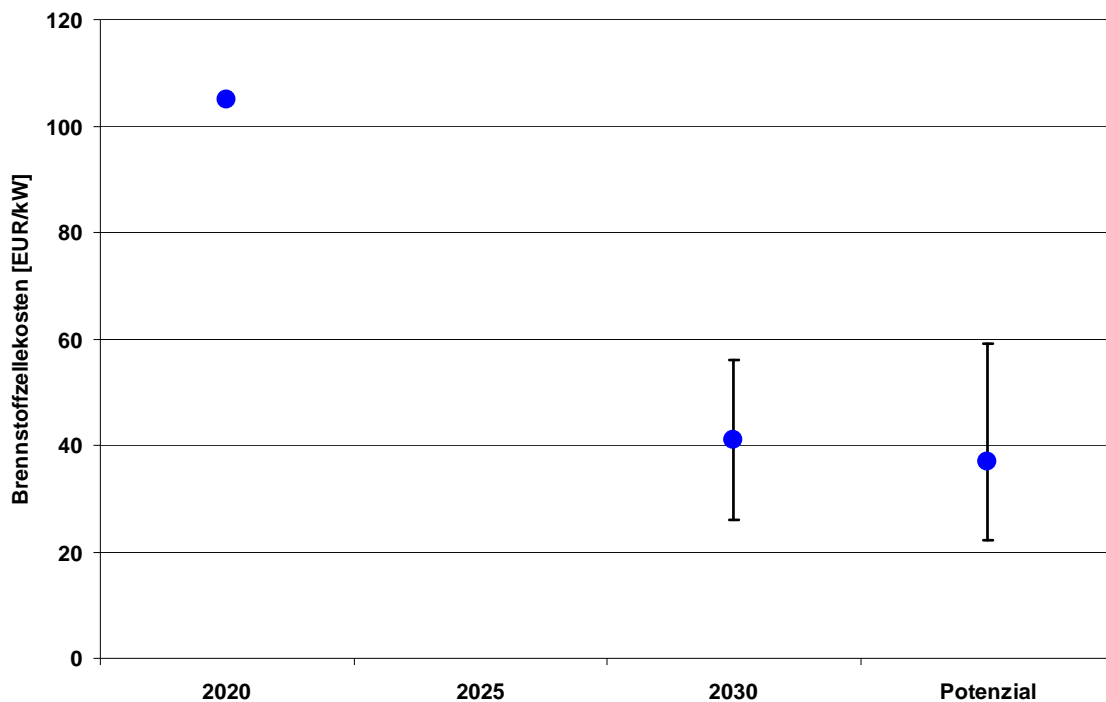


Abbildung 3-2: Nahansicht der zukünftigen spezifischen Kosten von Brennstoffzellen /IEA 2005/, /Concawe 2007/, /Gül 2008/

Tabelle 3-3 beinhaltet die prozentualen Kostenanteile von Brennstoffzellen. Zu sehen ist, dass die größten Kostenbestandteile dieser Technologie die Komponenten Membran, Elektrode und bipolare Platten sind.

Tabelle 3-3: Kostenanteile der Brennstoffzelle /Tsuchiya und Kobayashi 2004/, /IEA 2005/

	Derzeitige Kosten- anteile (%)	Zukünftige Kos- tenanteile (%)
Membran	14	16
Elektrode	39	49
Bipolare Platten	45	29
Platin Katalysator	1	3
Peripheriegeräte	<1	1
Montage	<1	2
Summe	100	100

Ein Einsatz von alternativen Membranmaterialien könnte zu signifikanten Kostensenkungen der Brennstoffzelle führen. Derzeitige Nafionmembrane können in Zukunft u. a. durch organisch veränderte Silikate, die heute noch nicht am Markt verfügbar sind, ersetzt werden. Eine

Ersetzung des Membranmaterials verspricht für diese Komponente eine Kostensenkung von bis zu 90 % / IEA 2005/.

Die Kosten der Elektrode sind im Wesentlichen von der Produktionstechnik und dem Produktionsvolumen abhängig. Erwartet wird, dass eine Massenproduktion Kostensenkungen von 90 % mit sich bringen wird / IEA 2005/.

Genauso wird durch eine Massenproduktion von bipolaren Platten eine Kostensenkung, in diesem Fall von 95 %, erwartet. Ein solch hohes Produktionsvolumen wird sich auch auf die eingesetzten Materialien der bipolaren Platten auswirken und den derzeit für diese verwendeten gefrästen Graphit oder den Gold ummantelten Stahl durch geeignete Kohlenstoff-Polymer Komposite ersetzen / IEA 2005/.

Fraglich ist, ob verfügbare Produktionskapazitäten der Nachfrage folgen können und nicht zu Engpässen in der Brennstoffzellenproduktion führen. Es wird davon ausgegangen, dass man für eine jährliche Fahrzeugproduktion mit Brennstoffzellenantrieb von 100 Millionen Stk., eine jährliche Platinproduktion von 2 kt benötigt. Diese Menge entspricht der zehnfachen heutigen Produktion / IEA 2005/.

Die gravimetrische Leistungsdichte für derzeitige Brennstoffzellen liegt zwischen 0,47 und 0,58 kW/kg /NREL 2005/, /Mench 2008/. Erwartet wird in Zukunft eine Erhöhung dieses Wertes auf 0,65 kW/kg/Mench 2008/.

3.3 Wasserstoffspeicher

Die spezifischen Kosten der Wasserstoffspeicherung sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Sie beziehen sich jeweils auf eine gasförmige Speicherung des Wasserstoffs bei 700 bar. Erneut stellen die blauen Dreiecke die Literaturwerte und die grauen Punkte die Zielwerte des DOE dar.

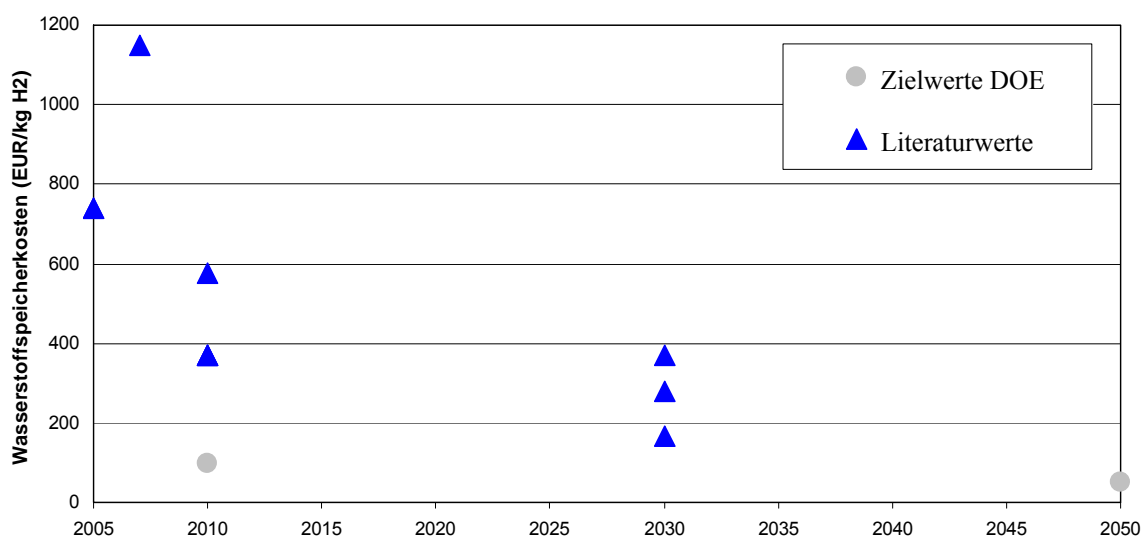


Abbildung 3-3: Derzeitige und zukünftige spezifische Kosten von Wasserstoffspeicher /IEA 2005/, /Concawe 2007/

Derzeitige Kosten (für die Jahre 2005 und 2010) liegen zwischen ca. 400 und 1150 EUR/kg H₂. Bezogen auf den Energieinhalt entsprechen diese Kosten 12 - 34,5 EUR/kWh. Der Zielwert des DOE für 2010 ist optimistischer als die Literaturwerte. Selbst die prognostizierten Werte für 2030 sind höher als der Zielwert für 2010. Die erwarteten Wasserstoffspeicherkosten für das Jahr 2030 variieren zwischen 167 und 370 EUR/kg H₂. Diese Werte entsprechen bezogen auf den Energieinhalt 5 bis 11 EUR/kWh.

3.4 Batterie

Wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, stellen Nickel-Metall-Hydrid-Batterien derzeit die am weitesten verbreitete Batteriespeichertechnologie für elektrische und hybrid-elektrische Antriebskonzepte dar. Die spezifischen Kosten liegen bei energieoptimierter Auslegung zwischen 200 EUR/kWh und 700 EUR/kWh und bei leistungsoptimierter Auslegung zwischen 400 EUR/kWh und 2000 EUR/kWh /IEA 2007/. Aufgrund der im Vergleich zur Li-Ion-Batterie geringeren gravimetrischen Energiedichte der Ni-MH-Batterie von nur 40 – 80 Wh/kg werden jedoch nach allgemeiner Einschätzung kurz- bis mittelfristig Li-Ion-Batterien zur dominierenden Batteriespeichertechnologie im Fahrzeugbereich aufsteigen. Erste Beispiele hierfür sind aktuelle bzw. kurz vor der Markteinführung stehende Fahrzeugmodelle wie der Mercedes S 400 BlueHybrid, der BMW Concept 7 Series Active Hybrid oder der Mitsubishi i-EV. Aus diesem Grund beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die ökonomischen und technischen Eigenschaften von Li-Ion-Batterien.

Literatur- und Herstellerangaben zu den derzeitigen spezifischen Kosten von Li-Ion-Batterien schwanken in einem sehr weiten Bereich von unter 300 EUR/kWh bis über 1500 EUR/kWh (Abbildung 3-4). Diese hohe Streubreite kann zum Teil durch die starken Kostendifferenzen zwischen energieoptimiert und leistungsoptimiert ausgelegten Batteriesystemen erklärt werden. Leistungsoptimierte Batterien finden vor allem bei Hybridfahrzeugen Anwendung, die in der Regel nur über eine niedrige Batteriekapazität von ca. 1 kWh verfügen, jedoch kurzfristig hohe Leistung abgeben (Boosten, rein elektrische Fahren) oder aufnehmen (Rekuperation von Bremsenergie) müssen. Demgegenüber ist bei Batterie-Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybridfahrzeugen in der Regel eine energieoptimierte Auslegung der Batterie von Vorteil, um eine möglichst hohe elektrische Reichweite bei niedrigem Fahrzeuggewicht zu erzielen. Die höheren spezifischen Kosten von leistungsoptimierten Batterien resultieren aus der größeren Kathodenoberfläche, die zur Verkürzung der chemischen Reaktionszeit beim Be- und Entladen erforderlich ist. Dabei machen die Kathodenmaterialien, insbesondere der darin enthaltene Kobalt-Anteil, einen Großteil der spezifischen Gesamt-Batteriekosten aus.

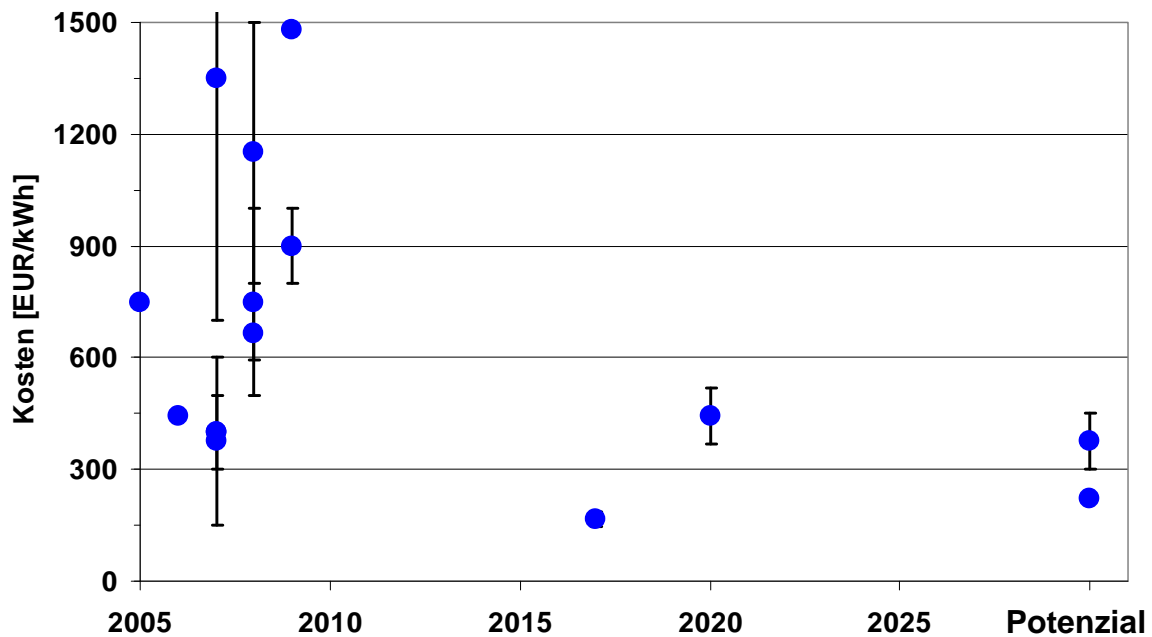


Abbildung 3-4: Derzeitige und zukünftige Kosten von Li-Ion-Batterien /BCG 2009/, /Winter 2008/, /Mock, Schmid 2008/, /Schuster 2009/, /Stan 2005/, /Agentur für Erneuerbare Energien 2009/, /Joseph et al. 2006/, /Sauer 2007/, /Jakubek, Schweiger 2008/, /Centurion 2009/, /IEA2007/, /IEA 2008/

Für die zukünftige Entwicklung der spezifischen Kosten von Li-Ion-Batterien werden hohe Einsparpotenziale durch Serienproduktion mit großen Stückzahlen für möglich gehalten. Schätzungen hierzu bewegen sich üblicherweise zwischen 150 EUR/kWh und 450 EUR/kWh, wobei der Zeitpunkt für die Erreichung dieser Werte stark von den unterstellten Markteinführungsszenarien und den daraus resultierenden Stückzahlen abhängt.

Eine Unsicherheitsgröße für die zukünftige Entwicklung der spezifischen Batteriekosten liegt in der zeitlichen Preisentwicklung der eingesetzten Rohstoffe, vor allem Kobalt, Mangan und Lithium. Derzeit scheint noch unklar, ob insbesondere die Förderkapazitäten für Lithium bei einer großflächigen Einführung von Elektromobilität auf Basis von Li-Ion-Batterien im erforderlichen Umfang gesteigert werden können /WBCSD 2009/. Auch die örtliche Konzentration der weltweiten Lithium-Vorkommen, die zum Großteil in der Andenregion um Chile, Argentinien und Bolivien zu finden sind, könnte zu politischen Abhängigkeiten und daraus resultierenden Preisanstiegen führen. Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Rohstoffengpässen ist der Aufbau eines umfassenden Recyclingsystems für Li-Ion-Batterien, das bereits heute wirtschaftlich darstellbar ist. Die Europäische Batterierichtlinie 2006/66/EC sieht daher Recyclingquoten für Li-Ion-Batterien von 12,5 % im Jahr 2012 und 22,5 % im Jahr 2016 vor /ISI 2009/.

Neben den spezifischen Kosten stellt die gravimetrische Energiedichte von Li-Ion-Batterien einen weiteren Faktor dar, der bei der Auslegung von Elektrofahrzeugen mit hoher elektrischer Reichweite ins Gewicht fällt (Abbildung 3-5). Auf Zellebene beträgt diese bei energieoptimierten Batterien derzeit ca. 140 Wh/kg und bei leistungsoptimierten Batterien ca. 70

Wh/kg. Eine Steigerung auf 200 Wh/kg bzw. 120 Wh/kg durch optimierte Materialien in der Zellchemie scheint für die Zukunft erreichbar.

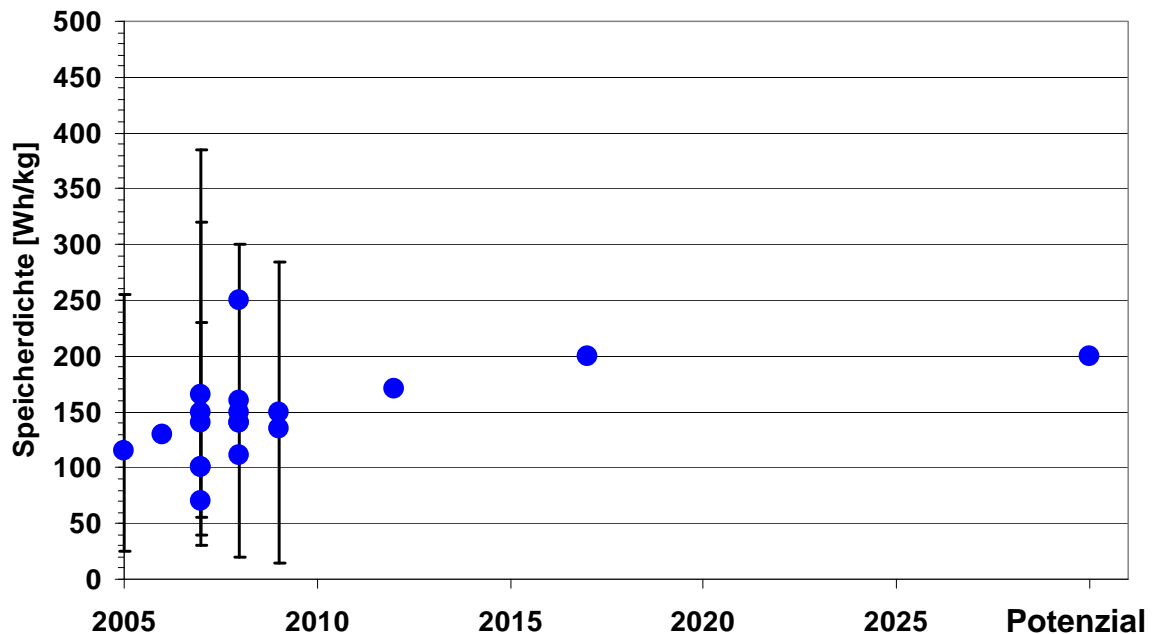


Abbildung 3-5: Derzeitige und zukünftige gravimetrische Energiedichten von Li-Ion-Batterien /Winter 2008/, /Mock, Schmid 2009/, /Schuster 2009/, /Stan 2005/, /Joseph et al. 2006/, /Sauer 2007/, /Jakubek, Schweiger 2008/, /ATZelectronic 2009/, /Naunin 2007/, /IEA 2007/

Gleichzeitig wird von Seiten der Batteriehersteller für die Anwendung in Hybridfahrzeugen eine Optimierung der gravimetrischen Leistungsdichte von derzeit 3 kW/kg auf ca. 4 kW/kg für zukünftige Batteriesysteme angestrebt /Fetzer 2009/.

3.5 Elektromotor und Steuerung

Die folgenden Ausführungen zu den Kosten von Elektromotoren beziehen sich ausschließlich auf permanent erregte Synchronmaschinen (PMSM), da diese bei heutigen Hybrid- und Elektrofahrzeugen aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen Regelbarkeit bevorzugt eingesetzt werden.

Die spezifischen Kosten heutiger als Fahrzeugantrieb eingesetzter Elektromotoren bewegen sich größtenteils zwischen 15 EUR/kW und 20 EUR/kW (Abbildung 3-6). Grundsätzlich handelt es sich bei Elektromotoren um eine seit vielen Jahren eingesetzte und technisch ausgereifte Technologie. Dennoch erscheint eine Reduzierung der spezifischen Kosten durch Massenproduktion möglich. Die für das Jahr 2030 bzw. als Potenzial ausgewiesenen spezifischen Kosten beziehen sich größtenteils auf produzierte Stückzahlen von mehr als 100.000 Einheiten pro Jahr und Nennleistungen zwischen 32 kW und 70 kW. Die niedrigsten spezifischen Kosten in Abbildung 3-6 (4,32 EUR/kW) repräsentieren den Zielwert der PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles). Dieser Wert scheint aus heutiger Sicht jedoch sehr optimistisch, da er kaum zur Deckung der Materialkosten ausreichen würde /Graham

2001/. Realistischer erscheinen zukünftige spezifische Kosten in der Größenordnung von 12 EUR/kW.

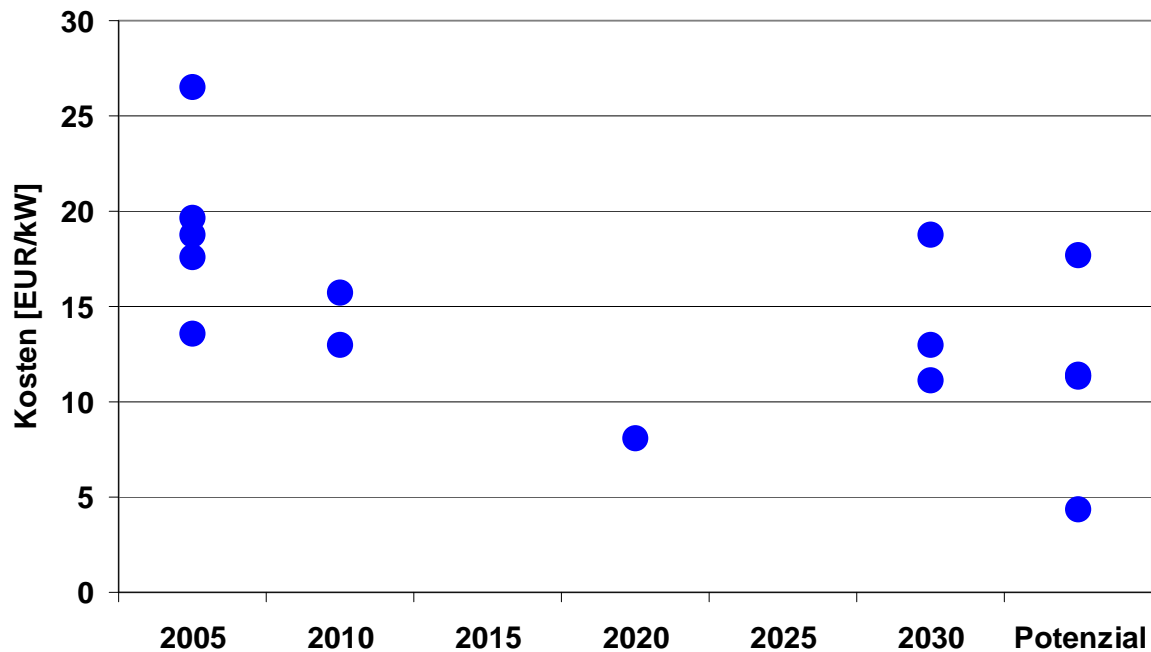


Abbildung 3-6: Derzeitige und zukünftige spezifische Kosten von Elektromotoren /IEA 2005/, /Concawe 2007/, IPTS 2005/, /Graham 2001/

Die Regelung des Elektromotors erfordert als zusätzliche Komponente eine Motorsteuerung, die es ermöglicht, in jedem Lastpunkt das erforderliche Drehmoment bzw. die gewünschte Drehzahl einzustellen. Die Kosten für die Motorsteuerung betragen heute bei einer Leistung des PMSM-Elektromotors von 40 kW ca. 1.020 EUR. Bei Einsetzen der Massenproduktion wird eine Reduktion um 70 % auf dann 310 EUR für realistisch gehalten /IPTS 2005/.

3.6 DC/DC- und AC/DC-Wandler

Bei elektrischen und hybrid-elektrischen Fahrzeugantrieben mit Batterie als Energiespeicher ist als weitere Komponente ein DC/DC-Wandler erforderlich. Er dient dazu, das für den Antrieb erforderliche hohe Spannungsniveau von üblicherweise über 100 V auf das für den Betrieb elektrischer Nebenaggregate erforderliche Spannungsniveau von 12 V zu transformieren. Die Kosten hängen im Wesentlichen vom Niveau der Eingangsspannung ab. Für Eingangsspannungen bis maximal 200 V liegen sie je nach Quelle zwischen 300 EUR /Graham 2001/ und 316 EUR /Mittnacht 2009/.

Batterie-Elektrofahrzeuge und Plug-In-Hybridfahrzeuge, bei denen die Batterie durch externe Aufladung nachgeladen werden kann, benötigen für den Anschluss an das Wechselstromnetz als weitere Komponente einen AC/DC-Wandler. Die Kosten hierfür liegen bei ca. 410 EUR /Graham 2001/.

4 Vergleich und Bewertung der elektrischen und hybrid-elektrischen Antriebskonzepte

Beim folgenden Vergleich und bei der Bewertung der verschiedenen elektromobilen Antriebskonzepte werden jeweils zwei Fahrzeugklassen betrachtet (Tabelle 4-1). In der Fahrzeugklasse Kleinwagen wird als Referenzfahrzeug ein Smart ForTwo Coupé mit einem 1,0 l Benzinmotor und einer Leistung von 45 kW angenommen. Die betrachteten elektromobilen Antriebsvarianten in dieser Fahrzeugklasse werden so ausgelegt, dass sie von der Leistung her dem Referenzfahrzeug entsprechen. Zusätzlich werden eine minimale Reichweite von 75 km sowie eine minimale Lebensdauer von 12 Jahren bzw. 100.000 km vorgegeben. Als Referenzfahrzeug in der Mittelklasse dient ein VW Golf mit 1,9 l Dieselmotor und einer Antriebsleistung von 77 kW. Als zusätzliche Auslegungsparameter für die alternativen Antriebsvarianten werden eine minimale Reichweite von 200 km sowie eine minimale Lebensdauer von 12 Jahren bzw. 200.000 km vorgegeben.

Tabelle 4-1: Übersicht der betrachteten Antriebstechnologien je Fahrzeugklasse

Antriebstechnologie	Fahrzeugklasse	
	Kleinwagen (Referenz: Smart ForTwo)	Mittelklasse (Referenz: VW Golf)
Benziner konventionell	X	
Diesel konventionell		X
Batterie-elektrisch (BEV)	X	X
Brennstoffzelle (FCEV)	X	X
Brennstoffzelle Hybrid (FCHEV)	X	X
Voll-Hybrid (HEV _{full})	X	X
Mild-Hybrid (HEV _{mild})	X	X
Plug-In-Hybrid (PHEV)	X	X
Auslegungsparameter		
Leistung	45 kW	77 kW
min. Reichweite	75 km	200 km
min. Lebensdauer	12 a	12 a
	100.000 km	200.000 km

4.1 Vergleich der resultierenden Fahrzeuginvestitionskosten

Tabelle 4-2 zeigt die im weiteren Verlauf unterstellten derzeitigen spezifischen Kosten der einzelnen Fahrzeugkomponenten und Tabelle 4-3 die angenommenen zukünftigen Kosten jener Komponenten im Jahr 2030. Die Kostenannahmen basieren auf der durchgeführten Literaturrecherche (Kapitel 3).

Tabelle 4-2: Übersicht der derzeitigen spezifischen Kosten für Fahrzeugkomponenten

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV (Full)	HEV (Mild)	PHEV
Karosserie Kleinwagen	EUR	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Karosserie Mittelklasse		16165	16165	16165	16165	16165	16165	16165
Ottomotor mit Getriebe	EUR/kW	30	-	-	-	30	30	27
Dieselmotor mit Getriebe	EUR/kW	52.4	-	-	-	-	-	-
Benzin-/Dieseltank	EUR	125	-	-	-	125	125	125
H2-Speicher	EUR/kWh	-	-	22.2	22.2	-	-	-
E-Motor	EUR/kW	-	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
E-Motorsteuerung	EUR	-	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Batterie	EUR/kWh	-	600	-	1000	1000	1000	600
Brennstoffzelle	EUR/kW	-	-	370	370	-	-	-
DC/DC-Wandler	EUR	-	300	300	300	300	300	300
AC/DC-Wandler	EUR	-	410	-	-	-	-	410
Summe Kleinwagen	EUR	8207	10349	9731	10731	10494	10494	10501
Summe Mittelklasse	EUR	16372	18514	17896	18896	18659	18659	18666

Tabelle 4-3: Übersicht der zukünftigen spezifischen Kosten für Fahrzeugkomponenten

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie Kleinwagen	EUR	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Karosserie Mittelklasse		16165	16165	16165	16165	16165	16165	16165
Ottomotor mit Getriebe	EUR/kW	38.4	-	-	-	33.6	33.6	30.3
Dieselmotor mit Getriebe	EUR/kW	56.4	-	-	-	-	-	-
Benzin-/Dieseltank	EUR	125	-	-	-	125	125	125
H2-Speicher	EUR/kWh	-	-	8.34	8.34	-	-	-
E-Motor	EUR/kW	-	12	12	12	12	12	12
E-Motorsteuerung	EUR	-	310	310	310	310	310	310
Batterie	EUR/kWh	-	200	0	400	400	400	200
Brennstoffzelle	EUR/kW	-	0	50	50	-	-	-
DC/DC-Wandler	EUR	-	300	300	300	300	300	300
AC/DC-Wandler	EUR	-	410	-	-	-	-	410
Summe Kleinwagen	EUR	8220	9232	8680	9080	9181	9181	9387
Summe Mittelklasse	EUR	16385	17397	16845	17245	17346	17346	17552

Brennstoffzellen und Batterien sind die wesentlichen Komponenten, die die Gesamtkosten der alternativen Antriebe im Vergleich zum Referenzfahrzeug beeinflussen. Es ist in dieser Studie angenommen, dass eine Kostensenkung bei Brennstoffzellen bis zum Jahr 2030 von 85 % erreicht werden kann. Die Annahmen für Kostensenkungen bei Batterien liegen zwischen 60 % für leistungsoptimierte und 67 % für energieoptimierte (vgl. Kapitel 3).

Mit diesen Annahmen spezifischer Kosten und den vorher definierten Randbedingungen (Tabelle 4-1), werden die Gesamtinvestitionskosten der Fahrzeuge bestimmt, die in Abbildung 4-1 dargestellt sind. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Investitionskosten nach Komponenten ist im Anhang unter Abschnitt 8.1 verfügbar.

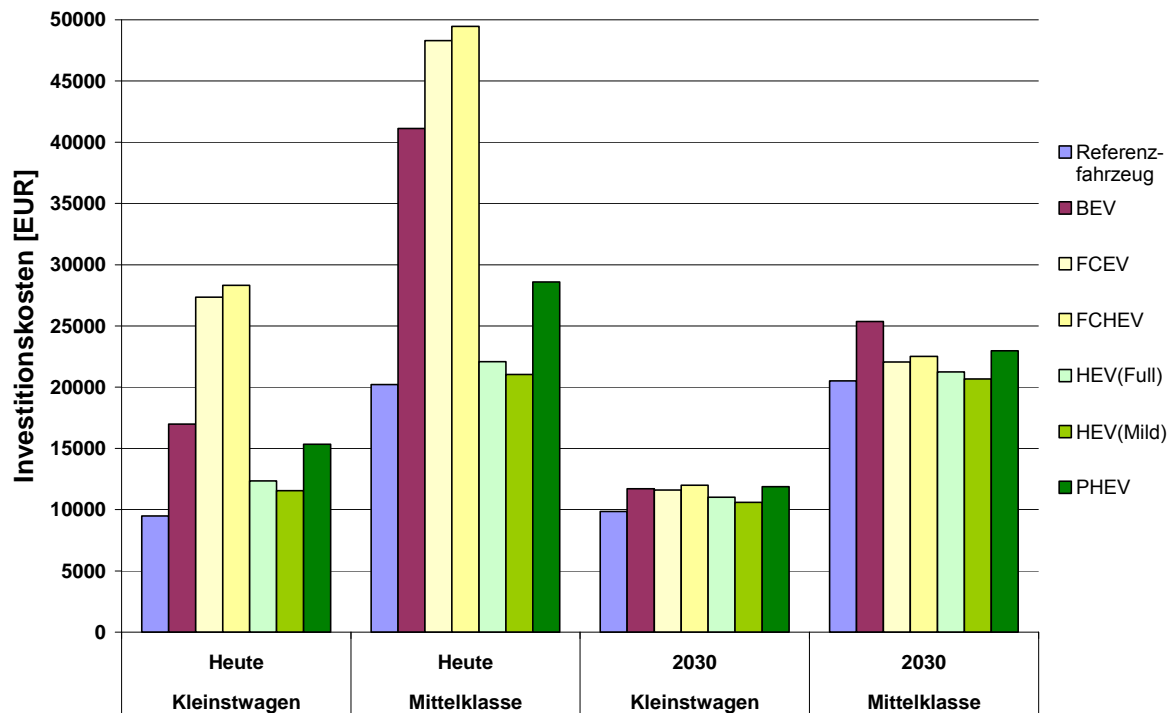


Abbildung 4-1: Vergleich der aktuellen und zukünftigen Investitionskosten der unterschiedlichen Antriebe

Der Investitionskostenvergleich für den derzeitigen Stand zeigt, dass Brennstoffzellenfahrzeuge mehr als doppelt so viel wie das jeweilige Referenzfahrzeug kosten. Die Kosten des BEV liegen um 80 % höher bei Kleinstwagen bzw. um 100 % höher bei Mittelklassewagen. Grund für die prozentual höheren Mehrkosten bei den elektrisch betriebenen Mittelklassewagen, ist deren höhere Reichweite von 200 km (im Vergleich zu 75 km bei Kleinstwagen). Solch größere Reichweiten sind nur mit einer größeren Batterie (36 kWh anstatt 11 kWh) realisierbar, was wiederum zusätzliche Kosten verursachen würde.

Die derzeitigen Hybridfahrzeuge, deren Kosten um 4 % bis 30 % über denen des jeweiligen Referenzfahrzeuges liegen, bilden hierbei die günstigste Alternative. Die PHEV-Investitionskosten liegen zwischen denen von Hybridfahrzeugen und BEV.

Der Vergleich zwischen den derzeitigen und zukünftigen Investitionskosten zeigt eine signifikante Reduktion der Mehrkosten bei allen Fahrzeugtypen. Die Mehrkosten bei zukünftigen Mittelklassewagen schwanken zwischen 1 % bei Mild Hybrid und 24 % bei BEV. Im Vergleich dazu variieren die Mehrkosten bei zukünftigen Kleinstwagen zwischen 8 % bei Mild Hybrid und 22 % bei FCHEV.

4.2 Vergleich der resultierenden Fahrzeugmassen

In Tabelle 4-4 sind die für die Untersuchung unterstellten spezifischen Massen für verschiedene Fahrzeugkomponenten dargestellt. Es wird angenommen, dass sich nur die spezifische Massen der Batterien und Brennstoffzellen in der Zukunft ändern werden. Die daraus errechneten Gesamtmassen sind in der Abbildung 4-2 veranschaulicht. Eine detaillierte Aufstellung der Komponentenmassen/Fahrzeugmassen ist dem Anhang 8.2 zu entnehmen.

Tabelle 4-4: Übersicht der spezifischen Massen für Fahrzeugkomponente

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie Kleinwagen	kg	636	636	636	636	636	636	636
Karosserie Mittelklasse		1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038
Verbrennungsmotor (Otto für Kleinwagen)	kg/kW	2.21	-	-	-	2.21	2.21	1.99
Verbrennungsmotor (Diesel für Mittelklassewagen)		2.64	-	-	-	-	-	-
Getriebe	kg	0	-	-	-	0	0	-
Benzin-/Dieseltank	kg	15	-	-	-	15	15	15
H2-Speicher	kg/kWh	-	-	1.28	1.28	-	-	-
E-Motor	kg/kW	-	1	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
E-Motorsteuerung	kg	-	14	14	14	14	14	14
Batterie (Heute)	kg/kWh	-	7.14	-	14.29	14.29	14.29	7.14
Batterie (Zukunft)	kg/kWh	-	5	-	8.33	8.33	8.33	5
Brennstoffzelle (Heute)	kg/kW	-	-	2.13	2.13	-	-	-
Brennstoffzelle (Zukunft)	kg/kW	-	-	1.54	1.54	-	-	-
DC/DC-Wandler	kg/Anzahl	-	2	2	2	2	2	2
AC/DC-Wandler	kg/Anzahl	-	2	-	-	-	-	2

Die heutigen schwersten Kleinwagen bzw. Mittelklassewagen sind FCHEV (10 % mehr Gewicht als das Otto-Referenzfahrzeug) bzw. BEV (11 % mehr Gewicht als das Diesel-Referenzfahrzeug). Mit den diskutierten Annahmen zur Reduktion des spezifischen Gewichts wird das schwerste Fahrzeug in Zukunft (FCEV) nur 6 % Mehrgewicht gegenüber seinem Referenzfahrzeug aufweisen.

Aufgrund des allgemein geringen Mehrgewichts der alternativen Antriebe gegenüber dem Referenzfahrzeug lässt sich festhalten, dass dieses keine Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit dieser Konzepte, weder heute, noch in der Zukunft bedeutet.

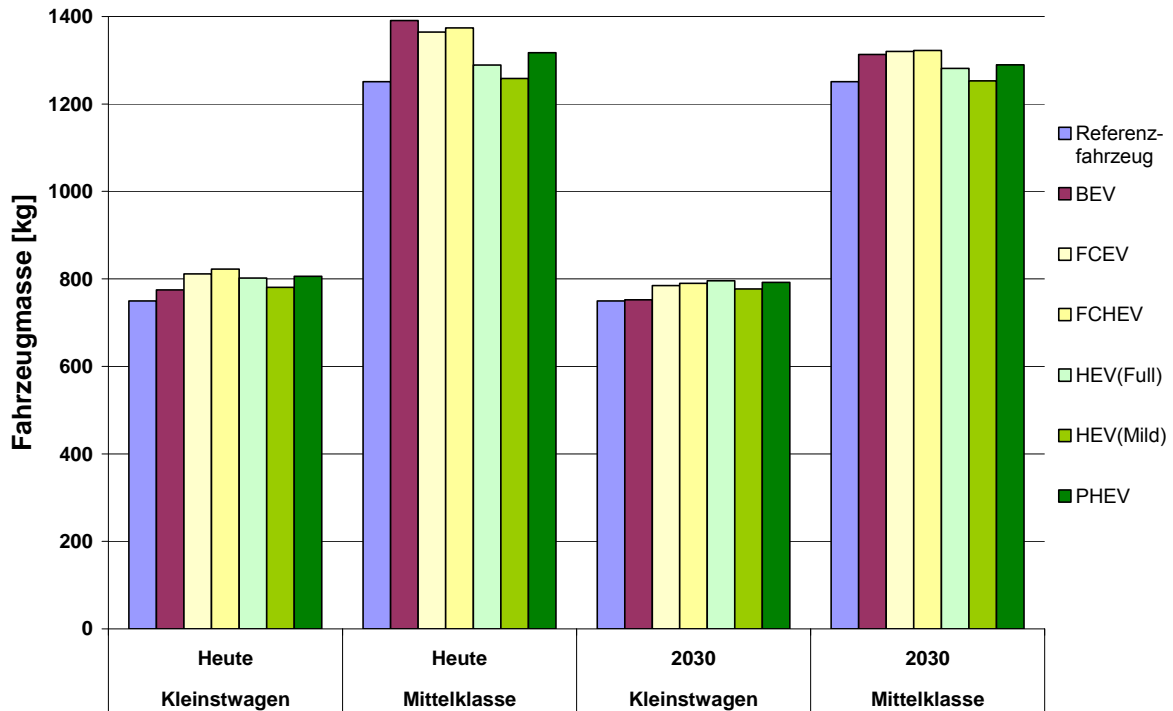


Abbildung 4-2: Derzeitige und zukünftige Fahrzeugmassenvergleich für verschiedene Antriebe

4.3 Spezifische Kraftstoffverbräuche der einzelnen Fahrzeuantriebe

Die im Rahmen dieser Studie angenommenen derzeitigen und zukünftigen Energieverbräuche sind in Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 aufgezeigt. Die Kraftstoffverbräuche der Referenzfahrzeuge basieren auf den Messungen für den Smart forTwo Coupé und den VW Golf Diesel nach der Richtlinie des „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) /VDA 2009/ und sind unter der Annahme angepasst, dass reale Kraftstoffverbräuche ca. 10 % höher liegen als im NEFZ. Zudem ist vorausgesetzt, dass die Kraftstoffverbräuche der Referenzfahrzeuge bis zum Jahr 2030 in beiden Klassen um ungefähr 21 % sinken. Diese Annahme berücksichtigt auch, dass die Start-Stopp-Automatik bis 2030 bei konventionellen Fahrzeuantrieben zum Standard gehört und folglich einen positiven Effekt auf die Kraftstoffverbräuche hat. Für FCEV und FCHEV wurde angenommen, dass die innerorts/außerorts Effizienzverhältnisse den Verhältnissen der BEVs entsprechen, da beide Antriebe mit Elektromotoren betrieben werden. Die Kraftstoffverbräuche sind in MJ/km angegeben. Der kombinierte Verbrauch von 1,68 MJ/km des Kleinwagen heute entspricht dabei einen Benzinverbrauch von 5,2 l/100km. Für den Mittelklassewagen entspricht der kombinierte Verbrauch von 1,97 MJ/km einem Dieselverbrauch von 5,5 l/100km.

Es zeigen sich deutliche Unterschiede im Energieverbrauch der Fahrzeuge beim Einsatz innerorts oder außerorts. Während bei den Referenzfahrzeugen Außerorts-Fahrten niedrigere Kraftstoffverbräuche aufweisen, ist es bei den Konzepten BEV, FCEV, FCHEV und

PHEV genau umgekehrt, da Verbrennungsmotoren den höchsten Wirkungsgrad bei Volllast aufweisen und Elektromotoren bei Teillast.

Tabelle 4-5: Derzeitige Energieverbräuche (MJ/km) von Kleinwagen bzw Mittelklassewagen

MJ/km	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV	
							elektr.	konv.
Kleinwagen	Benzin							
innerorts	2.18	0.43	0.90	0.82	1.53	1.74	0.43	0.90
außerorts	1.43	0.65	1.35	1.23	1.22	1.29	0.65	1.35
kombiniert	1.68	0.58	1.20	1.09	1.32	1.44	0.58	1.20
Mittelklassewagen	Diesel							
innerorts	2.57	0.55	1.02	0.93	2.26	2.52	0.55	1.14
außerorts	1.70	0.83	1.54	1.40	1.60	1.68	0.83	1.72
kombiniert	1.97	0.73	1.37	1.24	1.82	1.96	0.73	1.53

Tabelle 4-6: Zukünftige Energieverbräuche (MJ/km) von Kleinwagen bzw Mittelklassewagen

MJ/km	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV	
							elektr.	konv.
Kleinwagen	Benzin							
innerorts	1.69	0.35	0.75	0.68	1.27	1.44	0.35	0.70
außerorts	1.11	0.52	1.12	1.03	1.00	1.05	0.52	1.04
kombiniert	1.30	0.46	1.00	0.91	1.09	1.18	0.46	0.93
Mittelklassewagen	Diesel							
innerorts	2.03	0.44	0.87	0.79	1.89	2.09	0.44	0.88
außerorts	1.34	0.66	1.31	1.20	1.33	1.40	0.66	1.33
kombiniert	1.56	0.59	1.16	1.06	1.52	1.63	0.59	1.18

BEV haben schon heute und werden auch in der Zukunft die niedrigsten Energieverbräuche aufweisen, was am insgesamt hohen Wirkungsgrad des Elektromotors von bis zu 95 % gegenüber maximal 30 % bei Verbrennungsmotoren liegt. So erreichen BEV ungefähr 65 % niedrigere Kraftstoffverbräuche als die jeweiligen Referenzfahrzeuge. Die Brennstoffzellenfahrzeuge folgen den BEV mit 24 % bis 31 % niedrigerem Energieverbrauch in Bezug auf Referenzfahrzeuge. Nicht berücksichtigt wurde dabei, dass bei Fahrzeugkonzepten ohne Verbrennungsmotor wie BEV und FCEV keine Motorabwärme zur Verfügung steht und sich daher ein zusätzlicher Energiebedarf für die Fahrzeugheizung ergibt. Das betrifft sowohl die vom TÜV vorgeschriebene Heizung zur Freihaltung der Scheiben als auch die Heizung der Fahrgastzelle. Als Heizungssystem kommen z.B. Diesel, Benzin oder Gas betriebene Standheizungen oder rein elektrische Heizungen infrage.

Hybridfahrzeuge haben eine geringere Kraftstoffersparnis im Vergleich zu anderen elektromobilen Technologien. Derzeitige Kraftstoffersparnisse bei HEV gegenüber einem Referenzfahrzeug liegen für Kleinwagen zwischen 14 % und 21 %. Es wird angenommen, dass diese aufgrund der Einführung der Start-Stopp-Automatik bei Referenzfahrzeugen in Zukunft nur noch zwischen 9 % und 16 % liegen werden. Derzeit haben Mild-Hybridfahrzeuge in der Mittelklasse ungefähr den gleichen Kraftstoffverbrauch wie das Diesel-Referenzfahrzeug. Für die Zukunft wird angenommen, dass das Diesel-Referenzfahrzeug in 2030 ca. 5 % weniger Energie als ein Ottomotor Mild HEV verbraucht.

Die PHEV können sowohl elektrisch als auch unter Einsatz des Range-Extenders (Ottomotor-generator-Elektromotor) angetrieben werden. Der Verbrauch bei einer Fahrt mit Elektromotor ist identisch wie beim BEV angenommen. Im Betrieb mit Range-Extender ergibt sich ein zwischen 23 % und 29 % niedrigerer Kraftstoffverbrauch als beim jeweiligen

Referenzfahrzeug, da der Verbrennungsmotor beim PHEV seriell geschaltet ist und somit stets in einem optimalen Betriebspunkt arbeiten kann.

4.4 Mobilitätskosten

Basierend auf den in Kapitel 4.1 und 4.3 dargestellten Investitionskosten und Kraftstoffverbräuchen der verschiedenen Fahrzeugkonzepte werden im Folgenden die resultierenden Mobilitätskosten miteinander verglichen. Dazu werden drei Nutzerprofile betrachtet, die sich hinsichtlich der jährlichen Fahrleistung, der Fahrtanteile innerorts und außerorts sowie der täglichen Wegstrecke unterscheiden und im Wesentlichen an statistische Daten aus /DIW 2003/ angelehnt sind (Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7: Übersicht der betrachteten Nutzerprofile

		Hausfrau/mann	Pendler/In	Geschäftsreisende(r)
Jahresfahrleistung	km/a	6000	12000	26000
Anteil innerorts	%	60%	34%	20%
Anteil außerorts	%	40%	66%	80%
Regelmäßige tägliche Fahrtstrecke	km/d	15	32	100
Sonstige Fahrten	km/a	2100	3680	0
Anteil Fahrtstrecken bis 40 km	%	77%	80%	40%
Anteil Fahrtstrecken bis 64 km	%	88%	90%	64%

Das Profil „Hausfrau/mann“ repräsentiert einen Anwendungsfall mit einer relativ geringen täglich zurückgelegten Fahrtstrecke von 15 km, unter die beispielsweise Einkaufsfahrten oder Begleitdienste fallen. Zusammen mit einem weiteren Anteil für sonstige Fahrten wie Wochenendausflüge und Urlaubsreisen in Höhe von 2.100 km ergibt sich eine Jahresfahrleistung von 6.000 km, die zu 60 % innerorts erbracht wird.

Unter das Anwendungsprofil „Pendler/In“ fällt der typische deutsche Durchschnittspendler, der für die Fahrt zur Arbeitsstelle und zurück täglich 32 km zurücklegt. Zusammen mit dem Anteil für sonstige Fahrten ergibt sich eine Jahresfahrleistung von 12.000 km, die zu 66 % außerorts erbracht wird.

Das dritte Nutzerprofil „Geschäftsreisende(r)“ kommt bei einer regelmäßigen täglichen Fahrtstrecke von 100 km auf eine Jahresfahrleistung von 26.000 km. Der Außerorts-Anteil beträgt dabei 80 %.

Für die Bewertung von Plug-In-Hybridfahrzeugen ist als zusätzliche Information der Fahrtanteil, der rein elektrisch zurückgelegt werden kann, erforderlich. Daher sind in Tabelle 4-7 die angenommenen Anteile der Fahrtstrecken bis 40 km bzw. bis 64 km angegeben, was der unterstellten elektrischen Reichweite von PHEVs im Kleinst- bzw. Mittelklassesegment entspricht.

Für die Berechnung der Mobilitätskosten werden die in Tabelle 4-8 aufgeführten Kraftstoffpreise unterstellt. Die Werte für Benzin, Diesel und Strom entsprechen den im Rahmen der Studie „Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 (Energieprognose 2009)“ angenommenen bzw. errechneten Energieträgerpreisen. Für Strom wurde dabei der Haushaltsstrompreis angesetzt. Für Wasserstoff wurden die in /Concawe 2007/ angegebenen Produktionskosten einer zentralen Wasserstoffproduktion aus Erdgas-Dampfreformierung angesetzt, wobei die im Rahmen der Energieprognose 2009 unterstellten Erdgaspreise eingerechnet wurden. Zusätzlich wurden Transport- und Verteilungskosten für einen kombinierten Pipeline- und LKW-Transport nach /Gül 2008/ aufgeschlagen (vgl. Kapitel 5.2). In Klammern sind in Tabelle 4-8 jeweils die zusätzlich zu den reinen Energieträgerkosten anfallenden Kraftstoffsteuern angegeben. Sie umfassen bei Benzin und Diesel die Mineralölsteuer und Mehrwertsteuer und bei Strom Mehrwertsteuer, Stromsteuer, Konzessionsabgabe sowie Aufwendungen für EEG und KWK-Förderung. Im Fall von Wasserstoff, für dessen Anwendung als Kraftstoff bislang keine Besteuerung anfällt, wurde unterstellt, dass bei einem zukünftigen Ausbau der Wassertoffnutzung eine Steuerbelastung anfällt, die dem Mittel der Steuerbelastung für Benzin und Dieselmotorkraftstoff entspricht.

Tabelle 4-8: Angenommene Kraftstoffpreise

	Preise (Steuern) in EUR/GJ		
	heute	2030 (Ölpreis = 75 \$ ₂₀₀₇ /bbl)	2030 (Ölpreis = 100 \$ ₂₀₀₇ /bbl)
Benzin	12,6 (26,4)	15,5 (26,9)	19,1 (27,6)
Diesel	12,6 (19,6)	16,7 (20,4)	19,9 (21,0)
Strom	35,7 (30,0)	36,0 (24,9)	37,0 (25,1)
H ₂	24,4 (-)	26,0 (23,6)	28,0 (24,3)

Weitere Rahmenannahmen zur Berechnung der Mobilitätskosten sind ein Zinssatz in Höhe von 4 % für die Berechnung der annualisierten Investitionskosten, eine Fahrzeuglebensdauer von 12 Jahren, jährliche Wartungskosten in Höhe von 2 % der Investitionskosten sowie jährliche Kosten für Fahrzeugsteuer und Versicherung in Höhe von 3 % der Investitionskosten.

4.4.1 Heutige Mobilitätskosten

Im Kleinstwagensegment ergeben sich zum heutigen Zeitpunkt für das Referenzfahrzeug auf Basis eines konventionellen Ottomotors die niedrigsten Mobilitätskosten für alle betrachteten Nutzerprofile (Abbildung 4-3). Die Ursache liegt in dem deutlich niedrigeren Anteil fixer Kosten, insbesondere des Investitionskostenanteils. Bei den übrigen Fahrzeugantrieben führen vor allem die derzeit noch hohen spezifischen Kosten für Batterie bzw. Brennstoffzelle zu einem deutlich höheren Investitionskostenanteil, der auch durch einen teilweise niedrigeren Anteil der Kraftstoffkosten nicht kompensiert werden kann.

Am nächsten an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit liegen die beiden Hybridkonzepte HEV_{Full} und HEV_{Mild} . Der leicht höhere Investitionskostenanteil an den Mobilitätskosten kann im Falle einer hohen jährlichen Fahrleistung durch niedrigere Kraftstoffkosten nahezu vollständig kompensiert werden. So liegen die Mobilitätskosten für das Profil „Pendler/In“ mit jeweils 12,2 ct/km nur 0,5 ct/km über den Mobilitätskosten des Referenzfahrzeugs. Die mit Abstand höchsten Mobilitätskosten weisen derzeit die Antriebskonzepte auf Brennstoffzellenbasis FCEV und FCHEV auf. Trotz derzeit fehlender Besteuerung des eingesetzten Wasserstoffs ergeben sich je nach Anwendungsfall mehr als doppelt so hohe Mobilitätskosten wie beim Referenzfahrzeug.

Durch Multiplikation der Mobilitätskosten mit den jährlich gefahrenen Kilometern ergeben sich die Jahreskosten für das Referenzfahrzeug mit dem Profil „Hausfrau/mann“ in Höhe von 1884 EUR/Jahr. Mit dem Profil „Pendler/In“ steigen die Jahreskosten auf 2232 EUR/Jahr und mit dem Profil „Geschäftsreisende(r)“ auf 3042 EUR/Jahr.

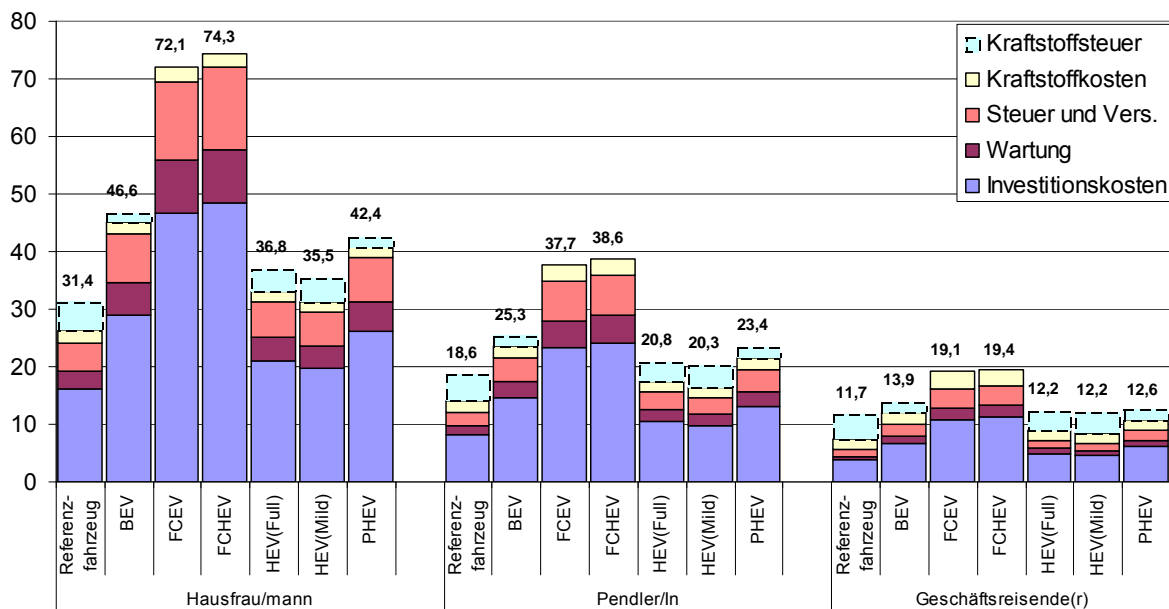


Abbildung 4-3: Derzeitige Mobilitätskosten Kleinwagen [EURct/km]

Ein Blick auf die derzeitigen Mobilitätskosten der verschiedenen Antriebskonzepte in der Mittelklasse (Abbildung 4-4) verdeutlicht, dass auch hier das Referenzfahrzeug - in diesem Fall ein konventionelles Dieselfahrzeug - für alle Nutzerprofile die wirtschaftlichste Variante darstellt. Insgesamt steigen die Mobilitätskosten gegenüber denen des Kleinwagen deutlich, was zum einen an den allgemein höheren Investitionskosten und zum anderen an dem jeweils höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch in der Mittelklasse liegt. Besonders betroffen hiervon ist das BEV, für das in der Mittelklasse eine wesentlich höhere benötigte Reichweite (200 km gegenüber 75 km bei Kleinwagen) vorgegeben wurde, was zu erheblich höheren Investitionskosten für die Batterie führt. Die Mobilitätskosten der Hybridvarianten HEV_{Full} und HEV_{Mild} liegen erneut nur knapp über denen des Referenzfahrzeugs. Im Gegensatz zum

Kleinstwagen ist hier jedoch die Differenz des Investitionskostenanteils deutlich kleiner, da als Referenz ein Dieselfahrzeug angesetzt wird. Aus dem gleichen Grund fällt der Vorteil der Hybridvarianten bei den Kraftstoffkosten niedriger aus.

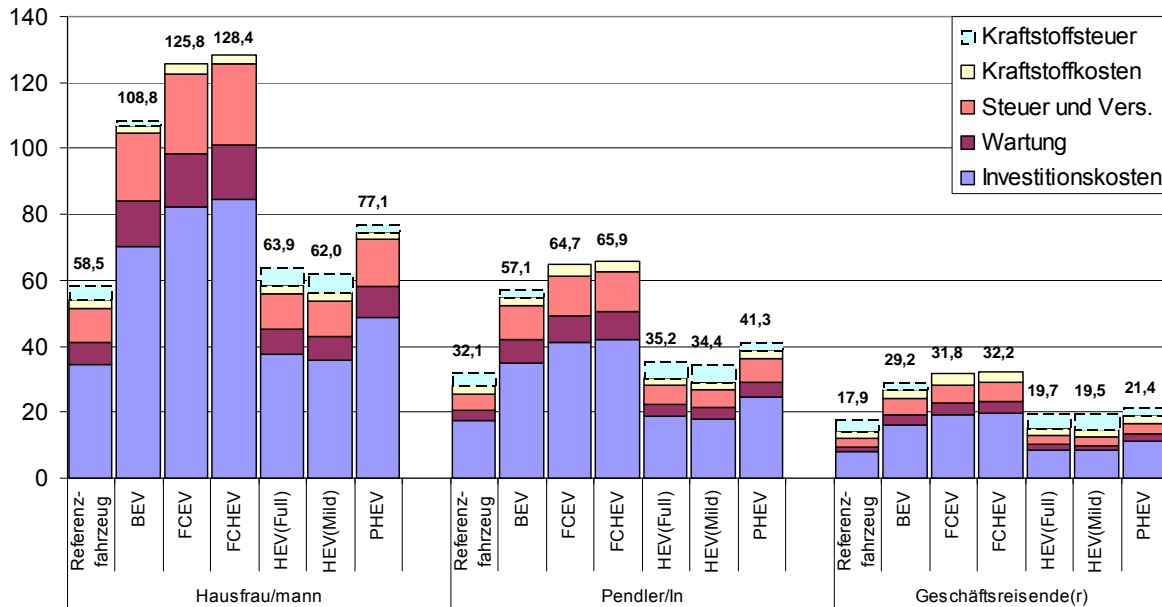


Abbildung 4-4: Derzeitige Mobilitätskosten Mittelklassewagen [EURct/km]

Eine detaillierte tabellarische Auflistung der einzelnen Kostenbestandteile an den Gesamt-Mobilitätskosten für alle diskutierten Anwendungsfälle befindet sich im Anhang unter Abschnitt 8.3.

4.4.2 Mobilitätskosten im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung

In diesem Abschnitt werden die zukünftigen Mobilitätskosten der verschiedenen Antriebe für den Fall einer moderaten Ölpreisentwicklung mit einem Anstieg auf 75 \$₂₀₀₇/bbl im Jahr 2030 analysiert. Aufgrund der hohen Unsicherheit bzgl. der zukünftigen Besteuerung der verschiedenen Kraftstoffe werden die Mobilitätskosten zunächst ohne Kraftstoffsteuern diskutiert.

Abbildung 4-5 zeigt, dass sich die Mobilitätskosten der alternativen Antriebskonzepte im Kleinstwagenbereich denen des Referenzfahrzeugs deutlich annähern. Dies betrifft vor allem die Varianten BEV, FCEV, FCHEV und PHEV, die in besonderem Maße von der Reduktion der spezifischen Batterie- und Brennstoffzellenkosten bis zum Jahr 2030 profitieren. Für die Hybridantriebe HEV_{Full} und HEV_{Mild} ergeben sich erneut höhere Mobilitätskosten als beim Referenzfahrzeug. Zwar sinkt die Differenz bei den Investitionskosten, gleichzeitig reduziert sich jedoch auch der Vorteil bei den Kraftstoffkosten, da sich die spezifischen Kraftstoffverbräuche annähern.

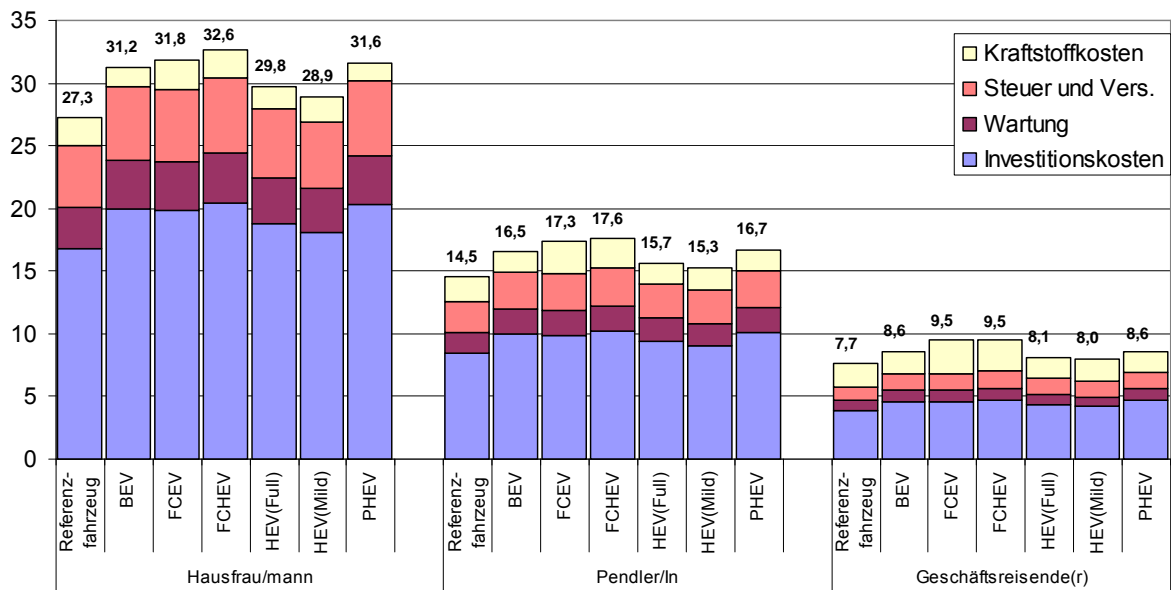


Abbildung 4-5: Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 ohne Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]

Werden bei der Berechnung der Mobilitätskosten die in Tabelle 4-8 angenommenen zukünftigen Steuersätze für die verschiedenen Kraftstoffe unterstellt, resultieren daraus die in Abbildung 4-6 dargestellten Mobilitätskosten. In diesem Fall ergeben sich für die Nutzerprofile „Pendler/In“ und „Geschäftsreisende(r)“ niedrigere Mobilitätskosten bei BEV und PHEV als beim Referenzfahrzeug. Für das Nutzerprofil „Geschäftsreisende(r)“ wird auch bei den Hybridantrieben HEV_{Full} und HEV_{Mild} die Wirtschaftlichkeitsgrenze erreicht. Lediglich die Fahrzeugantriebe auf Brennstoffzellenbasis weisen nach wie vor für alle Anwendungsfälle höhere Mobilitätskosten als das Referenzfahrzeug auf.

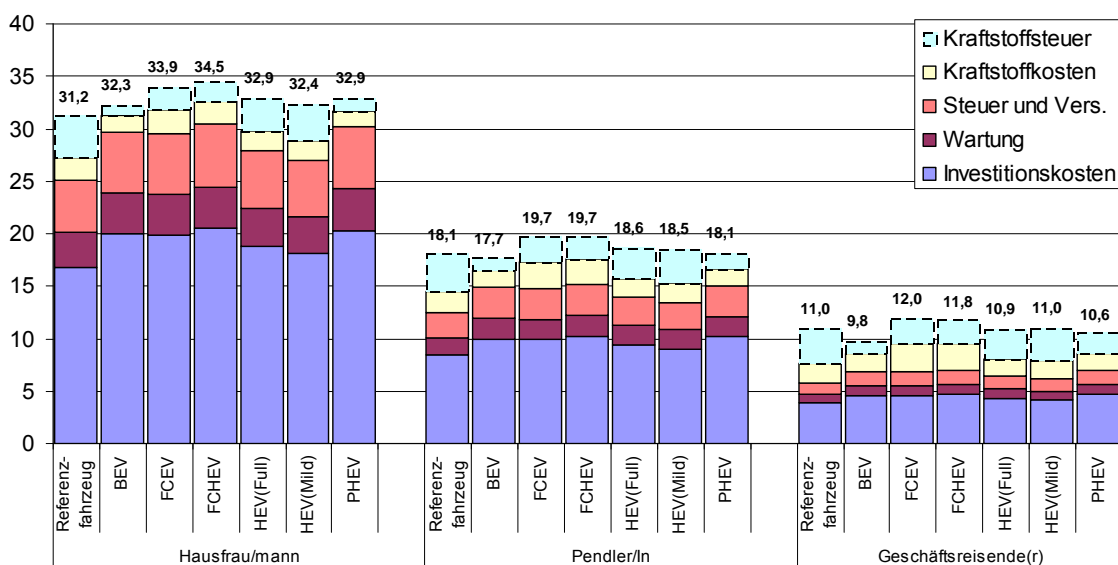


Abbildung 4-6: Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 mit Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]

Die Mobilitätskosten ohne Berücksichtigung von Steuern bei Mittelklassewagen zeigen für 2030 gegenüber den aktuellen Mobilitätskosten eine ähnliche Entwicklung wie bei Kleinstwagen (Abbildung 4-7). Lediglich bei BEV und PHEV fällt die Annäherung an die Mobilitätskosten des Referenzfahrzeugs aufgrund der größeren Batteriekapazität geringer aus. Bei hohen Jahresfahrleistungen wie im Fall des Profils Geschäftsreisende(r) erreichen die Mobilitätskosten des Mild-Hybridfahrzeugs bereits das Niveau des Referenzfahrzeugs.

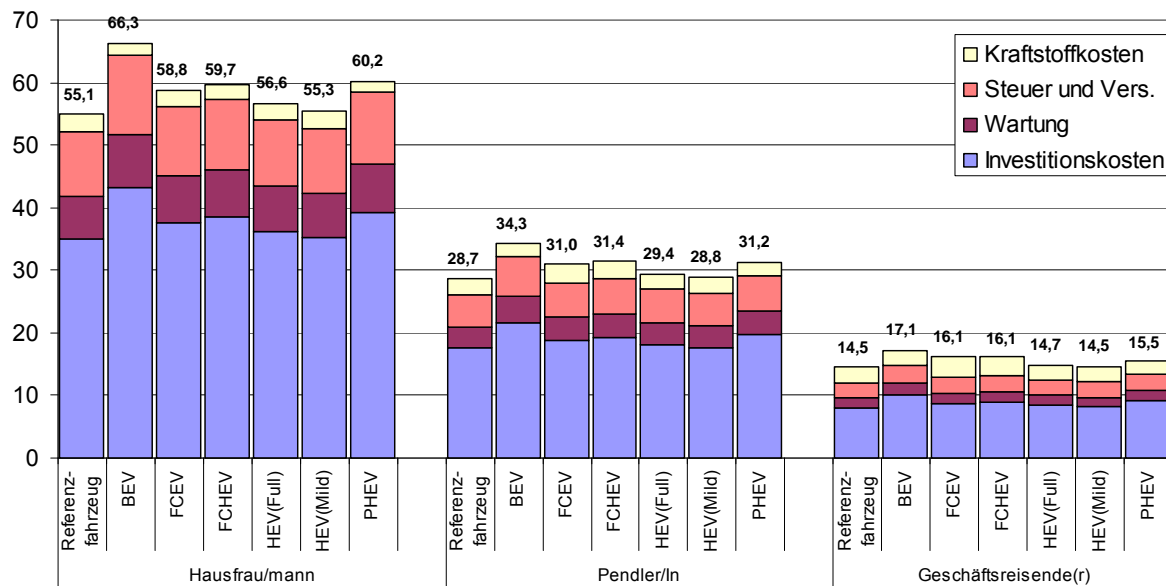


Abbildung 4-7: Mobilitätskosten Mittelklassewagen im Jahr 2030 ohne Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]

Unter Berücksichtigung von Kraftstoffsteuern ergeben sich bei Mittelklassewagen gegenüber den Kleinstwagen einige Veränderungen (Abbildung 4-8). BEV und PHEV erreichen aufgrund des hohen Investitionskostenanteils in keinem der Nutzerprofile mehr die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit. Bei den Hybridantrieben HEV_{Full} und HEV_{Mild} steigt der Abstand der Mobilitätskosten zu denen des Referenzfahrzeugs aufgrund der höheren Steuerbelastung von Benzin gegenüber Dieselkraftstoff an. Die Mobilitätskosten der Fahrzeugkonzepte auf Brennstoffzellenbasis erreichen erneut in keinem der Nutzerprofile das Niveau des Referenzfahrzeugs.

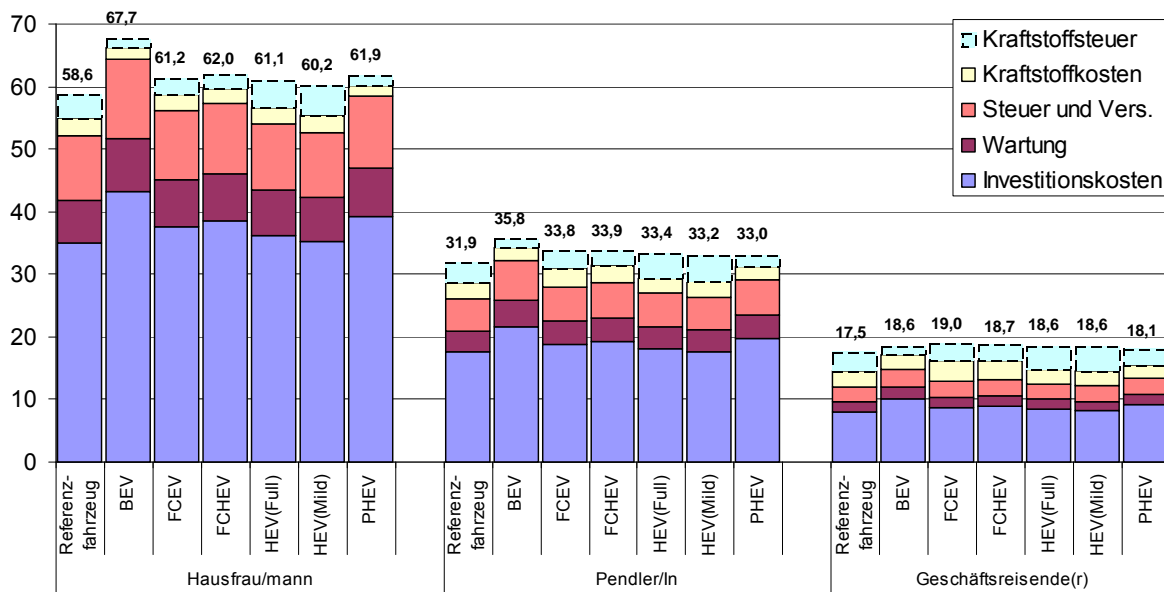


Abbildung 4-8: Mobilitätskosten Mittelklassewagen im Jahr 2030 mit Kraftstoffsteuern bei moderater Ölpreisentwicklung [EURct/km]

4.4.3 Mobilitätskosten im Jahr 2030 bei hohem Ölpreis

Aufgrund der hohen Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Energieträgerpreise soll in diesem Abschnitt die Sensitivität der in Kapitel 4.4.2 diskutierten Mobilitätskosten in Bezug auf die Entwicklung des Ölpreises untersucht werden. Dabei wird für das Jahr 2030 ein Ölpreis von 100 \$₂₀₀₇/bbl angenommen mit den in Tabelle 4-8 dargestellten resultierenden Preisen für Benzin, Diesel, Strom und Wasserstoff.

Wie aus Abbildung 4-9 hervorgeht, steigen die Mobilitätskosten des Referenzfahrzeugs bei Kleinwagen ohne Berücksichtigung von Kraftstoffsteuern je nach Nutzerprofil um 0,4 ct/km bis 0,5 ct/km gegenüber den entsprechenden Mobilitätskosten bei moderater Ölpreisentwicklung an. Bei den Hybridfahrzeugen HEV_{Full} und HEV_{Mild} bewegt sich der Anstieg der Mobilitätskosten in einer ähnlichen Größenordnung. Die übrigen Antriebskonzepte BEV, PHEV, FCEV und FCHEV zeigen demgegenüber geringere Veränderungen der Mobilitätskosten um nur 0,1 ct/km bis 0,2 ct/km, da der Anstieg der Energieträgerpreise für Strom und Wasserstoff bei höherem Ölpreis deutlich geringer ausfällt als der Preisanstieg für Benzin und Diesel. Dennoch liegen die Mobilitätskosten aller Antriebsalternativen unverändert über denen des Referenzfahrzeugs.

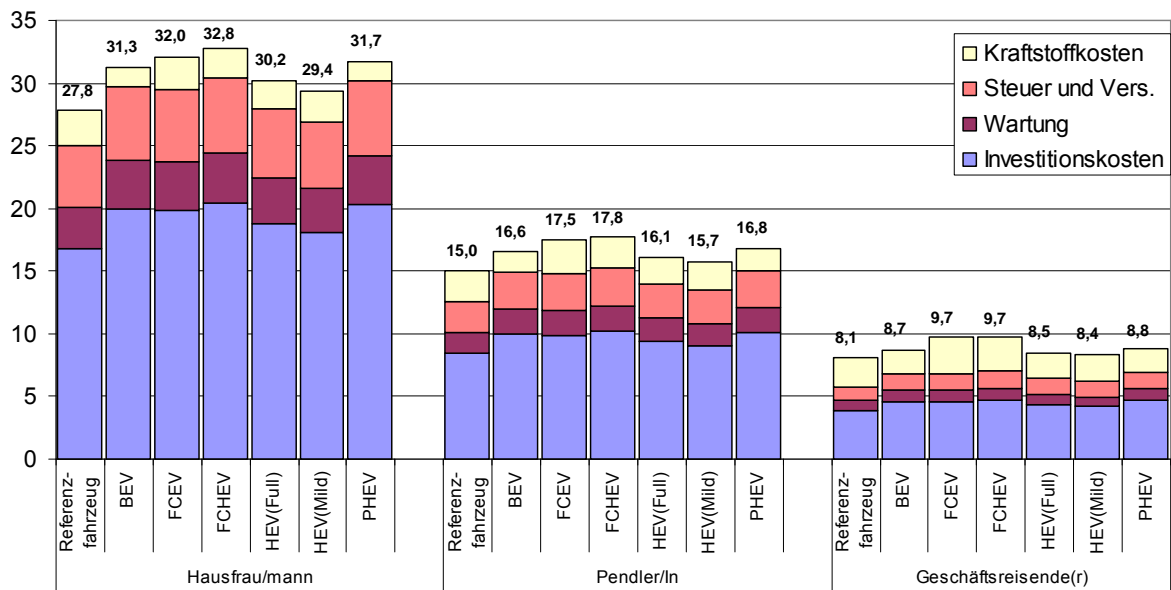


Abbildung 4-9: Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 ohne Kraftstoffsteuern bei hohem Ölpreis [EURct/km]

Bei Einbeziehung der für 2030 unterstellten Kraftstoffsteuern in die Berechnung der Mobilitätskosten ergeben sich ähnliche Effekte (Abbildung 4-10). Auch hier nehmen die Mobilitätskosten des Referenzfahrzeugs gegenüber den entsprechenden Mobilitätskosten bei moderatem Ölpreis stärker zu als die der alternativen Antriebe. Die Kostenvorteile von BEV und PHEV gegenüber der Referenz bei den Nutzerprofilen „Pendler/In“ und „Geschäftsreisende(r)“ werden dadurch noch ausgebaut.

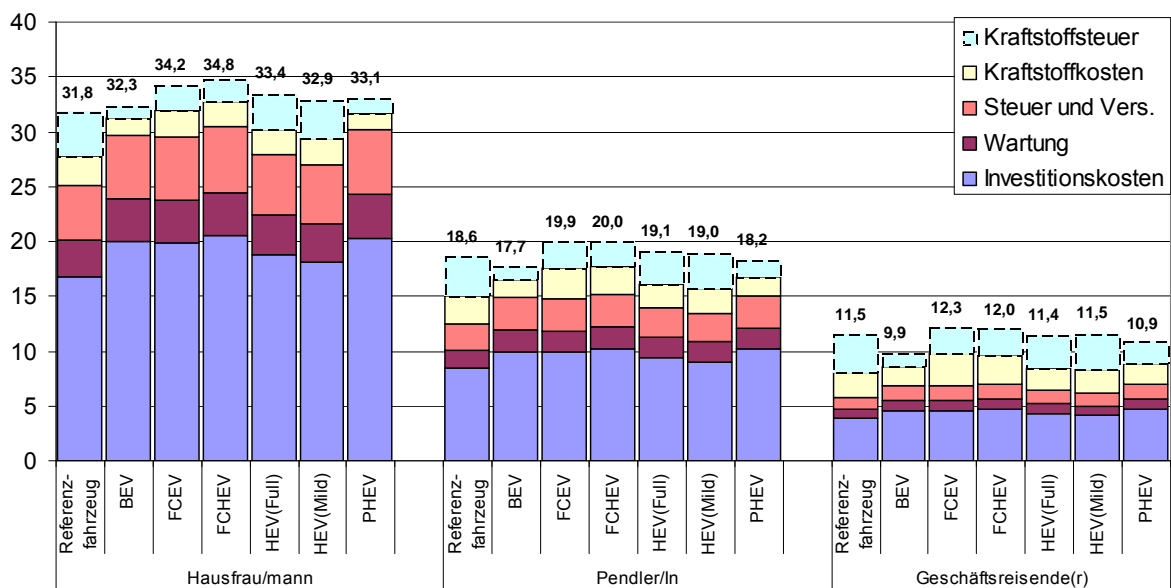


Abbildung 4-10: Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 mit Kraftstoffsteuern bei hohem Ölpreis [EURct/km]

Da die Auswirkungen eines höheren Ölpreises auf die Mobilitätskosten bei Mittelklassewagen im Wesentlichen den beschriebenen Effekten bei Kleinwagen entsprechen, wird an dieser Stelle auf eine weitere Diskussion für die Mittelklasse verzichtet. Die entsprechenden Mobilitätskosten für Mittelklassewagen bei hohem Ölpreis können jedoch im Anhang im Abschnitt 8.3 nachgelesen werden.

Zusammenfassend sind in Tabelle 4-9 die derzeitigen und zukünftigen (Jahr 2030) normierten Mobilitätskosten für Klein- bzw. Mittelklassewagen gegenübergestellt. Für die verschiedenen Profile sind die Kosten auf das jeweilige derzeitige Referenzfahrzeug ohne Steuern bezogen. Die Mobilitätskosten sind dabei für den moderaten Ölpreis dargestellt. Aus der Darstellung wird deutlich, dass sich die Mobilitätskosten bei allen elektromobilen Antriebskonzepten bis zum Jahr 2030 an die des jeweiligen Referenzfahrzeugs annähern. Je größer die Jahresfahrleistung des jeweiligen Anwenderprofils, desto stärker können die höheren Investitionskosten der alternativen Antriebe gegenüber der Referenz durch Einsparungen bei den variablen Kosten kompensiert werden.

Tabelle 4-9: Vergleich Mobilitätskosten in Prozent des Referenzfahrzeugs des jeweiligen Profils

		Kleinwagen				Mittelklassewagen			
		heute		2030		heute		2030	
		ohne Steuern	mit Steuern	ohne Steuern	mit Steuern	ohne Steuern	mit Steuern	ohne Steuern	mit Steuern
Hausfrau/mann	Referenzfahrzeug	100	119	103	118	100	108	102	108
	BEV	170	176	118	122	197	201	122	125
	FCEV	273	273	120	128	232	232	108	113
	FCHEV	281	281	123	131	237	237	110	114
	HEV(Full)	125	139	113	124	108	118	104	113
	HEV(Mild)	119	134	109	122	104	114	102	111
	PHEV	154	160	120	124	138	142	111	114
Pendler/In	Referenzfahrzeug	100	131	103	128	100	114	102	113
	BEV	167	179	117	125	195	202	122	127
	FCEV	266	266	122	139	229	229	110	120
	FCHEV	273	273	124	139	233	233	111	120
	HEV(Full)	123	147	111	131	108	125	104	119
	HEV(Mild)	117	143	108	130	104	122	102	118
	PHEV	151	165	118	128	138	146	111	117
Geschäftsreisende(r)	Referenzfahrzeug	100	155	102	145	100	126	102	123
	BEV	160	184	114	130	189	205	120	131
	FCEV	253	253	126	159	224	224	113	134
	FCHEV	257	257	126	156	226	226	113	132
	HEV(Full)	117	162	107	145	106	138	103	131
	HEV(Mild)	113	161	105	146	103	137	102	131
	PHEV	143	167	113	141	134	151	109	128

4.4.4 Variation der spezifischen Kosten von Schlüsselkomponenten

In diesem Kapitel werden die Effekte der Variation der spezifischen Kosten bei Schlüsselkomponenten auf die Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität untersucht. Dabei wurden die Brennstoffzelle und die Batterie als Schlüsselkomponenten identifiziert.

Im Folgenden werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die spezifischen Kosten der Brennstoffzellen (Abbildung 4-11) und der Batterien (Abbildung 4-12) im Jahr 2030 für das Nutzerprofil „Pendler/In“ und die Fahrzeugkategorie Mittelklasse variiert. Dabei wird eine moderate Ölpreisentwicklung unterstellt, Kraftstoffsteuern werden nicht berücksichtigt.

Die spezifischen Kosten der Brennstoffzellen werden ausgehend vom heutigen Niveau von 370 EUR/kW bis hin zu 25 EUR/kW variiert. Es wird deutlich, dass die Brennstoffzellenkosten bei etwa 25 EUR/kW liegen müssten, damit Brennstoffzellenfahrzeuge unter den vorgegebenen Randbedingungen die gleichen Mobilitätskosten wie das Referenzfahrzeug erreichen. Mit den im Rahmen dieser Studie angenommenen zukünftigen Brennstoffzellenkosten von 50 EUR/kW lägen die Mobilitätskosten geringfügig über denen des Referenzfahrzeugs.

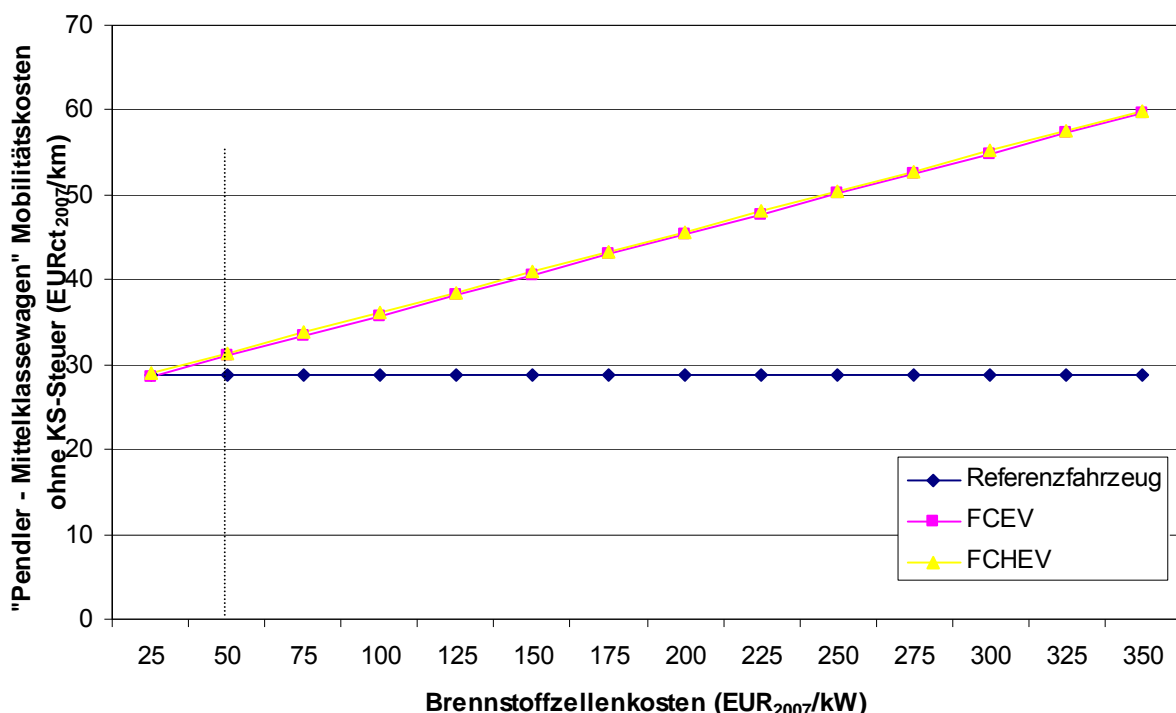


Abbildung 4-11: Parametervariation der spezifischen Brennstoffzellenkosten im Jahr 2030 (moderater Ölpreis)

Die spezifischen Kosten für Batterien werden zwischen 600 EUR/kWh (heutiger Wert) und 50 EUR/kWh variiert, wobei Kosten unterhalb von 100 EUR/kWh niedriger als alle im Rahmen der Literaturrecherche gefundenen Aussagen zur zukünftigen Batteriekostenentwicklung

wären. Aus Abbildung 4-12 wird deutlich, dass die zukünftigen Batteriekosten zwischen 50 und 150 EUR/kWh liegen müssten, damit die Mobilitätskosten bei BEVs unter den gegebenen Randbedingungen etwa in den Bereich der Mobilitätskosten der Referenzfahrzeuge gelangen. Bei PHEVs wirken sich die Batteriekosten aufgrund der kleineren Dimensionierung der Batterie weniger stark auf die Mobilitätskosten aus, sodass diese auch bei den im Rahmen dieser Studie angenommenen Batteriekosten von 200 EUR/kWh nur geringfügig über der Referenz liegen.

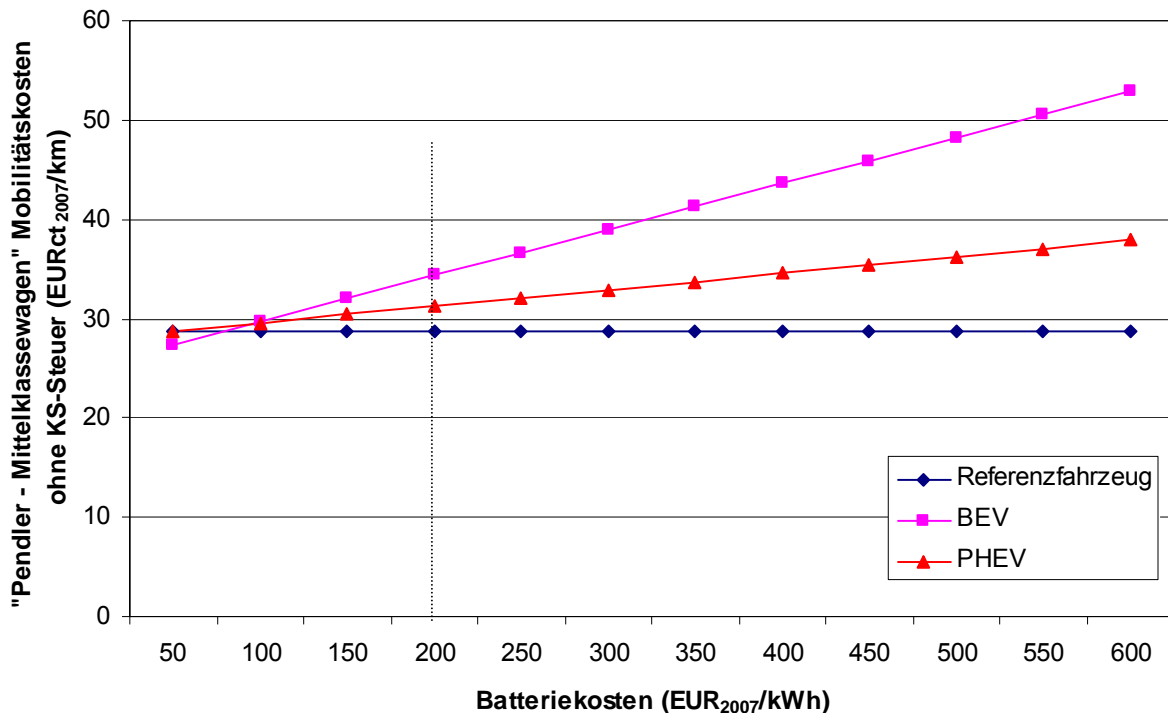


Abbildung 4-12: Parametervariation der spezifischen Batteriekosten im Jahr 2030 (moderater Ölpreis)

4.5 Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen

Im Folgenden werden die derzeitigen und zukünftigen Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen der verschiedenen Antriebskonzepte in Abhängigkeit vom Nutzerprofil verglichen und bewertet. Well-to-Wheel bedeutet in diesem Fall, dass sowohl die CO₂-Emissionen bei der Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank) als auch die CO₂-Emissionen beim Verbrauch des jeweiligen Kraftstoffs zum Fahrzeugantrieb (Tank-to-Wheel) in die Betrachtung einfließen. Die Well-to-Tank-CO₂-Emissionen der Strom- und Wasserstoffproduktion sind in hohem Maße vom jeweiligen Produktionspfad abhängig. Während beim Einsatz erneuerbarer Energiequellen nahezu keine Well-to-Tank-CO₂-Emissionen entstehen, können sie beim Einsatz kohlenstoffhaltiger fossiler Energieträger wie Kohle beträchtlich sein. Bei der folgenden Analyse wurden für die heutige Stromproduktion die spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes im Jahr 2007 nach /UBA 2009/ angesetzt (Tabelle 4-10). Für das Jahr 2030 wurden die im Rah-

men der Studie „Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 (Energieprognose 2009)“ errechneten spezifischen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung angenommen. Bezüglich der Wasserstoffproduktion werden sowohl für heute als auch für das Jahr 2030 die spezifischen CO₂-Emissionen einer Produktion durch zentrale Erdgas-Dampfreformierung unterstellt /Concawe 2007a/.

Tabelle 4-10: Angenommene CO₂-Emissionen der Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank) /Concawe 2007a/, /UBA 2009/

	WtT-Emissionen [kg/GJ]	
	Heute	2030
Benzin	12,3	12,3
Diesel	14,1	14,1
Strom	173,3	80,4
H ₂	100,0	100,0

4.5.1 Heutige Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen

Der Vergleich der heutigen Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen im Kleinwagensegment zeigt, dass alle alternativen elektromobilen Antriebskonzepte unabhängig vom Nutzerprofil niedrigere CO₂-Emissionen aufweisen als das Referenz-Benzinfahrzeug (Abbildung 4-13). Während die Emissionen beim Referenzfahrzeug und bei den beiden Hybridkonzepten HEV_{Full} und HEV_{Mild} von den Tank-to-Wheel-Emissionen dominiert werden, fallen sie bei den Varianten BEV, FCEV und FCHEV ausschließlich im Bereich Well-to-Tank bei der Strom- bzw. Wasserstoffproduktion an. Aufgrund des schlechteren Antriebswirkungsgrades der Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb FCEV und FCHEV gegenüber dem BEV ergeben sich hier leicht höhere CO₂-Emissionen, obwohl die angenommenen spezifischen CO₂-Emissionen der Wasserstoffproduktion unter denen der Stromproduktion liegen. Beim PHEV werden die Anteile der Well-to-Tank- und der Tank-to-Wheel-CO₂-Emissionen stark vom Nutzerprofil beeinflusst. Beim Profil „Hausfrau/mann“ dominieren aufgrund des hohen Anteils rein elektrisch zurückgelegter Fahrten die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung, während beim Profil „Geschäftsreisende(r)“ aufgrund des häufiger einsetzenden Range-Extenders die Emissionen im Fahrbetrieb überwiegen. In der Summe liegen die Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen des PHEV bei allen Nutzerprofilen im Kleinwagensegment etwa auf dem Niveau des BEV.

Die Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen im Mittelklassesegment unterscheiden sich bezüglich des Verhältnisses der einzelnen Antriebskonzepte zueinander kaum von denen im Kleinwagensegment. Aufgrund des allgemein höheren Kraftstoffverbrauchs in der Mittelklasse liegen auch die CO₂-Emissionen absolut betrachtet höher. Auf eine nähere Diskussion der Werte im Mittelklassesegment soll an dieser Stelle verzichtet werden. Die berechneten Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen der Mittelklasse befinden sich jedoch ebenso wie die der Kleinwagen in tabellarischer Form im Anhang unter Abschnitt 8.4.

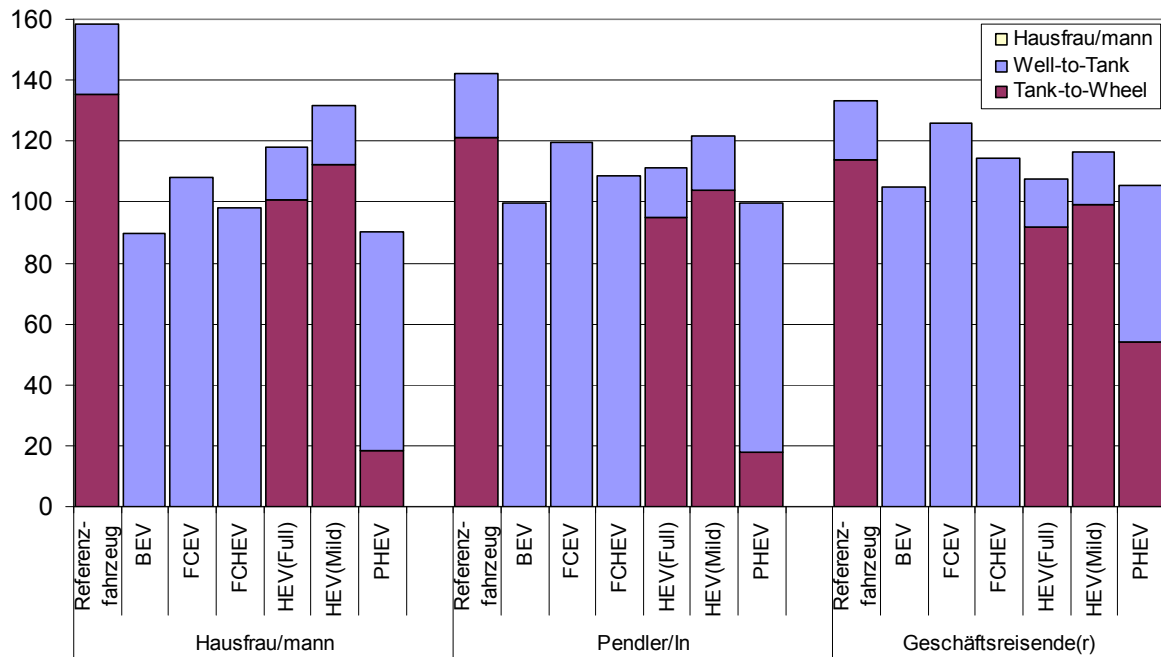


Abbildung 4-13: Aktuelle Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen bei Kleinstwagen [g/km]

4.5.2 Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen im Jahr 2030

Bis zum Jahr 2030 kommt es bei den Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen der einzelnen Antriebe im Kleinstwagensegment teilweise zu deutlichen Veränderungen (Abbildung 4-14). Die Emissionen des Referenzfahrzeugs verringern sich aufgrund des reduzierten spezifischen Kraftstoffverbrauchs je nach Nutzerprofil um 30 g/km bis 36 g/km. Die mit Abstand stärkste Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen gegenüber heute lässt sich beim BEV beobachten. Der Rückgang beruht hauptsächlich auf der unterstellten Reduzierung der spezifischen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung von heute 173,3 kg/GJ auf 80,4 kg/GJ im Jahr 2030. Das PHEV profitiert ebenfalls teilweise von dieser Entwicklung. Aufgrund des je nach Nutzerprofil unterschiedlich hohen Fahrtanteils mit Betrieb des Range-Extenders fällt der Rückgang der Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen jedoch niedriger aus als beim BEV, sodass sich im direkten Vergleich der beiden Antriebe jetzt stets höhere Emissionen beim PHEV ergeben. Die Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle FCEV und FCHEV weisen die geringste Verbesserung der Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen aller Antriebsvarianten gegenüber heute auf. Hauptgrund ist der Umstand, dass auch für das Jahr 2030 die Erdgas-Dampfreformierung als Wasserstoff-Produktionspfad angenommen wird und es somit zu keiner Veränderung der spezifischen CO₂-Emissionen bei der Herstellung kommt. Beim FCEV fällt außerdem auf, dass die Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen im Nutzerprofil „Hausfrau/mann“ noch deutlich unter denen des Referenzfahrzeugs liegen, während sie beim Nutzerprofil „Geschäftsreisende(r)“ leicht höher sind. Die Ursache hierfür liegt in der Tatsache, dass der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors sein Optimum bei hoher Last hat, während es beim Elektromotor im Teillastbereich zu finden ist. Der hohe Anteil von Innerorts-Fahrten bei niedriger Last im

Nutzerprofil „Hausfrau/mann“ begünstigt daher tendenziell eher die Fahrzeuge mit Elektroantrieb, während der hohe Außerorts-Anteil bei hoher Last im Profil „Geschäftsreisende(r)“ eher dem Referenzfahrzeug entgegenkommt.

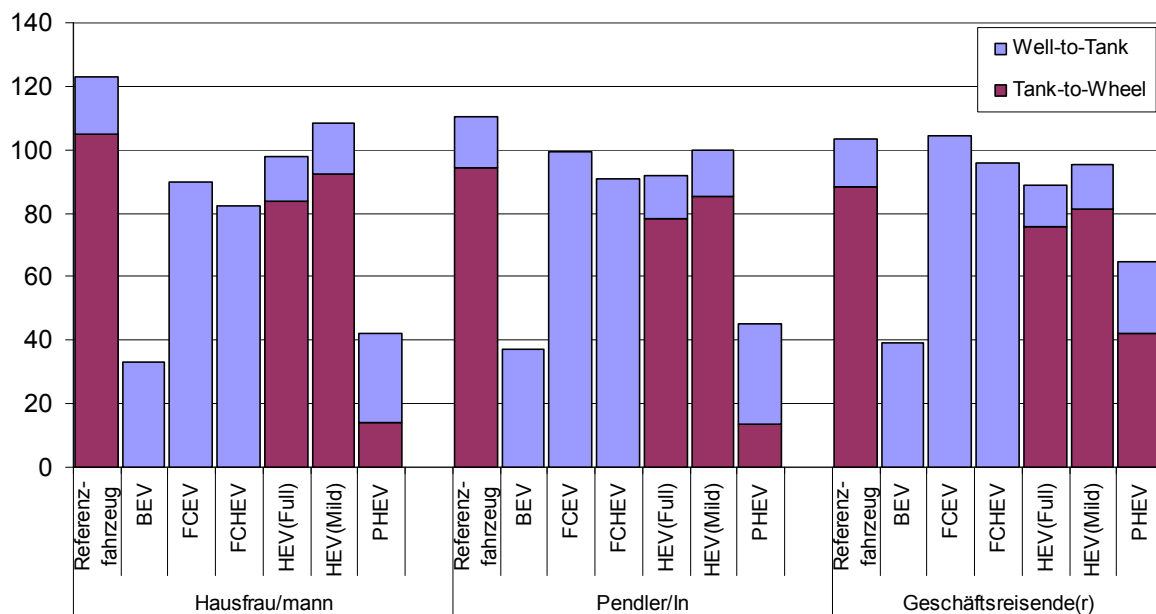


Abbildung 4-14: Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen im Jahr 2030 bei Kleinstwagen [g/km]

Da die Effekte beim Mittelklassewagen denen beim Kleinstwagen ähneln, wird hier erneut auf eine nähere Diskussion der zukünftigen Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen verzichtet. Auch hierzu befinden sich jedoch alle berechneten Emissionswerte als Tabelle im Anhang unter Abschnitt 8.4.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Höhe der unterstellten zukünftigen CO₂-Emissionen bei der Kraftstoffherstellung einen entscheidenden Einfluss auf die Well-to-Wheel-CO₂-Bilanz der verschiedenen elektromobilen Antriebsalternativen hat. Für eine abschließende Bewertung wären daher weitere Untersuchungen mit verschiedenen Szenarien zum zukünftigen Mix der eingesetzten Produktionspfade in der Strom- und Wasserstoffherstellung erforderlich.

4.6 CO₂-Vermeidungskosten

Basierend auf den in Kapitel 4.4 diskutierten Mobilitätskosten und den Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen aus Kapitel 4.5 werden im Folgenden die CO₂-Vermeidungskosten der einzelnen elektromobilen Antriebsvarianten analysiert. Diese ergeben sich als Differenz der Mobilitätskosten der jeweiligen Antriebsvariante zu den Mobilitätskosten des Referenzfahrzeugs bezogen auf die Differenz der spezifischen CO₂-Emissionen der beiden Fahrzeuge. Die Berechnung der Vermeidungskosten erfolgt aus volkswirtschaftlicher Sicht, d. h., dass Fahrzeugsteuer und Kraftstoffsteuer nicht in die Berechnung der Mobilitätskosten mit einfließen.

Bei den aktuellen CO₂-Vermeidungskosten für Kleinstwagen weisen die Hybridvarianten HEV_{Full} und HEV_{Mild} die niedrigsten Werte auf. Sie liegen im günstigsten Fall für den HEV_{Full}

bei 468 EUR/t und für den HEV_{Mild} bei 523 EUR/kg. Die Bandbreite der Vermeidungskosten bei den einzelnen Antriebstechnologien beruht auf den unterschiedlichen betrachteten Nutzerprofilen. Alle Zahlenwerte zu den CO₂-Vermeidungskosten der verschiedenen Antriebsalternativen finden sich im Anhang 8.5. Im Wesentlichen aufgrund der aktuell hohen spezifischen Brennstoffzellenkosten liegen die CO₂-Vermeidungskosten für FCEV und FCHEV mit Abstand am höchsten und bewegen sich größtenteils oberhalb von 6.000 EUR/t. Auch die Vermeidungskosten von BEV und PHEV sind mit Werten von stets mehr als 1.000 EUR/t mehr als doppelt so hoch wie bei den Hybridvarianten HEV_{Full} und HEV_{Mild}.

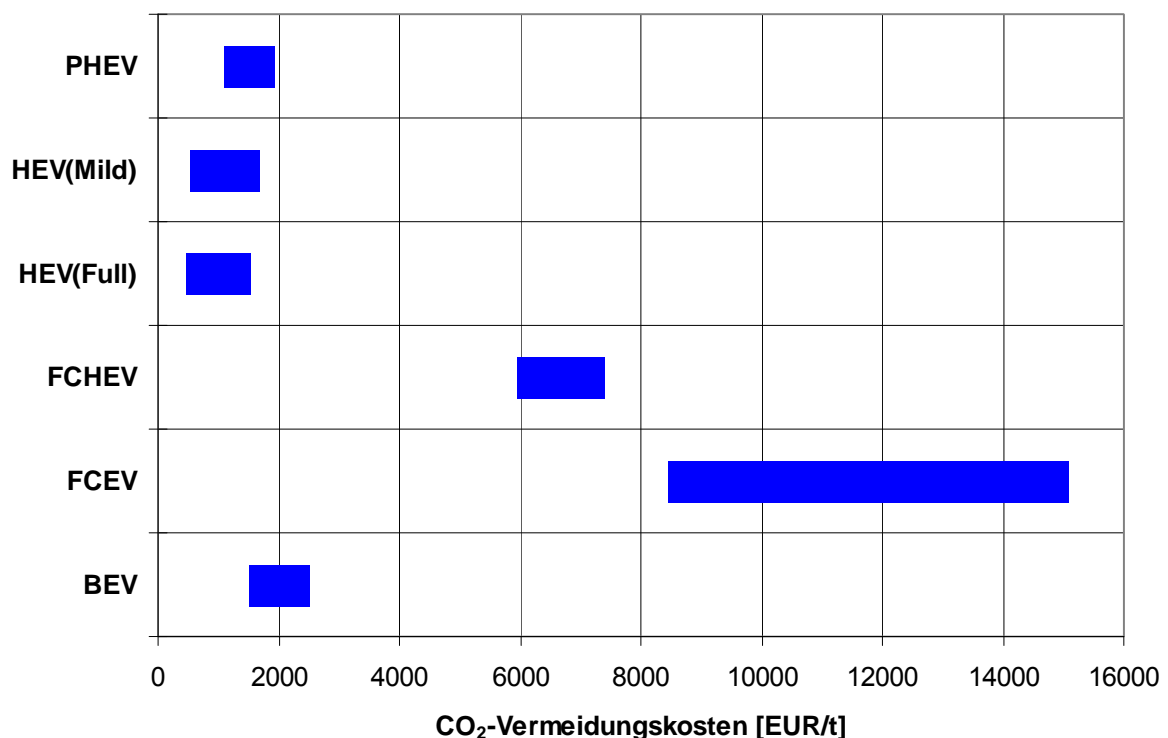


Abbildung 4-15: Heutige CO₂-Vermeidungskosten bei Kleinstwagen [EUR/t]

Beim Vergleich mit den heutigen CO₂-Vermeidungskosten bei Mittelklassewagen (Abbildung 4-16), fällt vor allem auf, dass die Vermeidungskosten des BEV drastisch auf bis zu 6.063 EUR/t steigen. Die Ursachen liegen in der hohen Batteriekapazität des Mittelklasse-BEV, die zur Erreichung der vorgegebenen Mindestreichweite von 200 km erforderlich ist, gepaart mit den derzeit hohen spezifischen Batteriekosten.

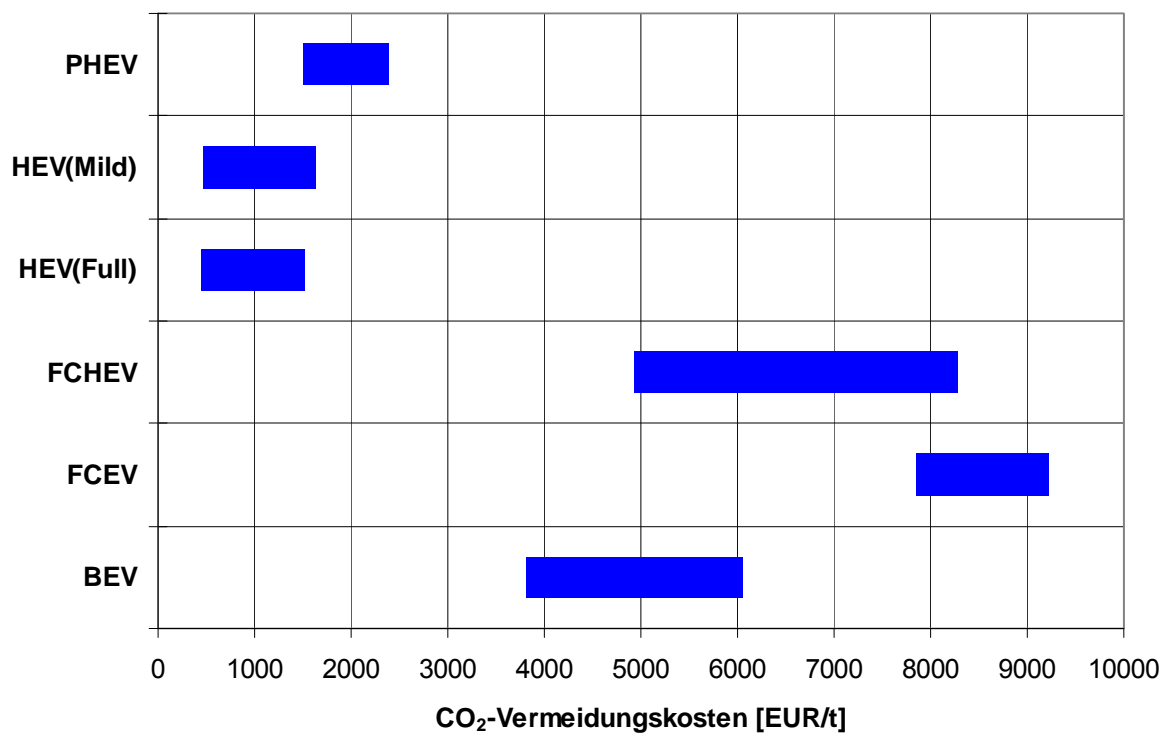


Abbildung 4-16: Heutige CO₂-Vermeidungskosten bei Mittelklassewagen [EUR/t]

Bis zum Jahr 2030 nehmen im Kleinwagensegment vor allem die CO₂-Vermeidungskosten des BEV deutlich ab (Abbildung 4-7). Sie liegen im günstigsten Fall bei 132 EUR/t und repräsentieren damit die preiswerteste CO₂-Vermeidungsoption aller betrachteten Antriebsalternativen. Der starke Rückgang der Vermeidungskosten wird zum einen durch die angenommene Reduktion der spezifischen Batteriekosten bis zum Jahr 2030 hervorgerufen und zum anderen durch den deutlichen Rückgang der spezifischen CO₂-Emissionen in der Stromerzeugung.

Auch die CO₂-Vermeidungskosten der Hybridvarianten HEV_{Full} und HEV_{Mild} weisen aufgrund der sinkenden Mehrkosten in der Anschaffung einen Rückgang auf, obwohl die tatsächliche CO₂-Einsparung aufgrund des sinkenden Verbrauchsvorteils gegenüber dem Referenzfahrzeug abnimmt.

Für die Brennstoffzellen basierten Antriebe FCEV und FCHEV ergeben sich erneut die höchsten CO₂-Vermeidungskosten, auch wenn insbesondere die Reduktion der spezifischen Brennstoffzellenkosten zu einem deutlichen Rückgang gegenüber den heutigen Vermeidungskosten führt.

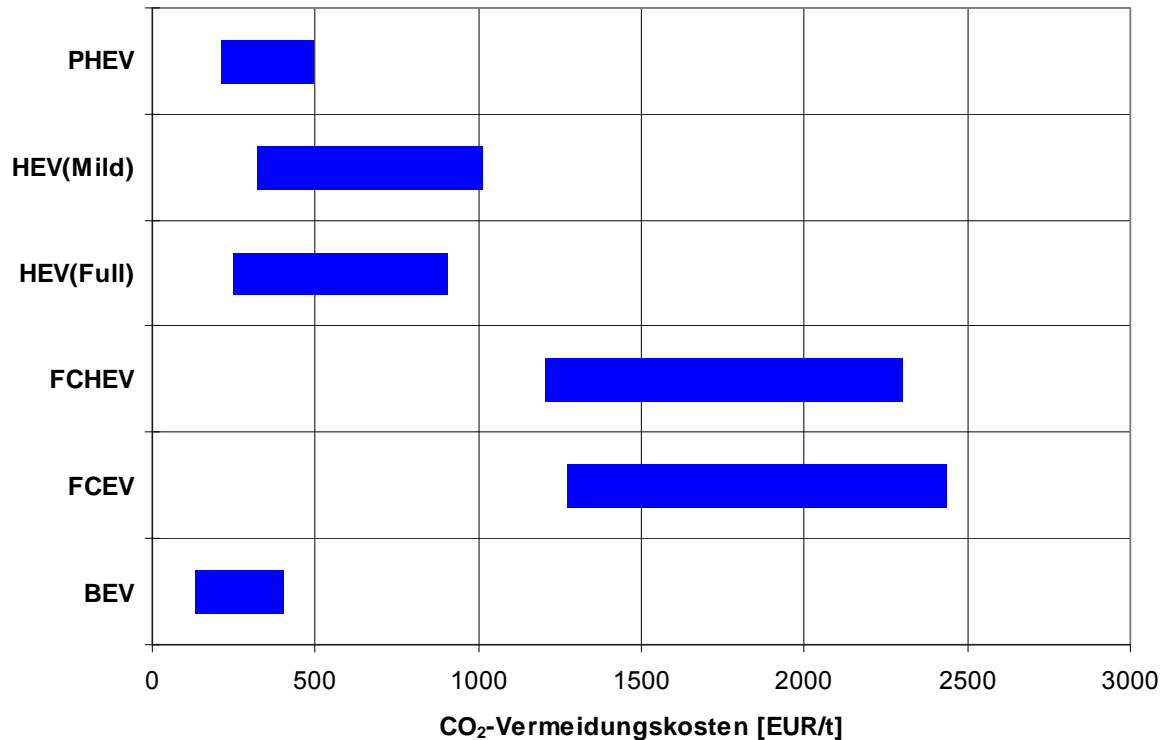


Abbildung 4-17: CO₂-Vermeidungskosten im Jahr 2030 bei Kleinstwagen [EUR/t]

Für Mittelklassewagen ergeben sich erneut höhere CO₂-Vermeidungskosten bei BEV und PHEV als beim Kleinstwagen, was auf die höhere Batteriekapazität zurückzuführen ist. Dennoch werden auch hier gegenüber den heutigen Vermeidungskosten deutliche Verbesserungen erzielt.

Beim HEV_{Mild} fällt auf, dass dieser teilweise negative CO₂-Vermeidungskosten liefert. Die hohe Bandbreite der Vermeidungskosten in Abhängigkeit vom Nutzerprofil deutet jedoch darauf hin, dass bei es sich bei den Mobilitätskosten und den Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen um sehr kleine Differenzbeträge gegenüber dem Referenzfahrzeug handelt.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass auch die Höhe der zukünftigen CO₂-Vermeidungskosten stark von den unterstellten Randbedingungen abhängt. Vor allem die angenommenen Produktionspfade in der Strom- und Wasserstoffherstellung beeinflussen sowohl die Erzeugungskosten als auch die Well-to-Tank-CO₂-Bilanz dieser Energieträger.

Verglichen mit den Kosten der CO₂-Vermeidung durch bisher ungenutzte Maßnahmen in anderen energiewirtschaftlichen Bereichen wie der Stromerzeugung, der Industrie oder im Gebäudebereich liegen die CO₂-Vermeidungskosten der diskutierten Antriebsalternativen jedoch grundsätzlich sehr hoch /Mc Kinsey 2007/. Eine stärkere Forcierung der Nutzung elektromobiler Antriebskonzepte aus Klimaschutzgründen erscheint daher nur bei ambitionierten CO₂-Minderungszielen sinnvoll.

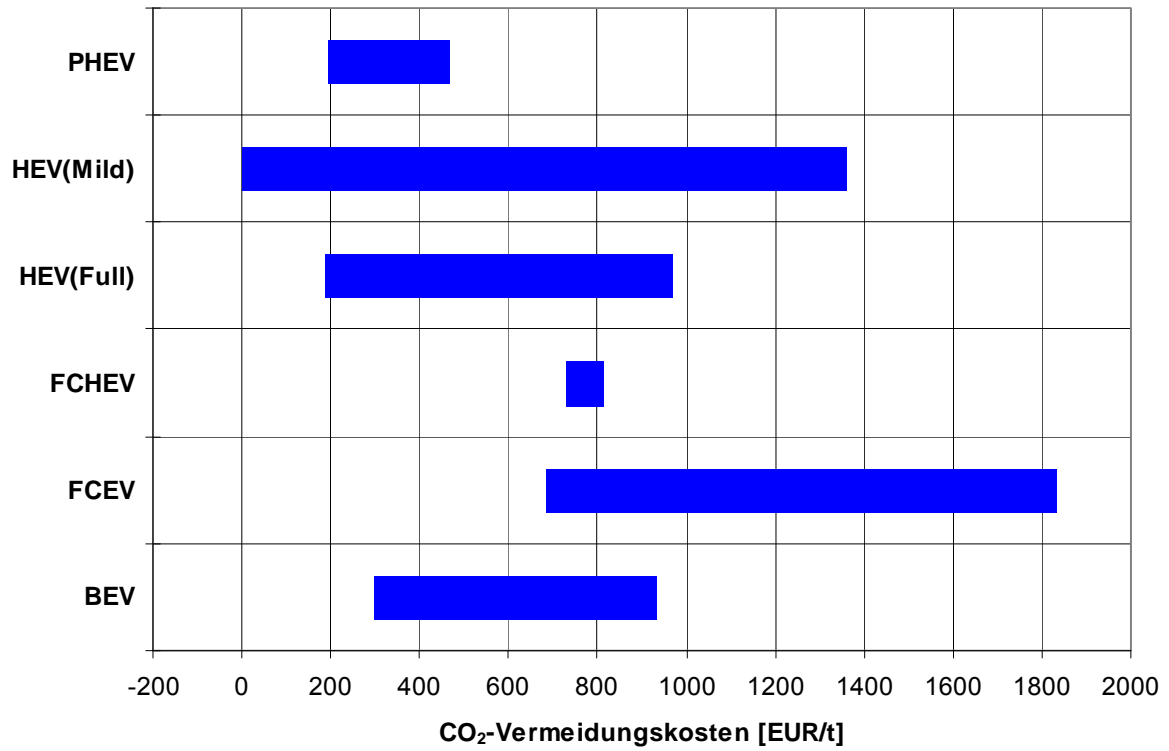


Abbildung 4-18: CO₂-Vermeidungskosten im Jahr 2030 bei Mittelklassewagen [EUR/t]

5 Weitere Aspekte der Elektromobilität

In diesem Abschnitt werden einige zusätzliche Aspekte der Elektromobilität erläutert. Zum einen wird auf die elektrische Ladetechnologien und deren Infrastruktur (vgl. Kapitel 5.1) eingegangen. Darauf folgend wird die Infrastruktur der Wasserstoffbereitstellung aufgezeigt (vgl. Kapitel 5.2). Zum Abschluss dieses Kapitels wird das Potenzial der Elektromobilität anhand mehrerer Beispielsrechnungen diskutiert (vgl. Kapitel 5.3).

5.1 Elektrische Ladetechnologien und Infrastruktur

Bei einer angenommenen Substitution von Benzin- und Dieselfahrzeugen durch Elektrofahrzeuge wird zukünftig ein höherer Stromverbrauch erwartet. Bei einer hohen Zahl gleichzeitig aus den öffentlichen Netzen ladender Elektrofahrzeuge kann die Stromversorgung vor große Herausforderungen gestellt werden /Brauner 2008/. Durch die Ladeleistung wird der Lastgang der elektrischen Netze hinsichtlich Energiemenge und zeitlicher Verteilung erheblich beeinflusst /Mezger, Blank 2009/. Außerdem ist die Höhe der Aufnahmeleistung von Elektrofahrzeugen als Speicher, unter Berücksichtigung von Lebensdauer und Sicherheitsaspekten, bisher nicht geklärt.

In diesem Abschnitt wird zunächst das bidirektionale Laden und darauf folgend das bidirektionale Laden diskutiert. Besondere Herausforderungen treten auf, falls Akkumulatoren mit kurzen Ladezeiten – von wenigen Minuten – eine weite Verbreitung finden. Um diese aufzuladen, sind schnellladefähige Systeme (vgl. Kapitel 5.1.3) mit hohen Ladeleistungen erforderlich. Bei gleichzeitiger Ladung von vielen Elektrofahrzeugen kann das Niederspannungsnetz überlastet werden, wodurch Versorgungsinfrastrukturen mit Anschluss an das Mittelspannungsnetz benötigt werden /Brauner 2008/. Um hohe Ladeströme und die dadurch resultierende Belastung des Spannungsnetzes zu vermeiden können auch Akkuwechselstationen (vgl. Kapitel 5.1.4) eingesetzt werden.

Im Folgenden werden unterschiedliche Lademöglichkeiten elektrisch angetriebener Fahrzeuge erläutert sowie deren Auswirkungen auf die Energieversorgung diskutiert. Dabei werden der aktuelle Stand der Technik beschrieben und zukünftige Perspektiven aufgezeigt.

5.1.1 *Direktionales Laden über Anschlüsse im Wohnbereich*

Eine gewöhnliche Haushaltssteckdose mit einer Spannung von 230 V und 16 A Absicherung wird einphasig mit Wechselstrom betrieben und erlaubt die Übertragung einer Ladeleistung von über 3 kW /Ursin, Höckel 2009/. Ein Drehstromanschluss mit 3-Phasen Drehstrom stellt bei einer Spannung von 400 V und 16 A eine Leistung von 10 – 15 kW bereit /Gulde 2009/.

Für den Fall, dass das Elektroauto über Nacht in der Garage an einer üblichen Hausleitung mit 3 kW aufgeladen wird, sind keine aufwendigen Installationen notwendig, da sich in diesem Fall die externe Energieeinspeisung nicht wesentlich von einer Einspeisung durch Rekuperation unterscheidet. Eine entsprechende Zuleitung lässt sich im Fahrzeug integrieren /Mezger, Blank 2009/. Bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 15 kWh auf 100

km für Elektrofahrzeuge ließe sich mit einer Ladezeit von 5 h eine Fahrstrecke von 100 km realisieren. Die Aufladung über einen 16 A – Drehstromanschluss ermöglicht Ladeleistungen von etwa 15 kW, somit wird für eine Fahrleistung von 100 km eine Ladezeit von 1 Stunde benötigt. Ein solcher Anschluss ist in der Regel in jedem Haushalt vorhanden und wird beispielsweise zum Betrieb von Elektroherden benutzt /Hildebrandt 2009/.

Ladeleistungen von Elektrofahrzeugen zwischen 3 – 15 kW sind im Wohnbereich keine außergewöhnlich hohen Einzellasten, sodass eine Aufladung über das Niederspannungsnetz prinzipiell möglich ist. Bei einer weiten Verbreitung der Elektromobilität besteht allerdings die Gefahr, dass es durch gleichzeitiges Laden mehrerer Verbraucher zu Netzüberlastungen kommt /Staschus, Woyke 2008/.

Das Aufladen von Akkus im Privatbereich wird sicherlich vorwiegend nachts stattfinden /Brauner 2008/. Dafür spricht einerseits, dass die meisten Fahrzeuge während der Nacht ohnehin nicht benutzt werden. Andererseits sind Nachtladungen aus Sicht der Versorgungsnetze ebenfalls günstig, da die Last zu dieser Zeit deutlich geringer ist als tagsüber /Staschus, Woyke 2008/, was zu einem veränderten Kraftwerkseinsatz führen wird.

Am folgenden Beispiel sollen näherungsweise die Potenziale einer Nacht-Aufladung an einer gewöhnlichen Haushaltssteckdose (Spannung: 230 V; Stromstärke: 16 A; Ladeleistung 3 kW) aufgezeigt werden. Die Annahmen für die Potenzialberechnung sind (vgl. Kapitel 4):

- Zurückgelegte km an einem Tag in Deutschland: Hausfrau/mann: 15 km; Pendler/In: 32 km; Geschäftsreisende(r): 100 km
- Der Energieverbrauch wird für einen Kleinwagen (BEV) mit 0,16 kWh/km angesetzt.
- In der Berechnung werden lediglich die Wochenarbeitstage betrachtet, da es an den Wochenenden zu einer deutlichen Veränderung der Netzlast kommt

Für die durchschnittlichen Fahrstrecken des Profils Hausfrau/mann von 15 km am Tag ist somit eine gespeicherte Energiemenge von etwa 2,4 kWh – pro Tag und BEV – erforderlich, die mit einer herkömmlichen Haushaltssteckdose in unter einer Stunde geladen werden kann. Der Pendler/In benötigt eine gespeicherte Energiemenge von 5,12 kWh und der Geschäftsreisende(r) eine Energiemenge von 16 kWh.

Aus dem Lastgang /UCTE 2009/, der die Leistungsnachfrage im Verlauf einer Woche aufzeigt, wird ersichtlich, dass die Netzlast ab 21 Uhr zunehmend abnimmt und um 8 Uhr wieder das Niveau von 21 Uhr erreicht (Abbildung 5-1). Um eine Vergleichmäßigung des Lastgangs zu erreichen bietet sich eine Aufladung von 21 bis 8 Uhr an. An den Wochenarbeitstagen beträgt das Niveau zu diesen beiden Zeitpunkten – zu Beginn und zum Ende des Lasttals – etwa 65.000 MW. Unter der Annahme einer konstanten Netzlast von 65.000 MW zwischen 21:00 – 8:00 Uhr, können die Täler des Lastgangs aufgefüllt werden sowie die überschüssige Leistung während der jeweiligen Zeiträume ermittelt werden. Dabei handelt es sich um die mittlere Leistung, die sich aus dem Leistungsüberschuss vom Beginn und dem Ende

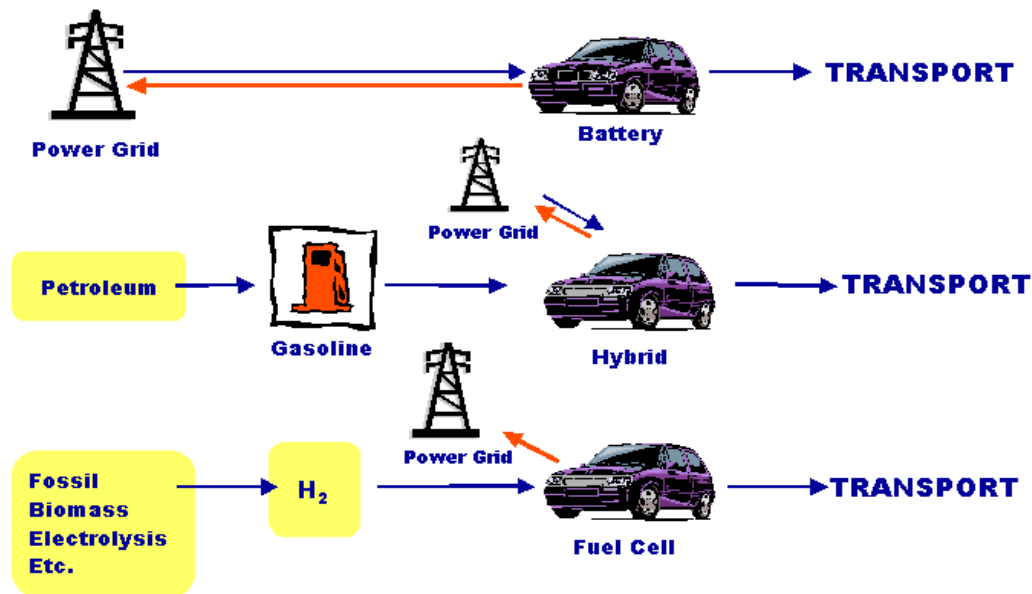


Abbildung 5-2: Vereinfachte Darstellung des Vehicle to Grid (V2G) – Konzepts /UDEL 2009/

An- und Abfahrvorgänge, sowie das Abschalten von Kraftwerken könnten durch das bidirektionale Laden aus Fahrzeug-Akkus vermieden werden. Dagegen treten durch die Speicherung des Stroms zusätzliche Leitungsverluste auf, da der Strom nach dem Speichervorgang wieder durch das Stromnetz zum Verbraucher übertragen wird.

Die Nutzung von Elektrofahrzeugen als mobile Speicherkraftwerke wird vor allem im Zusammenhang mit einem zukünftigen starken Ausbau der Elektromobilität im Straßenverkehr diskutiert. Der Realisierung eines solchen Konzepts stehen jedoch einige Herausforderungen gegenüber, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

Zunächst erfordert ein solch flexibler Austausch von elektrischer Energie zwischen Fahrzeug und Stromnetz entsprechende Steuerungstechnologien, die z. B. die Regulierung der Spannung bzw. Netzfrequenz übernehmen. Darüber hinaus sind intelligente Instrumente im Bereich des Lastmanagements notwendig, die einerseits die Einspeisung der erforderlichen Strommenge in das Stromnetz sicherstellen. Andererseits müssen sie aber auch den Bedürfnissen der Autofahrer Rechnung tragen und eine Entnahme der gespeicherten Energie, vor Beginn einer Fahrt ausschließen. Daneben muss im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik die Weiterentwicklung der vorhandenen Technik vorangetrieben werden. Um den Lade- und Entladevorgang extern (beispielsweise durch ein Energieversorgungsunternehmen) steuern zu können müssen Systeme zur Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der externen Regeleinheit entwickelt werden. Neben dem Messen der aktuellen Batteriekenndaten wie Ladestand, etc. müssen diese Daten an die externe Regeleinheit weitergeben und von dort den Steuerungsbefehl wieder an das Elektrofahrzeug zurückgeben. Hierfür werden verschiedene Systeme mit unterschiedlichen Übertragungsvarianten entwickelt. Die Nutzung des Stromkabels bis zur nächsten Ortsnetzstation mittels Power Line Communication (PLC) und von dort die Datenweitergabe über ein PLC-Model via Internetverbindung wird mit verschiedenen Standards entwickelt. Neben der Nutzung der Mobilfunknetze zur Daten-

übertragung werden auch lokale WLAN-Netze entwickelt, womit die Daten durch Vorbeifahren (bspw. eines Müllfahrzeugs) eingesammelt werden können. Herausforderungen bei der Nutzung des Internets ergeben sich weiter durch die Verwendung verschiedener Protokolle (Smart Message Language (SML) oder Device Language Message Specification/Companion Specification for Energy Metering (DLMS/COSEM)). Insgesamt muss die gesamte Kommunikation zwischen Fahrzeug, Ladeinfrastruktur und Energieversorger entwickelt werden.

Neben den technologischen sind auch wirtschaftliche Aspekte bei der Umsetzung eines flächendeckenden V2G – Systems von Bedeutung. Es müssen Geschäftsmodelle entwickelt werden, die sowohl die Interessen des Automobilbesitzers als auch die wirtschaftlichen Interessen von Energieversorgern und Netzbetreibern berücksichtigen.

Es könnten zudem neue Geschäftsfelder entstehen, die als Schnittstelle zwischen Netzbetreiber und Fahrzeughersteller fungieren. So könnten beispielsweise Parkhäuser mit einer Vielzahl von Stromanschlüssen den Stromhandel zwischen den beiden Handelspartnern steuern. Über heute übliche Drehstromanschlüsse mit 10 – 15 kW Leistung, ließen sich theoretisch Strommengen von 240 – 360 kWh pro Tag handeln. Bei einem Spitzenlastpreis von 20 Cent je kWh beträgt das Handelsvolumen pro Netzanschluss, 48 – 72 Euro am Tag. Dagegen entstehen dadurch neben den Kosten für die Installation der Anschlüsse sowie der Systeme für die Kommunikation mit dem Stromhandelsplatz auch Arbeitskosten.

5.1.3 Schnellladefähige Systeme

Mit Hilfe von schnellladefähigen Systemen sollen die Ladezeiten verkürzt werden. Ein schnelles Aufladen ist nur mit Akkumulatoren möglich, die in der Lage sind, hohe Ladeleistungen aufzunehmen. Außerdem ist eine entsprechende Infrastruktur erforderlich, welche die hohen Ladeleistungen bereitstellen kann. Derzeit gibt es keine klar definierten Anhaltspunkte, ab welcher Aufladedauer, Ladeleistung, Netzspannung oder Ladestrom eine Schnellladung vorliegt. Ausgehend von heute üblichen Tankzeiten von ca. 5 Minuten, sollen im Folgenden Ladezeiten, die sich in dieser Größenordnung (5 – 10 min) bewegen und für eine Fahrstrecke von mindestens 100 km (Profil Geschäftsreisende(r)) ausreichend sind, als Schnellladevorgänge angenommen werden. Beispielsweise müsste bei einem Energieverbrauch von 15 kWh auf 100 km und einer Ladedauer von 5 min, für eine Fahrstrecke von 100 km eine Ladeleistung von 180 kW bereitgestellt werden.

Anhand dieser vereinfachten Beispielrechnung wird deutlich, dass eine Stromversorgung von Schnellladestationen aus dem öffentlichen Niederspannungsnetz nicht möglich sein wird, da die Bemessungsscheinleistungen der Transformatoren, an Ortsnetzstationen im Niederspannungsnetz – abhängig von der Besiedlungsstruktur – zwischen 5 kVA und 1600 kVA liegen /Flosdorff, Hilgarth 2000/. Schnellladestationen erfordern somit Versorgungsinfrastrukturen mit Anschluss an das 10 kV/20 kV-Mittelspannungsnetz /Heuck, Dettmann 2005/, deren Kurzschlussleistungen bis zu 500 MVA betragen können, in der Regel liegen diese jedoch bei 50 – 200 MVA /BDEW 2008/.

Mit der heutigen Akkumulortechnologie lassen sich zwar die hohen Ladeleistungen meist aufnehmen, jedoch ist eine Schnellladung in der Regel mit Nachteilen hinsichtlich Lebensdauer und Sicherheit der Batterie verknüpft /Mock, Schmid 2008/. Die höheren Ladeströme führen zu einer starken Wärmeentwicklung im Akkumulator während des Ladevorgangs /Groiß 2009/. Zu hohe Temperaturen können sich negativ auf den chemischen Reaktionsprozess im Akku auswirken und zu einer irreversiblen Beschädigung der Bestandteile (z. B. Elektrolyten) im Akkumulator führen. In Extremfällen können durch Überhitzung sogar starke Reaktionen ausgelöst werden, wie beispielsweise in Li-Ionen Akkus /Oertel 2008/. Aus diesem Grund sind bei der Ladung an Schnellladestationen zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Derzeit gibt es in Tokyo sechs Schnellladestationen "quick charger" (Stand: Oktober 2008), bis März 2010 soll ein Netz von 200 Schnellladestationen vom japanischen Energieversorger TEPCO aufgebaut werden /Anegawa 2008/. Die Ladestationen werden mit Gleichstrom betrieben und stellen eine Leistung von 50 kW bei einer Spannung von 500 V und einer Stromstärke von 100 A bereit. Angeschlossen sind diese Ladestationen an ein 200 V Spannungsnetz mit 3-Phasen Drehstrom. Für eine Fahrstrecke von 40 km wird als Zielwert eine Ladedauer von 5 Minuten angegeben /Anegawa 2008/. Momentan beträgt die Ladedauer für den Mitsubishi i-MiEV etwa 30 Minuten für eine Reichweite von 144 km /Mitsubishi 2009/.

5.1.4 Akkumulator-Wechselstationen

Um lange Ladezeiten zu umgehen, bestehen Konzeptentwürfe, die einen Austausch der Akkumulatoren an einer Wechselstation vorsehen. Akkumulator-Wechselstationen dienen vorrangig dem Ziel, die Energieversorgung auf längeren Fahrtstrecken sicherzustellen. Während für die täglich anfallenden Fahrten, wie z. B. die Wege zur Arbeit, Einkauf usw., ein voll aufgeladener Akku mit einer Reichweite von 144 km /Mitsubishi 2009/ in der Regel ausreichend ist, bietet sich auf langen Fahrtstrecken – von mehreren hundert Kilometern – ein schneller Austausch des leeren gegen einen vorher voll aufgeladenen Akku an. Der Akkumulator muss dabei aus dem Fahrzeug herausgenommen und über eine Wechseinrichtung auf einen Lagerplatz zur Wiederaufladung abgestellt werden. Im Gegenzug muss ein aufgeladener Akku aus dem Lagerplatz entnommen und im Elektrofahrzeug integriert werden. Dieser Vorgang läuft vollautomatisch ab. Eine technische Gestaltung einer solchen Wechselstation wird in dem 1994 von der Gottlob Auwärter GmbH und der Varta Batterie AG angemeldeten Patent "Wechselstation für mit austauschbaren Akkumulatoren ausgerüstete Elektrostraßenfahrzeuge" /Lee et al. 1994/ gezeigt.

Zur Realisierung von Akkumulator-Wechselstationen sind standardisierte Akkutypen in Bezug auf Baugröße und Schnittstellen am Fahrzeug bzw. Ladeplatz notwendig, damit diese an jeder Umtauschstation ausgewechselt werden können. Denkbar wäre eine Einigung, zwischen Automobilherstellern und Herstellern von Akkumulatoren auf eine überschaubare Anzahl unterschiedlicher Akkumodelle.

Ein Akkutausch würde etwa soviel Zeit in Anspruch nehmen wie ein gewöhnlicher Betankungsvorgang bei einem Benzin- bzw. Diesel-Fahrzeug /Mock, Schmid 2008/. Neben dem Aspekt der Zeiteinsparung hat der Aufbau einer Infrastruktur mit Wechselstationen weitere positive Auswirkungen. So müsste bei technologischen Weiterentwicklungen der Akkumulatorsysteme nicht ein komplett neues Fahrzeug gekauft werden, sondern lediglich der Akkumulator ausgetauscht werden. Außerdem haben tauschbare Akkumulatoren den Vorteil, dass sie an den Stationen geprüft werden können. Somit wären immer funktionstüchtige Energiespeicher im Umlauf /Herz 2009/.

Aus Kundensicht könnten Akzeptanzprobleme auftreten, wenn der Kunde für einen hochwertigen Akku einen qualitativ minderwertigen Akku erhält. Dieses Problem könnte man umgehen, wenn der Energiespeicher nicht, als integraler Bestandteil des Fahrzeugs, in Besitz des Fahrzeughalters ist, sondern als eine Art Leihobjekt von einem Dienstleister bereitgestellt wird.

Das im Jahr 2007 gegründete Start-Up Unternehmen Better Place aus den USA sieht ein solches Geschäftsmodell vor. Die Akkumulatoren bleiben in Besitz des Unternehmens und werden an die Kunden vermietet, das Risiko trägt allein der Anbieter. Die Fahrzeughalter zahlen eine Grundgebühr und die zusätzlich entnommene Energie aus dem Energiespeicher.

In Israel ist das erste Better Place Projekt, mit der notwendigen Infrastruktur, ab 2011 geplant. Es sieht den Aufbau von 100 Akku-Wechselstationen an Tankstellen, Raststätten und Einkaufszentren vor, außerdem sind landesweit 500.000 Ladestationen geplant /Engel 2009/. Der Austausch der Akkus erfolgt in einer Box mit hydraulischen Hebevorrichtungen, die sich unterhalb des Fahrzeugs befinden und dauert nur wenige Minuten /Better Place 2009/.

Ob sich das Geschäftsmodell von Better Place letztendlich auf breiter Front durchsetzen wird, ist aus heutiger Sicht fraglich /Herz 2009/. Einerseits wird der Akkumulator von vielen Herstellern als primäres Differenzierungspotenzial künftiger Elektrofahrzeuge angesehen /Schumann 2009/. Andererseits bestehen Zweifel, ob Hersteller und Stromanbieter auf Teile ihres Geschäftsbereichs verzichten und dieses einem Intermediär wie Better Place überlassen /Herz 2009/.

5.2 Wasserstoffinfrastruktur

Elektromobilität in Kombination mit Wasserstoff als Energieträger erfordert zunächst den Aufbau einer umfassenden Wasserstoffinfrastruktur. Dies betrifft sowohl die Erzeugung des Wasserstoffs als auch Transport und Verteilung sowie ein flächendeckendes Tankstellennetz zur Fahrzeugbetankung.

Zur Erzeugung von Wasserstoff existiert grundsätzlich eine Vielzahl von Verfahren, die auf der Umwandlung verschiedener Energieträger basieren. Dazu zählen z. B. die Dampfreformierung von Erdgas, Kohle- oder Biomassevergasung und die Elektrolyse. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Herstellungskosten als auch hinsichtlich der bei der Wasserstoffproduktion entstehenden Treibhausgasemissionen (Tabelle 5-1). Im Falle der Elektrolyse sind zusätzlich die Treibhausgasemissionen zu berücksichtigen, die bei

der Erzeugung des eingesetzten Stroms entstehen. Im deutschen Strommix des Jahres 2007 betragen diese beispielsweise 173 kg/GJ /UBA 2009/.

Tabelle 5-1: Derzeitige Kosten und THG-Emissionen bei der Wasserstoffherstellung /Gül 2008/, /Concawe 2007/

	Kohle- vergasung	Kohle- vergasung + CCS	Erdgas-Dampf- reformierung	Biomasse- vergasung	Elektrolyse
Herstellungskosten [EUR/GJ]	4,39 - 7,51	4,88 - 14,30	5,56 - 21,80	10,40 - 21,16	11,40 - 22,69
THG-Emissionen [kg/GJ]	193	8,8	72,9 - 86,5	0 - 1,1	-

Die Herstellungskosten für Wasserstoff hängen in hohem Maße von der Produktionskapazität der jeweiligen Anlage ab, da es bei den kapitalintensiven Anlagen zu deutlichen Kostendegressionen bei Kapazitätssteigerung kommt. Wird der Wasserstoff dezentral in kleineren Anlagen erzeugt, deren Produktionskapazität entsprechend dem Bedarf einer angeschlossenen Tankstelle ausgelegt ist, ergeben sich deutlich höhere Produktionskosten. Lediglich die dezentrale Wasserstoffproduktion durch Erdgas-Dampfreformierung oder Elektrolyse werden unter bestimmten Umständen als potenzielle Optionen angesehen.

Die zentrale Wasserstoffproduktion in Anlagen mit hoher Produktionskapazität hat zwar den Vorteil niedrigerer Produktionskosten, erfordert aber zusätzliche Aufwendungen für den Transport des Wasserstoffs von der Produktionsstätte zur Tankstelle. Je nach Transportentfernung können unterschiedliche Transportoptionen zum Einsatz kommen (Abbildung 5-3).

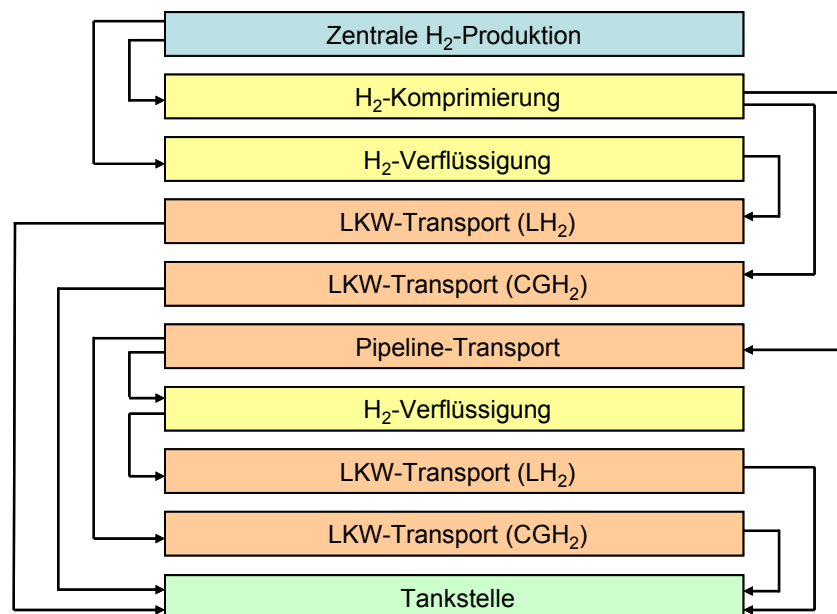


Abbildung 5-3: Übersicht verschiedener Transport- und Verteilungsoptionen für Wasserstoff

Eine seit mehr als 50 Jahren praktizierte Transportvariante für gasförmigen Wasserstoff ist der Pipeline-Transport. Derzeit existiert in Deutschland ein industriell genutztes Wasserstoff-

pipelinenetz von ca. 1.300 km Länge, das als Basis für den Aufbau eines flächendeckenden Pipelinenetzes dienen könnte. Heutige Wasserstoffpipelines haben üblicherweise einen Durchmesser von 25-30 cm und arbeiten bei Drücken zwischen 10 und 20 bar. Auch deutlich höhere Drücke bis 100 bar wurden bereits realisiert /IEA 2005/. Als Material kommt in der Regel Stahl zum Einsatz.

Unter bestimmten Voraussetzungen ließe sich auch das bereits existierende Erdgasnetz zum Transport von Wasserstoff nutzen. Dazu kämen jedoch nur die existierenden Erdgas-Pipelines aus Stahl in Frage, da die bei Erdgaspipelines häufig eingesetzten Kunststoffmaterialien aufgrund ihrer höheren Porosität zu starken Abdampfverlusten führen würden.

Eine wesentlich flexiblere Transportoption für Wasserstoff ist der LKW-Transport in flüssiger oder gasförmiger Form, der es ermöglicht, ein beliebig verteiltes Tankstellennetz zu versorgen. Nachteil dieser Variante sind die höheren spezifischen Transportkosten im Vergleich zur Pipeline-Variante.

Um die Vorteile der beiden Transportoptionen zu vereinen, wird häufig eine kombinierte Variante in Betracht gezogen. Der zentral produzierte Wasserstoff wird dabei zunächst via Pipeline in die Nähe eines Ballungszentrums transportiert und von dort via LKW an die einzelnen Tankstellen verteilt. In /Gül 2008/ werden für diese Variante Transport- und Verteilungskosten inklusive der Tankstellenkosten von 15,76 EUR/GJ angegeben. Dabei wird von einem Pipeline-Transport über 60 km gefolgt von einer Verflüssigung des Wasserstoffs und anschließendem LKW-Transport über 40 km ausgegangen. Für die Tankstelle wird ein täglicher Wasserstoffabsatz von 1.500 kg/d angenommen. Die Transport- und Verteilungskosten überwiegen somit je nach angewandtem Herstellungspfad die Wasserstoff-Herstellungskosten (vgl. Tabelle 5-1).

5.3 Potenzial der Elektromobilität zur Lastregelung

Die verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen zur Stromerzeugung führt in Zukunft zu einem steigenden Bedarf an Speichermöglichkeiten, da das Energieangebot aus regenerativen Energiequellen mit der Energienachfrage zeitlich und lokal oftmals nicht übereinstimmt. Bei einer weiten Verbreitung der Elektromobilität könnten Fahrzeug-Akkumulatoren als "mobile Speicherkraftwerke" dienen. Die Nutzungsdauer eines PKWs liegt meist unter einer Stunde pro Tag, in den restlichen mehr als 23 Stunden könnten die Fahrzeuge an das Stromnetz angeschlossen werden /Engel 2005/. Während dieser Zeit sind sie in der Lage überschüssige Energie, insbesondere aus regenerativen Energiequellen, zu speichern und die gespeicherte Energie bei Bedarf kurzfristig wieder ins Netz einzuspeisen.

Eine Herausforderung an die Integration der mobilen Speicher ist deren Verfügbarkeit. Im Gegensatz zu den stationären Speichern, die in der Regel konstant verfügbar sind, können mobile Speicher nur dann verwendet werden, wenn diese an das Stromnetz angeschlossen sind. Nachstehend wird zunächst das Potenzial der mobilen Speicher für den Tag-Nacht-Ausgleich von Strommengen aufgezeigt. Danach wird das Potenzial der Ladeenergie ver-

schiedener Fahrzeugnutzertypen berechnet. Diese Potenzialermittlung ist zunächst eine erste Abschätzung und soll in zukünftigen Arbeiten verfeinert werden.

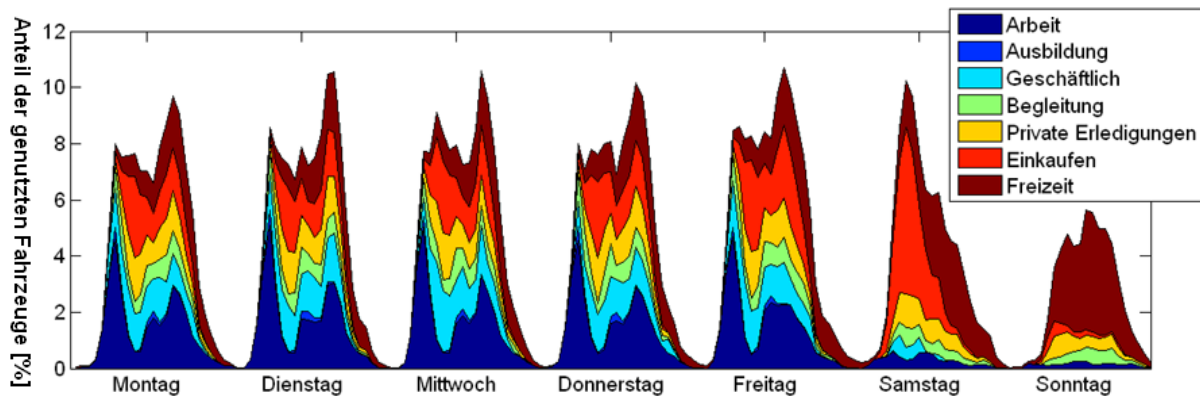


Abbildung 5-4: Stündlicher Anteil der genutzten Fahrzeuge für eine durchschnittliche Woche in Deutschland [%] /Hartmann et al. 2009/

Die Analyse der Verfügbarkeit von PKWs in Deutschland wird anhand der Daten von /Hartmann et al. 2009/ durchgeführt. Hierbei wurde ein Simulationsmodell erstellt, mit dem die Zeiten einer durchschnittlichen Woche berechnet werden, an denen die PKWs verfügbar sind und als Speicher genutzt werden können. Des Weiteren werden die gefahrenen täglichen Wege nach deren Motiven „Arbeit“, „Ausbildung“, „Geschäftlich“, „Begleitung“, „Private Erledigungen“, „Einkaufen“ und „Freizeit“ unterteilt /Infas 2004/. Grundlegende Annahmen für die Simulation sind, dass sobald ein Auto zwischen zwei Wegen steht, es am Stromnetz angeschlossen ist.

Bei dieser Potenzialabschätzung wird demnach ein flächendeckendes Ladeversorgungsnetz vorausgesetzt. Die genaue Vorgehensweise der Simulation kann in /Hartmann et al. 2009/ nachgelesen werden. In Abbildung 5-4 ist der stündliche prozentuale Anteil der Fahrzeuge, die in Deutschland gleichzeitig unterwegs sind für eine durchschnittliche Woche dargestellt. Es ist zu sehen, dass gleichzeitig maximal 11 % der PKWs in Deutschland unterwegs sind. Der Kurvenverlauf verhält sich dabei an den Wochentagen ähnlich. In den Morgenstunden erfolgt ein starker Anstieg der Fahrzeuge, die unterwegs sind, bis um ca. 7 Uhr. Zwischen 7 und 13 Uhr schwankt der prozentuale Anteil um das Niveau von ca. 7 % und steigt dann am Nachmittag (bis 16 Uhr) auf das Tagesmaximum von ca. 11 % an. Nach diesem Tagesmaximum sinkt der Anteil der Fahrzeuge, die unterwegs sind, und fällt ab 21 Uhr unter 2 %. In den Morgenstunden wird ein großer Teil der Fahrten durch Pendler zurückgelegt.

Da vor allem die Anfangszeiten der Pendler stark korrelieren erfolgt ein Maximum der genutzten Fahrzeuge mit dem Motiv „Arbeit“ um 7 Uhr morgens. Die Fahrten zurück von der Arbeit verteilen sich über den Nachmittag und summieren sich deshalb nicht wie am Morgen.

Ein weiterer Großteil der Fahrten, vor allem am Nachmittag, wird mit den Motiven „Freizeit“ und „Einkaufen“ durchgeführt. An Samstagen wird das Maximum schon morgens um 10 Uhr erreicht, was auf den hohen Anteil der Einkaufsfahrten zurückzuführen ist. An

Sonntagen halbiert sich im Vergleich zu den Wochentagen die gleichzeitige Nutzung der Fahrzeuge. Der Hauptgrund für Fahrten am Sonntag ist das Motiv „Freizeit“.

Aus Abbildung 5-4 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist ein Potenzial der Elektromobilität für einen Beitrag zum Ausgleich der Nachfrageschwankung zwischen den Tages- und Nachtstunden zu erkennen, da die PKWs hauptsächlich während den Tagesstunden genutzt werden und in den Nachtstunden nicht mehr bewegt werden. Hieraus ergibt sich das Potenzial diese Fahrzeuge mit Nachtstrom zu betanken und dadurch zum einen die Betankung der Fahrzeuge zu Peakzeiten am Tag zu vermeiden und zum anderen Kraftwerke, die nachts durch die geringe Stromnachfrage in Teillast gefahren werden müssten, durch höhere Stromnachfrage zu entlasten (vgl. Kapitel 5.1.1). Außerdem ergibt sich durch die hohe Verfügbarkeit bei einer großen Durchdringung der Elektromobilität auch ein großes Potenzial zur Ausregelung fluktuierender erneuerbarer Energien, vor allem der möglichen Überschussleistung, die im Falle eines Ausbaus der erneuerbaren Energien bei größerer Stromerzeugung als Stromnachfrage auftritt.

Die Elektrofahrzeuge sind ständig zu einem Großteil (>89 %) verfügbar. Die theoretische Darstellung, dass der gesamte PKW-Bestand von 46,6 Mio. durch Elektrofahrzeuge ersetzt würde und bei Annahme einer bereitgestellten Leistung von 15 kW pro PKW /Kempton, Dhanju 2006/ (das heißt, dass jedes Fahrzeug eine Anschlussleistung von 15 kW aufweist), entsteht eine gesamte Anschlussleistung von rund 630 GW. Dies entspricht dem Achtfachen der maximalen Netzlast von etwa 80 GW, die gegenwärtig in Deutschland erreicht wird.

Wird zusätzlich eine Speicherkapazität von 15 kWh pro Fahrzeug unterstellt ergibt sich eine maximale Speicherkapazität von 630 GWh. In Realität wird allerdings bedingt durch verschiedene Faktoren, wie z. B. Nutzung der Fahrzeuge zum Fahren, die maximale Speicherkapazität nie erreicht. Würden allerdings 10 % der Batterien als Stromspeicher verwendet, so ergibt sich eine Speicherkapazität von 63 GWh für Deutschland, was die derzeit in Deutschland installierte Pumpspeicherkapazität von ca. 40 GWh deutlich übersteigt.

Im Folgenden wird exemplarisch eine Abschätzung für den Strombedarf der verschiedenen Fahrzeugnutzertypen aus Abbildung 5-4 abgeleitet. Hierzu werden erneut die in Kapitel 4.4 definierten Anwendungsfälle

- „Hausfrau/mann“
- „Pendler/In“
- „Geschäftsreisende(r)“

herangezogen. Diese Potenzialabschätzung wird nur für Wochentage im Jahr durchgeführt, da an Wochenenden einheitliche Nutzerprofile nur schwer zu erkennen sind. Der Fahrzeugbestand wird mit 46,6 Mio PKWs in Deutschland angesetzt. Der Stromverbrauch wird für Pendler/In mit 0,57 MJ/vkm, für Geschäftsreisende(r) mit 0,60 MJ/vkm und für das Anwendungsprofil „Hausfrau/mann“ mit 0,52 MJ/vkm angenommen (siehe Kapitel 4.3). In Deutschland werden 260 Arbeitstage (Tage im Jahr abzüglich der Wochenenden) angesetzt. Die erste Gruppe, Hausfrau/mann, fährt durchschnittlich 15 km am Tag und dies mit mehreren kurzen

Fahrten mit den Motiven „Begleitung“ und „Einkaufen“. Das Nutzerprofil Pendler/In beinhaltet die täglichen Fahrten zur Arbeitsstelle und Ausbildungsstätte und die Fahrten zurück nachhause. Hierfür wird eine durchschnittliche tägliche Distanz von 32 km herangezogen /Infas 2004/. Die Geschäftsreisende(r) legt täglich eine Distanz von 100 km zurück. Aus Abbildung 5-4 kann für die drei Nutzertypen das durchschnittliche stündliche PKW Aufkommen an Wochentagen in Deutschland ermittelt werden:

- 0,81 % „Hausfrau/mann“
- 1,45 % „Pendler/In“
- 0,074 % „Geschäftsreisende(r)“

Die drei Nutzertypen repräsentieren fast die Hälfte (ca. 45 %) der Fahrten, die an den Wochentagen durchgeführt werden. Die restlichen Fahrten mit den Motiven Freizeit und private Erledigungen, sowie die Fahrten an den Wochenenden werden hier nicht betrachtet. Insgesamt ergibt sich somit die Jahresstromverbrauch der verschiedenen Nutzertypen von:

- 5,1 TWh für „Hausfrau/mann“
- 21,4 TWh für „Pendler/In“
- 3,6 TWh für „Geschäftsreisende(r)“

Dies entspricht insgesamt einer Ladeenergie für die drei beispielhaften Nutzertypen an Wochentagen von ca. 30 TWh pro Jahr oder 5 % des jährlichen Nettostromverbrauchs.

Zusammenfassend folgt aus dieser Betrachtung, dass die Elektromobilität durch deren hohe Verfügbarkeit und deren Möglichkeit den Ladevorgang in den Nachtstunden durchzuführen das Potenzial bietet, einen Beitrag zur Reduzierung der täglichen Nachfrageschwankung zu leisten. Zusätzlich kann durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen ein Speicher entstehen, der die heute installierte Pumpspeicherleistung und –kapazität deutlich übersteigt. Hierdurch entsteht die Möglichkeit, dass An- und Abfahrvorgänge konventioneller Kraftwerke (durch die Verwendung der Speicher zur Sekundärregelung) reduziert und die Integration fluktuierender erneuerbarer Energieerzeugung in das Stromnetz verbessert werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene elektrische und hybrid-elektrische Antriebskonzepte zunächst technisch beschrieben und anschließend einer vergleichenden Bewertung bezüglich ihrer heutigen und zukünftigen Mobilitätskosten, Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen und CO₂-Vermeidungskosten im Vergleich zu konventionellen Referenzfahrzeugen unterzogen. Dabei wurden jeweils unterschiedliche Nutzerprofile und Fahrzeugklassen betrachtet.

Im Ergebnis erwies sich unabhängig vom Nutzerprofil keine der diskutierten Antriebsalternativen für den heutigen Zeitpunkt als wirtschaftlich gegenüber dem jeweiligen konventionellen Referenzfahrzeug. Sollte es jedoch gelingen, die bestehenden Kostenreduktionspotenziale bei Schlüsselkomponenten wie Batterie und Brennstoffzelle bis zum Jahr 2030 auszuschöpfen, könnten die Mobilitätskosten insbesondere in Nutzerprofilen mit hoher Jahresfahrleistung zukünftig die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit erreichen (Tabelle 6-1). Die dargestellten Mobilitätskosten hängen in hohem Maße von dem jeweils betrachteten Nutzerprofil, den Annahmen zur Entwicklung der Kraftstoffkosten für Benzin, Diesel, Strom und Wasserstoff sowie von der zukünftigen Besteuerung dieser Energieträger ab.

Tabelle 6-1: Vergleich der betrachteten Antriebsalternativen in der Mittelklasse im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung

	Investitionskosten [1000 EUR]	Mobilitätskostem [EURct/km]	WtT-Emissionen [g/km]	TtW-Emissionen [g/km]	WtW-Emissionen [g/km]	CO ₂ - Vermeidungskosten [EUR/t]
Referenzfahrzeug (Diesel)	20.5	18 - 59	21 - 25	110 - 130	130 - 155	-
Batterie-Elektrofahrzeug	25.4	19 - 68	42 - 50	0	42 - 50	138 - 804
Brennstoffzellen- Elektrofahrzeug	22.1	19 - 61	104 - 122	0	104 - 122	514 - 1744
Brennstoffzellen-Hybrid- Elektrofahrzeug	22.5	19 - 62	95 - 112	0	95 - 112	561 - 656
Voll-Hybridfahrzeug	21.3	19 - 61	18 - 20	104 - 120	122 - 140	1182 - 1684
Mild-Hybridfahrzeug	20.7	19 - 60	19 - 22	111 - 131	129 - 153	8815 - 11423
Plug-In-Hybridfahrzeug	23.0	18 - 62	29 - 36	18 - 54	53 - 83	131 - 321

Bei den Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen wiesen alle elektromobilen Antriebskonzepte schon für den heutigen Zeitpunkt niedrigere Werte auf als die jeweiligen Referenzfahrzeuge. Die zukünftigen Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen und damit auch die resultierenden CO₂-Vermeidungskosten gegenüber dem jeweiligen Referenzfahrzeug (Tabelle 6-1) hängen insbesondere bei Einsatz von Strom und Wasserstoff als Kraftstoff stark von den unterstellten Well-to-Tank-Emissionen in der Kraftstoffherstellung ab. Hier wäre daher eine vertiefende Analyse mit verschiedenen Szenarien zum zukünftigen Mix der eingesetzten Produktionspfade in der Strom- und Wasserstoffherstellung sinnvoll, um eine detailliertere Bewertung der einzelnen Antriebsvarianten vornehmen zu können. Dies könnte z.B. über die Weiterentwicklung und Anwendung bestehender Energiesystemmodelle erfolgen, in denen das gesamte

Energiesystem von der Primärenergiegewinnung bis hin zur Energiedienstleistung aber auch einzelne Sektoren, wie der Umwandlungssektor und die verschiedenen Nachfragesektoren technologisch detailliert abgebildet sind. Auf diese Weise ließe sich der mögliche Beitrag elektromobiler Antriebskonzepte im Hinblick auf die Erreichung von Klimaschutzziele analysieren und ökonomisch bewerten.

Den Abschluss der Studie bildete die Diskussion weiterer Fragestellungen, die sich im Zusammenhang mit einer Einführung elektromobiler Antriebe im PKW-Verkehr ergeben. So erfordert der Einsatz von Strom und Wasserstoff im PKW-Verkehr zunächst den Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur für Erzeugung, Transport und Verteilung dieser Kraftstoffe, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Des Weiteren wurde das mögliche Potenzial von Elektrofahrzeugen zur Lastregelung überschlägig diskutiert. So ließe sich durch eine gesteuerte Ladung der Elektrofahrzeuge grundsätzlich die Integration fluktuierender erneuerbarer Energieerzeugung in das Stromnetz verbessern. Bei Einsatz der elektromobilen Speicher zur Sekundärregelung bestünde zudem theoretisch die Möglichkeit, die Zahl der ineffizienten An- und Abfahrvorgänge bei konventionellen Kraftwerken zu verringern. Eine genauere Quantifizierung dieser Potenziale ist jedoch mit weiterem Forschungsbedarf verbunden. Als Grundlage für solche Untersuchungen könnte auch hier die Anwendung eines Gesamt-Energiesystemmodells dienen, mit dem Fragen wie der mögliche Beitrag von Elektrofahrzeugen zur Kompensation von Lastschwankungen fundierter beantwortet werden könnten. Zudem würden auch Aspekte wie die erforderlichen Investitionen in ein flächendeckendes Netz aus direktionalen bzw. bidirektionalen Ladestationen oder in Transformatoren zur Spannungsniveauehebung des zunächst ins Niederspannungsnetz rückgespeisten Batteriestroms in die Bewertung mit einfließen.

Insgesamt wäre ein systemanalytischer Ansatz geeignet, um eine umfassende Bewertung elektromobiler Antriebskonzepte nach technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten in direkter Konkurrenz zu anderen alternativen Versorgungskonzepten und unter Berücksichtigung verschiedener energiepolitischer Rahmenbedingungen vorzunehmen.

7 Literatur

/Agentur für Erneuerbare Energien 2009/

Agentur für Erneuerbare Energien: Erneuerbare Elektromobilität; <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/verkehr/detailansicht/article/185/dossier-erneuerbare-elektromobilitaet.html>; gefunden am 20.05.2009

/Anegawa 2008/

Anegawa, T. (2008); Development of the most suitable infrastructure for commuter electric vehicles; TEPCO R&D Center, October 1, 2008

/ATZelectronic 2009/

Automobil technische Zeitschrift electronic: Lithium-Ionen-Batterie-Entwicklungen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge; Ausgabe 02/2009

/BCG 2009/

Boston Consulting Group : The Comeback of the Electric Car?; 2009

/BDEW 2008/

BDEW (2008) ; Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; Technische Richtlinie – Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Juni 2008.

/Better Place 2009/

Better Place Company ; Dienstleistungsunternehmen für Elektrofahrzeuge;
Internet : <http://www.betterplace.com/>

/Bohr 2009/

Bohr B. (2009); Automobilzulieferer in herausfordernden Zeiten; 9. Internationales Stuttgarter Symposium "Automobil- und Motorentechnik", 24. – 25. März 2009, Stuttgart, Deutschland

/Braess et al. 2007/

Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 5. Auflage. Vieweg Verlag. Wiesbaden, 2007

/Brauner 2008/

Brauner, G. (2008); Infrastrukturen der Elektromobilität, In: Elektrotechnik und Informationstechnik, Heft 11.2008, S. 382-386.

Centurion 2009/

Centurion Wirelss Technologies Inc.: Battery Fundamentals;
http://www.centurion.com/home/pdf/wp_battery_fundamentals.pdf; gefunden am 30.05.2009

/Concawe 2007/

Concawe, EUCAR, JRC: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Tank-to-Wheels Report, Appendix 1, Version 2c, März 2007

/Concawe 2007a/

Concawe, EUCAR, JRC: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well-to-Tank Report, Version 2c, März 2007

/DIW 2003/

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: Tabellenband Mobilität in Deutschland – Basisstichprobe; Berlin 2003

/EIA 2006/

Energy Information Administration: Annual Energy Outlook 2006; USA, 2006

/Engel 2009/

Engel, R. (2009); Gratisauto mit Stromvertrag; In: Industriemagazin 2/2009 vom 5.2.2009; http://www.industriemagazin.at/index.php?id=imartikel&tx_ttnews%5Btt_news%5D=5323

/Engel 2005/

Engel, T. (2005); Das Elektrofahrzeug als Regelenergiekraftwerk des Solarzeitalters; Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS); Object Farm Solarkonzepte

/Fetzer 2009/

Dr. Joachim Fetzer: Lithium-Ionen-Batterien – Herausforderungen und Meilensteine bei der Entwicklung für automobiler Anwendungen; Vortrag zum 59. Internationalen Motorpressekolloquium; Boxberg, Juni 2009

/Flosdorff, Hilgarth 2000/

Flosdorff, R.; Hilgarth, G. (2000); Elektrische Energieverteilung, 7. Auflage; Teubner Verlag 2000

/Groiß 2000/

Groiß, R. (2000); Schnellladung und Pulsladung von Bleibatterien; Dissertation an der Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Ulm

/Graham 2001/

Graham, R.: Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options; USA, 2001

/Gulde 2009/

Gulde, D. (2009); Artikel: Eco Drive Elektro-Infrastruktur – “Seid Netz zueinander“; In: Auto Motor und Sport 8/2009; S. 86 – 88

/Gül 2008/

Gül, T. (2008); An Energy-economic Scenario Analysis of Alternative Fuels for Transport; ETH Zürich, Doktorarbeit

/Hartmann et al. 2009/

Hartmann, N.; Özdemir, D.; Goyns, P.H.; Eltrop, L. (2009); Modelling the plug-in availability and calculations of energy storage potential of electric vehicles in Germany; EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norwegen

/Heinemann 2006/

Heinemann, D.: Strukturen von Batterie- und Energiemanagement-systemen mit Bleibatterien und Ultracaps. Dissertation. Berlin, 2006

/Herz 2009/

Herz, C. (2009); Better Place, "Visionär Agassi schielt auf deutschen Automarkt", In: Handelsblatt, vom 27.01.2009

/Heuck, Dettmann 2005/

Heuck, K.; Dettmann, K.-D. (2005); Elektrische Energieversorgung – Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, für Studium und Praxis, 6. Auflage; Vieweg Verlag 2005

/Hildebrandt 2009/

Hildebrandt E. (2009): Analyse der möglichen Technologien für die Umsetzung von vehicle-to-grid (V2G) Konzepten; Diplomarbeit

/Hybrid-Autos 2009/

<http://www.hybrid-autos.info/>, gefunden am 12.02.2009

/Infas 2004/

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (Infas) und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW); Mobilität in Deutschland 2002; Ergebnisbericht

/IPTS 2005/

IPTS: Hybrids for Road Transport. IPTS/IE, 2005

/IEA 2005/

International Energy Agency: Prospects for Hydrogen and Fuel Cells. IEA. Paris, 2005

/IEA 2007/

International Energy Agency: Status Overview of Hybrid and Electric Vehicle Technology; Paris, 2007

/IEA 2008/

International Energy Agency: Energy Technology Perspectives; Paris, 2008

/Jakubek, Schweiger 2008/

Dr. Stefan Jakubek, Dr. Mario Schweiger: Die Roadmap zum Elektroauto;
[http://www.eva.ac.at/\(de\)/publ/pdf/EGS_AVL_20081007.pdf](http://www.eva.ac.at/(de)/publ/pdf/EGS_AVL_20081007.pdf); gefunden am 01.07.2009

/Joseph et al. 2006/

A. Joseph and M. Shahidehpour: Battery Storage Systems in Electric Power Systems; Proceedings of the 2006 IEEE General Meeting; Montreal, June 2006

/Kempton, Dhanju 2006/

Kempton, W.; Dhanju, A. (2006); Electric Vehicles with V2G, Storage for Large-Scale Wind Power; In: Windtech International Magazine 2006; Groningen, Niederlande

/Krüger 2002/

Krüger, R.: Systemanalytischer Vergleich alternativer Kraftstoff- und Antriebskonzepte in der Bundesrepublik Deutschland. VDI Verlag, 2002

/Lee et al. 1994/

Lee, R. ; Bittihn, R. ; Wöffler, F. ; Wittke, K.-H. ; Wildhagen, K. (1994); Patent: DE 9305524: "Wechselstation für mit austauschbaren Akkumulatoren ausgerüstete Elektrostraßenfahrzeuge"; Europäisches Patentamt

/Leitinger, Brauner 2008/

Leitinger, C. ; Brauner, G. (2008); Nachhaltige Energiebereitstellung für elektrische Mobilität; In: Elektrotechnik und Informationstechnik, Heft 11.2008, S. 382-386

/Mc Kinsey 2006/

McKinsey & Company: Drive - The Future of Automotive Power 2006

/Mc Kinsey 2007/

McKinsey & Company: Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, Studie im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“, 2007

/Mench 2008/

Mench, M. M. (2008); Fuel Cell Engines, Wiley & Sons

/Metzger, Blank 2009/

Metzger, T. ; Blank, T. (2009); Projekt: Elektrostraßenfahrzeuge – Szenarien zur künftigen Nutzung und Synthese von Gesamtlastkurven

/Mitsubishi 2009/

Mitsubishi Motors (2009); Mitsubishi Press Release No. 3/2009: Mitsubishi i MiEV mit Elektro-Antrieb. Start der Flottentests in der Schweiz.

/Mittnacht 2009/

Antriebskomponenten Batterietechnik Mittnacht: Preisliste für elektrische Antriebskomponenten, Stand Januar 2009; <http://www.jmittnacht.homepage.t-online.de/shop/Preise.pdf>; gefunden am 03.05.2009

/Mock, Schmid 2008/

Mock, P. ; Schmid, S. (2008); Brennstoffzellen- und Hybridfahrzeuge – Kurzfristiger Hype oder langfristiger Trend? ; 6. VDI Tagung, Innovative Fahrzeugantriebe, 06 – 07.11.2009, Dresden

/Naunin 2007/

Dietrich Naunin: Hybrid-, Batterie und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge 2007; Expert Verlag 2007

/NREL 2009/

National Renewable Energy Laboratory (NREL):
<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/batteries.html>, gefunden am 18.02.09

/NREL 2005/

National Renewable Energy Laboratory (NREL); Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation, NREL/SR-560-39104

/Oertel 2008/

Oertel, D. (2008); Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag (TAB) Energiespeicher – Stand und Perspektiven; Sachstandbericht zum Monitoring “Nachhaltige Energieversorgung“

/Ragwitz et al. 2003/

Ragwitz, M.; Wietschel, M.; Hasenauer, U.; Fakolade, O.: Introduction of alternative transport fuels in the European Energy Market: Techno-economic barriers and perspectives. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Karlsruhe, 2003

/Sauer 2007/

Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer: Energiespeicher in Fahrzeugen; Vortrag im Rahmen der Hannovermesse 2007

/Schumann 2009/

Schumann, R. (2009); Im Artikel: Better Place, “Visionär Agassi schielt auf deutschen Automarkt“ , in: Handelsblatt, vom 27.01.2009

/Schuster 2009/

Andreas Schuster: Eigenschaften heutiger Batterie- u. Wasserstoffspeichersysteme für eine nachhaltige elektrische Mobilität, IEWT 2009

/Stan 2005/

Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2005

/Staschus, Woyke 2008/

Staschus, K. ; Woyke, W. (2008); Plug-In Elektrofahrzeuge – Voraussetzungen und Konsequenzen für Verteilungsnetze; VDE Kongress 2008, München; Zukunftstechnologien: Innovationen-Märkte-Nachwuchs

/TAB 2006/

Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB): Perspektiven eines CO₂ und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick. Berlin, 2006

/TNO 2006/

TNO, IEEP, LAT: Review and Analysis of the Reduction Potential and Costs of technological and other Measures to reduce CO₂-Emissions from Passenger Cars; Niederlande, 2006

/UBA 2009/

Umweltbundesamt: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2007; April 2009

/UCTE 2009/

Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity UCTE (2009);

Internet: http://www.ucte.org/statistics/consumption/e_default.asp (Stand: 04.05.2009)

/UDEL 2009/

University of Delaware (2009); Internet: <http://www.udel.edu/V2G/>

/Ursin, Höckel 2008/

Ursin, M.; Höckel, M. (2008); Fahren mit Strom; Fachbeitrag im Bulletin SEV/VES 1/2008 (Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE); S. 24 – 26

/VDA 2009/

VDA (2009); Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen, Fahren mit Strom; <http://www.dat.de/leitfaden/LeitfadenCO2.pdf>

/WBSD 2009/

World Business Council for Sustainable Development : The Lithium Boom is coming : The new Bubble ?; <https://www.wbcsd.org/plugins/DocSearch/details.asp?MenuId=MTY5&ClickMenu=LeftMenu&doOpen=1&type=DocDet&ObjectId=MzQ1MjE>; gefunden am 01.07.2009

/Wikimedia 2009/

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema-Brennstoffzelle.svg>, gefunden am 06.02.2009

/Winter 2008/

Martin Winter: Overview over Lithium Ion Battery Technology; IRES, 2008

/WindEnergy Study 2008/

WindEnergy Study 2008: Assessment of the wind energy market until 2017; HUSUM WindEnergy – The Leading Wind Energy Trade Fair; 9–13 Sept. 2008; Husum, Germany

/Wuppertal Institut 2006/

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien; Wuppertal 2006

8 Anhang

8.1 Anteile einzelner Komponenten an der Gesamt-Investitionskosten der verschiedenen Antriebsalternativen

Kleinstwagen heute

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	EUR	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
ICE	EUR	1350	0	0	0	1350	1350	810
Getriebe	EUR	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	EUR	125	0	0	0	125	125	125
H2-Speicher	EUR	0	0	555	505	0	0	0
E-Motor	EUR	0	833	833	833	555	167	833
E-Motorsteuerung	EUR	0	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Batterie	EUR	0	6420	0	1000	1000	600	3840
Brennstoffzelle	EUR	0	0	16650	16650	0	0	0
DC/DC-Wandler	EUR	0	300	300	300	300	300	300
AC/DC-Wandler	EUR	0	410	0	0	0	0	410
Gesamtkosten	EUR	9475	16983	27358	28307	12350	11562	15338

Mittelklassewagen heute

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	EUR	16165	16165	16165	16165	16165	16165	16165
ICE	EUR	3930	0	0	0	2250	2250	1350
Getriebe	EUR	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	EUR	125	0	0	0	125	125	125
H2-Speicher	EUR	0	0	1688	1535	0	0	0
E-Motor	EUR	0	1388	1388	1388	925	278	1388
E-Motorsteuerung	EUR	0	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Batterie	EUR	0	21840	0	1300	1300	900	7836
Brennstoffzelle	EUR	0	0	27750	27750	0	0	0
DC/DC-Wandler	EUR	0	300	300	300	300	300	300
AC/DC-Wandler	EUR	0	410	0	0	0	0	410
Gesamtkosten	EUR	20220	41123	48311	49457	22085	21038	28594

Kleinstwagen im Jahr 2030

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	EUR	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
ICE	EUR	1730	0	0	0	1514	1514	908
Getriebe	EUR	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	EUR	125	0	0	0	125	125	125
H2-Speicher	EUR	0	0	209	190	0	0	0
E-Motor	EUR	0	540	540	540	360	108	540
E-Motorsteuerung	EUR	0	310	310	310	310	310	310
Batterie	EUR	0	2140	0	400	400	240	1280
Brennstoffzelle	EUR	0	0	2250	2250	0	0	0
DC/DC-Wandler	EUR	0	300	300	300	300	300	300
AC/DC-Wandler	EUR	0	410	0	0	0	0	410
Gesamtkosten	EUR	9855	11700	11609	11990	11009	10597	11873

Mittelklassewagen im Jahr 2030

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	EUR	16165	16165	16165	16165	16165	16165	16165
ICE	EUR	4230	0	0	0	3230	3230	2153
Getriebe	EUR	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	EUR	125	0	0	0	125	125	125
H2-Speicher	EUR	0	0	634	577	0	0	0
E-Motor	EUR	0	900	900	900	600	180	900
E-Motorsteuerung	EUR	0	310	310	310	310	310	310
Batterie	EUR	0	7280	0	520	520	360	2612
Brennstoffzelle	EUR	0	0	3750	3750	0	0	0
DC/DC-Wandler	EUR	0	300	300	300	300	300	300
AC/DC-Wandler	EUR	0	410	0	0	0	0	410
Gesamtkosten	EUR	20520	25365	22059	22522	21250	20670	22975

8.2 Anteile einzelner Komponenten an der Gesamt-Fahrzeugmasse bei den verschiedenen Antriebsalternativen

Kleinstwagen heute

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	kg	636	636	636	636	636	636	636
ICE	kg	99	0	0	0	99	99	60
Getriebe	kg	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	kg	15	0	0	0	15	15	15
H2-Speicher	kg	0	0	32	29	0	0	0
E-Motor	kg	0	45	32	32	21	6	32
E-Motorsteuerung	kg	0	14	14	14	14	14	14
Batterie	kg	0	76	0	14	14	9	46
Brennstoffzelle	kg	0	0	96	96	0	0	0
DC/DC-Wandler	kg	0	2	2	2	2	2	2
AC/DC-Wandler	kg	0	2	0	0	0	0	2
Gesamtmasse	kg	750	775	811	823	802	781	806

Mittelklassewagen heute

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	kg	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038
ICE	kg	198	0	0	0	166	166	99
Getriebe	kg	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	kg	15	0	0	0	15	15	15
H2-Speicher	kg	0	0	97	89	0	0	0
E-Motor	kg	0	75	53	53	36	11	54
E-Motorsteuerung	kg	0	14	14	14	14	14	14
Batterie	kg	0	260	0	19	19	13	93
Brennstoffzelle	kg	0	0	160	160	0	0	0
DC/DC-Wandler	kg	0	2	2	2	2	2	2
AC/DC-Wandler	kg	0	2	0	0	0	0	2
Gesamtmasse	kg	1251	1391	1364	1374	1289	1258	1317

Kleinstwagen im Jahr 2030

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	kg	636	636	636	636	636	636	636
ICE	kg	99	0	0	0	99	99	60
Getriebe	kg	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	kg	15	0	0	0	15	15	15
H2-Speicher	kg	0	0	32	29	0	0	0
E-Motor	kg	0	45	32	32	21	6	32
E-Motorsteuerung	kg	0	14	14	14	14	14	14
Batterie	kg	0	54	0	8	8	5	32
Brennstoffzelle	kg	0	0	69	69	0	0	0
DC/DC-Wandler	kg	0	2	2	2	2	2	2
AC/DC-Wandler	kg	0	2	0	0	0	0	2
Gesamtmasse	kg	750	752	785	790	796	777	792

Mittelklassewagen im Jahr 2030

	Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Karosserie	kg	1038	1038	1038	1038	1038	1038	1038
ICE	kg	198	0	0	0	166	166	99
Getriebe	kg	0	0	0	0	0	0	0
Benzin-/Dieseltank	kg	15	0	0	0	15	15	15
H2-Speicher	kg	0	0	97	89	0	0	0
E-Motor	kg	0	75	53	53	36	11	54
E-Motorsteuerung	kg	0	14	14	14	14	14	14
Batterie	kg	0	182	0	11	11	8	65
Brennstoffzelle	kg	0	0	115	115	0	0	0
DC/DC-Wandler	kg	0	2	2	2	2	2	2
AC/DC-Wandler	kg	0	2	0	0	0	0	2
Gesamtmasse	kg	1251	1313	1320	1322	1281	1253	1289

8.3 Derzeitige und zukünftige Mobilitätskosten der verschiedenen Antriebsalternativen

Heutige Mobilitätskosten Kleinwagen [ct/km]

		Referenzfahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Investitionskosten	16.18	29.00	46.71	48.34	21.09	19.74	26.19
	Wartung	3.16	5.66	9.12	9.44	4.12	3.85	5.11
	Steuer und Vers.	4.74	8.49	13.68	14.15	6.18	5.78	7.67
	Kraftstoffkosten	2.38	1.85	2.64	2.40	1.77	1.97	1.74
	Kraftstoffsteuer	4.96	1.55	2.48	2.26	3.70	4.12	1.74
	Gesamt	31.41	46.56	74.63	76.58	36.85	35.47	42.45
Pendler	Investitionskosten	8.09	14.50	23.36	24.17	10.54	9.87	13.09
	Wartung	1.58	2.83	4.56	4.72	2.06	1.93	2.56
	Steuer und Vers.	2.37	4.25	6.84	7.08	3.09	2.89	3.83
	Kraftstoffkosten	2.13	2.05	2.92	2.66	1.67	1.82	1.94
	Kraftstoffsteuer	4.44	1.72	2.75	2.50	3.48	3.80	1.94
	Gesamt	18.61	25.35	40.43	41.12	20.84	20.31	23.37
Geschäftsreisender	Investitionskosten	3.73	6.69	10.78	11.15	4.87	4.56	6.04
	Wartung	0.73	1.31	2.10	2.18	0.95	0.89	1.18
	Steuer und Vers.	1.09	1.96	3.16	3.27	1.43	1.33	1.77
	Kraftstoffkosten	2.00	2.16	3.08	2.80	1.61	1.74	1.82
	Kraftstoffsteuer	4.17	1.81	2.90	2.63	3.37	3.63	1.82
	Gesamt	11.72	13.93	22.01	22.03	12.23	12.16	12.63

Heutige Mobilitätskosten Mittelklassewagen [ct/km]

		Referenzfahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Investitionskosten	34.53	70.22	82.49	84.45	37.71	35.92	48.83
	Wartung	6.74	13.71	16.10	16.49	7.36	7.01	9.53
	Steuer und Vers.	10.11	20.56	24.16	24.73	11.04	10.52	14.30
	Kraftstoffkosten	2.80	2.36	3.00	2.73	2.52	2.76	2.21
	Kraftstoffsteuer	4.36	1.98	2.83	2.57	5.26	5.75	2.21
	Gesamt	58.54	108.82	128.58	130.97	63.89	61.96	77.08
Pendler	Investitionskosten	17.26	35.11	41.25	42.23	18.86	17.96	24.41
	Wartung	3.37	6.85	8.05	8.24	3.68	3.51	4.77
	Steuer und Vers.	5.06	10.28	12.08	12.36	5.52	5.26	7.15
	Kraftstoffkosten	2.52	2.62	3.33	3.03	2.30	2.48	2.48
	Kraftstoffsteuer	3.91	2.19	3.14	2.85	4.80	5.18	2.48
	Gesamt	32.12	57.06	67.85	68.72	35.16	34.39	41.28
Geschäftsreisender	Investitionskosten	7.97	16.20	19.04	19.49	8.70	8.29	11.27
	Wartung	1.56	3.16	3.72	3.80	1.70	1.62	2.20
	Steuer und Vers.	2.33	4.74	5.57	5.71	2.55	2.43	3.30
	Kraftstoffkosten	2.36	2.76	3.51	3.19	2.18	2.34	2.32
	Kraftstoffsteuer	3.67	2.31	3.31	3.01	4.56	4.87	2.32
	Gesamt	17.89	29.18	35.15	35.20	19.69	19.54	21.41

Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung[ct/km]

		Referenzfahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Investitionskosten	16.83	19.98	19.82	20.47	18.80	18.09	20.27
	Wartung	3.29	3.90	3.87	4.00	3.67	3.53	3.96
	Steuer und Vers.	4.93	5.85	5.80	5.99	5.50	5.30	5.94
	Kraftstoffkosten	2.26	1.49	2.33	2.13	1.80	1.99	1.45
	Kraftstoffsteuer	3.93	1.03	2.12	1.94	3.12	3.46	1.32
	Gesamt	31.23	32.25	33.95	34.54	32.89	32.37	32.93
Pendler	Investitionskosten	8.41	9.99	9.91	10.24	9.40	9.05	10.14
	Wartung	1.64	1.95	1.93	2.00	1.83	1.77	1.98
	Steuer und Vers.	2.46	2.93	2.90	3.00	2.75	2.65	2.97
	Kraftstoffkosten	2.03	1.65	2.59	2.37	1.69	1.84	1.61
	Kraftstoffsteuer	3.52	1.14	2.35	2.15	2.93	3.19	1.42
	Gesamt	18.07	17.66	19.68	19.75	18.61	18.49	18.11
Geschäftsreisender	Investitionskosten	3.88	4.61	4.57	4.72	4.34	4.18	4.68
	Wartung	0.76	0.90	0.89	0.92	0.85	0.82	0.91
	Steuer und Vers.	1.14	1.35	1.34	1.38	1.27	1.22	1.37
	Kraftstoffkosten	1.90	1.74	2.72	2.49	1.63	1.75	1.60
	Kraftstoffsteuer	3.30	1.20	2.47	2.26	2.83	3.04	2.06
	Gesamt	10.98	9.80	12.00	11.78	10.92	11.01	10.62

Mobilitätskosten Mittelklassewagen im Jahr 2030 bei moderater Ölpreisentwicklung[ct/km]

		Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Investitionskosten	35.04	43.31	37.67	38.46	36.29	35.30	39.23
	Wartung	6.84	8.46	7.35	7.51	7.08	6.89	7.66
	Steuer und Vers.	10.26	12.68	11.03	11.26	10.63	10.34	11.49
	Kraftstoffkosten	2.92	1.90	2.71	2.48	2.58	2.81	1.84
	Kraftstoffsteuer	3.58	1.31	2.47	2.26	4.48	4.88	1.67
	Gesamt	58.64	67.66	61.23	61.96	61.05	60.21	61.89
Pendler	Investitionskosten	17.52	21.66	18.83	19.23	18.14	17.65	19.62
	Wartung	3.42	4.23	3.68	3.75	3.54	3.45	3.83
	Steuer und Vers.	5.13	6.34	5.51	5.63	5.31	5.17	5.74
	Kraftstoffkosten	2.63	2.11	3.01	2.76	2.35	2.53	2.05
	Kraftstoffsteuer	3.21	1.46	2.74	2.51	4.09	4.39	1.81
	Gesamt	31.91	35.79	33.78	33.87	33.44	33.18	33.05
Geschäfts-reisender	Investitionskosten	8.09	10.00	8.69	8.87	8.37	8.15	9.05
	Wartung	1.58	1.95	1.70	1.73	1.63	1.59	1.77
	Steuer und Vers.	2.37	2.93	2.55	2.60	2.45	2.39	2.65
	Kraftstoffkosten	2.47	2.22	3.17	2.90	2.23	2.38	2.05
	Kraftstoffsteuer	3.02	1.54	2.88	2.64	3.88	4.13	2.62
	Gesamt	17.52	18.63	18.99	18.75	18.57	18.63	18.14

Mobilitätskosten Kleinwagen im Jahr 2030 bei hohem Ölpreis [ct/km]

		Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Investitionskosten	16.83	19.98	19.82	20.47	18.80	18.09	20.27
	Wartung	3.29	3.90	3.87	4.00	3.67	3.53	3.96
	Steuer und Vers.	4.93	5.85	5.80	5.99	5.50	5.30	5.94
	Kraftstoffkosten	2.78	1.53	2.51	2.30	2.21	2.45	1.55
	Kraftstoffsteuer	4.03	1.04	2.18	1.99	3.20	3.54	1.33
	Gesamt	31.85	32.30	34.19	34.76	33.39	32.92	33.05
Pendler	Investitionskosten	8.41	9.99	9.91	10.24	9.40	9.05	10.14
	Wartung	1.64	1.95	1.93	2.00	1.83	1.77	1.98
	Steuer und Vers.	2.46	2.93	2.90	3.00	2.75	2.65	2.97
	Kraftstoffkosten	2.49	1.70	2.78	2.55	2.08	2.26	1.71
	Kraftstoffsteuer	3.61	1.15	2.41	2.21	3.01	3.27	1.44
	Gesamt	18.62	17.72	19.95	19.99	19.07	18.99	18.24
Geschäfts-reisender	Investitionskosten	3.88	4.61	4.57	4.72	4.34	4.18	4.68
	Wartung	0.76	0.90	0.89	0.92	0.85	0.82	0.91
	Steuer und Vers.	1.14	1.35	1.34	1.38	1.27	1.22	1.37
	Kraftstoffkosten	2.34	1.79	2.93	2.68	2.01	2.16	1.83
	Kraftstoffsteuer	3.38	1.21	2.54	2.33	2.90	3.12	2.10
	Gesamt	11.50	9.86	12.28	12.04	11.37	11.49	10.89

Mobilitätskosten Mittelklassewagen im Jahr 2030 bei hohem Ölpreis [ct/km]

		Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Investitionskosten	35.04	43.31	37.67	38.46	36.29	35.30	39.23
	Wartung	6.84	8.46	7.35	7.51	7.08	6.89	7.66
	Steuer und Vers.	10.26	12.68	11.03	11.26	10.63	10.34	11.49
	Kraftstoffkosten	3.49	1.95	2.92	2.67	3.17	3.46	1.97
	Kraftstoffsteuer	3.69	1.32	2.53	2.32	4.59	5.00	1.70
	Gesamt	59.32	67.73	61.51	62.22	61.76	60.98	62.05
Pendler	Investitionskosten	17.52	21.66	18.83	19.23	18.14	17.65	19.62
	Wartung	3.42	4.23	3.68	3.75	3.54	3.45	3.83
	Steuer und Vers.	5.13	6.34	5.51	5.63	5.31	5.17	5.74
	Kraftstoffkosten	3.14	2.17	3.24	2.97	2.90	3.11	2.19
	Kraftstoffsteuer	3.31	1.47	2.81	2.57	4.19	4.50	1.84
	Gesamt	32.52	35.86	34.08	34.16	34.09	33.88	33.21
Geschäfts-reisender	Investitionskosten	8.09	10.00	8.69	8.87	8.37	8.15	9.05
	Wartung	1.58	1.95	1.70	1.73	1.63	1.59	1.77
	Steuer und Vers.	2.37	2.93	2.55	2.60	2.45	2.39	2.65
	Kraftstoffkosten	2.94	2.28	3.42	3.13	2.75	2.93	2.34
	Kraftstoffsteuer	3.11	1.55	2.96	2.71	3.98	4.24	2.68
	Gesamt	18.09	18.71	19.32	19.05	19.18	19.28	18.49

8.4 Derzeitige und zukünftige Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen der verschiedenen Antriebsalternativen

Kleinstwagen heute

		Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Well-to-Tank	g/km	23	90	108	98	17	19	72
	Tank-to-Wheel	g/km	135	0	0	0	101	112	18
Pendler	Well-to-Tank	g/km	21	100	120	109	16	18	82
	Tank-to-Wheel	g/km	121	0	0	0	95	104	18
Geschäftsreisender	Well-to-Tank	g/km	19	105	126	115	16	17	51
	Tank-to-Wheel	g/km	114	0	0	0	92	99	54

Mittelklassewagen heute

		Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Well-to-Tank	g/km	31	114	123	112	25	27	92
	Tank-to-Wheel	g/km	164	0	0	0	144	157	23
Pendler	Well-to-Tank	g/km	28	127	137	124	22	24	105
	Tank-to-Wheel	g/km	148	0	0	0	131	141	22
Geschäftsreisender	Well-to-Tank	g/km	26	134	144	131	21	23	65
	Tank-to-Wheel	g/km	139	0	0	0	124	133	69

Kleinstwagen im Jahr 2030

		Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Well-to-Tank	g/km	18	33	90	82	14	16	28
	Tank-to-Wheel	g/km	105	0	0	0	84	93	14
Pendler	Well-to-Tank	g/km	16	37	99	91	13	15	32
	Tank-to-Wheel	g/km	94	0	0	0	79	85	14
Geschäftsreisender	Well-to-Tank	g/km	15	39	105	96	13	14	23
	Tank-to-Wheel	g/km	88	0	0	0	76	81	42

Mittelklassewagen im Jahr 2030

		Einheit	Referenz-fahrzeug	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	Well-to-Tank	g/km	25	42	104	95	20	22	36
	Tank-to-Wheel	g/km	130	0	0	0	120	131	18
Pendler	Well-to-Tank	g/km	22	47	116	106	19	20	40
	Tank-to-Wheel	g/km	117	0	0	0	109	118	17
Geschäftsreisender	Well-to-Tank	g/km	21	50	122	112	18	19	29
	Tank-to-Wheel	g/km	110	0	0	0	104	111	54

8.5 Derzeitige und zukünftige CO₂-Vermeidungskosten der verschiedenen Antriebsalternativen

Kleinstwagen heute

	Einheit	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	EUR/t	2520	8455	7413	1543	1693	1941
Pendler	EUR/t	2080	9845	6882	962	1061	1602
Geschäftsreisender	EUR/t	1508	15092	5957	468	523	1094

Mittelklassewagen heute

	Einheit	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	EUR/t	6063	9220	8281	1510	1633	2387
Pendler	EUR/t	5126	8739	6838	905	936	2048
Geschäftsreisender	EUR/t	3810	7849	4933	439	459	1502

Kleinstwagen im Jahr 2030

	Einheit	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	EUR/t	403	1270	1207	906	1014	491
Pendler	EUR/t	248	2433	1489	565	666	305
Geschäftsreisender	EUR/t	132	-	2305	249	323	210

Mittelklassewagen im Jahr 2030

	Einheit	BEV	FCEV	FCHEV	HEV(Full)	HEV(Mild)	PHEV
Hausfrau/mann	EUR/t	934	684	728	970	1360	469
Pendler	EUR/t	570	957	761	550	649	289
Geschäftsreisender	EUR/t	298	1832	816	187	-47	194