

ALTERNATIVE ANTRIEBSKONZEPTE

bei sich wandelnden Mobilitätsstilen

Tagungsbeiträge vom

08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe

Jochem / Poganietz / Grunwald / Fichtner (Hrsg.)



Scientific
Publishing

Patrick Jochem, Witold-Roger Pogonietz,
Armin Grunwald und Wolf Fichtner (Hrsg.)

**Alternative Antriebskonzepte bei
sich wandelnden Mobilitätsstilen**

Tagungsbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe

Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen

Tagungsbeiträge

vom 08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe

von

Patrick Jochem, Witold-Roger Pogonietz,
Armin Grunwald und Wolf Fichtner (Hrsg.)

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2013
Print on Demand

ISBN 978-3-86644-944-2

Danksagung

Die Herausgeber möchten sich an dieser Stelle bei Frau Monika Zimmer für die Unterstützung bei der Durchführung des Workshops in Karlsruhe bedanken. Ebenfalls gilt Herrn Christian Will großer Dank; er hat mit großem Fleiß zur Verbesserung der Inhalte sowie zum Layout aller Beiträge beigetragen.

Karlsruhe,
im Oktober 2012

Patrick Jochem, Witold-Roger Poganietz,
Armin Grunwald und Wolf Fichtner

Inhaltsverzeichnis

Prolog	1
1. Zukunftsperspektive individuelle Mobilität – Anforderungen, Erwartungen und Bedürfnisse	
<i>Barbara Lenz</i>	13
<i>1.1 Einleitung</i>	13
<i>1.2 Wachstum oder Stagnation der Mobilitätsnachfrage?</i>	14
<i>1.3 Wachsende Mobilität bei den Seniorinnen und Senioren</i>	16
<i>1.4 Auto-Mobilität als Ausdruck von lifestyle</i>	20
1.4.1 Das Auto in Konkurrenz mit Handy und Internet.....	20
1.4.2 Nutzen statt besitzen.....	23
1.4.3 Multimodalität	25
<i>1.5 „Umweltschutz“ und Auto</i>	27
<i>1.6 Fazit</i>	29
<i>Literaturverzeichnis</i>	31
2. Die Zukunft biogener Kraftstoffe	
<i>Daniela Trän, Karin Naumann und Arne Gröngroft</i>	35
<i>2.1 Einleitung</i>	35
<i>2.2 Zielvorgaben und Stand der Nutzung</i>	35
<i>2.3 Technologien für die Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen</i>	38
<i>2.4 Aktuelle F&E Schwerpunkte für zuverlässige und nachhaltige Kraftstoffe</i>	43
<i>2.5 Rolle der Biokraftstoffe in einer weitgehend regenerativen Energieversorgung</i>	47
<i>2.6 Schlussfolgerungen</i>	48
<i>Literaturverzeichnis</i>	49

3. Vergleich alternativer Antriebstechnologien Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug	
<i>Julia Michaelis, Patrick Plötz, Till Gnann und Martin Wietschel... 51</i>	
3.1 Einleitung	<i>51</i>
3.2 Ökologische Aspekte	<i>53</i>
3.2.1 Ökologische Bewertung auf Basis einer Well-to-Wheel Analyse	<i>53</i>
3.2.2 Abhängigkeit der Klimabilanz von der Fahrleistung	<i>57</i>
3.3 Infrastruktur	<i>59</i>
3.3.1 Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge	<i>59</i>
3.3.2 Ladeinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge	<i>62</i>
3.3.3 Vergleich der notwendigen Ladeinfrastruktur	<i>63</i>
3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	<i>67</i>
3.4.1 Methodik	<i>68</i>
3.4.2 Zeitliche Entwicklung der Wirtschaftlichkeit	<i>69</i>
3.4.3 Diskussion der Wirtschaftlichkeit	<i>72</i>
3.5 Zusammenfassung und Fazit	<i>73</i>
<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>75</i>
4. Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven – Die Sicht der Automobilindustrie	
<i>Stefan Pfahl</i>	<i>81</i>
4.1 Einführung	<i>81</i>
4.2 Exkurs: Ansätze Mercedes-Benz und smart	<i>85</i>
4.3 Methode	<i>86</i>
4.3.1 Technische Performance	<i>88</i>
4.3.2 TCO-Modell	<i>90</i>
4.3.3 Marktmodell	<i>96</i>
4.3.4 Angebot und Infrastruktur	<i>99</i>
4.4 Ergebnisse	<i>101</i>
4.5 Fazit: Ergebnis und Ausblick	<i>103</i>
<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>106</i>

5. Das relevante System zur Bewertung von Antriebskonzepten	
<i>Jens Buchgeister</i>	109
5.1 Einleitung	109
5.2 Bedeutung der Systemgrenzen	111
5.3 Beitrag alternativer Antriebe zur Kopplung des Energie- und Verkehrssystems.....	117
5.4 Zusammenfassung.....	119
Literaturverzeichnis.....	119
6. Umweltwirkungen alternativer Antriebe	
<i>Hinrich Helms, Julius Jöhrens und Udo Lambrecht</i>	123
6.1 Einleitung	123
6.2 Der Lebensweg von Elektrofahrzeugen	124
6.2.1 Fahrzeug- und Batterieherstellung.....	126
6.2.2 Fahrzeugkonzepte und ihre Nutzung	128
6.2.3 Strombereitstellung für Elektrofahrzeuge.....	130
6.3 Treibhausgasbilanz über den gesamten Lebensweg	132
6.3.1 Die heutige Situation	133
6.3.2 Szenario 2030	137
6.4 Energieeffizienz alternativer Antriebskonzepte	138
6.5 Fazit.....	142
Literaturverzeichnis.....	144
7. Reduktionspotenziale bei Pkw	
<i>Michael Krail</i>	147
7.1 Einleitung	147
7.2 Technische CO ₂ -Reduktionspotenziale bei Pkw	149
7.3 Modellierung der Antriebstechnologiewahl	152
7.4 Simulation von Szenarien	157
7.5 Fazit.....	162
Literaturverzeichnis.....	163

8. Mobility 2.0: Antriebskonzepte im Zusammenspiel mit multimodaler Mobilität	
<i>Patrick Jochem und Jens Schippel</i>	165
8.1 <i>Einleitung</i>	165
8.2 <i>Die Entwicklung der Antriebskonzepte im motorisierten Individualverkehr</i>	167
8.3 <i>Mobilitätsstilentwicklung in Deutschland auf Grund des technologischen Fortschritts</i>	171
8.4 <i>Multimodale Mobilität als Lösung der heutigen Herausforderungen im motorisierten Individualverkehr?</i>	174
8.5 <i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	179
<i>Literaturverzeichnis</i>	180
9. Mobilitätsverhalten und Mobilitätsbedürfnisse versus neue Antriebskonzepte: Wie passt das zusammen?	
<i>Bastian Chlond</i>	185
9.1 <i>Einleitung: Die Eigenschaften des privaten Pkw und Erklärungen für dessen Erfolg</i>	185
9.2 <i>Mobilitätsbedürfnisse vor dem Hintergrund des batterieelektrischen Fahrzeugs</i>	188
9.2.1 <i>Befunde zur Kfz-Nutzung</i>	188
9.2.2 <i>Rückfallebenen</i>	198
9.3 <i>Zusammenfassung, Thesen und Ableitung von Forschungsbedarf</i>	206
<i>Literaturverzeichnis</i>	207

Prolog

Witold-Roger Pogonietz, Patrick Jochem, Johannes Schäuble, Armin Grunwald und Wolf Fichtner

Die Diskussion um die Ölnappheit und den damit einhergehenden Peak Oil halten seit den achtziger Jahren in periodischen Abständen Einzug in politische und wissenschaftliche Diskussionen. Und so bleibt es unklar, wieso gerade die heutige Diskussion um Elektromobilität die entscheidende Änderung in diesem sonst global recht linear verlaufenden Prozess (d.h. steigende Kraftstoffverbräuche und CO₂-Emissionen) erbringen sollte. Auch wenn der Deutsche Personenstraßenverkehr bereits abnehmende Emissionen aufweist [2], ist der globale Trend ungebrochen.

Ähnlich wie in vielen europäischen Ländern, hat sich der Anteil des motorisierten Individualverkehrs am Personenverkehr in Deutschland nach einem rasantem Anstieg in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg in den letzten Jahrzehnten auf einem konstanten Niveau gehalten; parallel dazu zeigen die Zulassungen für Pkw einen vergleichbaren Verlauf [2]. Der persönliche Pkw mit Verbrennungsmotor etabliert sich als einfaches, bequemes und bezahlbares Verkehrsmittel: Ohne die sonst umfangreiche Vorausplanung können kurze sowie längere Strecken zurückgelegt werden und selbst Fernreisen sind möglich.

Wieso sollte sich das nun ändern? Es werden (schon wieder) Benzinrekordpreise verzeichnet: erstmalig mehr als 2 Euro für einen Liter Super in Italien [3]; aber historisch gesehen ist das nichts Neues: Die Preissteigerungen für einen Liter Super lagen in den letzten vierzig Jahren schon öfter über der heutigen 10 %-Grenze – auch wenn die nominalen Preissenkungen deutlich in der Minderheit sind (vgl. Abbildung 1).

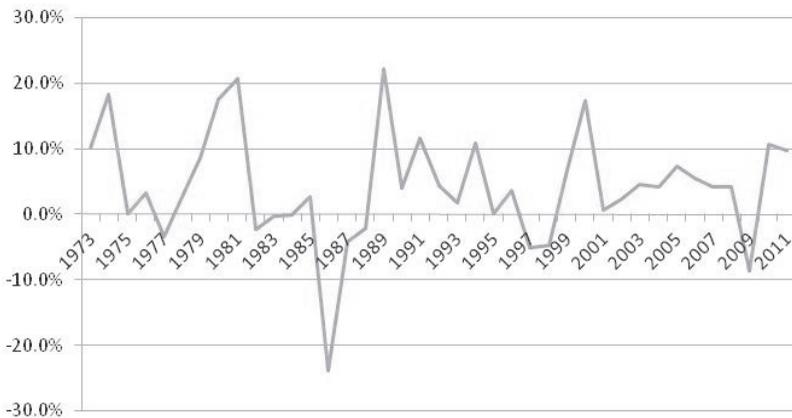


Abbildung 1: Prozentuale jährliche nominale Preisänderung für einen Liter Superbenzin in Deutschland [4].

Auch die nominale Rohölpreisentwicklung wirkt inflationsbereinigt weniger alarmierend (vgl. Abbildung 2) [6]. Ebenso sind die Prognosen der Ressourcen- und Reserven-Bestände in den letzten Jahren eher konstant und die errechneten Reichweiten verschieben sich durch neue Entdeckungen und technologische Fortschritte von Jahr zu Jahr. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [1] geht derzeit von einem Rohölanteil an den globalen Reserven der Primärenergieträger von ca. 17 % (vgl. Abbildung 3) und einer eher konstanten Förderung in den kommenden Jahren aus.

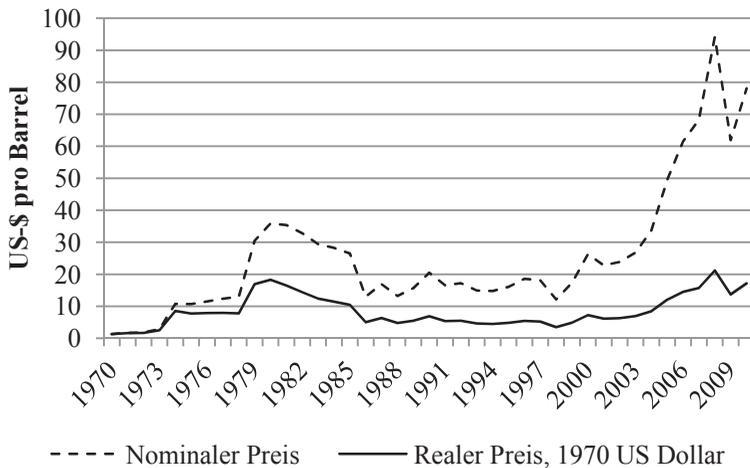


Abbildung 2: Entwicklung des nominalen und realen Weltmarkt-Rohölpreises (1970-2012) [6].

Jedoch zeigt diese Darstellung nur die eine Seite der Medaille und vernachlässigt den Hunger nach Energie der aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländer. Diese, v.a. die sog. BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China), weisen derzeit ein immenses wirtschaftliches Wachstum auf und werden ihre Nachfrage nach Ressourcen in den kommenden Jahren entsprechend steigern. So prognostizieren Experten beispielsweise im globalen Verkehr eine Verdopplung des Pkw-Bestandes und eine Verdreifachung des Frachtaufkommens bis 2050 [6]. In Anbetracht dieses Wachstums ist die statische Reichweite nach der BGR von 42 Jahren [1] jedoch schon alarmierender. Bei einer Verdopplung des Fahrzeugbestandes würde sich diese Reichweite signifikant verkürzen und die Situation in den kommenden Jahrzehnten zuspitzen.

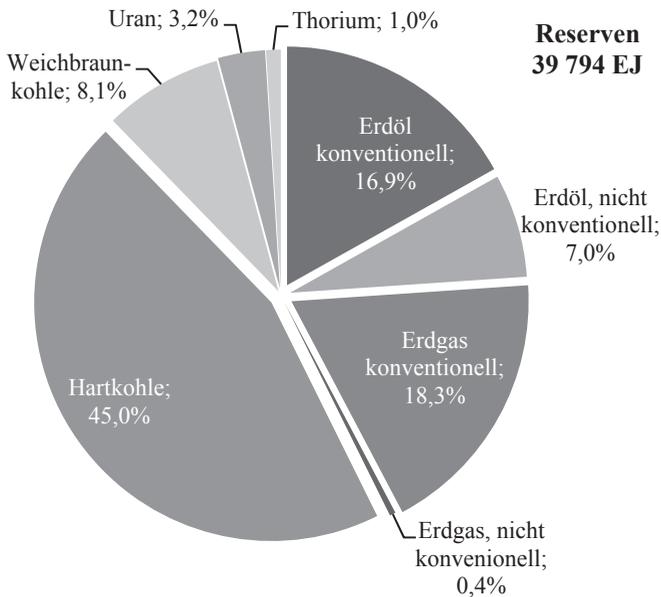


Abbildung 3: Anteil der globalen Reserven von nicht erneuerbaren Primärenergie-trägern (eigene Darstellung nach [1]).

Ein weiterer Punkt ist in den letzten beiden Jahrzehnten ebenfalls in das Bewusstsein der westlichen Länder gerückt: Der anthropogen verursachte Klimawandel. Die Industrieländer sind dafür bisher die Hauptverantwortlichen und sollten demzufolge bei der Klimagasvermeidung mit gutem Beispiel voran gehen. In diesem Kontext stellt sich auch die Frage, ob das langfristig schwindende Angebot an Öl somit noch relevant ist.

Der Verkehrssektor spielt im Zuge der Vermeidung von Treibhausgasen eine Hauptrolle. Er ist heute vom Straßenverkehr dominiert, und auf Grund der hohen Abhängigkeit von konventionellen Treibstoffen emissionsintensiv. Zudem nehmen in Megacities die Umweltbelastungen und die Infrastrukturüberlastungen rasant zu. Gleichzeitig werden sich verschiede-

ne Verkehrsträger und -technologien durch die dynamische Entwicklung im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie verschiedener Antriebstechnologien in ihrem Nutzungsaufwand und ihren Kosten immer ähnlicher. Insofern ist eine Lösung der genannten Herausforderungen einerseits in neuen Mobilitätskonzepten (insb. multimodale Wegekettten) aber auch in den neuen alternativen Antriebstechnologien zu sehen (insb. konventionelle Verbrennungsfahrzeuge, die mit Gas oder Biokraftstoffen betrieben werden, Brennstoffzellenfahrzeuge oder batterieelektrische Fahrzeuge).

Diese Überlegungen führten dazu, dass die Institute für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) sowie für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) am 8. und 9. März 2012 gemeinsam nach Karlsruhe zu einem Workshop mit dem Titel „*Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen*“ einluden. Ziel war es, interdisziplinär über die Themen Antriebskonzepte, Mobilitätsstile räumlicher Mobilität sowie über die Herausforderungen, die diese Themen in Zukunft stellen werden, zu diskutieren und ggf. erste stilisierte Fakten der aktuellen Trends in diesem Kontext festzuhalten.

Der Fokus lag insbesondere auf drei Antrieben: (1) der mit Biokraftstoffen betriebene konventionelle Verbrennungsmotor (dies beinhaltet auch Gasmotoren), (2) der aus einer Batterie gespeiste Elektromotor sowie (3) der Kombination Wasserstoff, Brennstoffzelle und Elektromotor. Jedes der drei genannten Antriebskonzepte hat dabei unterschiedliche Implikationen auf die zukünftige Ausgestaltung von Mobilitätskonzepten zur Befriedigung individueller räumlicher Mobilitätsbedürfnisse und muss technisch realisierbar und wirtschaftlich sein, zudem ökologische und rechtlich-politische Randbedingungen erfüllen und nicht zuletzt gesellschaftlich akzeptiert werden. Eine systemische Analyse unterschiedlicher Mobilitäts-

konzepte ist somit letztendlich nur im Spannungsfeld von Antriebstechnologie und korrespondierendem, sich entwickelndem Mobilitätsstil denkbar. Um die einzelnen Aspekte dieses Spannungsfelds hinreichend zu untersuchen wurde der Workshop und dementsprechend ebenfalls dieser Band in vier Themengebiete untergliedert. Zu Beginn sollen im ersten Themengebiet die grundsätzliche Zukunftsfähigkeit von Antriebskonzepten und mögliche Szenarien für individuelle Mobilität aufgezeigt werden. Im Anschluss werden im zweiten Themengebiet der Stand der Technik unterschiedlicher Technologien skizziert und darauffolgend im dritten Themengebiet deren Systemwirkungen untersucht. Zum Abschluss werden mögliche Zukünfte alternativer Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen aufgezeigt und Trends im Mobilitätsverhalten diskutiert.

Themengebiet 1: Zukunftsperspektive individuelle Mobilität

In ihrem Beitrag beurteilt Frau **Barbara Lenz** Auswirkungen einzelner, identifizierter Aspekte der Entwicklung der Mobilitätsnachfrage neueren Datums auf eine mögliche zukünftige Nachfrage. Die Analysen basierten dabei auf der Querschnittsstudie „Mobilität in Deutschland“. Es werden zudem aktuelle Nachfragetrends skizziert und mit Blick auf den Erfolg alternativer Antriebe untersucht. Hierdurch kann festgestellt werden, dass der generelle Bedarf an Mobilität wächst, wohingegen eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens nicht alle Bevölkerungsgruppen in demselben Maße betrifft. Die Autorin trifft dabei auf Basis ihrer Untersuchungen einige entscheidende Aussagen: Trotz einer ansteigenden Nutzung nicht-motorisierten Individualverkehrs bleibt das Auto wichtiges Konsumgut. Umweltaspekte spielen dabei beim Autokauf trotz steigendem Umweltbewusstsein eine untergeordnete Rolle und werden überdies in einigen Fällen außer Acht gelassen. Immer noch gilt das bekannte Mobilitätsverhalten der Bevorzugung eines persönlichen Fahrzeugs. Der Erfolg neuer alternativer

Antriebskonzepte hängt deshalb noch immer stark von der Entwicklung der Aspekte ab, die dieses Verhalten beeinflussen.

Themengebiet 2: Stand der Technik und Perspektiven

Der Entwicklungsstand biogener Kraftstoffe sowie in diesem Rahmen formulierte bestehende politische Ziele werden im Beitrag von **Daniela Thrän, Karin Naumann** und **Arne Gröngröft** aufgezeigt. Derzeit treten biogene Kraftstoffe hauptsächlich als Mischung mit fossilen Kraftstoffen auf und werden mittels der Konversions- und Aufbereitungstechnologie hergestellt. Die Autoren gehen in ihrem Beitrag von einer steigenden Nachfrage nach biogenen Kraftstoffen aus und schließen daraus die Notwendigkeit der Verbesserung bestehender Technologien und Prozesse. So können z.B. Herstellungsverfahren, die eine größere Rohstoffbasis zur Grundlage haben, eine mögliche Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion verringern. Weiterer Bedarf wird zudem in der Festlegung von Nachhaltigkeitsstandards in der Agrarproduktion gesehen.

Julia Michaelis, Patrick Plötz, Till Gnann und **Martin Wietschel** vergleichen in ihrem Beitrag Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge, indem sie jeweils deren ökologisches Potenzial, benötigte Infrastruktur und Wirtschaftlichkeit untersuchen. Sie kommen zu folgendem Ergebnis: Einen ökologischen Vorteil bieten alle untersuchten Antriebskonzepte lediglich bei Nutzung erneuerbarer Energien. Die Infrastruktur für Elektrofahrzeuge ist teils bereits vorhanden, wohingegen eine Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur noch ausgebaut werden muss. Mittelfristig ergibt sich somit die Möglichkeit, für Elektrofahrzeuge Marktanteile zu gewinnen, langfristig zeigt sich für Brennstoffzellenfahrzeuge vor allem im Bereich der Langstreckennutzung ein Wachstumspotential. Eine Entwicklung hin zu einer räumlichen Mobilität mittels diverser alternativer Antriebsysteme entsprechend den aufzufindenden Mobilitätsstilen, kann somit mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden.

Herr **Stefan Pfahl** erklärt aus Sicht der Automobilindustrie die Faktoren technischer Fortschritt, Kostensenkungspotential, politische Ziele im Bereich des Klimaschutzes sowie die Ausgestaltung der politischen Rahmenbedingungen für die weitere Entwicklung elektrischer Antriebe als entscheidend. Ausgehend von diesen Faktoren stellt der Autor in seinem Beitrag einen Modellansatz vor, mit dem die Zukunftsaussicht elektrischer Antriebe basierend auf einer Total Cost of Ownership-Bewertung skizziert wird und unter anderem folgende Aussagen getroffen werden können: Plug-In-Hybride werden früher als rein batterieelektrische Antriebe verstärkt Marktanteile gewinnen. Trotzdem ist eine stärkere politische Förderung zur Erreichung von einer Millionen Einheiten im Jahr 2020 in Deutschland notwendig.

Themengebiet 3: Systemwirkungen

Jens Buchgeister stellt in seinem Beitrag die Frage nach dem relevanten System für eine adäquate Bewertung von unterschiedlichen Antriebstechnologien. Anhand von mehreren Beispielen wird in dem Beitrag gezeigt, dass die Wahl des betrachteten Systems darüber entscheidet, inwieweit eine bestimmte Antriebstechnologie als vorteilhaft angesehen werden kann. So wird bspw. vielfach der Vorteil des Elektrofahrzeugs in den fehlenden Emissionen gesehen. Das Schlagwort der emissionsfreien Mobilität gilt hierbei als Vision. Tatsächlich werden hier die bei der Strombereitstellung verursachten Emissionen nicht erfasst. Ebenso bleiben die durch die Produktion eines Fahrzeugs induzierten Emissionen bei einer nur auf die Nutzung des Fahrzeugs begrenzten Betrachtung unberücksichtigt. Jens Buchgeister zieht daher den Schluss, dass die Anwendung einer umfassenden lebenswegbezogenen Analyse für eine adäquate Bewertung von Antriebstechnologien erforderlich ist.

Beispielhaft betrachten **Hinrich Helms, Julius Jöhrens und Udo Lambrecht** in ihrem Beitrag die Auswirkungen auf die gesamten Treib-

hausgasemissionen von Fahrzeugherstellung und -nutzung sowie der Ladestromerzeugung und -bereitstellung innerhalb Deutschlands für ein Fahrzeug der Kompaktklasse auf Basis des am ifeu entwickelten Ökobilanzmodells „eLCAR“. Anhand dieser Analyse werden Treiber für Treibhausgasemissionen identifiziert. Den Autoren zufolge ist die Klimabilanz eines Elektrofahrzeugs bei Ladung mit Strom aus dem derzeitigen deutschen Strommix geringfügig besser gegenüber einem Fahrzeug mit modernem Ottomotor. Nach den aufgestellten Umweltbilanzen bieten Elektrofahrzeuge ein großes Potenzial, in Zukunft Treibhausgasemissionen zu senken, wenn die Treibhausgasemissionen der Herstellung der Batterien zurückgehen und erneuerbare Energien entsprechend der neuen Stromnachfrage durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen ausgebaut werden.

Der steigenden Bedeutung von Innovationen im Bereich alternativer Antriebskonzepte wird im Beitrag von Herrn **Michael Krail** Rechnung getragen. Beschrieben wird hierin der während des Forschungsprojekts GHG-TransPoRD entwickelte, systemdynamische Ansatz, in dem das Entscheidungsverhalten von Käufern von Pkw unterschiedlicher Antriebstechnologien in Abhängigkeit unterschiedlicher Indikatoren simuliert wird. Mit Hilfe dieses Ansatzes können realistische CO₂-Reduktionsziele für alle Verkehrsmittel bis 2030 und 2050 in der EU ermittelt werden, wobei Entwicklungen wichtiger Treiber und Hemmnisse (wie z.B. eine geringe Tankstellen-Dichte) für die Verbreitung von alternativen Antrieben im Modell berücksichtigt werden. Des Weiteren können Aussagen zu der Diffusion alternativer Antriebe, CO₂-Emissionen, Preisen sowie zu Ausgaben für Forschung und Entwicklung gemacht werden. Der Autor kann im Anschluss an seine Analyse unter anderem feststellen, dass konventionelle Verbrennungsmotoren weiterhin großes Potenzial zur Effizienzsteigerung beinhalten und sich die Einführung eines Feebate-Systems positiv auf die Verbreitung alternativer Antriebe auswirken kann, sollte ein Ausbau der Ladeinfrastruktur stattfinden.

Themengebiet 4: Mögliche Zukünfte

Die Auswirkungen, die unterschiedliche Antriebskonzepte auf die zukünftige Gestaltung von Mobilität haben, werden von **Jens Schippl** und **Patrick Jochem** in ihrem Beitrag bestimmt. Hierfür wird das Verkehrssystem als sozio-technisches System mit für ein solches System typischen, koevolutionären Prozessen unter Berücksichtigung technologischer und politischer Rahmenbedingung betrachtet. Die Autoren heben des Weiteren den Bedarf an neuen Geschäftsmodellen zur Gestaltung von Mobilität hervor und diskutieren einige dieser Modelle und die darin enthaltenen Verknüpfungen zu Entwicklungen neuer Antriebstechnologien. Weitreichende Implikationen für die zukünftige Gestaltung von Mobilität werden im Bericht vor allem durch einen hohen Anteils von Elektrofahrzeugen im System erwartet. Dass neben den verwendeten Antriebstechnologien die Informations- und Kommunikationstechnologie einen großen Einfluss auf das Mobilitätsgeschehen hat, wird durch die skizzierten, innovativen und multimodalen Konzepte (Mobility 2.0-Konzepte) aufgezeigt.

Der Beitrag von **Bastian Chlond**, in dem das Mobilitätsverhalten von Pkw-Nutzern in Deutschland dargestellt wird, bildet den Abschluss dieses Bandes. Dabei wird der Anteil an Fahrzeugen in Deutschland ermittelt, an den der Anspruch der universellen Verwendung (z.B. Stadtfahrten und lange Reisen) gestellt wird. Es wird dabei konstatiert, dass die aktuellen elektrischen Antriebskonzepte diesem Anspruch bislang, im Gegensatz zu den konventionellen Antriebskonzepten, nicht gerecht werden. Der Autor beschreibt des Weiteren einige Trends und Veränderungen des Mobilitätsverhaltens, die sich auf die weitere Marktdurchdringung von alternativen Antriebskonzepten auswirken kann. Genannt werden in diesem Zusammenhang gewerbliche Flottenmodelle, die multimodale Orientierung der jungen Generation und die zunehmende Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien.

Fazit

In den Beiträgen wird deutlich: Eine Wandlung der Mobilitätsstile ist derzeit noch nicht festzustellen, auch wenn strukturelle Änderungen diesen Eindruck suggerieren können. Jedoch gibt es einige Anzeichen dafür, dass ein solcher Wandel, getrieben von Innovationen im Bereich der Mobilitätskonzepte (z.B. Carsharing) und Informations- und Telekommunikationstechnologie (z.B. Car-to-X) sowie in Antriebs und Kraftstofftechnologie (z.B. Effizienzsteigerung und Biogene Kraftstoffe), stattfinden wird. Hierfür ist es deshalb notwendig mögliche direkte Effekte und indirekte Systemwirkungen hinreichend zu untersuchen und eventuelle Szenarien zu entwickeln. Eine Aussage, die in den vorliegenden Beiträgen gemacht werden konnte, ist, dass das Ziel der CO₂-emissionsfreien Fortbewegung¹ sich lediglich durch den Ausbau der Elektromobilität realisieren lässt und auch nur im Falle einer vollständigen erneuerbaren Stromerzeugung sowie eines einheitlichen Fördersystems und unter den nötigen Rahmenbedingungen. Die zukünftige individuelle räumliche Mobilität wird sich demnach von der uns heute gewohnten unterscheiden. Die Beiträge dieses Bandes skizzieren einen möglichen Weg hin zu einer emissionsarmen Mobilität, die schneller, kommunikativer und einfacher sein könnte, als wir sie heute kennen. Mittelfristig erscheint zunächst eine Differenzierung der Antriebstechnologien sehr wahrscheinlich.

¹ Hierbei abstrahieren wir einerseits von bereits emissionsarmen Verkehrsmitteln (zu Fuß oder per Rad) und von Herstellungsprozessen des Fahrzeugs sowie der Kraftwerke etc., bei denen die CO₂-Emissionen zwar teilweise gemindert werden könnten, eine vollständige Vermeidung jedoch mit einem unverhältnismäßig großen Aufwand verbunden ist. Unsere Systemgrenzen fokussieren hier auf die Verkehrsmittelnutzung (dies beinhaltet aber durchaus die Herstellung der „Kraftstoffe“).

Literaturverzeichnis

- [1] BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2010): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Hannover.
- [2] BMVBS (Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (Hrsg.) (2011): Verkehr in Zahlen 2011/2012. Berlin.
- [3] DWN (Deutsche Wirtschaft Nachrichten) (2012): Italien: Preis für Super-Benzin steigt auf über 2 Euro. URL: <http://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/2012/08/22/italien-preis-fuer-super-benzin-steigt-auf-ueber-2-euro/>. Zugriff am 18.10.2012.
- [4] MWV (Mineralölwirtschaftsverband) (2012): Benzinpreise. URL: <http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise/?loc=8>. Zugriff am 18.10.2012.
- [5] Tecson (2012): Historische Ölpreise. URL: <http://www.tecson.de/historische-oelpreise.html>. Zugriff am 18.10.2012.
- [6] OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) (2012): OECD Factbook 2011: Economic, Environmental and Social Statistics. Genua.
- [7] WBCSD (World Business Council on Sustainable Development) (2004): Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability. Genua.

1. Zukunftsperspektive individuelle Mobilität – Anforderungen, Erwartungen und Bedürfnisse

Barbara Lenz

DLR Institut für Verkehrsforschung Berlin

1.1 Einleitung

Mobil zu sein, ist für viele Menschen zu einer Selbstverständlichkeit geworden. In einem gesellschaftlich-wirtschaftlichen Umfeld, wie wir es heute in Deutschland vorfinden, ist Mobilität unverzichtbar, wenn „gesellschaftliche Teilhabe“, also der Zugang zu Ausbildung und Bildung, Arbeit und Versorgung, aber auch zum kulturellen und politischen Geschehen gewährleistet sein soll. In diesem Sinne wird Mobilität auch immer wieder als Grundbedürfnis verstanden. Individuelle Mobilität hat in Deutschland ein hohes Niveau erreicht, und ein Rückgang der Nachfrage ist derzeit nicht erkennbar.

Dennoch zeichnen sich Veränderungen in Umfang und Art der Mobilitätsnachfrage ab – besonders deutlich gilt dies für Gruppen wie junge Menschen und Menschen in den Altersgruppen 65+. Gleichzeitig entwickelt sich die Mobilitätsnachfrage räumlich durchaus unterschiedlich. Dies ist auch durch räumliche Unterschiede in der Angebotsentwicklung bedingt, vor allem im Hinblick auf neue Mobilitätskonzepte, aber auch im Hinblick auf die Einführung neuer Antriebskonzepte, deren Einstiegsmärkte eher in den großen Städten und Agglomerationen als in suburbanen und ländlichen Räumen zu finden sein werden [8].

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel des vorliegenden Beitrags, wesentliche Komponenten der jüngeren Entwicklung der Mobilitätsnachfrage zu identifizieren und ihre Bedeutung für die künftige Nachfrage einzuschät-

zen. Dazu werden aktuelle Nachfragetrends dargestellt und schließlich auch im Hinblick auf die Durchsetzung alternativer Antriebe diskutiert.

1.2 Wachstum oder Stagnation der Mobilitätsnachfrage?

Über Jahrzehnte hinweg erschien das stetige Wachstum von Mobilität und Verkehr selbstverständlich und gleichzeitig unabwendbar. Dabei war das Wachstum vor allem mit der Zunahme von Pkw-Besitz und -Nutzung verbunden. Während die Zahl der Pkw im Jahr 1960 in Westdeutschland erst bei knapp 4,5 Mio. lag, hatte sie zum Zeitpunkt der deutschen Wiedervereinigung im Jahr 1989 bereits das Niveau von fast 30 Mio. Pkw (Westdeutschland) erreicht [4]. Am 1. Januar 2012 registriert das Kraftfahrtbundesamt 42,9 Mio. Pkw; dies bedeutet, dass in Deutschland nunmehr 633 Pkw auf 1.000 Einwohner kommen [13]. Analog dazu hat sich der Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) am Modal Split verändert; in der KONTIV, der ersten bundesweiten Erhebung im Jahr 1976, belief sich der MIV-Anteil (Fahrer und Mitfahrer) auf 46 %, in der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ (MiD 2008) [15] lag dieser Wert bei 58 % (vgl. Abbildung 4).

Damit liegen Pkw-Besitz und -Nutzung in Deutschland auf einem ausgesprochen hohen Niveau. Aus den jüngeren nationalen Erhebungen gibt es allerdings Hinweise, dass das Wachstum vor allem im MIV, also in der Pkw-Nutzung, nicht länger anhält. So bilden sowohl die Zahlen des „Mobilitätspanels“ (www.mobiliaetspanel.de) als auch der Vergleich zwischen MiD 2002 [16] und 2008 [15] für das Verkehrsaufkommen, das heißt die zurückgelegten Wege, eine Situation zwischen Stagnation und Rückgang ab. Vor diesem Hintergrund prägte Zumkeller [26] den Begriff vom „Paradigmenwechsel“ in der Alltagsmobilität und brachte damit gleichzeitig die Erwartung zum Ausdruck, dass es sich um eine längerfristig anhaltende Entwicklung handeln werde.

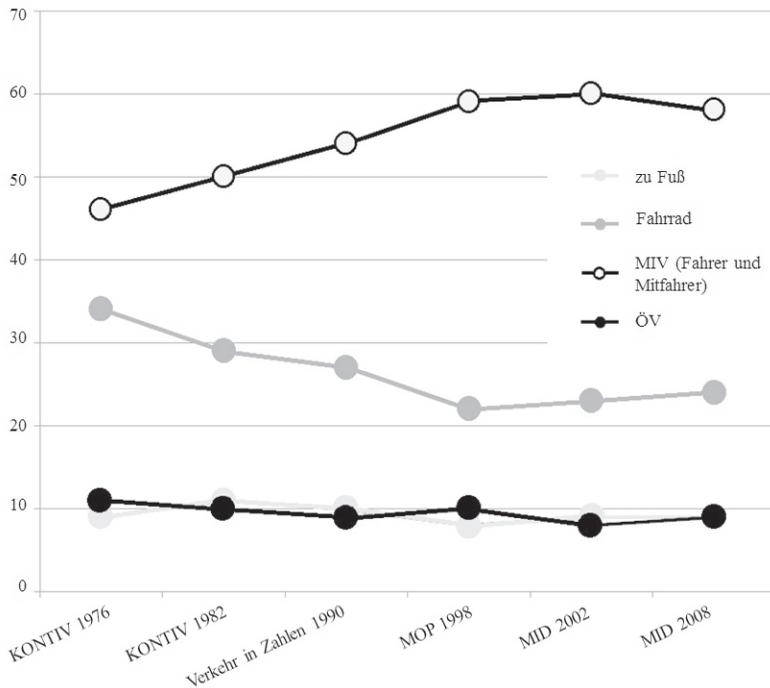


Abbildung 4: Entwicklung des Modal Split (Verkehrsaufkommen) in Deutschland 1976-2008.

Wenngleich die Pkw-Nutzung als langjähriger Treiber der Mobilitätsentwicklung nicht weiter zugenommen hat, so ist dennoch die Mobilität der Bevölkerung in Deutschland auch in den vergangenen Jahren weiter gewachsen. Gegenüber 272 Mio. Wegen im Jahr 2002 wurden in 2008 281 Mio. Wege zurückgelegt; das entspricht einer Zunahme um rund 3 %, die ihren hauptsächlichen Grund im Anstieg der Mobilitätsrate (Anteil der Befragten mit mindestens einem Weg am Befragungstag) von 86 % (2002) auf 90 % (2008) sowie in der Zunahme der Wege pro Person von 3,3 (2002) auf 3,4 (2008) findet [11, S.24]. Das heißt: Mehr Menschen gehen

häufiger aus dem Haus. Der zusätzliche Mobilitätsbedarf wird vor allem zu Fuß und mit dem Fahrrad, in geringfügig zunehmendem Umfang auch mit dem Öffentlichen Verkehr (ÖV) gedeckt (vgl. Abbildung 5).

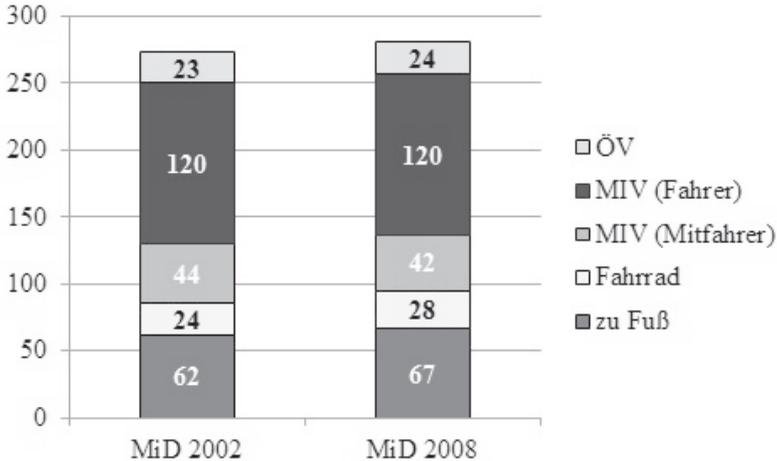


Abbildung 5: Entwicklung des verkehrsmittelspezifischen Verkehrsaufkommens in Deutschland zwischen den Jahren 2002 (272 Mio. Wege) und 2008 (281 Mio. Wege) [11, S.27].

Damit lässt sich festhalten, dass auf der Ebene der einzelnen Personen die Mobilität steigt und es dadurch zu einem leichten Wachstum auch der Verkehrsnachfrage insgesamt kommt. Wenn die Menschen unterwegs sind, dann zunehmend auch mit nicht-motorisierten Verkehrsmitteln, wenngleich der Pkw weiterhin für mehr als die Hälfte der Wege (58 %) und über drei Viertel der zurückgelegten Personenkilometer (78 %) genutzt wird.

1.3 Wachsende Mobilität bei den Seniorinnen und Senioren

Die Zunahme der Verkehrsnachfrage, die in der MiD 2008 im Vergleich zu 2002 abgebildet wird, speist sich zu einem großen Teil aus dem Nachfrage-

zuwachs der Personengruppe 65+. Dieser Nachfragezuwachs setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, einerseits aus der wachsenden Mobilitätsquote in den betreffenden Altersgruppen, andererseits aus der Zunahme an Wegen (vgl. Abbildung 6).

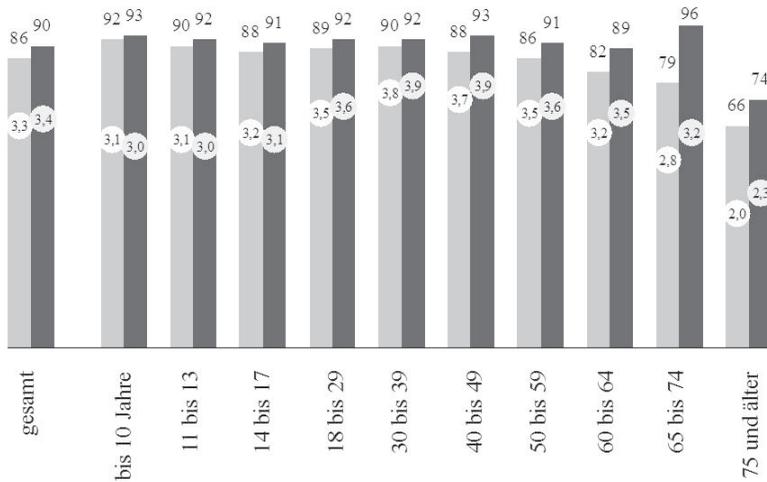


Abbildung 6: Mobilitätsquote und mittlere Wegezahl 2002 und 2008 nach Altersgruppen [11, S.171].

Der größte Teil des Wachstums ist in denjenigen Senioren-Haushalten entstanden, die über einen Pkw verfügen – das sind 54 % der Ein- und 92 % der Zweipersonenhaushalte („Seniorenhaushalt“ bedeutet dabei: die Person bzw. die jüngste Person im Haushalt ist 60 Jahre alt oder älter). Damit hat sich zwischen 2002 und 2008 die ständige Verfügbarkeit eines Pkw in der Altersgruppe 65+ von 50 auf 62 % erhöht, gleichzeitig ist der Anteil der Besitzerinnen und Besitzer eines Führerscheins um 11 Prozentpunkte auf 76 Prozent angestiegen. Angesichts dieser Entwicklung ist auch die durchschnittliche Jahresfahrleistung bei den Seniorinnen

und Senioren deutlich gewachsen – der Anstieg von 9.493 km auf 10.849 km entspricht einer Zunahme um 14 %.

Allerdings handelt es sich dabei um Durchschnittswerte. Hauptverursacher dieser deutlichen Veränderungen ist die Altersgruppe der „jungen Alten“, das heißt der 65- bis 74-Jährigen. In der Gruppe der „alten Alten“ ab 75 Jahre gehen sowohl die Pkw-Nutzung als auch die Wegelängen deutlich zurück, und der eigene Pkw wird nur noch von 67 % der Personen in dieser Altersgruppe mehrmals wöchentlich genutzt; bei den 65- bis 74-Jährigen sind dies noch 84 %. Gleichzeitig schränken die Hochbetagten aber auch die Nutzung von Öffentlichen Verkehrsmitteln ein; damit wird im hohen Alter das Zu-Fuß-Gehen zu einer besonders wichtigen Form der Mobilität (vgl. Abbildung 7).

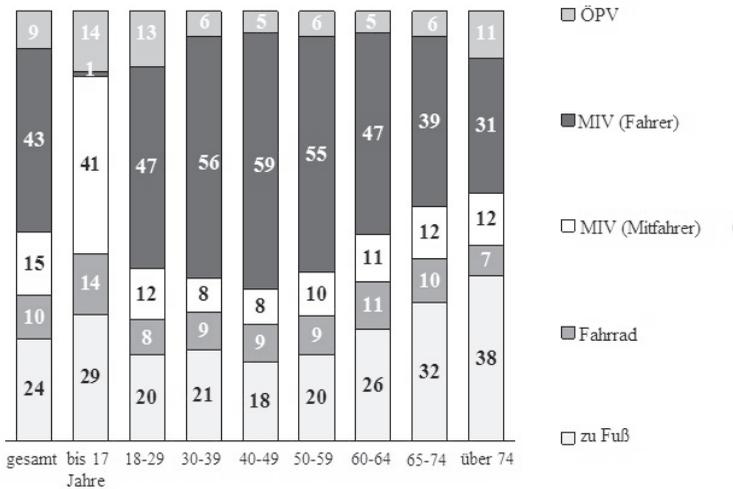


Abbildung 7: Modal Split-Anteile (Wege) 2008 nach Altersgruppen [11, S.77].

Das hohe Mobilitätswachstum vor allem bei den „jungen Alten“ darf allerdings nicht dazu verleiten, die Generation 65+ ausschließlich als sogenannte „Silver Ager“, das heißt weitestgehend frei von körperlichen Einschränkungen und mit aktivem Lebensstil, wahrzunehmen. Vielmehr bestehen innerhalb der Gruppe der Seniorinnen und Senioren deutliche Unterschiede, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Einkommen, aber auch aufgrund unterschiedlicher körperlicher Fitness. Insbesondere Frauen steht im höheren Alter oft nur ein stark eingeschränktes Haushaltsbudget zur Verfügung, zusätzlich sind sie häufiger als Männer mehreren gleichzeitigen physischen Beeinträchtigungen ausgesetzt [1]. Dies wirkt sich in mehrfacher Hinsicht mobilitätseinschränkend aus: Personen mit geringer finanzieller Ausstattung sowie mit körperlichen Mobilitätseinschränkungen gehen seltener aus dem Haus, legen kürzere Strecken zurück und haben nur ein eingeschränktes Zeitfenster, um aus dem Haus zu gehen (vgl. Abbildung 8). Diese Zusammenhänge verstärken sich ab einem Alter von 60 Jahren zunehmend und treffen Frauen stärker als Männer.

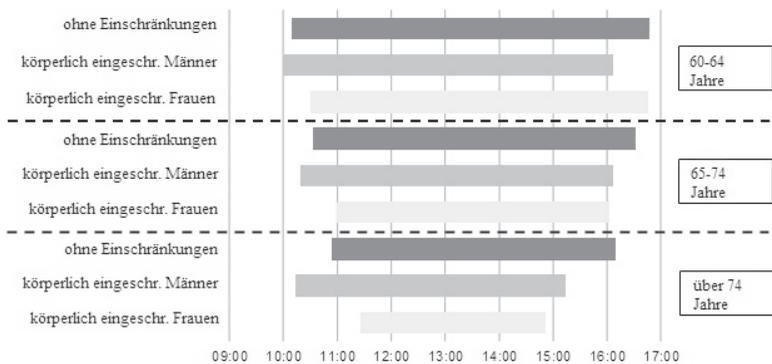


Abbildung 8: Zeitfenster für Außer-Haus-Wege von Personen mit und ohne Mobilitätseinschränkung 2008, spezifiziert nach Geschlecht (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis der MiD 2008 [15]; Zeitfenster berechnet aus durchschnittlicher Startzeit des ersten Weges und durchschnittlicher Ankunftszeit des letzten Weges).

1.4 Auto-Mobilität als Ausdruck von lifestyle

Bei der Frage, inwieweit Mobilität ein Ausdruck von „lifestyle“ ist, steht derzeit das Auto als „klassischer“ Ausdruck von Mobilität im Mittelpunkt der Diskussion. Dabei existieren im Wesentlichen zwei Diskussionsstränge – zum einen die Annahme, dass das Auto vor allem in der jüngeren Generation in seiner Bedeutung als lifestyle-Produkt von anderen Konsumgegenständen, insbesondere Handy und Internet, abgelöst worden ist, zum anderen die These des zunehmenden Pragmatismus bei der Realisierung von Mobilitätswünschen, der sich in einem Nutzen-statt-Besitzen-Verhalten sowie in wachsender Multimodalität niederschlägt.

1.4.1 Das Auto in Konkurrenz mit Handy und Internet

Es gibt kaum einen Zweifel, dass vor allem für jüngere Menschen Handy und Internet wichtige Kommunikationsmittel im Alltag darstellen und damit wesentliche Instrumente im sozialen Miteinander sind. Vor diesem Hintergrund wird ihre Bedeutung für den Alltag höher eingeschätzt als die Bedeutung des Autos. Zu dieser Schlussfolgerung kommt die iCar-Studie, eine Untersuchung, die im Jahr 2011 als Online-Befragung mit 1.247 jungen Menschen im Alter zwischen 18 und 25 Jahren durchgeführt wurde. Dabei beantworteten 75,8 % der Probanden die Frage „Können Sie sich vorstellen, einen Monat ohne Handy und Internet zu leben?“ mit „nein“. Dagegen können sich 58,7 % der Befragten vorstellen, einen Monat ohne Auto zu leben. Daraus leiten die Autoren der Studie ab, dass „das Auto als Statussymbol in den letzten Jahren signifikant an Bedeutung verliert. Zwar will die junge Generation hoch mobil sein – sowohl in der physischen als auch in der virtuellen Welt. Aber vor die Wahl gestellt, ist den 18- bis 25-Jährigen in Deutschland die Konnektivität in der virtuellen Welt zumeist wichtiger“ [5, S.6]. Da es sich bei der Studie um eine Querschnittsanalyse ohne Vorgängererhebung handelt, ist die hier vorgenommene Ei-

nordnung in eine zeitliche Entwicklung zumindest zu hinterfragen. Darüber hinaus sollte bei der Bewertung der Ergebnisse auch die Unterschiedlichkeit der Substitutionsmöglichkeiten berücksichtigt werden, nämlich beim Auto insbesondere die ebenfalls leistungsfähigen Verkehrsmittel Fahrrad und Öffentlicher Verkehr, bei Handy und Internet dagegen die deutlich weniger flexiblen Kommunikationsmittel Festnetztelefon und Briefpost.

Auch wenn mit den Ergebnissen der iCar-Studie sorgfältig umgegangen werden sollte, so scheint das Bild vom Bedeutungsverlust des Autos durchaus zu Befunden zu passen, die einen Wandel in der Alltagsmobilität von jungen Menschen diagnostizieren. Die MiD 2008 beispielsweise hat gezeigt, dass der Modal Split gerade auch in den jüngeren Altersgruppen sinkende Anteile beim MIV aufweist – im Vergleich 2008 zu 2002 ist dieser Anteil von 65 % auf 57 % gesunken. Dies geht Hand in Hand (ohne deswegen zwangsläufig ursächlich zu sein) mit einer nachlassenden Pkw-Verfügbarkeit speziell bei jüngeren Menschen. Selbst in den Kernstädten, wo diese Pkw-Verfügbarkeit ohnehin schon auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau lag, ist sie weiter abgesunken (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Pkw-Verfügbarkeit bei 18- bis 24-Jährigen nach Raumtyp 2002 und 2008 (Quellen: [12]; [11]; eigene Berechnungen).

18- bis 24-Jährige in ...	2002	2008	Veränderung 2002 -2008
... Kernstädten	51 %	42 %	- 9 Prozentpunkte
... Verdichteten Kreisen	70 %	61 %	- 9 Prozentpunkte
... Ländlichen Kreisen	71 %	69 %	- 2 Prozentpunkte
Gesamt	65 %	57 %	- 8 Prozentpunkte
jeweilige Differenz zu 100 = „gelegentlich“ / „gar nicht“			

Darüber hinaus kann die Wertschätzung des Autos als Teil des (wachsenden) Umweltbewusstseins junger Menschen verstanden werden. So zeigt beispielsweise die 16. SHELL-Jugend-Studie aus dem Jahr 2010, dass 76 Prozent der jungen Menschen im Alter zwischen 12 und 25 Jahren den

Klimawandel als großes bis sehr großes Problem einschätzen und sich deshalb auch entsprechend verhalten wollen:

- 52 Prozent wollen bewusst Energie sparen im Alltag.
- 44 Prozent wollen mehr Fahrrad statt Auto fahren (ab 18 Jahre).
- 39 Prozent wollen sich für ein kleineres Auto entscheiden (ab 18 Jahre) [2, S.104, 178, 183].

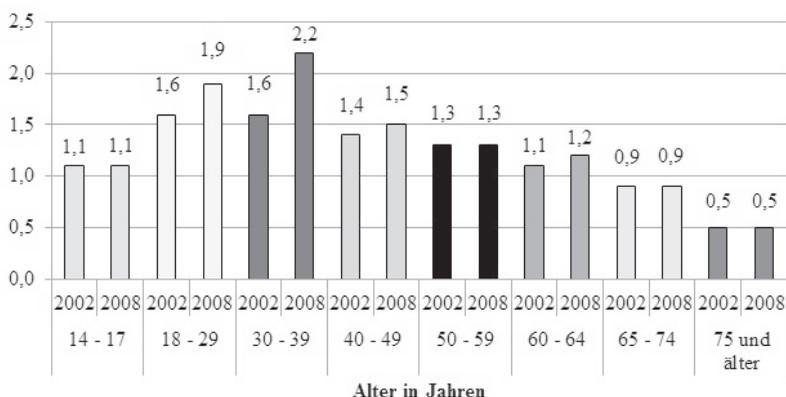


Abbildung 9: Durchschnittliche Anzahl von Reisen mit Übernachtung „in den letzten drei Monaten“ (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis der MiD 2008 und 2002 [15]; [16]).

Allerdings lässt sich anhand von MiD 2002 und 2008 darstellen, dass kein konsistentes Verhalten zwischen Alltagsmobilität und Reisemobilität vorliegt. So steht dem Rückgang an Alltagsmobilität gerade bei den jungen Menschen eine deutliche Zunahme der Reisemobilität gegenüber (vgl. Abbildung 9). Dabei zeigt sich – nahezu unabhängig vom Haushaltseinkommen –, dass im Vergleich zu 2002 sowohl die Gruppe der 18- bis 29-Jährigen als auch der 30- bis 39-Jährigen im Jahr 2008 mehr, zum Teil

deutlich mehr, Reisen unternimmt. Allerdings liegt für die Gruppe der 18- bis 29-Jährigen der Bahnanteil mit 29 % deutlich über dem Durchschnitt von 20 %, während der Anteil der Flugreisen mit 13 % leicht unterdurchschnittlich bleibt (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis MiD 2002 und 2008 [15]; [16]).

1.4.2 Nutzen statt besitzen

Angelehnt an die Diskussion zum Einstellungs- und Verhaltenswandel gerade bei den jüngeren Menschen ist die These vom wachsenden Pragmatismus. In Bezug auf den Pkw wird unterstellt, dass damit auch eine zunehmende Realisierung von „Nutzen statt Besitzen“ verbunden sei. Grundlage für diese These ist einerseits die Beobachtung, dass jüngere Menschen eine besonders hohe Offenheit gegenüber neuen oder besser: „neu aufgelegten“ Mobilitätskonzepten wie Car Sharing zeigen [24], andererseits die Tatsache, dass sich ein beträchtlicher Anteil der multimodal sich verhaltenden Personen aus der Gruppe der 18- bis 29-Jährigen rekrutiert.

In den 1990er Jahren bildete die Idee des „Nutzen-statt-Besitzen“ einen Teil der Nachhaltigkeitsdebatte, bei der davon ausgegangen wurde, dass auf dem Weg in eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung die „Umorientierung des Konsums im Hinblick auf eine Nutzung der Produkte anstelle ihres Besitzes“ ein „bedeutsamer neuer Aspekt“ sei [25, S.246]. Diese Erwartungen bauten auf die Ergebnisse empirischer Untersuchungen auf, die zeigten, dass sich zumindest ein Teil der Bevölkerung gegenüber eigentumslosen Formen des Konsums grundsätzlich aufgeschlossen zeigt, wenngleich eigentumsloser Konsum de facto noch relativ wenig verbreitet war und ist [18], [19], [20]). Zu den möglichen Gründen der geringen Verbreitung zählt nach Scholl et al. ([18] mit Bezug auf [9] und [22]) die Tatsache, dass Produkte „Bestandteil von etablierten Konsumpraktiken“ seien und ihre Nutzung weitgehend von Gewohnheiten, die sich nur schwer verändern ließen, geprägt sei [18, S.4]. Schrader verweist in diesem Zusammen-

hang auf die „typische Diskrepanz zwischen Einstellung und Verhalten“, aber auch auf die noch geringere Fixierung von Gewohnheiten bei jüngeren Menschen [20, S.13].

Vor allem neuere Car Sharing-Angebote, insbesondere auch die sogenannten Flex-Angebote (z.B. Car2Go oder DriveNow), zeichnen sich dadurch aus, dass sie der symbolischen Bedeutung des Eigentums von spezifischen Konsumgütern ein Angebot entgegensetzen, das ebenfalls im Sinne einer symbolischen Bedeutung interpretiert werden kann (vgl. dazu auch [14]): Die symbolische Bedeutung liegt zum einen in der Art des Angebotes, das eine hohe räumliche und zeitliche Flexibilität verspricht, und zum anderen in der Art der Fahrzeuge, die zur Verfügung gestellt werden. Das Car Sharing-Fahrzeug ist nicht mehr rein funktional, sondern ein Fahrzeug mit Image-Wert, teilweise sogar mit Namen. Damit scheint eine Zuordnung bestimmter Fahrzeuge zu Gruppen von Nutzerinnen und Nutzer des Fahrzeugs einherzugehen, die sich über Internet-Communities wie Facebook zusammenfinden (Gespräch mit Dr. Sven Kesselring, TU München, im Februar 2012). Das „gemeinsame“ Auto wird zum Tamagochi, dessen Wohlergehen im Interesse der Gruppe liegt. Es scheint, als werde auf diese Weise einer wesentlichen Umsetzungsbarriere für „Nutzen-statt-Besitzen“ [21] entgegengewirkt. Diese bislang in Zahlen nicht fassbaren Beobachtungen entsprechen auch dem Verbrauchertypus des „Transumers“, der nicht an Besitztümern, sondern an Erlebnissen interessiert ist. Dadurch, dass dem Transumer das Nutzen wichtiger als das Besitzen ist, wird seine Einstellung zum Besitz flexibilisiert ([23], zitiert bei [18, S.3]). „Nutzen-statt-Besitzen“ vor allem mit Pragmatismus zu begründen, erscheint vor diesem Hintergrund nicht gerechtfertigt.

1.4.3 Multimodalität

Ebenso wenig bekannt sind derzeit die Motive, die dazu führen, dass sich Menschen in ihrer alltäglichen Mobilität nicht nur auf ein Verkehrsmittel fokussieren, sondern je nach Situation und Bedarf unterschiedliche Verkehrsmittel nutzen, also beispielsweise mit dem Öffentlichen Verkehr zur Arbeit, mit dem Fahrrad am Wochenende ins Grüne und mit dem Auto zum wöchentlichen Großeinkauf fahren. Auch in diesem Zusammenhang wird immer wieder die Annahme geäußert, dass der Zugriff auf unterschiedliche Verkehrsmittel nicht zuletzt Ergebnis eines wachsenden Pragmatismus bei den Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmern sei (vgl. z.B. [6]). Zutreffend ist jedenfalls die Beobachtung, dass Multimodalität durchaus verbreitet ist, und vor allem in den jüngeren Bevölkerungsgruppen zunimmt. Definiert man multimodales Verhalten als „Nutzung von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsmitteln pro Woche, ohne Fußwege“, dann betrug der Anteil der Multimodalen unter den 18- bis 29-Jährigen im Jahr 2002 51 % und stieg in dieser Altersgruppe bis zum Jahr 2008 auf 54 % (vgl. Abbildung 10). Dabei ist – über alle Altersgruppen hinweg – multimodales Verhalten in den größeren Städten etwas häufiger anzutreffen als im Randbereich der Städte und im ländlichen Raum (vgl. Tabelle 2).

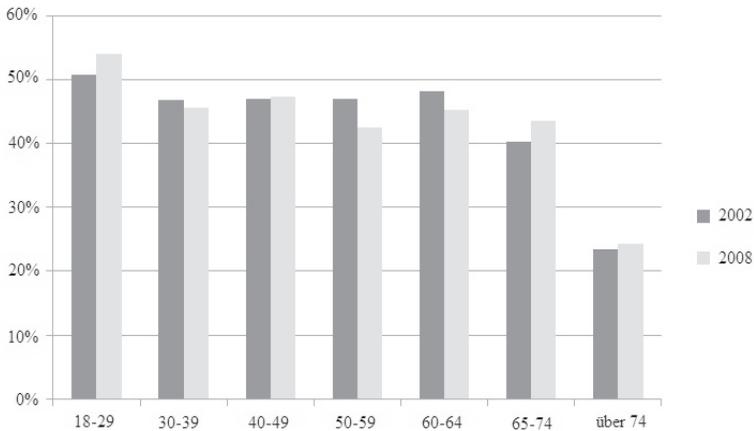


Abbildung 10: Anteil der multimodalen Personen in unterschiedlichen Altersgruppen 2002 und 2008 (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis der MiD 2008 und 2002 [15], [16]).

Insgesamt allerdings stagniert der Anteil der Multimodalen (sofern man die genannte Definition von Multimodalität zugrunde legt), die sowohl 2002 als auch 2008 knapp die Hälfte der Bevölkerung im Alter von 14 Jahren und älter ausmachten. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass „multimodal“ durchaus die Nutzung des MIV beinhaltet [17]. Berechnungen auf Basis der MiD 2008 ([15] Personendatensatz zur Ermittlung von Multimodalität und Wegedatensatz zur Ermittlung des Modal Split der multimodalen bzw. monomodalen Personen am Stichtag) rechtfertigen die Einschätzung, dass bei multimodalen Personen der Anteil der mit dem Pkw zurückgelegten Wege um etwa ein Drittel geringer ausfällt, als dies bei (im oben definierten Sinn) Nicht-Multimodalen der Fall ist. Die geringere MIV-Nutzung wird vor allem durch ÖV- und Fahrrad-Nutzung ausgeglichen.

Tabelle 2: Multimodales Verhalten (definiert als „Nutzung von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsmitteln pro Woche, ohne Fußwege“) der Personen im Alter von 14 Jahren und älter nach Raumtyp 2002 und 2008 (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis MiD 2008 [15]).

	2002	2008
Kernstädte	51 %	50 %
Verdichteten Kreise	44 %	43 %
Ländlichen Kreise	46 %	44 %

1.5 „Umweltschutz“ und Auto

Während oben bereits gezeigt wurde, dass zumindest jüngere Menschen aufgrund einer umweltorientierten Einstellung über persönliche Konsequenzen hinsichtlich Autokauf und Autonutzung nachdenken, ist derzeit aus statistischer Sicht kein nennenswerter Einfluss auf den Pkw-Bestand ableitbar [13]. Hinsichtlich der Pkw-Nutzung zeigen die Ergebnisse der MiD 2008, dass mit wachsendem ökonomischem Status eines Haushalts der Anteil der Wege, die zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden, zurückgeht, und damit der Anteil der MIV-Wege steigt [11, S.154ff]. Insgesamt erweist sich der ökonomische Status als besonders einflussreich auf das Verkehrsverhalten und damit auf die (über die Zahlen der MiD 2008 messbare) verursachten CO₂-Emissionen. Dabei gilt einerseits, dass mit dem ökonomischen Status eines Haushalts die Zahl und Länge der täglichen Wege ansteigt, andererseits kommt dieser Status im Typ des zur Verfügung stehenden Pkw zum Ausdruck. So nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass statushöhere Haushalte über größere, allerdings auch neuere und effizientere Fahrzeuge verfügen und mit diesen Fahrzeugen eine überdurchschnittliche Jahreskilometerleistung erzeugen. Gleichzeitig zeigt sich, dass der seit Jahren anhaltende Trend zur stärkeren Motorisierung der Neufahrzeuge sich auch 2008 noch nicht abgeschwächt hat. Vielmehr geht die

Zahl der schwächer motorisierten Pkw weiter zurück und der Anteil der stärkeren Leistungsklassen wächst. Dennoch kommt fast die Hälfte des CO₂-Ausstoßes von kleinen und kompakten Fahrzeugen (Beispiele für „Kleinwagen“: Opel Corsa, BMW Mini; Beispiele für „Kompaktklasse“: VW Golf, Toyota Auris), ein weiteres Viertel von Mittelklassefahrzeugen (Beispiele für „Mittelklasse“: Mercedes C-Klasse, Renault Laguna).

Betrachtet man „Umweltschutz“ als mögliches Motiv beim Autokauf, dann scheint zumindest das Kriterium CO₂-Ausstoß an Gewicht zu verlieren. So zeigt die ARAL-Studie „Trends beim Autokauf 2011“ die deutlich nachlassende Bedeutung dieses Aspekts beim Autokauf: 2009 bezeichneten noch 59 % der Befragten den CO₂-Ausstoß des neu zu erwerbenden Fahrzeugs als „wichtig“ oder „sehr wichtig“, 2011 waren nur noch 47 % der potenziellen Käufer dieser Meinung (vgl. Abbildung 11). Dies geht einher mit einer sinkenden Neigung, für verbrauchsarme Fahrzeuge mehr zu bezahlen. Allerdings ist innerhalb des Personenkreises, der eine grundsätzliche Zahlungsbereitschaft aufweist, bei rund einem Fünftel der Befragten die Akzeptanz auch eines höheren Mehrpreises für verbrauchsarme Fahrzeuge vorhanden. Die Autoren der ARAL-Studie schließen daraus, dass sich offensichtlich die Erkenntnis durchsetze, „dass es ‚grüne‘ Technologie nicht zum Nulltarif gibt“ [3, S.17].

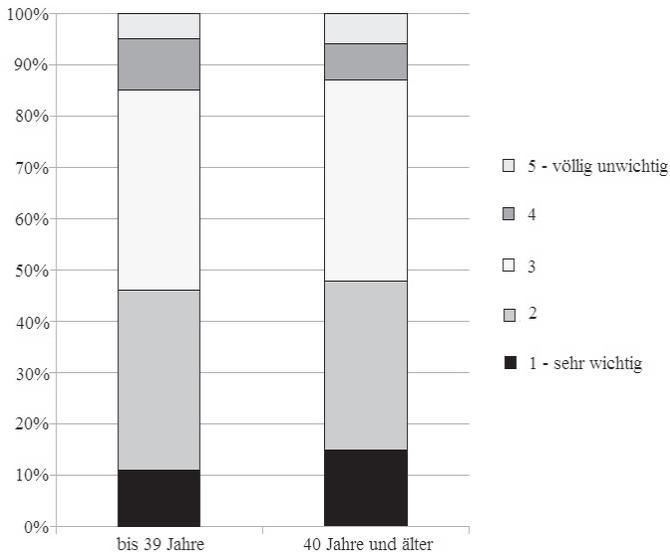


Abbildung 11: Einschätzung der Bedeutung eines niedrigen CO₂-Ausstoßes beim Kauf des nächsten Autos (n=351, „nächstes Auto“ = Neuwagen oder Jahreswagen; [3]).

1.6 Fazit

Der Beitrag hat gezeigt, dass der Mobilitätsbedarf grundsätzlich wächst, während ein Wandel im Mobilitätsverhalten nicht gleichermaßen über alle Bevölkerungsgruppen hinweg erfolgt, sondern eher einzelne Bevölkerungsgruppen betrifft, und auch innerhalb dieser Bevölkerungsgruppen entlang von Einflüssen wie Einkommen oder Bildung variiert. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass die Nutzung von Verkehrsmitteln des nicht-motorisierten Individualverkehrs zunimmt, dass aber dennoch die „automobile Selbstbeweglichkeit“ [7] weiterhin den Mobilitätsalltag des größeren Teils der Bevölkerung prägt. Das Auto bleibt ein wichtiges Kon-

sumgut – egal, ob als eigenes Fahrzeug oder Car Sharing-Dienstleistung. Zwar steigt das Umweltbewusstsein, jedoch ohne dass damit eine nennenswerte Bereitschaft zum Mobilitätsverzicht vorhanden wäre. Gleichzeitig scheinen Umweltaspekte, insbesondere die CO₂-Emissionen der Fahrzeuge, beim Autokauf an Bedeutung zu verlieren.

Die Frage, ob bzw. inwieweit sich änderndes Mobilitätsverhalten und neue Antriebskonzepte zusammengehören, ist derzeit nur schwer abschätzbar (s. a. Beitrag Jochem und Schippl in diesem Band). Die ersten Ergebnisse aus den Versuchen in den „Modellregionen“ zur Akzeptanz und Nutzung von Elektrofahrzeugen könnten hierzu allerdings Hinweise geben (ca. 350 Vorher-Nachher-Befragte (12-Monate-Intervall), vor allem aus Berlin, Stuttgart, Rhein-Main): So hat sich dort gezeigt, dass das Interesse seitens potenzieller Kunden durchaus vorhanden ist, konkrete Kaufabsichten sich aber erst ganz allmählich entwickeln, insbesondere aufgrund der hohen Preisdifferenz zu konventionellen Fahrzeugen. Gleichzeitig gibt es eine eindeutige Präferenz der herkömmlichen Fahrzeuganschaffung, das heißt, die große Mehrzahl der potenziellen Neuwagenkäufer möchte weiterhin ein *eigenes* Auto besitzen [10]. Man muss allerdings davon ausgehen, dass die Durchsetzung neuer alternativer Antriebskonzepte noch länger auf sich warten lässt, sofern weiterhin eine deutliche Diskrepanz im Anschaffungspreis bestehen bleibt bzw. keine zusätzlichen Kauf- und/oder Nutzungsanreize geschaffen werden.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle für die große und exzellente Unterstützung von Frau Katja Köhler bedanken. Sie hat insbesondere bei der Datenrecherche und -aufbereitung diesen Beitrag erheblich bereichert.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Ahacic, M.G. Parker und M. Thorslund (2007): Aging in disguise: age, period and cohort effects in mobility and edentulousness over three decades. *European Journal of Ageing* 4, S. 83-91.
- [2] M. Albert, K. Hurrelmann und G. Quenzel (2010): 16. Shell Jugendstudie. Jugend 2010. Frankfurt am Main.
- [3] ARAL-Studie (2011): Trends beim Autokauf 2011. URL: http://www.aral.de/liveassets/bp_internet/aral/aral_de/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/t/broschuere_aral_studie_trends_beim_autokauf_2011.pdf. Zugriff am 15.09.2012.
- [4] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) (2010): Fahrzeugbestand Lkw und Pkw in Deutschland 1950-2010. URL: http://www.bgl-ev.de/images/daten/bestand/alle_tabelle.pdf. Zugriff am 15.09.2012.
- [5] S. Bratzel, L. Lehmann und R. Tellermann (2011): i-Car: Die junge Generation und das vernetzte Auto. Empirische Befragung zu den Einstellungen und Verhaltensmustern der 18-25 Jährigen in Deutschland. Center of Automotive Management. Working Paper 2011/03.
- [6] BUNDZEIT 03/12; URL: <http://www.bundzeit.de/index.php?idcatside=242>. Zugriff am 15.09.2012.
- [7] R. Buhr, W. Canzler, A. Knie und S. Rammler (1999): *Bewegende Moderne. Fahrzeugverkehr als soziale Praxis*. Berlin.
- [8] DLR Institut für Verkehrsforschung (2012): Neues aus der MiD – Auswertungen zu Fahrzeuganschaffung und Fahrzeugbesitz. Unveröffentlichtes Arbeitspapier.

- [9] R. Eisendle und E. Miklautz (Hrsg.) (1992): Produktkulturen. Campus-Verlag, Frankfurt am Main / New York.
- [10] Fraunhofer ISI (2012): Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen – Roadmap zur Kundenakzeptanz. Berlin. URL: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/e/de/publikationen/roadmap_broschuere_netz.pdf?WSESSIONID=8bff393bd949380e1419f638ffba3ca9. Zugriff am 15.09.2012.
- [11] Infas und DLR (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Strukturen – Aufkommen – Emissionen – Trends. Bonn/Berlin.
- [12] Infas und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2002): Mobilität in Deutschland 2002. Kontinuierliche Erhebung zum Mobilitätsverhalten. Bonn/ Berlin.
- [13] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2012): Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2012. URL: http://www.kba.de/cln_033/nn_125264/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand__node.html?__nnn=true. Zugriff am 15.09.2012.
- [14] A. Knie und S. Rammler (1999): Automobilität und Selbstbeweglichkeit. Soziologische Überlegungen zur besonderen Affinität von Moderne und Motorisierung. In: A. v. Vegesack und M. Kries (Hrsg.) (1999): Automobility – was uns bewegt. Vitra Design Museum. Weil am Rhein.
- [15] Mobilität in Deutschland 2008 (MiD 2008). Nationale Erhebung, beauftragt vom Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung.
- [16] Mobilität in Deutschland 2002 (MiD 2002). Nationale Erhebung, beauftragt vom Bundesministerium für Verkehr Bau- und Wohnungswesen.

-
- [17] C. Nobis (2012): Multimodalität – Entstehung und Förderungsmöglichkeiten nachhaltigen Mobilitätsverhaltens. Dissertation an der Humboldt-Universität zu Berlin (in Vorbereitung).
- [18] G. Scholl, L. Schulz, E. Süßbauer und S. Otto (2010): Nutzen statt Besitzen – Perspektiven für ressourceneffizienten Konsum durch innovative Dienstleistungen. Ressourceneffizienz Paper 12.4, Wuppertal.
- [19] G. Scholl und W. Konrad (2004): Verbraucherakzeptanz von Nutzungsstrategien. Diskussionspapier des IÖW 63/04. Berlin.
- [20] U. Schrader (2001): Konsumentenakzeptanz eigentumersetzender Dienstleistungen. Konzeption u. emp. Analyse. Frankfurt a. Main.
- [21] U. Schrader (2002): Konsumpolitik als Determinante der Konsumentenakzeptanz eigentumersetzender Dienstleistungen. In: Scherhorn, Gerhard; Weber Christoph (Hrsg.): Nachhaltiger Konsum. Auf dem Weg zur gesellschaftlichen Verankerung, S. 219-230. München.
- [22] E. Shove (2003): Comfort, Cleanliness and Convenience. The Social Organization of Normality. Oxford/ New York.
- [23] Trendbüro (2007): Upgrade-Gesellschaft. Leben im Jetzt – Besitzen auf Zeit. Langfassung. Hamburg.
- [24] Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011): Umweltwirtschaftsbericht 2011. Daten und Fakten für Deutschland. Dessau-Roßlau.
- [25] Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (1997): Nachhaltiges Deutschland. Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Berlin.
- [26] D. Zumkeller (2004): Verkehrliche Wirkungen des demographischen Wandels – Erkenntnisse aus zehn Jahren Panel. Straßenverkehrstechnik 12, S. 651-658.

2. Die Zukunft biogener Kraftstoffe

Daniela Thrän^{1,2}, Karin Naumann², Arne Gröngröft²

¹Helmholtzzentrum für Umweltforschung Leipzig

²Deutsches Biomasseforschungszentrum Leipzig

2.1 Einleitung

Biogene Kraftstoffe gelten als ein wichtiger Baustein für den Übergang in eine weniger auf fossilen Energieträgern basierende Energieversorgung. Entsprechend sind in vielen Ländern inzwischen klare Zielvorgaben für ihren Beitrag zur Kraftstoffversorgung definiert worden. Ob und wie diese erfüllt werden können, hängt von der Stabilität der politischen Rahmenbedingungen und der Weiterentwicklung der Bereitstellungstechnologien ab. Der nachfolgende Beitrag zeigt den Stand der Technik wie auch den bestehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf. Durch eine Weiterentwicklung der Produktionstechnologien können Biokraftstoffe künftig noch zielgerichteter in eine weitgehend auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung integriert werden.

2.2 Zielvorgaben und Stand der Nutzung

Für die verstärkte Substitution von fossilen Kraftstoffen durch regenerative Energieträger sind in den vergangenen Jahren in vielen Regionen der Welt politische Ziele formuliert sowie verbindliche Quoten vereinbart worden. Sie sind abgeleitet aus den übergeordneten gesellschaftspolitischen Zielen zur Reduzierung der Klimagasemissionen, zur Erhöhung der Versorgungssicherheit aber auch zur Entwicklung der heimischen Landwirtschaft. Die Priorisierung der Ziele ist dabei regional unterschiedlich. Abbildung 12 gibt die politisch vorgegebenen Quoten unterschiedlicher Länder weltweit

wieder. Bisher wird die Substitution von fossilen Kraftstoffen weitestgehend durch Bioethanol und Biodiesel erreicht.

In den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sind gegenwärtig unterschiedliche Biokraftstoffquoten zu verzeichnen, die bis zum Jahr 2020 jedoch in allen Staaten auf 10 % (energetisch) ansteigen sollen. Zudem wurden konkrete Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe definiert. Nach Richtlinie 2009/28/EG [11, S.28] dürfen lediglich Biokraftstoffe auf die Quote angerechnet werden, die folgenden drei Anforderungen gerecht werden:

(1) Kein Anbau von Biomasse auf Flächen mit hohem Wert für die biologische Vielfalt (z. B. Primärwälder, Naturschutzflächen, natürliches Grünland), hohem ober- oder unterirdischen Kohlenstoffbestand (Feuchtgebiete, kontinuierlich bewaldete Gebiete), Torfmoor;

(2) Einhaltung der Anforderungen der europäischen „Cross-Compliance“-Regelungen (Standards in den Bereichen Umwelt- und Tierschutz, Pflanzen- und Tiergesundheit) für den Biomasseanbau in der EU bzw. vergleichbarer Standards außerhalb der EU;

(3) Treibhausgasminderung um 35 % ab Inkrafttreten, bzw. 50 % ab 2017, bzw. 60 % ab 2018 für Neuanlagen im Vergleich zum fossilen Referenzkraftstoff (Diesel oder Ottokraftstoff).

Weitere Nachhaltigkeitsanforderungen werden diskutiert, z.B. soziale Standards und Faktoren zur Berücksichtigung der Effekte indirekter Landnutzungsänderungen auf die Treibhausgasemissionen des Biomasseanbaus.

Zudem wird die Möglichkeit der Doppelanrechnung von Kraftstoffen aus bestimmten Reststoffen gegeben (so genannte Doppelzählung) [11, S.28]. Der Status der Umsetzung der europäischen Richtlinie in nationales Recht ist sehr unterschiedlich in den Mitgliedsstaaten, so dass sie ihre Wirkung noch nicht umfassend entfalten konnte [5].

Deutschland hat die europäischen Ziele wie folgt spezifiziert:

- Für den Zeitraum 2010 – 2014 müssen Biokraftstoffe einen Anteil von 6,25 % (energetisch) am gesamten Kraftstoffmarkt haben,
- ab dem Jahr 2015 werden die energetischen Mindestanteile ersetzt durch eine Klimaschutzquote von zunächst 3 % Reduzierung der Treibhausgasemissionen des gesamten Kraftstoffverbrauchs durch Biokraftstoffe, bzw. 4,5 % in 2017 und 7 % in 2020 [9].

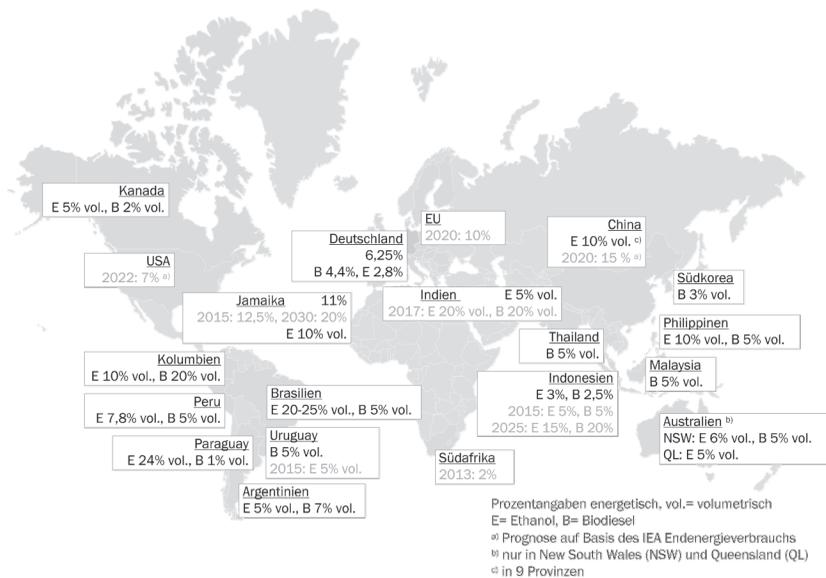


Abbildung 12: Internationale Quoten für die Substitution von fossilen Kraftstoffen.
 Datengrundlage: [2].

Den weltweiten Zielvorgaben stand 2008 ein globaler Biokraftstoffeinsatz von 1,8 EJ/a gegenüber. Damit wurden vom gesamten Energiebedarf im Verkehrssektor, knapp 100 EJ/a, ca. 2 % durch Biokraftstoffe bereit gestellt [3]. Die wesentlichen Absatzbereiche stellten Südamerika dar, wo z. B. in Brasilien bereits 21 % des gesamten Energiebedarfs durch Bio-

kraftstoffe gedeckt werden, gefolgt von den USA (4 %) und Europa, wo der Biokraftstoffanteil in 2008 bei ca. 3 % lag. Während in Südamerika und den USA hauptsächlich Bioethanol eingesetzt wird, dominiert in Europa Biodiesel, was in erster Linie durch den Fahrzeugbestand begründet ist [2].

Der energetische Anteil von Biokraftstoffen am deutschen Kraftstoffverbrauch stieg stark bis zum Jahr 2007, wo er einen Wert von 7,4 % erreichte. In den nachfolgenden Jahren wurden lediglich Werte zwischen 5 und 6 % erreicht [1]. Gleichzeitig haben sich seit 2010 geringe Mengen an Biomethan als Beimischung in Erdgas-Kraftstoffen etabliert. Ende 2011 standen dafür 60 Produktionsanlagen zur Verfügung [10].

Bis 2030 erwartet die Internationale Energie Agentur weltweit eine 3,5-fache Zunahme des Einsatzes von Biokraftstoffen auf 7 EJ/a, was bei einer dann erwarteten Kraftstoffnachfrage von knapp 130 EJ/a etwa 25 % der erwarteten Nachfrageresteigerung nach Kraftstoffen insgesamt decken würde und einem Biokraftstoffanteil von 5 % weltweit gleich käme [3]. In anderen Szenarien werden teilweise noch höhere Biokraftstoffanteile bis 2030 erwartet [8]. Auch in Deutschland sind die höheren politischen Zielvorgaben aus Langfristszenarien mit hohen Biokraftstofferwartungen abgeleitet [6].

Um das Potenzial nachhaltig verfügbarer Rohstoffe (bzw. Reststoffe) effizient nutzen zu können, ist die Verfügbarkeit eines entsprechend breiten Technologie-Portfolios zweckmäßig.

2.3 Technologien für die Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen

Für die Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen stehen generell diverse Konversionspfade zur Verfügung, die sich im Wesentlichen durch folgende Kriterien voneinander abgrenzen:

- Status der Technologie² bzw. Marktreife,
- Anforderungen an die Rohstoffbasis und damit verbundenes Ressourcenspektrum,
- Komplexität der Konversionstechnologien und Anlagengröße,
- Effizienz der Konversion bzw. spezifischer Rohstoffbedarf,
- Integrationsmöglichkeit in die vorhandene Distributionsinfrastruktur, sowie
- erzielbare Kraftstoffqualitäten für die Nutzung.

	Status Technologie ^a Heute Mittelfristig	Bewertung der Komplexität ^b	(Erwartete) Anlagenkapazität ^c (in MW Biokraftstoff)	Gesamteffizienz ^d (in %)	Distribution ^e	Nutzung ^f
Biokraftstoffoptionen			10.....100.....1.000	0.....50.....100		
Flüssig						
Konv. Biodiesel	⇒⇒⇒⇒⇒	++++			+++	+++
Konv. Bioethanol	⇒⇒⇒⇒⇒	+++			+++	+++
Biodiesel (Hydr.)	⇒⇒⇒⇒⇒	++			++++	++++
Bioethanol (Lig.)	⇒⇒⇒⇒⇒	++			+++	+++
FT-Kraftstoffe	⇒⇒⇒(→)	+			++++	++++
Methanol	⇒(→)⇒(→)	++			++	++
Gasförmig						
Biomethan/Biogas	⇒⇒⇒⇒⇒	++++			+++	+++
Biomethan/Bio-SNG	⇒⇒⇒(→)⇒(→)	++			+++	+++
Dimethylether	⇒⇒⇒(→)	++			++	++
Wasserstoff	⇒(→)⇒(→)	++{+}			+	+

^a Konzept / Labor →, Pilot →→, Demonstration →→→, Kommerziell / etabliert →→→→;^b Anlagenkomplexität: + sehr komplex...++++ wenig komplex;
^c bezogen auf Biomasseinput; ^d Bezug Technikstand (verschied. Konzepte) theoretische Werte; ^e Kompatibilität zu bestehender Infrastruktur für Reinkraftstoffe: +weniger vielversprechend...++++ sehr vielversprechend

© DBFZ, 2012

Abbildung 13: Vergleich von Bereitstellungspfaden für biogene Kraftstoffe [4].

² Häufig wird zwischen Kraftstoffen der ersten, zweiten und dritten Generation unterschieden, die durch eine unterschiedlich Rohstoffbasis gekennzeichnet sind (erste Generation: Pflanzenteile; zweite Generation: komplette Pflanzen mit Lignozelluloseanteilen; dritte Generation: Algen). Diese Begriffe sind jedoch nicht eindeutig definiert und sind missverständlich, da eine Ablösung der Technologien der sogenannten ersten Generation durch die zweite nicht absehbar ist. Vielmehr können die Technologien zur Umwandlung von Lignozellulose zu den bereits etablierten Technologien hinzukommen.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Konversionstechnologien sind in Abbildung 13 vergleichend gegenübergestellt.

Derzeit etablierte Biokraftstoffe umfassen Biodiesel aus Pflanzenölen sowie Bioethanol aus Zucker und Stärke:

- Die Verarbeitung von Pflanzenölen zu Biodiesel durch Umesterung mit Methanol ist ein verfahrenstechnisch einfaches und effizientes Verfahren. Als Rohstoffe werden vor allem ölhaltige Samen und Früchte genutzt, bei deren Verarbeitung teilweise auch ein proteinreicher Presskuchen anfällt, der als Futtermittel vermarktet werden kann. Alternativ zu der Umesterung des Pflanzenöls kann auch eine Behandlung mit Wasserstoff durchgeführt werden (Hydrotreated vegetable oil, HVO). So lässt sich Pflanzenöl in bestehende Raffinerien integrieren. HVO Biokraftstoffe lassen sich durch Anpassung der Verfahrensbedingungen in ihren Eigenschaften variieren, sodass es möglich ist Diesel, Benzin oder Kerosin herzustellen. Vor allem die Kerosinherstellung wird häufig als große Stärke des Hydrotreatings von Pflanzenölen gesehen. Für die Erfüllung der erwähnten Nachhaltigkeitsanforderungen hat sich jedoch besonders der Einsatz von Palmöl und Sojaöl als schwierig herausgestellt.
- Die Produktion von Ethanol ist ein biochemisches Verfahren, bei dem Hefen die Zuckerbestandteile einer Lösung zu Ethanol metabolisieren. Als Einsatzstoffe kommen daher zunächst alle Pflanzen mit ausreichendem Zucker- (Zuckerrübe, Zuckerrohr u.a.) oder Stärkegehalt (Mais, Weizen, Cassava u.a.) in Frage. Für die Verarbeitung von Stärke ist der Einsatz von Enzymen notwendig, die die Stärke in vergärbare Zucker umwandeln. Die Verarbeitung von zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen ist im kommerziellen Einsatz etabliert. Um die Konkurrenzfä-

higkeit mit fossilen Kraftstoffen zu verbessern wird vor Allem die Vermarktung der Nebenprodukte und stärkere Integration der Anlagen in die landwirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Produktionsketten vorangetrieben. Die dazu verfolgten Konzepte sind vielfältig und stark regional unterschiedlich, können aber zu erheblichen Steigerungen der Anlagenwirtschaftlichkeit führen.

Zur Biokraftstoffproduktion werden also derzeit hochwertige landwirtschaftliche Produkte eingesetzt werden, die bislang vor Allem als Lebensmittel eingesetzt wurden. Um die Rohstoffauswahl auszuweiten werden daher unterschiedliche Verfahren entwickelt. Besonders durch Verfahren zur Verarbeitung von Lignozellulose (z.B. Holz, Stroh, Bagasse u.a.) ließen sich hier große Rohstoffpotenziale erschließen. Unterschiedliche Verfahren befinden sich in der Entwicklung und Erprobung um diesem Ziel näher zu kommen. Allerdings sind anspruchsvollere Verfahren notwendig um die widerstandsfähigen Lignozelluloserohstoffe zu flüssigen Kraftstoffen zu verarbeiten.

- Für eine biochemische Ethanolproduktion aus Lignozellulose sind Aufschlussverfahren in der Entwicklung um eine vergärbare Zuckerlösung herzustellen. Mehrere Entwickler haben vollintegrierte Demonstrationsanlagen errichtet oder sind dabei, um Erfahrungen mit der Technologie zu sammeln (Inbicon, Abengoa, Südchemie, Chemtex u.a.). Der verfahrenstechnische Mehraufwand kann nur durch niedrigere Rohstoffkosten gerechtfertigt werden. Zudem fallen bei der Ethanolproduktion aus Lignozellulose andere Rohstoffbestandteile als Nebenprodukte an (z.B. Lignin, C5-Zucker) als bei etablierten Verfahren, für die es noch keine entwickelten Absatzmärkte gibt. Daher ist noch nicht klar, wie der De-

ckungsbeitrag durch diese Nebenprodukte zum Betrieb der Anlagen maximiert werden kann.

- Auch eine thermo-chemische Konversion von Lignozellulose zu Biokraftstoffen ist möglich. Die Rohstoffe werden dazu erhöhten Temperaturen ausgesetzt, was zur teilweisen Degradierung der Moleküle führt. Je nach Prozessführung lassen sich hier unterschiedliche Grade der Degradierung erreichen. Die meisten Entwicklungen sehen einen Abbau bis zu einem Synthesegas vor. Dessen Bestandteilen reagieren anschließend an der Oberfläche von Katalysatoren wieder zu größeren Kraftstoffmolekülen. Demonstrationsanlagen zur thermochemischen Biokraftstoffproduktion wurden von unterschiedlichen Entwicklern errichtet (Choren, KIT, Güssing, Chemrec u.a.). Auch eine biochemische Verarbeitung des Synthesegases zu Ethanol ist möglich und wird bezüglich seiner Vorteile und Herausforderungen untersucht. Alternativ zur vollständigen Vergasung ist auch eine Pyrolyse der Biomasse möglich, wobei ein flüssiges Pyrolyseöl entsteht. Dieses bedarf jedoch erheblicher verfahrenstechnischer Behandlung, um den Ansprüchen eines modernen Kraftstoffes zu genügen.
- Grundlegend wird auch der Einsatz von Algen zur Kraftstoffproduktion diskutiert und untersucht. Hohe Wachstumsraten sowie die Möglichkeit zur Anreicherung von Wertstoffen wie z.B. Lipiden oder Stärke werden als Vorteile der Algen genannt. Allerdings lassen sich diese Effekte bislang nicht verbinden, was einen kommerziellen Einsatz von Algen als Kraftstoffrohstoff derzeit unwahrscheinlich macht.

2.4 Aktuelle F&E Schwerpunkte für zuverlässige und nachhaltige Kraftstoffe

Mit Blick auf die ab 2017 verschärften Anforderungen an die Klimagaseinsparung, sowie der diskutierten Nutzungskonkurrenz v.a. zum Nahrungsmittelsektor, richtet sich die Forschung und Entwicklung von Kraftstoffen mit besseren Nachhaltigkeitskennwerten vor allem auf die gezielte Verwertung von Reststoffen. Für ausgewählte Reststoffe konnten solche Lösungen in den vergangenen Jahren bereits etabliert werden (z.B. Bereitstellung von Biodiesel aus Altfetten und Tierkörperrückständen³), allerdings sind diese Reststoffe im Aufkommen begrenzt.

Sowohl zu den etablierten als auch zu den in Entwicklung befindlichen Biokraftstoffen werden zahlreiche Forschungsfragen bearbeitet, die u.a. folgende Schwerpunkte untersuchen:

- Anlagenoptimierung etablierter Verfahren in ökonomischer und ökologischer Hinsicht; dies kann z.B. Effizienzsteigerungen durch Prozessoptimierung oder alternative Hilfsstoffe beinhalten.
- Entwicklung neuer Verfahren, um Rohstoffe ohne direkte Nahrungsmittelkonkurrenz einzusetzen und bessere Kraftstoffqualitäten zu erreichen; Ziel: Erprobung und Markteinführung zuverlässiger Anlagentechnologien.
- Biokraftstoffnutzung: Optimierung von Effizienz und Abgasverhalten im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren und Technologie der Abgasreinigung.
- Bei Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung stehen systemische Fragen im Vordergrund, wie z.B. die Bewertung von Landnutzungsänderungen, Governance-Fragen zur Landnutzung und

³ Die Anerkennung dieser Stoffe auf die Quote ist wegen der damit ggf. verbundenen Quersubventionierung bestimmter Produktionsbereiche (hier konkret Fleischverarbeitung) umstritten.

die dynamische Betrachtung der Treibhausgaseinsparung in einem sich ändernden Energiemix.

Im Einzelnen sind folgende Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte bei den Konversionstechnologien zu identifizieren:

Die Biodieselproduktion ist bereits sehr nahe an der optimalen Umwandlungseffizienz. Optimierungen können jedoch noch hinsichtlich der Reaktionszeit, beispielsweise durch alternative Katalysatoren, erreicht werden. Auch die Erhöhung von Druck und Temperatur oder der Einsatz innovativer Mischverfahren kann zu einer beschleunigten Reaktion führen. Ein erhöhter Stoff- und Energieeinsatz ist jedoch auch immer vor dem Hintergrund der damit verbundenen THG-Emissionen zu bewerten und abzuwägen. Da sich die stofflichen Eigenschaften von Biodiesel je nach Rohstoff und Verarbeitungsprozess unterscheiden, ist seine motorische Nutzung (als Reinkraftstoff oder Blend) weiterhin Gegenstand von Untersuchungen.

Bei der Ethanolproduktion aus Zucker und Stärke gibt es verschiedene Ansätze zur verfahrenstechnischen Optimierung. Eine wesentliche Herausforderung ist dabei, den Energiebedarf für die Stofftrennung zu vermindern. Dazu werden Hefen gezüchtet, die hohe Ethanolkonzentrationen in der Fermentation tolerieren. Über intelligente Verschaltungen zur Wärmerückgewinnung und innovative Stofftrennungsverfahren lässt sich der Bedarf an Heizenergie verringern. Die Verarbeitung der Nebenprodukte und die Minimierung der Abwasserproduktion bieten weitere Möglichkeiten zur Anlagenoptimierung. So werden derzeit Biogasanlagen für die Verwertung von Produktionsrückständen (v.a. Schlempe) in deutschen Ethanolanlagen installiert. Da Ethanol ein klar definierter Stoff ist und keine Stoffmischung, sind die Fragestellungen an die motorische Nutzung nicht abhängig von dem Produktionsverfahren. Hier sind im Wesentlichen die Normierung und Freigabe von Benzin/Ethanolmischungen mit mehr als 10 % Ethanol (z.B. E20 oder E25) für die Fahrzeugflotten notwendig.

Für die Kommerzialisierung von Bioethanol aus Lignozellulose werden viele Forschungsfragen bearbeitet. Eine große Herausforderung ist es mechanisch robuste Apparate zur kontinuierlich betriebenen Vorbehandlung des Stroh zu entwickeln. Große Anstrengungen werden zudem unternommen um effiziente Enzymsysteme für die Verzuckerung der Zellulose bereitzustellen. Die Züchtung und Entwicklung von speziellen Hefen, die auch Pentosen vergären können soll zur Erhöhung der Ethanolausbeute führen, da so auch die Hemizellulosefraktion des Rohstoffs erschlossen werden kann. Im Rahmen von Demonstrationsvorhaben gilt es zudem die Verschaltung der Reaktoren und Stofftrennungsschritte zu erproben und Schwachstellen in deren Verbund und Betrieb aufzufinden.

Bei thermochemischen Prozessen zur Biokraftstoffproduktion gilt es die Komplexität der Anlagen und damit die benötigte Anlagengröße zu verringern. So wird versucht über ein zweistufiges Produktionsverfahren die Diskrepanz zwischen Vorteilen großer Verarbeitungsanlagen und den daraus resultierenden logistischen Herausforderungen zu verringern. Auch die Integration in holzverarbeitende Anlagen wie Zellstofffabriken ist ein verfolgter Ansatz. Durch Produktion von Biomethan (biogenic Synthetic Natural Gas – Bio-SNG) anstelle von Flüssigkraftstoffen kann die Komplexität der Anlagen zudem erheblich verringert werden, was auch kleinere Produktionsanlagen ermöglicht.

Parallel wird auch an der Weiterentwicklung der Biomethanaufbereitung aus Biogas geforscht. Gezielte Vorbereitung der Substrate, Steuerung der mikrobiologischen Prozesse sowie Effizienzsteigerungen bei der Gas-aufbereitung sollen diese bereits verfügbaren Konversionstechnologien schrittweise verbessern.

Biomethan kann als Kraftstoff für Erdgasfahrzeuge vermarktet werden. Hier ist bislang jedoch der Absatzmarkt klein, da die Verbreitung von Erdgasfahrzeugen gering ist. Als mögliches Einsatzfeld gilt es zudem, auch einen erhöhten Absatz von Biomethan im Schwerlastbereich zu untersu-

chen. Dort wirkt sich das zusätzliche Gewicht der benötigten Gastanks weniger stark aus als im Pkw. Zudem kann sich die Umrüstung der Lkw-Flotten aufgrund der geringeren Kraftstoffpreise bei Gasbetrieb für die Betreiber schneller lohnen

Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsanforderungen der EU-Direktive ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Erreichung der künftigen Anforderungen an den Klimaschutz für die unterschiedlichen Biokraftstoffe unterschiedlich hoch. Dabei bestehen kurzfristig auf der technischen Seite noch deutliche Möglichkeiten, z.B. durch Prozessoptimierung die Klimagasemissionen zu reduzieren. In der Gesamtschau haben die Klimagasemissionen der Biomasseproduktion einen hohen Stellenwert (Abbildung 14). Reduktionsmöglichkeiten bestehen in der Optimierung der landwirtschaftlichen Praxis, beispielsweise bei Düngung, Pflanzenschutz und Bodenbearbeitung.

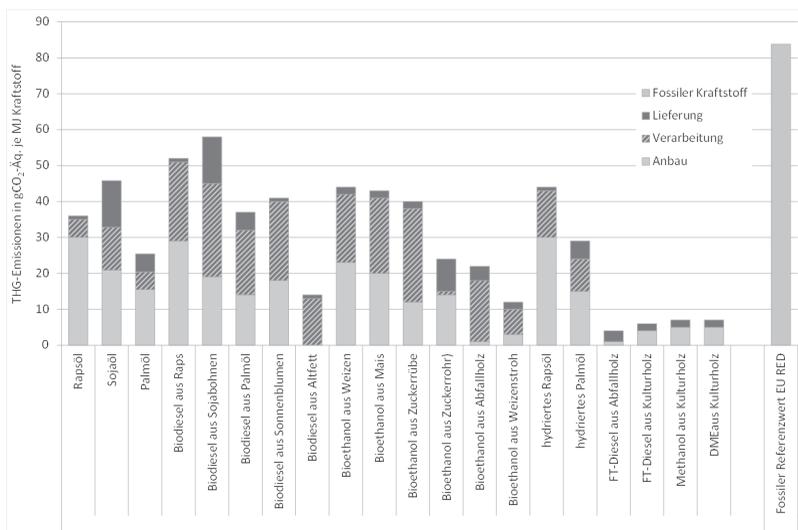


Abbildung 14: Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Biokraftstoffoptionen nach Erneuerbare Energien Richtlinie [11].

Die Bedeutung der landnutzungsbedingten Klimagasemissionen ist bisher unzureichend erforscht und spezielle Steuerungsinstrumente für den Anbau von Energiepflanzen umstritten. Zunehmend wird die mittelfristige Ausweitung der Nachhaltigkeitskriterien auf die gesamte Energiepflanzenproduktion bzw. langfristig auf die gesamte Agrarproduktion als wichtige Voraussetzung für eine nachhaltige Biomasseproduktion diskutiert, weil nur durch diesen ganzheitlichen Ansatz Verdrängungseffekte besser abgebildet und verzerrte Beurteilungen der Klimagaseffekte vermieden werden können. Da gegenwärtig ungewiss ist, ob und in welchem Umfang Nachhaltigkeitsanforderungen an die Agrarproduktion etabliert werden, ist auch ungewiss, in welchem Maße diese Verzerrungen die Diskussion um die Nachhaltigkeit von biogenen Kraftstoffen weiter beeinflussen. Damit kann die Bereitstellung von Energiepflanzen zur Produktion nachhaltiger Biokraftstoffe nicht allein durch weitgehende Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe gelöst werden können, sondern hängt zwingend von der Weiterentwicklung der Agrarpolitik ab.

Für bisher ungenutzte Reststoffe bestehen diese Unsicherheiten nicht. Wenn die Weiterentwicklung der Konversionstechnologien und damit die Nutzbarmachung der vorhandenen Rest- und Abfallstoffkontingente gelingt, so könnte in 2030 der anvisierte Beitrag durch Biokraftstoffe von 7 EJ/a durch diese Konzepte deutlich übertroffen werden, ohne dass zusätzliche Flächen für den Anbau von Biomasse in Anspruch genommen werden müssten [7].

2.5 Rolle der Biokraftstoffe in einer weitgehend regenerativen Energieversorgung

Auch wenn die Vielzahl der gegenwärtigen F&E-Aktivitäten erfolgreich verlaufen, bleiben die verfügbaren Biomassepotenziale begrenzt, und zukünftige Mobilitätslösungen dürfen nicht auf die Treibstoffsubstitution in bestehenden Antriebskonzepten beschränkt bleiben. Eine wesentliche Mög-

lichkeit um den Anteil regenerativer Energie im Verkehrssektor zu erhöhen ist eine deutliche Verminderung des Gesamtverbrauchs durch beispielsweise die Vermeidung von Verkehr, die weitere Optimierung von Logistikketten oder den Wechsel auf andere Verkehrsträger. Mit einer zunehmend regenerativen Energieversorgung werden Biokraftstoffe insbesondere in den Bereichen interessant, in denen Antriebsalternativen erst langfristig erwartet werden können. Dies betrifft, den Schwerlastverkehr, Schiffsverkehr und insbesondere den Flugverkehr.

Für den Flugsektor besteht mit dessen Integration in den Europäischen Emissionshandel (ETPS) seit dem Jahr 2012 verstärkter Handlungsbedarf bei der Verminderung der Treibhausgasemissionen. Biogene Flugkraftstoffe sind vor diesem Hintergrund besonders relevant, da es nicht ausreichend Optimierungspotenzial beim Verbrauch gibt und keine Alternativen zu kerosinbetriebenen Turbinen absehbar sind. Diese haben zudem auch sehr spezifische Ansprüche an die Kraftstoffeigenschaften.

2.6 Schlussfolgerungen

Biogene Kraftstoffe gelten als ein wichtiger Baustein für den Übergang in eine auf erneuerbare Energien basierende Energieversorgung. Der Einsatz der biogenen Kraftstoffe findet derzeit überwiegend als Beimischung zu den fossilen Kraftstoffen statt. Dadurch lassen sich auch die Unterschiede in den motorischen Eigenschaften abfedern. Die Verfahren die sich bislang durchgesetzt haben zeichnen sich durch verhältnismäßig einfache Konversions- und Aufbereitungstechnologien aus. Dabei werden allerdings sehr spezifische Rohstoffe benötigt, die Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion unterliegen. In der Entwicklung befinden sich gegenwärtig Verfahren, die eine deutlich breitere Rohstoffbasis einsetzen können und damit die Konkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion entschärfen. Die Nachfrage nach nachhaltigen Biokraftstoffen in einer umweltverträglichen Energieversorgung dürfte absehbar deutlich steigen.

Die dauerhafte Deckung dieser Nachfrage hängt damit einerseits von der systematischen Weiterentwicklung der Technologien und Prozessen und andererseits von der Etablierung umfassender Nachhaltigkeitsstandards in der Agrarproduktion ab.

Künftige biogene Kraftstoffe müssen daher international unter Einhaltung anspruchsvoller Nachhaltigkeitsanforderungen produziert werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Böhme und W. Dürrschmidt (2011): Erneuerbare Energien in Zahlen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- [2] International Energy Agency (IEA) (2011): Technology Roadmaps - Biofuels for Transport. International Energy Agency, Paris.
- [3] International Energy Agency (IEA) und Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2010): World Energy Outlook 2010, Paris.
- [4] F. Müller-Langer (2009): Alternative Kraftstoffe im Vergleich, DENA-Jahreskongress „energie. effizient. mobil“, Berlin.
- [5] L. Pelkmans, N. Devriendt, L. Goovaerts und P-P. Schouwenberg (2012): Prospective study: Implementation of sustainability requirements for biofuels and bioenergy and related issues for markets and trade: IEA Bioenergy/vito.
- [6] M. Schlesinger, D. Lindenberger und C. Lutz (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Basel/ Köln/ Osnabrück.

- [7] D. Thrän, K. Bunzel und U. Seyfert (2011): Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials. Status quo and options for specification. DBFZ Reprot Nr. 7. DBFZ, Leipzig.
- [8] Shell International BV (2008): Shell energy scenarios to 2050.
- [9] Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen vom 15. Juli 2009.
- [10] DBFZ (Deutsche Biomasseforschungszentrum) (2012): Focus on Biomethane Biomass for Energy. Leipzig.
- [11] Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG EU-Richtlinie 2009/28/EC.

3. Vergleich alternativer Antriebstechnologien Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug

Julia Michaelis, Patrick Plötz, Till Gnann, Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

3.1 Einleitung

Alternative Antriebe bieten Optionen zur Reduktion und Vermeidung von globalen Treibhausgasemissionen sowie lokalen Emissionen. Gleichzeitig ist die Automobilindustrie in vielen Ländern ein wichtiger Industriesektor [22]. Gerade der Elektromobilität, einschließlich der Brennstoffzellenfahrzeugtechnologie, wird hier in den nächsten Jahren eine sehr bedeutsame Rolle zugeschrieben. Die verschiedenen Antriebstechnologien unterscheiden sich dabei zum Teil deutlich in technischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Zum besseren Verständnis und zur genauen Einordnung der einzelnen Antriebsarten im Hinblick auf zukünftige gesellschaftliche, politische und wirtschaftliche Relevanz ist ein direkter Vergleich dieser Antriebstechnologien sinnvoll.

Elektrofahrzeuge können in zwei Untergruppen eingeteilt werden. Die erste, kann direkt durch Aufnahme von Elektrizität am Stromnetz geladen werden. Hierzu zählen insbesondere reine Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV) mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor. In diesem Beitrag werden parallele und serielle PHEV, letztere häufig nur als Range-Extender oder Range-Extended Electric Vehicle (REEV) bezeichnet, als gleicher Fahrzeugtyp betrachtet. Micro-, Mild- oder Vollhybride (HEV), die nicht am Stromnetz geladen werden können, werden nicht zu den Elektrofahrzeugen gezählt und im Folgenden

nicht betrachtet. Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) stellen die zweite Gruppe der Elektrofahrzeuge dar. Einige ausgewählte Eigenschaften zeigt hierbei Tabelle 3 anhand derer die verschiedenen Fahrzeugkonzepte für eine typische Auslegung eines Mittelklassefahrzeugs verglichen werden können.

Tabelle 3: Ausgewählte Eigenschaften verschiedener Antriebskonzepte.

Eigenschaft	Benzin-Fahrzeug	Plug-In Hybrid	Lithium-Ionen-Batteriefahrzeug	Brennstoffzellen-fahrzeug
Abkürzung	ICE	PHEV	BEV	FCEV
Energieinhalt (Tank)	445 kWh	200 + 10 kWh	24 kWh	140 kWh
Volumen (Tank)	50 Liter	25 + 50 Liter	90 bis 170 Liter	120 bis 180 Liter
Gewicht (Tank)	37 kg	20 + 100 kg	150 bis 250 kg (Zelle+System)	4+80 kg (Kraftstoff+System)
Reichweite	> 700 km	50 + 600 km	< 150 km	~400 km
„Tank“-Häufigkeit	Alle 2 Wochen	Jeden Tag + alle 2 Wochen	Alle 3 Tage voll, 30 % jeden Tag	Alle 1 bis 2 Wochen
„Tank“-Dauer	3 Minuten	3 Minuten + 2 Stunden	0,5-8 Stunden	3 Minuten

Deutlich wird hierbei, dass Brennstoffzellenfahrzeuge Nachteile gegenüber konventionellen hinsichtlich des Volumens und des Gewichts haben, während batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge zusätzlich die Probleme der beschränkten Reichweite und der erhöhten Ladedauer mit sich bringen. So beträgt der Energieinhalt eines Brennstoffzellenfahrzeugs nur ein Drittel dessen eines Verbrenners, bei einem durchschnittlichen BEV sogar nur fünf bis zehn Prozent. Das Volumen der Tanks der Elektrofahrzeuge liegt beim Zwei- bis Vierfachen, das Gewicht beim Zwei- bis Fünffachen dessen eines Verbrenners. Die Reichweite eines BEVs liegt bei 10 bis 20 % der

Reichweite eines verbrennungsmotorisch betriebenen Pkws, die Ladedauer kann bei bis zu acht Stunden im Vergleich zu einer dreiminütigen Betankung liegen. Auf einige dieser Aspekte wird im Folgenden eingegangen, insbesondere eine Gegenüberstellung hinsichtlich des Bedarfs und der Ausgestaltung an Infrastruktur, der Wirtschaftlichkeit der Antriebe und ihres ökologischen Potenzials ist in diesem Zusammenhang sinnvoll. Diese Aspekte sind entscheidend für die zukünftige Durchsetzung der Technologien am Markt, für mögliche politische Entscheidungen hinsichtlich einer Förderung durch die öffentliche Hand oder Schwerpunktsetzung bei einer Förderung.

Der Text ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 3.2 befasst sich zunächst mit der Klimabilanz der verschiedenen Antriebe. Der anschließende Abschnitt 3.3 stellt die Ausgestaltung und die Kosten für Infrastruktur für die drei Technologien genauer dar, bevor in Abschnitt 3.4 die Wirtschaftlichkeit der Technologien für einen „typischen“ Pkw aus Fahrersicht thematisiert werden. Eine zusammenfassende Diskussion in Abschnitt 3.5 rundet den Beitrag ab.

3.2 Ökologische Aspekte

3.2.1 Ökologische Bewertung auf Basis einer Well-to-Wheel Analyse

Die Analyse ökologischer Aspekte spielt bei der Untersuchung alternativer Antriebe eine entscheidende Rolle. Zum einen bieten diese Antriebsformen die Möglichkeit, Emissionen aus dem Verkehr nachhaltig und langfristig zu senken, zum anderen konnte gezeigt werden, dass die Umweltentlastung zu den entscheidenden Kaufargumenten bei potenziellen Erstkäufern zählt [33, S.28].

Zu den Aspekten, die bei der ökologischen Bewertung von alternativen Antrieben eine Rolle spielen, sind die Menge an Treibhausgasen und Luft-

schadstoffen zu zählen, die während des Lebenszyklus eines Fahrzeuges emittiert werden. Luftschadstoffe wirken eher kurzfristig und lokal und können durch technische Veränderungen an konventionellen Fahrzeugen gut verringert werden. Treibhausgase wirken hingegen langfristig und global und sind oft nur mit erheblichem technischen Aufwand zu mindern. Dementsprechend werden die Klimabilanzen verschiedener konventioneller und alternativer Antriebsformen im Folgenden gegenübergestellt, so dass daraus eine Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit abgeleitet werden kann [22, S.85].

Sowohl BEV, PHEV als auch FCEV können einen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen liefern, was insbesondere dann gilt, wenn die Kraftstoffproduktion CO₂-frei oder -arm erfolgt. Möglich ist dies, wenn Strom aus erneuerbaren Energiequellen zum Antrieb der Elektrofahrzeuge bzw. bei der Wasserelektrolyse zur Wasserstoffherstellung eingesetzt wird. Im Fall einer Kraftstoffherstellung, die zu 100 % erneuerbare Energien verwendet, dominieren i. d. R. die Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugproduktion die Emissionsbilanz der Fahrzeuge. Neue Fertigungsverfahren tragen jedoch dazu bei, die Emissionen auch bei der Herstellung zu senken. Darüber hinaus wirkt sich auch hier der steigende Anteil erneuerbarer Energiequellen am Strommix positiv auf die Emissionsminderung bei der Fertigung aus. Bei der Verwendung fossiler Energieträger zur Wasserstoffherstellung ohne CO₂-Abscheidung könnten die Emissionswerte hingegen die von konventionellen Fahrzeugen übersteigen [6, S.4].

Um verschiedene Antriebssysteme hinsichtlich ihres Emissionsausstoßes vergleichbar zu machen, erfolgt die Angabe der Emissionsmengen in g CO₂-Äquivalent/km. CO₂-Äquivalente geben die Klimawirksamkeit verschiedener Treibhausgase, zu denen neben Kohlendioxid (CO₂) auch Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) zählen, in relativer Wirkung zu CO₂ wieder [6, S.11].

Bei der Bewertung der Emissionsmengen kann der Fokus auf zwei verschiedene Sequenzen der Energiekettegelegt werden. Je nach Ansatz geht entweder nur die Vorkette der Kraftstoffbereitstellung (Ölgewinnung, Raffination bzw. Strom- und Wasserstoffherzeugung sowie Distribution) oder nur der Fahrbetrieb in die Analyse ein oder aber die Betrachtung umfasst die gesamte Energiekette von der Quelle bis zum Rad (Well-to-Wheel). Unterschieden werden drei Energieketten [6, S.XV]:

- Well-to-Tank (= Quelle-zu-Tank) Energiekette
- Tank-to-Wheel (= Tank-zu-Rad) Energiekette
- Well-to-Wheel (= Quelle-zu-Rad) Energiekette

Die Well-to-Wheel-Analyse beinhaltet somit einen ganzheitlichen Betrachtungsansatz, der als Grundlage für die Analyse die gesamte Energiekette auswählt. Sie stellt damit eine umfassende Lebenszyklusanalyse von Fahrzeugantrieben dar [35].

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Well-to-Wheel-Analyse bezüglich der Emissionswerte eines konventionellen Diesel- und Benzinfahrzeugs (ICE) mit denen eines BEV, PHEV und FCEV in Deutschland für das Jahr 2015 verglichen. Für die Strombereitstellung wurden zwei Szenarien gegenübergestellt: zum einen das Szenario „Strommix“, mit den CO₂-Emissionen des durchschnittlichen Strommixes in 2015 (nach [24]) und zum anderen das Szenario „REG“, das einen Anteil der regenerativen Energieträger am deutschen Strommix von 100 % unterstellt. Zudem wurden zwei Alternativen für den gasförmigen Wasserstofftransport untersucht: der Transport von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (*Compressed Gaseous Hydrogen* CGH₂) mit 50 MPa-Druckflaschentrailer und der Transport via Pipeline. Für alle Antriebsarten wurde ein Fahrzeug des Mittelklasse-Segments angenommen, dem beispielsweise der VW Golf zuzuordnen ist.

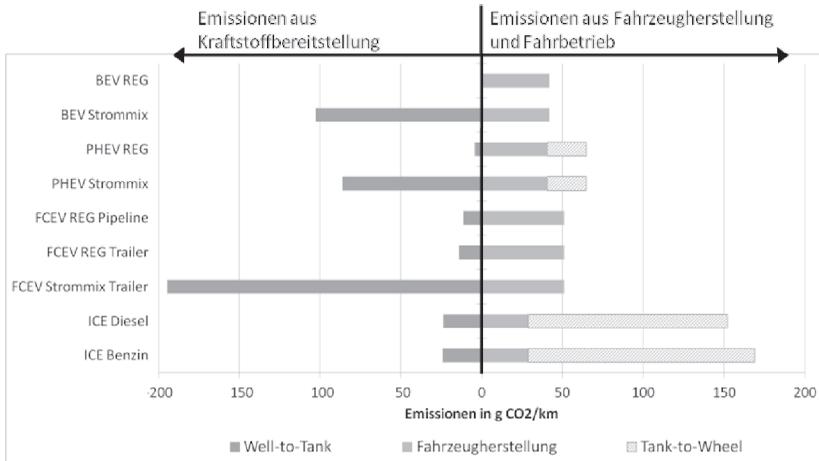


Abbildung 15: Emissionen der unterschiedlichen Antriebe Well-to-Wheel.

Anhand der Ergebnisse aus Abbildung 15 lässt sich zeigen, dass die Emissionen von einer Vielzahl an Faktoren abhängen. Die Well-to-Tank-Emissionen werden stark beeinflusst von der zugrundegelegten Stromherkunft: das Szenario „Strommix“ sorgt für deutlich höhere Emissionswerte bei der Kraftstoffherstellung als das Szenario „REG“, bei dem für das BEV die Well-to-Tank-Emissionen gänzlich verschwinden. Desweiteren lässt sich erkennen, dass die Fahrzeugherstellung bei allen alternativen Antriebsarten mit 41 bis 51 g CO₂-Äquivalent/km höhere Emissionswerte aufweisen als die konventionellen Antriebe mit 29 g CO₂-Äquivalent/km, was aus dem Umstand folgt, dass die Herstellung der BEV, PHEV und FCEV in der Regel Energie- und CO₂-intensiver ist [35, S.9]. Deutlich wird zudem, dass die BEV, FCEV und u. U. auch PHEV lokal emissionsfrei betrieben werden können, was den Haupttreiber für das positive Umweltimage darstellt, das mit alternativen Antrieben einhergeht. Auch der PHEV,

für den ein elektrischer Fahranteil von 80% unterstellt wird [16, S.131], liegt in der Nutzungsphase mit 24 g CO₂-Äquivalent/km deutlich unter den Emissionswerten der konventionellen Fahrzeuge, die 123 g CO₂-Äquivalent/km für Diesel- und 140 g CO₂-Äquivalent/km für Benzinfahrzeuge aufweisen. Zu beachten ist hierbei, dass die Well-to-Wheel-Emissionswerte des PHEV erheblich von dem zugrundegelegten elektrischen Fahranteil bestimmt werden. Würden alle Fahrten rein elektrisch zurückgelegt, hätte ein PHEV aufgrund der geringeren Batteriekapazität und damit geringeren Herstellungsaufwendungen sogar eine bessere Klimabilanz als ein BEV [12, S.83].

3.2.2 Abhängigkeit der Klimabilanz von der Fahrleistung

Die höheren Emissionswerte, die aus der Fahrzeugherstellung bei alternativen Antrieben resultieren, werden auch als „ökologischer Rucksack“ der alternativen Antriebe bezeichnet. Sie können jedoch wegen der geringeren CO₂-Emissionen während der Fahrzeugnutzung (Lebenszyklus) und durch eine hohe Fahrleistung kompensiert werden. Wie Abbildung 16 zeigt, liegen die Emissionswerte für ein konventionelles Dieselfahrzeug bis zu einer Fahrleistung von ca. 15.000 km unter den Emissionswerten des BEV, der mit rein regenerativ erzeugtem Strom betrieben wird. Außerdem wird deutlich, dass beim FCEV die Stromherkunft einen erheblichen Einfluss hat; so bleibt beispielsweise ein FCEV bei einer Wasserstoffproduktion aus konventionellem Strommix immer über dem Emissionslevel des Dieselfahrzeugs, während ein FCEV, das Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen verwendet, ab ca. 30.000 km die Emissionswerte des Dieselfahrzeugs unterbietet.

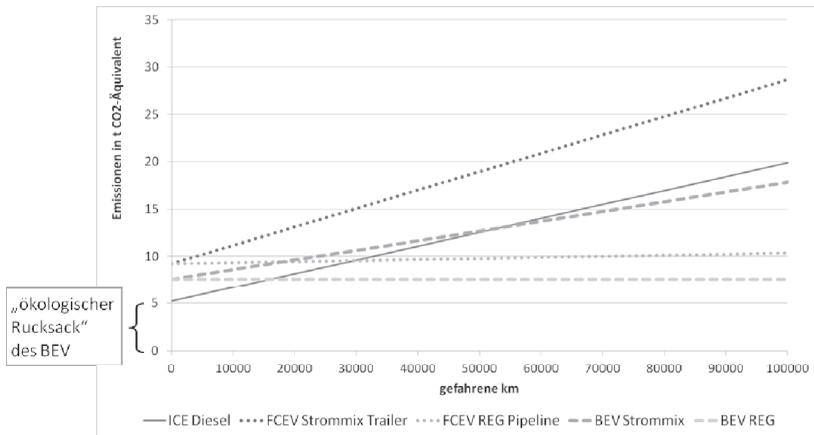


Abbildung 16: Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebsarten in Abhängigkeit der gefahrenen Kilometer.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine deutliche Senkung der Treibhausgasemissionen und somit eine positive Klimabilanz im Verkehrssektor nur durch den Ausbau erneuerbarer Energiequellen zu erzielen ist. Wird der deutsche Strommix angenommen, ergeben sich für BEV und PHEV nur marginal kleinere und für FCEV sogar höhere Emissionswerte im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen. Unter Annahme einer Stromproduktion, die zu 100 % auf regenerativen Energien beruht, stoßen jedoch alle alternativen Antriebsformen deutlich weniger Emissionen aus als die konventionellen Benzin- und Dieselfahrzeuge. Ein BEV schneidet hierbei aufgrund geringerer Emissionsmengen bei der Well-to-Tank Energiekette und der Fahrzeugherstellung besser ab als ein FCEV. Für einen PHEV muss die Berechnung der Emissionen stets in Abhängigkeit des zugrundegelegten elektrischen Fahranteils gesehen werden. Für den hier angenommenen elektrischen Fahranteil von 80 % liegen die Emissionswerte des PHEV knapp über denen des FCEV. Sollen zukünftig die alternativen Antriebssysteme mit regenerativem Strom versorgt werden, muss je-

doch beachtet werden, dass beim Ausbau der regenerativen Energieträger zusätzliche Kapazitäten geschaffen werden, die keine Nutzungskonkurrenzen zwischen dem Verkehrssektor und anderen Wirtschaftsbereichen entstehen lassen. Zur besseren Integration der erneuerbaren Energien kann zudem ein zeitflexibles Aufladen der Fahrzeuge (Lastmanagement) beitragen, das sich nach der Verfügbarkeit von Wind- und Sonnenenergie richtet und die Klimavorteile der alternativen Antriebe somit zusätzlich unterstützt [22, S.92].

3.3 Infrastruktur

3.3.1 Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

BEV und PHEV, wie sie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurden, benötigen für ihren Antrieb elektrischen Strom, den sie aus dem Stromnetz „tanken“. Hierbei unterscheidet man üblicherweise verschiedene Arten von Ladetechnologie, den Ort der Ladung, die Anschlussleistung und bezüglich ungesteuerter oder gesteuerter (intelligenter) Ladung, die eventuell eine Rückspeisung ermöglicht.

Als Ladetechnologien für Elektrofahrzeuge stehen das konduktive und das induktive Laden sowie der Batterietausch als Optionen zur Verfügung. Weiterhin unterscheidet man nach Onboard- und Offboard-Systemen zur Spannungsgleichrichtung und zwischen stationärem oder dynamischem Laden bezüglich der Induktion [16]; [25]. Als derzeit dominante Option wird das konduktive Laden mit Kabel angesehen, da es bereits vielerorts verfügbar und im Vergleich am kostengünstigsten installiert und betrieben werden kann [17]; [32].

Hinsichtlich des Ladeortes wird üblicherweise unterschieden nach privaten, halböffentlichen und öffentlichen Lademöglichkeiten [4]; [34]. Als private Lademöglichkeiten werden solche bezeichnet, die in einer Garage oder einem Stellplatz, also bei Privatpersonen, zur Verfügung stehen.

Halböffentliche Lademöglichkeiten sind nur für bestimmte Nutzergruppen zugänglich, z. B. am Arbeitsplatz oder auf dem vereinseigenen Parkplatz an einem Sportzentrum. Öffentliche Ladeinfrastruktur hingegen steht jedem im öffentlichen Raum zur Verfügung, also in Parkhäusern oder am Straßenrand. In neueren Veröffentlichungen wird auch von gewerblichen Lademöglichkeiten gesprochen, die Fahrzeugen des Wirtschaftsverkehrs als Pendant zur primären privaten Lademöglichkeit für Privatnutzer zur Verfügung stehen (siehe z.B. [20, S.21]).

Die Anschlussleistung stellt ein weiteres Unterscheidungsmerkmal dar, wozu vier Kategorien (Modi 1-4) unterschieden werden [8]. In Modus 1 wird hier mit bis zu 3,7 Kilowatt (kW; entspricht 230 Volt (V) multipliziert mit 16 Ampere (A)) über ein einphasiges Kabel geladen, wozu einfache Schuko-Stecker verwendet werden können. Modus 2 erlaubt eine Ladung mit 22,2 kW (400 V Leiterspannung, 32 A Strangstrom)⁴, wenn entsprechende Stecker mit Pilotkontakt eingesetzt werden, die die Steckdose freischalten. Stecker ohne Schutzkontakt werden von 32 A auf 16 A (11,1 kW) heruntergeregelt. In Modus 3 ist die Ladung mit bis zu 250 A mit 400 V (173 kW) möglich, wobei größere Kabel- und Kontaktdurchmesser im Stecker verwendet werden müssen. Eine Verwendung niederklassiger Stecker ist möglich, reduziert jedoch die Spannung auf die darunterliegende Klasse. Modus 3 ermöglicht zudem die digitale Kommunikation, womit ein gesteuertes Laden gewährleistet werden kann. Während in den Modi 1-3 Wechselstrom zum Einsatz kommt, wird in Modus 4 Gleichstrom mit bis zu 400 A (276,8 kW) zur Schnellladung verwendet. In Deutschland scheint sich ein Standardisierungsvorschlag des VDE weitestgehend durchgesetzt zu haben [30]: Hier wird auf der untersten Leistungsebene von 3,7 kW, auf der zweiten von 11,1 kW, auf der dritten 22,2 kW und auf der obersten Ebene von 43,6 kW gesprochen. Die unteren drei Spannungsebenen sollen

⁴ Aufgrund des dreiphasigen Drehstromanschlusses wird die Leistung mit $\sqrt{3}$ multipliziert.

zum herkömmlichen Laden verwendet werden, die oberste zur sogenannten Schnellladung (i. d. R. mit Gleichstrom).⁵ Hier können laut verschiedenen Herstellern technisch noch höhere Leistungen genutzt werden (siehe [27]). Die Degradation der Batterie aufgrund hoher Ladeleistung sowie die hohen Kosten der Schnellladestationen stellen jedoch bislang mögliche Hindernisse dar [16, S.32, 33, 66-74]. An privaten Stellplätzen wird üblicherweise von einer möglichen Ladeleistung von 3,7-11,1 kW ausgegangen, an allen anderen Ladeorten ist eine Ladung ab 11,1 kW in Diskussion, wobei die EV individuell ihre Ladeleistung unterhalb der Maximalleistung vorgeben können (siehe z. B. [16], S.27–31).⁶

Die gesteuerte Ladung von Elektrofahrzeugen kann helfen, potenzielle Lastspitzen in den Abendstunden zu vermeiden, die entstünden wenn eine große Zahl an Nutzern gleichzeitig oder nach dem letzten Weg des Tages laden würde [32]. Die einfachste Steuerung ist eine einfache zeitliche Verzögerung (durch einfache Zeitschaltungen oder Steuersignale, wie sie bereits heute bei HT/NT-Tarifen⁷ üblich sind). Auch eine direkte Steuerung der Ladelast wäre denkbar, ist aber erheblich komplizierter. Eine weitere Ausbaustufe würde dann die Möglichkeit des Rückspeisens der Energie aus der Fahrzeugbatterie ins Netz bieten um dieses zu entlasten [15]. Allerdings sind hierfür Ladegeräte mit bidirektionaler Kommunikation notwendig. Technisch möglich ist auch die Zwischenspeicherung von Überschussstrom in Elektrofahrzeugen, jedoch bedarf dies einer ausreichend hohen Zahl von Fahrzeugen, die einen Teil ihrer Kapazität im Netz zur Verfügung stellen [7].

⁵ In [10, S.57] wird anstatt der Untergliederung in Schnellladung die intuitivere Unterteilung nach Leistungsklassen vorgeschlagen.

⁶ 3,7 kW sind ein theoretischer (und von 3,68 aufgerundeter) Wert; insbesondere im Altbau sind 3,5 kW als Obergrenze realistischer.

⁷ HT = Hauptzeit, NT = Nebenzeit

3.3.2 Ladeinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge

Die Ladeinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge ist hinsichtlich der Technologie einheitlicher im Vergleich zu der für Elektrofahrzeuge, jedoch ist der Transport von Wasserstoff komplizierter, da es als Gas leicht flüchtig ist. Wasserstoff für industrielle Anwendungen ist mit weltweiten jährlichen Produktionszahlen von ca. 700 Mrd. Nm³ ein stark genutztes Industriegas, insbesondere in der Chemieindustrie. [13, S.1] Hierbei wird Wasserstoff entweder produziert und direkt wieder verbraucht oder entsteht als Nebenprodukt in Industrieprozessen. Die Herstellung und Verwendung von Wasserstoff in rein energetischen Anwendungen wie der Mobilität ist bisher nicht verbreitet und muss erst aufgebaut werden – dies stellt gegenüber der Nutzung von Fahrstrom einen wesentlichen Unterschied dar. Deshalb wird hierauf kurz eingegangen.

Zur Erzeugung von Wasserstoff kommen im Wesentlichen drei Verfahren in Frage: die Elektrolyse, die Dampfreformierung oder die Vergasung von Biomasse oder Kohle [2, S.277-278]. Bei der Elektrolyse wird Wasser (H₂O) mit Hilfe von elektrischem Strom in seine Bestandteile Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) zerlegt, die an der Kathode, bzw. Anode entstehen. Die Dampfreformierung ist das derzeit meistgenutzte Verfahren in der chemischen Industrie, bei der leichte Kohlenwasserstoffe (z.B. Naphtha, Methan oder auch Biogas) mit Katalysatoren in Wasserstoff umgesetzt werden [31, S.318-319]. „Die Vergasung eines Festbrennstoffs [...] lässt sich in die Teilschritte Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung untergliedern“ [31, S.320]. Es existieren zudem weitere Verfahren zur Wasserstoffherzeugung (vgl. [2]; [31, S.315-327]), jedoch ist davon auszugehen, dass hauptsächlich die drei beschriebenen Verfahren bis zum Jahr 2030 eingesetzt werden [2, S.303]. In der Anfangsphase wird zudem auf die Wasserstoffmengen zurückgegriffen, die als Nebenprodukt in der Industrie entstehen, da hier die Wasserstoffnachfrage noch relativ gering ist.

Prinzipiell kann man vier Transportmöglichkeiten von der Produktionsquelle zur Tankstelle unterscheiden: den Transport von Flüssigwasserstoff per Lkw, den Transport von gasförmigem Wasserstoff per Lkw, den Transport von gasförmigem Wasserstoff per Pipeline oder den Transport des Primärenergieträgers mit anschließender Produktion des Wasserstoffs on-site direkt an der Tankstelle (vgl. z.B. [26, S.107]).⁸ Der Transport von großen Mengen an gasförmigem Wasserstoff per Lkw ist nur für kurze Strecken (< 200 km) geeignet, da die Transportkapazität eines CGH₂-Trailers nur etwa 0,5 t bis 0,95 t (abhängig vom Druck) beträgt, während der kapitalintensivere Flüssigwasserstoff Transportkapazitäten von etwa 3,5 t zulässt [3, S.329, 334-335]; [6, S.68-71]⁹. Für große Entfernungen stehen bereits heute weltweit Wasserstoff-Pipelines von 16.000 km Gesamtlänge zur Verfügung, die vor allem in der Chemieindustrie genutzt werden [3, S.323]. Auch die Nutzung des Erdgasnetzes zum Wasserstofftransport ist denkbar, die Auslegung des bestehenden Erdgasnetzes ist jedoch hinsichtlich der Energietransportkapazität für Wasserstoff ungünstiger als für den Transport von Erdgas [3, S.326-327].

3.3.3 Vergleich der notwendigen Ladeinfrastruktur

Im folgenden Abschnitt soll die Ladeinfrastruktur von Brennstoffzellenfahrzeugen und Elektrofahrzeugen hinsichtlich der Technologie, bezüglich der Kosten und in Bezug auf die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten zum heutigen Zeitpunkt und in Zukunft eingegangen werden.

⁸ Zur Verdichtung und Verflüssigung von Wasserstoff siehe [31, S.327-329] und [3, S.322-323, 329-334].

⁹ Für 100 Kilometer Fahrstrecke benötigt ein Mittelklassefahrzeug etwa 1 kg Wasserstoff, ein Lkw etwa das Dreifache. Bei Entfernungen von über 200 km würde der Lkw also bereits mindestens 6 kg Wasserstoff benötigen, also rund 1 % seines gesamten Tankinhalts, was ihn nicht mehr wirtschaftlich werden lässt.

In einem Technologievergleich lässt sich feststellen, dass die Schwierigkeiten für Wasserstoff eher in der Herstellung und im Transport liegen, während für Elektroladesäulen der Ort der Ladung und weitere technische Details bei der Ladung von Bedeutung sind. Dies hängt zum einen mit der unterschiedlichen Ladedauer zusammen, da die Ladedauer der Brennstoffzellenfahrzeuge vergleichbar ist zu der von konventionell betriebenen Fahrzeugen, während Elektrofahrzeuge auch bei Schnellladestationen mit 100 kW etwa zwölf Minuten für eine komplette Aufladung eines Fahrzeugs mit einer (Netto-) Batteriekapazität von 20 kWh benötigen. Zum anderen wird die Wasserstoffinfrastruktur zentral zur Verfügung stehen, wie heute bei Tankstellen für Benzin und Diesel, während Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge einen dezentralen Ansatz mit vielen Lademöglichkeiten an unterschiedlichen Ladeorten setzt. Auch aufgrund der Ladezeit wird eine höhere Dichte von Lademöglichkeiten für Elektroautos von Nöten sein. Hier sollte aber auch die heimische Steckdose mitgezählt werden, die – wenn verfügbar – wohl das einfachste Laden darstellt (abends einfach einstecken vs. „Umweg fahren“ zur Tankstelle bei konventionellen Fahrzeugen bzw. FCEV).

Die Standardisierung ist für Wasserstoff in ISO und SAE (z.B. bei Anschlüssen) schon weiter als bei Elektrofahrzeugen, auch wenn hier bei beiden Antriebstechnologien noch viel zu tun ist [10, S.6-9].

Hinsichtlich der Kosten gestaltet sich ein Vergleich schwierig, da die Kosten einer Elektro-Ladesäule kaum mit denen einer Wasserstofftankstelle vergleichbar sind, zumal dies wiederum vom Durchsatz an Fahrzeugen, respektive der Ladedauer, abhängt. Tabelle 4 zeigt exemplarisch die Investitionen pro elektrischem Ladepunkt und die einer Wasserstofftankstelle sowie die ungefähren Kosten für Anschluss, Wartung und einer Tankfüllung.

Tabelle 4: Vergleich der Kosten von Elektro- und Wasserstoffinfrastruktur.

Elektrischer Ladepunkt			
Typ	Investition pro Ladepunkt¹⁰	Fahrzeuge pro Tag¹¹	Investition pro Fahrzeug
Privat (ungesteuert)	~100 €	1	100 €
Privat (Wallbox)	~400 €	1	400 €
Halböffentlich (11 kW)	~2.500 €	2	1.250 €
Öffentlich (22 kW)	~5.000 €	5	1.000 €
Schnellladesäule	~40.000 €	25	1.600 €

Wasserstofftankstelle			
Investition Tankstelle (klein)	600.000 €	70-100	6.000-8.500 €
Investition Tankstelle (mittel)	1.100.000 €	150-250	4.400-7.300 €
Investition Tankstelle (groß)	1.600.000 €	450-600	2.700-3.500 €

Man erkennt deutlich, dass die Investitionen eines elektrischen Ladepunktes stark vom Ort abhängen, sie jedoch um ein Vielfaches geringer als die einer Wasserstofftankstelle sind. Die höheren Investitionen für Wasserstofftankstellen können sich jedoch über den höheren Umsatz bei einer Tankfüllung und den potenziell höheren Durchsatz aufgrund der kürzeren Ladedauer tragen – bezogen auf die Fahrzeuge pro Tag liegen die Investitionen im Bereich der öffentlichen elektrischen Ladesäulen.

Aktuell sind in Deutschland eine Vielzahl von privaten Lademöglichkeiten vorhanden¹², während die Zahlen im halböffentlichen und öffentlichen Bereich nicht detailliert erfasst sind. Die Vielzahl der ersten Ladestationen stammt aus dem BMVBS-Projekt „Elektromobilität in Modellregionen“, in dem 613 private, 488 halböffentliche und 836 öffentliche Lade-

¹⁰ Investitionen aus [6]; [10, S.53-55]; [16, S.31-35]; [20].

¹¹ Annahmen aus [16]; [18, S.21].

¹² Laut [5] und [14] verfügen zwischen 71 % und 96 % (je nach Gemeindegröße) über eine Garage oder einen Stellplatz am Haus. Hier kann man davon ausgehen, dass in vielen Fällen eine Steckdose erreichbar ist.

punkte zwischen 2009 und 2011 installiert wurden [19]. In Deutschland gibt es derzeit etwa 20 Wasserstofftankstellen die teilweise öffentlich zugänglich sind [28]. Die European Expert Group on Future Transport Fuels sieht bis 2020 etwa 2.000 Wasserstofftankstellen europaweit vor, was ähnlich zu den Annahmen anderer Quellen ist [1, S.385-453]; [10, S.28, 55]; [26, S.175–179, 181, 182]. Hinsichtlich der Ladesäulen für Elektrofahrzeuge existieren bislang keine Ausbauszenarien, jedoch sind sich verschiedene Quellen einig, dass für die Erstnutzer der Elektromobilität die heimischen Lademöglichkeiten größtenteils ausreichend sind, da deren Fahrzeuge ausreichend lange zu Hause stehen und sich ein weiterer Ausbau nur mit entsprechenden Fahrzeugzahlen rentiert, während halböffentliche Ladesäulen, z. B. am Arbeitsplatz im nächsten Schritt adressiert werden müssen [10, S.23-27]; [16]. Das Risiko eines Aufbaus einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge ist laut [21, S.25] geringer.

Es bleibt festzuhalten, dass BEV verschiedene Möglichkeiten der Ladeinfrastruktur nutzen können, im ersten Schritt aber primär privat laden werden. Wasserstofffahrzeuge benötigen Infrastruktur analog zu den heutigen Tankstellen für fossile Kraftstoffe, die jedoch mit einigem Aufwand für den Transport und dem Tankstellenbau verbunden sind. Der kapitalintensive Wasserstofftankstellenaufbau verbunden mit einer geringen Auslastung der Tankstellen führt zu hohen spezifischen Kosten, wodurch für Wasserstoff tatsächlich ein Henne-Ei-Problem besteht, das ein Industriekonsortium im Rahmen des Projektes H2Mobility zu lösen versucht [1]; [29].

Die in diesem Abschnitt ausgesparten PHEV werden hauptsächlich an der privaten Ladeinfrastruktur laden oder die Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz nutzen. Eine dezidierte eigene Ladeinfrastruktur benötigen sie nicht, da sie die der reinen Batteriefahrzeuge nutzen können oder herkömmliche Tankstellen zurückgreifen.

3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die derzeitigen doch recht geringen Verkaufszahlen von BEV in Deutschland (541 im Jahr 2010 und ca. 4500 in 2011) zeigen, dass die heutigen Fahrzeuge und Rahmenbedingungen noch nicht so sind bzw. wahrgenommen werden, dass die politisch gesetzte Zahl von einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 sicher erreicht wird. Auch weltweit sind die bisherigen Verkaufszahlen eher ernüchternd, verglichen mit den Prognosen, die noch vor ein bis zwei Jahren angestellt wurden [22].

Neben dem Prestigeeffekt und Komfortgewohnheiten und weiteren Faktoren spielen die Kosten für Erwerb und Nutzung eines Fahrzeuges für potenzielle Käufer eine wichtige Rolle bei der Entscheidung über den Kauf. Viele Entscheidungen bei der Wahl zwischen verschiedenen Kraftstoff- und Antriebssystemen weisen darauf hin, dass Wirtschaftlichkeitserwägungen die Entscheidung wesentlich beeinflussen. So fahren in Deutschland Diesel-Pkw im Durchschnitt 22.300 km im Jahr, während Benzin-Pkw im Schnitt jährlich nur 11.800 km zurücklegen [14, S.164] – d. h. ihre Fahrprofile korrelieren mit ihrer Wirtschaftlichkeit unter den in Deutschland vorhandenen Bedingungen. Dennoch ist dieser Zusammenhang nicht ganz so einfach: alternative Kraftstoffe tun sich trotz geringer Betriebskosten schwer – wie beispielsweise die Nachfrage nach Erdgasfahrzeugen zeigt [9] – oder auch die Nachfrage nach großen Fahrzeugen mit großer Motorisierung. Dennoch spielt die Wirtschaftlichkeit einer Antriebstechnologie für viele Kundengruppen eine wichtige Rolle. Im vorliegenden Abschnitt soll die zeitliche Entwicklung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Antriebstechnologien exemplarisch für ein Mittelklassefahrzeug in Abhängigkeit der Fahrleistung untersucht werden.

3.4.1 Methodik

Im Folgenden werden die Anschaffungs- und Betriebskosten der alternativen Antriebe BEV, PHEV, FCEV sowie der konventionellen Fahrzeuge betrachtet und Wirtschaftlichkeitsberechnungen dargestellt. Für eine sinnvolle Einschätzung der Gesamtkosten von Elektrofahrzeugen werden die Gesamtlebenskosten (TCO – total cost of ownership) betrachtet. Diese setzen sich zusammen aus Fixkosten (z. B. die Anschaffung des Fahrzeugs) und laufenden Kosten (z. B. für den Verbrauch). Typischerweise sind Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (ICE) teurer in der Anschaffung, aber günstiger in den laufenden Kosten. Die hohen Anschaffungsausgaben werden wesentlich durch die Batterie- bzw. Brennstoffzellenpreise bestimmt. Erstere liegen heute noch bei rund 600 bis 800 €/kWh und es wird erwartet, dass sie unter 300 €/kWh sinken werden [22]. Details zur methodischen Vorgehensweise, der Datengrundlage und Berechnung finden sich in [23]. Wie bei BEV wird die Wirtschaftlichkeit bei FCEV vom Antriebsstrang dominiert. Ziele die hier erreicht werden müssen sind:

- Senkung der Brennstoffzellen-Systemkosten auf unter 100 €/kW_{el}.
- Platinbelegung von ca. 10 g für 93 kW_{el} (heute: 80 g)
- Lebensdauer von mehr als 5.000h (heute ca. 2.500 bis 3.000 h)

Diese Verbesserungen können prinzipiell durch Skaleneffekte und weitere Forschung und Entwicklung erreicht werden. Der genaue Zeitpunkt zu dem diese oder ähnliche Werte für Brennstoffzellen erreicht werden können ist aber derzeit noch unsicher. Für die konkreten Rechnungen im folgenden Abschnitt wurde auf eher optimistische Kostensenkungsannahmen der Literatur zurückgegriffen.

3.4.2 Zeitliche Entwicklung der Wirtschaftlichkeit

Bei der Betrachtung der Kosten die durch Fahrzeugkauf und -betrieb entstehen sind sowohl die zurückgelegte Jahresfahrleistung und das Fahrprofil als auch die zukünftige Entwicklung der Batterie- und Treibstoffkosten von großer Bedeutung. Wir betrachten daher in diesem Abschnitt drei äquidistante Zeitpunkte (2012, 2021 und 2030, also jeweils neun Jahre Differenz für bessere Vergleichbarkeit) sowie verschiedene Jahresfahrleistungen. Die TCO wird gemäß dem Vorgehen in [23] berechnet. Dabei wird ein Diskontierungszeitraum von acht Jahren bei einem Zinssatz von 4 % verwendet. Die weiteren Annahmen zu den Antrieben sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die TCO p. a. werden zu einfacheren Vergleichbarkeit auf einen Tag umgelegt, d. h. durch 365 geteilt. Dies hat weiterhin den Vorteil, dass die begrenzte Reichweite reiner Batteriefahrzeuge (ausgehend von Ladung des Fahrzeugs ausschließlich über Nacht) explizit dargestellt werden kann.

Insgesamt geht ein potentieller Käufer im jeweiligen Jahr davon aus, dass die Kraftstoff- und Batteriepreise konstant bleiben, und prüft, welcher der Fahrzeugtypen für ihn der günstigste sein wird. Zusätzlich ist beachten, dass alle Preise inklusive Mehrwertsteuer von 19 % zu verstehen sind. Die Betrachtung gilt daher eher für private Käufer.

Tabelle 5: Parameterwerte für TCO Berechnungen nach [6]; [11]; [12] sowie eigene Annahmen.¹³

Investition Fahrzeug ohne Batterie [Euro]	2012	2030	Änderung p.a.	
ICE	23.276	23.276	0,00%	
BEV	25.757	23.964	-0,40%	
PHEV	26.654	25.069	-0,34%	
FCEV	51.664	31.045	-2,79%	
Fahrzeugtyp	ICE	BEV	PHEV	FCEV
Batteriegröße [kWh]	0	24	10	1,6

Preise	2012	2021	2030	Änderung p.a.
Batterie [Euro/kWh]	800	477	250	-6,26%
Benzin [Euro/l]	1,600	1,88	2,285	2,0%
Strom [Euro/kWh]	0,200	0,217	0,239	1,0%
H2 [Euro/kWh]	0,205	0,222	0,245	1,0%

Verbrauch	2012	2030	2012	2030	Änderung p.a.
	[l/100km]	[l/100km]	[kWh/km]	[kWh/km]	
ICE	6,88	5,17	0,615	0,462	-1,58%
BEV	2,36	1,98	0,211	0,177	-0,99%
PHEV-elektrisch	2,36	1,98	0,211	0,177	-0,99%
PHEV-Verbrenner	5,00	4,00	0,447	0,358	-1,23%
FCEV	2,61	2,60	0,233	0,233	-0,0%

Die Ergebnisse der TCO Berechnung für die Jahre 2012, 2021 und 2030 sind in Abbildung 17 gezeigt.

¹³ Eingangsgrößen sind schwarz, berechnete Größen grau dargestellt. Heizwert von Benzin wird als 8,9 kWh/l angenommen [6].

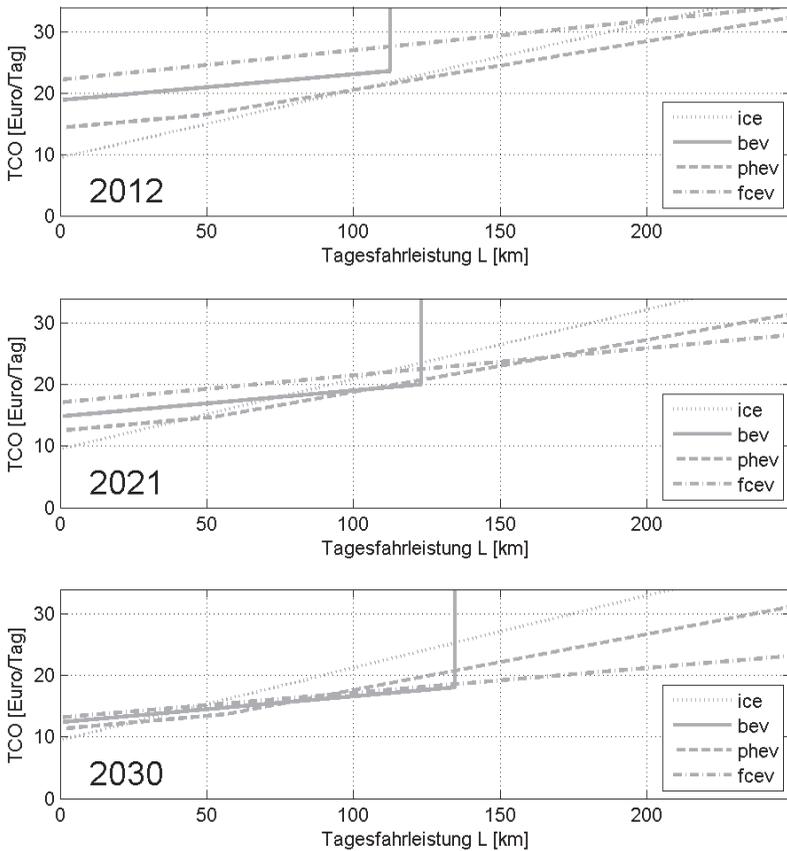


Abbildung 17: TCO pro Tag für die verschiedenen Antriebstechnologien ICE, BEV, PHEV und FCEV in Abhängigkeit von der Tagesfahrleistung.

Man erkennt deutlich, dass die alternativen Antriebe mit höheren Investitionen beim Kauf verbunden sind (höhere Anfangswerte der Kurven bei einer Tagesfahrleistung $L=0$ km) aber niedrigere Betriebskosten aufweisen (niedrigere Steigung der Gerade als Funktion von L). Das heißt ab einer gewissen Fahrleistung sind alternative Antriebe in den Gesamtkosten güns-

tiger als konventionelle Fahrzeuge. Im Vergleich der einzelnen Jahre erkennt man deutlich, dass die betrachteten alternativen Antriebe unter den hier getroffenen Annahmen heute (2012) nicht wirtschaftlich sind. Mit sinkenden Batterie- und Brennstoffzellenpreisen sowie steigenden Benzin- und Dieselkosten sollte es aber in den kommenden Jahren wirtschaftlich interessante Bereiche geben. Dies sind insbesondere PHEV für Personen mit hohen Jahresfahrleistungen und dann auch für FCEV für Personen mit hohen Fahrleistungen. Noch später, ab 2030, können auch reine Batteriefahrzeuge für Personen mit hohen Jahresfahrleistungen wirtschaftlich attraktiv werden und vermehrt auch Brennstoffzellenfahrzeuge. Hierbei ist allerdings einzuschränken, dass die begrenzte Reichweite von Elektrofahrzeugen eine wichtige Beschränkung darstellt. Fahrer müssten täglich viel fahren, aber nie oder (falls nicht zusätzlich geladen werden kann) nur sehr selten sehr lange Strecken die größer sind als die elektrische Reichweite des Fahrzeugs. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen gelten die Ergebnisse nur unter Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Entwicklung der Kosten für Brennstoffzellen. Diese lassen sich heute noch schlecht abschätzen, da bisher kaum oder keine Fahrzeuge kommerziell verfügbar sind.

3.4.3 Diskussion der Wirtschaftlichkeit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für alle drei hier betrachteten alternativen Antriebe hohe Jahresfahrleistungen nötig sind, um die höheren Anschaffungskosten dieser Fahrzeuge über die geringeren laufenden Kosten zu amortisieren. Die genaue Antwort auf die Frage nach der Wirtschaftlichkeit hängt dabei auch stark vom betrachteten Zeitraum ab. Trotzdem lässt sich sagen, dass alternative Antriebe durch die sinkenden Batteriepreise und steigenden Kraftstoffpreise in den nächsten Jahren wirtschaftlich vor allem für Vielfahrer interessant werden können. Wesentliche Unterschiede zwischen den Technologien sind hierbei die folgenden: Für FCEV sind sehr hohe Jahresfahrleistungen nötig, das heißt im Bereich der Reiselimou-

sinen könnte es Marktsegmente geben.¹⁴ PHEV sind interessant bei mittleren bis hohen Jahresfahrleistung und BEV sind bei den hier angenommenen Parameterentwicklungen nur in einem kleinen Fenster mit hohen Jahresfahrleistung und regelmäßigen Strecken wirtschaftlich.

Außerdem können die Fahrzeuge mit alternativen Antrieben wegen ihrer geringen Betriebskosten auch gerade für gewerbliche Halter durch die zum Teil recht hohen Jahresfahrleistungen auch ökonomisch sehr attraktiv sein. Mobilitätshebungen in Deutschland haben gezeigt, dass gewerblich gehaltene Fahrzeuge zum Teil deutlich höhere Jahresfahrleistungen aufweisen als privat gehaltene Fahrzeuge [35]. Unter der Annahme, dass ökonomische Erwägungen (im Sinne der *total cost of ownership*) für die rein gewerblichen Käufer von Kraftfahrzeugen eine größere Rolle spielen als für private Käufer, könnten Elektrofahrzeuge von gewerblichen Haltern auch trotz hoher Anschaffungskosten erworben werden. Gleichzeitig sind die Preise für eine ökonomische Betrachtung wie oben geschehen für gewerbliche Halter unter Umständen andere, da diese günstigere Industriestrompreise verwenden können. Für eine derartige Betrachtung müssen verschiedene Wirtschaftsbranchen mit ihren Anforderungen an Fahrzeugeigenschaften, zum Beispiel Ladevolumen und Ladegewicht, aber auch ihre Fahrprofile detailliert untersucht werden. Die Heterogenität des Wirtschaftsverkehrs verbietet hier allerdings pauschale Aussagen.

3.5 Zusammenfassung und Fazit

Die Elektromobilität einschließlich der Brennstoffzellenfahrzeuge kann in den nächsten Dekaden eine wichtige Rolle spielen. Ein wesentlicher Grund ist der Klimaschutz. Wenn das 2-Grad-Szenario der Klimaerwärmung

¹⁴ Diese sind allerdings keine Mittelklassefahrzeuge und müssten gesondert betrachtet werden und ein direkter Vergleich mit Dieselfahrzeugen wäre nötig, in diesem Bereich vor allem einsetzt werden und effizienter sind als die hier betrachteten Benzinfahrzeuge.

erreicht werden soll, dann muss der Verkehrssektor trotz der zukünftig erwarteten weiter stark steigenden Verkehrsleistung deutlich zur Senkung der Treibhausgase in einem Maße beitragen, der durch Verbrennungsmotoren auf Basis fossiler Rohstoffe nicht leistbar ist. Elektrofahrzeuge können hier bei entsprechender Herstellung des Stromes bzw. des Wasserstoffes aus CO₂-freien oder armen Quellen einen wichtigen Beitrag im Individualverkehr leisten. Dies gilt auch bei der Berücksichtigung des höheren ökologischen Rucksackes, den diese Fahrzeugtechnologien in der Herstellung gegenüber den konventionellen Fahrzeugen mitbringen – allerdings nur dann, wenn diese Fahrzeuge eine entsprechende jährliche Fahrleistung haben. Ein zweiter Grund ist die Verknappung der Ölreserven, die einen Umstieg auf Alternativen in den nächsten Jahren notwendig machen könnte. Somit ist die Elektromobilität der Kernhebel für eine nachhaltige Mobilität in der Zukunft.

Zwischen Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen gibt es beim Aufbau der Infrastruktur deutliche Unterschiede. Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erfolgt zentral und ist kapitalintensiv, was gerade in den ersten Jahren durch eine Unterauslastung eine wirtschaftliche Herausforderung darstellt. Bei Batteriefahrzeugen wird der Ladeprozess auf längere Sicht überwiegend zu Hause oder im halböffentlichen Bereich stattfinden, wobei diese Infrastruktur häufig schon besteht bzw. mit vergleichbar geringen Kosten aufgebaut werden kann. Generell ist allerdings zu bilanzieren, dass bei einer entsprechenden Auslastung beide Infrastruktursysteme keinen großen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit haben und in einer ähnlichen Größenordnung liegen können.

Für einen Markterfolg müssen allerdings noch eine Reihe weiterer Herausforderungen gelöst werden. Den Schlüssel nehmen dabei wegen ihrem hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit die Batterien und die Brennstoffzellen ein. Hier müssen noch deutlich Kostensenkungen und eine Erhöhung der Lebensdauer erreicht werden. Vergleicht man die Technologien hin-

sichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit gegenüber den konventionellen Fahrzeugen, so bleibt festzuhalten, dass sie auf absehbare Zeit teuer in der Anschaffung aber günstiger im Betrieb sein können. D. h. diese Fahrzeuge müssen für eine Wirtschaftlichkeit hohe jährliche Fahrleistungen aufweisen – in diesem Punkt greifen Ökonomie und Ökologie ineinander. Allerdings haben hierbei Batteriefahrzeuge wegen der beschränkten Reichweite, die auch absehbar in den nächsten 10 bis 15 Jahren nicht deutlich gesteigert werden kann, gegenüber Plug-in Hybriden und Brennstoffzellenfahrzeugen einen Nachteil. Plug-in Hybride werden in den nächsten Jahren wahrscheinlich gegenüber den reinen Batteriefahrzeugen deutlich höhere Marktanteile gewinnen können. Brennstoffzellenfahrzeuge bieten sich gerade für Fahrzeuge mit hohen jährlichen Fahrleistungen an – ein Segment, welches zwar von den Bestandszahlen her nicht sehr groß ist, welches aber wegen der hohen Fahrleistung bezüglich Umwelt- und Ressourcenauswirkungen sehr wichtig ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass zukünftige mehrere alternative Antriebssysteme sich durchsetzen können, die unterschiedliche Marktsegmente ansprechen, erscheint hoch zu sein.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Ball, P. Seydel, M. Wietschel und C. Stiller (2009): Hydrogen-infrastructure build-up in Europe. In: M. Ball und M. Wietschel (Hrsg.): *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*, S. 385-453. Cambridge University Press, New York.
- [2] M. Ball, W. Weindorf und U. Büniger. (2009): Hydrogen Production. In: M. Ball und M. Wietschel (Hrsg.): *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*, S. 277-308. Cambridge University Press, New York.
- [3] M. Ball, W. Weindorf und U. Büniger. (2009): Hydrogen Distribution. In: M. Ball und M. Wietschel (Hrsg.): *The Hydrogen Econ-*

- omy: Opportunities and Challenges, S. 322–347. Cambridge University Press, New York.
- [4] T.A. Becker (2009): Electric Vehicles in the United States - A New Model with Forecasts to 2030.
- [5] D. Biere, D. Dallinger und M. Wietschel (2009): Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. Zeitschrift für Energiewirtschaft 33 (Nr.2), S. 173-181.
- [6] U. Bünger und W. Weindorf (2011): Well-to-Wheel Analyse von Elektrofahrzeugen - Studie für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). München.
- [7] D. Dallinger, D. Krampe und M. Wietschel (2011): Vehicle-to-grid regulation based on a dynamic simulation of mobility behavior. IEEE transactions on smart grid 2 (Nr.2) (Juni), S. 302-313.
- [8] DIN (Hrsg.) (2010): DIN EN 62196: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen - Teil 1: Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen bis 250 A Wechselstrom und 400 A Gleichstrom (Entwurf).
- [9] E. Dütschke, U. Schneider, A. Peters, A.-G. Paetz und P. Jochem (2011): Moving towards more efficient car use – what can be learnt about consumer acceptance from analysing the cases of LPG and CNG?. In: ECEEE 2011 Summer Study Proceedings.
- [10] European Expert Group on Future Transport Fuels (2011): Infrastructure for Alternative Fuels.
- [11] H. Helms und J. Hanusch (2010): Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen. Heidelberg
- [12] H. Helms, J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht und M. Pehnt (2011): UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Ergebnisbericht. Heidelberg. URL: <http://www.emobil->

umwelt.de/images/ergebnisbericht/ifeu_%282011%29_-_UMBR_eLA_ergebnisbericht.pdf.

- [13] IEA (2007): Hydrogen Production & Distribution. IEA Energy Technology Essentials, Paris.
- [14] ifas und DLR (2008): Mobilität in Deutschland (MiD) 2008. Bonn/ Berlin.
- [15] P. Jochem, T. Kaschub und W. Fichtner (im Erscheinen): How to Integrate Electric Vehicles in the Future Energy System? In: M. Hülsmann und D. Fornahl (Eds.): Evolutionary Paths Towards the Mobility Patterns of the Future. Springer, Heidelberg.
- [16] F. Kley (2011): Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge - Analyse und Bewertung einer Aufbastrategie auf Basis des Fahrverhaltens. Fraunhofer Verlag, Karlsruhe.
- [17] F. Kley, D. Dallinger und M. Wietschel (2010): What is a right-sized PHEV? Considering users' driving profiles. In Proceedings of 2nd European Conference Smart Grids and E-Mobility, Brüssel.
- [18] McKinsey (2011): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis - The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. Available at: <http://www.zeroemissionvehicles.eu/>.
- [19] NOW (2011): Elektromobilität in Modellregionen - Ergebnisse und Ausblick - Pressemitteilung. Nationale Organisation Wasserstoff, Berlin.
- [20] NPE (2011): Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität“. Berlin.
- [21] G.J. Offer, D.A. Howey, M. Contestabile, R. Clague und N.R. Brandon (2010): Comparative analysis of battery electric, hydro-

- gen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. In: Energy Policy 38, p. 24-29.
- [22] A. Peters, M. Wietschel, W. Schade, C. Doll, A. Thiel, M. Möckel, P. Plötz und C. Zanker (2012): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt.
- [23] P. Plötz, T. Gnann und M. Wietschel (2012): Total Ownership Cost Projection for the German Electric Vehicle Market with Implications for its Future Power and Electricity Demand. Dresden.
- [24] Prognos, EWI und GWS (2011): *Energieszenarien 2011*. Basel/ Köln/ Osnabrück.
- [25] S. Schraven, F. Kley und M. Wietschel (2010): Induktives Laden von Elektromobilen - Eine techno-ökonomische Bewertung. Working Paper Sustainability and Innovation.
- [26] P. Seydel (2008): Entwicklung und Bewertung einer langfristigen regionalen Strategie zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur - auf Basis der Modellverknüpfung eines Geografischen Informationssystems und eines Energiemodells. Zürich.
- [27] Siemens (2009): From Wind To Wheels. In: The Magazine for Research and Innovation. Pictures of the Future, S. 44-47.
- [28] TÜV SÜD und LBST (2012): H2Stations.org - The LBST Information Portal on Hydrogen Filling Stations Worldwide. URL: <http://www.h2stations.org/>.
- [29] TÜV SÜD und LBST (2012): H2Stations.org - The LBST Information Portal on Hydrogen Vehicles Worldwide. URL: <http://www.h2mobility.org/index.html>.
- [30] VDE (2010): VDE-AR-E 2623-2-2 „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elekt-

rofahrzeugen – Teil 2-2: Anforderungen an Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen.

- [31] M. Wietschel, M. Arens, C. Dötsch, S. Herkel, W. Krewitt, P. Markewitz, D. Möst und M. Scheufen (Hrsg.) (2010): *Energietechnologien 2050*. Karlsruhe/ Stuttgart.
- [32] M. Wietschel, D. Dallinger, C. Doll, T. Gnann, A. Held, F. Kley, C. Lerch, et al. (2011): *Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität*. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- [33] M. Wietschel, E. Dütschke, S. Funke, A. Peters, P. Plötz, U. Schneider, A. Roser und J. Globisch (2012): *Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern“*. Karlsruhe.
- [34] M. Wietschel, F. Kley und D. Dallinger (2009): *Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur*. In: *ZfAW Zeitschrift für die Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft* 3, S. 33-41.
- [35] M. Wietschel und P. Plötz (2012) *Wirtschaftlichkeit, Effizienz und CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen*. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und Elektrisches Energiemanagement III*. Bd. 120. expert Verlag, Düsseldorf.

4. Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven – Die Sicht der Automobilindustrie

Stefan Pfahl,
Daimler AG

4.1 Einführung

Zur Perspektive alternativer Antriebskonzepte gibt es heute unterschiedlichste Erwartungen. Nach einer Phase der Euphorie in den letzten beiden Jahren, rufen die Medien aktuell „das Ende des Hypes“ bei den Elektrofahrzeugen aus. Selbstverständlich ist es seriös nicht möglich, eine langfristige Prognose zu erstellen – dafür ist, wie gezeigt wird, die Vielzahl an Einflussfaktoren mit zu großen Unsicherheiten verbunden. Es ist aber durchaus möglich die Entwicklung wichtiger Grundparameter auf Seiten von Technik und Politik vorzuzeichnen und damit die Rolle der alternativen Antriebe für die Automobilindustrie in den nächsten zehn Jahren einzuordnen. Um den Rahmen nicht zu sprengen, erfolgt dies hier eingegrenzt auf die elektrischen Antriebe ohne Brennstoffzellenfahrzeuge (s. Beitrag Michaelis et al. in diesem Band) wengleich die vorgestellte Methode bereits auch zur Einordnung von weiteren Optionen wie Brennstoffzellen- oder Erdgasantriebe genutzt wurde.

Aus Sicht der Automobilindustrie entscheiden zwei Faktoren die Perspektive der elektrischen Antriebe wesentlich: Auf der eine Seite die technische Entwicklung und die Verringerung der Kosten und auf der anderen Seite die Entwicklung der Rahmenbedingungen und insbesondere der politischen Förderung von Elektrofahrzeugen. Beide Faktoren werden daher im Weiteren näher beleuchtet und miteinander verbunden.

Ein weiterer, davon zunächst unabhängiger Indikator sind die politischen Ziele im Bereich des Klimaschutzes. Sie ermöglichen bereits eine erste Abschätzung der Bedeutung elektrischer Antriebe. Unter den politischen Klimaschutzziele sind zwei Eckpfeiler für die Automobilindustrie besonders relevant:

- Bis zur Mitte des Jahrhunderts wollen die großen Industriestaaten als „G8“ die weltweiten CO₂-Emissionen halbieren¹⁵ – sie haben sich damit die Sicht des IPCC zu Eigen gemacht und würden dabei sogar eine Reduktion auf nur 20 % des Emissionsniveaus von 1990 anstreben. Den dann verbleibenden 2 t CO₂ pro Einwohner und Jahr entsprächen bereits die CO₂-Emissionen bei der Nutzung eines heutigen durchschnittlichen Kleinwagens. Dessen Energieverbrauch wird also weitgehend CO₂-frei sein müssen, wenn man unterstellt, dass es nicht möglich sein wird, alle anderen Sektoren vollständig auf regenerative Energien umzustellen.
- Bis zum Jahr 2020 strebt die Europäische Union ein Flottenverbrauchsziel von 95 g CO₂/km an – andere Industrieländer haben vergleichbare Vorgaben formuliert. Dieses Ziel ist nach heutigem Kenntnisstand allein mit konventionellen Technologien nicht erreichbar. Schon das aktuell gültige Flottenziel von 130 gCO₂/km im Zeitraum 2012-2015 hat zu einer historisch beispiellosen Anstrengung der Automobilindustrie mit jährlichen Einsparungen von ca. 3 % geführt. Selbst wenn sich dieser Degressionsverlauf – wie in Abbildung 18 skizziert – fortsetzen ließe, wäre rein rechnerisch ein Flottenwert von bestenfalls 110 g CO₂/km erreicht. Selbst dann bestünde also eine Lücke von 15 g CO₂/km bis zum Erreichen des 95 g-Ziels.

¹⁵ Vgl. bspw. die Abschlusserklärung des G8-Gipfels in L’Aquila 2009.

Langfristig, aber auch bereits in der näheren Zukunft, ergibt sich also die Notwendigkeit, einen wachsenden Teil des automobilen Energieverbrauchs CO₂-frei abzudecken. Und dafür ist der elektrische Antrieb mit seiner hohen Effizienz und der Möglichkeit, CO₂-freien Strom zu nutzen, eine herausragende Option.

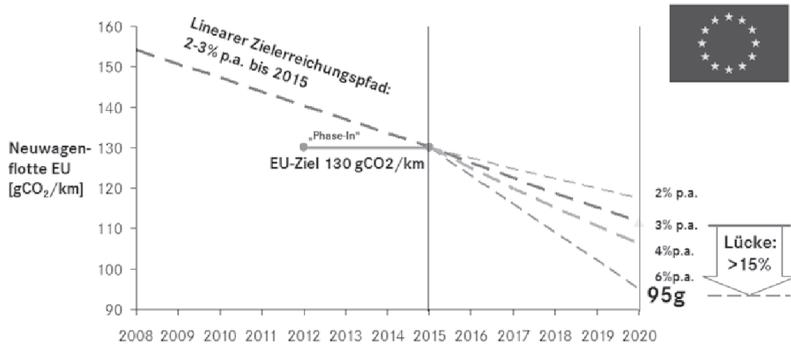


Abbildung 18: Beispiel EU-Flottengesetzgebung: Das Ziel für 2020 wird einen erheblichen Anteil alternativer Antriebe notwendig machen [5]; [6].

Damit elektrische Antriebe aber tatsächlich einen Massenmarkt erreichen und so einen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten, muss ihre Wirtschaftlichkeit der von konventionellen Antrieben ebenbürtig sein. Tatsächlich ist absehbar, dass auf dem Weg von einem Flottenwert 130 g CO₂/km hin zu einem Flottenwert von 95 g CO₂/km der Zeitpunkt kommen wird, zu dem die CO₂-Vermeidungskosten elektrischer Antriebe die der konventionellen unterschreiten werden. Abbildung 19 zeigt diese Perspektive. Die fächerförmige Ausprägung der Kostenerwartung elektrischer Antriebe deutet die hier bestehenden Potentiale an. Der untere Kostenverlauf unterstellt bereits die Etablierung elektrischer Antriebe in einem Massenmarkt.

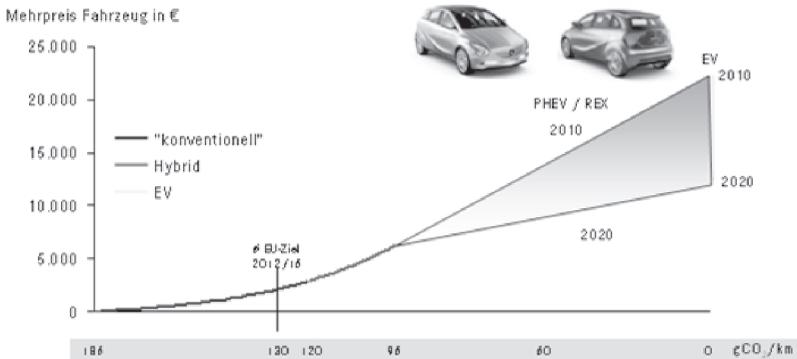


Abbildung 19: Mit der Entwicklung von Märkten für Elektrofahrzeuge sinken die Kosten und Preise signifikant. Vereinfachte Darstellung der Technikkosten auf Basis von [3], [11] und [12]. Basis ist ein C-Segment-Fahrzeug im Jahr 2002.

Ein solcher Massenmarkt wird sich in den Märkten zuerst entwickeln, in denen die politischen Rahmenbedingungen die anfänglich vorliegenden Kostennachteile des elektrischen Antriebes überbrücken. Wie unten gezeigt wird, fördern derzeit fast alle großen Industrienationen elektrische Antriebe mit Beträgen von 5.000 € und mehr pro Fahrzeug. Neben den Indikationen Flottenverbrauchsziele und Kostendegression müssen diese politischen Rahmenbedingungen bekannt sein, um zu einer ganzheitlichen Perspektive zu den elektrischen Antrieben zu gelangen.

Im Folgenden wird nach einer Fokussierung auf die Daimler AG das Marktpenetrationsmodell alternativer Antriebe vorgestellt. Nach Einführung in die Methodik wird auf die Modellperformance eingegangen bevor die Bereiche Total-Cost-of-Ownership, Marktmodell sowie Angebot und Infrastruktur näher beleuchtet werden. Nach den Modellergebnissen rundet ein Fazit diesen Beitrag ab.

4.2 Exkurs: Ansätze Mercedes-Benz und smart

Wie in der Einführung beschrieben, wird die Bedeutung der alternativen Antriebe wachsen, ohne dass dadurch die konventionellen Technologien als Basis der automobilen Technik in Frage gestellt werden. Das Unternehmen Daimler hat eine lange Historie in der Erforschung und frühen Entwicklung elektrischer Antriebe und Mercedes-Benz ist heute laut ADAC die Automobilmarke mit den niedrigsten spezifischen Verbräuchen [1]. Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Mobilität folgen wir einer Roadmap, die alle Optionen optimal verbindet. Dies beinhaltet die Weiterentwicklung modernster Verbrennungsmotoren, den Ausbau von Hybriden und Plug-In-Hybriden bis hin zum gänzlich emissionsfreien Fahren durch Elektrofahrzeuge mit Batterie und Brennstoffzelle (s. Abbildung 20). Und selbstverständlich engagieren wir uns für den Einsatz der jeweils optimalen Energieträger, von sauberen Otto- oder Dieselmotoren bis hin zum Wasserstoff oder eben CO₂-freiem Strom. Mit der Investition in ein Windrad geht die Daimler AG sogar noch einen Schritt weiter und stellt emissionsfreies Fahren – von der Stromquelle bis zum Rad – für alle smart fortwo electric drive in Deutschland sicher [4].

Mit dem smart sind wir Vorreiter bei den rein batterieelektrischen Fahrzeugen und können auf Praxiserfahrung in Kundenhand verweisen [13].

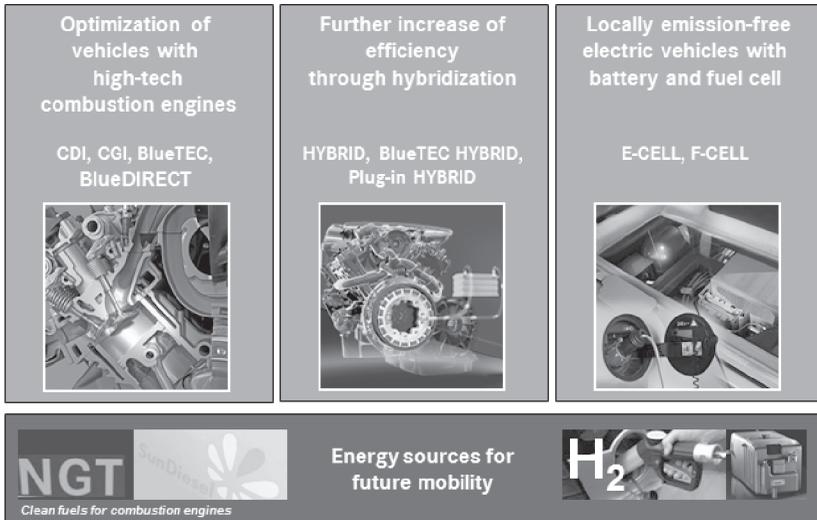


Abbildung 20: Daimler Roadmap für eine nachhaltige Mobilität.

4.3 Methode

Aus den ersten Nutzerrückmeldungen wissen wir, dass es eine Vielzahl an Faktoren gibt, die die Attraktivität elektrischer Antriebe ausmacht (vgl. z.B. [13]). Dabei lassen sich drei Blöcke unterscheiden:

- Technische Performance: Gerade bei den rein batterieelektrischen Antrieben wurden Ladezeit, die elektrische Reichweite sowie weitere Performancekriterien wie Höchstgeschwindigkeit als wichtig angeführt.
- Kosten: Hier werden Faktoren wie Lebensdauer der Batterie (dem größten Kostenblock in der Gesamtbilanz), Preis des Fahrzeugs, Stromkosten etc. aufgeführt.
- Fahrzeugangebot und Infrastruktur: Markteinführungstermine von Elektrofahrzeugen; Möglichkeiten, zu Hause oder öffent-

lich zu laden; die Fähigkeit, Strom zum Nachttarif zu beziehen etc.

Diesen Rückmeldungen entsprechend, haben wir ein Marktmodell erarbeitet, das die Entwicklung einer Perspektive auf die alternativen Antriebe ermöglicht. Dieses Modell trägt dabei zwei Grundanliegen Rechnung:

- Inhaltlich soll geklärt werden, welche Stückzahlanteile von Elektrofahrzeugen unter den jeweiligen politischen Rahmenbedingungen zu erwarten sind.
- Methodisch soll es dabei auch gelingen, einer interdisziplinär besetzten Gruppe von Fachleuten oder Stakeholdern eine gemeinsame, transparente Bewertungsbasis zu bieten, die zu für alle nachvollziehbaren, reproduzierbaren Ergebnissen führt.

Es muss hier herausgehoben werden, dass mit dem im Folgenden skizzierten Modellansatz keine präzise Prognose über die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen geschaffen werden soll. Im Gegensatz zu anderen Marktmodellierungstools arbeiten wir mit extremen Vereinfachungen hinsichtlich der Anzahl von Beispielfahrzeugen, Nutzergruppen etc. Entsprechend der Erkenntnis „It’s better to be vaguely right, than to be precisely wrong“ besteht dabei der Anspruch, dass die vorliegenden Erkenntnisse und Annahmen über die Entwicklung einzelner Einflussfaktoren zu einem stimmigen Gesamtbild verbunden und nachvollziehbare Tendenzaussagen möglich werden. Solche Tendenzaussagen sind prinzipiell auch mit rein qualitativen Verfahren möglich. Im Gegensatz dazu setzen wir aber bewusst auf einen quantitativen Ansatz, weil nur dieser es erlaubt, die Bedeutung einzelner Einflussfaktoren durchgehend angemessen zu gewichten.

In diesem Sinne wurde der hier vorgestellte Ansatz bereits in vielfältiger Weise genutzt: Von Hochschulprojekten und Seminaren über unternehmensinterne Strategieprozesse bis hin zum Einsatz in der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Im Folgenden wird der in der AG 7 („Rahmenbedingungen“) der NPE spezifizierte Modellansatz näher be-

schrieben. Dabei wurden insbesondere die Beispielfahrzeuge sowie die Eingangsprämissen im Rahmen von interdisziplinären Workshops der AG 7, Unterarbeitsgruppe „Fahrzeug“, festgelegt. Teile dieses Ansatzes und der Ergebnisse sind im Kapitel 5.4 des zweiten Berichtes der NPE [8] sowie in dessen Anhang [9] im Kapitel 6 dokumentiert. Im dritten Bericht der NPE [10] basieren Aussagen der Kapitel 5 und 6 auf dem Modellansatz. Die Gliederung folgt den Kundenkriterien „Technische Performance“, „Kosten“ sowie „Angebot und Infrastruktur“.

4.3.1 Technische Performance

Um das Modell überschaubar zu halten, soll eine möglichst kleine Anzahl an Beispielfahrzeugen repräsentativ für die Gesamtzahl der in Deutschland jährlich ca. 3 Mio. neu zugelassenen Pkw stehen. Mit drei Paarungen aus dem Kleinwagen-, Kompaktwagen- sowie Mittel-/Oberklasse-Segmenten (A/B-, C-, D-Segmente) wird jeweils etwa ein Drittel des Gesamtmarktes abgedeckt, wenn man das D-Segment hier als repräsentativ für alle weiteren (größeren) Fahrzeugsegmente ansieht. Der heutige Stand der Technik legt folgende segmentspezifische Technikzuordnung nahe:

- A/B-Segment: reines batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)
- C-Segment: Range Extender Fahrzeug (REEV)
- D-Segment: Plug-In-Hybrid (PHEV)

Die spezifischen Fahrzeugpaarungen – konventionell vs. elektrisch – und Teile der Performance-Daten zeigt Tabelle 6.

Die geringen jährlichen Fahrleistungen im A- und B-Segment erlauben hier den Einsatz rein batterieelektrischer Antriebe mit zertifizierten Reichweiten von 160 km. Im C-Segment erscheint das als eine zu große Einschränkung, so dass hier die Range-Extender-Technologie für passend gehalten wurde – wenn die Reichweite der Batterie nicht ausreicht, erlaubt ein verbrennungsmotorisches Zusatzaggregat die Weiterfahrt. Fahrzeuge des D-Segments werden dagegen in der Regel zu häufig als Langstrecken-

fahrzeuge eingesetzt, als dass hier eine Range-Extender-Funktion als ausreichend angesehen werden kann. Stattdessen ist der Einsatz von Plug-In-Hybriden sinnvoll. Die für den Plug-In-Hybriden angesetzte elektrische Reichweite von 25 km ermöglicht es, den Großteil der Pendlerstrecken zur Arbeit und zurück elektrisch zu bewältigen, so dass hier der aus der Gesetzgebung abgeleitete elektrische Fahranteile von 50 % plausibel ist.

Tabelle 6: Grundparameter der Einzelfahrzeuge [8].

	Einheit	A/B-Segment		C-Segment		D-Segment	
Antrieb	-	Otto	EV	Diesel	Otto REEV	Diesel	Otto PHEV
Fahrleistung Erstnutzer	km/a	15.000	15.000	15.000	15.000	30.000	30.000
Fahrleistung Zweitnutzer	km/a	10.000	10.000	15.000	15.000	20.000	20.000
Nutzungsdauer Erstnutzer	Jahre	4	4	4	4	4	4
Nutzungsdauer Zweitnutzer	Jahre	6	6	6	6	6	6
Leistung Verbrennungsmotor	kW	50	0	80	40	120	80
Leistung elektrisch	kW		40		80		40
Hubraum Verbrennungsmotor	l	1,0	-	1,6	1,0	2,0	1,6
Elektrischer Verbrauch	Wh/km		120		150		170
Elektrische Reichweite	km		160		100		25
Elektrische Fahranteile	%		100		80		50
Entladehub (DOD)	%		95		90		50

Für jedes der drei Segmente wird eine durchschnittliche Haltedauer des Erstnutzers von vier Jahren vorausgesetzt. Für die Haltedauer des Zweitnutzers, dessen TCO ebenfalls berücksichtigt werden, sind weitere sechs Jahre veranschlagt. Die Leistungswerte sind so gesetzt, dass die Kombina-

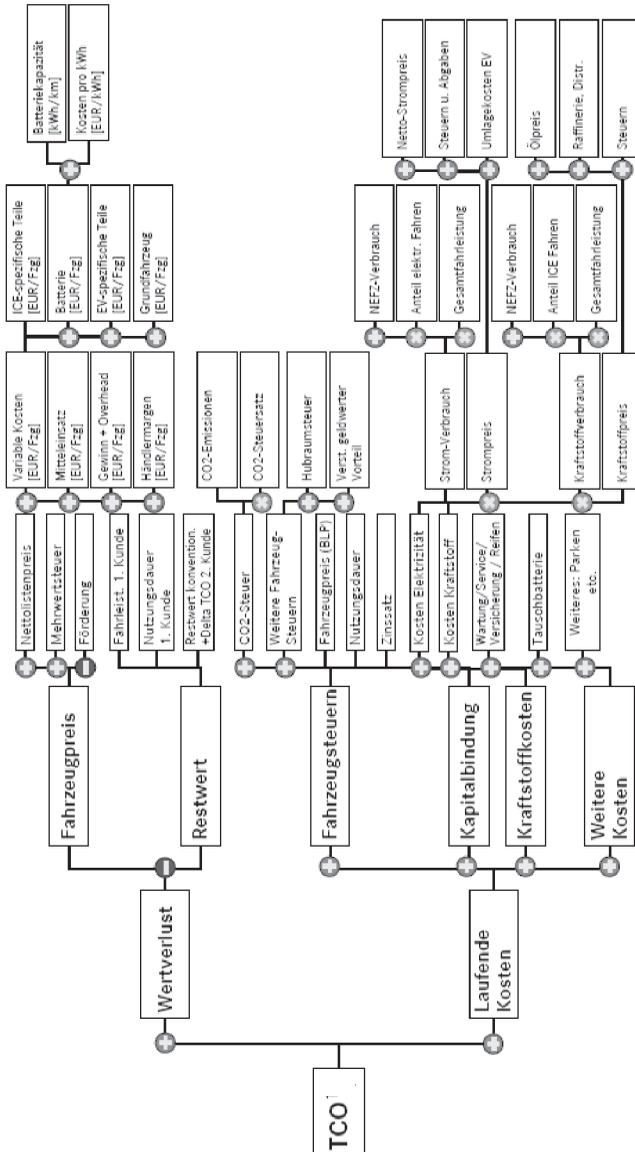
tion aus Verbrennungs- und Elektromotor von REEV und PHEV zu einer dem Referenzfahrzeug vergleichbaren Performance führt. Elektrischer Verbrauch und elektrische Reichweite orientieren sich an den sich heute abzeichnenden Werten. Der elektrische Fahranteil ergibt sich dann aus der im Neuen Europäischen Fahrzyklus definierten Berechnung. Zuletzt ist zur Ableitung der notwendigen Batteriegröße der hinterlegte Entladehub „Depth of Discharge“ (DOD) festzulegen. Zum Schutz der Lebensdauer werden hier für PHEV üblicher Weise Werte von um 50 % diskutiert. Bei allen Unterschieden im Detail kann unterstellt werden, dass die ausgewählten Paarungen für den Nutzer grundsätzlich gleichwertige Alternativen hinsichtlich der technischen Performance darstellen. Demzufolge sind es die Kosten sowie das Fahrzeugangebot und die Infrastruktur, die im Modellansatz relevant sind.

4.3.2 TCO-Modell

Auf Basis der genannten Fahrzeugpaarungen lassen sich die jeweiligen Gesamtkosten (Total Cost of Ownership – TCO) vergleichen. Bei dem hier verwendeten Ansatz zur TCO-Rechnung werden die zum Zeitpunkt der Nutzungsentscheidung absehbaren Gesamtkosten des Erstnutzers für eine Antriebsvariante abgebildet. Die Gesamtkosten eines Fahrzeuges umfassen alle Kostenfaktoren, die während der Nutzung anfallen. Sie lassen sich in zwei Blöcke einteilen:

- Anschaffungspreis incl. einmalige Steuern und Anreize bzw. Wertverlust und Verzinsung und
- Laufende (jährliche) Kosten, also Kraftstoffkosten, Kfz-Steuer, Wartung und Versicherung.

Abbildung 21 zeigt alle relevanten Elemente am Beispiel eines privaten Nutzers eines C-Segment REEV.



Source: Daimler

Abbildung 21: Grundschemata TCO-Berechnung.

Für die Abschätzung des zukünftigen Kraftstoffverbrauchs und der verbrauchsbezogenen Mehrkosten der konventionell angetriebenen Referenzfahrzeuge werden die Ergebnisse der von TNO durchgeführten Studie für die Europäische Kommission herangezogen [11, S.54ff.]; [12]. Um einen konkreten Bezug auf aktuelle Fahrzeuge herstellen zu können, wurden im Prozess der NPE aktuelle Beispielfahrzeuge ausgewählt:

- A-Segment: (Beispiel VW Polo, Otto, ca. 45 kW)
- C-Segment: (Beispiel VW Golf, Diesel, ca. 80 kW)
- D-Segment: (Beispiel BMW 320 d / Mercedes-Benz C 220 CDI, ca. 125 kW)

Mit der Auswahl dieser Beispielfahrzeuge können reale, aktuelle Verbrauchswerte zur weiteren Analyse genutzt werden. Die Verbrauchswerte für das Jahr 2015 wurden mit Hilfe der Kosten-Verbrauchsrelation von TNO errechnet. Dabei wird unterstellt, dass von 2002 bis zum Jahr 2015 für das A-Segmentfahrzeug durchschnittliche Kosten von ca. 30 € pro g CO₂/km, für die C- und D-Segment-Fahrzeuge von 40 bis 45 € pro g CO₂/km eingesetzt werden. Die so abgeleiteten Zusatzkosten werden den aktuellen Preisen aufgeschlagen. Zusätzliche Aufschläge wie etwas Vertriebsmargen erschienen uns für die hier diskutierte Thematik nicht plausibel.

Würde man für die Zeit nach 2015 eine weitere Verbrauchsreduktion nach TNO unterstellen, so ergäben sich Grenzkosten von über 100 € pro g CO₂/km. Für Zusatzkosten in dieser Größenordnung besteht keine Möglichkeit, sie durch die eingesparten Kraftstoffkosten zu amortisieren. Daher wird unterstellt, dass keine weiteren Kosten in die Fahrzeuge hineingenommen werden. Nichts desto trotz kann im Rahmen kontinuierlicher Verbesserungsprozesse von einer weiteren Verbrauchsreduktion ausgegangen werden. Beispielsweise unterstellt auch [12] zeitlich abhängige Lernkurven. Hier wird von einer Verbesserung von 1 % pro Jahr ohne Kosten-

wirkung ausgegangen, so dass sich eine weitere Verbrauchsreduktion von ca. 5 g CO₂/km bis 2020 ergibt.

Die Prämisse zu den Komponentenkosten der elektrischen Antriebe basiert auf den Rückmeldungen der NPE-Arbeitsgruppen 1 (Antriebstechnologie), 2 (Speichertechnologie) und 3 (Infrastruktur, Netzintegration). Ein Quervergleich zeigt eine gute Übereinstimmung mit anderen namhaften Quellen, wie bspw. [3] und [12]. Über alle xEVs wurden für das Ladegerät 400 € und für die EV-Komponenten (Leistungselektronik, Elektromotor etc.) ein Kostenblock von 2.600 € unterstellt. Tabelle 7 zeigt die Kostenprämissen für Batterien – für die eine zeitliche Degression unterstellt ist – sowie die resultierenden Fahrzeugpreise und -verbräuche.

Bezüglich der politischen Umfeldparameter wurden die wesentlichen Kenngrößen auf dem Niveau des Jahres 2011 beibehalten:

- Mehrwertsteuer: 19 %
- Mineralölsteuer Benzin: 0,6545 €/Liter
- Mineralölsteuer Diesel: 0,4704 €/Liter
- Einkommenssteuersatz: 40 %
- Unternehmenssteuer: 35 %
- Dienstwagensteuer: als geldwerter Vorteil zu versteuern sind monatlich: Bruttolistenpreis * (1 % + 0,03 % * Entfernungskilometer zwischen Wohnung-Arbeitsstätte)

Die Prämissen zur Entwicklung des Ölpreises sind an das mittlere Szenario der Internationalen Energieagentur angelehnt. Damit ergeben sich für 2014 88 \$/bbl., für 2017 94 \$/bbl. und für 2020 100 \$/bbl [7].

Es wird ein konstanter Wechselkurs von 1,25 \$ pro 1 € unterstellt.

Für den Strompreis wurde ein pauschaler Wert von 24 Cent pro kWh unterstellt. Darin sind alle Steuern und Abgaben in der aktuellen Höhe enthalten. Da hierzu Voraussagen kaum möglich sind, wurden weder Kostenrisiken (höhere Kosten für CO₂-freien Strom, Umlage des Infrastrukturaufbaus etc.) noch Kostenchancen (Ertrag aus Regelleistung etc.) berücksichtigt.

Tabelle 7: Entwicklung von Batteriekosten, Fahrzeugpreise sowie -verbräuche für die Stützjahre 2011, 2014, 2017 und 2020.

	Einheit	2011	2014	2017	2020
Batteriekosten	€/kWh	800	400	300	280
A-Segment					
Fahrzeugpreis netto konventionell	€	10.403	10.982	11.176	11.176
Verbrauch konventionell	gCO ₂ /km	122	105	98	95
Fahrzeugpreis netto BEV	€	27.440	19.336	17.228	16.720
Zertifizierter Verbrauch BEV	gCO ₂ /km	0	0	0	0
C-Segment					
Fahrzeugpreis netto konventionell	€	19.352	19.615	19.702	19.702
Verbrauch konventionell	gCO ₂ /km	104	101	98	95
Fahrzeugpreis netto REEV	€	34.213	27.197	25.281	24.725
Zertifizierter Verbrauch REEV	gCO ₂ /km	21	20	20	19
D-Segment					
Fahrzeugpreis netto konventionell	€	32.787	33.497	33.734	33.734
Verbrauch konventionell	gCO ₂ /km	127	118	113	110
Fahrzeugpreis netto PHEV	€	44.077	39.553	38.223	37.860
Zertifizierter Verbrauch PHEV	gCO ₂ /km	64	59	57	55

Während sich auf dieser Basis die einzelnen Schritte der TCO-Rechnung weitgehend selbst erklären, gibt es Parameter, für die die Rechenschritte abgesprochen und entsprechend festgelegt werden müssen. Diese sind im Folgenden dargestellt:

Wertverlust: Aufgrund der geringen Erfahrungswerte ist es heute nicht möglich, den Wertverlust von xEVs vorauszusagen. Sicher ist, dass die

Übernahme aktueller Werte konventioneller Fahrzeuge nicht angemessen wäre. So liegt der Wertverlust von konventionellen Fahrzeugen nach drei oder vier Jahren Haltedauer etwa bei 50 %. Bei elektrischen Antrieben spricht für einen kleineren Wertverlust bspw. die höhere Attraktivität einer modernen Technologie. Für einen höheren Wertverlust gegenüber konventionelle spricht dagegen bspw. die Kostendegression bei xEV-Komponenten wie Batterie etc., und dass gerade für den Zweitnutzer das Risiko teurer Reparaturen ggf. schwer kalkulierbar ist. Einen Sonderfall stellt zudem das staatlich geförderte xEV dar. Da der Zweitnutzer i.d.R. keine zum Erstnutzer vergleichbare Förderung erfährt, wird seine Zahlungsbereitschaft im Verhältnis relativ gering sein. Für den hier vorgestellten Modellansatz wird mit zwei Grundannahmen gearbeitet:

- Das Risiko eines unverhältnismäßig teuren Komponentenschadens in der Nutzungszeit des Zweitkunden wird ausgeschlossen – in den unterstellten Komponentenkosten ist dies (z.B. als Versicherungskostenanteil) enthalten.
- Die Zahlungsbereitschaft des Zweitkunden umfasst exakt den Restwert des konventionellen Vergleichsfahrzeugs zuzüglich dem TCO-Vorteil, der sich für den Zweitkunden über seine Nutzungsdauer ergibt.

Zyklusverbrauch vs. Realverbrauch: Verbrauchs- und CO₂-Werte werden im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt. Reale Verbräuche können, je nach tatsächlichem Fahrverhalten, von diesem Wert abweichen. Obwohl sich daher in den TCO-Rechnungen Verzerrungen gegenüber den realen Kosten ergeben können, wird hier mit den im NEFZ ermittelten Werten gearbeitet: Nur diese sind allgemein zugänglich und vergleichbar, so dass sie für die hier gestellte Aufgabe – über die Relation der TCO Stückzahlableitungen zu treffen – die bestmögliche Basis darstellen.

Dynamik: Die realen TCO des jeweiligen Nutzers werden sich über die Zeit entsprechend dem Verlauf der kostentreibenden Parameter wie Ener-

giepreis, Steuern etc. ändern. In dem hier vorgenommenen Ansatz rechnen wir jedoch die TCO der vollen Haltedauer mit den Parametern des ersten Jahres. Dabei wird unterstellt dass der Erstnutzer bei der Entscheidung im Wesentlichen die dann aktuelle Situation ins Kalkül zieht.

Diskontierung: Die Anfangsinvestition wird in der aktuellen Rechnung mit 5 % verzinst. In der Annahme, dass dies dem realen Kundenverhalten in der Regel entspricht, werden alle weiteren, jährlichen Kostenfaktoren nicht verzinst.

Wartung und Versicherung: Da Voraussagen zu den Kosten von Wartung und Versicherung elektrischer Antriebe derzeit nicht möglich sind, wird hier angenommen, dass sich diese nicht wesentlich von denen der konventionellen unterscheiden.

Nutzergruppen: In Deutschland ist zwischen den drei Nutzergruppen privater Nutzer, geschäftlicher Nutzer, Dienstwagennutzer zu unterscheiden. Für diese Gruppen ergeben sich je eigene Kostenstrukturen. So ergibt sich für den geschäftlichen Nutzer die Möglichkeit der Abschreibung, Dienstwagennutzer versteuern den sich ergebenden geldwerten Vorteil. In den Berechnungen der NPE wurde angenommen, dass bei Neuwagen die privaten Nutzer 40 % des Marktes ausmachen, Geschäftswagen dagegen 60 %. Von diesen 60 % wird die Hälfte (also 30 Prozentpunkte) als Dienstwagen genutzt.

4.3.3 Marktmodell

Mit dem Marktmodell wird die zu erwartenden Stückzahlentwicklung von Elektrofahrzeugen abgeleitet. Herzstück ist die Beschreibung einer segmentspezifischen Abhängigkeit zwischen den TCO und den jeweiligen Marktanteilen konkurrierender Antriebe. Es wird also angenommen, dass sich die Marktanteile der hier aufgeführten Fahrzeugpaarungen abhängig von den TCO einstellen. Je höher die Kosten des Elektrofahrzeuges im

Vergleich zum konventionellen Referenzfahrzeug sind, desto geringer ist dessen Marktanteil.

Aufgrund der heute noch geringen Marktanteile lässt sich der genaue Zusammenhang für Elektrofahrzeuge heute nicht seriös mit empirischen Daten belegen. Es wird daher hier unterstellt, dass grundsätzlich ähnliche Nutzerreaktionen zu erwarten sind, wie sie bei der Paarung Otto vs. Diesel bekannt sind. Den Zusammenhang bezeichnen wir mit dem Begriff TCO-Sensitivität.

Tatsächlich kann man bei der Verteilung von Stückzahlanteilen Otto vs. Diesel einen maßgeblichen Einfluss der TCO feststellen. Vor allem Europa, mit seinen extrem heterogenen Rahmenbedingungen, bietet hier aufschlussreiche Hinweise. So ist bspw. der Dieselanteil in Frankreich und Österreich mit über 75 % sehr hoch, während er in den Niederlanden und der Schweiz sehr niedrig ist. Diese Unterschiede lassen sich auf die jeweiligen Steuersysteme, die den einen oder anderen Antrieb TCO-seitig bevorzugen, zurückführen. Durch den länderübergreifenden Vergleich einzelner, von der technischen Performance her gleichwertiger Fahrzeugpaarungen, lassen sich einzelne Stützpunkte der gesuchten TCO-Sensitivität ableiten.

Noch bessere Untersuchungsvoraussetzungen bietet der deutsche Automobilmarkt. Hier besteht die Besonderheit, dass der TCO-Vorteil des Ottos oder des Diesels von den jeweiligen Fahrleistungen abhängt. Aufgrund des niedrigeren Kaufpreises und der niedrigeren Kfz-Steuer ist der Otto bei geringen Fahrleistungen zumeist die günstigere Option. Mit zunehmender Fahrleistung kommen dagegen der niedrigere Verbrauch und die günstigere Mineralölsteuer des Diesels zum Tragen, so dass seine Gesamtkosten die des Ottos häufig ab einer jährlichen Fahrleistung von 10.000 bis 25.000 km unterschreiten. Betrachtet man nun die wirkliche Verteilung von Neuwagenkäufen in Abhängigkeit von den jeweiligen Fahrleistungen, ergibt sich tatsächlich der zu erwartende Verlauf, bei dem das

Maximum der Otto-Stückzahlen bei deutlich geringeren Fahrleistungen gegenüber dem Maximum der Dieselstückzahlen angesiedelt ist.

Aus diesen Werten haben wir eine TCO-Sensitivität abgeleitet, deren Verlauf in Abbildung 23 dargestellt ist. Man sieht, dass bei gleichen TCO hier eine technische Gleichwertigkeit und damit eine Gleichverteilung von 50 % für beide Antriebsoptionen unterstellt wird. Geringe Differenzen von bis zu 5 % der Gesamtkosten ändern daran zunächst wenig. Erreicht eine Antriebsalternative dagegen einen TCO-Nachteil von 10 %, so halbiert sich dessen Marktanteil auf 25 % und sinkt dann schnell auf sehr kleine Werte.

In Ergänzung zu diesem ersten Teil der TCO-Sensitivität, der sich aus den empirischen Werten der Otto- und Diesel-Stückzahlen ableiten lässt, wurde als weiterer Aspekt die zu erwartende Kaufbereitschaft von „Early Adopters“ aufgenommen. Kundenbefragungen und die vorliegenden Ergebnisse aus Nutzerstudien von Elektrofahrzeugen weisen darauf hin, dass für eine kleinere Gruppe besonders technologieaffiner Nutzer mit ausgeprägten ökologischen Präferenzmustern eine erhöhte Bereitschaft besteht, höhere Preise bzw. TCO für Elektrofahrzeuge zu akzeptieren. Diese kleine Gruppe von unter 5 % Anteil ist bereit, bis hin zu jährlich 3.000 € höhere Gesamtkosten in Kauf zu nehmen. Für diesen Aspekt besteht eine zeitliche Abhängigkeit: Mit schwindendem Neuigkeitsgrad sinkt auch die Attraktivität von Elektrofahrzeugen in diesem Sinne.

Verbindet man die aufgeführten Ergebnisse aus den Otto-Diesel-Marktanteilen, den Kundenbefragungen und den ersten Nutzerstudien von Elektrofahrzeugen, so erhält man einen charakteristischen Verlauf, der dem eines gespiegelten „S“ entspricht. In Abbildung 22 ist er für die in der NPE untersuchten Fahrzeuge und Privatnutzer dargestellt. Für Geschäftswagenkunden wird unterstellt, dass sie deutlich sensitiver auf TCO-Nachteile reagieren. Das für sie angenommene Nutzerverhalten ist mit der magentafarbenen Linie dargestellt. In dem hier relevanten Beispiel von zwei Antriebsalternativen ist der Stückzahlanteil der TCO-seitig günstige-

ren Option durch nachträgliche Normierung anzuheben, um letztlich wieder auf eine Verteilung von 100 % zu gelangen.

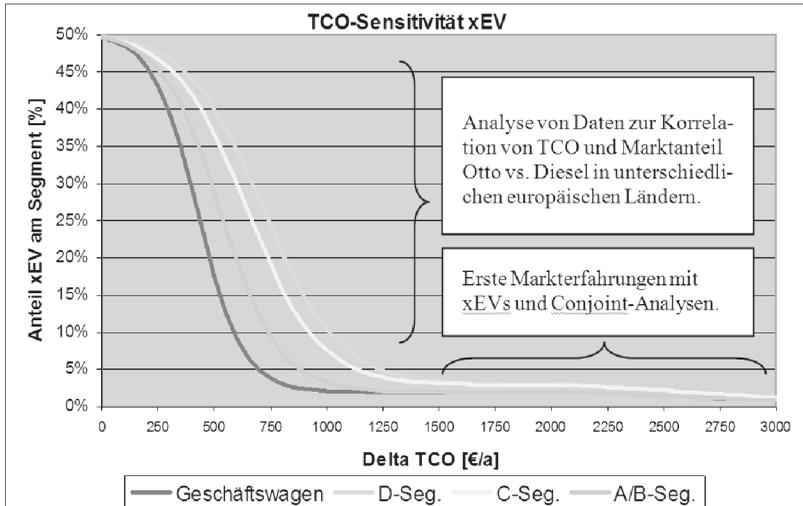


Abbildung 22: Modellannahmen zu TCO-Sensitivitäten von Elektrofahrzeugen.

Quellen: Daimler interne Analyse von Daten zur Korrelation von TCO und Marktanteil von Otto und Diesel in unterschiedlichen europäischen Ländern.

Ergebnisse aus ersten Markterfahrungen mit xEVs und internen Conjoint-Analysen zur Zahlungsbereitschaft von Fahrzeugkäufern für alternative Antriebe. Vgl. auch [13].

4.3.4 Angebot und Infrastruktur

Die durch die TCO-Sensitivität ermittelte Kaufbereitschaft ist um einen Faktor („Diffusionsfaktor“) zu ergänzen, mit dem Attraktivitätseinschränkungen von elektrischen Antrieben besonders in der frühen Phase der Marktentwicklung berücksichtigt werden. Zu diesen Faktoren gehören das zunächst eingeschränkte Angebot in verschiedenen Fahrzeugsegmenten, die noch begrenzte Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur sowie anfänglich

zu erwartenden Vorbehalte gegenüber der noch nicht etablierten elektrischen Antriebstechnologie. Der Diffusionsfaktor drückt also aus, welcher Anteil der über den TCO-Ansatz ermittelten potentiellen Kunden von Elektrofahrzeugen den Kaufwunsch tatsächlich umsetzt. Im Rahmen der NPE wurde bspw. für das Jahr 2011 ein Diffusionsfaktor von nur 5 % abgeschätzt – d.h. 95 % der auf Grund TCO interessierten Kunden lassen sich vom Kauf abhalten, weil es z. B. kein Angebot in der von ihnen bevorzugten Fahrzeugklasse gibt oder weil sie keinen Zugang zu einer Ladesäule haben.

Aufgrund der Komplexität der genannten Einflussgrößen und der dynamischen Veränderung in den Märkten lässt sich der Diffusionsfaktor nicht mit letzter Präzision bestimmen. Dies ist nach unserer Überzeugung auch nicht nötig, um ein ausreichend aussagefähiges Bild über die Perspektiven der Elektrofahrzeuge zu erhalten. Die Erfahrung zeigt, dass der Diffusionsfaktor aber hervorragend geeignet ist, um in interdisziplinären Expertenkreisen schnell zu einer gemeinsamen Sichtweise über die einschränkenden Faktoren zu gelangen. In der AG 7 der NPE wurden die Diffusionsfaktoren im Jahre 2020 für BEV auf 45, für REEV auf 63 und für PHEV auf 80 % festgelegt. Der zeitliche Verlauf ist in Tabelle 8 wiedergegeben.

Tabelle 8: Diffusionsfaktoren, die im Rahmen AG 7 der NPE abgeschätzt wurden (Quelle: Prämissenfestlegung im Rahmen Workshop NPE AG 7 am 11.2.2011).

	2011	2014	2017	2020
BEV	5 %	15 %	30 %	45 %
REEV	5 %	18 %	40 %	63 %
PHEV	5 %	20 %	50 %	80 %

Man sieht, dass für BEV des A- oder B-Segments selbst im Jahr 2020 noch eine relativ große Hürde besteht. Als klassisches Stadtauto drückt sich hier die erwartete Unterdeckung mit einer öffentlichen Ladeinfrastruktur aus. Demgegenüber würden im Jahr 2020 80 % der potentiellen Kunden von Plug-In-Hybriden ihre Präferenz auch tatsächlich umsetzen. Aufgrund der verbrennungsmotorischen Reichweite besteht hier eine große Autonomie gegenüber einer öffentlichen Ladeinfrastruktur.

4.4 Ergebnisse

Auf Basis des skizzierten Marktmodells und den hier gesetzten Prämissen ergibt sich die Perspektive, dass der TCO-Nachteil der elektrischen Antriebe – für Privatnutzer – bis zum Jahr 2020 auf ein Niveau von ca. 1.000 € im Jahr sinkt. (Für geschäftlich genutzte Fahrzeuge weichen die TCO-Werte davon etwas ab. Obwohl auch diese in den folgenden Stückzahlableitungen eingegangen sind, werden sie hier nicht weiter dokumentiert, um den Umfang des Beitrags in einem vertretbaren Rahmen zu halten.) Wesentliche Treiber für die kontinuierliche Verbesserung der TCO-Situation von Elektrofahrzeugen sind das Absinken der Batteriekosten auf 280 €/kWh und der kontinuierliche Anstieg des Ölpreises. Wie oben beschrieben, wurden viele weitere Parameter, insbesondere die Steuern, auf dem aktuellen Wert eingefroren.

Abbildung 23 zeigt die Auswirkung dieser TCO-Entwicklung auf die zu erwartenden Neuwagenverkäufe in Deutschland. Die zunächst erheblichen TCO-Nachteile führen dazu, dass der Marktanteil von Elektrofahrzeugen erst im Jahr 2017 den Wert von einem Prozent überschreitet. Ein Marktanteil von 5 % wäre dann etwa ab dem Jahr 2020 denkbar. In Konsequenz ergeben sich kumuliert etwa 450.000 Fahrzeuge, die bis zum Jahr 2020 auf Deutschlands Straßen zum Einsatz kämen.

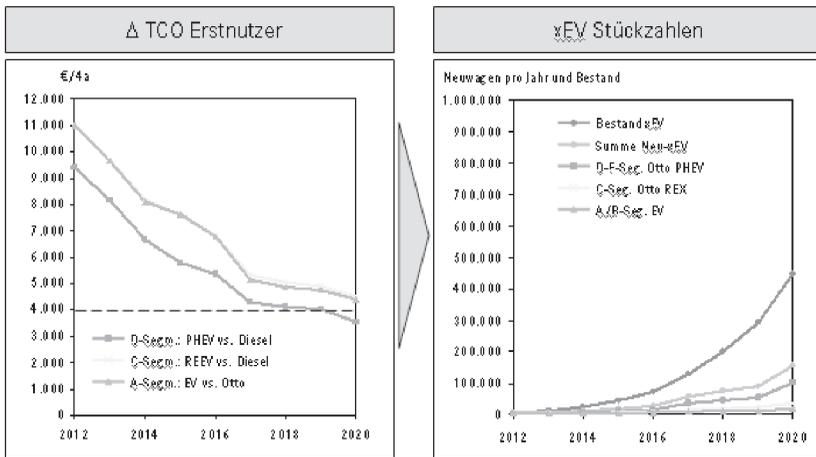


Abbildung 23: Simulation des TCO-Nachteils elektrischer Antriebe am Beispiel des privaten Nutzers sowie die abgeleitete Stückzahlentwicklung für den deutschen Gesamtmarkt bis 2020. (Quelle: eigene Berechnung auf Basis Prämissen NPE, vgl. [8].

Das 2011 im Rahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität formulierte Ziel von 1 Millionen Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2020 würde somit verfehlt. Es wurde daher im Rahmen der Arbeitsgruppe 7 in der NPE untersucht, unter welchen Bedingungen eine entsprechende Verdopplung des Marktanteils elektrischer Antriebe bis 2020 möglich ist. Unter den diskutierten Szenarien wird hier dasjenige herausgegriffen, bei dem staatliche Förderung einen nachhaltigen Stückzahlanteil von mindestens 5 % ab dem Jahr 2015 bewirkt.

Dazu wurde ein Förderung simuliert, die den TCO-Nachteil der elektrischen Antriebe bereits ab dem Jahr 2013 auf einen Bereich von jährlich 1.000 € (also 4.000 € in den vier Jahren Haltedauer des Erstnutzers) verringert. Das differenzierte Förderkonzept beinhaltet staatliche Anreize, Sonderabschreibungen, KfW-Förderkredite bis hin zu nicht monetären Anrei-

zen, die im Modell bzgl. ihrer Wirkung monetarisiert wurden. Diese Bestandteile sind im zweiten Bericht der NPE [10] beschrieben. Für die hier aufzuzeigende Perspektive elektrischer Antriebe sind die integrierten Förderbeträge relevant. Diese zeigt Abbildung 24 zusammen mit den simulierten Stückzahleffekten. Da mit dem Markterfolg elektrischer Antriebe erhebliche Kostendegressionspotentiale erwartet werden, zeigt auch die Förderung einen degressiven Verlauf. Im Szenario wird sie bis zum Jahr 2020 auf null reduziert.

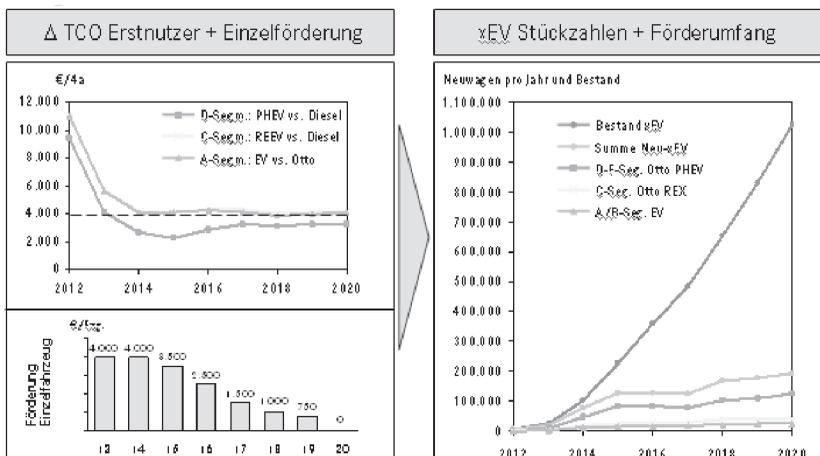


Abbildung 24: Fördermodell und Stückzahleffekt.

4.5 Fazit: Ergebnis und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein Modellansatz vorgestellt, mit dem die Perspektive elektrischer Antriebe auf Basis einer umfassenden TCO-Bewertung entwickelt wird. Ziel dieses Ansatzes ist es, mit einer möglichst überschaubaren Anzahl an berücksichtigten Einflussgrößen grundsätzliche Tendenzaussagen reproduzierbar und quantitativ treffen zu können. Es geht weniger darum, eine wissenschaftliche Prognose zu erstellen, als die Konsequenzen

bestehender Prämissen und eines bestehenden Marktverständnisses konsistent abzuleiten. In diesem Sinne wurde der Ansatz für Hochschulprojekte, Strategieprozesse und im Rahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

Es ergeben sich mit den im Kontext der NPE zusammengestellten Prämissen Tendenzaussagen, die in Teilen eine neue Perspektive auf die elektrischen Antriebe ermöglichen.

Plug-In-Hybride werden sich schneller durchsetzen als rein batterieelektrische Antriebe. Während Elektromobilität nach wie vor häufig mit reinen batterieelektrischen Antrieben und daher mit Fahrzeugen des A- und des B-Segmentes gleichgesetzt wird, zeigt unsere Analyse, dass es Plug-In-Hybride in größeren Fahrzeugsegmenten sein dürften, die zuerst das Potential für signifikante Marktanteile jenseits der 5 %-Marke erreichen werden. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Batterie entstehen hier geringere Mehrkosten als bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Wie in den Abbildung 23 und Abbildung 24 zu sehen, sinkt der TCO-Nachteil daher früher auf ein niedriges Niveau ab. Gleichzeitig weisen die Kunden von größeren Fahrzeugen in unseren Modellannahmen eine größere Toleranz gegenüber TCO-Nachteilen auf (vgl. Tabelle 8). Da zudem die Abhängigkeit von einer öffentlichen Infrastruktur bei Plug-In-Hybriden deutlich geringer ist als bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen (vgl. die Diffusionsfaktoren in Tabelle 8) sind also alle relevanten Einflussfaktoren für den Plug-In-Hybriden günstiger als für das rein batterieelektrische Fahrzeug. Im Effekt ergibt unsere Analyse für Plug-In-Hybride einen Anteil von mehr als 50 % unter allen Elektrofahrzeugen.

Das Ziel der Nationalen Plattform Elektromobilität von einer Millionen Einheiten in Deutschland bis zum Jahr 2020 wird ohne eine stärkere politische Förderung nicht zu erreichen sein. Die zunächst gravierenden Kostennachteile der Elektrofahrzeuge werden nicht ausreichend durch die günstigeren Energiekosten und den Entfall der Kfz-Steuer ausgeglichen. Die in

der NPE unterstellten Kostendegressionen, etwa bei Batterien, implizieren bereits eine Stückzahlentwicklung hin zum Massenmarkt. Um eine solche Entwicklung zu stimulieren, ist in unserem Modell eine Förderung für Elektrofahrzeuge nötig, die zunächst ca. 4.000 € pro Fahrzeug betragen würde und bis 2020 vollständig auslaufen könnte. Dass eine Förderung in dieser Höhe nicht unangemessen ist, zeigt der Blick auf die internationale Entwicklung. Außer Deutschland fördern heute die größten Industrienationen elektrisch angetriebene Fahrzeuge mit Beträgen von 5.000 € und mehr. Im Umkehrschluss heißt das, dass für diese Länder die hier entwickelte Perspektive hin zu einem Marktanteil von 5 % spätestens ab dem Jahr 2015 erwartet werden kann. Tatsächlich zeigen die aktuellen Marktzahlen, dass sich auf dem aktuell noch niedrigen Niveau die durch die Förderung bestehenden Unterschiede signifikant in den Stückzahlanteilen elektrischer Antriebe niederschlagen. Bezogen auf den Marktanteil führt hier Norwegen mit einem Marktanteil von bereits knapp 3% vor den Niederlanden Japan, Frankreich und den USA (vgl. z.B. [2]).

Das hier vorgestellte Förderszenario enthält einen Auslauf der Förderung bis zum Jahr 2020. Als Ausblick wäre zu diskutieren, inwieweit auch eine andauernde Förderung plausibel wäre. Dabei ist neben dem oben angestellten internationalen Vergleich auch ein intersektoraler Vergleich aufschlussreich. Eine Hauptmotivation für den Einsatz und die Förderung von Elektrofahrzeugen ist deren Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen. Die Zusatzkosten für CO₂-freien Strom schlagen sich nur in sehr geringem Maße in den TCO nieder und Elektrofahrzeuge bieten aufgrund der Flexibilität in den Ladezeiten erhebliche Synergien für fluktuierenden regenerativen Strom. In anderen Sektoren werden Beiträge zur CO₂-

Reduktion mit Beträgen von bis zu 300 oder 500 € pro Tonne gefördert¹⁶. Langfristig dürfte mindestens ein Wert von 100 € pro Tonne als angemessen erscheinen¹⁷. Unter der Maßgabe, dass die in Tabelle 6 und Tabelle 7 spezifizierten elektrisch angetriebenen Fahrzeuge CO₂-freien Strom nutzen, ergibt sich eine Reduktion von etwa 10 bis 15 t CO₂ pro Fahrzeug, die entsprechend eine dauerhafte Förderung von 1.000 bis 1.500 € rechtfertigen könnten.

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC (2012): AutoMarxX: Sicherheit bringt Sieg für den Stern – Mercedes verdrängt Audi von Spitzenplatz. URL: http://www.adac.de/sp/presse/meldungen/test/sonstige_tests/ADAC_AutoMarxX%20.aspx?ComponentId=129237&SourcePageId=86736#infogramm. Zugriff am 19.10.2012.
- [2] AID (2012): AID Newsletter 1216.
- [3] Concawe (2008): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. TANK-to-WHEELS Report, Version 3. URL: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1%20TTW%20Report%2007102008.pdf>. Zugriff am 19.10.2012.
- [4] Daimler AG (2012): Der neue smart fortwo electric drive fährt komplett emissionsfrei. URL: <http://www.daimler.com/dccom/0->

¹⁶ Beispielsweise beträgt die Förderung von Photovoltaik- oder Wind-Offshore-Strom im Rahmen des EEG (ca. 15 Cent pro kWh) umgerechnet ca. 300 € pro Tonne CO₂, wenn man überschlagsweise davon ausgeht, dass hierdurch CO₂-Emissionen von ca. 500 g/kWh entfallen werden. Die Steuerentlastung von CNG-Kraftstoffen im Automobil führt sogar zu einem Wert von 500 € pro t.

¹⁷ Dies entspräche bspw. der aktuellen Förderung von Wind-Onshore-Strom mit ca. 5 Cent pro kWh.

- 5-7153-49-1491045-1-0-0-0-0-16696-0-0-0-0-0-0.html. Zugriff am 19.10.2012.
- [5] European Commission (EC) (2009): Regulation No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles. URL: <http://eur-lex.europa.eu/JOHTML.do?uri=OJ:L:2009:140:SOM:EN:HTML>. Zugriff am 19.10.2012.
- [6] European Environment Agency (EEA) (2012): Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2011. URL: <http://www.eea.europa.eu/publications/monitoring-co2-emissions-from-new>. Zugriff am 13.11.2012.
- [7] International Energy Agency (IEA) (2010): World Energy Outlook 2010. Paris.
- [8] NPE (2011a): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_2.pdf. Zugriff am 19.10.2012.
- [9] NPE (2011b): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_2_anhang_bf.pdf. Zugriff am 19.10.2012.
- [10] NPE (2012): Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_bf.pdf. Zugriff am 19.10.2012.

- [11] TNO, IEEP und LAT (2006): Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-emissions from passenger cars. Final report, Delft.
- [12] TNO et al. (2011): Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars. Final report.
- [13] J. Wind et. al. (2011): Schlussbericht e-mobility, Daimler AG. Konzeption und Entwicklung (Modul 1), Berlin/ Hamburg.

5. Das relevante System zur Bewertung von Antriebskonzepten

Jens Buchgeister

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am KIT

5.1 Einleitung

Mit der Veröffentlichung des Abschlussberichts der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft“ des 12. Deutschen Bundestages ist die Steuerung und Verringerung anthropogen induzierter Stoff- und Energieströme mittels Stoffstrommanagement zur Daueraufgabe einer nachhaltigen Entwicklung geworden [3]. Denn sowohl die Verfügbarkeit von Ressourcen als auch die Aufnahmekapazität der Umweltmedien als stoffliche Senken sind begrenzt. Dies gilt heute in besonderem Maße für den motorisierten Individualverkehr, der mit seinen spezifischen Problemen des hohen Flächenbedarfs, der verursachten Emissionen an Treibhausgasen, Partikeln im Innenstadtbereich sowie Lärm immer stärker in den Fokus der Diskussion einer nachhaltigen Entwicklung gerät (vgl. [8]).

Dabei richtet sich der Blick auf die zurzeit noch mehrheitlich eingesetzten Antriebe von Otto- und Dieselmotor, um diese durch neue Alternativen zu ersetzen. Zu den alternativen Antrieben zählen die Brennstoffzelle, der Elektroantrieb inklusive Hybrid, Autogas (LPG) sowie die Verwendung von Erdgas in seinen unterschiedlichen Formen Compressed Natural Gas (CNG), Liquefied Natural Gas (LNG) und Synthetic Natural Gas (SNG). Zum Jahresbeginn 2012 gab es in Deutschland 51.735.177 zugelassene Kraftfahrzeuge, darunter 42.927.647 Personenkraftwagen (Pkw) – was

einen Höchstwert darstellt. Der Fahrzeugbestand mit alternativen Antrieben konnte im Jahr 2011 um 6,7 % zulegen und ist mit 1,4 % im Bestand vertreten (vgl. [6]). Eine genaue Aufteilung des Pkw-Bestands in Bezug auf die einzelnen alternativen Antriebe zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Anzahl zugelassener Pkw mit alternativen Antrieben (vgl. [6]).

Alternative Antriebe	Elektro	Hybrid	Flüssiggas (LPG)	Erdgas (CNG, LNG, SNG)	Brennstoffzelle
Anzahl Pkw	4.541	47.642	~ 432.000	~ 92.000	keine Angabe

Im Energieflussbild von Deutschland ist der Verkehr am Ende der Prozesskette von Gewinnung/Aufkommen über Umwandlung, Verteilung und Speicherung als Verbrauchssektor Teil des gesamten Energiesystems. Hierbei verläuft bei den konventionell auf Erdölbasis betriebenen Fahrzeugen der Weg des Primärenergieträgers Erdöl zum größten Teil über den Aufbereitungsprozess der Raffinerien in die Verbrauchssektoren Verkehr und Haushalte, um zur Deckung der Mobilität und des Wärmebedarfs in den Haushalten zu sorgen [1]. Nur sehr geringe Mengen an Erdöl nehmen einen anderen Weg über die Umwandlungsprozesse der Kraft- oder Heizwerke um einen sehr kleinen Beitrag zur Strom- und Fernwärmeversorgung zu leisten. Im Gegensatz hierzu ist die Mengenaufteilung der Primärenergieträger bei den alternativen Antrieben wie z.B. Elektro-, Brennstoffzellen- und Erdgasmotor umgekehrt, da der Anteil der von den Kraftwerken zu Strom umgewandelt wird, um ein vielfaches höher ist. Zudem gibt es einen grundsätzlichen Unterschied in den jeweiligen Prozessketten, der darin liegt, dass sich der Prozessabschnitt der Verteilung und Speicherung sowie Anschluss zum Endenergieverbraucher unterschiedlich gestaltet. Während die Infrastruktur beim Diesel- und Ottokraftstoff von den Raffinerien unterbrochen ist, da ein oder mehrere Transportmittel eingesetzt werden, um schlussendlich über das Straßennetz zu den Kraftstoff-Tankstellen zu gelangen, wird die erzeugte Elektrizität bzw. Erdgas in ein

geschlossenes Verteilnetz eingebracht, in dem sich die Antriebsenergie auch speichern lässt und ein zusätzlicher Nutzen für das gesamte Energiesystem erbracht wird.

Dieser Umstand der verschiedenen Prozessketten bei den konventionellen und alternativen Antriebsenergien, die unterschiedliche Dienstleistungen im Gesamtsystem erbringen, stellt einen systemanalytischen Vergleich von unterschiedlichen Antriebskonzepten vor besonderen Herausforderungen bei der Festlegung der Systemgrenzen.

In diesem Beitrag wird zum einen die Bedeutung der gewählten Systemgrenzen auf Basis des Lebenswegansatzes für die Bewertung von Antriebskonzepten beleuchtet. Zum anderen erfolgt ausgehend von den in der Automobilwirtschaft üblich verwendeten systemischen Ansätzen Tank-to-Wheel (TTW) und Well-to-Tank (WTT) eine Ableitung der vollständigen vertikalen und horizontalen Systemgrenzen des Kraftfahrzeuglebenswegs. Abschließend wird mit Hilfe des Lebenswegansatzes der entstehende Zusatznutzen sowie der erhöhte Vernetzungsgrad der Energieprozessketten bei der Verwendung alternativer Antriebskonzepte abgeleitet.

5.2 Bedeutung der Systemgrenzen

Bei der Durchsicht von Herstellerangaben zu Personenkraftwagen fällt auf, dass diese entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen zur Information von potenziellen Käufern zum einen den Kraftstoff- bzw. Energiebedarf pro 100 km und zum anderen die spezifischen CO₂-Emissionen in Gramm pro gefahrenen km enthalten (vgl. [4]). Hierbei wird der Kraftstoffverbrauch nach einem bestimmten referenzierten Fahrmuster, dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), angegeben. Diese Angaben entsprechen der üblichen Betrachtungsweise, die ausschließlich nur den Betrieb des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel, TTW) in den Blick nimmt (vgl. [10]). Durch diese Regelung kommt es bei Fahrzeugen mit einem reinen Elektroantrieb dazu, dass die Fahrzeugemissionen mit dem Wert Null ausgewiesen wer-

den, obwohl selbstverständlich die Stromerzeugung genauso wie die Gewinnung von Erdöl, der Transport und die Aufbereitung zu einem konventionellem Otto- oder Dieselmotortreibstoff mit Treibhausgasemissionen verbunden sind. Diese Systemerweiterung die Prozessketten von der Herstellung, dem Transport sowie die damit verbundenen Recycling- und Entsorgungsprozesse der Antriebsenergie eines Pkw mit zu berücksichtigen, ist als Well-to-Tank (WTT) Ansatz definiert und führt kumulativ mit dem TTW-Ansatz zur Gesamtbetrachtung Well-to-Wheel (WTW). Abbildung 25 zeigt mit Hilfe des horizontalen und vertikalen Lebenswegansatzes eines Kraftfahrzeugs, in welcher Weise der TTW- und WTT-Ansatz in der Matrix miteinander verschränkt ist, um den gesamten Lebensweg der Antriebsenergie inklusive der Fahrzeugnutzung zu betrachten.

Hierbei sind in der Vertikalen die Lebenswegphasen Initiale Herstellung, Nutzung und Enddemontage des Kraftfahrzeugs dargestellt und horizontal der Lebensweg der in den einzelnen Lebenswegphasen des Kraftfahrzeugs eingesetzten Antriebsenergien. Dies bedeutet, dass sämtliche Prozesse von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung inklusive Verwertung, sozusagen „von der Wiege bis zur Bahre“, in die Untersuchung einfließen.

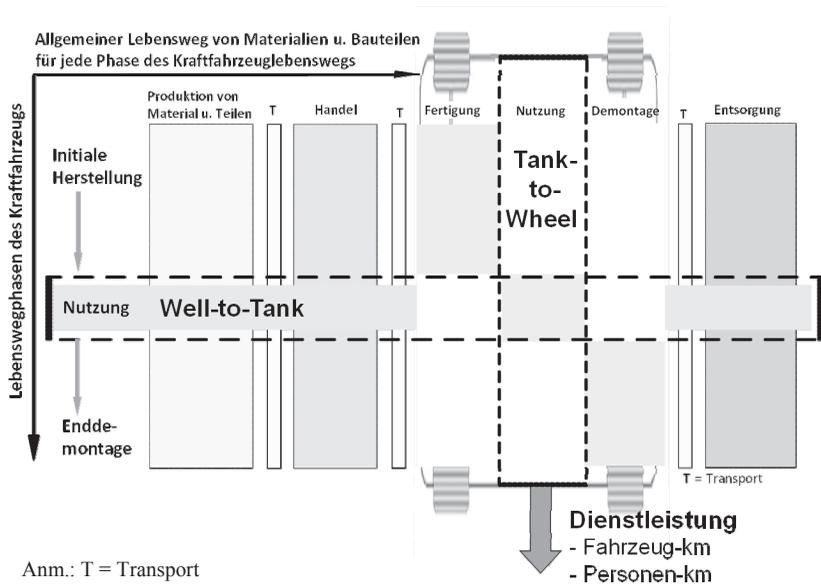


Abbildung 25: Darstellung der berücksichtigten Prozessketten des Tank-to-Wheel- und Well-to-Tank-Ansatzes auf Basis der horizontalen und vertikalen Systemgrenzen des Kraftfahrzeullebenswegs.

Die festzulegende Dienstleistung des Kraftfahrzeugs wird in Fahrzeug- oder Personenkilometer für die gesamte Lebensdauer angegeben. Der Vorteil dieser umfassenden Systemdarstellung ist eine schnelle Übersicht über die Detailtiefe der einbezogenen Prozessketten im Untersuchungsrahmen. Dieses Beispiel zeigt welche Relevanz, die zu wählenden Systemgrenzen beim Vergleich von unterschiedlichen Fahrzeugantrieben in Bezug auf die Treibhausgasemissionen haben können. Zusätzlich stellt sich die Frage, welche Bedeutung die nicht berücksichtigten Lebenswegphasen der Kraftfahrzeugherstellung und -entsorgung sowie die Randbedingungen der Fahrzeugnutzung auf z.B. die freigesetzten Treibhausgasemissionen besitzen. In Abbildung 26 werden die Treibhausgasemissionen in Tonnen CO₂-

Äquivalenten über den gesamten Fahrzeuglebensweg zu verschiedenen Fahrzeugmodellen des VW Golf VI dargestellt (vgl. [11]).

Als funktionelle Einheit der Ökobilanzierung ist der Personentransport über eine festgelegte Gesamtdistanz von 150.000 km im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) definiert (vgl. [12]). Die Wartung des Fahrzeugs, wie der Wechsel von Motoröl, Reifen, Bremsflüssigkeit, Zündkerzen oder Batterie, ist nicht Bestandteil der Untersuchung, da aus älteren Studien zum Golf A4 keine wesentlichen Umweltbelastungen davon ausgehen (vgl. [9]).

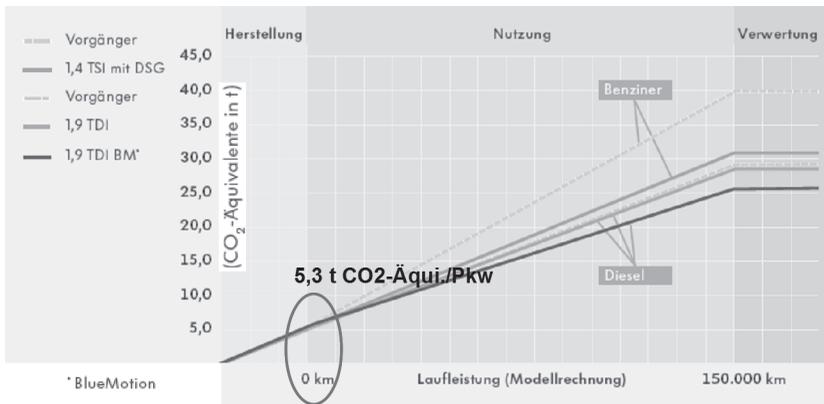


Abbildung 26: Darstellung der Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten für verschiedene Fahrzeugmodelle des Golfs über den gesamten Fahrzeuglebensweg bei einer angenommenen Fahrleistung von 150.000 km [11].

Der Wert der Treibhausgasemissionen zur Herstellung der Fahrzeugmodelle wird mit ca. 5,3 t CO₂-Äquivalenten angegeben (vgl. [11, S.11]). Aus der Abbildung 26 ist ersichtlich, dass näherungsweise alle Kurven der unterschiedlichen Fahrzeugmodelle diesen Wert nach der Fahrzeugherstellung (0 km Laufleistung) aufweisen. Mit der Umrechnung auf die Gesamtlauflistung von 150.000 km beträgt der Anteil der Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugherstellung ca. 35 g CO₂-Äquivalente pro km. Bei der

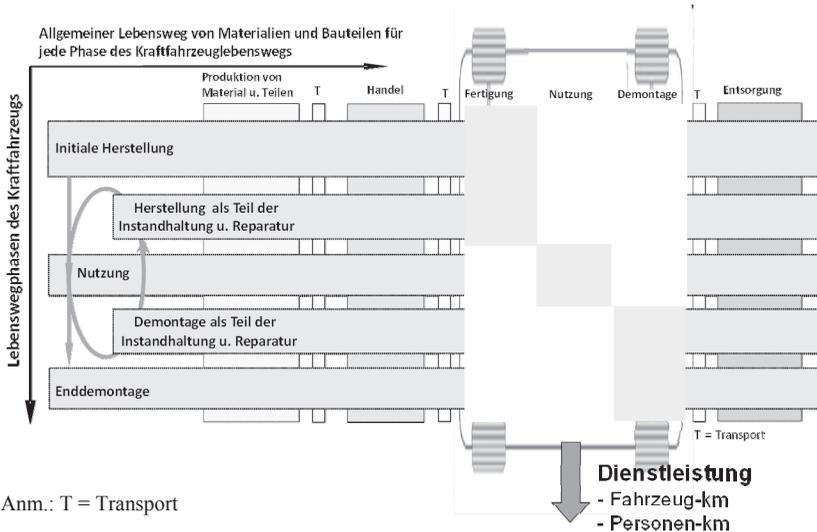
Annahme von einer geringeren Gesamtfahrleistung von 100.000 km steigt dieser Wert auf 53 g CO₂-Äquivalenten je km an. In Anbetracht des nach EG Verordnung 449/2009 für neuzugelassene Pkw zulässigem Durchschnittswert von 130 g CO₂ pro km ein beträchtlicher Anteil von ca. 25 bis 41 %.

Ebenso macht das Diagramm deutlich, dass die Lebenswegphase der Fahrzeugentsorgung zu einem kaum sichtbaren Anstieg der Treibhausgasemissionen führt. Die Ursache hierfür liegt in der gesetzlich geregelten Altautoentsorgung sowie den hohen Recyclingquoten der Fahrzeugbauteile und -materialien und spezifischen Verfahren, wie z.B. das von VW eingesetzte SiCon-Verfahren (vgl. [7]).

Diese Ergebnisse zu den Lebenswegphasen der Kraftfahrzeugherstellung und -entsorgung treffen gleichermaßen auf Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zu. Hierbei nimmt insbesondere der Elektroantrieb inklusive Hybridausführung mit einer schweren bzw. zusätzlichen Batterie mit geringer Lebensdauer eine Sonderrolle ein. Des Weiteren ist für die alternativen Antriebe die Versorgungsstruktur der Antriebsenergie von großer Wichtigkeit, da sie insbesondere im Fall der Brennstoffzelle nicht vorliegt und einen erheblichen Mehraufwand in die Werkstoff- und Verfahrenstechnik gegenüber konventionellen Fahrzeugantrieben erfordert. Auch für den Elektroantrieb ist der Aufbau einer zusätzlichen Ladeinfrastruktur von Nöten. Zusätzlich bestehen große Unterschiede in den Infrastrukturen für alternative Fahrzeugantriebe, welche den Einsatz erneuerbarer Energien in den jeweiligen Vorketten der Antriebsenergie zulassen.

Aus den genannten Gründen und um keine relevanten Beiträge des jeweiligen konventionellen und alternativen Antriebskonzepts zu vernachlässigen, ist aus der Anforderung nach Vollständigkeit und Genauigkeit der Systemstruktur der gesamte vertikale und horizontale Kraftfahrzeuglebensweg für eine vergleichende Bewertung heranzuziehen. Abbildung 27

stellt die Matrix-Struktur der vertikalen und horizontalen Systemgrenzen des gesamten Kraftfahrzeuglebenswegs dar.



Anm.: T = Transport

Abbildung 27: Vollständige vertikale und horizontale Systemgrenzen des gesamten Kraftfahrzeuglebenswegs (angepasst nach [2]).

Zusätzlich zur Darstellung in Abbildung 25 ist ausgehend von der Lebenswegphase der Nutzung ein wiederkehrender Phasenzyklus von Demontage und Herstellung als Teil der Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen oder einer Unfallreparatur in die vertikale Struktur der Kraftfahrzeuglebenswegphasen integriert worden. Die Berücksichtigung dieses Zyklus ist insbesondere in Bezug auf die Bewertung von Elektrofahrzeugen eine wichtige Voraussetzung, um die mit der Fahrzeugbatterie verbundenen stofflichen und energetischen Aufwände umfassend zu berücksichtigen.

5.3 Beitrag alternativer Antriebe zur Nutzsteigerung und Flexibilisierung des Energiesystems

Durch einen vermehrten Einsatz von alternativen Antriebskonzepten im Verkehrssektor kommt es quasi automatisch zu einer Anhebung des Nutzens und der Flexibilisierung im gesamten Energiesystem, da im Lebensweg der Energieprozessketten der alternativen Antriebe eine geschlossene Infrastruktur zwischen der Erzeugung von Antriebsenergie, wie beispielsweise bei Wasserstoff, Erdgassubstituten und Elektrizität sowie deren Verteilungsnetzen, besteht. Dies bedeutet im Fall von Wasserstoff und Erdgassubstituten, dass eine Speicherung im Erdgasnetz möglich ist, die zu einer höheren Auslastung der bestehenden Energieversorgungsstruktur führt. Zusätzlich lassen sich diese Antriebsenergien ganz flexibel auch zur Strom- und Wärmeerzeugung im Gesamtsystem einsetzen. Ein spezieller Fall stellt die Elektromobilität dar, da mit der Fahrzeugbatterie eine Fahrzeugkomponente zur Verfügung steht, die im Gegensatz zum Otto- und Dieselmotorkraftstoff schon wegen der elektrischen Antriebsenergie mit einer Vielzahl sowohl fossiler als auch an erneuerbarer Primärenergieträger verknüpft ist. Zudem kann die Fahrzeugbatterie als Speicherelement im Elektrizitätsnetz eine zusätzliche Funktion bzw. Dienstleistung über die Mobilitätsdienstleistung hinaus erbringen und an Bedeutung für die Energieversorgung gewinnen. In wie weit eine Integration von Elektrofahrzeugen in das elektrische Versorgungsnetz als Energiespeicher erschließbar ist, hängt von möglichen Geschäftsmodellen ab und ob ein Zusammenschluss vieler Elektrofahrzeuge zu einem großen virtuellen Elektrizitätsspeicher möglich ist, um über eine intelligente Netzsteuerung am Elektrizitätsmarkt teilzunehmen. Auch wenn sich solche Überlegungen noch in der Konzeptionsphase befinden, so lässt sich auch schon heute erneuerbar erzeugte Elektrizität von Solarzellen auf dem Hausdach entgegen der derzeitigen durchgeführten Netzeinspeisung als Eigenstrom zur Ladung einer Fahrzeugbatterie nutzen. Einen Überblick welchen Beitrag die Integration

von Elektrofahrzeugen in die Elektrizitätsversorgungsstruktur trotz hoher Anteile fluktuierender erneuerbarer Energien zur Netzstabilität liefern kann, findet sich bei Fournier [5].

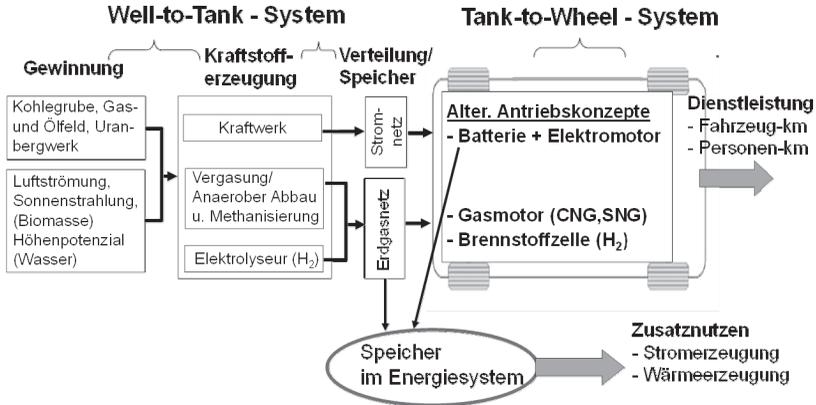


Abbildung 28: Beitrag der alternativen Antriebskonzepte zur Steigerung des Nutzens und der Flexibilisierung des Energiesystems.

Abbildung 28 zeigt mit Hilfe des Lebenswegansatzes in welcher Weise die alternativen Antriebskonzepte zu einer Verknüpfung mit einer Vielzahl an fossilen und erneuerbaren Primärenergieträgern innerhalb des Energiesystems führt. Insbesondere die Möglichkeit einen Beitrag zur Speicherung von Endenergie oder Sekundärenergieträgern innerhalb der Energieversorgungsstruktur zu leisten, ermöglicht die Erbringung einer zusätzlichen Energiedienstleistung in Form von Strom- und Wärmebereitstellung. Somit trägt eine Erhöhung des Anteils an alternativen Antrieben im Verkehrssektor zu einer Flexibilisierung im Energiesystem bei. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass bei einer vergleichenden Bewertung alternativer Antriebe das Gesamtsystem aus den jeweiligen Energieprozessketten der Antriebsenergien sowie den Prozessketten zusätzlicher Energiedienstleistungen aufzustellen ist.

5.4 Zusammenfassung

Anhand mehrerer Beispiele zur vergleichenden Untersuchung von Fahrzeugantrieben hinsichtlich der Treibhausgasemissionen konnte aufgezeigt werden, dass eine Vernachlässigung relevanter Beiträge innerhalb der einzelnen Antriebskonzepte aus systemanalytischer Ansatz nur über die Anwendung einer umfassenden Lebensweganalyse vermieden werden kann.

Zur Bewertung der vorliegenden alternativen Antriebskonzepte (Brennstoffzelle, Elektro- und Hybridantrieb, Autogas (LPG), Erdgas (CNG, LNG, SNG)) ist aus systemanalytischer Sicht eine Verknüpfung des Energie- und Verkehrssystems notwendig, da Schnittstellen über den multifunktionalen Einsatz sowohl als Antriebsenergie wie auch als Speicherelement (Batterie oder Sekundärenergieträger H_2 bzw. CH_4 mit Zwischenspeicherung im Erdgasnetz) gegeben sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) (2011): Energieflussbild 2009 Deutschland, Stand 31.03.2011. URL: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=64. Zugriff im September 2012.
- [2] J. Buchgeister, U. Jeske und M. Klingele (2007): Task Sharing on Environmental Product Declaration Setup in Business to Business Relations. Vortrag LCM 2007, 27-29.08.2007 in Zürich.
- [3] Deutscher Bundestag (1994): Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft“. Die Industriegesellschaft gestalten – Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen des 12. Deutschen Bundestages, Bonn.

- [4] EU Parlament und Rat (2009): Verordnung EG Nr. 443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Brüssel.
- [5] G. Fournier, M. Baumann, J. Buchgeister, M. Weil und R. Seign (2012): Elektrofahrzeuge als virtuelle Speicher zur Kompensierung volatiler erneuerbarer Energien in Deutschland - Ein neues Geschäftsmodell? Vortrag auf dem 4. Wissenschaftsforum Mobilität "Steps to Future Mobility", Universität Duisburg-Essen.
- [6] Kraftfahrt-Bundesamt (2012): Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2012. Pressemitteilung Nr. 3/2012. Flensburg, 24.01.2012, www.kba.de.
- [7] S. Krinke, B. Bossdorf-Zimmer und D. Goldmann (2005): Ökobilanz Altfahrzeugrecycling – Vergleich des VW-SiCon-Verfahrens und der Demontage von Kunststoffbauteilen mit nachfolgender werkstofflicher Verwertung - Kurzfassung. Volkswagen AG, Wolfsburg.
- [8] S. Rodt, B. Georgi, B. Huckestein, L. Mönch, R. Herbener, H. Jahn, K. Koppe und J. Lindmaier (2010): CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland - Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. In: UBA-Texte 05/2010, Berlin.
- [9] G. W. Schweimer und M. Levin (2000): Sachbilanz des Golf A4. Volkswagen AG, Wolfsburg.
- [10] TÜV Saarland (2005): Kohlenstoffdioxidemissionen von gasbetriebenen Personenkraftfahrzeugen mit allgemeiner Betriebserlaubnis oder EU-Typgenehmigung. Zusammenfassung Dr. K. Wiedemann, März 2005, TÜV Saarland, Saarbrücken.

- [11] Volkswagen AG (2008): Der Golf Umweltprädikat. Wolfsburg, Januar 2008, www.umweltpraedikate.de.
- [12] Volkswagen AG (2008): Der Golf Umweltprädikat – Hintergrundbericht. Wolfsburg, September 2008, www.umweltpraedikate.de.

6. Umweltwirkungen alternativer Antriebe

Hinrich Helms, Julius Jöhrens und Udo Lambrecht
Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

6.1 Einleitung

Verkehr ist nicht nur Grundlage vieler privater und wirtschaftlicher Aktivitäten, sondern auch Verursacher zahlreicher Umweltbelastungen. Dazu gehören insbesondere der Beitrag zur innerstädtischen Luftverschmutzung und der Ausstoß von Klimagasen.

Die Einführung und Verschärfung der Abgasgrenzwerte (Euro-Stufen) für Kraftfahrzeuge hat in den letzten Jahrzehnten zur Einführung von Minderungstechnologien wie Drei-Wege-Katalysator und Partikelfilter geführt, so dass trotz der Zunahme der Fahr- und Verkehrsleistungen eine erhebliche Reduktion der Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs erreicht wurde. Dennoch sind mit den heutigen Luftbelastungen noch relevante Gesundheitswirkungen verbunden. Die von der EU aufgestellten Luftqualitätsgrenzwerte [1] werden bei Feinstaub und Stickstoffdioxid (NO₂) weiterhin an vielen verkehrsdominierten Messstellen in Deutschland überschritten. Dies erfordert eine weitere Reduktion der Abgasemissionen aller Straßenfahrzeuge.

Beim Endenergieverbrauch und den Treibhausgasemissionen des Verkehrs gibt es dagegen bisher nur geringe Fortschritte: Der Endenergieverbrauch des motorisierten Verkehrs ist seit 1960 etwa um das Dreifache gestiegen [2]. Der Verkehr hat heute einen Anteil von etwa 30 % am Endenergieverbrauch in Deutschland [3], davon entfallen ca. 80 % auf den Straßenverkehr. Hierfür werden überwiegend die erdölbasierten Energieträger Diesel- und Ottokraftstoff genutzt. Erdgas und Autogas sowie Bio-

kraftstoffe haben kleinere Anteile. Eine Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und die Umstellung auf erneuerbare Energien sind jedoch wichtige Ziele der EU und der Bundesregierung.

Elektromobilität gilt hier als Hoffnungsträger, der wesentlich dazu beitragen kann, die Umweltbelastungen des Verkehrs zu verringern und seine Energieversorgung auf eine breitere Grundlage zu stellen. So ist eine Zielsetzung des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität [4]: „Die Elektromobilität soll einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten“. Im Energiekonzept der Bundesregierung [5] werden Elektrofahrzeuge als wichtige Möglichkeit genannt, die Abhängigkeit von Erdöl zu reduzieren. Aber inwieweit kann Elektromobilität tatsächlich dazu beitragen, diese Probleme zukünftig zu verringern? Im Fokus der Betrachtungen dieses Beitrags steht der motorisierte Straßen- und insbesondere der Pkw-Verkehr.

6.2 Der Lebensweg von Elektrofahrzeugen

Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen von Elektro-Pkw und welche Minderung können sie im Vergleich zu Pkw mit Verbrennungsmotoren erzielen? Zur Beantwortung dieser Fragen müssen die Treibhausgasemissionen entlang des gesamten Lebensweges der Fahrzeuge analysiert werden (vgl. Abbildung 29). In Ökobilanzen werden dazu die Energieaufwendungen und Emissionen für die Herstellung der Fahrzeuge, bei der Nutzung der Fahrzeuge sowie für deren Entsorgung bzw. Recycling berücksichtigt.

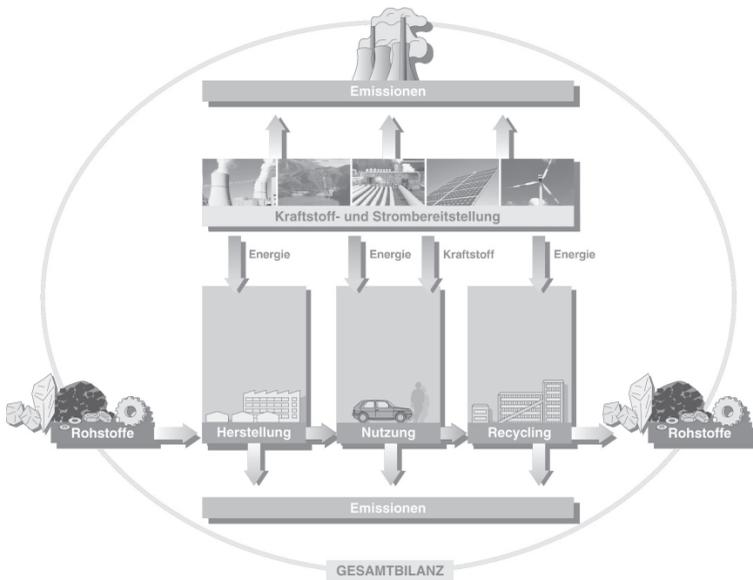


Abbildung 29: Was wird bei der Umweltbilanzierung der Elektrofahrzeuge berücksichtigt? (Eigene Darstellung).

In dem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projekt UMBReLA [6] wurden für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge verschiedene Antriebskonzepte und Nutzungsarten ökobilanziell verglichen. Dabei kam das vom IFEU entwickelte Ökobilanzmodell eLCAR (Electric Car LCA) zum Einsatz. Die Basis für die Modellierung bilden Daten aus aktuellen BMU-geförderten Flottenversuchen, die mit Literaturdaten sowie IFEU-internen Datensätzen ergänzt wurden.

Am Beispiel eines Kompaktklasse-Pkw wird in diesem Artikel der Einfluss der Fahrzeugherstellung, der Fahrzeugnutzung sowie der Strombereitstellung auf die Treibhausgasemissionen dargestellt. Der geographische Bezugsrahmen ist dabei Deutschland. Die Infrastruktur zur Fahrzeugherstellung und -entsorgung bzw. zur Energiebereitstellung wird nicht bilanziert, da ihr Anteil vernachlässigbar ist.

6.2.1 Fahrzeug- und Batterieherstellung

Die Herstellung von Fahrzeugen und Batterien wird im Ökobilanzmodell eLCAr über detaillierte Informationen zum Materialeinsatz für die Fahrzeuge sowie dem mit der Produktion zusammenhängenden Energie- und Transportaufwand bilanziert (siehe [6]). Dabei sind insbesondere die zwischen den Antriebskonzepten differierenden Komponenten von Bedeutung, bei Elektrofahrzeugen ist dies vor allem die Batterie. Während für die heutige Situation von 1,5 Batterien (Energiedichte 70 Wh/kg) über den Lebensweg des Fahrzeugs ausgegangen wird (es ist also bei jedem zweiten Fahrzeug ein Austausch der Batterie unterstellt), wird 2030 nur noch eine Batterie (150 Wh/kg) für das Fahrzeugleben unterstellt (siehe [6]). Für die Fertigung der Fahrzeuge und Batterien in Deutschland wird im Szenario 2030 der entsprechende Strommix mit einem deutlich höheren Anteil an erneuerbaren Energien angesetzt.

Wichtige Grundlage der Bilanzierung der Lithium-Ionen-Batterie sind Herstellerdaten. Berücksichtigt wurden die Materialherstellung und -verarbeitung für die Zellen und das Gehäuse sowie das Batteriemangement, außerdem Energieeinsatz und Transportprozesse für die Fertigung.

Unter den genannten Annahmen verursacht die Herstellung einer Batterie mit einer heute für mittlere Fahrzeuge typischen Kapazität von 24 kWh Treibhausgasemissionen von etwa 5 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Die gesamten Herstellungsemissionen eines Kompaktklassefahrzeugs liegen damit beim BEV mit über 11 t nahezu doppelt so hoch wie bei einem konven-

tionellen Otto-Pkw mit unter 6 t (siehe Abbildung 30). Bei einem Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV) ist die Batterie in der Regel deutlich kleiner; es muss jedoch auch der zusätzliche verbrennungsmotorische Antriebsstrang berücksichtigt werden. Bei einer gegenüber dem BEV halbierten Batteriekapazität (12 kWh) entstehen etwa 9 Tonnen Treibhausgasemissionen.

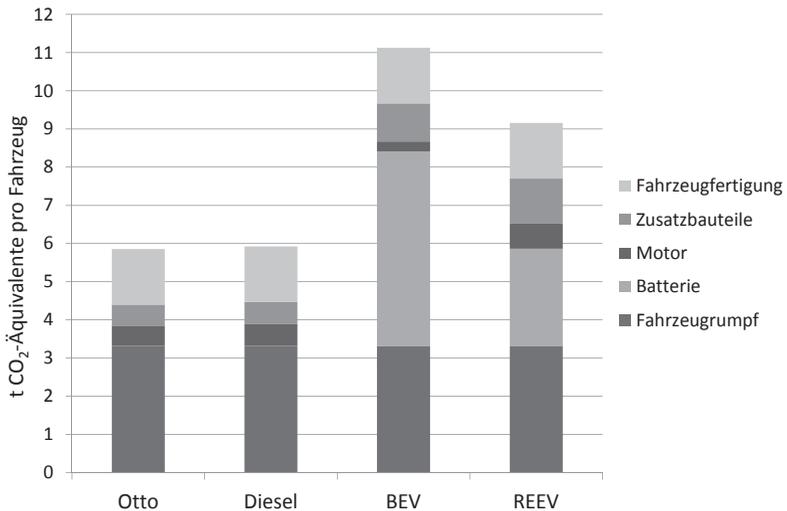


Abbildung 30: THG-Emissionen der Herstellung eines Pkw der Kompaktklasse [6], Stand 2010.

Die Unterschiede in der Herstellung zwischen einem BEV und einem konventionellem Otto- bzw. Diesel-Fahrzeug liegen damit bei ca. 5 t CO₂-Äquivalenten. Umgelegt auf einen Kilometer entspricht dies (bei einer Lebensfahrleistung von 150.000 km) einer „Last“ von ca. 30 g CO₂/km für das BEV. Die Emissionen während der Nutzung des Fahrzeuges müssen damit also – durch Effizienzverbesserungen und den Einsatz von erneuerbaren Energien – um etwa 30 g CO₂/km geringer sein als bei konventionel-

len Diesel- und Otto-Pkw, um den höheren Produktionsaufwand zu kompensieren. Geringere Laufleistungen der Elektro-Pkw erhöhen die CO₂-Menge je Kilometer, die gegenüber dem konventionellen Pkw zusätzlich abzuschreiben ist.

6.2.2 Fahrzeugkonzepte und ihre Nutzung

Die Effizienz der Fahrzeuge im Betrieb ist ein weiterer wichtiger Parameter für die Klimabilanz der Fahrzeuge. Einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung kann die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs der Fahrzeuge leisten (siehe Abbildung 31).

Hybridfahrzeuge (z.B. der seit einigen Jahren erhältliche Toyota Prius) steigern durch die Elektrifizierung die Effizienz vor allem im städtischen Bereich, wo der konventionelle Antrieb im Teillastbetrieb einen geringeren Wirkungsgrad aufweist, und bieten die Möglichkeit, Bremsenergie zurückzugewinnen. Während „Mild-Hybride“ lediglich den Startvorgang elektrisch unterstützen, kann ein Voll-Hybrid mit größerer Batterie mehr Bremsenergie aufnehmen und Strecken rein elektrisch zurücklegen. Diese Fahrzeuge nutzen ausschließlich konventionellen Kraftstoff zum Tanken.

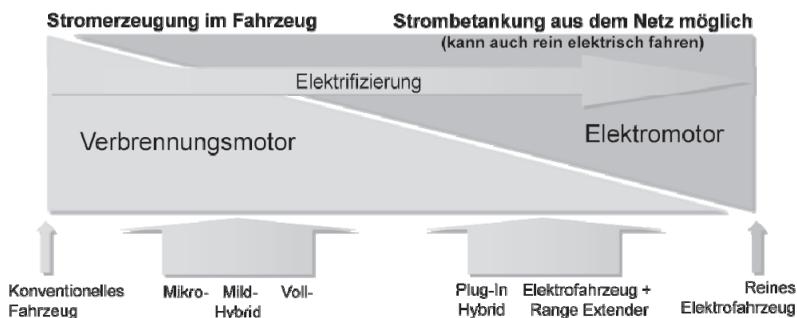


Abbildung 31: Elektrifizierung des Antriebsstrangs (eigene Darstellung).

Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-Kfz (Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung) haben eine größere Batterie als die klassischen Hybrid-Fahrzeuge und können am Stromnetz aufgeladen werden. Sie haben üblicherweise eine elektrische Reichweite von ca. 50 km.

Rein elektrisch betriebene Batteriefahrzeuge beziehen ihre Energie allein aus dem Stromnetz. Die Reichweite dieser Fahrzeuge ist damit durch die Batteriekapazität begrenzt. Dementsprechend ist die Batterie in der Regel deutlich größer als bei Plug-In-Hybriden bzw. Elektrofahrzeugen mit Range Extender.

Am Beispiel eines Kompaktklasse-Pkw wird in diesem Beitrag der Einfluss wichtiger Parameter auf die Treibhausgasbilanz diskutiert. Dabei werden folgende Antriebskonzepte untersucht:

- Diesel- und Otto-Pkw,
- Elektro-Pkw (12 kWh-Batterie) mit Otto-Motor als Range-Extender (REEV)
- Reines Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV mit 24 kWh-Batterie)

Der Energieverbrauch während der Fahrt hängt neben dem Antriebskonzept vom Fahrprofil und den fahrzeugspezifischen Eigenschaften (Rollwiderstand, Gewicht etc.) sowie der Nutzung von Nebenverbrauchern (z.B. Klimaanlage) ab. Dieser wurde unter der Berücksichtigung von im Straßenverkehr aufgenommenen Fahrprofilen (Fahrmuster des Handbuchs Emissionsfaktoren [7]) und Annahmen zu den Nebenverbrauchern ermittelt. Die für ein Kompaktklassenfahrzeug bei mittlerer Nutzung (30 % Innerortsverkehr, 30 % BAB, 40 % sonst. Außerortsverkehr) berechneten Verbrauchswerte sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Verbrauch eines Pkw der Kompaktklasse, mittlere Nutzung [2]; [6].

	Otto	Diesel	REEV (verbr.)	REEV (elektr.)	BEV
	l/100 km	l/100 km	l/100 km	kWh/100 km	kWh/100 km
2010	7,4	5,8	7,4	21	23,1
2030	5,8	5,0	5,8	15,7	17,2

Die Verbrennungsmotoren werden dabei von Kraftstoffen mit wachsendem Biokraftstoffanteil angetrieben. Es wurde nach [2] angenommen, dass der Anteil der Biokraftstoffe von heute 3 % bei Otto-Pkw und 5 % bei Diesel-Pkw auf 10 bzw. 13 % ansteigt. Wenn nicht anders angegeben, wird von einer Lebenslaufleistung von 150.000 km ausgegangen.

6.2.3 Strombereitstellung für Elektrofahrzeuge

Der für den Fahrbetrieb erforderliche Strom muss vom Kraftwerkspark bereitgestellt werden. Die Art der Strombereitstellung ist von entscheidender Bedeutung für die Klimabilanz der Elektrofahrzeuge. Während für die Erzeugung von Strom mit Windkraft 12 g CO₂-Äquivalente/kWh entstehen, sind es bei modernen Steinkohlekraftwerken ca. 900 g CO₂-Äquivalente/kWh (siehe Abbildung 32), bei alten Braunkohlekraftwerken sogar 1.400 g CO₂-Äquivalente/kWh. Die durchschnittliche Stromproduktion in Deutschland führte im Jahr 2009 zu 630 g CO₂-Äquivalenten pro kWh Strom, für das Jahr 2030 wurden etwa 42 g/kWh berechnet [8].

Elektrofahrzeuge als zusätzlicher Stromverbraucher sorgen dafür, dass Kraftwerke, die sonst nicht zur Stromerzeugung herangezogen worden wären, in manchen Stunden zum Einsatz kommen. Diese sogenannten „marginalen Kraftwerke“ (oder Grenzkraftwerke) sind – je nach Zeitpunkt der Nachfrage – beispielsweise Steinkohle- oder Gaskraftwerke. Welches der Kraftwerke gerade das marginale Kraftwerk ist, ergibt sich aus der sogenannten Merit-Order, in der die Kraftwerkserzeugungskapazitäten nach Betriebskosten sortiert dargestellt werden (Angebotskurve). Für die Grenz-

kosten sind die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere Brennstoff- und Zertifikatspreise, ausschlaggebend. Wichtig ist allerdings auch der Zeitverlauf der Nachfrage. Nachts ist die Stromnachfrage geringer; dadurch sind Grenzkraftwerke solche, die niedrigere variable Kosten haben als Grenzkraftwerke tagsüber. Bei entsprechender Ladestrategie der Elektrofahrzeuge kann dies zu einer höheren Auslastung von Mittellastkraftwerken (z.B. Steinkohle) führen.

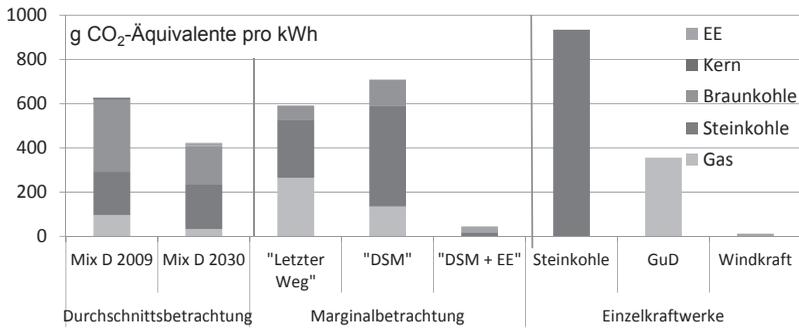


Abbildung 32: Spezifische Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung für EV in 2030 [8].

Zur Bewertung dieser energiewirtschaftlichen Effekte wurden im Rahmen eines vom BMU finanzierten Projektes energiewirtschaftliche Modelle mit einem Ökobilanzmodell gekoppelt [8]. Dabei wurde ein Fahrzeugbestand von 12 Mio. E-Pkw im Jahr 2030 zu Grunde gelegt. Für diese Rahmenbedingungen wurden drei konkrete „Ladeszenarien“ untersucht:

- Keine Ladesteuerung („Tanken nach dem letzten Weg“): Dies bedeutet einen Anstieg der Spitzenlast um 6,2 GW [8]. Die entstehenden Lastspitzen (vor allem am frühen Abend) werden in erster Linie durch Gaskraftwerke und in geringem Umfang durch Steinkohle gedeckt. Die spezifischen CO₂-Emissionen für diesen zusätzlichen Strom liegen deutlich höher als der

durchschnittliche Strommix in 2030, der zu etwa der Hälfte aus erneuerbaren Energien besteht.

- Durch gesteuertes Laden („DSM“ = Demand Side Management) kann der Anstieg der Spitzenlast auf 1,2 GW begrenzt werden ([9] und [10]). Zudem können hierbei etwa 30 % des Stroms genutzt werden, der in Phasen eines Überangebotes (z.B. bei starkem Wind) abgeregelt werden müsste. Damit könnte ca. 3,5 % des Fahrstroms von E-Pkw durch Überschussstrom bereitgestellt werden und gleichzeitig ein signifikanter Beitrag zur besseren Integration fluktuierender erneuerbarer Energien geleistet werden. Die Verlagerung des Ladevorgangs führt jedoch auch dazu, dass durch die Verstetigung des Strombedarfs von E-Pkw vor allem Kraftwerke mit geringen variablen Kosten genutzt werden, also insbesondere Steinkohlekraftwerke. In Summe führt dies zu noch höheren Treibhausgasemissionen als bei der ungesteuerten Betankung nach dem letzten Weg (siehe Abbildung 32).
- Durch Zubau zusätzlicher erneuerbarer Energie in Höhe des geladenen Fahrstroms in Verbindung mit gesteuertem Laden (DSM+EE) kommt es zu einer deutlichen Reduktion der mit der Strombereitstellung verbundenen Treibhausgasemissionen. Das Ziel einer nahezu klimaneutralen Betankung wird dann fast erreicht.

6.3 Treibhausgasbilanz über den gesamten Lebensweg

Setzt man die oben diskutierten Lebenswegabschnitte zur Gesamtbilanz zusammen, so ergibt sich die Treibhausgasbilanz über den gesamten Lebensweg. Da sich der Strommix in den kommenden Jahren signifikant ändert, werden im Folgenden zwei Zeitpunkte vorgestellt: die Bilanz unter heutigen Bedingungen und für das Jahr 2030.

6.3.1 Die heutige Situation

Der heutige Stand des Kraftwerksparks und der Fahrzeugtechnologien führen dazu, dass bei den Analysen das Dieselfahrzeug bei den Treibhausgasemissionen deutlich besser als der Benziner abschneidet – vornehmlich aufgrund der höheren Motoreffizienz und der geringeren Emissionen in der Kraftstoffvorkette. Das BEV liegt, trotz der deutlich höheren Herstellungsemissionen, zwischen Otto- und Dieselantrieb, da die nutzungsbedingten Emissionen geringer als bei den Verbrennern sind (vgl. Abbildung 33).

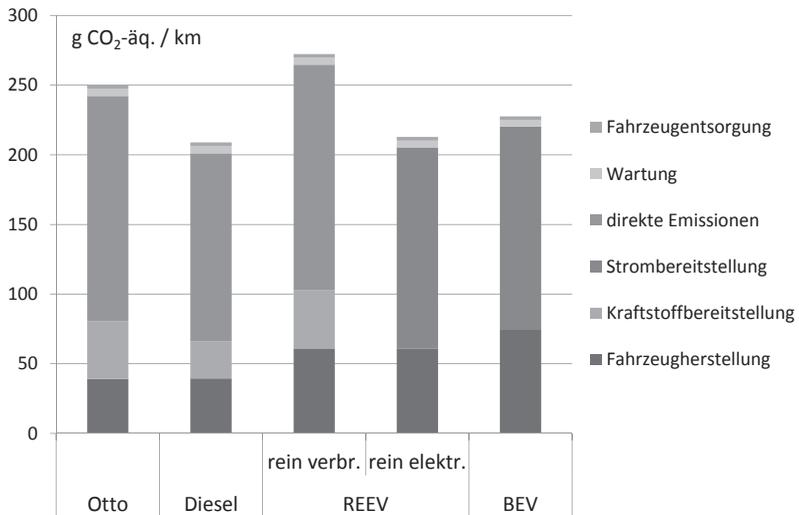


Abbildung 33: Klimawirkung verschiedener Antriebstechnologien für einen Kompaktklasse Pkw 2010 [6].

Beim REEV liegen die Emissionen im rein elektrischen Betrieb entsprechend niedriger als im verbrennungsmotorischen Betrieb. Die Höhe der Treibhausgasemissionen hängt damit vom Anteil des elektrischen Betriebes ab: Bei rein elektrischem Betrieb liegen die Treibhausgasemissionen etwas

niedriger als beim BEV, da durch die kleinere Batterie die Herstellungsaufwendungen geringer sind. BEV und REEV können zudem Strom aus erneuerbaren Quellen nutzen. Wird garantiert, dass dieser Strom zusätzlich erzeugt wird und nicht nur von anderen Abnehmern auf Elektro-Fahrzeuge verschoben wird, dann führt dies zu einem deutlichen Klimavorteil.

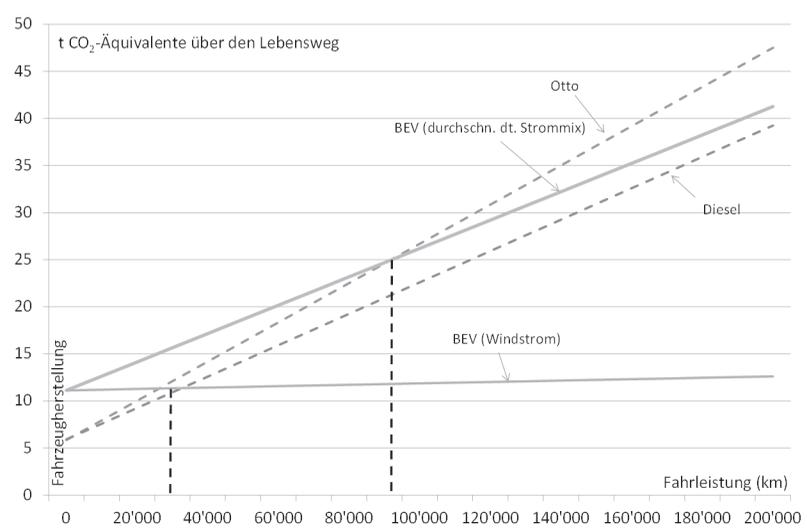


Abbildung 34: Klimawirkung nach Lebensfahrleistung, Strommix und Antriebstechnologie (gemischte Nutzung) [6].

Eine Betrachtung über die Fahrleistung zeigt: Ein mit heutigem deutschem Strommix betriebener batterieelektrischer Pkw muss etwa 100.000 km betrieben werden, um die höheren Herstellungsaufwendungen durch geringere Emissionen während der Nutzungsphase gegenüber einem Otto-Pkw auszugleichen (Abbildung 34). Da in der Nutzungsphase bei Diesel-Pkw nur geringfügig höhere Treibhausgasemissionen als das BEV entstehen, können die höheren Herstellungsaufwendungen des BEV erst bei einer Fahrleistung von über 200.000 km ausgeglichen werden. Bei

Nutzung von Strom aus zusätzlichen erneuerbaren Energie entstehen in der Nutzungsphase nahezu keine zusätzlichen Emissionen, so dass die Klimabilanz des BEV bereits ab einer Fahrleistung von etwa 30.000 km günstiger ist als beim konventionellen Pkw.

Insbesondere im Stadtverkehr mit vielen Brems- und Beschleunigungsvorgängen und hohen Anteilen von Teillastbetrieb haben Elektro-Pkw große Effizienzvorteile gegenüber Otto-Pkw. Abbildung 35 zeigt, dass dementsprechend bei einer städtischen Nutzung (City-Nutzung) die erhöhten Aufwendungen bei der Fahrzeugherstellung des BEV auch im Strommix 2010 schon bei Fahrleistungen von ca. 40.000 km durch die geringeren Nutzungsemissionen ausgeglichen werden. Bei einer Lebensfahrleistung von 150.000 km ergäbe sich damit bei einer City-Nutzung ein Vorteil von ca. 11 t CO₂ durch den Einsatz von Elektro-Pkw, bei einer gemischten Nutzung jedoch nur ein Vorteil von ca. 5 t.

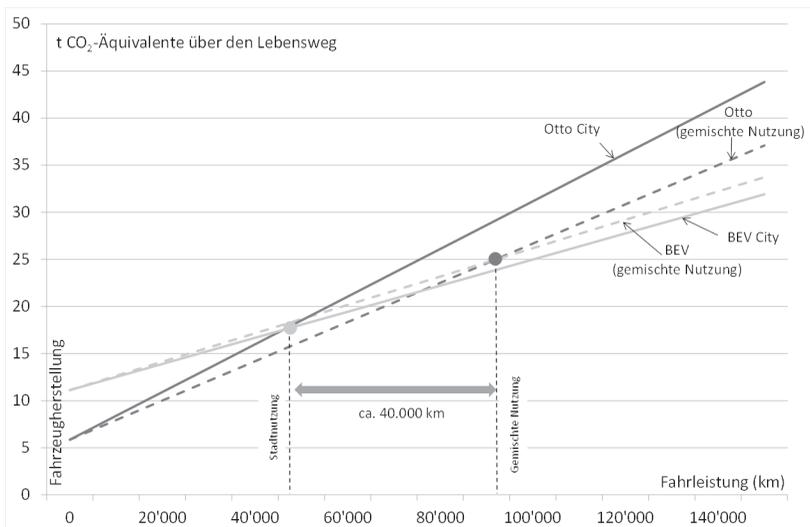


Abbildung 35: Klimawirkung nach Lebensfahrleistung, Antriebstechnologie und Nutzung [6].

Die eigene Bilanz erstellen – der Emobil-Umweltrechner

Mit dem Projekt UMBReLA begleitete das IFEU die BMU-Aktivitäten zu Forschung und Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland in den letzten drei Jahren. Basierend auf den Ergebnissen von UMBReLA wurde ein Umweltrechner erstellt, mit dem verschiedene Antriebskonzepte für individuelle Situationen verglichen werden können. Dazu müssen nur wenige, leicht verständliche Parameter eingegeben werden. Der Rechner ist frei zugänglich im Internet auf der Projekthomepage www.emobil-umwelt.de zu finden.



Abbildung 36: Beispiele Umweltrechner UMBReLA (<http://www.emobil-umwelt.de>).

6.3.2 Szenario 2030

Mit der Verbesserung der Effizienz der Fahrzeuge sowie der Zunahme des Anteils von Biokraftstoffen und erneuerbarem Strom sinken die spezifischen Treibhausgasemissionen der Pkw. Wird für 2030 der angestrebte durchschnittliche deutsche Strommix mit etwa 50 % erneuerbaren Energien zu Grunde gelegt, dann zeigen sich – trotz der dann immer noch höheren Herstellungsaufwendungen der Elektrofahrzeuge – signifikante Vorteile für Elektrofahrzeuge (Abbildung 37). Eine Ursache für die relativ bessere Bilanz des BEV liegt dabei auch in der gegenüber 2010 unterstellten wesentlich besseren Haltbarkeit der Batterie.

Die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen kann durch eine Kopplung des Ausbaus erneuerbarer Energien an die Markteinführung der E-Fahrzeuge und gesteuertem Laden („DSM + EE“) nochmals signifikant verbessert werden. Die Aufladung der Elektrofahrzeuge erfolgt dann nahezu klimaneutral.

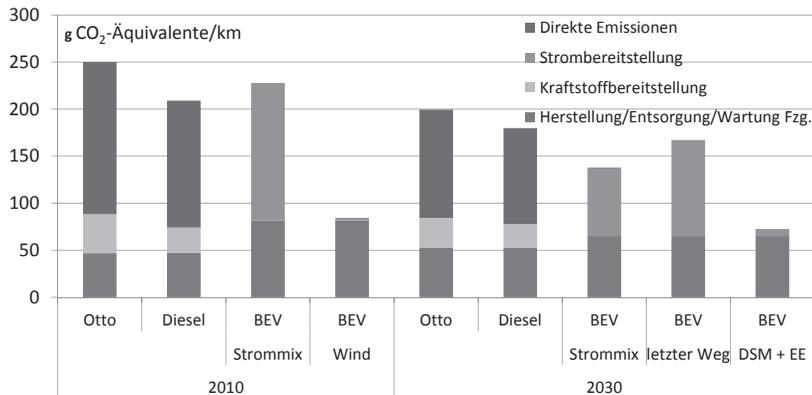


Abbildung 37: Klimawirkung für verschiedene Strommixe und Antriebstechnologien (2010 und Szenario 2030).

Gelingt es allerdings nicht, entsprechende zusätzliche Kapazitäten aufzubauen, so besteht das Risiko, dass die Nutzung von entsprechenden Grenzkraftwerken zu höheren Treibhausgasemissionen führen: So erhöhen sich durch ungesteuertes Laden nach dem „letzten Weg“ die Treibhausgasemissionen gegenüber dem durchschnittlichen Mix 2030 um gut 20 %, da hier verstärkt ältere fossile Kraftwerke zur Deckung der Spitzenlast zum Einsatz kommen müssen. Gesteuertes Laden (DSM) ohne eine Kopplung an erneuerbare Energie (d.h. besserer Ausnutzung kostengünstiger Mittellastkraftwerke während der Nacht) führt sogar zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen um etwa 35 %. Ähnliche Effekte wurden auch in anderen Studien (z.B. [11]) ermittelt.

6.4 Energieeffizienz alternativer Antriebskonzepte

Neben Batterieelektrischen Fahrzeugen werden auch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle (FCEV) von einigen Automobilherstellern weiterentwickelt. Die Analyse der Treibhausgasemissionen eines Brennstoffzellen-Pkw gegenüber einem Elektro-Pkw, jeweils über den gesamten Lebensweg als Szenario für 2030 [6], zeigt Vorteile für den Elektro-Pkw. Auch bei Brennstoffzellen-Pkw verbessert sich die Klimabilanz zwar mit dem Einsatz erneuerbarer Energien (z.B. Windstrom für die Elektrolyse) deutlich, erreicht jedoch trotzdem nicht das Niveau eines mit zusätzlichem Windstrom betriebenen Elektro-Pkw (siehe Abbildung 38).

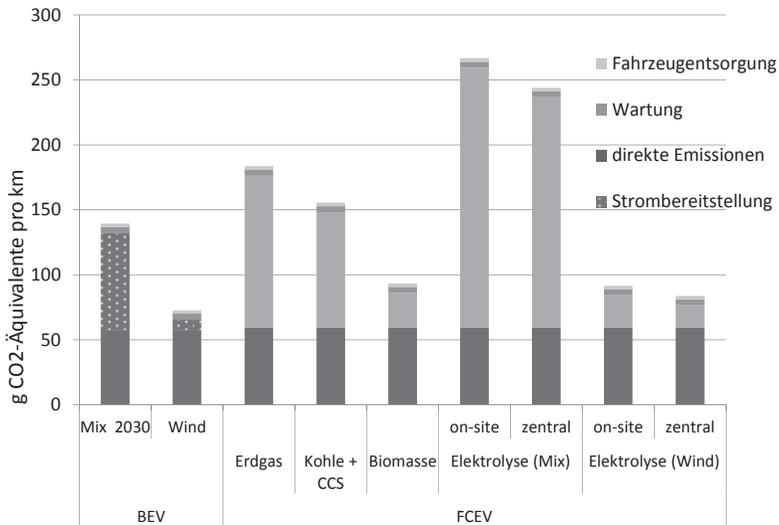


Abbildung 38: Klimabilanz von BEV und FEV der Kompaktklasse mit unterschiedlicher Energiebereitstellung (Szenario 2030) [6].

Die Nachteile des Brennstoffzellen-Pkw gehen dabei u.a. auf den schlechteren Gesamtwirkungsgrad zurück. Während bei Elektro-Pkw der Strom aus dem Netz nach Zwischenspeicherung in der Batterie am Elektromotor direkt in Antriebsleistung umgewandelt wird, erfolgt bei der Brennstoffzelle der zusätzliche Umwandschritt der Elektrolyse. Nach Zwischenspeicherung der Energie in Form von Wasserstoff erfolgt dann im Fahrzeug die Rückverstromung durch die Brennstoffzelle (siehe Abbildung 39). Insgesamt kann bei einem Elektrofahrzeug damit fast 80 % des bereitgestellten Stroms in Antriebsenergie umgesetzt werden. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen liegt dieser Anteil nur bei gut einem Viertel (26 %).

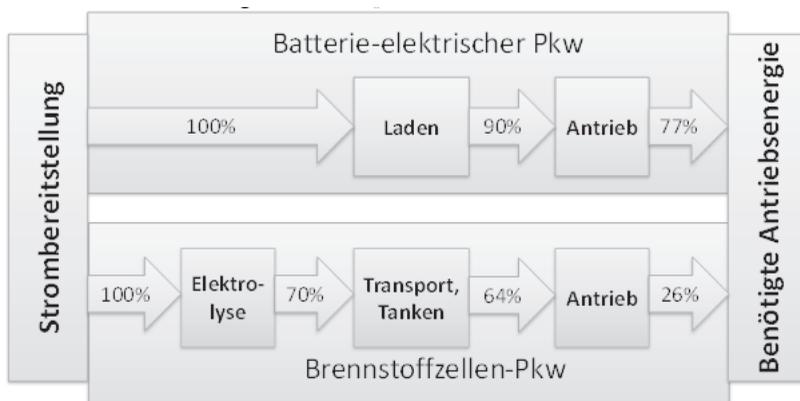


Abbildung 39: Wirkungsgradbeispiel der Antriebsstränge [6].

So sorgt die Verwendung von Strom aus zusätzlichen erneuerbaren Energien zwar für eine günstige Klimabilanz sowohl bei Brennstoffzellen-, als auch bei Elektrofahrzeugen, erneuerbare Energien bleiben jedoch auf absehbare Zeit begrenzt. Jede Kilowattstunde erneuerbaren Stroms sollte daher den größtmöglichen Nutzen bringen. Die Frage der Energieeffizienz von Antriebskonzepten rückt unter diesen Randbedingungen verstärkt in den Blickpunkt. Abbildung 40 zeigt die Treibhausgasemissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte und Energiequellen gegenüber dem kumulierten Energieaufwand über den gesamten Lebensweg des Fahrzeugs.

Bei konventionellen Pkw mit Verbrennungsmotor korrelieren beide Größen bei Nutzung fossiler Kraftstoffe. Mit durchschnittlichem deutschen Strommix betriebene Elektrofahrzeuge liegen auch bei der Energieeffizienz über den Lebensweg etwa zwischen dem Otto und dem Diesel-Pkw, da hier ein großer Anteil fossiler Kraftwerke zur Stromerzeugung zum Einsatz kommt. Brennstoffzellen-Pkw haben demgegenüber durch die zusätzlichen Umwandlungsverluste der Elektrolyse einen höheren Energieaufwand und bei gleichem Strommix auch eine schlechtere Klimabilanz.

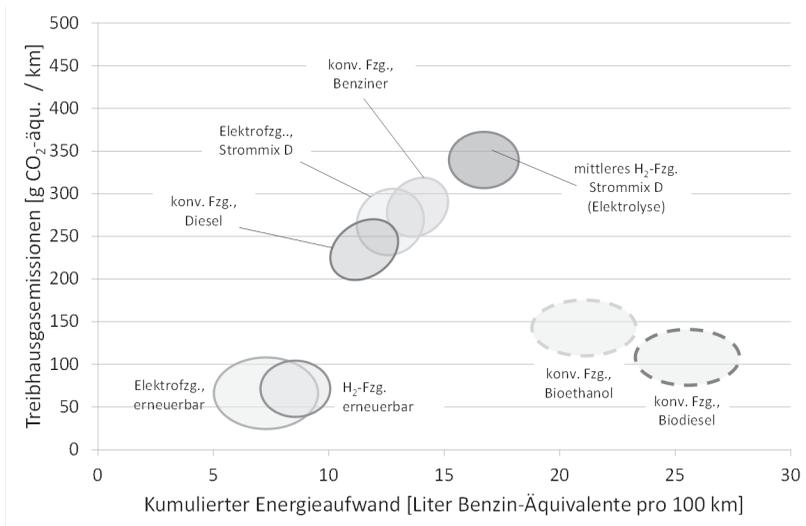


Abbildung 40: Treibhausgasemissionen und Energieaufwand über den Lebensweg eines Pkw der Kompaktklasse (eigene Darstellung auf Basis von [6]).

Biokraftstoffe können für konventionelle Pkw zwar eine deutliche Verbesserung der Klimabilanz erreichen (mögliche Landnutzungsänderungen sind dabei nicht berücksichtigt), die Energieeffizienz über den gesamten Lebensweg stellt sich jedoch deutlich schlechter dar. Wird dagegen Strom z.B. aus zusätzlichen Windkraftanlagen entweder direkt in Elektrofahrzeugen oder zur Produktion von Wasserstoff für Brennstoffzellen-Pkw eingesetzt, dann stellt sich dies sowohl aus Klimasicht, als auch aus Effizienz-sicht als günstigste Alternative dar¹⁸. Aus der Effizienzperspektive stehen BEV dabei jedoch besser da als FCEV. Letztere haben durch ihre deutlich höhere Reichweite jedoch auch ein erweitertes Nutzungsspektrum.

¹⁸ Als Energieaufwand der Windkraftanlage wird dabei die Energieabgabe ins Stromnetz bilanziert.

6.5 Fazit

Elektro-Pkw sind zwar vor Ort emissionsfrei, kommen aber zur Lösung der aktuellen verkehrsbedingten Probleme der Luftreinhaltung zu spät. Sie haben auch auf die Reduzierung der städtischen Lärmbelastung nur einen geringen Einfluss. Elektro-Pkw bieten aber mittel- und langfristig große Potenziale, um die Energieversorgung des Verkehrs zu diversifizieren und dessen Treibhausgasemissionen zu mindern. Das zeigen die hier vorgestellten Umweltbilanzen, die den gesamten Lebensweg der Fahrzeuge - von der Herstellung der Fahrzeuge und hier insbesondere der Batterie über deren Nutzung bis zur Entsorgung bzw. einem Recycling - betrachten.

Heute ist die Klimabilanz eines Elektro-Pkw bei Nutzung des deutschen Durchschnittstroms nur wenig besser als bei einem modernen Otto-Pkw. Diesel-Pkw zeigen sogar geringere Treibhausgasemissionen. Denn zum einen führt die Batterie (24 kWh) gegenüber einem konventionellen Pkw zu einer Verdoppelung der Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung. Zum anderen ist der Stromverbrauch des Elektro-Pkw über den heutigen deutschen Kraftwerkspark mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden. Erst die Nutzung von Strom aus zusätzlich installierter Kapazität erneuerbarer Energien führt zu einer relevanten Reduzierung der Treibhausgasemissionen, was den Elektro-Pkw dann bereits heute wesentlich klimaverträglicher macht als konventionelle Pkw.

Zukünftig werden die Treibhausgasemissionen der Herstellung der Batterien zurückgehen, ihre Einsatzdauer wird sich erhöhen und auch die Effizienz der Fahrzeuge wird sich verbessern. Zusätzlich ist ein Ausbau erneuerbarer Energien zur Strombereitstellung zu erwarten. Unter den getroffenen Annahmen zeigen sich im Jahr 2030 deutliche Klimavorteile von Elektro-Pkw gegenüber verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen, wenn die erneuerbaren Energien entsprechend dem Bedarf der Elektro-Fahrzeuge zusätzlich ausgebaut werden. Geschieht dies nicht, könnten zur Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage durch Elektroautos überwiegend

fossile Energieträger (u.a. Kohle) zum Einsatz kommen. Damit würden Elektro-Pkw einen nur geringen Klimavorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen haben. In Verbindung mit geeigneten Rahmenbedingungen für einen Ausbau erneuerbarer Energie stellen Elektrofahrzeuge jedoch eindeutig eine aussichtsreiche Perspektive für einen klimafreundlicheren Verkehr dar.

Pkw mit Range-Extender (REEV) oder Plug-In-Hybrid-Pkw (PHEV) können die Vorteile der beiden Antriebsstränge (Verbrenner, Elektroantrieb) nutzen und damit auch die Reichweite der BEV deutlich steigern. Die Klimabilanz dieser Fahrzeuge, die aus heutiger Sicht in den nächsten Jahren einen erheblichen Zuwachs erfahren werden, hängt dabei stark von den Nutzungsanteilen der beiden Antriebsstränge sowie den spezifischen CO₂-Emissionen des genutzten Stroms ab. Durch eine gute Abstimmung des elektrischen und verbrennungs-motorischen Betriebs kann die Treibhausgasbilanz weiter optimiert werden.

Die dargestellten Analysen zeigen am Beispiel eines Kompaktklasse-Fahrzeugs, welche Parameter für die Treibhausgasemissionen relevant sind. Bei der Elektromobilität handelt sich um ein Innovationsgebiet mit hoher Dynamik. Die für die Umweltbilanzen relevanten Parameter müssen weiter beobachtet werden. Dazu gehören die Lebensdauer und Energiedichte von Batterien, sowie die in den Batterien eingesetzten Materialien. Die vorgestellten Umweltbilanzen sind somit Grundlage für eine ökologische Optimierung der Elektrofahrzeuge. Sie sind auch eine Grundlage für eine Gesamtschau, in der verschiedene Fahrzeuggrößen (z.B. Stadtauto mit kleiner Batterie, „Reisehybrid“) und ihre Einsatzarten (z.B. Car-Sharing, Car2Go) und Nutzung (z.B. städtisch) in Hinblick auf die Systemwirkungen bilanziert und für ökologisch besonders günstige Einsatzzwecke ausgewählt werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] EU Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Europäische Union, Brüssel.
- [2] Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 - 2030; Erstellung der Software TREMOD - Transport Emission Model im Auftrag des UBA (FZK 204 45 139); ab 1993 mit verschiedenen Aktualisierungen und Erweiterungen; dazu Kooperationsabkommen mit VDA Frankfurt; MWV Hamburg; Deutsche Bahn AG, Deutsche Lufthansa, TUI; mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) u. a. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU). Heidelberg 2009.
- [3] Energy Balance for the Federal Republic of Germany 2009. AG Energiebilanzen e.V. Berlin 2011.
- [4] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin 2009.
- [5] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin 2010.
- [6] H. Helms, J. Jöhrens, U. Lambrecht, et al (2011): Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. Heidelberg.
- [7] Handbook emission factors for road transport (HBEFA) Version 3.1. Infras. Bern 2010.
- [8] M. Peht, H. Helms, U. Lambrecht, D. Dallinger, M. Wietschel, H. Heinrichs, R. Kohrs, J. Link, S. Trommer, T. Pollok und P. Behrens (2011): Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien ge-

prägten Energiewirtschaft. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft. Vol. 35, Wiesbaden.

- [9] D. Dallinger (2010): Variable tariffs for demand response with grid-connected electric vehicles and their contribution to integrate intermittent renewable generation. Paper for 2nd European conference smartGrids & e-mobility. OTTI, Regensburg
- [10] J. Link, M. Büttner, D. Dallinger und J. Richter (2010): Optimisation algorithms for the charge dispatch of plug-in vehicles based on variable tariffs. Working paper sustainability and innovation No. S3/2010, Karlsruhe.
- [11] F. Hacker, R. Harthan, P. Kasten, C. Loreck und W. Zimmer (2011): Marktpotenziale und CO₂-Bilanz von Elektromobilität. Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM. Berlin.

7. Reduktionspotenziale bei Pkw

Michael Krail

Fraunhofer Institut für Informations- und Systemforschung (ISI), Karlsruhe

7.1 Einleitung

Verkehr ist heutzutage der Hauptverursacher von CO₂-Emissionen in der EU. Seit 1990 sind die CO₂-Emissionen aus dem Verkehr in der EU27 kontinuierlich gestiegen. Laut der Internationalen Energieagentur, IEA [1], war alleine der motorisierte Straßenverkehr für rund 93 % der gesamten CO₂-Emissionen des Verkehrs der EU27 im Jahr 2009 verantwortlich. Etwa zwei Drittel gehen davon auf das Konto des Personenverkehrs.

Derzeit existieren auf EU-Ebene noch keine verbindlichen CO₂-Reduktionsziele für den gesamten Verkehr bzw. einzelne Verkehrsträger. Sektorübergreifend existiert das Ziel von 20 % Reduktion bis 2020 gegenüber 1990. Im Weißbuch Verkehr der Europäischen Kommission [2] wurde ein Ziel von 60 % CO₂-Reduktion für den Verkehr bis 2050 gegenüber 1990 formuliert. Um diese Ziele realisieren zu können und langfristig den vom IPCC empfohlenen 2-Grad-Erwärmungspfad bis 2100 nicht zu überschreiten muss sich das heutige Verkehrssystem drastisch ändern. Signifikante Änderungen des Mobilitätsverhaltens sind dazu notwendig. Dieses kann durch ein steigendes Bewusstsein der Bevölkerung in Kombination mit fiskal- bzw. preispolitischen Maßnahmen und anderen Anreizsystemen beeinflusst werden. Jedoch scheut sich die Politik davor, der Bevölkerung weitere wesentliche finanzielle Bürden aufzuerlegen, da Mobilität unabdingbar für die Wettbewerbsfähigkeit und damit das Wachstum der Europäischen Wirtschaft ist. Die notwendigen Änderungen zeichnen sich somit eher langfristig als mittelfristig ab.

Dementsprechend steigt die Bedeutung von Innovationen im Bereich der Energieeffizienz sowohl als auch im Bereich alternativer Antriebskonzepte. Die 2009 verabschiedete Verordnung (EG) Nr. 443/2009 der Europäischen Kommission [3] soll diese Entwicklung beschleunigen. Darin sind CO₂-Ziele für die durchschnittliche Flotte der verkauften Pkw pro Hersteller in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht definiert. Die europäischen Hersteller sollen laut Verordnung das Flotten-Ziel von maximal 130 g CO₂/km bis 2015 und 95 g CO₂/km bis 2020 erreichen. Ähnliche Ziele existieren mittlerweile ebenfalls auf anderen großen Märkten außerhalb Europas. Langfristig sind jedoch 95 g CO₂/km bei Weitem nicht ausreichend, um das in der Diskussion oft erwähnte CO₂-Reduktionsziel von 80 % gegenüber 1990 zu erreichen. Technische Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz bei konventionellen Verbrennungsmotoren werden derzeit verstärkt in Neufahrzeuge eingebaut, um den Durchschnittsverbrauch zu senken. Der Carnot-Wirkungsgrad stellt dabei jedoch eine natürliche Grenze dar, die nicht überschritten werden kann. Ein technischer Wandel von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energien als Energieträger für den Verkehr ist somit unumgänglich. Jedoch dürfen dabei die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus dieser Alternativen nicht vernachlässigt werden (vgl. Beitrag Helms et al. in diesem Band).

Alternativen zum klassischen Verbrennungsmotor bei Pkw sind zum Teil bereits seit einigen Jahren verfügbar, teilweise stehen diese kurz vor der Markteinführung. Trotzdem sind weit über 99 % der europäischen Pkw-Flotte nach wie vor mit konventionellem Verbrennungsmotor ausgestattet. Eine der zentralen Fragen ist daher, wie politische Entscheidungsträger und die Autoindustrie die Einführung alternativer Antriebskonzepte beschleunigen können. Eine weitere entscheidende Frage wird sein, wie groß das maximale Potenzial von Effizienzmaßnahmen für Pkw mit konventionellen Verbrennungsmotoren ist.

Im Folgenden wird ein systemdynamischer Ansatz beschrieben, der das Entscheidungsverhalten von Pkw-Käufern für eine bestimmte Antriebstechnologie in Abhängigkeit einer Reihe zentraler Indikatoren simuliert. Der Ansatz wurde im Rahmen des Forschungsprojekts GHG-TransPoRD¹⁹ aus dem siebten Rahmenprogramm der EU weiterentwickelt und angewandt, um realisierbare CO₂-Reduktionsziele für alle Verkehrsmittel bis 2030 und 2050 in der EU zu ermitteln. Das Modell berücksichtigt dabei die Entwicklung von wichtigen Treibern sowie Hemmnissen für eine schnelle Diffusion von alternativen Antrieben: Vergleichsweise hohe Kaufpreise, geringe Tankstellen-Dichte, geringe Reichweite, begrenzte kalendarische Lebenszeit von Batterien und fehlende Information über bzw. auch Akzeptanz gegenüber neuen Antriebstechnologien. Die Rückkoppelung zwischen Verkaufszahlen einzelner Antriebstechnologien und den Verkaufspreisen wird dabei mittels angepasster 1-faktorieller Lernkurven dynamisch simuliert.

Kapitel 7.2 beschreibt zunächst die aus einer umfassenden Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse zu CO₂-Reduktionspotenzialen bei Pkw, deren Kosten und zeitliche Machbarkeit. Kapitel 7.3 beschreibt die Struktur des angewendeten Fahrzeugflottenmodells und seine Wirkungszusammenhänge. Kapitel 7.4 skizziert die Ergebnisse der Simulation von vier verschiedenen Szenarien. Ein Fazit rundet den Beitrag ab.

7.2 Technische CO₂-Reduktionspotenziale bei Pkw

Die Wirkung der im Jahr 2009 verabschiedeten Verordnung (EG) Nr. 443/2009 der Europäischen Kommission [3], die den Pkw-Herstellern in Europa CO₂-Ziele für deren Flotten bis 2015 und 2020 auferlegt hat, lässt sich eindeutig aus der Entwicklung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen

¹⁹ GHG-TransPoRD - Reducing greenhouse-gas emissions of transport beyond 2020 – linking R&D, transport policies and reduction targets: www.ghg-transpord.eu

von neu zugelassenen Pkw in Europa ablesen. Laut EEA [4] haben sich diese von 2000 bis 2008 nur um ca. 1,4 % pro Jahr verbessert, wohingegen man von 2008 bis 2010 ca. 4,4 % jährliche Reduktion der CO₂-Emissionen registriert hat. Der Großteil dieser Reduktion wurde durch den Einbau von Effizienzmaßnahmen an Pkw mit konventionellem Verbrennungsmotor erreicht. Motoren-Downsizing, verbesserte Aerodynamik und Start-Stopp Mechanismen waren dabei oft eingesetzte Technologien.

Im europäischen Forschungsprojekt GHG-TransPoRD [5] wurden die vielversprechendsten Technologien zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei Pkw identifiziert. Die Reduktionspotenziale von 51 einzelnen Maßnahmen bzw. Technologien wurden anhand einer umfangreichen Literaturrecherche zusammengetragen und auf einen durchschnittlichen Referenz-Pkw aus dem Jahr 2010 mit ca. 140 g CO₂/km bezogen ermittelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die verwendeten Studien auch Gewichtseffekte der jeweiligen Technologien und Maßnahmen berücksichtigen. Zusätzlich entstehende Kosten für Hersteller bzw. Käufer wurden ebenfalls ermittelt, sowie die technische Reife und der frühest mögliche Zeitpunkt der Markteinführung. Um maximal mögliche Potenziale von Kombinationen von Technologien zu berechnen, mussten die einzelnen Maßnahmen darüber hinaus auf deren Kombinierbarkeit analysiert werden. Mittels zahlreicher Interviews sowie Workshops mit Experten aus der Automobilindustrie wurden diese Effekte quantifiziert. Technologien, bei denen in der Literatur unterschiedlich hohe Potenziale identifiziert worden sind, wurde das jeweils gemittelte CO₂-Reduktionspotenzial aus allen Studien zugeordnet. Die Technologien wurden im nächsten Schritt gruppiert nach dem Bereich der jeweiligen Anwendung. Daraus resultierend entstand eine kurze Liste von 13 Technologieclustern i , denen bis zu sechs Einzeltechnologien j zugeordnet wurden. Dabei wurde das gesamte CO₂-Reduktionspotenzial POT des Technologieclusters i wie folgt aus den Einzelpotenzialen $POT_j(i)$ berechnet:

$$POT(i) = 1 - \left(\prod_{j=1}^n 1 - (\gamma_j * POT_j(i)) \right) \quad [7.1]$$

Der Koeffizient γ_j reduziert das Potenzial einer Technologie im Falle eines möglichen Kannibalismus-Effektes in Kombination mit anderen Technologien. Ein Beispiel für einen auftretenden Kannibalismuseffekt stellt die Kombination von rekuperativer Abgas-Wärmerückgewinnung und Latent-Wärmespeichern dar, da die Abwärme von beiden Technologien genutzt wird und somit weniger Energie für beide Technologien zur Verfügung steht.

Tabelle 11 zeigt die ermittelten Potenziale der Technologiecluster gegenüber Referenz-Pkw mit Otto- bzw. Dieselmotor des Jahres 2010 für die EU. Reduktionspotenziale von batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEV) und von Brennstoffzellen-Pkw (FCEV) wurden dabei nicht angegeben, da die Gesamtemissionen von der Herstellung des Energieträgers (Strom und Wasserstoff) abhängen. Hinsichtlich der Kosten und der Wirksamkeit der Technologien stechen besonders Technologien im Bereich Thermomanagement, der Verbrennungstechnologie, dem Motoren-Downsizing sowie der Verbesserung der Aerodynamik und der Verringerung des Rollwiderstandes hervor. Diese zeigen, dass eine substantielle Verbesserung der Effizienz von Pkw mit konventionellen Verbrennungsmotoren durchaus kostengünstig sein kann. Bei den angegebenen Kosten handelt es sich um zusätzliche Kosten für den Verbraucher zum Zeitpunkt der Markteinführung der Technologien. Die Kosten der dadurch eingesparten Teile eines Referenz-Pkw wurden abgezogen. Die Zusammensetzung der einzelnen Cluster beschreibt Akkermans et al. [5].

Tabelle. 11: CO₂-Reduktionspotenziale und Kosten von Technologieclustern.

Technologie-Cluster	Potenzial Benziner	Potenzial Diesel	Kosten (€₂₀₀₅)
Aerodynamik und Widerstand	6.8%	6.9%	288 €
Batterie-elektrische Fahrzeuge			14,271 €
CNG	17%	15.2%	2,410 €
Getriebe und Übertragung	3.6%	3.8%	2,532 €
Elektronik - Verbraucher	7.3%	7.3%	1,773 €
Elektronik - Erzeugung	5.0%	5.0%	1,415 €
Antriebssteuerung	12.6%	11.5%	1,949 €
Thermomanagement	11.2%	11.4%	791 €
Hybrid-Fahrzeuge	20.4%	20.3%	2,025 €
Brennstoffzellen-Fahrzeuge			26,233 €
Verbrennungstechnologie	9.9%	11.0%	923 €
Leichtbau	9.9%	9.9%	1,600 €
Motoren-Downsizing	19.8%	9.7%	723 €

Die aufgelisteten Technologien können zum Teil auch zur Verbesserung der Effizienz von Pkws mit alternativem Antrieb verwendet werden. Leichtbaumaßnahmen, Technologien zur Verbesserung der Aerodynamik und Verringerung des Rollwiderstands, sowie elektronische Verbraucher können sowohl bei Pkw mit konventionellen Verbrennungsmotoren als auch bei BEV, FCEV oder bei Plug-in Hybriden (PHEV) eingebaut werden.

7.3 Modellierung der Antriebstechnologiewahl

CO₂-Reduktionspotenziale für verschiedene Antriebsarten, die entstehenden Kosten für den Einbau dieser Technologien, sowie die Zeitspanne bis zu einer theoretisch möglichen, vollständigen Umstellung aller Pkw-Segmente sind die wichtigsten Erkenntnisse der im vorigen Kapitel beschriebenen techno-ökonomischen Analyse. Diese sind wesentlich für eine realistische Abschätzung der Diffusionspotenziale von alternativen Antrieben, da sie wichtige Einflussgrößen zukünftig verändern können. Wichtige

Einflussparameter für die Wahl einer bestimmten Antriebstechnologie beim Kauf eines Pkw sind: Der Kaufpreis, der Verbrauch, die jeweiligen Kraftstoffpreise, Kosten für Steuern und Versicherung, die Dichte der Betankungsinfrastruktur und die Reichweite pro Tankfüllung. Darüber hinaus wird die Entscheidung nicht immer aus rein ökonomischen Gesichtspunkten getroffen. Studien wie die von Aral [6] zeigen, dass darüber hinaus Faktoren wie Sicherheit, das Image oder schlicht das Design des Fahrzeugs nicht vernachlässigt werden dürfen.

Das integrierte Makroökonomie-, Verkehrs- und Umweltmodell ASTRA enthält ein Modul zur Simulation dieser Entscheidungen. Detaillierte Beschreibungen der Funktion und Struktur des ASTRA Modells können Schade [7] bzw. Krail [8] entnommen werden. Das ASTRA Pkw-Flottenmodell für die EU27 besteht dabei aus drei wesentlichen Teil-Modulen:

- Dem Pkw-Bestandsmodul,
- dem Zulassungsmodul und
- dem Antriebstechnologiewahl-Modul.

Der Kern des Modells bildet ein Stock-Flow-Modell, bei dem der Bestand der Pkw für jedes der EU27 Länder nach Alter, Emissionsstandard und Antriebstechnologie differenziert wird. Jährlich kommen die neu registrierten Pkw hinzu. Die verschrotteten, bzw. aus der EU exportierten Pkw, werden aus dem Bestand genommen. Die Verschrottungsrate steigt mit zunehmendem Alter der Pkw. Neuzulassungen hängen von der Anzahl der verschrotteten Pkw ab, von denen ein Teil durch neue Pkw ersetzt wird. Weitere Einflussfaktoren für die Anzahl der Neuzulassungen sind die Entwicklung des Pro-Kopf-Einkommens, die gemittelten Pkw-Kaufpreise, die gemittelten Kraftstoffpreise, die Bevölkerungsentwicklung sowie das Niveau der Motorisierung. In Abhängigkeit des Jahres der Neuzulassung werden die Pkw mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einem Emissionsstandard zugeordnet. Abbildung 41 gibt einen Überblick über die Funktion und die Wirkungszusammenhänge innerhalb des Pkw-Flottenmodells.

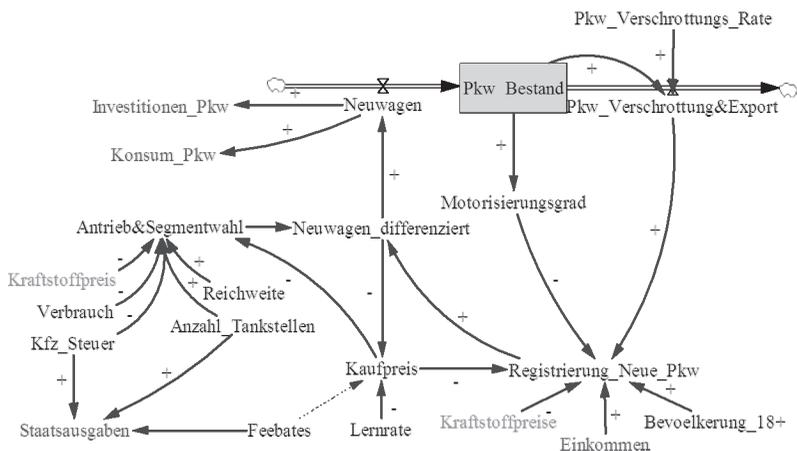


Abbildung 41: Vereinfachtes Wirkungsdiagramm des ASTRA Pkw-Flotten-Modells.

Die zweite Differenzierung in dieser Top-Down Simulation besteht in der Zuordnung der neu zugelassenen Pkw zu einer Antriebstechnologie. ASTRA unterscheidet dabei zwischen Pkw mit folgenden Antriebsarten: Diesel, Benzin, CNG (Compressed Natural Gas), LPG (Liquified Petroleum Gas), Hybrid (HEV), Bioethanol (bzw. Flexi-fuel), BEV und FCEV. Plug-in Hybride (PHEV) und Extended Range Electric Vehicles (REEV) werden der Gruppe der Hybrid-Pkw zugeordnet. Die Wahlentscheidung zwischen diesen Antriebsarten basiert in ASTRA auf der *Discrete Choice*-Theorie. Daniel McFadden [9] wurde für die Entwicklung und Anwendung dieser Theorie im Jahr 2000 der Nobelpreis zugesprochen. Die Theorie wurde dabei erstmals für die Simulation der Verkehrsmittelwahl und der Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Zusammenhang mit der Planung des BART Systems in San Francisco angewandt. Die Prämissen

sen bei der Verkehrsmittelwahl sowie der Wahl eines geeigneten Antriebs sind ähnlich. Jede Alternative besitzt dabei einen Nutzen, der in Form negierter Kosten der jeweiligen Alternativen interpretiert werden kann. Die Verfügbarkeit und der Zugang zu einer bestimmten Alternative sind in beiden Fällen beeinflussende Größen. Im Falle der Verkehrsmittelwahl wäre dies beispielsweise der Zugang zum ÖPNV, im Falle der Antriebswahl die Möglichkeit zum Auftanken bzw. Aufladen des Fahrzeugs. Zusätzlich ermöglicht die Theorie noch die Berücksichtigung von qualitativen Treibern bei der Wahlentscheidung. Individuelle Präferenzen und unterschiedliche Akzeptanz können somit ebenfalls einfließen.

Der negative Nutzen bei der Wahl eines Antriebes wird im ASTRA Pkw-Flotten-Modell mittels des Konzepts der *Total Cost of Ownership* (TCO) beschrieben. Die Kosten setzen sich daraus abgeleitet aus dem Kaufpreis pC , Steuern und Versicherung $taxC$, den Kosten für Wartung mC , den Kraftstoffkosten vC und den sogenannten Beschaffungskosten $procC$ differenziert für jede Antriebstechnologie cc wie folgt zusammen:

$$C_{cc} = \alpha_{cc} * pC_{cc} + taxC_{cc} + mC + vC_{cc} + procC_{cc} \quad [7.2]$$

Dabei werden alle Kosten auf den gefahrenen Kilometer bezogen. Einmalig bzw. jährlich anfallende Kosten wie beispielsweise der Kaufpreis werden diskontiert und mittels der durchschnittlichen Laufleistungen der einzelnen Antriebstechnologien und deren mittlere Lebensdauer auf den einzelnen Kilometer bezogen. Kraftstoffbeschaffungskosten hängen von der Dichte des Tankstellennetzes für die jeweilige Kraftstoff- bzw. dem Energieträger ab. Daraus ergeben sich durchschnittliche Entfernungen zu Tankstellen, mittels denen Kosten für Fahrt und die benötigte Zeit für Tankfahrten ermittelt werden. Diese werden ebenfalls auf den gefahrenen Kilometer umgerechnet und zu den anderen Kostenpositionen addiert.

Kraftstoffkosten ergeben sich aus dem Durchschnittsverbrauch von Pkw mit dem jeweiligen Antrieb und den Kosten des genutzten Energieträgers. Über eine Koppelung von ASTRA mit dem Weltenergiemodell POLES konnten Kraftstoffpreise von POLES an ASTRA übergeben werden. Im Gegenzug berechnet ASTRA die resultierende Nachfrage nach den Kraftstoffen über die Flottenentwicklung und die Entwicklung der Verkehrsnachfrage. Diese wiederum schließt die Rückkoppelungsschleife, indem sie in POLES [11] zu Veränderungen bei den Kraftstoffpreisen führt.

Durchschnittliche Kaufpreise für Pkw mit den unterschiedenen Antriebsarten verändern sich dynamisch im Modell. Die in Studien wie von McKinsey [11] gesammelten Daten über mögliche Kostendegressionen von alternativen Antriebskonzepten wurden mittels einfaktorieller Lernkurven in das Modell integriert. Dabei hängt die Entwicklung der Kosten ausgehend von einem hohen Kaufpreis bei Markteinführung von der Diffusionsgeschwindigkeit und den kumulierten, weltweiten Verkaufszahlen Q ab. ASTRA verwendet Gleichung 7.3 zur Berechnung der Kostendegression für verschiedene Antriebsarten sowie für die Ausstattung der Fahrzeuge mit Effizienzmaßnahmen (siehe Kapitel 7.2). Dabei werden moderate Lernraten ε für alle Antriebstechnologien cc und Effizientechnologien angenommen. Schade [12] beschreibt die angenommenen Lernraten. Ein Normalisierungsparameter m eicht die Funktion auf die Startwerte.

$$pC_{cc,t} = mQ_{cc,t}^{-\varepsilon} \quad [7.3]$$

Kostenentwicklungen aus Lernkurven spiegeln gut die Herstellungskosten wider. Allerdings sind diese Entwicklungen weniger deutlich bei den Verbraucherpreisen sichtbar. Da zudem die Hersteller angesichts des politischen Drucks zur Reduktion der CO₂-Emissionen ihrer Pkw-Flotten gezwungen sind effiziente Pkw und Pkw mit alternativen Antrieben verstärkt

zu verkaufen, geht das Modell davon aus, dass neue Antriebs- und Effizienz-Technologien über einen Zeitraum von fünf Jahren ohne Marge verkauft werden und erst danach deutlich über der Lernkurve liegende Verbraucherpreise verlangt werden. Die angenommene Kostenentwicklung entspricht damit einer abgeflachten Lernkurve.

Das verwendete Logit-Modell berücksichtigt letztlich das Kostenaggregat C in Kombination mit einem antriebspezifischen Störterm LC , der Präferenzen und Akzeptanz verschiedener Antriebstechnologien repräsentiert. Die resultierende Größe P stellt die Wahrscheinlichkeit des Kaufs eines Pkws mit einer bestimmten Antriebstechnologie cc dar.

$$P_{cc} = \frac{\exp(-\lambda * C_{cc} + LC_{cc})}{\sum_{cc} \exp(-\lambda * C_{cc} + LC_{cc})} \quad [7.4]$$

7.4 Simulation von Szenarien

Das Ziel der Anwendung des ASTRA Modells in GHG-TransPoRD bestand in der Ermittlung von machbaren THG-Reduktionszielen bis 2030 und 2050 für die EU27. Dazu wurden zehn Szenarien skizziert, die Aufschluss darüber geben sollten, welche politischen Maßnahmen die Erreichung von ambitionierten Reduktionszielen unterstützen können. Im Folgenden werden daraus 3 unterschiedliche Szenarien ausgewählt:

- *MAX E&M*: Pkw-Hersteller stellen ihre Produktion konsequent auf ausschließlich maximal effiziente konventionelle Pkw mit Verbrennungsmotoren um. Darüber hinaus wird weiter auch in F&E von alternativen Antriebskonzepten investiert und diese ebenfalls so früh wie möglich angeboten. Entstehende Kosten

werden gemäß dem in Kapitel 3 vorgestelltem Ansatz an die Verbraucher weitergegeben.

- *EV&HFC*: Es werden die gleichen Effizienzmaßnahmen bei konventionellen Pkw wie in *MAX E&M* angenommen. Zusätzlich wird ein *Feebate* System implementiert, bei dem Käufer alternativer, nicht-fossiler Antriebe 5.000 € Rabatt über den Zeitraum von 10 Jahren gewährt werden. Gleichzeitig wird eine Gebühr für den Kauf von Pkws mit Verbrennungsmotoren in Höhe von 1.500 € erhoben. Zeitgleich wird der beschleunigte Aufbau einer Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe angenommen.
- *AMB REG*: Dieses Szenario basiert auf den Annahmen des *EV&HFC* Szenarios. Zusätzlich werden fossile Brennstoffe schrittweise stärker besteuert und ab 2035 der Verkauf von Pkws mit fossilem Antrieb verboten.

Alle drei Szenarien gehen davon aus, dass die Auto-Hersteller nur noch maximal effiziente Pkw, egal ob mit konventionellem oder alternativem Antrieb, anbieten. Die im Modell simulierte Wahlmöglichkeit für den Kunden besteht damit nur noch zwischen den in Kapitel 7.3 beschriebenen Antriebsarten. Die in der techno-ökonomischen Analyse ermittelten CO₂-Reduktionspotenziale bewirken in allen drei Szenarien, dass Neufahrzeuge im Jahr 2020 bei durchschnittlich großen Benzinern 53% und bei Diesel-Pkws 48% effizienter sind als die EU-Referenzfahrzeuge aus 2010. Bei Pkws mit alternativen Antrieben ergeben sich ebenfalls deutliche Effizienzpotenziale. Abbildung 42 zeigt die Szenarienergebnisse in Form von Anteilen der Antriebsarten an der gesamten Pkw-Flotte der EU27 im Jahr 2050 auf. Hocheffiziente Pkws mit konventionellem Verbrennungsmotor dominieren im *MAX E&M* Szenario bis 2040 das Bild. Alternative Antriebe diffundieren durch die schnell realisierten Verbesserungen des Kraftstoffverbrauchs und den Kostenvorteil bei Kaufpreis und den Betriebskos-

ten nur langsam in die Flotte. Da POLES optimistische Annahmen zur Entwicklung der Öl-Ressourcen verwendet, kann sich das Bild bei pessimistischerem Verlauf zu Gunsten der alternativen Antriebe drehen. Die Einführung eines Feebate System wie in *EV+HFC* und *AMB REG* sowie der Ausbau der Betankungsinfrastruktur beschleunigt die Diffusion der alternativen Antriebe deutlich. Eine komplette Verdrängung von Pkws mit Verbrennungsmotoren findet jedoch nur in *AMB REG* durch das Verbot für Pkws mit Verbrennungsmotor statt. BEV, FCEV und PHEV prägen darin in gleichem Umfang das Bild.

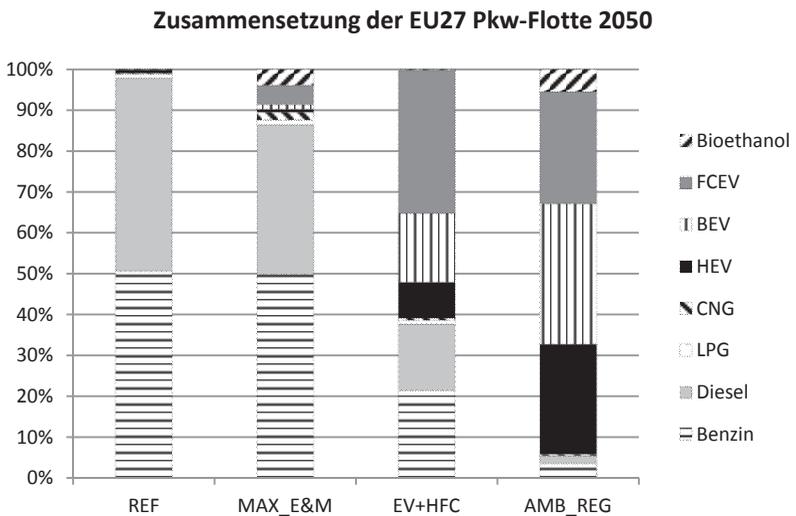


Abbildung 42: Zusammensetzung der Pkw-Flotte in 2050 in der EU.

Einer der Haupttreiber, der zur der oben skizzierten Zusammensetzung der europäischen Pkw-Flotte führt ist die Kaufpreisveränderung. Die Anwendung von adaptierten einfaktoriellen Lernkurven für Effizienztechnologien und alternative Antriebe führt in den verschiedenen Szenarien zu

unterschiedlichen Verläufen der Kaufpreise. Abbildung 43 zeigt diese Entwicklung für die verschiedenen Antriebsarten bis 2050 auf. Die langsame Diffusion von FCEV und besonders BEV in *MAX E&M* bewirkt nur langsam sinkende bzw. im Falle von BEV sogar stagnierende Kosten. Die in allen Szenarien vorgesehene Verwendung von Leichtbaumaterialien bis 2025 bewirkt im Falle von FCEV sogar eine zunächst steigende Kostenkurve. Pkws mit Verbrennungsmotor sind in *MAX E&M* zwischen 4 % und 29 % teurer als im Basisszenario. Über die Lebensdauer eines Pkw amortisieren sich diese Zusatzkosten durch den deutlich sinkenden Kraftstoffverbrauch. Trotzdem muss man besonders den abgeschätzten Anstieg der Kaufpreise bei Kleinwagen von 29 % als kritisch betrachten, da in diesem Segment die Bereitschaft zum Kauf teurerer Pkws geringer ist als im Segment der Oberklasse.

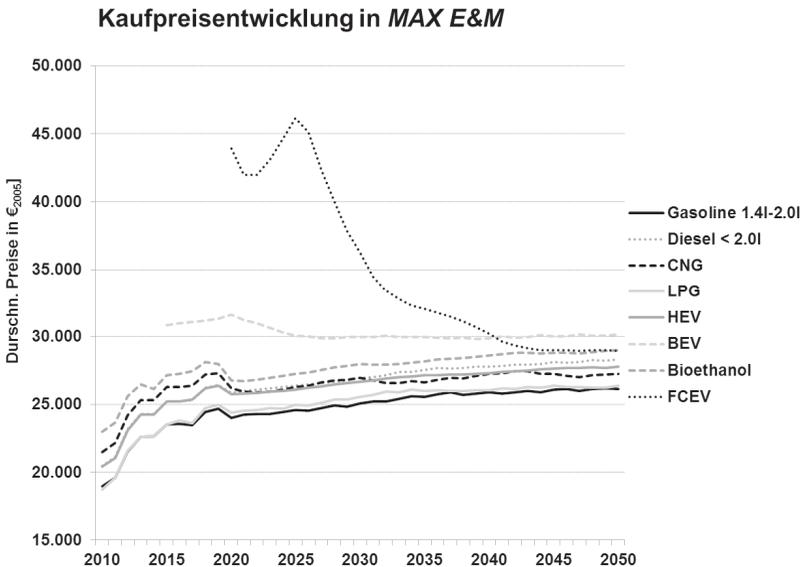


Abbildung 43: Entwicklung der durchschnittlichen Kaufpreise in *MAX E&M* in der EU.

Die Kostenkurven für das EV+HFC und das MAB REG Szenario sind ähnlich jedoch mit deutlich steilerer Kostendegression bei BEV, FCEV und HEV durch die angenommene Einführung eines Feebate Systems.

Abbildung 44 zeigt die sich ergebenden durchschnittlichen CO₂-Emissionen der europäischen Pkw Flotte in den ausgewählten Szenarien. In allen Szenarien können die Hersteller durchschnittlich die als Ziel ausgegebenen 130 g CO₂/km bis 2015 und 95 g CO₂/km bis 2020 unterbieten. Bei einer radikalen Umstellung der Verkaufsstrategie auf effiziente Pkws ließen sich gemäß der Analyse auch schnelle und deutliche Verbesserungen bei den CO₂-Emissionen realisieren. Die unteren Grenzen der CO₂ Emissionen von Pkws mit Verbrennungsmotor wird beim Anblick der Kurve des MAX E&M Szenarios deutlich. Einzig die Umstellung auf Pkws mit alternativen Antrieben macht langfristig ambitionierte CO₂-Reduktionsziele realistisch.

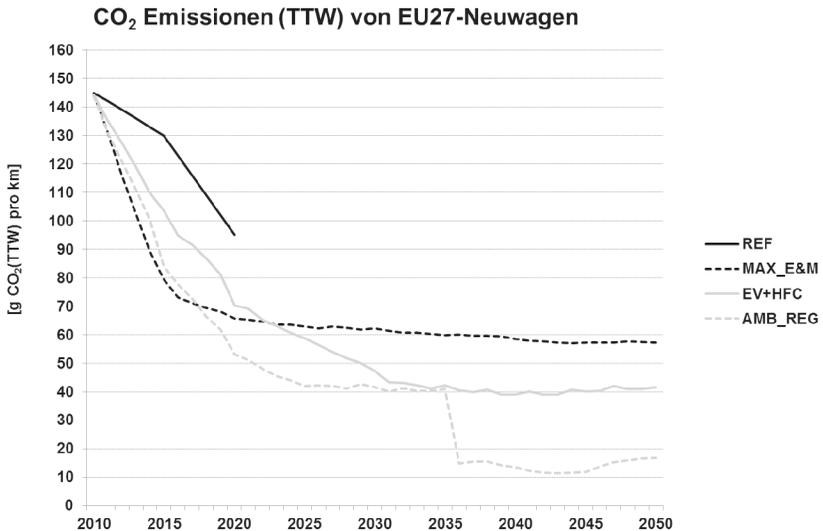


Abbildung 44: CO₂-Emissionen von neu zugelassenen Pkw in der EU.

Die Szenarienanalyse mit ASTRA ergab darüber hinaus, dass Reboundeffekte nicht unterschätzt werden dürfen. Deutlich sinkende Betriebskosten bei Pkws durch den maximalen Einsatz von Effizienztechnologien machen das Verkehrsmittel Pkw verhältnismäßig günstiger gegenüber den Alternativen. Daher ändert sich die Verkehrsmittelwahl und auch die Verkehrsverteilung. Längere Fahrten können zu gleichen Kosten gemacht werden. Dieser Reboundeffekt bewirkt, dass die CO₂-Emissionen aus dem Pkw-Verkehr im *MAX E&M* Szenario nur um 43 % gegenüber 2010 verbessern. In *AMB REG* macht sich der hohe Anteil alternativer Antriebe bemerkbar und lässt die CO₂-Emissionen bis 2050 sogar um 87 % sinken.

7.5 Fazit

Die Simulation von CO₂-Reduktionspotenzialen bei Pkw kann auf Grund ihrer Komplexität nur mit einem integrierten Ansatz gelingen. Der vorgestellte systemdynamische Ansatz basiert auf diesem Prinzip und berücksichtigt die Rückkoppelungen des Systems. In Kombination mit der techno-ökonomischen Analyse konnte abgeschätzt werden, welche CO₂-Reduktionspotenziale verschiedene Antriebskonzepte bei Pkw zukünftig haben. Verbrennungsmotoren haben trotz deutlicher Verbesserung der Effizienz in den letzten Jahren noch große Steigerungsmöglichkeiten. Die Analyse ergab maximal 53 % Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs von Pkw mit Ottomotor bis 2020 gegenüber einem europäischen Referenzfahrzeug aus dem Jahr 2010. Damit lassen sich bereits das von der EU Kommission ausgegebenen Ziel von 95 g CO₂/km realisieren. Allerdings sind ambitionierte Ziele nur durch die beschleunigte Diffusion von Pkws mit alternativen Antrieben erreichbar. Die Einführung eines Feedback-Systems kann einen Anschlagmechanismus für alternative Antriebe darstellen, muss jedoch einhergehen mit dem Ausbau der Betankungsinfrastruktur.

Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency (2011): CO₂ Emissions from Fuel Combustion.
- [2] European Commission (2011): The Transport White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. COM(2011)144 final.
- [3] Europäische Commission (2009): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen.
- [4] European Environmental Agency (2011): Monitoring the CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2010.
- [5] L. Akkermans, K. Vanherle, A. Moizo, P. Raganato, B. Schade, G. Leduc, T. Wiesenthal, S. Shepherd., M. Krail und W. Schade (2010): Ranking of measures to reduce GHG emissions of transport: reduction potentials and qualification of feasibility.
- [6] Aral (2005): Aral Studie – Trends beim Autokauf 2005. Aral press.
- [7] W. Schade (2004): Strategic Sustainability Analysis: concept and application for the assessment of the European Transport Policy.
- [8] M. Krail (2009): System-based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behavior. NOMOS-Verlag, Baden-Baden.
- [9] D. McFadden (2001): Economic Choices. In: The American Economic Review.

- [10] M. Krail, W. Schade, D. Fiorello, F. Fermi, A. Martino, P. Christidis, B. Schade, J. Purwanto, N. Helfrich, A. Scholz und M. Kraft (2007): Outlook for Global Transport and Energy Demand.
- [11] McKinsey (2010): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis – The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles.
- [12] W. Schade, M. Krail, L. Akkermans, D. Fiorello, A. Jopson, J. Köhler, A. Moizo., B. Schade, S. Shepherd, L. Sievers, L. Tercero, K. van Herle, C. Weiss und T. Wiesenthal (2012): Bottom-up quantifications of selected measures to reduce GHG emissions of transport for the time horizons 2020 and 2050: Cost assessment of GHG mitigation measures of transport.

8. Mobility 2.0: Antriebskonzepte im Zusammenspiel mit multimodaler Mobilität

Patrick Jochem^a und Jens Schippl^b

^a Institut für Industriebetriebswirtschaftslehre und Industrielle Produktion (IIP) am KIT

^b Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am KIT²⁰

8.1 Einleitung

Die prognostizierte Verdoppelung des globalen Fahrzeugbestandes bis 2050 [26] verdeutlicht die Herausforderung, der wir uns stellen müssen, wenn wir die CO₂-Emissionen im motorisierten Individualverkehr senken wollen. Dies erscheint aufgrund des signifikanten Anteils an den globalen CO₂-Emissionen von 23 % (gesamter Verkehrssektor²¹) [26] unabwendbar.

Grundsätzlich können die CO₂-Emissionen durch (1) Verkehrsleistungsreduktion, (2) Verkehrsverlagerung und (3) technische Verbesserungen am Fahrzeug oder Kraftstoff gesenkt werden. Im Hinblick auf die Zielsetzung sind zwei Dinge unumstritten. (a) Die Prognosen der globalen Verkehrsleistungsentwicklung zeigen ein signifikantes Wachstum und (b) alle drei Maßnahmen sind nicht scharf voneinander zu trennen. So kommt es beispielsweise bei Effizienzgewinnen beim Verbrennungsprozess im Pkw-Motor zur Reduktion der variablen Kosten und somit zu einem geringeren Verkehrsverlagerungs- und Verkehrsleistungsreduktionsanreiz (sog. „Reboundeffekt“; u.A. [10]).

²⁰ Die Autoren möchten Herrn Manuel Großkinsky für seine inhaltliche Unterstützung bei der Erstellung dieses Kapitels danken.

²¹ Der CO₂-Anteil des Straßenverkehrs liegt hier bei etwa 80 % [26].

Die genannten Strategien unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihres Ansatzes und ihrer Maßnahmen, sie haben auch unterschiedliche Konsequenzen für die Nutzer des Verkehrssystems bzw. für die Gestaltung von Mobilität. Die ersten beiden Strategien (1) und (2) gehen zwangsläufig mit spürbaren Änderungen für die Nutzer einher, wenn eben Fahrten vermieden werden müssen oder wenn, bei der zweiten Strategie, ein Nutzer ein anderes Verkehrsmittel für einen Weg wählt. Die dritte Strategie erlaubt dagegen grundsätzlich eine Reduktion von Energieverbrauch und Emissionen, ohne dass sich für den Nutzer spürbare Änderungen der Mobilitätsmuster ergeben müssen. Das gilt aber nicht uneingeschränkt für alle technischen Innovationen die dieser Strategie zugeordnet werden können. So gehen beispielsweise viele Experten davon aus, dass die mit hohen Erwartungen verbundenen batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles – BEV) auch noch mittel bis langfristig deutlich geringere Reichweiten und längere Ladezeiten im Vergleich zu den heutigen verbrennungsmotorgetriebenen Fahrzeugen mit sich bringen. Das kann zunächst psychologisch als Einschränkung wahrgenommen werden. Für den Nutzer können diese neuen technologischen Settings aber auch konkrete Einschränkungen mit sich bringen, die zumindest für einige etablierte Nutzungsmuster Änderungen bedeuten. Dies trifft insbesondere für die Urlaubsfahrten zu, die von vielen (noch) per Pkw durchgeführt werden (s. Kapitel 9) – im Hinblick auf die gesamtdeutsche Fahrtenverteilung ist der Anteil an Fahrtstrecken, die nicht mehr mit den heutigen handelsüblichen BEV ohne Ladevorgang überwindbar sind (100 bis 150 km), dagegen deutlich unter zwei Prozent [11].

Vor diesem Hintergrund soll im vorliegenden Beitrag der Frage nachgegangen werden, welche Implikationen verschiedene Antriebskonzepte, die in anderen Beiträgen in diesem Band diskutiert werden, für die zukünftige Gestaltung von Mobilität haben. Dazu müssen technologische Settings wie auch zentrale Parameter der aktuellen Gestaltung von Mobilität be-

rücksichtigt werden. Das Verkehrssystem wird damit als sozio-technisches System betrachtet, in dem sich technische und nicht-technische Entwicklungen gegenseitig beeinflussen. Solche in der Literatur oft als Koevolution bezeichneten Prozesse lassen sich in vielen sozio-technischen Systemen beobachten, treten aber im Verkehrsbereich besonders deutlich zu Tage (vgl. [23]; [24]). So haben technische Entwicklungen bei Fahrzeugen und Infrastruktursystemen die heutigen Mobilitätsmuster erst ermöglicht; gleichzeitig bringen die Mobilitätsmuster Erwartungen und Forderungen an Technik und Infrastruktur mit sich, die sich auf deren Ausgestaltung auswirken.

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Entwicklung der wichtigsten alternativen Antriebskonzepte kurz skizziert. Deren mögliche Implikationen auf die Gestaltung von Mobilität sind Gegenstand von Kapitel 8.2. Dabei wird deutlich gemacht, dass eine breitere, systemische Perspektive erforderlich ist um die Forschungsfrage dieses Beitrags zu adressieren (vgl. Kapitel 5). So müssen auch neue Formen oder Geschäftsmodelle zur Gestaltung von Mobilität berücksichtigt werden, die sich teilweise unabhängig von, teilweise in Verbindung mit neuen Antriebstechnologien entwickeln. Einige dieser Konzepte werden in Kapitel 8.3 eingeführt und in Kapitel 8.4 diskutiert. Kapitel 8.5 fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

8.2 Die Entwicklung der Antriebskonzepte im motorisierten Individualverkehr

Nachdem zu Anfang des motorisierten Individualverkehrs (MIV) die Antriebstechnologien noch vielseitig waren (insb. Kohle, elektrischer Strom, und Benzin; über Pferde auch Biomasse), dominierte im 20. Jahrhundert das Erdöl den MIV [15, S.9ff]. Insbesondere in den USA, aber auch in vielen anderen Staaten wurden die Fahrzeuge immer schwerer und technologische Entwicklungen gingen überwiegend zu Lasten der Energieeffizienz bei der Fahrzeugnutzung: Während ein Fahrzeug der 90er Jahre im

Vergleich zu den 50ern nicht zwingend weniger Kraftstoff verbraucht, so ist es doch erheblich stärker motorisiert, sicherer und komfortabler [26, S.81]. Dieser Prozess, der schwereren Pkw kann bis heute in Deutschland beobachtet werden (u.A. [21, S.71]), auch wenn sich der Trend verlangsamt und teilweise bereits rückläufig ist.²²

Der heutige Verbrennungsmotor hat sich über mehr als hundert Jahre in einem harten internationalen Wettbewerb weiterentwickelt und ist technisch weit fortgeschritten und ausgereift. Dies hat zu einem fest etablierten Technik-Infrastruktursystem geführt, das eng mit den Lebensgewohnheiten und Logistikkonzepten in unserer Gesellschaft verbunden ist. Es bedarf starker Treiber, um eine Änderung der etablierten und erfolgreichen Antriebstechnologien zu verursachen.

Für die Entwicklung alternativer Treibstoffe und Antriebstechnologien lassen sich verschiedene begünstigende Faktoren ausmachen. Die Reduzierung der Abhängigkeit von Ölimporten aus politisch instabilen Regionen ist sicherlich ein wichtiger Faktor, dessen Bedeutung durch die Peak-Oil-Diskussion immer wieder beflügelt wird. Weiter geht es um internationale Wettbewerbsvorteile: keiner kann es sich leisten wichtige Entwicklungen in einem hart umkämpften Markt zu verpassen. Zudem spielen Umweltaspekte bzw. Umweltregulierungen eine zentrale Rolle. Das betrifft die Reduzierung des Schadstoffausstoßes vor allem in Agglomerationsräumen.

Ganz entscheidender Treiber ist der Ausstoß klimawirksamer Gase. Der CO₂-Ausstoß des Verkehrsbereichs stieg in den letzten Jahrzehnten erheblich an. Nachdem die Europäischen Automobilhersteller Mitte der 90er Jahre absehen konnten, dass die politischen Entscheidungsträger dieser Entwicklung nicht weiter tatenlos zusehen wollten, proklamierten sie in einer freiwilligen Selbstverpflichtung ein spezifisches Emissionsziel von 140 gr. CO₂ pro Kilometer für ihre neu zugelassenen Neufahrzeuge im Jahr 2008 [6]. Dieses Ziel konnte jedoch nicht erreicht werden. Die Europäische

²² Beispielsweise ist der neue Golf VII erstmalig leichter als sein Vorgänger.

Kommission verabschiedete in Folge dessen 2009 die Regulierung 443/2009. Diese beinhaltet spezifische Emissionsvorgaben für in Europa neu zugelassene Fahrzeuge der Klasse M1²³ für 2012 in Höhe von durchschnittlich 130 und 2020 in Höhe von durchschnittlich 95 Gramm CO₂ pro Kilometer.²⁴ Eine weitere Absenkung dieser Werte für die kommenden Jahre gilt als hochwahrscheinlich. Dies, so sind sich viele Autoexperten einig, wird nur mit einer signifikanten Änderung der Antriebstechnologie oder mit alternativen Kraftstoffen möglich sein (u.A. s. Kapitel 4).

Diese Regulierung verstärkt die Diskussion und die Implementierung alternativer Antriebssysteme und Kraftstoffe. Hierunter fallen insbesondere Biokraftstoffe, (Bio-)Erdgas-, Autogas-, Brennstoffzellen- und Hybridfahrzeuge sowie batterieelektrische Fahrzeuge, die trotz (teilweise) erheblicher steuerlicher Begünstigung heute weiterhin kaum am Markt vertreten sind.

Für die kommenden Jahrzehnte wird dennoch eine Diversifikation der Antriebstechnologien erwartet [25]. Die ermittelten Szenarien unterscheiden sich jedoch signifikant, und es ist im Hinblick auf 2050 kein eindeutiger Trend der Marktanteile zu identifizieren. Gerade bei der Elektrifizierung werden Marktanteile von 0 % [21] bis 80 % [25] prognostiziert (s. auch Abbildung 45).

²³ Die Fahrzeugklasse M1 der EC beinhaltet im Wesentlichen alle vierrädrigen zur Personenbeförderung eingesetzten Fahrzeuge mit weniger als acht Sitzen (ohne Fahrersitz) (EU-Direktive 70/156/EEC).

²⁴ Leichtere (schwerere) Fahrzeuge haben niedrigere (höhere) Grenzwerte. Ein Hersteller muss nur für seine gesamtflotte die spezifischen Ziele erreichen. Einzelfahrzeuge können von den Zielwerten abweichen.

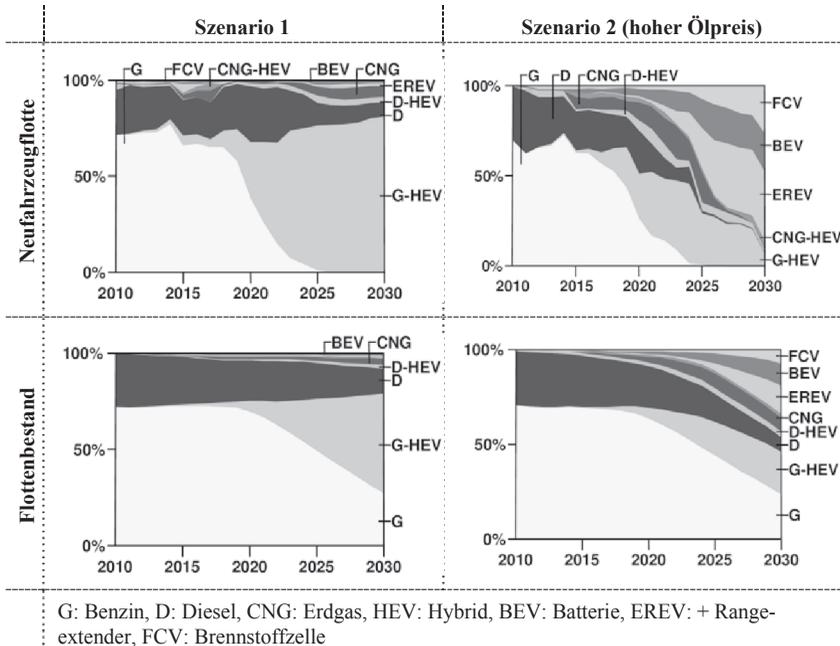


Abbildung 45: Verschiedene Szenarien der Fahrzeugtechnologieentwicklung bis 2030 [16].

Die große Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Entwicklungsperspektiven der verschiedenen Ansätze basiert darauf, dass alle Alternativen ihre spezifischen Vor- und Nachteile aufweisen, die teilweise unterschiedlich bewertet und gewichtet werden. Beispielsweise haben Biokraftstoffe aus Sicht der Fahrzeugindustrie und anderer Experten den Vorteil, dass lediglich technischen Anpassungen am Fahrzeug entstehen, die Nutzung hiervon jedoch (fast) unbeeinträchtigt ist. Umweltverbände und andere Beobachter kritisieren dagegen die negativen Umweltauswirkungen insbesondere von importierten Biokraftstoffen sowie die zunehmende Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung. Andere Beiträge in diesem Band (insb. Kapitel 2 und 7) sowie [9] gehen näher auf die jeweiligen Vor- und Nachteile alternativer Antriebstechnologien ein.

8.3 Mobilitätsstilentwicklung auf Grund des technologischen Fortschritts

Um nun Aussagen der oben genannten Technologien auf die zukünftige Gestaltung von Mobilität machen zu können, muss zunächst ein Blick auf die heutige Gestaltung von Mobilität und auf beobachtbare Veränderungen geworfen werden. Aus den umfangreichen Daten von infas und DLR [11] zur Mobilität in Deutschland und anderen Quellen (vgl. Kapitel 1 und 9) lassen sich hier nur einige zentrale Punkte kurz anreißen, die für die Fragestellung dieses Beitrags besonders relevant erscheinen.

Die durchschnittlich zurückgelegten 3,4 Wege und 39 Kilometer eines deutschen Bürgers verteilen sich nicht nur auf unterschiedliche Fahrtzwecke, sondern insbesondere auch auf verschiedene Entfernungen in ungleichen Umgebungen [11]. Dabei bleibt die im MIV zurückgelegte Tagesdistanz zu ca. 90 % unter 100 Kilometern [11]. Was die Reisezwecke betrifft, so lässt sich festhalten, dass die relative Bedeutung von Arbeitswegen und dienstlichen Wegen weiter zurückgeht. Zu den Ursachen gehören vermutlich die Zunahme der Einpersonenhaushalte sowie der demographische Wandel. Einkauf, Erledigungen und Freizeit machen ca. $\frac{2}{3}$ aller Wege aus – Einkauf und Erledigungen mit steigender Tendenz! Insgesamt lässt sich aus den Daten ein moderates Wachstum von Verkehrsaufkommen und -leistung beobachten [11].

Grundsätzlich sind die Trends der Mobilitätsmuster im Lauf der Zeit nicht immer so konstant geblieben. So nahm beispielsweise der Anteil der MIV-Nutzung lange Zeit zu: Der Kraftfahrzeugbestand ist zwischen 1992 und 2007 von 44,3 Millionen auf 55,5 Millionen gewachsen (vgl. [4]). Nach den Daten von 2008 [11] ist das Wachstum des MIV im Vergleich zu früheren Jahren jedoch deutlich abgeschwächt und der öffentliche Verkehr sowie der nicht-motorisierte Individualverkehr steigen leicht an. Laut dem BMVBS [4] wurden 2007 aber immer noch 82,9 % der gesamten Personenverkehrsleistung über den MIV abgewickelt.

Viele Studien weisen darauf hin, dass sich bei unterschiedlichen Altersgruppen unterschiedliche Tendenzen im Verkehrsverhalten erkennen lassen. So nutzen ältere Verkehrsteilnehmer (älter als 60) häufiger den Pkw als die gleiche Gruppe vor 10 Jahren. Gleichzeitig weisen viele Daten darauf hin, dass insbesondere bei jungen Erwachsenen in urbanen Zentren das Interesse am Pkw-Besitz und an der Pkw-Nutzung nachlassen (s. Kapitel 1 und 9). Die Bedeutung des Autos als Statussymbol sinkt bei dieser Gruppe. Eine wachsende Gruppe dieser jungen Städter wird pragmatischer und flexibler in der Verkehrsmittelwahl (u.A. [7]). Einer der möglichen Gründe ist technischer Natur: so wird argumentiert, dass die Verbreitung von Informations- und Kommunikationstechnologien eine intermodale Verkehrsmittelwahl begünstigt, den face-to-face Kontakt zu Freunden über soziale Netzwerke zumindest teilweise substituiert und eventuell auch Smartphones und ähnliches mit Statussymbolen in Verbindung gebracht werden könnten (vgl. [24]). Immer wieder wird betont, dass unklar bleibt, ob diese Gruppe ihr Verhalten mit dem Eintritt in eine neue Lebensphase ändert. Die gemachten Erfahrungen sowie der enge Bezug zu Technologien für die Planung und Strukturierung von Alltagsroutinen werden aber sicherlich erhalten bleiben.

Wie könnten nun Implikationen neuer Antriebstechnologien auf die zukünftige Gestaltung von Mobilität aussehen? Änderungen werden erst deutlich, wenn die neuen Technologien Einfluss nehmen auf wesentliche Parameter wie Zahl der Wege, Länge von Wegen oder Verkehrsmittelwahl. Hinter den zugrunde liegenden Entscheidungen haben wiederum zahlreiche andere Faktoren einen Einfluss, wie z.B. Kosten, Komfort und Bequemlichkeit oder Geschwindigkeit. Die im vorhergehenden Kapitel genannten alternativen Antriebe unterscheiden sich erheblich hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen auf die Mobilitätsstile der Nutzer und auf die zukünftige Gestaltung von Mobilität (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Auswirkungen der verwendeten Technik auf Mobilitätsstile (von ++ = „starke Auswirkungen“ bis -- = „keine Auswirkungen“).

Technik	Geschätzte Auswirkungen auf Mobilitätsstile (Länge oder Anzahl der Wege oder Verkehrsmittelwahl)
BEV	++
H₂ / FC	-
Hybride	-
Biokraftstoffe	--
CNG/LPG	-

Wie im vorigen Kapitel bereits angesprochen, bedeutet die Einführung von Biokraftstoffen im Wesentlichen die Substitution eines Treibstoffes durch einen anderen. Hier sind keine Änderungen der Mobilitätsstile bzw. der Gestaltung von Mobilität zu erwarten. Lediglich kleinere Einflüsse wie Leistung, Reichweite und insbesondere das Tankstellennetz können jedoch einen Einfluss auf die Kaufentscheidung haben. Ähnliches gilt für Gasfahrzeuge (insb. Compressed Natural Gas (CNG) und Liquefied Petroleum Gas (LPG) welches auch Autogas genannt wird) und Hybridtechnologien, bei denen vergleichbare Reichweiten und Ladezeiten wie bei herkömmlichen Fahrzeugen zu erwarten sind. Denkbar sind aber auch so genannte „Rebound Effekte“, gerade wenn die alternativen Antriebe Mobilität nicht nur sauberer sondern in Bezug auf die variablen Kosten auch günstiger machen würden. Das würde bedeuten, dass die Nutzer das Fahrzeug mehr nutzen als vorher, weil der Geldbeutel und das „Umweltbewusstsein“ durch die neue Technik entlastet werden.

Auch die Kombination aus Wasserstoff und Brennstoffzelle würde vermutlich zukünftig etwas geringere Reichweiten als herkömmliche Fahrzeuge ermöglichen. Dazu kämen Änderungen beim Tankvorgang sowie hoch wahrscheinlich auch bei Verteilung und Struktur der Infrastruktur. Inwieweit das Auswirkungen auf die Mobilitätsmuster haben würde ist

schwer auszumachen. Möglicherweise gewöhnen sich die Nutzer schnell an die Neuerungen und tanken einfach nur öfters.

Änderungen der Mobilitätsmuster sind vor allem durch die Einführung von BEVs zu erwarten. Bisher sind BEVs in den Bereichen „Tank-Zeit“, Reichweite und Zuverlässigkeit herkömmlichen Fahrzeugen unterlegen. Für Nutzer mit unterdurchschnittlicher Fahrleistung gilt das auch für die Kosten. Durch den steigenden Kraftstoffpreis und sinkenden Batteriekosten könnte sich dieser Nachteil aber bald relativieren.

Neben der Änderung der Antriebstechnologie werden aber auch Änderungen im Hinblick auf die Verkehrsmittelnutzung sowie neue Formen der Mobilität diskutiert. So zeigt beispielsweise die Vision der Viver-Studie [20] für 2050 eine Koexistenz verschiedener neuer Technologien (insb. BEV, Segways, Brennstoffzellenfahrzeug, Pedelecs sowie Hybride) auf. Darüber hinaus sind auch neue Konzepte wie Energieplushäuser mit 14.000 Freikilometern für BEV denkbar [3] oder sehr multimodale Konzepte, die beispielsweise durch Erhöhung der Parkgebühren für konventionelle Pkw und gleichzeitiger Quersubventionierung des städtischen Personennahverkehrs „erzwungen“ werden [5]. Die zentrale Bedeutung neuer Konzepte und Geschäftsmodelle für die zukünftige Gestaltung von Mobilität wird im nächsten Kapitel weiter hervorgehoben.

8.4 Multimodale Mobilität als Lösung der heutigen Herausforderungen im MIV?

Viele der soeben genannten Visionen für den Individualverkehr der Zukunft gehen davon aus, dass neue Verkehrskonzepte und Geschäftsmodelle, die multimodale Mobilität ermöglichen, von entscheidender Bedeutung für die zukünftige Gestaltung von Mobilität sein werden. Eine besondere Rolle als „Enabling Technology“ kommt dabei der Entwicklung im Informations- und Kommunikationstechnologiebereich zu. Künftig könnten verkehrsträgerübergreifende „Applications“ auf Smartphones die vielschichti-

gen Mobilitätsentscheidungen erheblich vereinfachen. Neben den eigenen Präferenzen, Gewohnheiten, Erfahrungen, Durchschnittsgeschwindigkeiten, aktuellen Wetter- und Verkehrsbedingungen, etc. können die gewöhnlichen Ziele bereits hinterlegt sein. Hiermit wäre dann eine schnelle kosten- und/oder umweltoptimale Entscheidung möglich. Darüber hinaus könnten Informationen über aktuelle Ereignisse im Zusammenhang mit der Reise bzw. Reisestrecke effizient angezeigt werden. Im Zeitalter der Kommunikationstechnologien ist somit ein intermodaler Weg um ein Vielfaches leichter geworden. In diesem Kontext möchten wir im Folgenden einige Konzepte darlegen um anschließend die Notwendigkeit alternativer Antriebe zu diskutieren.

Dem privaten Pkw-Besitz und die damit verbundenen Mobilitätsmuster stehen oft einer multimodalen Verkehrsmittelwahl gegenüber. Ein eigener Pkw lädt zur Nutzung ein (Stichwort Bequemlichkeit, aber auch zur „Besitz-Bestätigung“). Konzepten wie Car-Sharing wird deshalb oft eine Schlüsselrolle in multi-modalen Verkehrskonzepten zugeschrieben. Die Zugriffsmöglichkeit auf einen Pkw über Car-Sharing erleichtert die Entscheidung auf einen eigenen Pkw zu verzichten. Studien zeigen, dass Nutzer von Car-Sharing weniger Kilometer mit dem Pkw zurücklegen und mehr den ÖPNV nutzen als ihre Vergleichsgruppen – dies gilt insbesondere auch im Vorher-Nachher-Vergleich [12]; [14]. Wenn auch bisher nur ein kleiner Teil der deutschen Führerscheinbesitzer die klassischen Carsharing-Angebote (220.000 Fahrtberechtigte 2012) nutzt, so sind die stabilen Wachstumsraten von 10-20 % pro Jahr doch eindrucksvoll (vgl. [2]).

Neben den klassischen Autoverleihern (Sixt, Hertz, etc.) und den etablierten Carsharingangeboten, wie sie unter anderen von Stadtmobil, Cambio oder stadtauto angeboten werden, stehen dem Nutzer mittlerweile auch weitere Konzepte, wie beispielsweise die „spontanen Carsharingangebote“ car2go (Daimler), Quicar (Volkswagen) sowie DriveNow (BMW und Sixt) aber auch Mischformen wie das Angebot von

der Deutschen Bahn (Flinkster) zur Verfügung. Bei den „spontanen Carsharingkonzepten“ stehen die Fahrzeuge, ähnlich wie beim Call-a-Bike-Angebot, ohne festen Standort verteilt im definierten Stadtgebiet und können spontan gemietet werden. Neben einer Grundgebühr ist dann nur eine geringe Kilometer- und oder Zeitgebühr zu entrichten. Das Flinkster-Angebot der Deutschen Bahn umfasst auch einige Elektrofahrzeuge und ist auf die Anbindung der Bahnhöfe ausgerichtet. Ende 2011 wurde das System bereits in ca. 140 deutschen Städten angeboten [13]. Nach erfolgreicher Einführung von car2go in Ulm hat es sich in vielen Großstädten bereits etabliert. In Amsterdam gibt es inzwischen beispielsweise 300 Elektro-Smarts²⁵, für Stuttgart sind 500 Stück vorgesehen. Als weiteres Angebot kann auch der Privatwagen einfach über ein Portal zum Carsharing Fahrzeug mit den Nachbarn werden (Nachbarschaftsauto.de oder Tamyca.de).

Grundsätzlich bietet Car-Sharing die Möglichkeit, die Nachteile von Elektrofahrzeugen zumindest teilweise auszugleichen: die Kosten werden auf die Nutzer verteilt, die höhere Kilometerfahrleistung bringt größere Einsparungen durch geringere Energiekosten und die geringe Reichweite stellt weniger ein Problem dar, da zumindest beim klassischen Car-Sharing für längere Fahrten auch Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb gebucht werden könnten (vgl. z.B. [1]).

Für kürzere Strecken in Städten ist das „Call-a-bike“-Angebot eine sehr attraktive, schnelle und flexible Lösung. Ohne eine monatliche Grundgebühr können so spontan beispielsweise über das Smartphone Fahrräder an einer Straßenecke ausgeliehen, genutzt und anschließend an einer beliebigen Kreuzung innerhalb des Gebietes wieder abgestellt werden. In Großstädten ist es damit ein schnelles und unkompliziertes Verkehrsmittel.

Das Herzstück eines multimodalen Verkehrssystems ist aber weiterhin der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV). Dieser hat sich von der Nachkriegszeit als Transportmittel für die mittleren und unteren Bevölke-

²⁵ <http://www.car2go.com/amsterdam/en/>

rungsschichten zu einem Serviceprovider entwickelt, der in den Mega- und Großstädten unverzichtbar für (fast) alle Bevölkerungsschichten geworden ist. Alleine zwischen 2002 und 2008 konnte er sein Verkehrsaufkommen in Deutschland um 4 % auf einen Anteil von fast 9 % steigern [11]. Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit und Sauberkeit spielen hier eine große Rolle und die Öffnung zu neuen Informationstechnologien und Bezahlssystemen erleichtern die Nutzung. Dies fördert insbesondere das Interesse der jüngeren Bevölkerung in Deutschland, bei denen die Nutzung von Informationstechnologien fester Bestandteil der Alltagsroutinen ist (vgl. z.B. [22]). Darüber hinaus schätzen die Fahrgäste immer mehr die nutzbare Zeit, die ihnen während der Fahrt für Kommunikation oder andere Aktivitäten verbleibt.

Neben dem ÖPNV gehören aber auch Taxis zur Vervollständigung des Angebots und lückenlosen Abdeckung. Auch wenn diese Alternative in der Regel ein teures Verkehrsmittel darstellt, ist es insbesondere als Sammeltaxi für ländliche Gebiete die einzige Möglichkeit in einer multimodalen Wegeketten das gewünschte Ziel zu erreichen.

Als neuere Entwicklungen innerhalb multimodaler Wegeketten ist insbesondere das Dynamic Ridesharing zu nennen. flinc.org scheint derzeit der führender Anbieter für Dynamic Ridesharing in Deutschland zu sein. Es ermöglicht nach einer Registrierung spontan per Smartphone eine regelmäßige, aber auch spontane Mitfahrgelegenheit zu finden. Es ist damit eine Mischung zwischen Mitfahrzentrale und sozialem Netzwerk. Sobald diese Dynamic Ridesharing Netzwerke ausreichend Mitglieder haben ist es im Prinzip möglich sich spontan mit seinem Smartphone an eine Straße zu stellen und nach einer Mitfahrgelegenheit zum gewünschten Ziel zu suchen. Eine erfolgreiche Umsetzung könnte zu einer erheblichen Minderung des Verkehrsaufkommens auf den Straßen führen. Neben flinc.org gibt es noch viele weitere Anbieter wie beispielsweise PocketTaxi, die bisher den Fokus auf Berufspendler haben [17]. Dadurch, dass die verschiedenen Anbieter bisher nicht vernetzt sind ist die Praktikabilität eingeschränkt. So

kommt keiner der Anbieter auf eine adäquate Mitgliederzahl. Dennoch lassen erste Praxistests vielversprechende Ergebnisse erkennen.

Neben diesen Entwicklungen in den einzelnen Modi gibt es bereits mehrere Konzepte diese miteinander zu verknüpfen (sog. Mobility 2.0). Dabei ist neben einem einfachen Informationsmedium zur Planung und Buchung auch ein einheitliches Abrechnungssystem hilfreich. So erwägen immer mehr Gemeinden als ersten Schritt die Einführung von multimodalen eTickets: Eine Scheckkarte, die für das Bezahlen von Parkscheinen, Ladestationen, Museum, Schwimmbad, Kino etc. sowie als Bibliotheksausweis, ÖPNV-Karte, CarSharing-Nutzerkarte, (Sammel-)Taxinutzung, Fahrradverleih, etc. eingesetzt werden kann [8]. Berlin, Freiburg, Hamburg und Frankfurt haben bereits ähnliche Kartensysteme eingeführt [8]. Diese Karten sollen insbesondere die Multimodalität fördern und die Flexibilität der Nutzer erhöhen.

Das eTicket ist damit ein erster Schritt zu einer integrierten Mobilität, welche einen virtuellen Transportraum mit Check-in und Check-out Vorgängen betreten und verlassen werden kann (vgl. [5]). Wege innerhalb des Raumes werden über kontaktlose Bezahlssysteme (beispielsweise via Smartphone) und aufgezeichneten GPS-Koordinaten verkehrsträger-, kilometer- und sekundengenau abgerechnet.²⁶

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass diese Verkehrskonzepte der Zukunft nun einerseits mit alternativen Antrieben mit geringeren variablen Kosten günstiger zu betreiben sind; andererseits aber auch deren Bedarf (in Hinblick auf die Rohstoff und Klimagasproblematik) abschwächen, da sie die Effizienz des Verkehrssystems auch mit den vorhandenen Technologien erheblich steigern können. Aus heutiger Perspektive ist der Markterfolg dieser Konzepte kaum abschätzbar. Ein solches Verkehrssystem wäre dann nicht mehr vorrangig von Besitzverhältnissen, sondern vielmehr vom Zugang bestimmt („Access-Gesellschaft“).

²⁶ Diese Abrechnung stellt dann an den Datenschutz eine erhebliche Aufgabe.

8.5 Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren drängten viele neue unterschiedliche Antriebstechnologien in den Pkw-Markt. Oft findet dabei eine für den Nutzer kaum spürbare Substitution einer alten Technologie durch eine neue statt. Implikationen für die zukünftige Gestaltung von Mobilität wären vor allem von einer verstärkten Marktdurchdringung mit BEVs zu erwarten. Hier werden sich die Mobilitätsmuster sicherlich zu einem gewissen Grad den neuen technischen Settings – u.a. geringere Reichweiten, längere Ladezeiten – anpassen müssen (vgl. [23]).

Wichtig ist dabei, das Verkehrssystem als dynamisches System zu begreifen, in dem sich Innovationen und Änderungen in unterschiedlichen Bereichen gleichzeitig vollziehen. Diese Änderungen beeinflussen sich gegenseitig im Sinne einer Koevolution [24]. In diesem Wechselspiel müssen mögliche Implikationen der Antriebstechnologien für die zukünftige Gestaltung von Mobilität betrachtet werden. Eine Koevolution von Mobilitätsmustern, neuen Technologien und neuen Mobilitätsangeboten bzw. Geschäftsmodellen ist zu erwarten. Im Bereich der Technologien kommt dabei neben den Antriebstechnologien den Informations- und Kommunikationsanwendungen eine zentrale Rolle zu.

Bezogen auf die zukünftige Gestaltung von Mobilität können sowohl Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie wie auch auf der anderen Seite der Trend zum autolosen Stadtbewohner genutzt werden, um ein innovatives und multimodales Konzept zu entwickeln, welches als Ergänzung oder gar als Alternative zu den alternativen Antrieben weitaus angenehmer sein kann, als es noch vor ein paar Jahren denkbar war. In solchen, sogenannten Mobility 2.0-Konzepten lassen sich über ein Smartphone innerhalb von Sekunden Fahrpläne des öffentlichen Nahverkehrs abfragen, Fahrräder bzw. andere Fahrzeuge an der Straßenecke ausleihen, eine spontane Mitfahrgelegenheit identifizieren, mit weiteren Verkehrsteilnehmern kurzfristig ein Sammeltaxi bestellen und vieles mehr.

Eine solche Mobilität ist bereits heute an vielen Orten erlebbar und beweist manchen Orts, dass sie schneller, kommunikativer, günstiger und umweltfreundlicher sein kann. Ebenso ist sie in der Regel weniger abhängig von Preisschwankungen der Primärenergieträger. Nicht undenkbar ist, dass in solch einer flexiblen zukünftigen Mobilitätswelt für den jeweiligen Zweck die passende Antriebstechnologie gewählt wird: per pedes und Fahrrad für die Kurzstrecke, BEV für etwas längere Distanzen, Brennstoffzellenfahrzeuge für mittlere Wege und biogene Kraftstoffe für Langstrecken (insb. Güterverkehr). D.h., dass diese Konzepte die Marktpenetration alternativer Antriebe fördern, aber nicht als alleinige Lösung der heutigen Herausforderungen im motorisierten Individualverkehr gesehen werden können.

Eine wichtige Entwicklung wäre dann die Auflösung des engen Zusammenhangs zwischen Autobesitz und Autonutzung, die durch Car-Sharing und verwandte Angebote zunehmend einfacher verfügbar und nutzbar wird. Der Visionär und Zukunftsforscher Jeremy Rifkins [18] hatte bereits vor über 10 Jahren das „Age of Access“ angekündigt, in dem die Nutzung von Gütern weniger mit deren Besitz verknüpft ist. Erst danach hat Rifkins [19] die Vision der „Hydrogen Economy“ publiziert; die aus heutiger Sicht sicherlich weniger greifbar erscheint als das Age of Access.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Barthel (2012): Elektroautos im Carsharing. In: Internationales Verkehrswesen (64) 1, S. 38-40.
- [2] BCS (2012): Bundesverband CarSharing e.V. Jahresbericht 2011/2012. URL:
http://www.carsharing.de/images/stories/pdf_dateien/jahresbericht_2011_2012_druckversion.pdf. Zugriff am 04.08.12.

-
- [3] Bien-Zenker AG (2012): Bien-Zenker Immobilien machen mobil. In: S. Habibi Isfahani (Hrsg.): Stadt der Zukunft, S. 15. impact Verlag, Berlin.
- [4] BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2011) (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2010/2011. DVV, Hamburg.
- [5] W. Canzler und A. Knie (2011): Einfach Aufladen – Mit Elektromobilität in eine saubere Zukunft. München.
- [6] EC (European Commission) (1998): Implementing the Community strategy to reduce CO₂ emissions from cars: an environmental agreement with the European automobile industry. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. COM (98) 495 final, Brüssel.
- [7] L. Eckstein, S. Faßbender, L. Ickert und P. Urban (2011): Mobilitätsbedürfnisse der kommenden Kundengeneration. In: ATZ 2011, 9.
- [8] eTicket (2012). URL: <http://www.eticket-deutschland.de>. Zugriff am 18.10.2012.
- [9] Eucar, Concawe und JRC (Joint Research Centre of the EU Commission) (2007): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. URL: http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/WTW_Report_010307.pdf. Zugriff am 18.10.2012.
- [10] M. Frondel, J. Peters und C. Vance (2007): Identifying the Rebound – Theoretical Issues and Empirical Evidence from a German Household Panel. RWI Discussion Paper 57, Essen.
- [11] Infas und DLR (2010): Mobilität in Deutschland, Kurzbericht, Bonn. URL: <http://www.mobilitaet-in->

- deutschland.de/pdf/MiD2008_Kurzbericht_I.pdf. Zugriff am 18.10.2012.
- [12] A. Knie und W. Canzler (2005): Die intermodalen Dienste der Bahn: Wirkungen und Potenziale neuer Verkehrsdienstleistungen. Gemeinsamer Schlussbericht von DB Rent und WZB, Verbundprojekt Intermodi.
- [13] K. Kolwitz (2012): Entspannt unterwegs. In: S. Habibi Isfahani (Hrsg.): Stadt der Zukunft, S. 12. inactp Verlag, Berlin.
- [14] C. Maertins (2006): Die intermodalen Dienste der Bahn: Mehr Mobilität und weniger Verkehr? Wirkungen und Potenziale neuer Verkehrsdienstleistungen. Discussion Paper SP III 2006-101, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin
- [15] W.J. Mitchell, C.E. Borroni-Bird und L.D. Burns (2010): Reinventing the Automobile. MIT Press, Cambridge, MA.
- [16] P. Mock (2010): Entwicklung eines Szenarienmodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21). Dissertation, DLR, Stuttgart.
- [17] PocketTaxi (2012). URL: <http://www.pockettaxi.de>. Zugriff am 18.10.2012.
- [18] J. Rifkins (2001): The Age of Access: The New Culture of Hypercapitalism, Where All of Life Is a Paid-for Experience. Tarcher/Putnam, New York.
- [19] J. Rifkins (2003): The Hydrogen Economy. Tarcher/Putnam, New York.
- [20] W. Schade, A. Peters, C. Doll, S. Klug, J. Köhler und M. Krail (2011): VIVER – Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 3/2011, Karlsruhe.

- [21] K.O. Schallaböck, M. Fishedick, B. Bronus, H.-J. Luhmann, F. Merten, H.E. Ott, A. Pastowski und J. Venjakob (2006): Klima-wirksame Emissionen des Pkw-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien. In: Wuppertal Spezial 34, Wuppertal.
- [22] A.-W. Scheer (2009): Webciety – Wie das Internet unser Leben prägt. Präsentation der BITKOM-Studie „Webciety“, CeBIT, 2. März 2009. Hannover.
- [23] J. Schippl (2012): Etablierte Mobilitätsmuster - eine Hürde für die Elektromobilität? In: M. Decker, A. Grunwald, M. Knapp (Hrsg.): Der Systemblick auf Innovation. Technikfolgenabschätzung in der Technikgestaltung, S. 117-127. Berlin: edition sigma 2012.
- [24] J. Schippl und M. Puhe (2012): Technology Options in Urban Transport: Changing paradigms and promising innovation pathways – Final Report. European Parliament/Science and Technology Options Assessment (STOA) 2011. Brüssel.
- [25] S. A. Schmid und B. Propfe (2012): Scenarios for the Market-development of Electrified Vehicles. URL: http://elib.dlr.de/68492/1/f-cell_Fahrzeugszenarien_10-09-28_fin-ex.pdf. Zugriff am 18.10.2012.
- [26] WBCSD (World Business Council on Sustainable Development) (2004): Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – Project report. Genua.

9. Mobilitätsverhalten und Mobilitätsbedürfnisse versus neue Antriebskonzepte: Wie passt das zusammen?

Bastian Chlond

Institut für Verkehrswesen (IfV) am KIT

9.1 Die Eigenschaften des privaten Pkw und Erklärungen für dessen Erfolg

Stellt man sich die Frage, was die Erfolgsgeschichte des privaten Kraftfahrzeugs ausmacht, so fallen einem viele unterschiedliche Aspekte ein:

- Man kann jederzeit losfahren: Das Fahren mit dem konventionellen persönlichen Pkw erfordert eigentlich schon seit Dekaden keine auf den Pkw bezogenen Planungen, abgesehen von ab und an einer Inspektion und der Reifendruckkontrolle.
- Man kann damit in Urlaub fahren.
- Man kann das Fahrzeug nutzen, um größere Mengen auf einmal oder eben auch Möbel bei IKEA einzukaufen.
- Man kann mit dem persönlichen Pkw prinzipiell jedes Ziel erreichen.
- Man kann allein und manchmal auch zu mehreren unterwegs sein.
- Man kann alleine und ungestört sein („der persönliche Pkw“, in dem man alles so gestalten und auch herum liegen lassen kann, wie es einem gefällt).

Dies beruht auf den Parametern des konventionellen Pkws, wie er sich in der Evolution in über 100 Jahre Autogesichte herausgebildet hat. Auch wenn es Sport- und Geländewagen und Fahrzeuge im Premium- und

Low-Cost-Segment gibt, so verfügen mehr als 90 % aller Fahrzeuge in der Flotte über 4 bis 5 Sitzplätze und haben eine prinzipiell unbegrenzte Reichweite. Dadurch, dass ein Betanken i.d.R. innerhalb von 5 Minuten erfolgen kann, müssen Unternehmungen und Reisen nicht geplant werden, die Fahrer oder die Fahrerinnen können spontan alle nur denkbaren Ziele ansteuern.

Damit ist der konventionelle Pkw ein Universaltalent!

Betrachtet man dagegen die Eigenschaften z.B. eines rein batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV), so sieht dieses gegenüber dem Pkw mit Verbrennungsmotor aus rein praktischen Überlegungen zunächst "alt" aus, insbesondere, da diese Autos nur bestimmte Marktsegmente bedienen können. Das heißt, diese Fahrzeuge können nur bestimmte Fahrtmuster bedienen, die an bestimmte sozio-ökonomische Eigenschaften der Fahrer gebunden sind.

- Zunächst einmal sind die bislang am Markt befindlichen E-Fahrzeuge eher klein. Damit haben sie ein eingeschränktes Kofferraumvolumen. Die Universalität im Hinblick auf Großeinkäufe ist nicht gegeben.
- Die Fahrzeuge haben eine begrenzte Reichweite (Zusammenstellung z.B. bei [8]). Bestimmte Fahrtzwecke fallen hiermit komplett aus. Und unter Berücksichtigung der mittleren Pendelweglänge von 16 km und einer mittleren Fahrleistung je Pkw in Deutschland von ca. 12.000 km bleibt rein überschlägig ein großer Anteil an Fernverkehrsnutzung, die mit einem BEV nicht adäquat realisierbar ist.
- Es fehlt an Lade-Infrastruktur: Zwar sind die Bemühungen der Industrie und der Politik offenkundig, im öffentlichen Raum Ladeinfrastruktur zu schaffen, das Problem liegt aber durchaus

auch im Bereich der privaten Stellplätze. Obgleich durchaus 50 % der Stellplätze auf privatem Grund liegen, werden diese zweckentfremdet genutzt (Garagen als Lagerplatz) oder aber sind nicht ohne weiteres mit Ladeinfrastruktur ausstattbar. Daher begegnen Verbraucher (und die Medien) den E-Fahrzeugen mit der entsprechenden Skepsis, was sich vielfach auch in Karikaturen widerspiegelt.

Unter dem Strich bedeutet es, dass das BEV, an den Nutzer andere Ansprüche stellt: Er muss sein Verhalten stärker planen (Abfahrtszeitpunkt, Ziel, die ganze Wegekette) und dies steht in Konflikt mit den Gewohnheiten und Erfahrungen des Nutzers mit dem konventionellen Pkw. Dies wird zumindest subjektiv von den potentiellen Nutzern so kolportiert.

Dies sind allerdings nur generelle Überlegungen, die sich stark an den Mittelwerten der Verkehrsgrößen und der „Durchschnittsnutzer“ orientieren. Mittlerweile ist die Motorisierung in Deutschland so hoch, dass ein bestimmter Anteil der Fahrzeuge spezialisiert eingesetzt wird, dass die üblichen Annahmen des Universalitätsanspruchs nicht mehr zutreffen. Aus diesem Grund werden nachfolgend im Beitrag Befunde vorgestellt, die darstellen sollen, wie Mobilitätsverhalten mit dem Pkw in Deutschland erfolgt und für welchen Anteil an Fahrzeugen der Universalitätsanspruch besteht – jeweils vor dem Hintergrund der Fahrzeugeigenschaften, insbesondere des (batterie-) elektrischen Pkw.

Anschließend werden bestimmte Trends dargestellt, die dazu beitragen könnten, das Elektrofahrzeug zu etablieren. Allerdings ist dies i.d.R. mit Ansprüchen an Verhaltensänderungen verbunden.

9.2 Mobilitätsbedürfnisse vor dem Hintergrund des batterieelektrischen Fahrzeugs

9.2.1 Befunde zur Kfz-Nutzung

Nachfolgend werden unterschiedliche Befunde zur Fahrzeugnutzung vorgestellt, hier wird abgeschätzt, wie groß der Anteil an Fahrzeugen sein könnte, der durch BEV substituiert werden könnte und in welchen Haushalten und Fahrzeugen dies der Fall sein könnte.

Fernverkehrsrelevanz

Generell wird die Relevanz des Anteils an Fahrten im Bereich der Fernverkehrsmobilität unterschätzt. Erhebungen (z.B. das Deutsche Mobilitätspanel: [6], [10]) verdeutlichen, dass im Alltag in Deutschland zwar täglich ca. 161 Mio. motorisierte Ortsveränderungen (also ohne Wege zu Fuß oder mit dem Fahrrad) im Nahbereich zurückgelegt werden, und nur 4 Mio. im Fernbereich (Fahrtweite > 100 km). D.h. es werden zwar nur 2 bis 3 % aller Fahrten im Fernverkehr durchgeführt, jedoch sind dies fast 40 % aller zurückgelegten Kilometer.

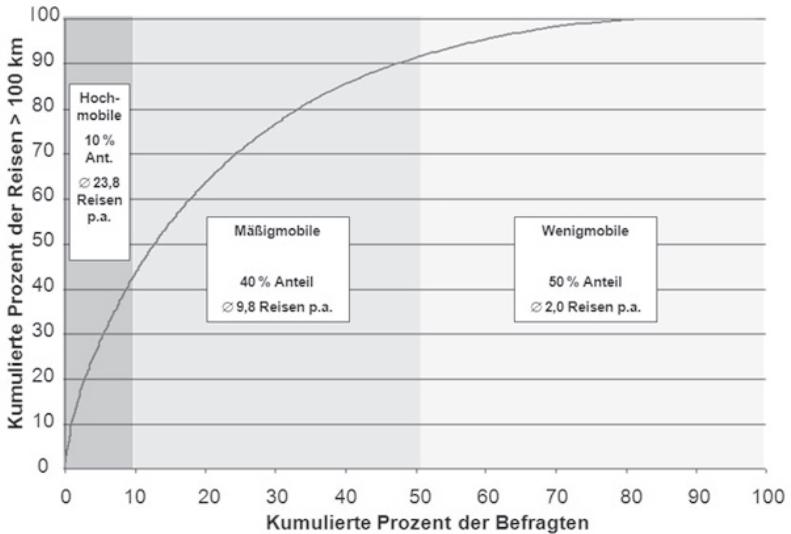


Abbildung 46: Fernverkehrsnachfrage und Verteilung in der bundesdeutschen Bevölkerung als Ergebnis der INVERMO-Erhebung 2001/2002.

Allerdings ist diese Nachfrage im Fernbereich innerhalb der Bevölkerung extrem heterogen verteilt; ein Ergebnis, was sich im Übrigen nur durch die Beobachtung von Personen über längere Zeiträume erheben lässt (Erhebung INVERMO: [1], [5], [9]). Die Ergebnisse dieser Erhebung verdeutlichen, dass knapp die Hälfte aller Fernverkehrsmobilität in der Bevölkerung von nur ca. 10 % aller Personen ausgeübt wird. Umgekehrt machen 50 % der Bevölkerung nur sehr wenige oder sogar gar keine Reisen oder Unternehmungen, die sie weiter als 100 km von zuhause wegführen (Abbildung 46).

Hieraus die Schlussfolgerung abzuleiten, dass für die geringer im Fernverkehr aktiven Personen dann gerade E-Fahrzeuge mit einer geringeren Reichweite geeignet sein können, ist nicht zulässig: Gerade diejenigen, die im Fernverkehr eine geringe Mobilität aufweisen, verhalten sich monomo-

dal und verwenden für ihre Mobilität dann zumeist einen Pkw. Hochmobile dagegen verwenden unterschiedliche Verkehrsmittel im Fernverkehr also neben dem Pkw auch häufiger die Bahn oder das Flugzeug.

Es lässt sich also feststellen, dass die Fernverkehrsrelevanz des Pkw absolut gegeben ist. Im Mittel machte der Bundesbürger im Jahr 2002 8,8 „Reisen“ pro Person und Jahr und damit mindestens die doppelte Anzahl an Ortsveränderungen bzw. Fahrten über eine Distanz größer 100 km. Dabei dominiert der Pkw die Fahrtmuster im Fernverkehr nach wie vor – trotz der aufkommenden Relevanz des Flugverkehrs gerade für den Urlaubsverkehr.

Verteilung des Pkw-Besitzes in Haushalten

Es lässt sich argumentieren, dass Haushalte die mehr als einen Pkw besitzen, diese Pkw innerhalb des Haushalts so tauschen können, dass für die „seltenen“ Fernverkehrsereignisse (oder Transportereignisse) jeweils die dafür geeigneten (konventionellen) Fahrzeug zum Einsatz kommen könnten. Hieraus könnte man einen potentiellen Markt für E-Fahrzeuge abschätzen indem man den Anteil an Zweitwagen in der Flotte der Pkw in Privathaushalten in Deutschland bestimmt.

Die folgende Tabelle 13 zeigt die Verteilung des Pkw-Besitzes für alle Haushalte in Deutschland im Jahr 2010. Diese Tabelle beruht auf unterschiedlichen Erhebungen und Datengrundlagen²⁷ und stellt lediglich eine – wenn auch wahrscheinliche – Abschätzung der Verteilung dar.

²⁷ Erhebungen zum Deutschen Mobilitätspanel, Statistik des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), Erhebungen zur Einkommens und Verbrauchsstichprobe aus unterschiedlichen Jahrgängen.

Tabelle 13: Verteilung des Pkw-Besitzes in Haushalten 2010.

Haushaltsgröße # PKW	1-Pers.- HH	2-Pers.- HH	3-Pers.- HH	4+ -Pers.- HH	Insgesamt: Pkw -Ausstattung
0 Pkw	17%	5%	1%	1%	23%
1 Pkw	22%	22%	6%	6%	55%
2+ Pkw	1%	8%	6%	7%	21%
Insgesamt Haushalte	40%	34%	13%	13%	100%

Daraus ergeben sich unter Berücksichtigung des Gesamt-Pkw-Bestands in Deutschen Privathaushalten die folgenden Zahlen für die Flotte in Privathaushalten (42 Mio. Pkw, einschließlich privat genutzter Firmenfahrzeuge):

- ca. 23 Mio. Pkw sind alleinige Fahrzeuge im Haushalt, für die der „Universalitätsanspruch“ angenommen werden muss.
- ca. 8,5 Mio. Pkw sind „Erstwagen“ (für die die Fernverkehrsrelevanz sowie eben der Universalitätsanspruch gegeben sein muss).
- ein Viertel der deutschen Pkw-Flotte in Privathaushalten (10,5 Mio. Pkw) sind „Zweit- und Drittwagen“.

Allerdings ist diese Abschätzung in gewisser Weise naiv: Viele nominale Zweitwagen werden von studierenden Söhnen oder Töchtern genutzt, für die durchaus Fernverkehrsrelevanz besteht. Und die „Persönlichkeitseigenschaft“ des Pkw wird beim Tauschen innerhalb eines Haushalts aufgegeben. Daher stellt sich die Annahme, dass ein Viertel der Flotte durch BEV substituierbar sein könnte, als relativ optimistisch dar.

Daher ist es sinnvoll, die tatsächliche Pkw-Nutzung unter Alltagsbedingungen zu analysieren.

Analyse der Tauglichkeit als (batterie-)elektrisches Fahrzeug unter Alltagsbedingungen

Zentrale Herausforderung bei der Analyse der Nutzung von Pkw ist die Verfügbarkeit von Informationen über eine Pkw-Nutzung über längere Zeiträume, um gerade die seltenen Ereignisse des Fernverkehrs bzw. der Ereignisse außerhalb des Alltagsbereichs in ihrer Relevanz einordnen zu können. Derartige Daten stehen mit Ausnahme der allerjüngsten Fahrzeuggeneration aber auch nicht für alle Hersteller, wo diese Daten aus dem Fahrzeugdatenbus mitgeloggt werden können, üblicherweise nicht zur Verfügung. Darüber hinaus beträgt das mittlere Fahrzeualter der Deutschen Pkw-Flotte 8,3 Jahre. D.h., Daten die für die Kfz-Nutzung in der Flotte verwertbar wären, stehen auf absehbare Zeit nicht in einer repräsentativen Stichprobe zur Verfügung.

„Normale“ Mobilitätshebungen (z.B. MiD) erstrecken sich üblicherweise nur über einen Tag und erlauben es daher nicht, Aussagen über die Kfz-Nutzung des befragten Haushalts außerhalb eines Stichtags abzuleiten. Die daraus gewonnen Aussagen sind daher nicht geeignet.

Im Deutschen Mobilitätspanel (MOP, Erhebung im Auftrag des Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) wird hingegen das Mobilitätsverhalten von Personen über den Verlauf einer Woche erfasst. Dies umfasst alle Wege (Ortsveränderungen) der Personen mit Zeiten, Zweck, benutzten Verkehrsmitteln und Entfernung. Die Erhebungsdauer einer Woche ist allerdings auch nicht geeignet, Fernverkehrereignisse bezogen auf die Fahrzeugebene abzuleiten. Jedoch wird, ergänzend zur Erhebung der Mobilität im Alltag mit allen Verkehrsmitteln (der sogenannten „Alltagsmobilität“), die Fahrzeugnutzung mit Pkw erhoben: Dafür füllen die Personen aus den Haushalten, die einen Pkw besitzen, über acht Wochen im Frühjahr ein Tanktagebuch aus, in dem bei jedem Tankvorgang unter anderem Kilometerstand und Kraftstoffmenge notiert wird. Außerdem geben die Probanden für den Pkw die geschätzte Jahresfahrleistung

an. Dadurch, dass das MOP als Panel (= wiederholte Teilnahme derselben Erhebungseinheiten) organisiert ist, können - sofern im Tanktagebuch über dasselbe Fahrzeug berichtet wird – die Jahresfahrleistungen sogar exakt bestimmt werden.

Die Datenbasis des Mobilitätspanels erlaubt also eine Analyse fußend sowohl auf der Mobilität von Personen mit einem Pkw als auch auf der Tanktagebucherhebung, um gewisse Abschätzungen der potentiellen Eignung von BEV zur Befriedigung existierender Mobilitätsbedürfnisse abzuleiten. Die Datenbasis ist damit geeignet, die oben gestellten Fragen – unter Setzung bestimmter Annahmen (z.B. Zuordnung von Pkw-Wegen einer Person zu Pkws eines Haushalts) – zu beantworten. Hierbei werden folglich die detaillierten Mobilitätsdaten einer Person über eine Woche mit den rudimentären Informationen der Tanktagebucherhebung verschnitten, um so zumindest den Anteil an Pkw zu bestimmen, für die keine Fernverkehrsrelevanz und damit eine E-Tauglichkeit anzunehmen ist. Damit stehen auch die Eigenschaften der aktuell genutzten Fahrzeuge und die der Besitzer für Analysen zur Verfügung.

Ergebnisse der Analysen zur Fahrzeugnutzung

Zunächst lässt sich aus den gemessenen Jahresfahrleistungen eine rechtsschiefe Verteilung darstellen: Zwar haben über 30 % aller Pkw eine Jahresfahrleistung von unter 8000 km (siehe Abbildung 47), jedoch kann daraus nicht unmittelbar auf eine Substituierbarkeit durch E-Fahrzeuge geschlossen werden, da keine Aussagen ableitbar sind, ob diese „geringere“ Fahrleistung regelmäßig erfolgt (z.B. täglich nur 30 km) oder aber selten höhere Fahrleistungen (= Fernverkehrsrelevanz) beobachtet werden können.



Deutsches Mobilitätspanel

Abbildung 47: Jahresfahrleistungsverteilung der Pkw-Flotte in Privathaushalten in Deutschland.

Aus dem Pkw-Bestand des Mobilitätspanels konnten jedoch zwei Gruppen von Pkw identifiziert werden, für die eine Substituierbarkeit durch BEV mit der heutigen Technik möglich wäre: Dies sind regelmäßig genutzte Fahrzeuge mit geringer regelmäßiger Tagesfahrleistung und selten genutzte Fahrzeuge mit geringer Monats- und Jahresfahrleistung.

Für die Gruppe der täglich, aber nur auf Kurzstrecken genutzten, Pkws wurden dabei folgende Bedingungen definiert:

- Tägliche Fahrleistung in der Berichtswoche jeweils unter 70 km.
- Die Fahrleistung in den acht Wochen der Tankbucherhebung ist kleiner als die achtfache berichtete Wochenfahrleistung.
- Die Jahresfahrleistung ist geringer als die 11-fache Monatsfahrleistung der Tankbucherhebung. Durch diese Einschränkung wird sichergestellt, dass z.B. Urlaubsnutzungen mit wenigen sehr langen Fahrten ausgespart bleiben.

Bei der Berechnung der Bedingung 1 wurde in Haushalten, die mehr Führerscheininhaber als Pkw besitzen, deren Fahrleistung auf diese Pkws kumuliert. Die Bedingungen 2 und 3 stellen sicher, dass es sich bei der berichteten Woche nicht um einen Ausreißer nach unten handelt. Zusammengefasst beschreibt diese Gruppe Fahrzeuge, die ohne Nutzungseinschränkung zuhause nachts aufgeladen werden könnten und die mit großer Wahrscheinlichkeit keine Langstreckenfahrt unternehmen. Die drei Bedingungen werden von ca. 4 % der Pkw aus der deutschen Flotte erfüllt.

Neben dieser Gruppe der täglich genutzten Pkws, sind ebenso BEV als Ersatz für Fahrzeuge mit geringer Nutzung denkbar. Hierfür wurden folgende Bedingungen definiert:

- Nutzung höchstens 4 mal in der Berichtswoche.
- Maximal 70 km an einem Tag berichtet.
- Jahresfahrleistung unter 4.000 km.
- Monatsfahrleistung der Tankbuchehebung unter 600 km.

Diese Bedingungen werden von weiteren ca. 3,5 % der Pkw-Flotte erfüllt, die nicht bereits in die erste Kategorie fallen. Insgesamt werden also durch die beiden Gruppen etwa 7,5 % der Pkw als von der Nutzung her geeignet für den rein batterieelektrischen Betrieb identifiziert (im Folgenden als „E-mobil-tauglich“ bezeichnet). Das bedeutet, dass nur 7,5 % aller Fahrzeuge wahrscheinlich gar nicht im Fern- und Regionalverkehr genutzt werden – umgekehrt verdeutlicht das, dass auch viele der sogenannten „Zweitwagen“ im Fern- und Regionalverkehr genutzt werden.

Wie stark das Zusammenwirken der Bedingungen das Potential einschränkt, macht Abbildung 48 deutlich, in der die Wochenfahrleistungen aller Pkw denen der E-mobil-tauglichen gegenübergestellt werden.

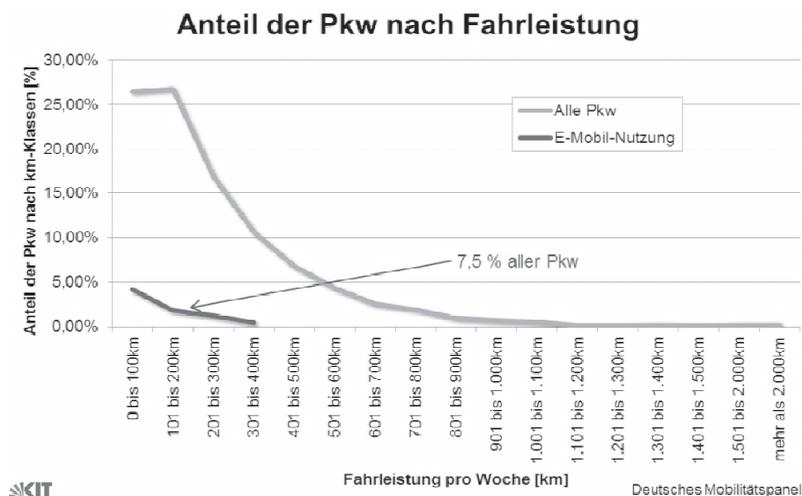


Abbildung 48: Verteilung der Pkw-Fahrleistungen im Vergleich zwischen allen Pkw mit denjenigen, die batterie-elektrisch betrieben werden könnten.

Eine Analyse der sozio-demographischen und sozio-ökonomischen Eigenschaften der Halter bzw. Eigenschaften der Fahrzeuge verdeutlichen folgende Zusammenhänge:

- Fast die Hälfte der Pkw, deren Nutzung „E-mobil-tauglich“ ist, befindet sich in Rentnerhaushalten. Hier ist die geringere Fahrleistung durch den lebenszyklusbedingten geringeren Aktionsradius der Rentner verursacht. Hier spielen durchaus auch Fahrzeuge größerer Hubraumklassen eine Rolle, in den Fällen, wo Pkw aus früheren (aktiveren) Lebensphasen in das Rentenalter „mitgebracht“ werden. Wie weiter oben dargestellt beträgt das Durchschnittsalter der Deutschen Flotte 8,3 Jahre.
- Das weitere Segment (44 % der als geeignet identifizierten Pkw) sind die typischen Zweitwagen aus Haushalten mit min-

destens einem Erwerbstätigen mit zwei oder mehr Pkw, hier dominieren die kleineren Hubraumklassen.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so wird aber deutlich, dass genau diese Marktsegmente (alte Pkw von Rentnern und kleine Zweitwagen) nicht die typischen, für eine Vorreiterfunktion am Markt erforderlichen, Marktsegmente sind²⁸!

Das Wirtschaftlichkeitsdilemma

Dazu kommt das Wirtschaftlichkeitsdilemma: Die betrachteten Marktsegmente (Rentner, Besitzer von Kleinwagen) haben offensichtlich eine gewisse Kostensensitivität.

Das konventionelle Auto hat einen bestimmten Anteil an Fixkosten (i.d.R. zeitabhängige Abschreibung und Wertverlust sowie Steuer und Versicherung) und die fahrleistungsabhängigen Kosten (im wesentlichen Treibstoffkosten). Diese Kostenstrukturen lassen sich zumindest bei den Fixkosten in gewissem Rahmen beeinflussen, wobei die fahrleistungsabhängigen Kosten bei den vorhandenen Fahrzeugen – außer in geringem Umfang durch eine entsprechende Fahrweise – kaum beeinflussbar sind. Bei den E-Fahrzeugen spielen die Fixkosten die zentrale Rolle (schon aufgrund der hohen Anschaffungskosten, dies dürfte sich auch mittelfristig kaum ändern) während die fahrleistungsabhängigen Kosten für elektrische Energie (im Vergleich zu den Treibstoffkosten) vergleichsweise gering sind. Damit wäre das E-Fahrzeug zwar theoretisch wirtschaftlich für Vielfahrer, bloß ist es technisch dazu (noch) nicht in der Lage. Das konventionelle Fahrzeug zeigt sich bislang auch in dieser Hinsicht als universell. Man kann seine Kostenstrukturen doch einigermaßen flexibel skalieren, z.B. durch die Wahl eines „alten“ weitestgehend abgeschriebenen Fahrzeugs. Das hohe Durchschnittsalter der Pkw-Flotten in Europa (z.B.

²⁸ Eine ausführliche Darstellung der Untersuchungen findet sich in [3]. Zur Methodik siehe [2].

Deutschland (2011): 8,3 Jahre) verdeutlicht, dass viele Haushalte ihre Gesamt-Pkw-Kosten so im Griff zu halten versuchen.

Unter dem Strich bedeutet das, dass die Eigenschaften der BEV (Reichweite, Fixkosten) im Widerspruch stehen zu den Nutzerbedürfnissen. Hier entsteht ein Dilemma, für das Lösungen gefunden werden müssen.

9.2.2 Rückfallebenen

Flottenmodelle und Leihfahrzeuge

Folglich wird in der Automobilindustrie über Lösungen nachgedacht, welche in der Lage sein können, die Defizite des BEV zu kompensieren. Hier gibt es z.B. die Idee von „Flottenmodellen“: Für den Fall, dass ein E-Fahrzeug an die Grenzen seiner technischen Reichweite stößt, kann es temporär zurückgegeben werden und der Fahrer erhält aus einer Flotte des Dienstleisters ein anderes, z.B. „fernverkehrstaugliches“ Fahrzeug.

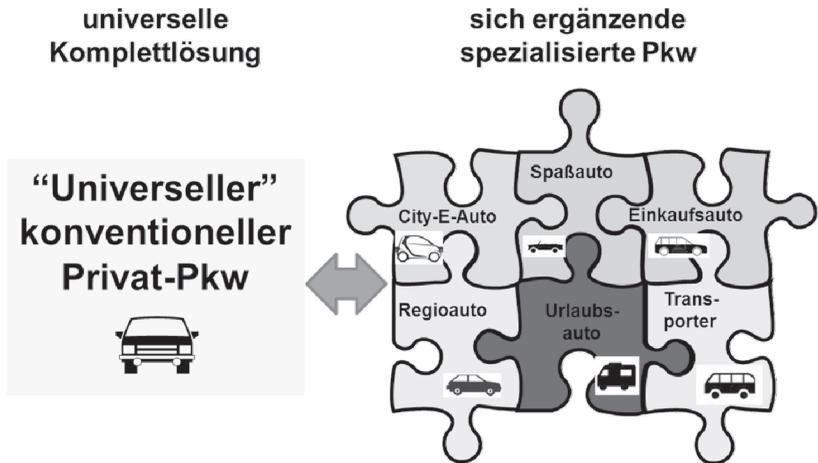


Abbildung 49: Flottenmodelle vs. eigener konventioneller Pkw mit Universalitätseigenschaften.

Diese Lösung klingt zunächst überzeugend, die Nutzeransprüche an die Universalität konventioneller Pkw werden durch die temporäre Ausleihbarkeit „spezialisierter“ Fahrzeuge nicht nur kompensiert sondern sogar erweitert.

Allerdings bleiben bestimmte Fragen unbeantwortet bzw. werden neue Probleme verursacht:

- Zunächst geht für den Nutzer der Individualitätsanspruch verloren. Er muss ein anderes als das gewohnte Fahrzeug nutzen, umgekehrt wird das persönliche Fahrzeug ggf. durch andere benutzt. Dies erfordert von den heutigen Fahrzeugbesitzern ein Umdenken.
- Es ergibt sich ein Dilemma zwischen den Nutzungsmustern im Kollektiv (z.B. in der Urlaubssaison) und den individuellen Ansprüchen (jederzeitige Verfügbarkeit).

- Es entstehen neue Transaktionskosten. Die Planung einer Reise erfordert Aufwendungen, die der heutige Autobesitzer in dieser Form nicht gewohnt sein dürfte. Damit geht ein gewisser Teil der Spontaneität verloren.

Neue Signale seitens der Nachfrage

Andererseits gibt es erste Signale, die darauf hindeuten, dass der Mobilitätsmarkt in Bewegung kommt: In jüngster Zeit mehren sich die Indizien und Studien, in denen dargestellt wird, dass die „Jüngeren“ (unter 30-Jahren) eine gegenüber vorherigen Generationen und Kohorten verändertes Mobilitätsverhalten aufweisen [4], [7]. Diese Studien belegen, dass bei den Jüngeren die Pkw-Nutzung rückläufig ist, wobei gleichzeitig die Nutzung anderer Verkehrsmittel zunimmt (s. Kapitel 1 und 8).

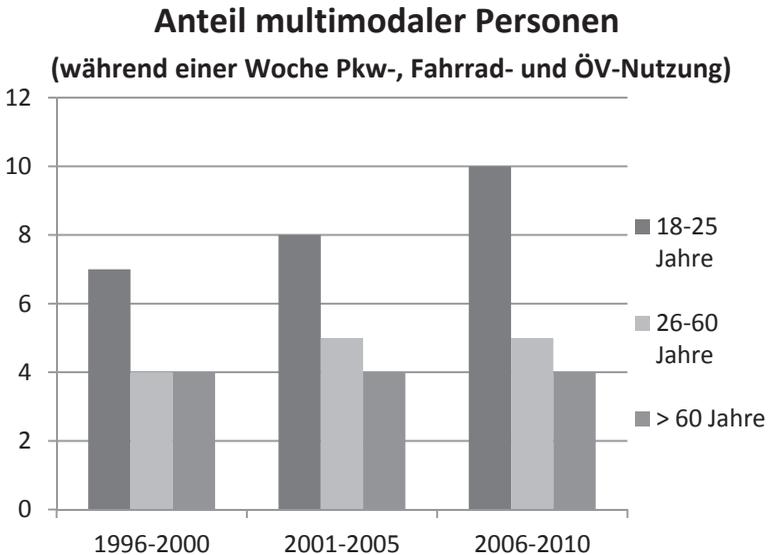


Abbildung 50: Veränderung des Anteils multimodaler Personen in unterschiedlichen Altersgruppen (Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Daten des Deutschen Mobilitätspanels).

Zentraler Punkt für diese Veränderungen ist zunehmend das sogenannte „multimodale Verhalten“. Eine Person verhält sich multimodal, wenn sie im Alltag nicht nur ein Verkehrsmittel benutzt, sondern unterschiedliche Verkehrsmittel. Ein solches Verhalten setzt sich dabei von Seiten der Jüngeren her durch (siehe Abbildung 50). Offensichtlich verändert sich der Stellenwert des Pkws – vor allem bei den Jüngeren. Trotz erheblicher und komplexer Mobilitätsbedürfnisse gelingt es einem Teil der Jüngeren, ihre Verkehrsmittelnutzung so zu organisieren, dass alle Mobilitätsbedürfnisse befriedigt werden können, aber eben ohne bzw. mit deutlich weniger Pkw-Nutzung. Gerade bei diesen Personen hat der Pkw offensichtlich nicht mehr seine Universalitätsbedeutung. Damit ist diese Gruppe interessant,

um die Relevanz und Nutzbarkeit auch eines nicht universellen Elektrofahrzeuges einschätzen zu können.

Das heißt, es stellt sich die Frage, wie die jüngeren multimodalen Verkehrsteilnehmer ihre Multimodalität organisieren und welche Schlussfolgerungen daraus für die Elektromobilität zu ziehen sind: Um „erfolgreich“ multimodal zu agieren, muss die flexible Verkehrsmittelnutzung möglichst transaktionskostenfrei gestaltet werden können. Dies geschieht bei den „modernen“ flexiblen Multimodalen mittels der Dienste der Informations- und Kommunikationstechniken - insbesondere der auf Basis des mobilen Internets. Gerade die sogenannten „Smartphones“ mit ihren „Apps“ (die gerade von den „Jüngeren“ genutzt werden) bieten eine Vielzahl an Zugriffsmöglichkeiten auf unterschiedliche Mobilitätsangebote und Verkehrsmittel, um flexibel und situationsgerecht mobil sein zu können und erleichtern somit erfolgreiches multimodales Verhalten. Dabei gibt es nicht nur die reine Information sondern auch das flexible Buchen und das Ticketing. Hier entwickelt sich gegenwärtig ein Markt für neue Dienste und Dienstleistungen. Diese sind durchaus erfolgreich. Die Verfügbarkeit der neuen Technik und die aufkommenden Dienste bedingen sich dabei gegenseitig.

Der konventionelle „universelle“ Privat-Pkw wird durch die multimodalen Verkehrsteilnehmer offensichtlich durch einen Verkehrsmittelmix substituiert, worin der Pkw zwar vorkommt (z.B. als Car-Sharing-Fahrzeug), aber eben andere Verkehrsmittel genau die Märkte besetzen, für die sie besonders geeignet sind. Umgekehrt werden die Schwächen einzelner Verkehrsmittel durch ihre Komplementarität zueinander kompensiert (s. Abbildung 51).

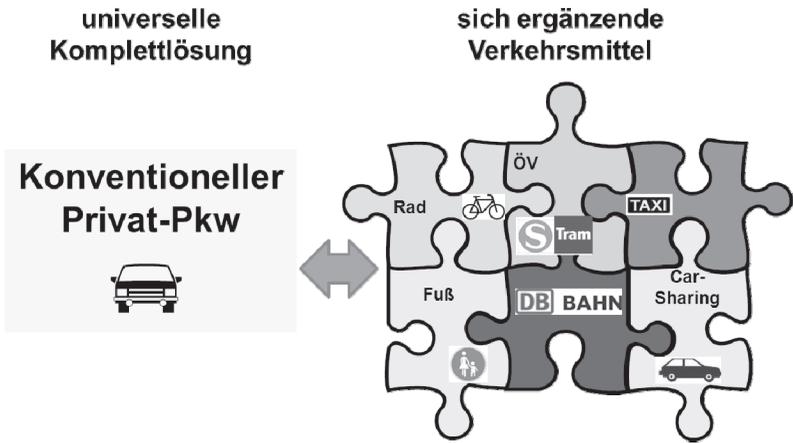


Abbildung 51: Verkehrsmittel „multimodaler“ Verkehrsteilnehmer vs. eigener konventioneller Pkw mit Universalitätseigenschaften.

Hierbei ist auch zu betonen, dass in bestimmten Märkten und für bestimmte Fahrtzwecke der Pkw ohnehin seine Universalitätseigenschaft eingebüßt hat, weil er einfach nicht mehr in der Form benötigt wird: Für Urlaubs- und Fernreisen findet in den letzten Jahren eine Substitution des Pkw durch das Flugzeug statt [4], ähnliches passiert gegenwärtig durch die Bahn im Fernverkehr gerade auf Relationen zwischen Großstadt und Großstadt, Räumen wo der Pkw schon seit geraumer Zeit seinen Wettbewerbsvorsprung eingebüßt hat.

Multimodale Verkehrsteilnehmer schaffen es durch die geschickte Kombination von Angeboten offensichtlich, erfolgreich (und kostengünstig) mobil zu sein – zumindest da, wo alternative Mobilitätsangebote zur Verfügung stehen, was zunächst nur in den Kernbereichen der Großstädte der Fall zu sein scheint.

Jedoch verdeutlichen die Entwicklungen seitens der Nachfrage auf der einen Seite und die Entwicklungen von Angeboten und Diensten auf der

anderen, dass durch diese Techniken und Dienste aber eben auch die neue Einstellung zur Multimodalität Elektromobilität eher „machbar“ wird – trotz der offensichtlichen Einschränkungen in Hinblick auf die Reichweite.

Was bedeute das für Mobilitätsverhalten und die Elektromobilität?

Verkehrsmittel werden sich für den Nutzer im Umgang ähnlicher: Um ein Elektrofahrzeug zu besitzen, müssen mehr oder weniger häufig andere Pkw oder eben auch andere Verkehrsmittel genutzt werden. Diese andere Nutzung bedingt gewisse Transaktionskosten: Damit werden sich aus der Sicht des Fahrers und Besitzers eines BEV Einsatzmöglichkeiten und Grenzen dieses Fahrzeugs und die multimodale Verkehrsmittelnutzung ähnlich – dies gilt für den Zugang (mit Vorbuchung und Reservierung) wie auch für die Nutzung (spezialisiert und jeweils zugeschnitten auf bestimmte Einsatzmuster): Dies bedeutet aber auch, dass bestimmte sonstige Eigenschaften eines persönlichen Pkw dabei auf der Strecke bleiben („My Car is My Castle“, Image, Status).

Zunächst einmal verschwimmen die Unterschiede zwischen dem universellen Pkw und den multimodalen alternativen Verkehrsmitteln. Wenn dem so ist, ist das eine gute Nachricht, da sich in Zukunft ein Pkw-Nutzer für mehr Fahrten zu überlegen hat, welche Alternativen vorhanden sind. Und hat der Pkw-Nutzer den Umgang mit den Alternativen erlernt, fällt situationsabhängig der Einstieg in die Nutzung gänzlich anderer Verkehrsmittel wahrscheinlich leichter.

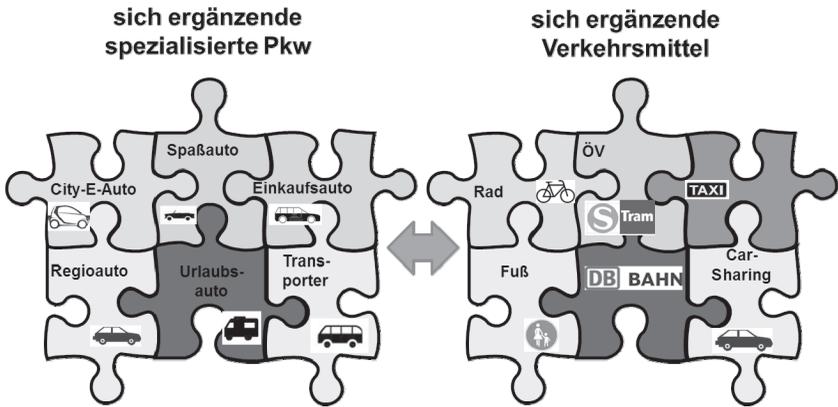


Abbildung 52: Multimodale Verkehrsangebote vs. Flottenlösungen mit unterschiedlichen Pkw.

Die weniger gute Nachricht ist, ob der bisherige Pkw-Nutzer diese gefühlten Einschränkungen seiner individuellen Freiheit und Unabhängigkeit, die ihm so über den Umweg der Elektrofahrzeuge aufgezwungen werden, akzeptiert. Dies könnte die Durchsetzbarkeit der Elektrofahrzeuge am Markt dämpfen. Die zunehmende Multimodalität bei den Jüngeren (und hier gerade bei bestimmten Peer-Groups: „gebildet im urbanen Umfeld“) lassen jedoch die Vermutung zu, dass hier eine unumkehrbare Entwicklung eingesetzt hat. Diese bietet zwar Chancen – im Hinblick auf ein vernünftiges Verkehrsverhalten - aber auch Risiken, z.B. für die Automobilhersteller: Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass es durchaus auch Pkw-Fahrer geben dürfte, die aufgrund des E-Autos merken, dass ein Leben eigentlich auch ohne persönliches Auto möglich ist.

9.3 Zusammenfassung, Thesen und Ableitung von Forschungsbedarf

Es lässt sich feststellen, dass neue (batterie-)elektrische Antriebe bislang nicht den gewohnten Ansprüchen an die „Universalität“ des konventionellen Pkw gerecht werden. Auch auf absehbare Zeit fallen die Eigenschaften von BEV und die aus der Gewohnheit mit dem konventionellen Pkw resultierenden Ansprüche an einen privaten Pkw auseinander. Dazu kommt, dass gerade diejenigen, für die heute schon ihre Pkw-Mobilität direkt durch ein E-Fahrzeug substituierbar wäre, nicht zu den Peer-Groups gehört, die normalerweise neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte durchsetzen könnte – nicht zuletzt aufgrund der Kostenstrukturen des E-Fahrzeugs. Flottenmodelle werden als Rückfallebene angesehen, die bei fehlender Eignung des E-Fahrzeugs eine Alternative anbieten.

Eine Generation wächst heran, für die der Pkw keine Notwendigkeit darstellt, welche sich wegen des vergleichsweise einfachen Zugang zu alternativen Modes über die Informations- und Kommunikationstechnologien zunehmend „multimodal“ orientiert und welche sich die universelle Mobilität durch Kombination von Verkehrsmitteln zunehmend aneignet. Schreibt man diesen Prozess fort, könnte diese dynamische Organisation der Mobilität in Verbindung mit den „Universalitätsdefiziten“ des BEV dazu führen, dass andere Verkehrsmittel stärker wahrgenommen und auch genutzt werden.

Damit bietet die Zukunft Anwendungsbereiche für alle Antriebsarten, Fahrzeuge und Verkehrsmittel und damit für alle sowohl Chancen als auch Risiken.

Um diese Prozesse abschätzen zu können, bleiben jedoch Fragen offen: Diese beziehen sich zum einen auf das generelle Fernverkehrsverhalten (Wie häufig findet denn Mobilität außerhalb des Bereiches der Alltagsmobilität mit einem Pkw statt? Wie verändert sich die Verkehrsmittelnutzung im Fernverkehr?); zudem ist das verfügbare Zahlenmaterial gering – die

letzten verfügbaren Zahlen und Erhebungsdaten sind aus den Jahren 2001/2 [9].

Eine weiterer Forschungsfokus bezieht sich auf die Wirkungen der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) auf das Verkehrsverhalten (Welche Wirkungen haben IKT auf Verkehrsmittelnutzung? Für welche Personenkreise ist das relevant?) Bislang liegen nur wenig konkrete Befunde vor, Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten dürften mehr als nur wahrscheinlich sein.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Chlond, J. Last, W. Manz und D. Zumkeller (2004): Eckwerte des Personenfernverkehrs in Deutschland. In: Internationales Verkehrswesen 56, Heft 10, S. 430-435.
- [2] B. Chlond, M. Kagerbauer, P. Ottmann und D. Zumkeller (2009): Mobilitätspanel: Pkw-Fahrleistungen und Treibstoffverbrauch im Vergleich. In: Internationales Verkehrswesen 61, Heft 3, S. 71-75.
- [3] B. Chlond, M. Kagerbauer und P. Vortisch (2011): Welche Anforderungen sollen Elektrofahrzeuge erfüllen? – Hinweise aus der Perspektive der Mobilitätsforschung. In: H. Proff, J. Schönharting, D. Schramm und J. Ziegler (Hrsg.): Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität – betriebswirtschaftliche und technische Aspekte. Wiesbaden.
- [4] Ifmo (Institut für Mobilitätsforschung) (2011): Mobilität junger Menschen im Wandel – multimodaler und weiblicher. München.
- [5] W. Manz, J. Last, B. Chlond und D. Zumkeller (2005): Die intermodale Vernetzung von Personenverkehrsmitteln unter Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse. INVERMO-Schlussbericht, Karlsruhe.

- [6] mobilitaetspanel.de: Webseite zum Deutschen Mobilitätspanel MOP. Zugriff am 06.08.2011.
- [7] C. J. Tully, (2011): Mobilisierung des Mobilen - Trends in der Jugendmobilität. In: Der Nahverkehr, Heft 7-8/2011.
- [8] VALEO (2010): White paper for the Zero Emission Vehicle URL: www.valeo.com/fileadmin/dotcom/uploads/pdf/En/white%20paper%20ZEV%20Valeo%202010_ANG.pdf. Zugriff am 06.08.2012.
- [9] verkehrspanel.de: Webseite zur Fernverkehrserhebung INVERMO. Zugriff am 06.08.2011.
- [10] D. Zumkeller, B. Chlond und O. Lipps (1999): Das Mobilitätspanel (MOP) – Konzept und Realisierung einer bundesweiten Längsschnittbetrachtung. Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft, Heft B217, S. 33-72.



ALTERNATIVE ANTRIEBSKONZEPTE BEI SICH WANDELNDEN MOBILITÄTSSTILEN

Der Workshop Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen befasste sich insbesondere mit der Diskussion, ob die künftige Mobilität eher von alternativen Antriebskonzepten geprägt sein wird und die Mobilitätsgewohnheiten ähnlich sein werden bzw. sich an die Antriebstechnologien anpassen werden, oder ob es vielmehr einen Umbruch bei den Mobilitätsstilen, der Verkehrsmittelnutzung, geben wird – hin zu einer integrierten multimodalen Mobilität.

Diese Fragestellung wurde unter vier Aspekten beleuchtet: Entwicklung der individuellen Mobilität(-sstile), Stand und Perspektiven der Technik, Systemwirkungen sowie mögliche Zukünfte der Mobilität.

Als Antriebstechnologien standen der konventionelle Verbrennungsmotor, der Elektromotor mit Brennstoffzelle sowie der Elektromotor mit Batterie im Fokus. Diese Alternativen haben, insbesondere auch vor dem Hintergrund der Energiewende, verschiedene Anforderungen zu erfüllen: Sie müssen technisch realisierbar und wirtschaftlich sein, ökologische und politisch-rechtliche Rahmenbedingungen erfüllen und nicht zuletzt gesellschaftlich akzeptiert werden.

ISBN 978-3-86644-944-2

ISBN 978-3-86644-944-2



9 783866 449442 >