Strategische **O**ptionen der Automobilindustrie zur **M**aßnahmenallokation für die Migration nachhaltiger Antriebstechnologien in etablierten und aufstrebenden Märkten

Schlussbericht und Erfolgskontrollbericht der Technischen Universität Braunschweig und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen University

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Braunschweig Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University	Förderkennzeichen: 01UN1006A 01UN1006B
Vorhabenbezeichnung: STROM – **Str**ategische **O**ptionen der Automobilindustrie zur **M**aßnahmenallokation für die Migration nachhaltiger Antriebstechnologien in etablierten und aufstrebenden Märkten	
Laufzeit des Vorhabens: 01. Juni 2010 – 31. Mai 2013 bzw. 31. Oktober 2013	
Berichtszeitraum: 01. Juni 2010 – 31. Mai 2013 bzw. 31. Oktober 2013	

Freitag, 29. November 2013

Inhalt

I. Einleitung ... 5
II. Schlussbericht Teil I: Ausgangslage des Projekts und Vorgehen ... 6
II.1 Aufgabenstellung ... 6
II.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 7
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 8
II.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde ... 10
III. Schlussbericht Teil II: Verwendung der Zuwendung und Ergebnisverwertung ... 13
III.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele ... 13
III.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 13
III.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ... 14
III.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans ... 14
III.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ... 16
III.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses ... 19
III.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen ... 19
III.6.2 Geplante Veröffentlichungen ... 23
III.6.3 Auszeichnungen ... 24
IV. Erfolgskontrollbericht ... 25
IV.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen ... 25
IV.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens ... 26
IV.2.1 Politik ... 26
IV.2.2 Nachfrager ... 28
IV.2.3 Hersteller ... 34
IV.2.4 Wirkungsanalyse ... 41
IV.2.5 Zentrale Projektergebnisse und Handlungsempfehlungen ... 49
IV.3 Fortschreibung des Verwertungsplans ... 51
IV.3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende ... 51
IV.3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende ... 52
IV.3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ... 52
IV.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben ... 53
IV.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer ... 54
IV.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung ... 54
IV.6.1 Workshops ... 54
IV.6.2 Arbeitspakete ... 55
V. Berichtsblatt ... 57
VI. Literaturverzeichnis ... 59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen und Akteure des STROM-Projekts ... 8
Abbildung 2: Simulationsmodell der Automobilkaufentscheidung ... 29
Abbildung 3: Entwicklung der Absatzanteile elektrischer Fahrzeuge (HEV, PHEV und BEV) in Deutschland ... 32
Abbildung 4: Entwicklung der Absatzanteile elektrischer Fahrzeuge (HEV, PHEV und BEV) in China 33
Abbildung 5: Nutzeroberfläche der Datenbank zu alternativen Antriebstechnologien ... 34
Abbildung 6: Verlauf kumulierter Patentanmeldungen verschiedener Batterietypen ... 35
Abbildung 7: Technologie-Roadmap für batterieelektrische Antriebe im Basis-Szenario ... 35
Abbildung 8: Aufbau und Strukturierung des Technologiebewertungsmodells ... 36
Abbildung 9: Simulationsmodell des Herstellerverhaltens ... 37
Abbildung 10: Entwicklung der Marktanteile am Absatz elektrischen Fahrzeuge (HEV, PHEV, BEV, FCEV) für verschiedene Strategiekombinationen ... 40
Abbildung 11: Ökologische Faktoren ... 42
Abbildung 12: Ökonomische Faktoren ... 42
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Module "Aging Chain" und "Infrastruktur" ... 43
Abbildung 14: Ganzheitliches Simulationsmodell (Integration der Arbeitsphasen A bis D) ... 45
Abbildung 16: Validierungsphasen des Gesamtmodells ... 45
Abbildung 17: Entwicklung des Deutschen Pkw-Bestands bis 2030 (BAU-Szenario) ... 46
Abbildung 18: Exemplarische Szenario-Ergebnisse für Deutschland (ÜWS – Erhöhte Übergangswahrscheinlichkeit für Elektrofahrzeug; Tax KS - Erhöhung der konventionellen Kraftstoffsteuer) ... 47
Abbildung 19: Entwicklung der direkten Emissionen im BAU-Szenario (Deutschland) ... 47
Abbildung 20: Entwicklung des Chinesischen Pkw-Bestands bis 2030 (BAU-Szenario) ... 48
Abbildung 21: Entwicklung der direkten Emissionen im BAU-Szenario (China) ... 48
Abbildung 21: Realisierter Zeitplan des STROM-Projekts ... 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Änderungsbescheide der RWTH Aachen University ... 14
Tabelle 2: Szenarien politischer Instrumente (Deutschland) ... 28
Tabelle 3: Übersicht der evaluierten Strategien und Szenarien ... 44

Abkürzungsverzeichnis

AIP-TUBS	Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion der TU Braunschweig
BAU	Business-as-usual
BEV	Battery Electric Vehicle
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BUW	Bergische Universität Wuppertal
CNG	Compressed Natural Gas
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EV	Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
HEV	Hybrid Electric Vehicle
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
IWF-TUBS	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LPG	Liquefied Petroleum Gas
NGO	Nichtregierungsorganisation
NFF	Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik
OM-RWTH	Lehrstuhl für Operations Management der RWTH Aachen University
PHEV	Plug-in-Hybrid Electric Vehicle
PL-BUW	Lehrstuhl für Produktion und Logistik der Bergischen Universität Wuppertal
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University
TUBS	Technische Universität Braunschweig
UBA	Umweltbundesamt
VW AG	Volkswagen AG
VWL-TUBS	Institut für Volkswirtschaftslehre der TU Braunschweig

I. Einleitung

Das vorliegende Dokument beinhaltet den Schlussbericht sowie den Erfolgskontrollbericht, entsprechend der BNBest-BMBF 98, zum Forschungsprojekt „Strategische Optionen der Automobilindustrie zur Maßnahmenallokation für die Migration nachhaltiger Antriebstechnologien in etablierten und aufstrebenden Märkten – STROM“, Förderkennzeichen 01UN1006A für die Technische Universität Braunschweig (TUBS) und Förderkennzeichen 01UN1006B für die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University (RWTH). Der Bericht beinhaltet die Beiträge aller am Projekt beteiligten Verbundpartner. Er umfasst im ersten Teil des Schlussberichts (Kapitel II) eine kurze Darstellung der Ausgangslage des Projekts und des daraus abgeleiteten Vorgehens. Der zweite Teil des Schlussberichts (Kapitel III) enthält eine eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung während der Projektlaufzeit und der Ergebnisverwertung. An den Schlussbericht schließt sich in Kapitel IV der Erfolgskontrollbericht mit der Zusammenfassung der erzielten Projektergebnisse an. Den Abschluss bildet in Kapitel V eine Kurzfassung des Berichts in Form des Berichtsblatts. Das vorliegende Dokument umfasst die gesamte Projektlaufzeit und damit den Berichtszeitraum 01.06.2010 bis 31.05.2013 (TUBS) bzw. 31.10.2013 (RWTH).

II. Schlussbericht Teil I: Ausgangslage des Projekts und Vorgehen

II.1 Aufgabenstellung

Der Klimawandel und die zunehmende Knappheit fossiler Ressourcen sind Treiber von Innovationen. Alternativ angetriebene Fahrzeuge wie Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge erscheinen als vielversprechende Möglichkeit, individuelle Mobilität nachhaltig zu gestalten. Aussagen darüber, ob und wann sich diese Fahrzeuge im Markt durchsetzen und mit welchen ökonomischen, ökologischen und sozialen Konsequenzen dies verbunden ist, erweisen sich jedoch als schwierig. Dies liegt zum einen an der unsicheren technologischen Entwicklung der Antriebskonzepte und zum anderen an den Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Entscheidungen in der Politik und der Automobilhersteller sowie des Verhaltens von Fahrzeugkäufern.

Vor diesem Hintergrund bestand das methodische Ziel des STROM-Projekts darin, verbesserte wirtschaftswissenschaftliche Modelle zur Entscheidungsunterstützung der Akteure des Automobilsektors (Politik, Hersteller und Nachfrager) zu entwickeln. Die Integration der Modelle zu einem Gesamtmodell sollte die ganzheitliche Analyse der Automobilmarktentwicklung und der damit verbundenen Auswirkungen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ermöglichen. Die generischen Modelle sollten sowohl für den gesättigten deutschen als auch für den noch wachsenden chinesischen Markt implementiert werden.

Das inhaltliche Ziel bestand darin, mit Hilfe der entwickelten Modelle die Abschätzung verschiedener Szenarien der Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien und der damit verbundenen ökonomischen, ökologischen und sozialen Konsequenzen zu ermöglichen. Basierend auf den Szenarien sollten Handlungsempfehlungen an politische Entscheidungsträger und Automobilhersteller abgeleitet werden. Für politische Entscheidungsträger betreffen diese den vorteilhaften Einsatz und die Ausgestaltung politischer Instrumente zur Beeinflussung von Kunden und Automobilherstellern. An Automobilhersteller sollten Empfehlungen hinsichtlich der Attraktivität der verschiedenen Antriebstechnologien und vorteilhafter Strategien für ihre Integration in das bestehende Fahrzeugportfolio gegeben werden. Durch die Gegenüberstellung des deutschen und des chinesischen Marktes sollten Erkenntnisse darüber erzielt werden, unter welchen Voraussetzungen sich verschiedene Herstellerstrategien und politische Instrumente als besonders erfolgversprechend erweisen.

II.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

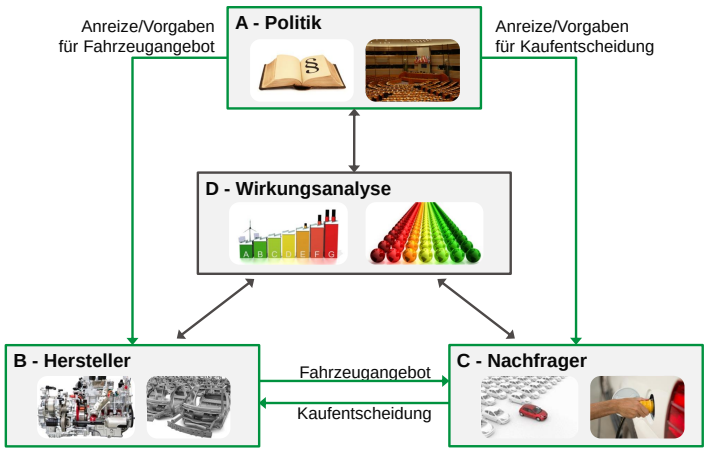
Das Projekt wurde gemeinsam von drei Instituten der Technischen Universität Braunschweig (Institut für Volkswirtschaftslehre – VWL-TUBS, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik – IWF-TUBS und Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion – AIP-TUBS) und dem Lehrstuhl für Operations Management der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen University (OM-RWTH) und in enger Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG (VW AG) durchgeführt. Die Partner verfügten bereits bei Projektbeginn über langjährige Erfahrung in den Bereichen der Technologie- (Herrmann et al. 2007) und Gesetzesfolgenabschätzung (Spengler/Walther 2005), des Public Choice (Batool/Sieg 2009), der Technologiefrüherkennung (Jühling et al. 2009), der Modellierung dynamischer Systeme (Onozaki et al. 2000), (Walther et al. 2008a), (Wansart et al. 2008), (Wansart et al. 2009), der dezentralen und agentenbasierten Entscheidungsfindung (Onozaki et al. 2003), (Sieg 2001), (Walther et al. 2007), (Walther et al. 2008b) sowie der umweltorientierten bzw. ganzheitlichen Bewertung (Bohr et al. 2007), (Hesselbach et al. 2007) von Technologiealternativen. Weiterhin arbeiteten die Partner bereits in zahlreichen öffentlich und industriell geförderten Projekten zusammen, wie zum Beispiel:

- Lithorec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. AIP-TUBS, IWF-TUBS, VW AG u.a. BMU. 2009 bis 2011 (aktuell: Lithorec II, AIP-TUBS, IWF-TUBS, VW AG u.a. BMU. 2012 bis 2015)
- Methoden zur ganzheitlichen Bewertung und zeitlichen Einordnung neuer Technologien. IWF-TUBS & VW AG. 2008 bis 2011
- Gesetzesfolgenabschätzung am Beispiel Abgasgesetzgebung. AIP-TUBS & VW AG. 2006 bis 2009
- Produktbezogener Umweltschutz der japanischen Automobilindustrie. AIP-TUBS & VW AG. 2003 bis 2005
- Nachhaltige Produktion: Erfassung und Verarbeitung von Energieströmen in der Produktion. IWF-TUBS. BMWi. 2007 bis 2010

Die Partner der TUBS sind eingebunden in das Niedersächsische Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF), welches interdisziplinäre Forschung für eine individuelle Mobilität der Zukunft bündelt. Forschungsvision des NFF ist das Metropolitan Car – dies umfasst Fahrzeuge zur Sicherstellung der individuellen Mobilitätsbedürfnisse in Ballungsräumen.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bearbeitung des STROM-Projekts erfolgte in vier Arbeitsphasen (vgl. Abbildung 1). Die akteursspezifischen Entscheidungsmodelle für Politik, Hersteller und Nachfrager wurden in den Arbeitsphasen A – C entwickelt. Die Integration der Modelle in ein Gesamtmodell zur Wirkungsabschätzung und die darauf basierende Ableitung von Handlungsempfehlungen erfolgte in der Arbeitsphase D. In jeder Arbeitsphase wurden die Analyse und Modellentwicklung unter Berücksichtigung des deutschen und des chinesischen Marktes durchgeführt.



Projektpartner:
- Technische Universität Braunschweig:
  - Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion
  - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
  - Institut für Volkswirtschaftslehre
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen University, Lehrstuhl für Operations Management
- Volkswagen AG, Konzern-Marktforschung, Trendforschung und Analysen

Abbildung 1: Phasen und Akteure des STROM-Projekts

Im Fokus von Arbeitsphase A stand die **Politik**, da diese wesentlich über die Rahmenbedingungen des Automobilmarkts bestimmt. Im Rahmen des ersten Arbeitspakets (A1) wurden die Beschränkungen, denen Politiker bei ihrem Handeln unterworfen sind, sowie wirtschaftspolitische Instrumente zur Beeinflussung des Handelns von Herstellern und Nachfragern untersucht. Im darauf aufbauenden Arbeitspaket (A2) wurden mögliche Selbstbindungsinstrumente zur Überwindung des Problems der Zeitinkonsistenz und zur nachhaltigen Gestaltung von Politikstrategien analysiert, ein Klimaabkommen als geeignetes Selbstbindungsinstrument identifiziert und zwei spieltheoretische Modelle zur näheren Analyse von Klimaabkommen entwickelt (Kratzsch et al. 2011), (Kratzsch et al. 2012). Untersucht wurde zusätzlich anhand eines spieltheoretischen Modells die Vorteilhaftigkeit der Förderung alternativer Antriebstechnologien im Spannungsverhältnis zwischen Netzwerkeffekten und Umweltexternalitäten (Dietrich/Sieg 2011). Zur weiteren Analyse im übergeordneten Gesamtmodell (Arbeitsphase D) wurden in Arbeitspaket A3 ausgewählte wirtschaftspolitische Instrumente parametriert, parametrisiert und in Politikszenarien miteinander kombiniert.

Automobilhersteller entscheiden darüber, welche Fahrzeuge mit welchen Antriebstechnologien ausgestattet werden und zu welchem Zeitpunkt sie zu welchem Preis am Markt angeboten werden. Ihr Entscheidungsverhalten wurde im Rahmen von Arbeitsphase B untersucht. In Arbeitspaket B1 erfolgte zunächst die techno-ökonomische Analyse und Bewertung

der verschiedenen Antriebstechnologien aus Herstellersicht. Dabei wurden sowohl die aktuellen Eigenschaften der Technologien als auch Erwartungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungspfade berücksichtigt. Hierauf aufbauend wurden in Arbeitspaket B2 Herstellerstrategien zur Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge ermittelt. Diese Erkenntnisse wurden in Arbeitspaket B3 in ein Simulationsmodell überführt, das es erlaubt, die Strategien unter Berücksichtigung verschiedener Entwicklungsszenarien zu bewerten. Bei dem Simulationsmodell handelt es sich um das von (Kieckhäfer 2013) entwickelte hybride Simulationsmodell, ergänzt um die Berücksichtigung von Wettbewerb zwischen Herstellern und verschiedenen Herstellerstrategien (vgl. Wachter/Spengler 2012). Die Ergebnisse der Strategiebewertung wurden anhand von Herstellerstrategien an das Modell zur Wirkungsanalyse (Arbeitsphase D) übergeben.

In Arbeitsphase C stand die Untersuchung des **Kundenverhaltens** im Mittelpunkt, da dieses letztendlich bestimmt, ob sich alternativ angetriebene Fahrzeuge im Markt durchsetzen oder nicht. Wie sich Kunden beim Autokauf verhalten und welche Unterschiede zwischen verschiedenen Kundengruppen insbesondere unter Berücksichtigung der Besonderheiten von gesättigten und wachsenden Märkten bestehen, wurde in Arbeitspaket C1 untersucht. In Arbeitspaket C2 wurde ein konzeptionelles Modell zur Abbildung der Automobilkaufentscheidung entwickelt. Dieses wurde in Arbeitspaket C3 in ein hybrides Simulationsmodell überführt (Kieckhäfer 2013). Hier werden agentenbasierte und systemdynamische Simulation kombiniert, um sowohl dem individuellen Kundenverhalten als auch den aggregierten Entwicklungen im Markt Rechnung zu tragen. Ergänzt wurde das Modell um die Veränderbarkeit der Einstellung von Kunden gegenüber Antriebstechnologien durch Werbung und Mund-zu-Mund-Propaganda. Der modulare Aufbau des Simulationsmodells erlaubt eine direkte Integration des Modells in das übergeordnete Gesamtmodell (Arbeitsphase D).

In Arbeitsphase D erfolgte die Integration der akteursspezifischen Modelle in ein Gesamtmodell, um eine Abschätzung der Marktentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge und eine **Analyse der damit verbundenen Auswirkungen** zu ermöglichen. Hierfür wurden in Arbeitspaket D1 zunächst Kriterien zur Abschätzung der Effizienz und Effektivität einzelner akteursspezifischer Maßnahmen herausgearbeitet und Technologiefolgen auf Einzeltechnologieebene für diese Kriterien analysiert. Relevante Kriterien wurden in das in Arbeitspaket D2 entwickelte dynamische Bestands-Fluss-Modell übertragen. Dieses Modell vereint die Erkenntnisse aus den Akteursmodellen (Arbeitsphasen A – C) und erlaubt eine Abschätzung der Marktentwicklung unter Berücksichtigung verschiedener Politik- und Herstellerstrategien. Basierend hierauf erfolgte in Arbeitspaket D3 eine ganzheitliche Analyse des Gesamtsystems, so dass in Arbeitspaket D4 Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Gestaltung politischer Instrumente zur Förderung alternativ angetriebener Fahrzeuge und eines vorteilhaften

Vorgehens zur Integration dieser Fahrzeuge in das Fahrzeugangebot eines Herstellers abgeleitet werden konnten.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern insbesondere im Hinblick auf die Integration der akteursspezifischen Modelle in das Gesamtmodell. Die Koordination der Arbeitsphase A oblag maßgeblich VWL-TUBS. Zur Analyse der verschiedenen Antriebstechnologien und deren Einbettung in das betriebswirtschaftliche Entscheidungskalkül arbeiteten IWF-TUBS und AIP-TUBS in Arbeitsphase B eng zusammen. Zur Parametrierung des in Arbeitsphase C entwickelten Simulationsmodells konnte AIP-TUBS auf Expertenwissen und Datensätze der Volkswagen AG zurückgreifen. Die ganzheitliche Analyse der Antriebstechnologien in Arbeitsphase D erfolgte in Zusammenarbeit von IWF-TUBS, AIP-TUBS und OM-RWTH. Die iterative Integration der Akteursperspektiven in das durch OM-RWTH entwickelte Simulationsmodell und die Ableitung der Handlungsempfehlungen erfolgten gemeinsam durch alle am Projekt beteiligten Partner. Zur realitätsnahen Abbildung des chinesischen Marktes wurde im Projektverlauf eine Kooperation mit Professor Jianxin You der School of Economics and Management der Tongji Universität Shanghai etabliert. Weiterhin wurde bereits zu Projektbeginn das Projekt SUSTECH initiiert. Hierbei handelt es sich um eine durch das Internationale Büro des BMBF geförderte Kooperation mit Professor Steve Skerlos der University of Michigan. Professor Skerlos forscht im Rahmen des von der National Science Foundation im MUSES Programm geförderten Projekts „Environmental Policy, Auto Design, & Materials Flows“[1] an Strategien zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrs. Das Ziel des kooperativen SUSTECH-Projekts besteht in der Integration der Ergebnisse beider Forschungsprojekte, dem kontinuierlichen wissenschaftlichen Austausch und der Erarbeitung eines gemeinsamen Projektantrags. Ein gemeinsam verfasstes Paper wurde im Rahmen der CIRP Conference on Life Cycle Engineering veröffentlicht (Herrmann et al. 2012).

II.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zu Beginn des Projekts existierten im Bereich **Politik** bereits Modelle mit dem Ziel das Problem der Zeitinkonsistenz bei politischen Entscheidungen zu lösen (Athey et al. 2005), (Kydland/Prescott 1977), (Mayer/Stähler 2013), (Sieg 1997). Weiterhin konnte an empirische und spieltheoretische Arbeiten zur Untersuchung von Klimaabkommen (Carraro/Siniscalco 1993), (Dellink et al. 2008), (Froyn/Hovi 2008), (Harstad 2012) angeknüpft werden. Auch wirtschaftspolitische Instrumente in der Umweltpolitik wurden in zahlreichen Untersuchungen bereits erforscht (Guertler/Sieg 2010), (Kirchgässner/Schneider 2003), (Liu/Helfand 2009), (Popp 2006), (Ryan et al. 2009), (Schulz 2004). Zu Projektbeginn wurden außerdem einige

[1] http://sitemaker.umich.edu/autopolicydesign/home

der untersuchten Instrumente bereits zur Regulierung der Automobilindustrie eingesetzt (Europäische Union 2009), (Französische Botschaft in Berlin 2008), (Ministry of Finance Japan 2008), (State of California 2008).

Im **Hersteller**-Bereich existierte bei Projektbeginn bereits eine Auswahl an Methoden zur Technologiebewertung, wie beispielsweise Technologie-Roadmapping, Szenariotechniken sowie Technologie- und Marktportfolios (Wallentowitz et al. 2009) oder einfache quantitative Instrumente (Buergel et al. 2009). Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung und Interdependenzen zwischen den Technologien wurden hier jedoch nur unzureichend berücksichtigt. Stärker betriebswirtschaftlich orientiert zeigten sich Ansätze aus dem Bereich der Finanzwirtschaft oder des Controllings (Raasch et al. 2007), (Schneider 2006). Zur optimalen Allokation von Emissions-Minderungsmaßnahmen existierten zu Projektbeginn insbesondere Arbeiten im Energiesektor (Fichtner 1999), (Fichtner 2005). Einen ersten Anknüpfungspunkt stellte das stark vereinfachte Modell zur Fahrzeugportfolioplanung von (Morgan/Daniels 2001) dar.

Nachfragerverhalten wurde in erster Linie mit Hilfe von Conjoint- und Discrete-Choice-Analysen (Brownstone et al. 2000), (Bunch et al. 1993), (Wüstenhagen/Sammer 2007), (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung 2008) untersucht. Diese Modelle berücksichtigen jedoch vielfach keine dynamischen Entwicklungen sowie Umwelteinflüsse. Erste Ansätze zur Integration von Discrete-Coice- und Diffusionsmodellen in systemdynamische Simulationsmodelle waren zu Projektbeginn publiziert (Eggert 2003), (Struben/Sterman 2008). Vernachlässigt wurde bei diesen Modellen jedoch die Heterogenität der Konsumenten, so dass lediglich Aussagen über durchschnittliche Kunden getroffen werden konnten. Diese weisen aus Sicht eines Automobilherstellers nur einen begrenzten Nutzen für die Portfolioplanung auf.

Zur Ermittlung der **Gesamtmarktentwicklung** wurden Instrumente der Gesetzes- (Europäische Kommission 2009), (Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2002) und Technologiefolgenabschätzung (VDI 2000) genutzt, um soziale, ökologische und ökonomische Auswirkungen sowie die Effizienz und Effektivität neuer Gesetze und Technologien ex-ante abzuschätzen (Böhret 2001), (Kirkpatrick/George 2007). Insbesondere das TREMOD/ TREMOVE Modell wurde von Seiten der EU hierfür verwendet (Transport & Mobility Leuven 2007). Weitere Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf die effektive Ausgestaltung politischer Rahmenbedingungen zur Emissionsminderung (Gül et al. 2009), (Turton 2006), das Zusammenspiel von Infrastruktur- und Absatzentwicklung (Struben/Sterman 2008), (Sullivan et al. 2009) sowie die Effektivität und Effizienz wirtschaftspolitischer Instrumente zur Beeinflussung von Kaufentscheidungen (Bosshardt et al. 2008), (Bundesamt für Energie 2007), (Hayashi et al. 2001), (Peters et al. 2008), (Walther et al. 2008a). Die **Auswirkungen** alternativer Antriebstechnologien wurden vornehmlich anhand ökologischer Kriterien unter Zuhil-

fenahme von Ökobilanzen (DIN 2006) bewertet (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2006), (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2007), (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2008), (Volkswagen AG 2008), (Volkswagen AG 2009). Ökonomische Parameter fanden in ausgewählten Ansätzen Anwendung (Institute for Energy and Environment/Baltic Renewable Energy Centre, Institute for Fuels and Renewable Energy 2007), (Kerdoncuff 2008). Auch waren bereits erste Analysen politischer Instrumente im Hinblick auf ihre ökologischen Auswirkungen erfolgt (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2009). Hierbei wurden jedoch die Anforderungen der verschiedenen Akteure des Verkehrssektors nicht berücksichtigt und keine Integration der verschiedenen Sichtweisen forciert. Auch wurde das Kundenverhalten nicht explizit in die Bewertung mit aufgenommen.

III. Schlussbericht Teil II: Verwendung der Zuwendung und Ergebnisverwertung

III.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Sowohl an der RWTH Aachen University als auch an der Technischen Universität wurden die Mittel wie geplant zur Erreichung der vorgegebenen Ziele verwendet.

III.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die **Technische Universität Braunschweig** kam es zu keinen Verschiebungen der Projektlaufzeit, lediglich zu Änderungen der Bearbeitungszeiten einzelner Arbeitspakete (vgl. Abschnitt IV.6). Das Projekt wurde planmäßig durchgeführt und abgeschlossen. Dem zahlenmäßigen Nachweis folgend besteht von Seiten der TUBS ein negativer Kassenbestand von 51.738,98 €.

Für die **RWTH Aachen University** wurden in organisatorischer/abrechnungstechnischer Hinsicht in den Jahren 2011 und 2012 Mittelübertragungen notwendig (Änderungsbescheide Nr. 2 und 3, sowie Nr. 7). Hierfür lagen personelle Gründe vor.

Zudem wurde die Arbeitsphase D aus inhaltlichen Gründen mit Änderungsbescheid Nr. 5 vom 14.09.2012 kostenneutral bis 31.10.2013 verlängert, da deutlich wurde, dass die Integration der akteursspezifischen Modelle im Anschluss an die Arbeitsphasen A – C erfolgen musste. Die Arbeitsphasen A – C wurden wie vorgesehen am 31.05.2013 beendet, im Anschluss erfolgte die Fertigstellung der Arbeitsphase D bis 31.10.2013.

Aufgrund der Rufannahme von Prof. Grit Walther erfolgte mit Änderungsbescheid Nr. 6 vom 17.10.2012 zudem die Übertragung der Projektmittel von der Bergischen Universität Wuppertal an die RWTH Aachen University.

Tabelle 1: Änderungsbescheide der RWTH Aachen University

Bescheid	Datum	Inhalt
Bewilligungsbescheid	19.10.2010	
Änderungsbescheid 1	25.02.2011	Einführung der Projektpauschale
Änderungsbescheid 2	30.05.2011	Veränderte Mittelzuweisung 2012
Änderungsbescheid 3	19.10.2011	Veränderte Mittelzuweisung 2012
Änderungsbescheid 4	13.12.2011 und 16.2.2012	Mittelumwidmung 843 → 850
Änderungsbescheid 5	14.09.2012	Kostenneutrale Verlängerung bis 31.10.2013
Änderungsbescheid 6	17.10.2012	Übertragung nach Aachen
Änderungsbescheid 7		Mittelübertragung 2012 → 2013

III.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der Zuwendung der Förderung des Projekts war insbesondere bedingt durch die Schwierigkeit, Komplexität und Neuartigkeit der Problemstellung. Zu Projektbeginn existierende Ansätze waren im Wesentlichen intuitiv und methodisch wenig ausgereift. Weiterhin wurden wesentliche Zusammenhänge und Interdependenzen vernachlässigt. Mit Hilfe der Förderung konnten fundierte wirtschaftswissenschaftliche Modelle zur Entscheidungsunterstützung von Politik und Automobilherstellern entwickelt werden, welche sowohl forschungsseitig als auch in der praktischen Anwendung einen wesentlichen Zugewinn darstellen. Durch die Förderung wurde eine interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener wirtschafts- und ingenieurswissenschaftlicher Disziplinen ermöglicht. Mit Hilfe dieser Kooperation konnten Interdependenzen zwischen den verschiedenen Akteuren des Automobilmarkts berücksichtigt und so ein erheblicher Mehrwert erzielt werden. Gleiches gilt für die umfassende ganzheitliche Bewertung der Antriebstechnologien.

III.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des STROM-Projekts entwickelten Modelle und durchgeführten Analysen ermöglichen eine Abschätzung der für verschiedene Szenarien zu erwartenden Marktdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge in Deutschland und China sowie der durch Produktion, Nutzung und Entsorgung der Fahrzeuge verursachten Emissionen und verbrauchten Ressourcen. Die entwickelten Modelle und Ergebnisse können sowohl in der Praxis zur Anwendung kommen als auch einen Beitrag zur Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Forschungsstands liefern.

Für die **Praxis** werden verschiedene Entscheidungsträger unterschieden. **Politische Entscheidungsträger** können basierend auf den Projektergebnissen Verständnis für den vorteilhaften Einsatz politischer Instrumente erlangen. Dabei kann eine multikriterielle Bewertung der einzelnen politischen Strategien in Bezug auf potentielle Umweltwirkungen, Wirtschaftlichkeit und Nutzengewinn für den Kunden durchgeführt werden. Im Zuge dieser Betrachtung ist es nicht nur möglich, die Auswirkung von einzelnen politischen Instrumenten zu analysieren, sondern auch das Zusammenspiel verschiedener politischer Instrumente und deren Wechselwirkungen zu bewerten. Auch ist es möglich, die Ausgestaltung der einzelnen Instrumente in Bezug auf Einsatzzeitpunkt, -dauer und -höhe zu betrachten, um eine vorteilhafte politische Strategie abzuleiten. Mit Hilfe der detaillierten Analyse des Akteurs Politik können weiterhin Aussagen bezüglich einer erfolgversprechenden Ausgestaltung von Klimaverhandlungen zwischen verschiedenen Ländern getroffen werden. Für **Automobilhersteller** besteht der Nutzen des Projekts in Aussagen hinsichtlich der vorteilhaften Gestaltung des zukünftigen Fahrzeugangebots. Weiterhin können Automobilhersteller mit Hilfe des entwickelten Simulationsmodells die Auswirkungen verschiedener Wettbewerbsstrategien testen und analysieren. Neben der Wirkungsanalyse von Wettbewerbsstrategien können durch die spezifische Analyse einzelner Einflussgrößen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Herstellerstrategien und der Marktentwicklung identifiziert werden. Sowohl für politische Entscheidungsträger als auch für Automobilhersteller stellt die Möglichkeit, verschiedene Szenarien zukünftiger Entwicklungen zu simulieren, eine Basis für die Diskussion mit verschiedenen Anspruchsgruppen (z.B. NGOs) dar. Aber auch **NGOs** bieten die Projektergebnisse die Möglichkeit, Angaben der Automobilindustrie mittels des Modells zu verifizieren und eigene Zukunftsszenarien zu simulieren. Die Zukunftsszenarien können dann im Hinblick auf ökologische Kriterien bewertet werden. Zudem kann mit Hilfe der Simulation ein besseres Verständnis für die Wirkungsweise der komplexen Struktur des Automobilmarkts erlangt werden (Kieckhäfer et al. 2012). Darüber hinaus dient die im Rahmen des Projekts erarbeitete Datenbasis zur Sammlung und Speicherung von Expertenwissen verschiedenster Fachgebiete.

Im Hinblick auf eine **wissenschaftliche Verwertung** wurden bereits diverse Zwischenergebnisse in Veröffentlichungen, Monographien und in wissenschaftlichen Vorträgen vorgestellt (vgl. III.6.1). Dabei wurde der Beitrag „A hybrid simulation approach for estimating the market share development of electric vehicles“ im Jahr 2013 mit dem Best-Practice-Paper-Award auf der 75. Wissenschaftlichen Jahrestagung des Verbands der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V. prämiert. Zukünftig sind weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen durch das Forschungskonsortium geplant (vgl. III.6.2).

Auch in die **Lehre** konnten die Ergebnisse des Projektes integriert werden. So wurden an den vier Lehrstühlen über 100 studentische Arbeiten (Master-, Bachelor-, Diplom-, Seminar-,

Studien- und Projektarbeiten) im Rahmen des STROM-Projektes betreut. Weiterhin flossen die Erkenntnisse, welche im Zuge der Projektarbeit erzielt werden konnten, auch in Lehrveranstaltungen ein, die auch in Zukunft an den verschiedenen Lehrstühlen unterrichtet werden. An der RWTH Aachen University flossen die Erkenntnisse aus dem Projekt in die Veranstaltungen „Produktionsplanung in der Automobilindustrie“, „Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke“ und das Projektseminar „E-Mobilität und neue Mobilitätskonzepte“ ein. Die Veranstaltung „Produktionsplanung in der Automobilindustrie“, in der explizit Modelle und Ergebnisse des Projektes präsentiert und mit einem interdisziplinären Höhrerkreis (Studenten der BWL, Wirtschaftswissenschaften, Wirtschaftsingenieurwesen) diskutiert wurden, erhielt die beste studentische Evaluation und somit den Lehrpreis der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen University für das Studienjahr 2012/13. An der TUBS finden die Projektergebnisse Eingang in die Vorlesungen „Nachhaltigkeit in Produktion und Logistik“ und „Bionische Methoden der Optimierung“ sowie die Softwareübung „Softwaretools zur systemdynamischen Modellierung von Stoff- und Energieströmen“. Weiter erfolgt eine Integration der Erkenntnisse in die Vorlesungen „Produkt- und Life-Cycle-Management“ und hier insbesondere in das darin integrierte Unternehmensplanspiel „Holistic“ (http://denke-ganzheitlich.de/), das Studierenden die Grundidee des Life Cycle Managements am Beispiel der Automobilindustrie vermittelt. Inhaltliche Erkenntnisse aus dem STROM-Projekt konnten hierbei zielführend in die Spielentwicklung eingebracht werden. Weiter erfolgt die Integration von Erkenntnissen in die Vorlesung „Life Cycle Assessment for sustainable engineering“.

III.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bei der Marktentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge handelt es sich um ein aktuelles Thema von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Entsprechend sind im Verlauf der Projektbearbeitung zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema erschienen. Dabei unterscheiden sich jedoch die jeweils gesetzten Schwerpunkte und verwendeten Ansätze von denen des STROM-Projekts, so dass die bekannt gewordenen Fortschritte anderer Stellen ergänzend in das STROM-Projekt integriert werden konnten.

Im Bereich der **Politik** ist insbesondere die Entwicklung des Regierungsprogramms Elektromobilität der Bundesregierung zu nennen (Bundesregierung 2011) sowie weitere Untersuchungen zur Wirksamkeit wirtschaftspolitischer Instrumente wie z.B. (Greaker/Heggedal 2010), (Hirte/Tscharaktschiew), (Whitefoot/Skerlos 2012). Weiterhin werden zahlreiche der untersuchten politischen Instrumente weltweit eingesetzt, wie beispielsweise die CO_2-Flottenregulierung, die neben der Europäischen Union unter anderem auch in den USA, China, Japan und Korea Anwendung findet. Auf Kundenseite finden mehrheitlich Kaufprämien für alternativ angetriebene Fahrzeuge (z.B. in Dänemark, Frankreich, Spanien oder China)

oder Steuererleichterungen (z.B. in USA, Japan und Indien) sowie nicht-monetäre Anreize, wie gesonderte Parkplätze oder Fahrspuren Anwendung (z.B. in USA, China, Japan und Brasilien) (ICCT 2011), (KPMG 2010), (OECD/IEA 2012), (Roland Berger 2009), (UN Department of Economic and Social Affairs 2011).

Im **Herstellerbereich** widmen sich zahlreiche Studien der Ermittlung von Entwicklungspfaden einzelner Antriebstechnologien z.B. (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2010), (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2012a), (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2012b), (Mc Kinsey & Company 2011), (The Boston Consulting Group 2011). Weiterhin wurde von (Mock 2010) im Rahmen des „Vector21-Projekts“ eine umfangreiche Bewertung alternativer Antriebstechnologien durchgeführt und ein Szenariomodell zur Abschätzung der Marktentwicklung alternativer Antriebe entwickelt. Es existieren außerdem erste Ansätze zur Verknüpfung der technischen und betriebswirtschaftlichen Sichtweise (Nishihara 2010), (Shiau 2011). Auch im Hinblick auf die betriebswirtschaftliche Analyse zeigen sich neue Ansätze, in welchen zum Teil speziell alternative Antriebstechnologien (Kwon 2012) oder allgemein „grüne“ Produkte (Krishnan/Lacourbe 2011) im Mittelpunkt stehen. Ebenso finden sich erste, vereinfachte Veröffentlichungen zur Untersuchung von Wettbewerbsverhalten bei der Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge (Guseo/Mortarino 2012), (Wesseling et al. 2013).

Während der Projektlaufzeit wurden im Bereich des **Nachfragerverhaltens** weitere Conjoint- bzw. Discrete-Choice-Studien durchgeführt z.B. (Achtnicht et al. 2012), (Center of Economic Research at ETH Zürich 2010), (Hidrue et al. 2011), (Struwe 2011). Außerdem finden agentenbasierte Simulationsmodelle zunehmend Einsatz bei der Erforschung von Kundenverhalten und daraus resultierendem Systemverhalten wie zu sehen z.B. bei (Eppstein et al. 2011), (Klasen/Neumann 2011), (Shafiei et al. 2012), (Zhang et al. 2011). Die Berücksichtigung von Rückkopplungen und Entwicklungen der Systemumwelt werden weiterhin mehrheitlich mit Hilfe von System-Dynamics-Modellen abgebildet wie beispielsweise von (Shepherd et al. 2012), (Wansart 2012), (Weikl 2010).

Zur Abschätzung der **Gesamtmarktentwicklung** sind beispielweise die Berichte der Nationalen Plattform Elektromobilität (Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung 2011), (Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung 2012), und das von der European School of Management and Technology entwickelte „Marktmodell Elektromobilität“ (European School of Management and Technology 2011) zu nennen. Des Weiteren wurden vom Fraunhofer ISI Markthochlaufszenarien für elektrische Fahrzeuge bis 2020 entwickelt (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2013b). Ebenso wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. sowie vom Büro für Technologiefolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag verschiedene Szenarien für die Entwicklung des Pkw-Marktes bis 2040 erstellt (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deut-

schen Bundestag 2012b), (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2013). Neben diesen Studien sind auch Zeitschriftenartikel zur Prognose der Marktentwicklung mittels eines generischen Modells z.B. (Pasaoglu et al. 2012) oder mit Hilfe von System-Dynamics-Ansätzen z.B. (Armenia et al. 2010), (Sweda/Klabjan 2011) publiziert worden. Ein Überblick über verschiedene Modelle zur Prognose der Marktentwicklung von alternativen Antriebskonzepten wird in (Al-Alawi/Bradley 2013) gegeben.

Zur Abschätzung der **Umweltwirkungen** der Marktdurchdringung von elektrischen Fahrzeugen wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zwei Studien in Auftrag gegeben: (1) „Umweltbilanzen Elektromobilität - UMBReLA“ (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2011a), (IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH 2011b) und (2) „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - OPTUM“ (Institut für sozial-ökologische Forschung 2011), (Öko-Institut e.V. 2011a), (Öko-Institut e.V. 2011c), (Öko-Institut e.V. 2011d), (Öko-Institut e.V. 2011e). Eine weitere durch das BMU angestoßene Studie hat das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (Kwade/Bärwaldt 2012), (Öko-Institut e.V. 2011b) sowie die Ressourcenverfügbarkeit (Konietzko/Gernuks 2011) zum Thema. Das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag hat ebenfalls die Bedeutung der Elektromobilität für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt analysiert (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag 2012a). Desweitern wurde eine Studie zu CO_2-Einsparpotentialen für Verbraucher erarbeitet (Öko-Institut e.V. 2010). Auch sind Richtlinien für die Erstellung von Ökobilanzen von elektrischen Fahrzeugen (eLCAR 2013) und Wasserstofftechnologien (FC-Hy Guide 2011) publiziert worden. Spezifische Untersuchungen widmeten sich der Ökobilanzierung von elektrischen Fahrzeugen z.B. (Hawkins et al. 2013), (Li et al. 2013), (Strecker et al. 2013), (Volkswagen AG 2012). Ein Überblick zur Ökobilanzierung von elektrischen Fahrzeugen wird von (Hawkins et al. 2012) vorgestellt. Die **techno-ökonomische** Entwicklung von elektrischen Fahrzeugen beschreiben zum Beispiel (Offer et al. 2010) und (Offer et al. 2011). Die Entwicklung der Kosten und der CO_2-Emissionen elektrischer Fahrzeuge wird von (Thiel et al. 2010) dargestellt.

Gerade im Hinblick auf die Entwicklung des **chinesischen Marktes** sind während der Projektlaufzeit zahlreiche Veröffentlichungen erschienen, die sich vornehmlich mit einer Abschätzung der zukünftigen Marktentwicklung beschäftigen z.B. (Hao et al. 2011b), (Hao et al. 2011d), (Huo/Wang 2012), (Huo et al. 2012a), (Ou et al. 2010b), (Pauliuk et al. 2012), (Wang et al. 2011a), (Wang et al. 2011b), (Yan/Crookes 2010), wobei auch einige Studien auf die Entwicklung des Marktanteils von alternativen Antrieben eingehen z.B. (He/Chen 2013), (Huo et al. 2010), (Huo et al. 2012b), (Huo et al. 2012c), (Yao et al. 2011), (Zhou et al. 2013). Zudem wurden spezifische Analysen zur Entwicklung des Kraftstoffverbrauches z.B. (Huo et al. 2011), (Huo et al. 2012b), (Wang et al. 2010) und zur Verschrottungsrate z.B. (Hao et al.

2011c) von Fahrzeugen publiziert. Weitere Veröffentlichungen fokussieren auf die historische Entwicklung und den aktuellen Stand des chinesischen Automobilmarktes wie z.B. (Hu et al. 2010), (ICCT 2012), (Leung 2011), (Li et al. 2013), (Ou et al. 2010a). Eine Darstellung der erwarteten **Technologiekosten** erfolgt z.B. in (Ou et al. 2013). Die **politische** Regulierung von elektrischen Fahrzeugen in China zeigen z.B. (Zheng et al. 2012) und (Hao et al. 2011a) auf. Ein Discrete-Choice-Modell zur Abbildung des **Kaufverhaltens** von chinesischen Ersatz- und Erstfahrzeugkäufern wurde z.B. von (Qian/Soopramanien 2011) geschätzt.

III.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

III.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

III.6.1.1 Referierte Zeitschriften

- Kieckhäfer, K.; Volling, T.; Spengler, T. S. (in Begutachtung, 2. Runde, Minor Revisions): A hybrid simulation approach for estimating the market share evolution of electric vehicles, in: Transportation Science.
- Gutowski, T. G.; Allwood, J. M.; Herrmann, C.; Sahni, S. (2013): A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling, in: Annual Review of Environment and Resources 38, 2013, 81 – 106.
- Kratzsch, U.; Sieg, G.; Stegemann, U. (2012): An international agreement with full participation to tackle the stock of greenhouse gases, in: Economics Letters 115 (3), 2012, 473 – 476.
- Kratzsch, U.; Sieg, G.; Stegemann, U. (2011): A Full Participation Agreement on Global Emission Reduction through Strategic Investments, in: R&D, Economics Research International, 2011, Article ID 318523.
- Walther, G.; Wansart, J.; Kieckhäfer, K.; Schnieder, E.; Spengler, T. S. (2010): Impact assessment in the automotive industry: mandatory market introduction of alternative powertrain technologies, in: System Dynamics Review 26 (3), 2010, 239 – 261.

III.6.1.1 Monographien

Kieckhäfer, K. (2013): Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios: Dargestellt am Beispiel innovativer Antriebe in der Automobilindustrie, Springer Gabler, Wiesbaden, Dissertation.

III.6.1.2 Begutachtete Beiträge in Proceedings und Sammelbänden

- Herrmann, C.; Kieckhäfer, K.; Mennenga, M.; Skerlos, S.; Spengler, T. S.; Stehr, J.; Raichur, V.; Walther, G. (2012): A framework to analyze the reduction potential of life

cycle carbon dioxide emissions of passenger cars, in: Dornfeld, D. A.; Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging technology for a sustainable world. Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Springer, Berlin, 2012, 55 – 60.

- Herrmann, C.; Spengler, T. S.; Mennenga, M.; Wachter, K.; Kieckhäfer, K. (2012): The Transition to Alternative Powertrains: Concept for the Life-Cycle-oriented Symbiosis of Technology, Product and Product Portfolio Planning, in: International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (ASME 2012), Chicago, August 12 – 16, 2012.
- Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Axmann, J.; Spengler, T. S. (2012): Model-based decision support for future OEM power-train portfolios: academic solutions for practical requirements, in: Husemann, E.; Lane, D. (Hrsg.): Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland, July 22 – 26, 2012.
- Herrmann, C.; Sangwan, K. S.; Mennenga, M.; Halubek, P.; Egede, P. (2011): Assessment of Alternative Propulsion Systems for Vehicles, in: Hesselbach, J. and Herrmann, C., (Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Springer, Berlin / Heidelberg, 2011, 51 – 56.

III.6.1.3 Sonstige Beiträge in Proceedings, Sammelbänden und Zeitschriften

- Kieckhäfer, K.; Volling, T.; Spengler, T. S. (2012): Supporting Strategic Product Portfolio Planning by Market Simulation: The Case of the Future Powertrain Portfolio in the Automotive Industry, in: Diamantopoulos, A.; Fritz, W.; Hildebrandt, L. (Hrsg.): Quantitative Marketing and Marketing Management: Marketing Models and Methods in Theory and Practice. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012, 123 – 147.
- Walther, G.; Leistner, N.; Hombach, L. E. (2012): STROM: Towards sustainable drivetrain technologies, in: InnovationsAllianz – Smart Cities, Düsseldorf, 2012, 44.
- Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Spengler, T. S. (2012): Automobilmarktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios im Übergang zur Elektromobilität, in: Proff, H.; Schönharting, J.; Schramm, D.; Ziegler, J. (Hrsg): Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte, Tagungsband des 3. Wissenschaftsforums Mobilität, Springer Gabler, Wiesbaden, 2012, 231 – 244.
- Wittek, K.; Mennenga, M.; Huth, C.; Schnöring, M.; Herrmann, C.; Woisetschläger, D.; Spengler, T. S. (2011): Die automobile Wertschöpfungskette von morgen, in: Neue Mobilität, Bundesverband eMobilität e.V., 2011, 5, 72 – 73.
- Walther, G. (2010): Nachhaltige Antriebsstrategien in der Automobilindustrie, in: BUW.OUTPUT Nr. 3/Sommersemester, 2010, 30 – 34.

III.6.1.4 Vorträge

- Hombach, L. E.; Walther G. (2013): Simulation based evaluation of strategies for the market diffusion of alternative drivetrain technologies, in: International Conference on Operations Research, Rotterdam, Niederlande.
- Walther, G. (2013): Modeling, optimization and simulation of the automotive market, in: 1st Sino-German OR Conference, Spitzingsee,
- Wachter, K. (2013): Innovation diffusion with competition: simulation based analysis of manufacturers‘ strategies for the introduction of alternatively powered vehicles, in: 7. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für System Dynamics, Würzburg.
- Wachter, K. (2013): Simulationsbasierte Analyse des Einflusses von Wettbewerb auf die Marktentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge, in: Workshop der GOR-Arbeitsgruppen „Simulation und Optimierung komplexer Systeme" & „Fuzzy Systeme, neuronale Netze und künstliche Intelligenz“, Aachen.
- Kieckhäfer, K. (2013): Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios: Dargestellt am Beispiel innovativer Antriebe in der Automobilindustrie, in: Institutskolloquium des Instituts für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kieckhäfer, K. (2013): A hybrid simulation approach for estimating the market share development of electric vehicles, in: 75. Jahrestagung des Verbands der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft (VHB), Würzburg.
- Dietrich, A.-M. (2012): Welfare Effects of Subsidizing a Dead-End Network of Less Polluting Vehicles, in: The 39th Annual EARIE Conference, Rom, Italien.
- Dietrich, A.-M. (2012): Wohlfahrtseffekte einer Subventionierung grüner Übergangstechnologien im Automobilsektor, in: Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik, Göttingen.
- Spengler, T. S. (2012): The Transition to Electric Vehicles: Simulation based Analysis of the Automotive Market, in: International Conference on Operations Research, Hannover.
- Dietrich, A.-M. (2012): Welfare Effects of Subsidizing a Dead-End Network of Less Polluting Vehicles, in: The Fourth Euro-African Conference in Finance and Economics, Kairo, Ägypten.
- Dietrich, A.-M. (2012): Welfare Effects of Subsidizing a Dead-End Network of Less Polluting Vehicles, in: The 19th Annual EAERE Conference, Prag, Tschechien.

- Herrmann, C. (2012): Elektromobilität: Herausforderungen und Chancen entlang der Wertschöpfungskette, in: Arbeitskreis Elektromobilität, Hannover.
- Kieckhäfer, K. (2012): Simulationsgestütze Analyse der Marktdiffusion elektrisch angetriebener Pkw, in: Workshop der GOR-Arbeitsgruppen "OR im Umweltschutz" und "Entscheidungstheorie und -praxis", Goslar.
- Dietrich, A.-M. (2011): Welfare Effects of Subsidizing a Dead-End Technology of Less Polluting Vehicles, in: Kolloquium zusammen mit dem WiN-Projekt ReSINa der Universität Göttingen, Braunschweig.
- Kieckhäfer, K. (2011): Simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung für die Einführung alternativer Antriebe: ein hybrider Ansatz, in: 5. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für System Dynamics, Wolfsburg.
- Kieckhäfer, K. (2011): Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios: dargestellt am Beispiel alternativer Antriebe in der Automobilindustrie, in: 13. Doktorandenworkshop Nordost, Göttingen.
- Kieckhäfer, K. (2011): Automobilmarktsimulation mit Hilfe von System Dynamics und der Agentenbasierten Simulation, in: GOR-Arbeitsgruppen-Treffen der AG "Simulation und Optimierung komplexer Systeme", Wuppertal.
- Sieg, G. (2011): A Full Participation Agreement On Global Emission Reduction Through Strategic Investments in R&D, in: 2011 Annual Meeting of the Public Choice Society, San Antonio, USA.
- Spengler, T. S. und Axmann J. (2011): Gesetzesfolgenabschätzung mit System Dynamics - Beispiel: Innovative Fahrzeugantriebe, in: 5. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für System Dynamics, Wolfsburg.
- Wachter, K. (2011): Simulationsgestützte Portfolioplanung im Rahmen der Einführung alternativer Antriebe: Anforderungen und Lösungsansätze, in: 13. Doktorandenworkshop Nordost, Göttingen.
- Walther, G. (2011): Modellbasierte Analyse und Bewertung von Emissionsminderungsstrategien der Automobilindustrie, in: Workshop der GOR-Arbeitsgruppe "OR im Umweltschutz", Augsburg.
- Walther, G. (2011): Automobile Antriebskonzepte der Zukunft: Eine Akteurs- und Strategieanalyse, in: The Reacting Atmosphere Academy, Wuppertal.
- Walther, G. (2011): Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus am Beispiel neuer Antriebskon-

zepte in der Automobilindustrie, in: Wirtschaftswissenschaftlichen Forums des Instituts für Unternehmensführung, Universität Bochum, Bochum.

- Kieckhäfer, K. (2010): Simulation-based decision support for the introduction of alternative powertrains, in: International Conference on Operations Research, München.
- Spengler, T. S. (2010): Impact Assessment im Automobilsektor, in: Niedersächsischer Kick-Off-Workshop Elektromobilität, Hannover.
- Spengler, T. S.; Kieckhäfer, K.; Wansart, J. (2010): Impact Assessment im Automobilsektor, in: AutoUni-Konferenz Impact Assessment: Modellierung der Lenkungswirkung von gesetzgeberischen Maßnahmen in der Umwelt- und Verkehrspolitik, Wolfsburg.

III.6.1.5 Poster

- Wachter, K.; Kieckhäfer, K., Spengler, T. S. (2013): Simulationsbasierte Analyse des Einflusses von Herstellerstrategien auf den Markterfolg von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien, in: NFF-Doktorandentag, Wolfsburg.
- Wachter, K.; Spengler, T. S. (2012): Innovation diffusion under competition: simulative strategy development for the introduction of alternatively powered vehicles, in: Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland.
- Walther, G.; Hombach, L. E.; Gröschel, J. (2012): Strategische Optionen der Automobilindustrie für die Migration nachhaltiger Antriebstechnologien, in: 4. Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Essen.
- Walther, G.; Hombach, L. E.; Gröschel, J. (2012): STROM: Towards sustainable drivetrain technologies, in: InnovationsAllianz – Smart Cities, Brüssel, Belgien.
- Kieckhäfer, K.; Volling. T.; Spengler, T. (2010): A Simulation Model to Assess Strategies for the Introduction of Alternative Powertrains, in: 10th Closed-Loop Supply Chain Workshop (CLSC10), Montreal, Kanada.

III.6.2 Geplante Veröffentlichungen

- Dietrich, A.-M.; Sieg, G. (2011): Welfare Effects of Subsidizing a Dead-End network of Less Polluting Vehicles, in: TU Braunschweig Economics Department Working Paper No. 12, 2011.
- Spengler, T. S.; Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Herrmann, C.; Mennenga, M.; Walther, G.; Hombach, L. E. (2014): Simulationsmodelle zur Entscheidungsunterstützung im Übergang zur Elektromobilität (Arbeitstitel).

- Spengler, T. S.; Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Herrmann, C.; Mennenga, M.; Walther, G.; Hombach, L. E. (2014): Market development of alternative drivetrain technologies in Germany and China: potential scenarios and implications for politics and manufacturers (Arbeitstitel).
- Spengler, T. S.; Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Herrmann, C.; Mennenga, M.; Walther, G.; Hombach, L. E.; Sieg, G.; Dietrich, A.-M. (2014): Forecasting of the market development of alternative drivetrain technologies: lessons from interdisciplinary research (Arbeitstitel).
- Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Spengler, T. S. (2014): Simulating dynamic consumer preferences for electric vehicles (Arbeitstitel).
- Kieckhäfer, K.; Wachter, K.; Spengler, T. S. (2014): Gaining competitive advantages trough the introduction of electric vehicles: a simulation based analysis of manufacturers' strategies (Arbeitstitel).
- Wachter, K. (2014): Markteinführung innovativer Antriebe in etablierten und aufstrebenden Märkten: simulationsbasierte Analyse von Herstellerstrategien (Arbeitstitel).

III.6.3 Auszeichnungen

- Best-Practice-Paper-Award auf der 75. Wissenschaftlichen Jahrestagung des Verbands der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V. für den Beitrag „A hybrid simulation approach for estimating the market share development of electric vehicles“, (Kieckhäfer, K.; Volling, T.; Spengler, T. S.)
- Lehrpreis der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen für das Studienjahr 2012/13 für die Vorlesung „Produktionsplanung in der Automobilindustrie“, in der explizit Modelle und Ergebnisse des Projektes präsentiert und diskutiert wurden
- Lehr-LEO Award 2013 für die beste Bachelor-Vorlesung „Produkt- and Life Cycle Management“. Bestandteil der Vorlesung ist das Unternehmensplanspiel „Holistic“ (http://denke-ganzheitlich.de/), für dessen Entwicklung inhaltliche Erkenntnisse aus dem STROM-Projekt genutzt wurden.

IV. Erfolgskontrollbericht

IV.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Ergebnisse des STROM-Projekts leisten einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der förderpolitischen Ziele. Im Projekt erfolgte die Weiterentwicklung verbesserter wirtschaftswissenschaftlicher Modelle zur Abschätzung möglicher Entwicklungsszenarien und der darauf aufbauenden integrierten nachhaltigkeitsorientierten Bewertung neuer Antriebskonzepte für den deutschen sowie für den chinesischen Automobilmarkt. Die entwickelten Modelle stellen sowohl auf der Ebene der Einzelakteure des Automobilmarkts (Hersteller, Kunde, Politiker) als auch auf der Ebene der integrierten Gesamtsystemsicht die benötigte **Wissensgrundlage und Entscheidungsunterstützung zur Ableitung von Handlungsstrategien für eine Politik der nachhaltigen Entwicklung** bereit.

Zum Aufbau einer **soliden methodischen Basis** wurde auf bewährte Methoden des Public-Choice, der Discrete-Choice-Theorie, der Spieltheorie sowie der dynamischen Simulation zurückgegriffen und diese weiterentwickelt. Die systematische Abbildung bestehender Unsicherheiten mittels der Szenarioanalyse sowie die modellseitige Implementierung von Lern- und Erfahrungskurven erlaubte die **geeignete Berücksichtigung der Langfristigkeit und Dynamik der gegebenen Planungsaufgabe**.

Durch die spezifische Entwicklung der Modelle für die Akteure des Automobilsektors konnten weiterhin die jeweiligen **zugrundeliegenden Verhaltensannahmen und Menschenbilder zweckmäßig abgebildet** werden. So war es möglich, notwendige Anreize für Anbieter/ Nachfrager einerseits sowie Selbstbindungsmechanismen von Politikern andererseits näher zu analysieren und diese Erkenntnisse direkt in die Modellentwicklung einfließen zu lassen. Zudem konnte durch die Verknüpfung der akteursspezifischen Teilmodelle eine integrierte Betrachtung der Mikro- und Makroebene erfolgen, so dass ein **Verständnis für die Verbindung zwischen dem Verhalten einzelner Akteure und dem resultierenden Systemverhalten** sowie der damit verbundenen Folgen geschaffen wurde. Die **integrierte Bewertung** der Einführung verschiedener Technologiestrategien erfolgte hierbei aus technischer, ökonomischer, ökologischer und zum Teil sozialer Sichtweise.

Anhand der gleichzeitigen Betrachtung des deutschen und des chinesischen Automobilmarktes konnten die **globalen Zusammenhänge der Fragestellung sowie Implikationen** für die Marktdurchdringung in nach- und überholenden Länder sowie für die sich daraus ergebende ganzheitliche Bewertung von Antriebstechnologien herausgearbeitet werden. Auf diese Weise konnten entscheidende Unterschiede in den externen und internen Rahmenbedingungen sowie dem Käuferverhalten herausgearbeitet und Rückschlüsse darüber gezogen werden,

welche länderspezifischen Rahmenbedingungen fördernd bzw. hemmend auf die Marktentwicklung alternativer Antriebstechnologien wirken. Die verwendeten Modellstrukturen erlauben dabei grundsätzlich die Anpassung an variierende Rahmenbedingungen, wie sie beispielsweise in weiteren Automobilmärkten (z.B. den USA) vorliegen, sodass eine zielorientierte Fortführung der Forschungsaktivitäten zur Entwicklung handlungsrelevanter Konzepte für eine nachhaltige Mobilität gewährleistet ist.

IV.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens

Die methodischen sowie inhaltlichen Ergebnisse des STROM-Projekts sind sowohl auf der Ebene der einzelnen Akteure (Politik, Hersteller, Nachfrager) angesiedelt als auch auf der übergeordneten Ebene der Wirkungsanalyse. Die Ergebnisse der Akteursbetrachtungen finden dabei zu großen Teilen Eingang in die Wirkungsanalyse und wurden dort zur Ableitung der Handlungsempfehlungen genutzt. Nachfolgend (Abschnitt IV.2.1) sind zunächst die Ergebnisse der Arbeitsphase A (Politik) dargestellt. Da die in Arbeitsphase B (Hersteller) erzielten Ergebnisse auf dem in Arbeitsphase C (Nachfrager) entwickelten Modell aufbauen, werden die Ergebnisse der Betrachtung der Nachfrager entgegen des Projektaufbaus zunächst in Abschnitt IV.2.2 erläutert. Daran anschließend folgen in Abschnitt 0 die Ergebnisse der Arbeitsphase B (Hersteller) und der Arbeitsphase D (Wirkungsanalyse) in Abschnitt IV.2.4. Abschließend findet sich eine Zusammenfassung der zentralen Projektergebnisse und der daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger und Automobilhersteller in Abschnitt IV.2.5.

IV.2.1 Politik

Im Bereich der Politik konnten Ergebnisse sowohl im Hinblick auf vielversprechende Selbstbindungsinstrumente für Politiker erzielt werden als auch hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit der Förderung alternativer Antriebstechnologien sowie möglicher wirtschaftspolitischer Instrumente hierzu.

Hinsichtlich der Selbstbindungsinstrumente konnte ein globales Klimaabkommen unter Teilnahme aller Staaten als geeignet identifiziert werden. Strebt eine nationale Regierung den Abschluss eines solchen Abkommens an, so kann sie den Verhandlungsprozess einseitig durch Investitionen in die Erforschung und Entwicklung umweltverträglicher Technologien beschleunigen. Sinken durch neue grüne Technologien die Kosten für die Vermeidung von Treibhausgasen und sind die neuen Technologien durch einen Technologietransfer allgemein verfügbar, so wird ein Klimaabkommen mit vollständiger Teilnahme aller Länder möglich. Das heißt, es werden auch Staaten dem globalen Klimaabkommen zustimmen, die unter sonst gleichen Bedingungen eine Teilnahme daran abgelehnt hätten. Dieses Ergebnis gilt gleichermaßen für Verhandlungen über die Vermeidung kurz- und langlebiger Treibhausga-

se. Eine spezifische Analyse eines solchen Klimaabkommens findet sich in (Kratzsch et al. 2011) und (Kratzsch et al. 2012).

Hinsichtlich der Förderung alternativer Antriebstechnologien zur Steigerung der Wohlfahrt konnte in (Dietrich/Sieg 2011) gezeigt werden, dass die Regierung neben den Wohlfahrtsgewinnen aus einer Reduktion von Umweltemissionen, wie beispielsweise Treibhausgasemissionen, ebenfalls die Wohlfahrtsverluste durch eventuelle Inkompatibilitäten in Bezug auf die nötige Tankstellen- oder andere Dienstleistungsinfrastruktur berücksichtigen muss. Dieser potentielle Wohlfahrtsverlust erfordert Investitionen in eine neue Infrastruktur. Ergeben sich durch den Einsatz einer grünen Technologie hohe Emissionsreduktionen und/oder ist der Bedarf an neuer Infrastruktur relativ gering, dann ist die Förderung gesellschaftlich wünschenswert. Bei Übergangstechnologien ist die gesellschaftliche Wertschätzung für die Zukunft zu berücksichtigen. Entspricht die Bewertung von Umweltschäden der Bewertung von Verlusten aufgrund der Inkompatibilität verschiedener Infrastrukturen, dann sollte auf die Förderung einer Übergangstechnologie unter Umständen auch dann verzichtet werden, wenn ihr Einsparpotential relativ hoch ist.

Grundsätzlich lassen sich zur Förderung alternativer Antriebstechnologien zahlreiche wirtschaftspolitische Instrumente einsetzen. Der im Projekt getroffenen Auswahl wurden die fachliche und praktische Relevanz, die öffentliche Diskussion sowie die Grenzen der verwendeten Methoden zu Grunde gelegt. Die fachliche Relevanz berücksichtigt die in der volkswirtschaftlichen Theorie und Empirie gängigen Lösungen und wurde mittels Literaturanalyse festgestellt. Die praktische Relevanz zielt auf die bereits in relevanten Automobilmärkten eingesetzten Maßnahmen ab und bedurfte einer Analyse der bestehenden gesetzlichen Vorgaben. Die Verfolgung der medialen Diskussion ermöglichte die Berücksichtigung der von unterschiedlichen Stakeholdern aktuell eingebrachten Lösungsvorschläge. Die aus den politischen Instrumenten gebildeten und im Rahmen der Wirkungsanalyse untersuchten Strategien sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Politische Strategien (Deutschland)

	1 Status Quo	2 Steuer auf Energie-träger	3 Kfz-Steuer-befreiung	4 Abwrack-prämie I	5 Abwrack-prämie II	6 Bonus/ Malus	7 F&E Förderung	8 Infra-struktur	9 Flotten-grenzwert	10 Verbot	11 Abwrack-prämie + Bonus/ Malus	12 Indirekte Förderung	13 Maximale Förderung
Steuer auf Energie-träger	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x
Kfz-Steuer-befreiung	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x
Abwrack-prämie	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	x	-	x
Bonus/ Malus	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	x
F&E-Förderung	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	x
Infra-struktur-förderung	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	x
Flotten-grenzwert	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	x	x

IV.2.2 Nachfrager

Im Bereich Nachfrage wurde im Rahmen des Projekts ein methodisch neuartiges Simulationsmodell entwickelt. Mit Hilfe des Modells ist es möglich, inhaltliche Erkenntnisse über mögliche Szenarien der Marktentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge in Deutschland und China zu erlangen.

IV.2.2.1 Methodische Ergebnisse

Das entwickelte Modell erlaubt es, die Kaufentscheidungen von Neuwagenkäufern in Deutschland und China zu simulieren. Methodisch vereint das Modell ein systemdynamisches Simulationsmodell mit einem agentenbasierten Modell. Auf diese Weise ist es möglich, gleichzeitig individuelles, heterogenes Kundenverhalten sowie aggregierte Entwicklungen der Marktumwelt abzubilden.[2] Das Modell wurde zunächst für den deutschen Markt entwickelt und im nächsten Schritt zur Abbildung des wachsenden chinesischen Marktes angepasst.

Zur Abbildung des heterogenen Kundenverhaltens werden die Kunden gemäß ihrem Alter in verschiedene Kundensegmente eingeteilt. Jedes Kundensegment wird durch eine Gruppe von Agenten repräsentiert, welche mit verschiedenen Charakteristika wie beispielsweise Alter, Fahrleistung sowie Präferenzparametern bezüglich der Fahrzeuge beschrieben sind (Kieckhäfer 2013). Den Agenten werden jeweils Fahrzeuge gemäß der aktuellen Aufteilung des Fahrzeugbestands zugewiesen. Für den gesättigten deutschen Markt, wird davon ausgegangen, dass alle Agenten bereits ein Fahrzeug besitzen. Fahrzeugbesitzer geben nach Ende ihrer jeweiligen Haltedauer ihr Fahrzeug ab und werden so wieder zu Neuwagenkäufern.

Die Kaufentscheidung ist in Anlehnung an (Mueller/Haan 2009) als zweistufiger Prozess modelliert. Im ersten Schritt werden die Größe und Zusammensetzung der Auswahlmenge, also welche Fahrzeuge bei der Kaufentscheidung Berücksichtigung finden, bestimmt. Die Auswahl der Fahrzeuge beruht auf Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Antrieb und Grö-

[2] Eine ausführliche Darstellung des Simulationsmodells für Deutschland findet sich in (Kieckhäfer 2013)

ßenklasse des aktuellen Fahrzeugs des Kunden und den anderen angebotenen Antrieben bzw. Größenklassen. Berücksichtigt werden hier auch die Kommunikation zwischen den Kunden sowie Werbemaßnahmen seitens der Hersteller, welche zu Veränderungen der Übergangswahrscheinlichkeiten der Antriebe führen können. Die Fahrzeuge in der Auswahlmenge werden im zweiten Schritt der Kaufentscheidung anhand ihrer Eigenschaften unter Rückgriff auf die Präferenzparameter und Charakteristika der Kunden bewertet. Hierzu wird auf die Discrete-Choice-Theorie zurückgegriffen. Für den deutschen Markt wird ein Nested-Logit-Modell verwendet, das von (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung 2008) geschätzt wurde.

Neben der disaggregierten Abbildung der Kaufentscheidung erlaubt das Modell auch eine Berücksichtigung der aggregierten Entwicklungen der Fahrzeugeigenschaften sowie der Infrastrukturabdeckung. Hierzu wird auf das systemdynamische Modell von (Walther et al. 2010) bzw. (Wansart 2012) zurückgegriffen. Hinsichtlich der Fahrzeugeigenschaften ist insbesondere die Entwicklung der Energiedichte sowie der Kosten der Batterietechnologie mit Hilfe des Lern- bzw. Erfahrungskurvenkonzepts abgebildet. Die zugrunde liegenden Entwicklungspfade und erwarteten Lernraten stammen aus den im Herstellerbereich durchgeführten Technologieanalysen (vgl. Abschnitt 0). Die Fahrzeugeigenschaften verändern sich entsprechend der abgesetzten Mengen im Zeitverlauf, so dass die Kunden bei ihrem nächsten Kauf von einem verbesserten Fahrzeugangebot profitieren können. Gleiches gilt für die Entwicklung der Infrastruktur. Hier wird davon ausgegangen, dass sich der Bestand an Tank- und Ladestellen zeitverzögert an den Bestand der jeweiligen Antriebskonzepte anpasst. Die Struktur des Simulationsmodells ist in Abbildung 2 dargestellt.

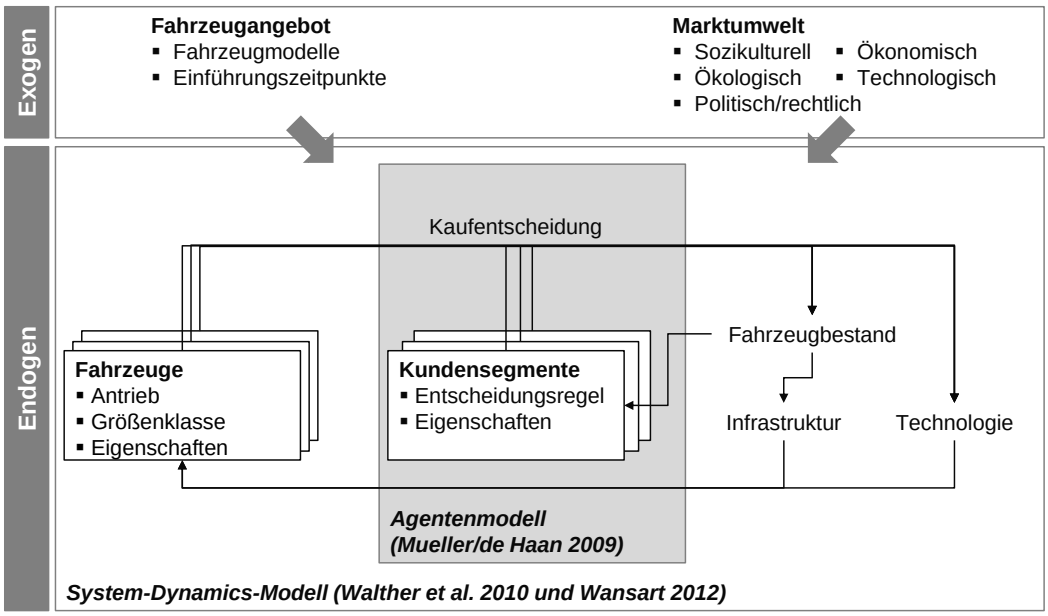


Abbildung 2: Simulationsmodell der Automobilkaufentscheidung[3]

[3] In Anlehnung an Kieckhäfer et al. 2012

Zur Abbildung des chinesischen Marktes ergeben sich einige Modellanpassungen: So werden andere Charakteristika bzw. Präferenzparameter berücksichtigt, beispielsweise auch die Größe der Familie oder das Geschlecht des Familienoberhaupts. Weiterhin setzt sich die Agentenpopulation zu Simulationsbeginn aus Fahrzeugbesitzern und potentiellen Fahrzeugkäufern zusammen. Für Fahrzeugbesitzer verläuft der Kaufentscheidungsprozess entsprechend dem deutschen Modell. Potentielle Fahrzeugkäufer beginnen den Kaufprozess gemäß der erwarteten Wachstumsraten des chinesischen Marktes. Sie verfügen bei der Durchführung ihres ersten Autokaufs noch nicht über Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Antriebsarten und Größenklassen. Stattdessen sind Auswahlwahrscheinlichkeiten hinterlegt, die unabhängig von einem aktuellen Fahrzeug sind und die Einstellung eines Kunden gegenüber den verschiedenen Antriebskonzepten repräsentieren. Zur Abbildung der zweiten Stufe der Kaufentscheidung wird das von (Qian/Soopramanien 2011) für den chinesischen Markt geschätzte Discrete-Choice-Modell verwendet.

Das Simulationsmodell ist in der Software AnyLogic 6.9.0 der Firma XJ Technologies implementiert. Zur Parametrisierung des Simulationsmodells wird auf Daten der Volkswagen AG zurückgegriffen. Weiterhin finden öffentlich zugängliche Daten des Kraftfahrbundesamtes und anderer Studien sowie die in Arbeitspaket B1 entwickelten Technologieroadmaps (vgl. Abschnitt 0) Eingang. Das Modell wurde gemäß des von (Rand/Rust 2011) vorgeschlagenen Vorgehens einer umfangreichen Validierung sowohl auf Mikro- als auch auf Makro-Ebene hinsichtlich Daten, Strukturen und Ergebnissen unterzogen. Für die Elemente, bei denen nicht auf eine empirische Datenbasis zurückgegriffen werden konnte (inbes. Wirkung von Werbemaßnahmen und Kommunikation), wurden umfangreiche Sensitivitätsanalysen zur Ermittlung der Auswirkungen verschiedener Parametrisierungen durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Simulationsmodells (mit Ausnahme der Berücksichtigung von Kommunikation und Marketing sowie der Anpassung an den chinesischen Markt) sowie eines Großteils der verwendeten Datengrundlage findet sich in (Kieckhäfer 2013). Eine Veröffentlichung zur Analyse des Einflusses verschiedener Kommunikationsstrukturen und der daraus resultierenden Empfehlungen für das Marketing alternativ angetriebener Fahrzeuge ist geplant. Gleiches gilt für eine tiefergehende Analyse des chinesischen Marktes (vgl. Abschnitt III.6.2).

Das entwickelte Simulationsmodell ermöglicht durch seine Integration von agentenbasierter und systemdynamischer Modellierung eine simultane Berücksichtigung von heterogenem Kundenverhalten und aggregierten Entwicklungen der Marktumwelt. Auf diese Weise kann ein verbessertes Verständnis für das System Automobilmarkt erzielt und es können Aussagen über wichtige Einflussgrößen auf die Marktentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge abgeleitet werden. Gleichzeitig stellt die verwendete Methodik jedoch auch hohe Anforderungen an die Datenverfügbarkeit und -güte. Da insbesondere bezüglich der Kommunikation zwischen Nachfragern und der Wirkung von Werbung auf die Kaufentscheidung keine

empirische Datenbasis verfügbar war, musste auf umfangreiche Simulationsstudien zurückgegriffen werden. Gleiches gilt für die Abbildung des chinesischen Marktes. So stammen die Daten für die erste Stufe der Kaufentscheidung bei Fahrzeugbesitzern (Bildung der Auswahlmenge) aus einer Erhebung der Volkswagen AG. Für Erstkäufer steht jedoch keine vergleichbare Datenbasis zur Verfügung, so dass hier Annahmen hinsichtlich der Auswahlwahrscheinlichkeiten für verschiedene Antriebstechnologien getroffen werden mussten. Allgemein ist zu berücksichtigen, dass sowohl für Deutschland als auch für China lediglich private Neuwagenkäufer abgebildet werden und keine Berücksichtigung des Gebrauchtwagenmarktes oder von gewerblichen Kunden stattfindet. Weiterhin werden neue Mobilitätskonzepte wie beispielsweise Fahrzeugleasing oder Car-Sharing nicht mit betrachtet. Eine mögliche Weiterentwicklung ist auch eine stärkere Differenzierung zwischen den Kundensegmenten. Gerade bei der Abbildung des chinesischen Marktes würde eine Differenzierung bezüglich Regionen und eine Unterscheidung zwischen Städten und ländlich geprägten Regionen eine noch höhere Erklärungsgüte ermöglichen.

IV.2.2.2 Inhaltliche Ergebnisse

Durch die Anwendung des Simulationsmodells lassen sich Aussagen darüber ableiten, welche Änderungen im Kundenverhalten nötig wären, um einen Markterfolg alternativ angetriebener Fahrzeuge zu erreichen. Entsprechend können auch Rückschlüsse über Chancen und Risiken gestalterischer Eingriffe seitens Politik oder Herstellern gezogen werden.

Für den deutschen Markt ist festzustellen, dass ohne diese Eingriffe eine Markdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge in absehbarer Zeit nicht stattfinden wird. Dies liegt darin begründet, dass die Fahrzeuge aktuell bei der Kaufentscheidung kaum berücksichtigt werden. Entsprechend wichtig ist es, die Bekanntheit der alternativ angetriebenen Fahrzeuge und damit auch die Bereitschaft der Kunden, diese bei einem Autokauf als vollwertige Alternative wahrzunehmen, zu erhöhen. Gelingt dies z.B. durch gezielte Werbung für innovative Antriebe seitens der Hersteller, können elektrische Fahrzeuge (HEV, PHEV und BEV)[4] einen nennenswerten Marktanteil erlangen (vgl. Abbildung 3). Eine große Rolle spielen dabei Hybridfahrzeuge (HEV und PHEV), da diese ein ähnliches Nutzungsverhalten wie konventionelle Fahrzeuge ermöglichen. Hybride können daher als Wegbereiter für vollelektrische Fahrzeuge dienen und sollten entsprechend vor diesen am Markt angeboten werden. Trotz ihrer Ähnlichkeit zu Benzin- und Dieselfahrzeugen bieten Gasfahrzeuge (CNG und LPG) nur ein geringes Potential zur nachhaltigen Gestaltung individueller Mobilität, da auch sie beim Autokauf aktuell kaum Berücksichtigung finden. Brennstoffzellenfahrzeuge sind hinsichtlich ihrer Wahrnehmung bei Kunden mit vollelektrischen Fahrzeugen vergleichbar, so dass auch hier ein Abbau der Hemmungen gegenüber den Fahrzeugen notwendig ist. Da die Marktreife

[4] Hinsichtlich der betrachteten Antriebstechnologien vgl. Abschnitt IV.2.3.2

dieser Antriebstechnologie jedoch noch nicht erreicht (vgl. Abschnitt IV.2.3.2) und eine Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff aktuell kaum existent ist, ist davon auszugehen, dass Brennstoffzellenfahrzeuge erst langfristig Marktanteile gewinnen werden können.

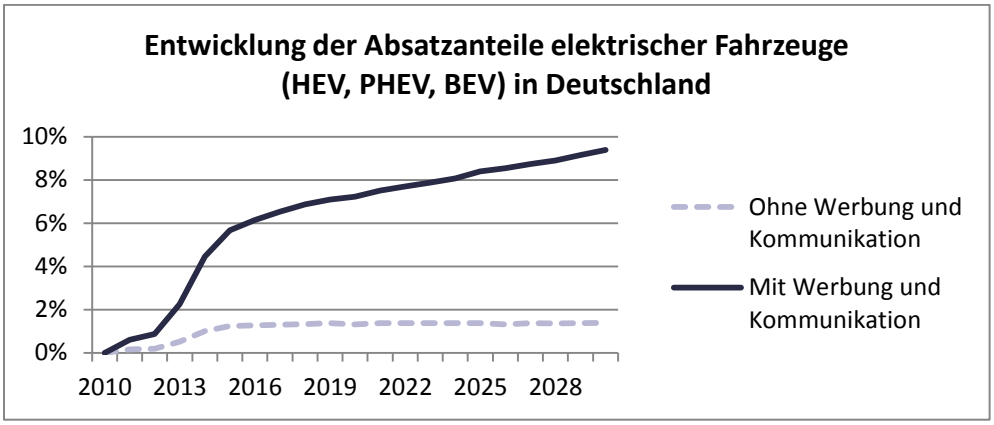


Abbildung 3: Entwicklung der Absatzanteile elektrischer Fahrzeuge (HEV, PHEV und BEV) in Deutschland

Diese Erkenntnisse aus dem deutschen Markt lassen sich auf den chinesischen Markt übertragen. Auch hier zeigen Kunden wenig Affinität gegenüber Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeugen. Eine zusätzliche Schwierigkeit, der sich Investoren in Elektrofahrzeuge in China gegenüber sehen, ist das nahezu vollständige Fehlen einer privaten Infrastruktur, so dass die Notwendigkeit des Aufbaus einer öffentlichen Ladeinfrastruktur im Vergleich zum deutschen Markt noch an Wichtigkeit gewinnt. Demgegenüber stellen die in China dominierenden Erstkäufer eine vielversprechende Chance zur Etablierung von alternativ angetriebenen Fahrzeugen dar. Erstkäufer besitzen bislang kein Fahrzeug, so dass der Kaufentscheidung keine habitualisierten Strukturen zu Grunde liegen. Dieser Effekt ist in Abbildung 4 dargestellt. Wird davon ausgegangen, dass die Einstellung von Erstkäufern gegenüber den Antriebstechnologien der von Wiederholungskäufern entspricht, ist auch für den chinesischen Markt nur eine geringe Marktdurchdringung zu erwarten (Pessimistisches Szenario).[5]

[5] Im Unterschied zu Deutschland fallen hier jedoch auch Diesel- und Gasfahrzeugen keine signifikanten Marktanteile zu.

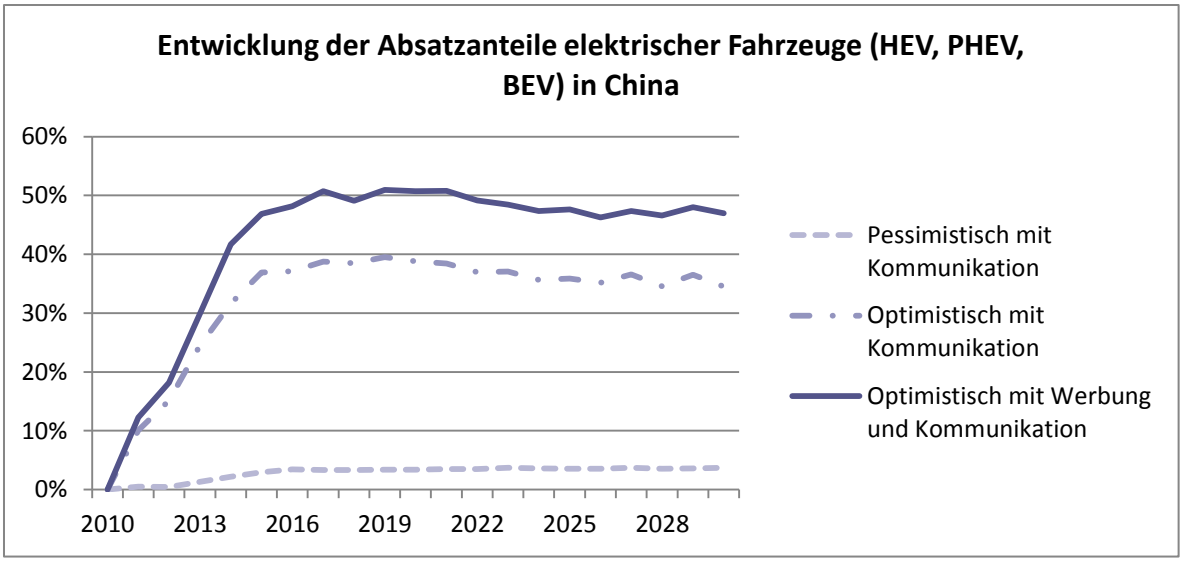


Abbildung 4: Entwicklung der Absatzanteile elektrischer Fahrzeuge (HEV, PHEV und BEV) in China

Im Gegensatz zu diesem pessimistischen Szenario stellt die Annahme, dass die Auswahlwahrscheinlichkeit für jedes Antriebskonzept identisch ist, ein optimistisches Szenario dar. In diesem Fall zeigt sich eine deutliche Steigerung der Absatzanteile elektrischer Fahrzeuge, da diese im direkten Vergleich mit Benzinfahrzeugen als ähnlich attraktiv wahrgenommen werden. Diese Entwicklung wird durch Werbemaßnahmen noch verstärkt, so dass ein Absatzanteil elektrischer Antriebe von knapp 50% erreicht werden kann. Die Entwicklung weist jedoch eine fallende Tendenz auf, da davon ausgegangen wird, dass Käufer nach dem ersten Enthusiasmus gegenüber alternativ angetriebenen Fahrzeugen wieder in die alten Verhaltensmuster zurückfallen und Benzin-Fahrzeuge wieder eine wichtigere Rolle einnehmen. Vor dem Hintergrund der bisherigen Entwicklungen erscheint die Annahme gleichverteilter Auswahlwahrscheinlichkeiten von Erstkäufern jedoch zu optimistisch und kann lediglich das Potential aufzeigen, das durch eine gezielte Steigerung der Attraktivität der neuen Technologien für Erstkäufer gehoben werden könnte.

Nicht berücksichtigt sind in dieser Arbeitsphase die mit der Marktentwicklung verbundenen Auswirkungen beispielsweise im Hinblick auf die mit der Energiebereitstellung verbundenen Emissionen. So ist eine Aussage darüber, welches Szenario aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu bevorzugen ist, weder für Deutschland noch für China möglich. Zu diesem Zweck wurde das entwickelte Simulationsmodell direkt in das übergeordnete Modell zur Wirkungsanalyse integriert.

IV.2.3 Hersteller

Die im Bereich Hersteller erzielten methodischen und inhaltlichen Ergebnisse beziehen sich zum einen auf die Ebene der analysierten Antriebstechnologien und zum anderen auf die Ebene des Herstellerverhaltens bei der Integration der innovativen Fahrzeuge in das bestehende Fahrzeugportfolio.

IV.2.3.1 Methodische Ergebnisse

Antriebstechnologien

Auf der Ebene der Antriebstechnologien wurde zu deren techno-ökonomischer Analyse eine Datenbank entwickelt, mit deren Hilfe gezielt Informationen zu mehr als 300 konkreten Fahrzeugmodellen sowie zu allgemeinen Literaturdaten von verschiedenen Antriebskonfigurationen abgefragt und miteinander verglichen werden können. Die Datenbank stellt eine Möglichkeit dar, Wissen über alternative Antriebstechnologien zu speichern, zu ergänzen und bei Bedarf abzurufen. Abbildung 5 zeigt die Nutzeroberfläche der entwickelten Datenbank.

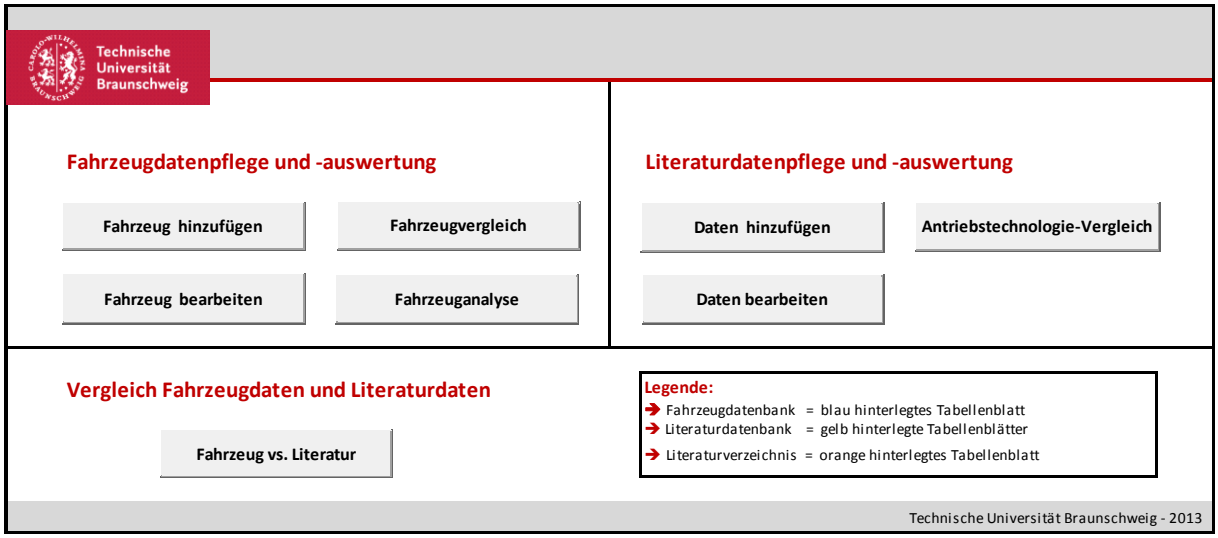


Abbildung 5: Nutzeroberfläche der Datenbank zu alternativen Antriebstechnologien

Weiterhin wurde eine Patent- und Publikationsanalyse zur Technologiefrüherkennung alternativer Antriebe durchgeführt, wobei die Entwicklung von Traktionsbatterien und Brennstoffzellen untersucht wurde. Diese beruht auf den Ergebnissen der von (Mock 2010) durchgeführten Patentanalyse. Eine Erweiterung erfolgte dahingehend, dass neben der zeitlichen Aktualisierung der Informationen, zusätzlich Patente und Publikationen im Hinblick auf deren direkten Bezug zum Fahrzeug analysiert wurden. Exemplarisch zeigt Abbildung 6 den Verlauf kumulierter Patentanmeldungen verschiedener Batterietypen, links ohne direkten Bezug zum Fahrzeug und rechts mit direktem Bezug zum Fahrzeug. Es ist zu erkennen, dass sich die Lithium-Ionen Batterie in der Wachstumsphase befindet und daher mit einer Verbreitung dieser Technologie gerechnet werden kann.

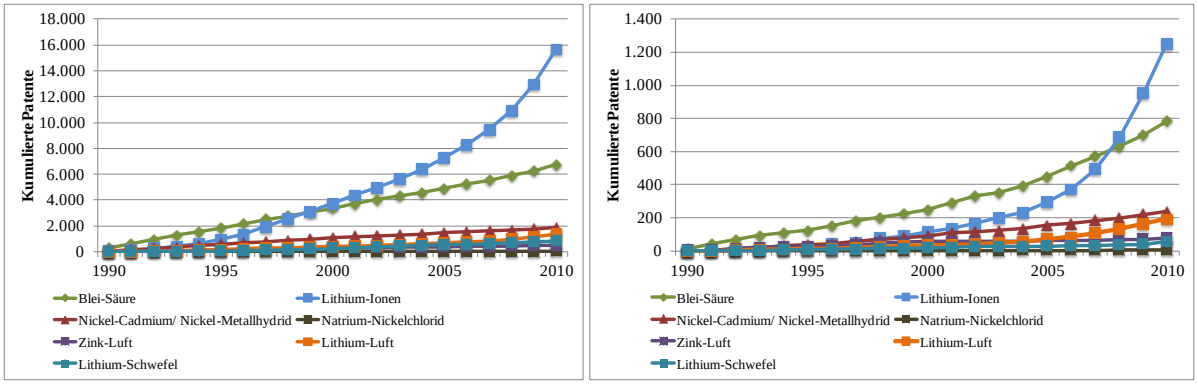


Abbildung 6: Verlauf kumulierter Patentanmeldungen verschiedener Batterietypen (links: allgemein, rechts: mit direktem Bezug zum Fahrzeug)

Aufbauend auf der Patent- und Publikationsanalyse wurden Technologieroadmaps zur Abbildung zukünftiger Entwicklungspfade verschiedener alternativer Antriebstechnologien erarbeitet. Sie stellen die Entwicklung der relevanten Komponenten von batterieelektrischen Antrieben (BEV, PHEV, HEV), Brennstoffzellenantrieben (FCEV) sowie Gas-Antrieben (CNG und LPG) für je drei verschiedene Szenarien (Basisszenario, ein für alternative Antriebe förderliches, ein für alternative Antriebe hinderliches Szenario) dar. In Abbildung 7 ist die Technologieroadmap für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge für das Basisszenario dargestellt.

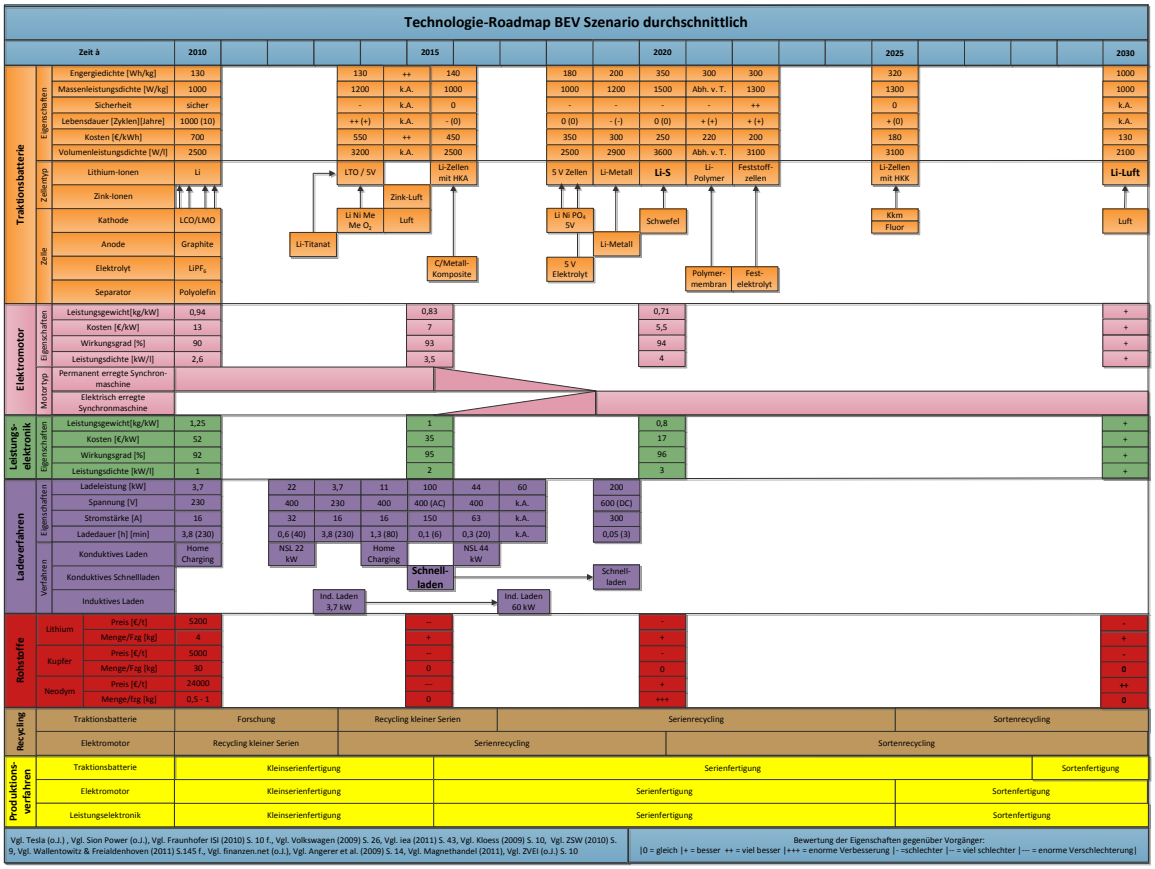


Abbildung 7: Technologie-Roadmap für batterieelektrische Antriebe im Basis-Szenario

Die mit Hilfe der Methoden des Technologiemanagements aufgearbeiteten Informationen wurden schließlich in eine Methodik zur Bewertung der Technologieattraktivität aus Herstel-

lersicht überführt und in einem Modell umgesetzt. Das Modell ermöglicht die Bewertung verschiedener Antriebsstränge hinsichtlich der Kriterien Funktionserfüllung, Flexibilität des Einsatzes in unterschiedlichen Fahrzeugtypen, Reifegrad und Kosten. Abbildung 8 zeigt die Struktur des Technologiebewertungsmodells. Bei der Bewertung werden die Randbedingungen, verfügbare Unternehmensressourcen, Präferenzen des Herstellers sowie verfügbare Informationen zu zukünftigen Technologieentwicklungen berücksichtigt.

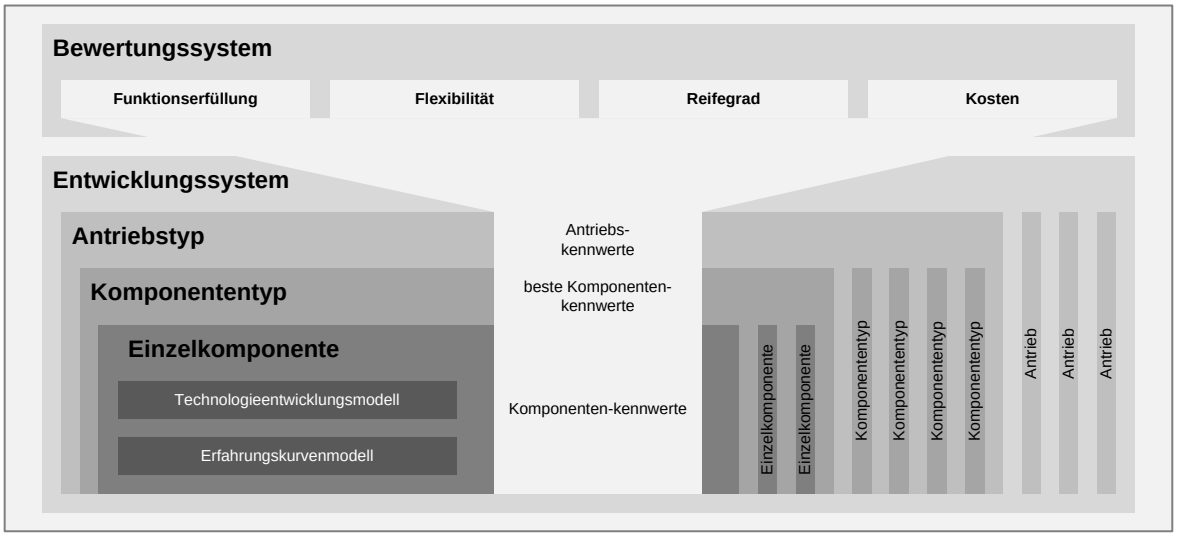


Abbildung 8: Aufbau und Strukturierung des Technologiebewertungsmodells

Die mit Hilfe des Technologiebewertungsmodells festgestellte Technologieattraktivität stellte eine wichtige Information für die Auswahl der im Modell zur Analyse des Herstellerverhaltens zu betrachtenden Technologien dar. Es konnten Aussagen darüber getroffen werden, welche Technologien für die Integration in das Fahrzeugangebot interessant sind und ab wann dies der Fall ist bzw. sein wird.

Herstellerverhalten

Die Analyse des Herstellerverhaltens erfolgte aus zwei Perspektiven. Zum einen wurde das Modell zur Simulation des Kundenverhaltens (vgl. Abschnitt IV.2.2) angewendet, um in einer aggregierten Betrachtung aus Industrieperspektive allgemeine produkt- und portfoliopolitische Gestaltungsoptionen zu untersuchen (Kieckhäfer 2013). Zum anderen erfolgte eine Weiterentwicklung des Simulationsmodells, um verschiedene Strategien zur Integration alternativ angetriebener Fahrzeuge in das Fahrzeugangebot eines Herstellers zu testen.

Das erweiterte Modell umfasst zwei konkurrierende Hersteller, die bei der Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge entweder eine Strategie als Pionier, als früher oder später Folger oder als Verweigerer verfolgen können. Die Strategien unterscheiden sich sowohl im gewählten Einführungszeitpunkt der Fahrzeuge (früh, leicht verzögert, stark verzögert, nie) als auch in der Preissetzung (hoher Preis mit abnehmender Tendenz für Pionier und frühen Folger, niedriger Preis mit steigender Tendenz für späten Folger). Einen weiteren wichtigen

Aspekt stellt die Berücksichtigung von Werbemaßnahmen dar. So können Hersteller entweder Werbemaßnahmen durchführen, deren Fokus auf den innovativen Antriebstechnologien liegt und damit die Wahrscheinlichkeit steigern, dass diese Teil der Auswahlmenge der Kunden sind (wird bei Pionier-Strategie gewählt), oder den Fokus auf die Fahrzeugmarke legen und damit die Attraktivität aller Fahrzeuge eines Herstellers steigern (früher und später Folger sowie Verweigerer). Abhängig von der gewählten Strategie können verschiedene Absatzmengen realisiert werden, welche wiederum für jeden Hersteller zur Generierung von Erfahrungskurveneffekten und damit zur Senkung der jeweiligen Herstellkosten beitragen. Um allerdings der Tatsache Rechnung zu tragen, dass gerade bei der Herstellung der Batterien oder der Leistungselektronik häufig auf die gleichen Zulieferer zurückgegriffen wird, findet im Simulationsmodell auch der Wissenstransfer zwischen Herstellern Berücksichtigung. In Abbildung 9 ist die Struktur des um die Berücksichtigung von Wettbewerb und Herstellerstrategien erweiterten Simulationsmodells abgebildet.

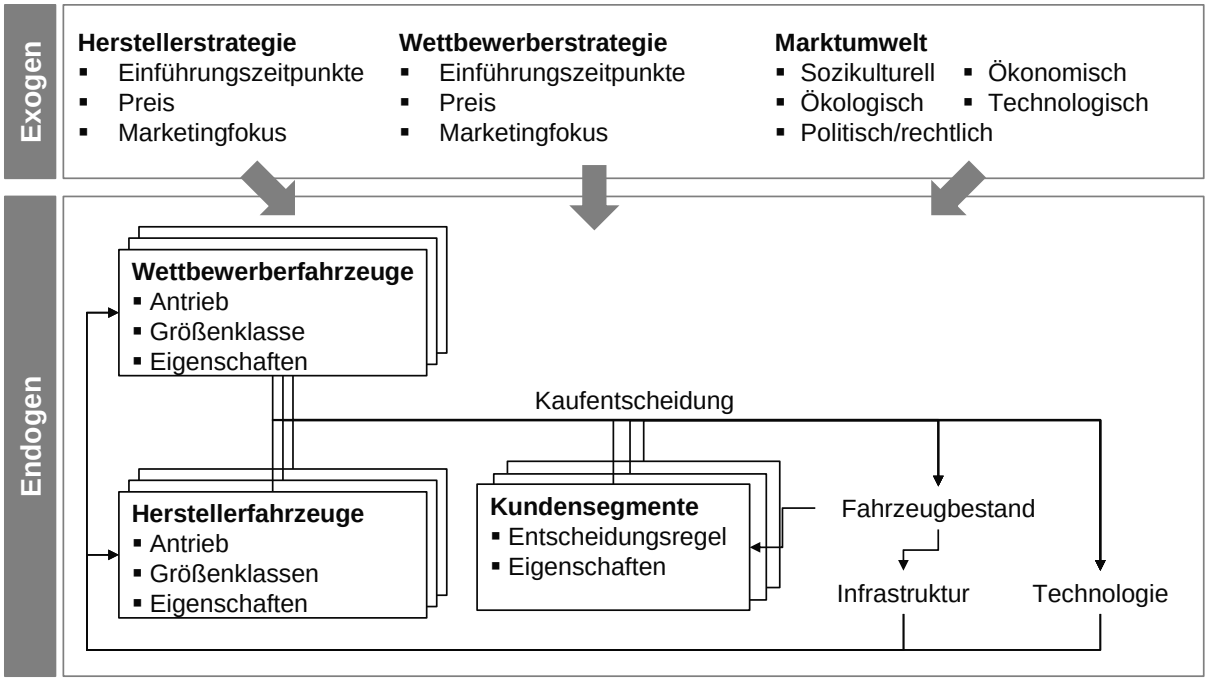


Abbildung 9: Simulationsmodell des Herstellerverhaltens[6]

Wie das Kundenmodell ist auch das Herstellermodell in der Software AnyLogic 6.9.0 der Firma XJ Technologies implementiert und es wird auf eine im Wesentlichen identische Datenbasis zurückgegriffen. Auch für dieses Modell wurden eine umfangreiche Validierung gemäß dem von (Rand/Rust 2011) vorgeschlagenen Vorgehen und zahlreiche Sensitivitätsanalysen für unsichere Parameter durchgeführt. Eine Veröffentlichung zur detaillierten Beschreibung des Simulationsmodells, zur Untersuchung des Einflusses von Wettbewerbsverhalten auf die Marktentwicklung alternativer Antriebe und zur Analyse der Vorteilhaftigkeit verschiedener Wettbewerbsstrategien befindet sich in Vorbereitung (vgl. Abschnitt III.6.2).

[6] In Anlehnung an Kieckhäfer et al. (2012)

Das entwickelte Simulationsmodell ermöglicht es, die Auswirkungen von verschiedenen Herstelleraktivitäten auf die Marktentwicklung alternativer Antriebstechnologien zu testen. Dabei finden sowohl heterogenes Kundenverhalten als auch die aggregierten Entwicklungen der Marktumwelt (z.B. Infrastrukturentwicklung) und ihre Auswirkungen auf die Absatzentwicklung Berücksichtigung. Die mit Hilfe des Modells erzielbaren Erkenntnisse ermöglichen sowohl Automobilherstellern eine bessere Wettbewerbspositionierung bei der Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge als auch Entscheidungsträgern in der Politik ein besseres Verständnis für die Auswirkungen des Wettbewerbs zwischen Herstellern auf die Gesamtmarktentwicklung. Da das Simulationsmodell auf dem in Abschnitt IV.2.2 beschriebenen Kundenmodell beruht, gelten auch für die Analyse des Herstellerverhaltens die dort beschriebenen Einschränkungen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Wettbewerbssimulation immer noch um eine aggregierte Betrachtung handelt, da lediglich der Wettbewerb zwischen zwei Herstellern und nicht das Oligopol des Automobilmarktes abgebildet ist. Weiterhin werden im Rahmen des Modells vorab definierte Herstellerstrategien getestet. Eine reaktive Anpassung des Herstellerverhaltens aufgrund der Konkurrenzsituation findet keine Berücksichtigung. Das Modell wurde als generisches Modell entwickelt und kann daher sowohl für den deutschen als auch für den chinesischen Markt angewendet werden. Die Struktur des Wettbewerbsverhaltens kann dabei erhalten bleiben, lediglich das Kundenverhalten ist an den betrachteten Markt anzupassen.

IV.2.3.2 Inhaltliche Ergebnisse

Antriebstechnologien

Mit Hilfe der Informationen aus Datenbank, Technologieroadmaps und Technologiebewertungsmodell konnten Erkenntnisse darüber erzielt werden, welche Antriebstechnologien aus Sicht eines Automobilherstellers zur Minderung des CO_2-Ausstoßes der Fahrzeugflotte grundsätzlich als vorteilhaft einzustufen sind. Kurz- bis mittelfristig kommt insbesondere konventionellen Antrieben eine hohe Bedeutung bei der Verringerung des CO_2-Ausstoßes der Fahrzeugflotte zu. Für Benzinfahrzeuge werden Weiterentwicklungspotentiale von bis zu 40% und für Dieselfahrzeuge von bis zu 30% angegeben (Mock 2010), (Roland Berger 2009). CNG und LPG betriebene Fahrzeuge sind aus techno-ökonomischer Sicht ebenfalls als attraktiv zu bewerten, da sie mit nur geringfügig höheren Herstellkosten verbunden sind als Benzin- oder Dieselfahrzeuge. Das mit konventionellen Antrieben verbundene CO_2-Minderungspotential ist allerdings im Vergleich zu batterie- oder brennstoffzellenelektrischen Antrieben gering. Die aus Sicht der potentiellen CO_2-Einsparung vorteilhaften elektrischen Antriebe (HEV, PHEV und BEV) befinden sich im Stadium der Marktreife. Voll- bzw. Plug-In-Hybride sind in der Kompakt-, Mittel- und Oberklasse eine valide Option. Vollständig batterieelektrische Fahrzeuge eignen sich besonders für den Einsatz in der Kleinwagen-, Kompakt- oder Mittelklasse. Vor allem für BEV sind die im Vergleich zu konventionellen Antrieben

hohen Herstellkosten nachteilig. Die Erzielung von Kosteneinsparungen durch Skaleneffekte in der Serienproduktion ist deshalb entscheidend für ihren Marktdurchbruch. Ein weiterer Hinderungsgrund für die Marktdurchdringung von BEV ist die derzeit geringe Reichweite. Hier ergibt sich der entscheidende Einfluss aus der Entwicklung der Batterie-Energiedichten. Technologiesprünge, beispielsweise durch die Weiterentwicklung verbesserter Batteriemodelle (wie Lithium-Schwefel-/Lithium-Luft-Batterien), könnten hier zu rapiden Verbesserungen führen. Brennstoffzellenantriebe erscheinen aus technischer Sicht ab frühestens 2020 für alle verfügbaren Größenklassen einsetzbar. Aktuell stehen dem jedoch die sehr hohen Kosten und die hochgradig unsichere weitere Entwicklung der Technologie entgegen. Aufgrund der globalen Verflechtungen der Automobilindustrie gelten diese Befunde sowohl für den deutschen als auch für den chinesischen Markt. In der Volksrepublik China kommt Diesel-, CNG- und LPG-Fahrzeugen jedoch kaum Bedeutung zu.

Herstellerverhalten

Basierend auf der Anwendung der Simulationsmodelle zum Herstellerverhalten zu produkt- und portfoliopolitischen Gestaltungsoptionen lässt sich zeigen, dass Hersteller durch die bewusste Gestaltung des Fahrzeugportfolios sowie einzelner Fahrzeuge einen Einfluss auf die Marktentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge nehmen können. So ist beispielsweise eine frühe Einführung von Hybridfahrzeugen (HEV und PHEV) aufgrund ihrer Rolle als Wegbereiter für vollelektrische Fahrzeuge zu empfehlen. Werden Benzinfahrzeuge standardmäßig als Vollhybride angeboten, kann die Konkurrenzsituation zwischen Benzin- und Hybridfahrzeugen aufgelöst und so die Marktentwicklung der elektrischen Fahrzeuge gefördert werden. Zu berücksichtigen sind hierbei jedoch potentielle nicht-intendierte Effekte wie beispielsweise eine Steigerung des Markanteils von Dieselfahrzeugen (Kieckhäfer 2013).

Bei der Wettbewerbsbetrachtung wurden verschiedene Strategiekombinationen, wie auszugsweise in Abbildung 10 dargestellt, getestet. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Verhalten des Wettbewerbers sowohl einen Einfluss auf die Absatzentwicklung der Fahrzeuge eines Herstellers als auch auf die Gesamtmarktentwicklung hat. Hierbei ist zu beachten, dass eine aus Herstellersicht vorteilhafte Strategie aus Gesamtmarktperspektive nicht unbedingt wünschenswert ist. So kann es beispielsweise aus Sicht eines Herstellers vorteilhaft sein, als einziger elektrische Fahrzeuge anzubieten. Aus Sicht der Gesamtmarktentwicklung ist jedoch eine Beteiligung aller Automobilhersteller am Markt für Elektrofahrzeuge wünschenswert. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die Marke eines Fahrzeugs einen wichtigen Kaufgrund darstellt. Werden also von einem attraktiven Hersteller keine alternativ angetriebenen Fahrzeuge angeboten, ist es wahrscheinlicher, dass Kunden ein konventionell angetriebenes Fahrzeug des Herstellers kaufen, als dass sie zu einem alternativ angetriebenen Fahrzeug eines anderen Herstellers wechseln. Zum anderen wird durch Wettbewerb der Anreiz gesteigert, Fahrzeuge zu attraktiven Preisen (gegebenenfalls sogar unter Stückkos-

ten) anzubieten oder durch Werbemaßnahmen herauszustellen, da diese mit Fahrzeugen von Wettbewerbern konkurrieren müssen. Weiterhin zeigt sich, dass für eine möglichst hohe Marktdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge ein frühzeitiger Markteintritt aller Hersteller mit einem Werbefokus auf den Antriebstechnologien wünschenswert ist. Aus Herstellersicht erweist sich jedoch die Strategie als früher Folger als vorteilhaft, da dieser von der gestiegenen Aufmerksamkeit für die innovativen Fahrzeuge aufgrund der Aktivitäten des Pioniers profitiert, die Wahrnehmung der eigenen Fahrzeuge jedoch gleichzeitig durch gezielte Bewerbung verbessern kann. Die ermittelten Effekte behalten in ihrer Tendenz sowohl für den deutschen als auch für den chinesischen Markt Gültigkeit. Aufgrund des in Abschnitt IV.2.2 gezeigten Potentials der Erstkäufer treten die genannten Effekte bei Annahme eines optimistischen Kundenszenarios jedoch deutlicher hervor.

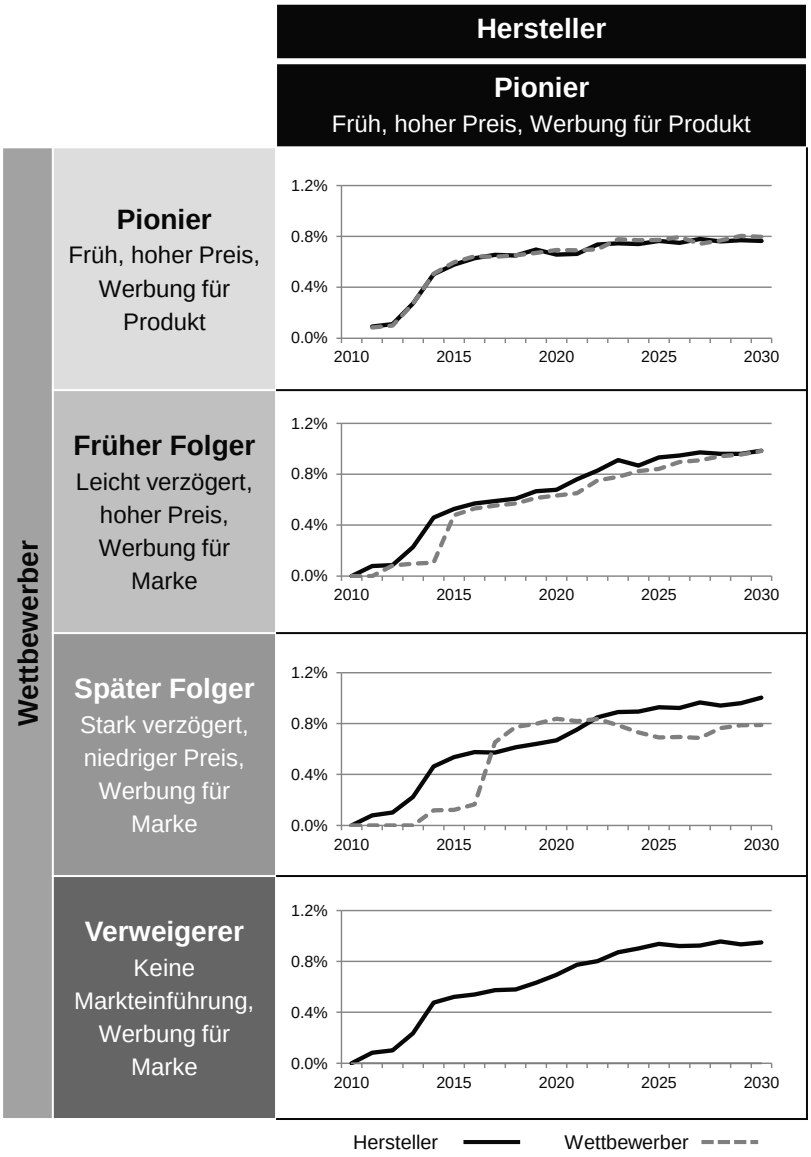


Abbildung 10: Entwicklung der Marktanteile am Absatz elektrischen Fahrzeuge (HEV, PHEV, BEV, FCEV) für verschiedene Strategiekombinationen

Bei den Analysen in dieser Arbeitsphase unberücksichtigt bleibt der Effekt einer politischen Regulierung des Herstellerverhaltens. Vor diesem Hintergrund wurden die Herstellerstrategien aggregiert und an das Modell zu Wirkungsanalyse übergeben.

IV.2.4 Wirkungsanalyse

Im Bereich der Wirkungsanalyse in Arbeitsphase D wurde unter Rückgriff auf die Ergebnisse der Arbeitsphasen A – C ein Gesamtmodell zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Effizienz und Effektivität nachhaltiger Antriebstechnologien sowie zur Analyse der Wirkung verschiedener Politik- und Herstellerstrategien entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein Bestands-Fluss-Modell, das in der Software AnyLogic implementiert wurde. Modellerweiterungen erfolgten im Wesentlichen dahingehend, dass verschiedene Marktdurchdringungsszenarien bezüglich ökologischer (Emissionen und Ressourcen) und ökonomischer Bewertungskriterien (Cashflows aus Akteursperspektive) analysiert werden können. Im Anschluss an die Modellentwicklung erfolgten eine umfassende Validierung des Gesamtmodells gemeinsam mit den Projektpartnern sowie die Durchführung umfangreicher Szenario- und Sensitivitätsanalysen für die Fallstudien Deutschland und China. Im Folgenden werden zunächst die methodischen und anschließend die inhaltlichen Ergebnisse der Arbeitsphase D vorgestellt.

IV.2.4.1 Methodische Ergebnisse

Im Bereich der Wirkungsanalyse erfolgte die Entwicklung eines Simulationsmodells zur dynamischen, lebenszyklusbasierten Bewertung des Pkw-Bestands hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Kriterien. Das Modell erlaubt die Analyse von verschiedenen Marktdurchdringungsszenarien hinsichtlich ausgewählter Bewertungskriterien im Simulationsverlauf, sowohl aus der Perspektive des Gesamtsystems als auch aus der akteursspezifischen Perspektive (Politik, Hersteller, Nachfrager).

Im Rahmen der Modellerweiterung erfolgte zunächst die Ermittlung relevanter Bewertungskriterien. Aus **ökologischer** Sicht sind dies die Emissionen sowie der Ressourcenverbrauch über die Lebenszyklus-Phasen Produktion, Nutzung und Entsorgung (vgl. Abbildung 11). Die Emissionen in der Nutzungsphase unterteilen sich dabei in direkte und indirekte Emissionen. Als relevante Emissionen wurden $CO_{2\text{-äq}}$, $SO_{2\text{-äq}}$ und PM und als relevante Ressourcen Rohöl, Gas, Neodym, Lithium, Kobalt, Wasserstoff, Platin, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Gold, Silber, Gallium, Indium und Germanium identifiziert.

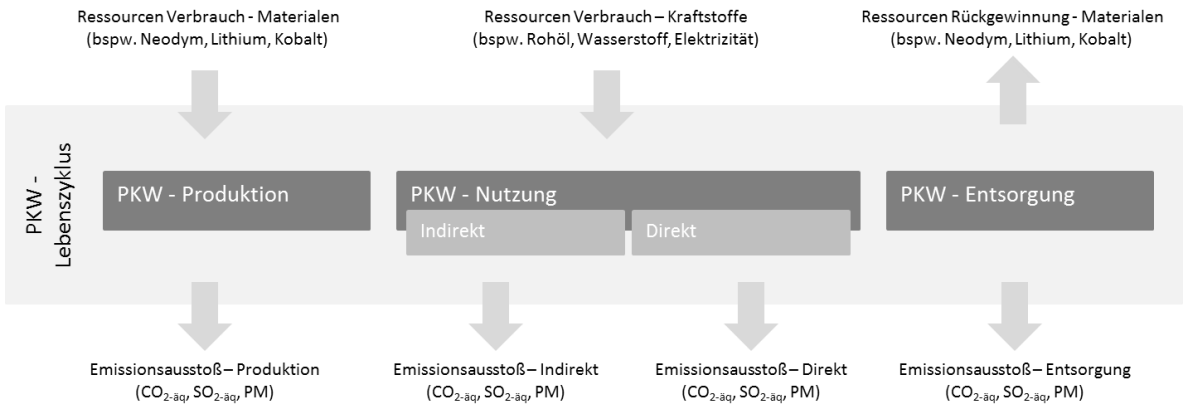


Abbildung 11: Ökologische Faktoren

Aus **ökonomischer** Sicht wurden für die verschiedenen Akteure des Gesamtmodells (Hersteller, Kunde, Politiker) die individuellen Cashflows identifiziert (vgl. Abbildung 12). Die Cashflows für Kunden und Hersteller konnten aus den individuellen Modellen der Arbeitsphase B und C übernommen werden, während für die Bewertung der aus Sicht des Politikers entstehenden Cashflows ein gesondertes Budget implementiert worden ist.

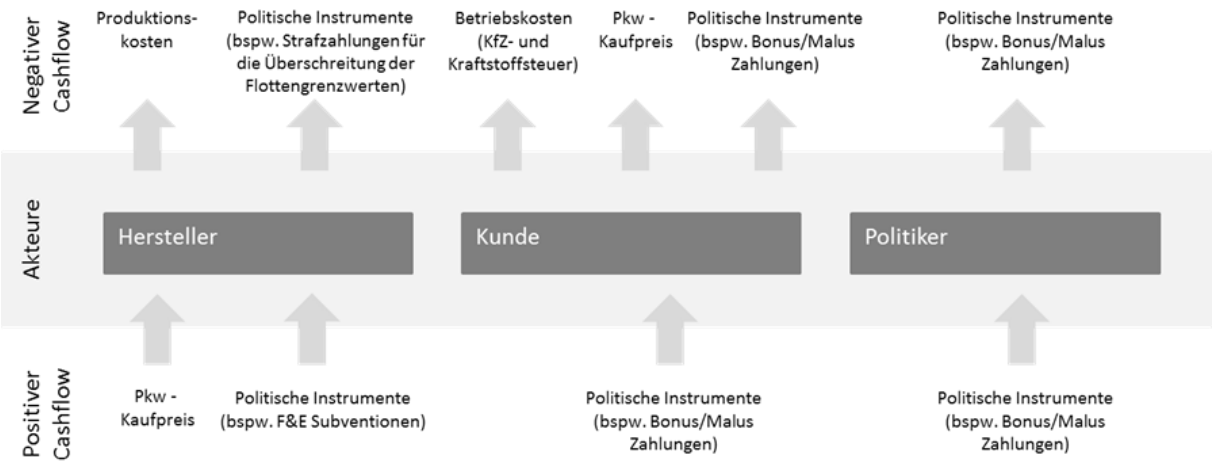


Abbildung 12: Ökonomische Faktoren

Weitere Modellanpassungen umfassen die Abbildung der Altersstruktur des Pkw-Bestands im Modell mittels einer Alterungskette (Aging Chains) wie beispielsweise in (Meyer 2009), (Sterman 2000), (Strohhecker 2008) und (Wansart 2012) sowie die Erweiterung des in Arbeitsphase C entwickelten Infrastrukturmodelles zur Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Infrastrukturabdeckung in Anlehnung an (Janssen et al. 2006), (Meyer/Winebrake 2009), (Shepherd et al. 2012), (Struben/Sterman 2008) und (Wansart 2012). Die Module der „Aging Chain“ und der „Infrastruktur“ sind schematisch in Abbildung 13 dargestellt.

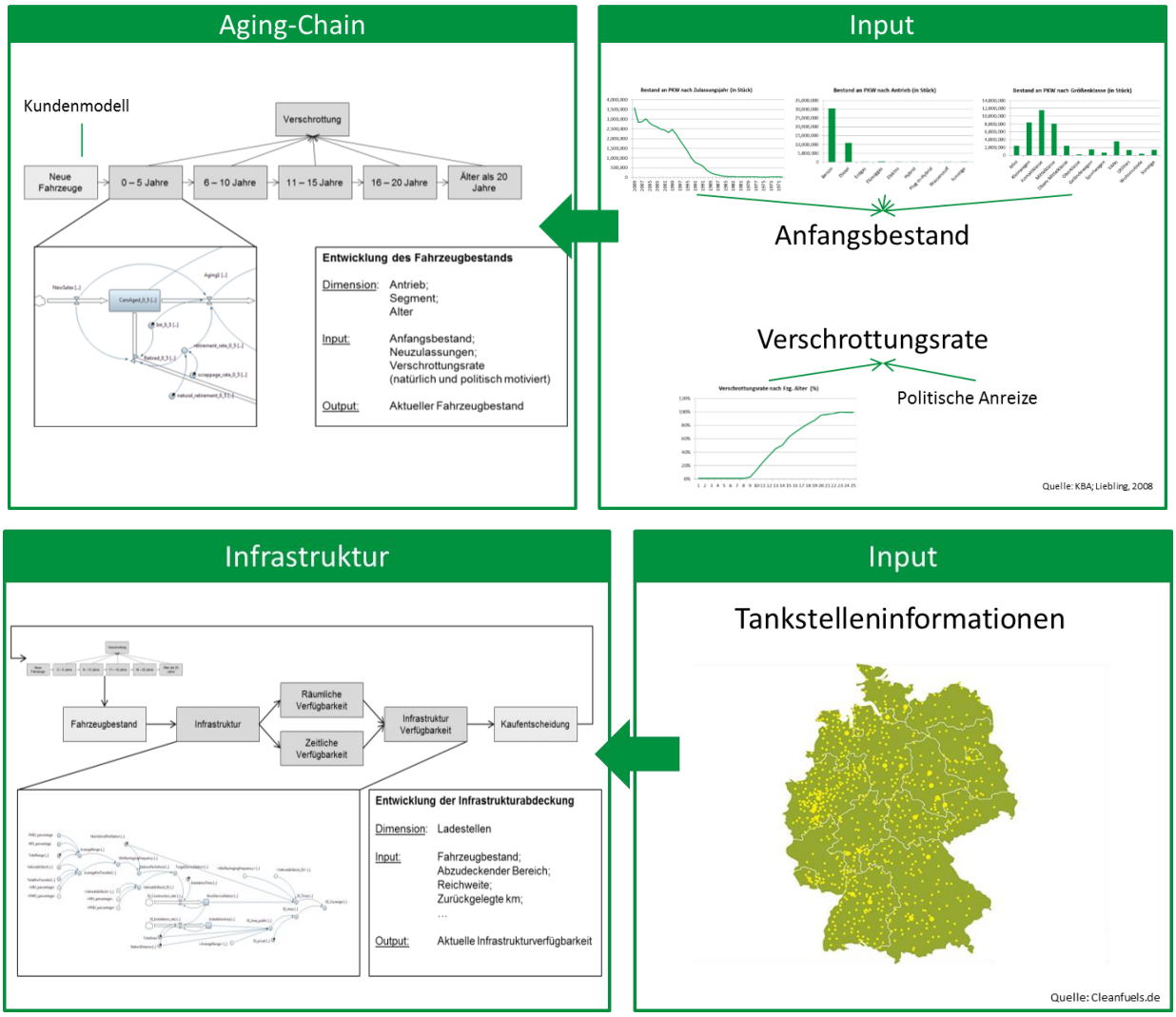


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Module "Aging Chain" und "Infrastruktur"

Die Integration der politischen Instrumente aus Arbeitsphase A sowie der Herstellerstrategien aus Arbeitsphase B in das Gesamtmodell erfolgte im Wesentlichen über Parametervariation und Szenarioanalysen. Dazu wurden entsprechende Parameter im Modell integriert (z.B. Bonus-/ Maluszahlungen im Kaufpreis, ein zusätzlicher Betrag in der KfZ-Steuer, etc.), parametrisiert und strategiespezifisch variiert. Insgesamt wurden 10 Umweltszenarien, 13 Politikstrategien und 3 Herstellerstrategien untersucht (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Übersicht der evaluierten Strategien und Szenarien

Stellgröße	Varianten	Szenario			
		BAU	1 - Tech_Opt	...	26 - Electro
Politik					
Steuer auf Energieträger bzw. Kraftstoff	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja - konventionell
Kfz-Steuer(befreiung)	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja - konventionell
Kaufprämien	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja
Maluszahlungen bei Anschaffung	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja
Infrastruktursubventionen	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja
F&E-Förderung	Ja Nein	Nein	Ja	...	Ja
Nicht-monetäre Förderung	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja
Verbot konventioneller Antriebstechnologien	Ja Nein	Nein	Nein	...	Nein
Anriebstechnologien					
Batterie - Technologiesprung auf Lithium Schwefel	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja
Batterie - Variation Lernrate "Kosten"	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
Batterie - Variation Lernrate "Energiedichte"	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
Brennstoffzelle - Kostenniveau Zelle	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
Brennstoffzelle - Kostenniveau Tank	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
Brennstoffzelle - Variation Lernrate "Kosten"	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
Benzin/Diesel - Variation Max. Einsparungspotential	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
CNG/LPG - Variation Max. Einsparungspotential	Optimistisch Neutral Pessimistisch	Neutral	Optimistisch	...	Optimistisch
Herstellerstrategien					
Einführungszeitpunkt	Früh Spät	Spät	Spät	...	Früh
Preis	Hoch Niedrig	Hoch	Hoch	...	Niedrig
Angebotene Antriebe	ICE Gas BEV FCEV	Alle	Alle	...	Kein Benzin
Unternehmensumwelt					
Preise konventionelle Kraftstoffe	Neutral Positiv	Neutral	Neutral	...	Positiv
Preise CNG/LPG	Neutral Positiv	Neutral	Neutral	...	Positiv
Preise Strom	Neutral Negativ	Neutral	Neutral	...	Neutral
Preise Wasserstoff	Neutral Negativ	Neutral	Neutral	...	Neutral
Infrastrukturentwicklung	Neutral Positiv	Neutral	Neutral	...	Positiv
Nachgelagerte Szenarien (kein Einfluß auf Marktentwicklung)					
CO2-Grenzwert für Herstellerflotten	Ja Nein	Nein	Nein	...	Ja
Reyclingqute	Verschidene Entwicklungen	Nein	Nein	...	Nein
Strommix	Verschidene Entwicklungen	DE	DE	...	DE
Vorgaben für die Kraftstoffzusammensetzung	Aktuelle Quote Erhöte Quote	Nein	Nein	...	Nein

Abbildung 14 stellt zusammenfassend das resultierende Gesamtmodell dar.

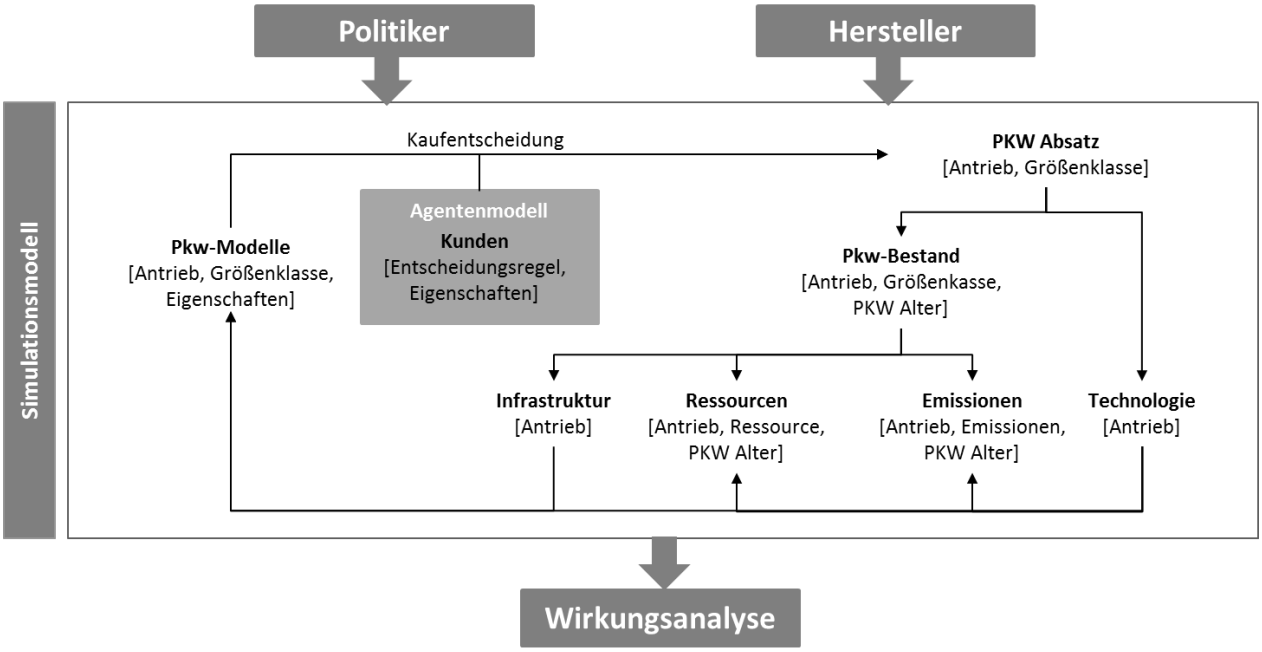


Abbildung 14: Ganzheitliches Simulationsmodell (Integration der Arbeitsphasen A bis D)

Das Gesamtmodell der Arbeitsphase D wurde in der Software AnyLogic 6.9.0 der Firma XJ Technologies implementiert. Zur Parametrisierung des deutschen und chinesischen Modells wurde auf Daten aus der aktuellen Literatur (vgl. Abschnitt III.5) sowie auf die mit den Projektpartnern in den Arbeitspaketen A – C erarbeiteten Ergebnisse zurückgegriffen. Im Anschluss erfolgte eine intensive Validierung des Modells in Form von Micro-face-, Macro-face-, empirischen Input- sowie empirischen Output-Validierungen (vgl. Rand/Rust 2011). An diesem Prozess wirkte das gesamte STROM-Konsortium bestehend aus Industriepartnern und Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen (BWL, VWL, Ingenieurswissenschaften) mit (vgl. Abbildung 15). Im Zuge der Empirical Input Validation erfolgten umfangreiche Sensitivitätsanalysen zur Ermittlung der einflussreichsten bzw. sensitivsten Parameter für die Ableitung der Szenarien.

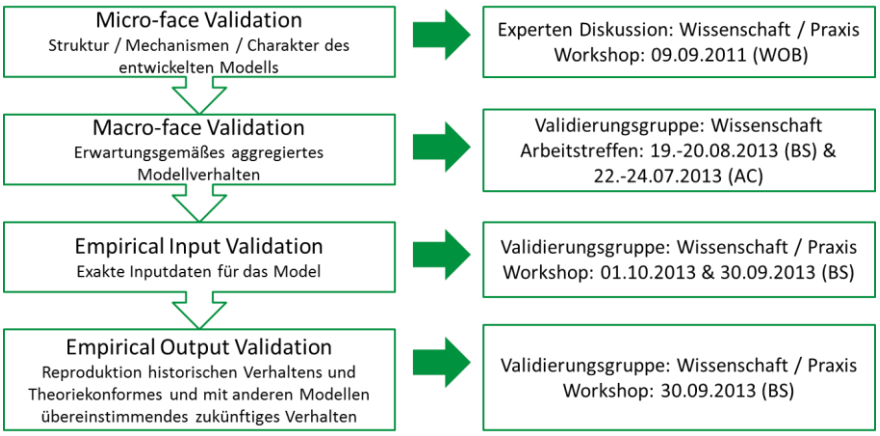


Abbildung 15: Validierungsphasen des Gesamtmodells

Das entwickelte Simulationsmodell ermöglicht durch die Integration des Kaufverhalten-Modells mit dem Bestands-Fluss-Modell eine detaillierte Abbildung der dynamischen Entwicklung des Pkw-Bestands sowie die Bewertung der verschiedenen Strategien aus lokaler Sicht (akteurspezifisch) sowie aus Sicht des Gesamtsystems. So ist es möglich, das Zusammenspiel der verschiedenen Strategien zu analysieren und etwaige Wechselwirkungen (positive sowie negative) zwischen den Akteuren und Strategien zu identifizieren. Da die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen stark von unsicheren zukünftigen Parameterentwicklungen (bspw. Kraftstoffpreise, Strommix, Recyclingquote) abhängig sind, erfolgten umfangreiche Simulationsstudien, um den Einfluss der unsicheren Umweltfaktoren zu analysieren und entsprechende Umweltszenarien abzuleiten.

IV.2.4.2 Inhaltliche Ergebnisse

Inhaltlich erlaubt die Auswertung des Gesamtmodells Aussagen über die Marktdiffusion alternativer Antriebstechnologien im Business-as-usual Szenario (BAU) sowie die Analyse des Einflusses verschiedener Politik- und Herstellerstrategien. Wie Abbildung 16 zeigt, kann für das Fallbeispiel Deutschland im BAU-Szenario bis 2030 nur ein geringer Marktanteil elektrischer Fahrzeuge erzielt werden.

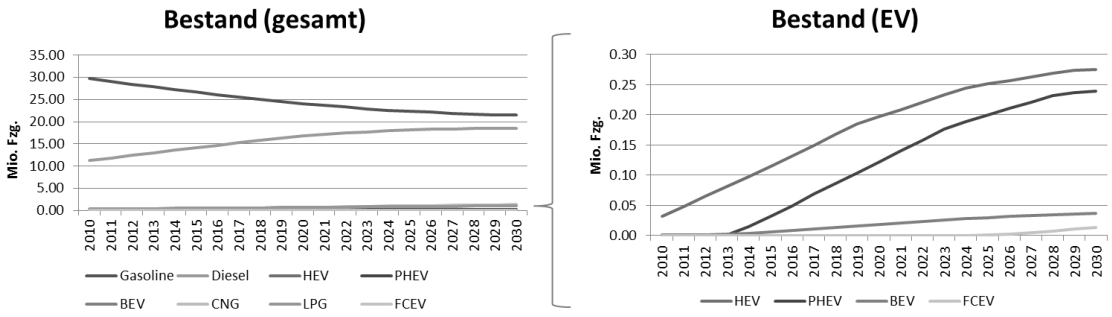


Abbildung 16: Entwicklung des Deutschen Pkw-Bestands bis 2030 (BAU-Szenario)

Bei der Analyse der Politik- und Herstellerstrategien wird deutlich, dass vor allem die Übergangswahrscheinlichkeiten von konventionellen zu alternativen Antrieben im agentenbasieren Kaufverhaltensmodell große Relevanz besitzen. Erst wenn erhöhte Übergangswahrscheinlichkeiten gewährleistet werden, die Kunden also neue Technologien explizit in ihre Kaufentscheidung aufnehmen, greifen auch politische Instrumente zur Absatzförderung. So zeigt Abbildung 17, dass die alleinige Erhöhung der Kraftstoffsteuer für konventionelle Antriebe (Tax KS) den Marktanteil alterativer Antreibe kaum erhöhen, während in Kombination mit erhöhten Übergangswahrscheinlichkeiten (ÜWS) der Marktanteil alternativer Antriebe deutlicher gesteigert wird.

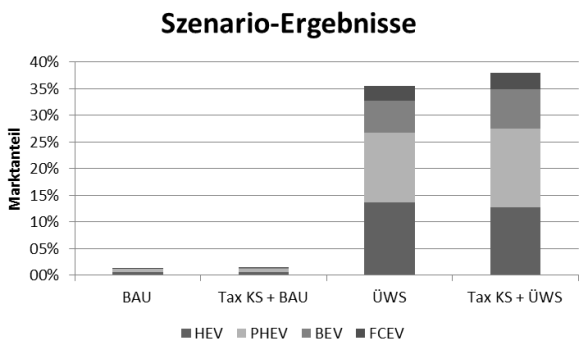


Abbildung 17: Exemplarische Szenario-Ergebnisse für Deutschland (ÜWS – Erhöhte Übergangswahrscheinlichkeit für Elektrofahrzeug; Tax KS - Erhöhung der konventionellen Kraftstoffsteuer)

Bezüglich der ökologischen Wirkungen wird deutlich, dass durch die Verschärfung von Grenzwerten (EURO-Norm) sowie die Effizienzsteigerung von konventionellen Antrieben die $SO_{2\text{-äq}}$ sowie PM Emissionen bis 2030 in allen Szenarien reduziert werden können, während eine Reduktion der $CO_{2\text{-äq}}$-Emissionen nur bei schneller Marktdiffusion der alternativen Antriebstechnologien erreicht werden kann (vgl. Abbildung 18).

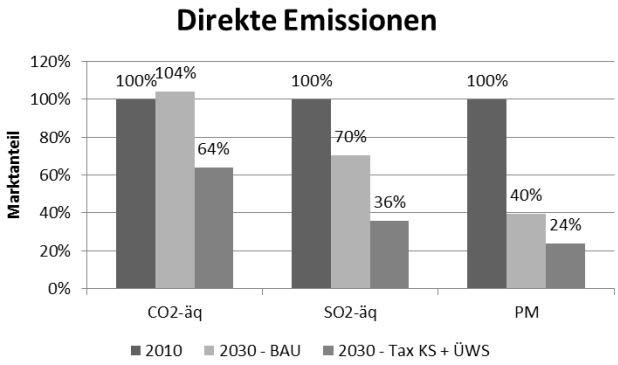


Abbildung 18: Entwicklung der direkten Emissionen im BAU-Szenario (Deutschland)

Im Gegensatz zum gesättigten deutschen Pkw-Markt wächst der **chinesische Pkw-Markt.** Elektrische Fahrzeuge können hierbei im BAU-Szenario einen höheren Marktanteil erzielen als in Deutschland (vgl. Abbildung 19). Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass Erstwagenkäufer in Ihrer Kaufentscheidung nicht so stark auf konventionelle Antriebe fixiert sind.

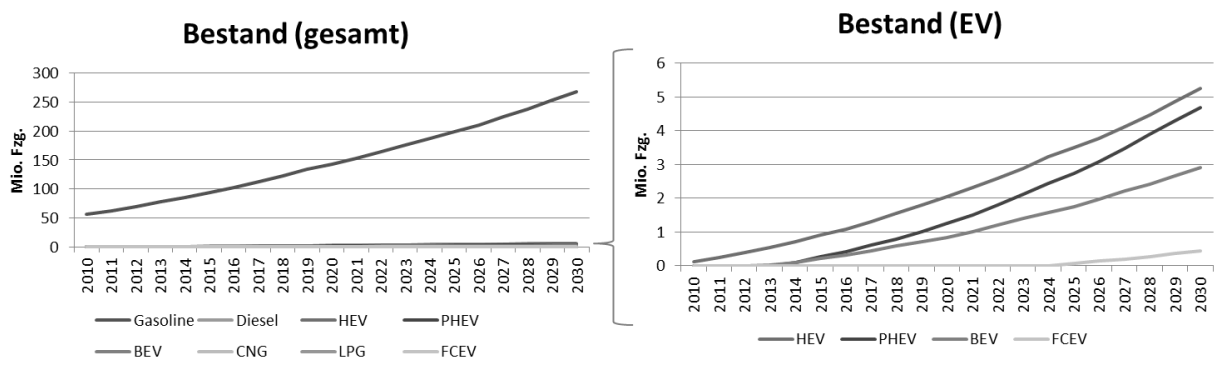


Abbildung 19: Entwicklung des Chinesischen Pkw-Bestands bis 2030 (BAU-Szenario)

Durch das Marktwachstum kommt es in allen ökologischen Wirkungskategorien im BAU-Szenario in China zu einer Erhöhung der Emissionen (vgl. Abbildung 20), wobei die Emissionen aufgrund von Effizienzsteigerungen konventioneller Pkw unterproportional zum Marktwachstum steigen.

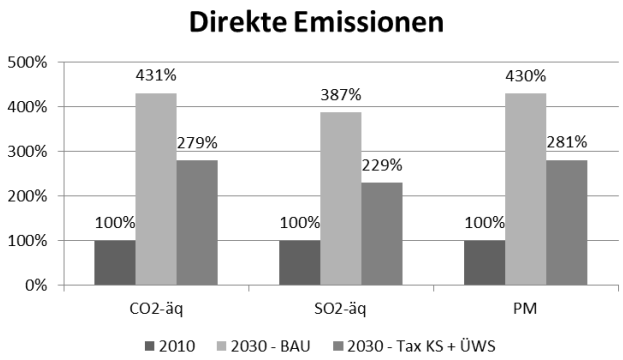


Abbildung 20: Entwicklung der direkten Emissionen im BAU-Szenario (China)

Als Resultat der Wirkungsanalyse ergibt sich auch hier, dass für die Marktdiffusion alternativer Antriebskonzepte die Präferenzen bzw. die Übergangswahrscheinlichkeiten der Kunden entscheidend sind. So führt der Einsatz von politischen Instrumenten (bspw. Steuererhöhungen) nur dann zu einer signifikanten Erhöhung des Marktanteiles von alternativen Antrieben, wenn auch die Attraktivität von alternativen Antrieben, erhöht werden kann. Im gesättigten deutschen Pkw-Markt können die $SO_{2\text{-äq}}$ und PM Emissionen auch bei einem geringen Marktanteil von alternativen Antrieben, durch Effizienzsteigerung von konventionellen Antrieben gesenkt werden, während eine Verringerung von $CO_{2\text{-äq}}$-Emissionen die erhöhte Marktdiffusion von alternativen Antrieben voraussetzt. Im wachsenden chinesischen Pkw-Markt kommt es in allen Szenarien zu steigenden Emissionen. Dieser Anstieg kann durch eine erhöhte Marktdiffusion von alternativen Antrieben nur abgeschwächt werden.

IV.2.5 Zentrale Projektergebnisse und Handlungsempfehlungen

Aus dem Projekt können die folgenden Ergebnisse und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden: Grundsätzlich stellt ein Klimaabkommen ein geeignetes Instrument dar, um politische Entscheidungsträger auch langfristig an die Reduktion von Umweltwirkungen zu binden. Eine Teilnahme aller Staaten an einem solchen Abkommen ist dabei möglich. Entsprechend sollten Verhandlungen zur Erzielung eines Klimaabkommens fortgeführt werden, um auch langfristig die Reduktion der Umweltwirkungen des Verkehrs voran zu bringen.

Auf Ebene einer einzelnen Volkswirtschaft erweist sich die Umsetzung der angestrebten Emissionsreduktionsziele im Verkehrssektor jedoch als Herausforderung. Langfristig stellen alternativ angetriebene Fahrzeuge wie Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge (unter der Voraussetzung regenerativ hergestellter Energie bzw. Wasserstoff) eine vielversprechende Möglichkeit zur nachhaltigen Gestaltung individueller Mobilität dar. Zunächst muss jedoch der Fokus auf der Verbrauchsreduktion konventioneller Antriebstechnologien liegen, um die Umweltwirkungen des Verkehrssektors zu reduzieren, da kurz- bis mittelfristig nicht mit einer umfassenden Markdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge zu rechnen ist. Hierfür sind im Wesentlichen Hemmnisse aus technologischer, betriebswirtschaftlicher und Kundensicht verantwortlich. Aus technologischer Sicht, stellen Benzin- und Dieselantriebe die am weitesten entwickelten Technologien dar, die mit ihrer Verbesserung verbundenen Emissionsreduktionen sind jedoch begrenzt. Vollelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge weisen das größte Potential zur Emissionsreduktion auf, befinden sich aber noch in einem früheren Entwicklungsstadium. Hybride Fahrzeuge (HEV und PHEV) stellen einen Kompromiss zwischen der Emissionsreduktion und dem Nutzen herkömmlicher Technologien dar. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht besteht ein Hemmnis für die Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge in ihren hohen Herstellkosten. Dabei besteht die Gefahr, dass durch das Angebot der wenig gewinnbringenden innovativen Fahrzeuge, gewinnträchtige konventionelle Fahrzeuge kannibalisiert und somit die erzielbaren Gewinne verringert werden. Aus Kundensicht schneiden alternativ angetriebene Fahrzeuge im Hinblick auf wichtige Kaufkriterien im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen schlechter ab – dies liegt beispielsweise an den hohen Kaufpreisen, der geringen Reichweite, den langen Ladevorgängen sowie der mangelhaften Infrastrukturabdeckung. Weiter bestehen Vorbehalte gegenüber den alternativen Antriebstechnologien, so dass diese aktuell bei der Kaufentscheidung kaum Berücksichtigung finden. Ein bedeutsamer Marktanteil alternativ angetriebener Fahrzeuge ist nur möglich, wenn es gelingt diese Hemmnisse abzubauen.

Politische Entscheidungsträger sehen sich mit einem Wandel der Antriebstechnologien konfrontiert. So spielt kurz- bis mittelfristig die Verbesserung konventioneller Antriebstechnologien eine wichtige Rolle zur Reduktion der Umweltwirkungen des Verkehrssektors. Ent-

sprechend sollte ein alleiniger Fokus politischer Instrumente auf Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeugen vermieden und die Verbrauchsreduktion konventioneller Fahrzeuge weiterhin gefordert und gefördert werden. Langfristig ist zur nachhaltigen Gestaltung individueller Mobilität jedoch die Marktdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge nötig. Um dies zu fördern, ist ein gezielter Abbau der Hemmnisse und Bedenken von Kunden ihnen gegenüber erforderlich. Hierzu können Ansätze dienen, die alternativ angetriebene Fahrzeuge „erlebbar" machen, wie beispielsweise Schaufensterprojekte und Modellregionen. Erst wenn es gelingt, die Wahrscheinlichkeit der Berücksichtigung alternativ angetriebener Fahrzeuge bei der Kaufentscheidung zu erhöhen, können monetäre Anreize wie z.B. Kaufprämien oder Steuerermäßigungen Wirkung zeigen.

Für **Automobilhersteller** zeigt sich ein Zielkonflikt zwischen der Förderung konventioneller und alternativer Antriebstechnologien, da konventionelle Fahrzeuge bereits über eine große Bekanntheit und eine vorteilhafte Gewinnspanne verfügen, alternative Antriebstechnologien jedoch einen wichtigen Schritt hin zur zukünftigen Gestaltung von Mobilität darstellen. Entsprechend sollten auch Automobilhersteller weiterhin die Verbesserung konventionell angetriebener Fahrzeuge vorantreiben und zeitgleich den Weg für die neuen Fahrzeugkonzepte bereiten. Hierfür weisen besonders Voll- und Plug-in-Hybride ein großes Potential auf, da sie auf Kundenseite ein ähnliches Nutzungsverhalten wie konventionelle Antriebe und für den Hersteller das Sammeln von Erfahrungen mit der neuen Batterie-Technologie ermöglichen. Zur erfolgreichen Platzierung alternativ angetriebener Fahrzeuge im Markt und der damit verbundenen Generierung von Wettbewerbsvorteilen kann weiterhin eine Steigerung der Attraktivität der innovativen Fahrzeuge beispielsweise durch gezielte Werbemaßnahmen und konkurrenzfähige Preissetzungen beitragen.

Bei **Betrachtung des chinesischen Marktes** behalten die zentralen Projekterkenntnisse sowie die ausgesprochenen Handlungsempfehlungen Gültigkeit. Unter global-politischen Gesichtspunkten stellt sich die Herausforderung, das chinesische Interesse an einer nachhaltigen Gestaltung individueller Mobilität zu fördern, um den globalen Herausforderungen wie dem Klimawandel erfolgreich zu begegnen und dem potentiellen kurzfristigen Kalkül einer Emissionsverschiebung durch mit Kohlestrom angetriebene Elektrofahrzeuge entgegenzuwirken. Ein globales Klimaabkommen könnte in diesem Kontext Anreize zur ganzheitlichen Reduktion der Umweltwirkungen des Verkehrssektors setzen. Deutsche Automobilhersteller sollten das große Potential des chinesischen Marktes nutzen, um Erfahrungen zu sammeln und die resultierenden Kostenreduktionen auch in anderen Automobilmärkten umzusetzen.

IV.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Im Rahmen des Projektes wurde in den Arbeitsphasen A bis D ein generisches Entscheidungsunterstützungsmodell erarbeitet, welches auf zwei Fallbeispiele, Deutschland und China, angepasst und validiert worden ist. Die Projektergebnisse bieten sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus wissenschaftlicher Sicht zahlreiche Erfolgsaussichten (vgl. Abschnitte IV.3.1 und IV.3.2). Weiterhin stellen Sie einen Anknüpfungspunkte für weitere Forschung bzw. zu praktischen Anwendung dar (vgl. Abschnitt IV.3.3).

IV.3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch die Nutzung des Simulationsmodells bietet sich für die verschiedenen Akteure des Automobilmarktes (Hersteller und Politiker) die Möglichkeit, vorteilhafte Strategien zu entwickeln. So ist es **Automobilherstellern** möglich, durch die vorherige Validierung verschiedener Marketingstrategien oder auch Einführungszeitpunkte von alternativen Antrieben Strategien zu vermeiden, die nicht zu einer erfolgreichen Markteinführung alternativ angetriebener Fahrzeuge führen. Dadurch kann Fehlinvestitionen entgegengewirkt werden. Im Sinne einer Wirkungsanalyse ermöglicht das entwickelte Simulationsmodell die Untersuchung von Auswirkungen von Entscheidungen auf das komplexe Marktverhalten und führt so zu einem besseren Verständnis über die Wirkungsweise des Marktes.

Politischen Entscheidungsträgern bietet das entwickelte Simulationsmodell die Möglichkeit, die Effektivität und Effizienz politischer Instrumente ex-ante zu bewerten. Zum einen kann die Wirkung verschiedener Szenarien auf Gesamtemissionen sowie Ressourcenbedarf abgeschätzt werden. Zum anderen können die mit möglichen politischen Strategien verbundenen negativen sowie positiven Cashflows für die verschiedenen Akteure des Systems (Kunden, Hersteller, Politik) bewertet und nicht intendierte finanzielle Wirkungen vermieden werden. Zusätzlich bietet das Simulationsmodell die Möglichkeit der Bewertung einzelner Instrumente sowie von Instrumentenbündeln. Hierbei erfolgt eine Kombination von Instrumenten wirkungsbasiert und nicht notwendigerweise linear, d.h. dass nichtlineare Effekte sowie etwaige Feedback-Loops (negative sowie positive) zwischen verschiedenen Instrumenten identifiziert werden können.

Generell ist es möglich, das entwickelte Simulationsmodell an die sich ändernden Umweltgegebenheiten anzupassen, um es auf verschiedene Problemstellungen heute und in Zukunft anwenden zu können. Die nationale Übertragbarkeit verdeutlicht die Anwendung des Modells auf die Fallstudie China.

IV.3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Während der Projektlaufzeit konnten diverse **wissenschaftliche** Veröffentlichungen durch das Projekt-Konsortium platziert werden. So wurden drei Publikationen in referierten Zeitschriften (zzgl. eine Publikation in der 2. Runde des Begutachtungsprozesses), vier Beiträge in begutachteten Proceedings und Sammelbänden sowie fünf Beiträge in sonstigen Proceedings und Sammelbänden veröffentlicht. Des Weiteren wurden fünf Poster präsentiert und 27 Vorträge gehalten. Es war zudem möglich, eine Dissertation abzuschließen (vgl. Abschnitt III.6.1). Nach Beendigung des Projektes sind weitere Veröffentlichungen geplant. Es sollen drei gemeinsame Publikationen der Verbundpartner in Bezug auf das Gesamtprojekt sowie die Interdisziplinarität des Vorhabens entstehen. Hinzu kommen noch diverse Veröffentlichungsprojekte der einzelnen Projektpartner. Auch sind aktuell weitere Dissertationsprojekte in Arbeit (vgl. Abschnitt III.6.2).

Auch in die **Lehre** konnten die Ergebnisse des Projektes integriert werden (für einen detaillierten Überblick des Einsatzes der erzielten Projektergebnisse in der Lehre vgl. Abschnitt III.4). Auf diese Weise können bereits Studierende einen Einblick in das komplexe System Automobilmarkt sowie Methoden zur Modellierung und Simulation dieses dynamisch komplexen sozio-ökonomischen Systems kennenlernen. Sie können so ein besseres Verständnis für die Komplexität der Abschätzung von Auswirkungen externer Eingriffe (wie beispielsweise politische Maßnahmen) gewinnen. Weiterhin erlangen die Studierenden eine Diskussionsfähigkeit hinsichtlich der mit der Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge verbundenen Chancen und Risiken für eine nachhaltige Gestaltung individueller Mobilität.

IV.3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im Rahmen des STROM-Projekts erzielten Ergebnisse bieten einen vielversprechenden Ansatzpunkt für weitere Entwicklungen sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus Sicht der praktischen Anwendbarkeit. Aus wissenschaftlicher Sicht ergibt sich **weiterer Forschungsbedarf** durch die notwendige Anpassung und Anwendung der entwickelten Modelle für weitere Automobilmärkte. Hier ist insbesondere die Untersuchung des US-amerikanischen Marktes zu nennen, der sich in seiner Struktur wesentlich sowohl vom chinesischen als auch vom deutschen Markt unterscheidet. Basierend auf dieser Analyse können sich Rückschlüsse über Gründe für die unterschiedliche Wirkung von politischen Instrumenten oder Herstellerstrategien ziehen lassen. Als entscheidend für den Markterfolg alternativer Antriebe könnten sich weiterhin innovative Mobilitätskonzepte (z.B. Fahrzeugleasing oder Car-Sharing) erweisen, sodass eine nähere Untersuchung ihrer Potentiale und Grenzen im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten erstrebenswert ist. Dabei sollte insbesondere die Integration der Nutzer in die Erstellung von Mobilitätsangeboten eine zentrale Rolle einnehmen. Einen wei-

teren Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsvorhaben stellt die Ermittlung von Pfaden zur langfristigen Treibhausgasreduktion über verschiedene, mit dem Verkehrssektor verknüpfte Industrien hinweg dar. Basierend darauf ließen sich notwendige CO_2-Minimierungsziele ermitteln, Aktivitäten zur Erreichung dieser Ziele ableiten und Handlungsbedarfe bestimmen.

Aus Sicht der **praktischen Anwendbarkeit** stellen die im STROM-Projekt entwickelten Modelle und Methoden wichtige Ansatzpunkte zur Unterstützung von politischen und industriellen Entscheidungsträgern dar. Um die praktische Einsetzbarkeit der Ansätze zu verbessern, wäre jedoch eine genauere Ausrichtung der jeweiligen Modelle an den Anforderungen von Seiten der Entscheidungsträger sowie eine Entwicklung einer entsprechenden Benutzeroberfläche nötig. Da es sich um sehr komplexe Modelle handelt, besteht ein weiterer wichtiger Schritt im Schaffen von Vertrauen in die entwickelten Modelle anhand weiterer Diskussionen und der Durchführung zusätzlicher Fallstudien.

Hinsichtlich der im Rahmen des Projekts aufgebauten **Auslandskooperation** ist ein weiterer Ausbau auch nach Projektende geplant. In Kooperation mit der University of Michigan befindet sich ein Projekt zur Identifikation globaler Emissionsreduktionspfade in Beantragung. Weiterhin ist die Fortführung des Austauschs wissenschaftlicher Mitarbeiter zur Intensivierung der gemeinsamen Forschungstätigkeit geplant. Gleiches gilt für den Kontakt zur Tongji Universität. Auch hier soll im Rahmen des Austauschs wissenschaftlichen Personals eine Weiterentwicklung der Forschung zu alternativen Antriebstechnologien in beiden Ländern führen. Zusätzlich ist der Abschluss eines gemeinsamen Doppel-Master-Abkommens geplant.

IV.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

In Arbeitsphase A (Politik) kam es zu keinen Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben. Im Bereich des Herstellerverhaltens (Arbeitsphase B) wurde von der im Projektantrag dargestellten Idee eines Optimierungsmodells zur Ermittlung des Fahrzeugportfolios Abstand genommen. Der Grund hierfür liegt in den zahlreichen Unsicherheiten hinsichtlich der technologischen Entwicklung. Weiterhin sind die mit einem Fahrzeugportfolio realisierbaren Absatzzahlen bzw. Erfolge von zahlreichen weiteren Faktoren (Wettbewerberverhalten, Entwicklungen der Marktumwelt,…) abhängig. Eine Überführung der Entscheidungssituation in ein Optimierungsmodell würde daher mit einem hohen Informationsverlust einhergehen. Vor diesem Hintergrund wurde der Weg der simulationsbasierten Analyse gewählt, deren Ziel weniger in der Ermittlung eines optimalen Fahrzeugangebots besteht, sondern vielmehr in der Schaffung eines Verständnisses für die Wirkungsweise des Automobilmarkts und die darin bestehenden Zusammenhänge.

Im Bereich des Nachfragerverhaltens (Arbeitsphase C) sollten laut Projektantrag die zeitliche Entwicklung von Präferenzen, Elastizitäten und Übergangswahrscheinlichkeiten Berücksichtigung finden. Da für eine Ermittlung der zeitlichen Entwicklung umfangreiche empirische Analysen nötig wären, die bislang nicht vorliegen, wurde der zeitlichen Veränderbarkeit der Präferenzen durch Berücksichtigung von Marketing und Mundpropaganda Rechnung getragen. Umfangreiche Sensitivitätsanalysen hinsichtlich verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten der Kommunikationsstrukturen wurden durchgeführt und zeigen notwendige Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten auf.

Im Rahmen der Wirkungsanalyse (Arbeitsphase D) musste von dem Ziel der integrierten Bewertung der Marktentwicklung im Hinblick auf soziale Parameter Abstand genommen werden, da keine Informationen hierfür verfügbar waren. Begründet liegt dies insbesondere in der Diskrepanz zwischen der qualitativen Natur der sozialen Bewertungskriterien und der quantitativen Natur des Simulationsmodells. Durch die Bewertung der monetären Auswirkungen der einzelnen Strategien auf den Kunden konnte im Rahmen des Modells jedoch ein erster Schritt zur Berücksichtigung sozialer Auswirkungen getan werden.

IV.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Nach Projektabschluss bietet der geplante Transfer-Workshop (16.12.2013) noch einmal die Möglichkeit, die Ergebnisse des Projektes vor Experten (Unternehmen, Politik, Verbände, Wissenschaft) zu präsentieren und im Anschluss zu diskutieren. Des Weiteren bleibt die Möglichkeit bestehen, zukünftige Veröffentlichungen auf der Homepage des STROM-Projektes zu platzieren (http://www.strom-nachhaltigkeit.de).

IV.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Insgesamt wurde das Projekt von Seiten der TUBS fristgerecht zum 31.05.2013 fertiggestellt. Die Bearbeitungszeit des Projekts von Seiten der RWTH Aachen University wurde um fünf Monate bis zum 31.10.2013 kostenneutral verlängert. In diesem Rahmen wurde das Projekt fristgerecht beendet. Im Projektverlauf ergaben sich Anpassung hinsichtlich der drei geplanten Workshops und inhaltliche Verschiebungen zwischen einzelnen Arbeitspaketen. Dies führte jedoch zu keinen Änderungen in der Ausgabenplanung.

IV.6.1 Workshops

Der für März 2011 geplante Workshop zur Diskussion des akteursspezifischen Entscheidungsverhaltens wurde auf September 2011 verschoben. Grund für die Verschiebung war der Wunsch, die entwickelten Modelle in einem weiter fortgeschrittenen Stadium zu diskutieren. Der Workshop fand am 09. September 2011 in Wolfsburg statt.

Der für März 2012 geplante Workshop zur Diskussion der entwickelten Modelle der Arbeitsphasen wurde auf Oktober 2012 verschoben. Weiterhin wurde das Thema des Workshops geändert, so dass die Modellierung und Bewertung der Marktdurchdringung alternativer Antriebe in der Volksrepublik China im Vordergrund stand. Der Workshop fand am 01. Oktober 2012 in Wolfsburg statt.

Der für Januar 2013 geplante Workshop wurde auf September 2013 verschoben. Grund hierfür war die verlängerte Bearbeitungszeit des Arbeitspakets zur Wirkungsabschätzung. Der Workshop fand projektintern am 30. September 2013 in Braunschweig statt.

Der Transfer-Workshop unter Beteiligung von Multiplikatoren aus Wirtschaft, Verbänden und Politik wird am 16. Dezember 2013 in Braunschweig stattfinden.

IV.6.2 Arbeitspakete

Arbeitspaket A2 wurde bereits vorzeitig, im Dezember 2011, abgeschlossen. Dies kam einem höheren Zeitbedarf bei der Bearbeitung von Arbeitspaket A3 zu gute. Dieses konnte in Folge fristgerecht abgeschlossen werden.

Entgegen dem ursprünglichen Zeitplan wurde die Laufzeit des Arbeitspaketes B1 verlängert. Dies ergab sich aus dem Ansatz, die Technologiebewertung direkt in das in Arbeitspaket B3 entwickelte Simulationsmodell einfließen zu lassen, so dass beide Arbeitspakete über einige Monate hinweg parallel bearbeitet wurden.

Aus inhaltlichen Gründen wurde die endgültige Festlegung der Segmentierungskriterien in Arbeitspaket C1 nach hinten verschoben, um Ergebnisse der Arbeitspakete C2 und C3 einfließen zu lassen. Weiterhin wurde mit Arbeitspaket C3 bereits während Arbeitspaket C2 begonnen, so dass beide Arbeitspakete parallel bearbeitet wurden. Grund hierfür war die zeitaufwendige Erarbeitung einer Datengrundlage für den chinesischen Markt.

Im Hinblick auf das Arbeitspaket D1 ergab sich eine zeitliche Anpassung um fünf Monate. So konnte die entwickelte Technologie-Datenbank mit Informationen über alle Kriterien und alternativen Antriebe in ihrer Struktur optimiert und weitere Informationen in die Datenbank integriert werden.

In Arbeitspaket D2 kam es zu zeitlichen Anpassungen, aufgrund der Verzögerungen in den Projektbereichen B und C. Des Weiteren ergab sich in der Modellgestaltung eine zeitliche Anpassung, die auf die projektübergreifende Standardisierung der Software zur Modellierung zurückzuführen war. Entsprechend ergab sich auch für das Arbeitspaket D3 eine Anpassung im Vergleich zum vorgesehenen Zeitplan, da hier Ergebnisse aus D1 und D2 benötigt wurden. Zusätzlich führte die nachträglich beschlossene Erweiterung der Antriebskonzepte (um Gas- und Wasserstoffantriebe) zu einem erhöhten Zeitaufwand im Rahmen der Erstellung der Datengrundlage. Die Bearbeitungszeit des Projekts von Seiten der RWTH Aachen Uni-

versity wurde um fünf Monate bis zum 31.10.2013 kostenneutral verlängert. In diesem Rahmen wurde das Projekt fristgerecht beendet.

Der realisierte Zeitplan kann der folgenden Abbildung 21 entnommen werden. Die Abweichungen zum Projektantrag sind farbig gekennzeichnet.

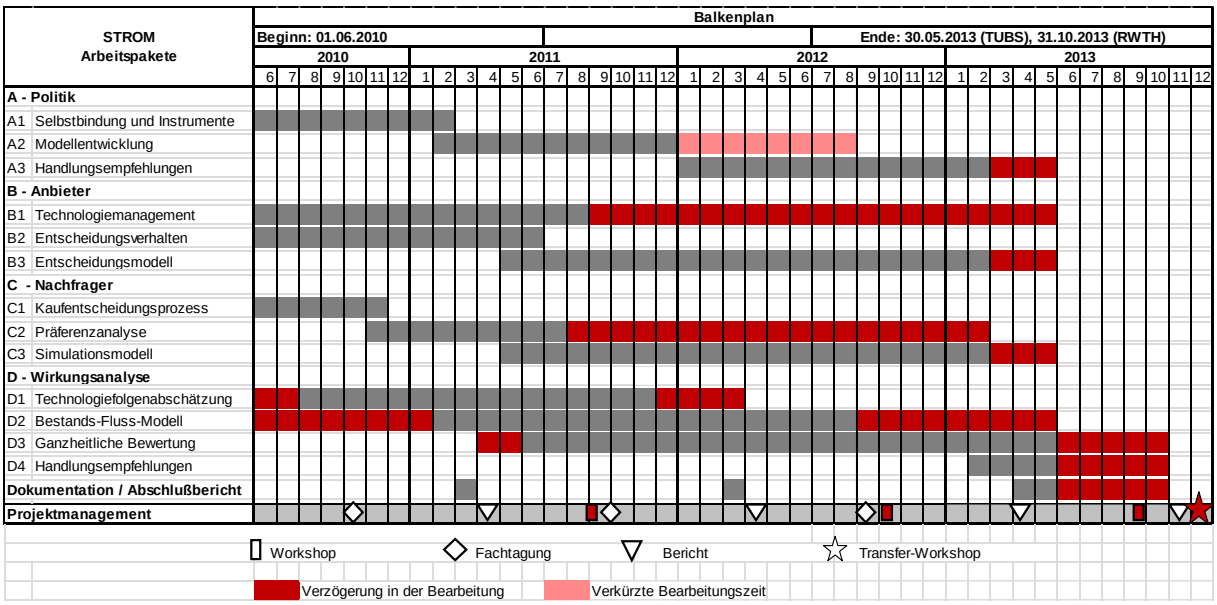


Abbildung 21: Realisierter Zeitplan des STROM-Projekts

V. Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN n/a	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht für das Verbundvorhaben „STROM - Strategische Optionen der Automobilindustrie zur Maßnahmenallokation für die Migration nachhaltiger Antriebstechnologien in etablierten und aufstrebenden Märkten“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Spengler, Thomas, S.; Kieckhäfer, Karsten; Wachter, Katharina; Herrmann, Christoph; Mennenga, Mark; Sieg, Gernot; Kratzsch, Uwe; Dietrich, Antje-Mareike; Walther, Grit; Hombach, Laura; Heise, Gilbert; Jorissen, Jens	5. Abschlussdatum des Vorhabens Mai bzw. Oktober 2013 6. Veröffentlichungsdatum November 2013 7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Braunschweig Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, Lehrstuhl für Produktion und Logistik (PL) Katharinenstraße 3, 38106 Braunschweig Technische Universität Braunschweig Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) Langer Kamp 19 B, 38106 Braunschweig Technische Universität Braunschweig Institut für Volkswirtschaftslehre Spielmannstraße 9, 38106 Braunschweig Rheinisch-Westfälische Technische Universität Aachen Lehrstuhl für Operations Management Kackertstr. 7, 52072 Aachen Volkswagen AG Konzern-Marktforschung, Trendforschung und Analysen Berliner Ring 2, 38436 Wolfsburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution n/a 10. Förderkennzeichen 01UN1006A (TUBS) 01UN1006B (RWTH) 11. Seitenzahl 69
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 170 14. Tabellen 3 15. Abbildungen 21
16. Zusätzliche Angaben n/a	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) n/a	

18. Kurzfassung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Endlichkeit fossiler Ressourcen stellen alternativ angetriebene Fahrzeuge wie Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge eine vielversprechende Option dar, individuelle Mobilität nachhaltig zu gestalten. Aussagen darüber, ob und wann sich diese Fahrzeuge im Markt durchsetzen und mit welchen ökonomischen, ökologischen und sozialen Konsequenzen dies verbunden ist, erweisen sich jedoch als schwierig. Dies liegt zum einen an der unsicheren technologischen Entwicklung der Antriebskonzepte und zum anderen an den Unsicherheiten hinsichtlich des zukünftigen Verhaltens von politischen Entscheidungsträgern, Automobilherstellern und Fahrzeugkäufern.

Vor diesem Hintergrund bestand das Ziel des STROM-Projekts darin, mögliche Szenarien für die zukünftige Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien zu ermitteln und die damit verbundenen Auswirkungen aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu analysieren. Dabei standen sowohl der gesättigte deutsche als auch der wachsende chinesische Markt im Zentrum der Untersuchung.

Zu diesem Zweck wurden im STROM-Projekt Modelle zur Abbildung des Entscheidungsverhaltens der Akteure des Automobilmarkts (Politik, Hersteller, Nachfrager) entwickelt. Diese wurden in einem iterativen Prozess in einem übergeordneten Gesamtmodell zur Wirkungsanalyse integriert. Das Modell stellt eine Kombination aus agentenbasierter Simulation und System Dynamics dar und ermöglicht daher gleichzeitig die Berücksichtigung heterogenen Akteursverhaltens und der aggregierten Entwicklung des Gesamtsystems. Eine ganzheitliche Analyse der mit der Marktdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge verbundenen Auswirkungen wird dadurch möglich. Entsprechend stellen die Projektergebnisse eine wesentliche Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik dar, da bei Projektbeginn existierende Ansätze zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung im Wesentlichen intuitiv und methodisch ausbaufähig waren. Weiterhin wurden wesentliche Zusammenhänge und Interdependenzen vernachlässigt.

Die Ergebnisse des STROM-Projekts zeigen, dass alternativ angetriebene Fahrzeuge erst langfristig einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Gestaltung individueller Mobilität leisten können und kurzfristig auf die Verbesserung konventioneller Antriebe gesetzt werden muss. Um eine erfolgreiche Marktdurchdringung alternativ angetriebener Fahrzeuge zu ermöglichen, ist jedoch bereits jetzt ihre Förderung seitens Politik und Automobilherstellern nötig. Hierbei sollte insbesondere der Abbau der Hemmungen gegenüber den innovativen Technologien beispielsweise durch verstärkte Werbemaßnahmen von Seiten der Hersteller oder durch gezielte von der Politik geförderte „Erlebnisprojekte“ im Fokus stehen. Diese Erkenntnisse gelten sowohl für den etablierten deutschen als auch für den aufstrebenden chinesischen Markt.
Die im Projekt erzielten Erkenntnisse und entwickelten Modelle können im Weiteren sowohl von politischen Entscheidungsträgern als auch von Automobilherstellern zur Entscheidungsunterstützung und als Diskussionsgrundlage genutzt werden.

19. Schlagwörter

Alternative Antriebstechnologien, Marktentwicklung, nachhaltigkeitsorientierte Wirkungsanalyse ,Deutschland, China

20. Verlag	21. Preis
Technische Informationsbibliothek Hannover	n/a

VI. Literaturverzeichnis

Achtnicht, Martin; Bühler, Georg; Hermeling, Claudia (2012): The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17 (3), S. 262–269. DOI: 10.1016/j.trd.2011.12.005.

Al-Alawi, Baha M.; Bradley, Thomas H. (2013): Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, S. 190–203. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.048.

Armenia, Stefano; Baldoni, Fabrizio; Diego, Falsini; Taibi, Emanuele (2010): A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System. In: International System Dynamics Society (Hg.): Proceedings of the 28th International Conference of the System Dynamics Society. Seoul. Online verfügbar unter http://www.systemdynamics.org/conferences/2010/proceed/papers/P1322.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Athey, Susan; Atkeson, Andrew; Kehoe, Patrick J. (2005): The Optimal Degree of Discretion in Monetary Policy. In: *Econometrica* 73 (5), S. 1431–1475. DOI: 10.1111/j.1468-0262.2005.00626.x.

Batool, Irem; Sieg, Gernot (2009): Bread and the attrition of power: Economic events and German election results. In: *Public Choice* 141 (1-2), S. 151–165. DOI: 10.1007/s11127-009-9443-x.

Bohr, Philipp; Herrmann, Christoph; Luger, Tobias (2007): Extended producer responsibility and product design: Free market tools to establish a virtual design feedback loop. In: *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing* 13 (3/4), S. 48–60.

Böhret, Carl (2001): Handbuch Gesetzesfolgenabschätzung (GFA). Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften. Baden-Baden: Nomos.

Bosshardt, M.; Ulli-Beer, S.; Gassmann, Fritz; Wokaun, Alexander (2008): The effect of multi-incentive policies on the competition of drivetrain technologies. In: International System Dynamics Society (Hg.): Proceedings of 2008 International System Dynamics Conference. Athen. Online verfügbar unter http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/papers/BOSSH242.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Brownstone, David; Bunch, David S.; Train, Kenneth (2000): Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 34 (5), S. 315–338. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00031-4.

Buergel, Hans Dietmar; Reger, Guido; Ackel-Zakour, René (2009): Technologie-Früherkennung in multinationalen Unternehmen: Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. In: Martin Moehrle und Isenmann Ralf (Hg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 27–53. Online verfügbar unter http://download.springer.com/static/pdf/594/chp%253A10.1007%252F3-540-27282-8_3.pdf?auth66=1382694661_dbf4eeb8e4f1876f4f631ce5c923d910&ext=.pdf.

Bunch, David S.; Bradley, Mark; Golob, Thomas F.; Kitamura, Ryuichi; Occhiuzzo, Gareth P. (1993): Demand for clean-fuel vehicles in California: A discrete-choice stated preference pilot project. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 27 (3), S. 237–253. DOI: 10.1016/0965-8564(93)90062-P.

Bundesamt für Energie (2007): Lenkungsabgaben zur Senkung des CO2-Ausstosses beim Neuwagenkauf. Schlussbericht. Hg. v. Bundesamt für Energie. Bern (Energiewirtschaftliche Grundlagen).

Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität. Hg. v. Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/regierungsprogramm-elektromobilitaet,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf.

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2012a): Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Innovationsreport. Hg. v. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin. Online verfügbar unter https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab153.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2012b): Zukunft der Automobilindustrie. Innovationsreport. Hg. v. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin. Online verfügbar unter http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab152.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Carraro, Carlo; Siniscalco, Domenico (1993): Strategies for the international protection of the environment. In: *Journal of Public Economics* 52 (3), S. 309–328. DOI: 10.1016/0047-2727(93)90037-T.

Center of Economic Research at ETH Zürich (2010): Individual characteristics and stated preferences for alternative energy sources and propulsion technologies in vehicles. A discrete choice analysis. Hg. v. Center of Economic Research at ETH Zürich. Online verfügbar unter http://www.cer.ethz.ch/research/WP-10-125.pdf.

Dellink, Rob; Finus, Michael; Olieman, Niels (2008): The stability likelihood of an international climate agreement. In: *Environ Resource Econ* 39 (4), S. 357–377. DOI: 10.1007/s10640-007-9130-7.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2013): Der PKW-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt. Projektbericht. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Stuttgart. Online verfügbar unter http://elib.dlr.de/84131/, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Dietrich, Antje-Mareike; Sieg, Gernot (2011): Welfare Effects of Subsidizing a Dead-End Network of Less Polluting Vehicles, Braunschweig.

DIN (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006).

Eggert, Wilm (2003): Nachfragemodellierung und -prognose zur Unterstützung der langfristigen Absatzplanung am Beispiel der deutschen Automobilindustrie. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Institut für Statistik und Mathematische Wirtschaftstheorie (SMW). Online verfügbar unter http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/4002003.

eLCAR (2013): Guidelines for the LCA of electric vehicles. Hg. v. eLCAR. Online verfügbar unter http://www.elcar-project.eu/fileadmin/dokumente/Guideline_versions/eLCAr_guidelines.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Eppstein, Margaret J.; Grover, David K.; Marshall, Jeffrey S.; Rizzo, Donna M. (2011): An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles. In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3789–3802. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.04.007.

Europäische Kommission (15.01.2009): Leitlinien zur Folgenabschätzung. SEK(2009) 92, 2009. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/governance/impact/commission_guidelines/docs/iag_2009_de.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Europäische Union (23.04.2009): Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Verordnung (EG) Nr. 443/2009, 2009. Online verfügbar unter http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:DE:PDF.

European School of Management and Technology (Hg.) (2011): Marktmodell Elektromobilität. Berlin. Online verfügbar unter http://www.mmem.eu/assets/report/ESMT-Marktmodell-Elektromobilitaet-Bericht.pdf.

FC-Hy Guide (2011): Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H_2 Technologies. Hg. v. FC-Hy Guide. Online verfügbar unter http://www.fc-hyguide.eu/documents/10156/21d22f59-9a01-4b90-a526-537b169081a2, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Fichtner, Wolf (1999): Strategische Optionen der Energieversorger zur CO2-Minderung: Ein Energie- und Stoffflussmodell zur Entscheidungsunterstützung. Berlin: Erich Schmidt.

Fichtner, Wolf (2005): Emissionsrechte, Energie und Produktion. Verknappung der Umweltnutztung und produktionswirtschaftliche Planung. Berlin: Erich Schmidt (Technological economics, Bd. 61).

Französische Botschaft in Berlin (2008): Klimaschutz: Das französische Bonus-Malus System zum Kauf schadstoffarmer Autos. Online verfügbar unter http://www.ambafrance-de.org/Klimaschutz-Das-franzosische-Bonus.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/t/de/publikationen/TRM-LIB2030.pdf.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2012a): Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/t/de/publikationen/PRM-LIB2030.pdf.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2012b): Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/t/de/publikationen/TRM-ESEM-2030.pdf.

Froyn, Camilla Bretteville; Hovi, Jon (2008): A climate agreement with full participation. In: *Economics Letters* 99 (2), S. 317–319. DOI: 10.1016/j.econlet.2007.07.013.

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Hg. v. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_2.pdf.

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (2012): Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht). Hg. v. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_3_bf.pdf.

Greaker, Mads; Heggedal, Tom-Reiel (2010): Lock-In and the Transition to Hydrogen Cars: Should Governments Intervene? In: *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy* 10 (1). DOI: 10.2202/1935-1682.2406.

Guertler, Marc; Sieg, Gernot (2010): Crunch Time: A Policy to Avoid the "Announcement Effect" when Terminating a Subsidy. In: *German Economic Review* 11 (1), S. 25–36. DOI: 10.1111/j.1468-0475.2009.00463.x.

Gül, Timur; Kypreos, Socrates; Turton, Hal; Barreto, Leonardo (2009): An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for personal transport using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM). In: *Energy* 34 (10), S. 1423–1437. DOI: 10.1016/j.energy.2009.04.010.

Guseo, Renato; Mortarino, Cinzia (2012): Sequential market entries and competition modelling in multi-innovation diffusions. In: *European Journal of Operational Research* 216 (3), S. 658–667. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.08.018.

Hao, Han; Wang, Hewu; Ouyang, Minggao (2011a): Comparison of policies on vehicle ownership and use between Beijing and Shanghai and their impacts on fuel consumption by passenger vehicles. In: *Energy Policy* 39 (2), S. 1016–1021. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.11.039.

Hao, Han; Wang, Hewu; Ouyang, Minggao (2011b): Fuel conservation and GHG (Greenhouse gas) emissions mitigation scenarios for China's passenger vehicle fleet. In: *Energy* 36 (11), S. 6520–6528. DOI: 10.1016/j.energy.2011.09.014.

Hao, Han; Wang, Hewu; Ouyang, Minggao; Cheng, Fei (2011c): Vehicle survival patterns in China. In: *Sci. China Technol. Sci.* 54 (3), S. 625–629. DOI: 10.1007/s11431-010-4256-1.

Hao, Han; Wang, Hewu; Yi, Ran (2011d): Hybrid modeling of China's vehicle ownership and projection through 2050. In: *Energy* 36 (2), S. 1351–1361. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.055.

Harstad, Bård (2012): The Dynamics of Climate Agreements. In: *SSRN Journal. DOI:* 10.2139/ssrn.1485838.

Hawkins, Troy R.; Gausen, Ola Moa; Strømman, Anders Hammer (2012): Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (8), S. 997–1014. DOI: 10.1007/s11367-012-0440-9.

Hawkins, Troy R.; Singh, Bhawna; Majeau-Bettez, Guillaume; Strømman, Anders Hammer (2013): Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. In: *Journal of Industrial Ecology* 17 (1), S. 53–64. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.

Hayashi, Y.; Kato, H.; Teodoro, R.V.R. (2001): An Analysis of the Effects of Car and Fuel Taxes on CO2 Emissions in Japan and Germany. In: Daniel Sperling und Kenneth S. Kurani (Hg.): Transportation, energy, and environmental policy. VIII biennial Asilomar Conference, September 11-12, 2001. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies (Transportation Research Board miscellaneous report), S. 229–251.

He, Ling-Yun; Chen, Yu (2013): Thou shalt drive electric and hybrid vehicles: Scenario analysis on energy saving and emission mitigation for road transportation sector in China. In: *Transport Policy* 25, S. 30–40. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.11.006.

Herrmann, Christoph; Hesselbach, Jürgen; Bock, Ralf; Zein, André; Öhlschläger, Gerlind; Dettmer, Tina (2007): Ecologically Benign Lubricants – Evaluation From a Life Cycle Perspective. In: *Clean Soil Air Water* 35 (5), S. 427–432. DOI: 10.1002/clen.200720025.

Herrmann, Christoph; Kieckhäfer, Karsten; Mennenga, Mark; Skerlos, Steven J.; Spengler, Thomas S.; Stehr, Julian et al. (2012): A Framework to Analyze the Reduction Potential of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions of Passenger Cars. In: David A. Dornfeld und Barbara S. Linke (Hg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 55–60.

Hesselbach, Jürgen; Herrmann, Christoph; Luger, Tobias (2007): Assessment of Recyclability. In: Günther Seliger (Hg.): Sustainability in Manufacturing. Recovery of Resources in Product and Material Cycles. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 90–103.

Hidrue, Michael K.; Parsons, George R.; Kempton, Willett; Gardner, Meryl P. (2011): Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. In: *Resource and Energy Economics* 33 (3), S. 686–705. DOI: 10.1016/j.reseneeco.2011.02.002.

Hirte, Georg; Tscharaktschiew, Stefan: The optimal subsidy on electric vehicles in a metropolitan area - a SCGE study for Germany. In: ERSA conference papers ersa12p324, S. ersa12p324. Online verfügbar unter http://www-sre.wu.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa12/e120821aFinal00326.pdf, zuletzt geprüft am 27.11.2013.

Hu, Xiaojun; Chang, Shiyan; Li, Jingjie; Qin, Yining (2010): Energy for sustainable road transportation in China: Challenges, initiatives and policy implications. In: *Energy* 35 (11), S. 4289–4301. DOI: 10.1016/j.energy.2009.05.024.

Huo, Hong; He, Kebin; Wang, Michael Q.; Yao, Zhiliang (2012a): Vehicle technologies, fuel-economy policies, and fuel-consumption rates of Chinese vehicles. In: *Energy Policy* 43, S. 30–36. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.064.

Huo, Hong; Wang, Michael Q. (2012): Modeling future vehicle sales and stock in China. In: *Energy Policy* 43, S. 17–29. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.063.

Huo, Hong; Wang, Michael Q.; Zhang, Xiliang; He, Kebin; Gong, Huiming; Jiang, Kejun et al. (2012b): Projection of energy use and greenhouse gas emissions by motor vehicles in China: Policy options and impacts. In: *Energy Policy* 43, S. 37–48. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.065.

Huo, Hong; Yao, Zhiliang; He, Kebin; Yu, Xin (2011): Fuel consumption rates of passenger cars in China: Labels versus real-world. In: *Energy Policy* 39 (11), S. 7130–7135. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.031.

Huo, Hong; Zhang, Qiang; He, Kebin; Yao, Zhiliang; Wang, Michael Q. (2012c): Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend. In: *Energy Policy* 43, S. 6–16. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.019.

Huo, Hong; Zhang, Qiang; Wang, Michael Q.; Streets, David G.; He, Kebin (2010): Environmental Implication of Electric Vehicles in China. In: *Environ. Sci. Technol.* 44 (13), S. 4856–4861. DOI: 10.1021/es100520c.

ICCT (Hg.) (2011): A Review and Comparative Analysis of Fiscal Policies Associated with New Passenger Vehicle CO2 Emissions. Online verfügbar unter http://www.theicct.org/review-and-comparative-analysis-fiscal-policies, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

ICCT (2012): The New Passenger Car Fleet in China 2010. Technology Assessment and International Comparisons. Hg. v. ICCT. Washington, DC. Online verfügbar unter http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_New_Passenger_Car_Fleet_China_2010.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2006): Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung. Hg. v. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU-BTL-Studie-FNR.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2007): Elektromobilität und erneuerbare Energien. Hg. v. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://ifeu.de/energie/pdf/Arbeitspapier5_%20Elektromobilitaet%20und%20erneuerbare%20Energien.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2008): Bioenergie aus Getreide und Zuckerrübe: Energie- und Treibhausgasbilanzen. Hg. v. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU%20-%20Bioenergie%20LAB%20-%20Kurzversion.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2009): Abwrackprämie und Umwelt. Eine erste Bilanz. Hg. v. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ifeu_abwrackpraemie_bf.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2011a): UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Ergebnisbericht. Hg. v. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.emobil-umwelt.de/images/ergebnisbericht/ifeu_(2011)_-_UMBReLA_ergebnisbericht.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2011b): UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. Hg. v. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.emobil-umwelt.de/images/pdf/ifeu_(2011)_-_UMBReLA_grundlagenbericht.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Institut für sozial-ökologische Forschung (2011): Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos. Arbeitspaket 1 des Projekts OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Hg. v. Institut für sozial-ökologische Forschung. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/oekodoc/1337/2011-001-de.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

Institute for Energy and Environment; Baltic Renewable Energy Centre, Institute for Fuels and Renewable Energy (2007): Biomass provision costs. Final report. Hg. v. Institute for Energy and Environment und Baltic Renewable Energy Centre, Institute for Fuels and Renewable Energy.

Janssen, Arthur; Lienin, Stephan F.; Gassmann, Fritz; Wokaun, Alexander (2006): Model aided policy development for the market penetration of natural gas vehicles in Switzerland. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40 (4), S. 316–333. DOI: 10.1016/j.tra.2005.06.006.

Jühling, E.; Torney, M.; Herrmann, Christoph; Dröder, K. (2009): Framework for the Integration of Service and Technology Strategies. In: Cranfield University (Hg.): Proceedings of the 1st CIRP Industrial Product-Service Systems (IPS2) Conference, S. 132–139.

Kerdoncuff, Pierre (2008): Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung. Online verfügbar unter http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000009255, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Kieckhäfer, Karsten (2013): Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios. Dargestellt am Beispiel innovativer Antriebe in der Automobilindustrie. Dordrecht: Springer.

Kieckhäfer, Karsten; Wachter, Katharina; Spengler, Thomas S. (2012): Automobilmarktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios im Übergang zur Elektromobilität. In: Heike Proff, Jörg Schönharting, Dieter Schramm und Jürgen Ziegler (Hg.): Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 231–243.

Kirchgässner, Gebhard; Schneider, Friedrich (2003): On the Political Economy of Environmental Policy. In: *Public Choice* 115 (3/4), S. 369–396. DOI: 10.1023/A:1024289627887.

Kirkpatrick, C. H.; George, Clive (2007): Impact assessment and sustainable development. European practice and experience. Cheltenham, Northampton: Elgar (Evaluating sustainable development).

Klasen, Jörg; Neumann, Donald (2011): An agent-based method for planning innovations. In: *International Journal of Innovation and Sustainable Development* 5 (2/3), S. 15–184. Online verfügbar unter http://inderscience.metapress.com/content/kg882l221336x442/, zuletzt geprüft am 30.10.2013.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (05.06.2002): Mitteilung der Kommission über Folgenabschätzung. KOM(2002) 276 endgültig, 2002. Online verfügbar unter http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0276:FIN:DE:PDF.

Konietzko, Stella; Gernuks, Marko (2011): Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen. Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt. Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen. Hg. v. Stella Konietzko und Marko Gernuks. Online verfügbar unter http://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/bericht-ressourcenverfuegbarkeit-projektuebergreifend.pdf.

KPMG (Hg.) (2010): The Transformation of the Automotive Industry: The Environmental Regulation Effect. Online verfügbar unter http://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/transformation-automotive-industry.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

Kratzsch, Uwe; Sieg, Gernot; Stegemann, Ulrike (2011): A Full Participation Agreement on Global Emission Reduction through Strategic Investments in R&D. In: *Economics Research International* 2011 (3), S. 1–6. DOI: 10.1155/2011/318523.

Kratzsch, Uwe; Sieg, Gernot; Stegemann, Ulrike (2012): An international agreement with full participation to tackle the stock of greenhouse gases. In: *Economics Letters* 115 (3), S. 473–476. DOI: 10.1016/j.econlet.2011.12.107.

Krishnan, Vish; Lacourbe, Paul (2011): Designing Product Lines with Higher Aggregate Environmental Quality. In: *SSRN Journal. DOI:* 10.2139/ssrn.1744301.

Kwade, Arno; Bärwaldt, Gunnar (2012): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. im Rahmen des FuE-Programms "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität". Hg. v. Arno Kwade und Gunnar Bärwaldt. Braunschweig. Online verfügbar unter http://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/abschlussbericht-lithorec.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Kwon, Tae-hyeong (2012): Strategic niche management of alternative fuel vehicles: A system dynamics model of the policy effect. In: *Technological Forecasting and Social Change* 79 (9), S. 1672–1680. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.05.015.

Kydland, Finn E.; Prescott, Edward C. (1977): Rules Rather than Discretion: The Inconsistency of Optimal Plans. In: *Journal of Political Economy* 85 (3), S. 473–492. Online verfügbar unter http://www.jstor.org/stable/1830193.

Leung, Vivian (2011): Slow diffusion of LPG vehicles in China—Lessons from Shanghai, Guangzhou and Hong Kong. In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3720–3731. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.03.081.

Li, Tao; Liu, Zhi-Chao; Zhang, Hong-Chao; Jiang, Qiu-Hong (2013): Environmental emissions and energy consumptions assessment of a diesel engine from the life cycle perspective. In: *Journal of Cleaner Production* 53, S. 7–12. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.04.034.

Liu, Yimin; Helfand, Gloria E. (2009): The Alternative Motor Fuels Act, alternative-fuel vehicles, and greenhouse gas emissions. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 43 (8), S. 755–764. DOI: 10.1016/j.tra.2009.07.005.

Mayer, Eric; Stähler, Nikolai (2013): The debt brake: business cycle and welfare consequences of Germany's new fiscal policy rule. In: *Empirica* 40 (1), S. 39–74. DOI: 10.1007/s10663-011-9177-0.

Mc Kinsey & Company (Hg.) (2011): Boost! Transforming the powertrain value chain - a portfolio challenge.

Meyer, Grischa (2009): Analyse und technisch-ökonomische Bewertung von Gesetzesfolgen im Individualverkehr – dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie Japans und Deutschlands. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Institut für Automobilwirtschaft und

Industrielle Produktion. Online verfügbar unter http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/receive/DocPortal_document_00031582, zuletzt geprüft am 08.11.2013.

Meyer, Patrick E.; Winebrake, James J. (2009): Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure. In: *Technovation* 29 (2), S. 77–91. DOI: 10.1016/j.technovation.2008.05.004.

Ministry of Finance Japan (2008): FY2009 Tax Reform (Main Points). Online verfügbar unter http://www.mof.go.jp/english/tax_policy/tax_reform/fy2009/tax2009a.pdf.

Mock, Peter (2010): Entwicklung eine Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR 21). Köln.

Morgan, Leslie Olin; Daniels, Richard L. (2001): Integrating product mix and technology adoption decisions: a portfolio approach for evaluating advanced technologies in the automobile industry. In: *Journal of Operations Management* 19 (2), S. 219–238. DOI: 10.1016/S0272-6963(00)00058-9.

Mueller, Michel G.; Haan, Peter de (2009): How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars: Part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation. In: *Energy Policy* 37 (3), S. 1072–1082. Online verfügbar unter http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508006599.

Nishihara, Michi (2010): Hybrid or electric vehicles? A real options perspective. In: *Operations Research Letters* 38 (2), S. 87–93. DOI: 10.1016/j.orl.2009.11.004.

OECD/IEA (Hg.) (2012): Improving the Fuel Economy of Road Vehicles – A policy package. Online verfügbar unter http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,31268,en.html, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

Offer, G. J.; Contestabile, M.; Howey, D. A.; Clague, R.; Brandon, N. P. (2011): Techno-economic and behavioural analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system in the UK. In: *Energy Policy* 39 (4), S. 1939–1950. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.01.006.

Offer, G. J.; Howey, D. A.; Contestabile, M.; Clague, R.; Brandon, N. P. (2010): Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. In: *Energy Policy* 38 (1), S. 24–29. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.08.040.

Öko-Institut e.V. (2010): CO2-Einsparpotenziale für Verbraucher. Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/oekodoc/1029/2010-081-de.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Öko-Institut e.V. (2011a): Marktpotenziale und CO2-Bilanz von Elektromobilität. Arbeitpakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg.

Öko-Institut e.V. (2011b): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/oekodoc/1500/2011-068-de.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Öko-Institut e.V. (2011c): Ökonomische Betrachtung der Speichermedien. Arbeitspaket 6 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/das_institut/team/dok/630.php?id=157&dokid=1339&anzeige=det&ITitel1=&IAutor1=, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

Öko-Institut e.V. (2011d): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/oekodoc/1342/2011-004-de.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Öko-Institut e.V. (2011e): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/oekodoc/1334/2011-449-de.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

Onozaki, Tamotsu; Sieg, Gernot; Yokoo, Masanori (2000): Complex dynamics in a cobweb model with adaptive production adjustment. In: *Journal of Economic Behavior & Organization* 41 (2), S. 101–115. DOI: 10.1016/S0167-2681(99)90059-8.

Onozaki, Tamotsu; Sieg, Gernot; Yokoo, Masanori (2003): Stability, chaos and multiple attractors: a single agent makes a difference. In: *Journal of Economic Dynamics and Control* 27 (10), S. 1917–1938. DOI: 10.1016/S0165-1889(02)00090-8.

Ou, Xunmin; Zhang, Qian; Zhang, Xu; Zhang, Xiliang (2013): China' New Energy Passenger Vehicle Development Scenario Analysis Based on Life Time Cost Modelling. In: *LCE* 04 (02), S. 71–79. DOI: 10.4236/lce.2013.42008.

Ou, Xunmin; Zhang, Xiliang; Chang, Shiyan (2010a): Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. In: *Energy Policy* 38 (1), S. 406–418. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.09.031.

Ou, Xunmin; Zhang, Xiliang; Chang, Shiyan (2010b): Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: Life-cycle energy demand and GHG emissions. In: *Energy Policy* 38 (8), S. 3943–3956. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.03.018.

Pasaoglu, Guzay; Honselaar, Michel; Thiel, Christian (2012): Potential vehicle fleet CO2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. In: *Energy Policy* 40, S. 404–421. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.10.025.

Pauliuk, Stefan; Dhaniati, Ni Made A.; Müller, Daniel B. (2012): Reconciling Sectoral Abatement Strategies with Global Climate Targets: The Case of the Chinese Passenger Vehicle Fleet. In: *Environ. Sci. Technol.* 46 (1), S. 140–147. DOI: 10.1021/es201799k.

Peters, Anja; Mueller, Michel G.; Haan, Peter de; Scholz, Roland W. (2008): Feebates promoting energy-efficient cars: Design options to address more consumers and possible counteracting effects. In: *Energy Policy* 36 (4), S. 1355–1365. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.12.015.

Popp, David (2006): R&D Subsidies and Climate Policy: Is There a "Free Lunch"? In: *Climatic Change* 77 (3-4), S. 311–341. DOI: 10.1007/s10584-006-9056-z.

Qian, Lixian; Soopramanien, Didier (2011): Heterogeneous consumer preferences for alternative fuel cars in China. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16 (8), S. 607–613. DOI: 10.1016/j.trd.2011.08.005.

Raasch, Christina; Schneider, Arne S.; Friedl, Gunther (2007): Strategic portfolio planning in industries with long R&D cycles and interrelated product offerings: a practical approach to optimisation. In: *International Journal of Technology Intelligence and Planning* 3 (3), S. 271–291. Online verfügbar unter http://inderscience.metapress.com/content/u67021508691111p/.

Rand, William; Rust, Roland T. (2011): Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor. In: *International Journal of Research in Marketing* 28 (3), S. 181–193. DOI: 10.1016/j.ijresmar.2011.04.002.

Roland Berger (2009): Powertrain 2020 - The Future Drives Electric. Hg. v. Roland Berger.

Ryan, Lisa; Ferreira, Susana; Convery, Frank (2009): The impact of fiscal and other measures on new passenger car sales and CO2 emissions intensity: Evidence from Europe. In: *Energy Economics* 31 (3), S. 365–374. DOI: 10.1016/j.eneco.2008.11.011.

Schneider, Arne S. (2006): Die strategische Planung des Produktportfolios bei Automobilherstellern. Konzeption eines Instruments zur Bewertung des Cycle-Plans. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos (Controlling und Management, 1).

Schulz, Wolfgang H. (2004): Industrieökonomik und Transportsektor. Marktdynamik und Marktanpassungen im Güterverkehr. Köln: Kölner Wiss.-Verl.

Shafiei, Ehsan; Thorkelsson, Hedinn; Ásgeirsson, Eyjólfur Ingi; Davidsdottir, Brynhildur; Raberto, Marco; Stefansson, Hlynur (2012): An agent-based modeling approach to predict the evolution of market share of electric vehicles: A case study from Iceland. In: *Technological Forecasting and Social Change* 79 (9), S. 1638–1653. DOI: 10.1016/j.techfore.2012.05.011.

Shepherd, Simon; Bonsall, Peter; Harrison, Gillian (2012): Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study. In: *Transport Policy* 20, S. 62–74. DOI: 10.1016/j.tranpol.2011.12.006.

Shiau, Ching-Shin (2011): Design decision making for market systems and environmental policy with. [S.l.]: Proquest, Umi Dissertatio.

Sieg, Gernot (1997): A model of partisan central banks and opportunistic political business cycles. In: *European Journal of Political Economy* 13 (3), S. 503–516. DOI: 10.1016/S0176-2680(97)00019-0.

Sieg, Gernot (2001): A political business cycle with boundedly rational agents. In: *European Journal of Political Economy* 17 (1), S. 39–52. DOI: 10.1016/S0176-2680(00)00027-6.

Spengler, Thomas S.; Walther, Grit (2005): Wertschöpfungsnetzwerke zur Umsetzung der WEEE-Richtline durch KMU – Handlungsempfehlungen an umweltpolitische Entscheidungsträger. In: *UmweltWirtschaftsForum* 13 (3), S. 49–54.

State of California (2008): The California Low-Emission Vehicle Regulations (With Amendments Effective January 4, 2008). Online verfügbar unter http://internetbeta.dep.state.fl.us/air/rules/ghg/california/62-285_rules_080908.pdf.

Sterman, John D. (2000): Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. [Nachdr.]. Boston: Irwin/McGraw-Hill.

Strecker, Bryan; Hausmann, Austin; Depcik, Christopher (2013): Well to Wheels Energy and Emissions Analysis of a Recycled 1974 VW Super Beetle Converted into a Plug-in Series Hybrid Electric Vehicle. In: *Journal of Cleaner Production. DOI:* 10.1016/j.jclepro.2013.04.030.

Strohhecker, Jürgen (Hg.) (2008): System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verl. Online verfügbar unter http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2826486&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

Struben, Jeroen; Sterman, John D. (2008): Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. In: *Environ. Plann. B* 35 (6), S. 1070–1097. DOI: 10.1068/b33022t.

Struwe, Robin (2011): Kundenpräferenzen im Spannungsfeld technologischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Herausforderungen am Anbeginn einer Zeitenwende in der Automobilindustrie. Eine Analyse mit dem Blick auf die Reduktion von CO2-Emissionen. Berlin: Logos Berlin (AutoUni-Schriftenreihe, 19).

Sullivan, J. L.; Salmeen, I. T.; Simon, C. P. (2009): PHEV Marketplace Penetration. An Agent Based Simulation. University of Michigan. Online verfügbar unter http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/63507/102307.pdf?sequence=1, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Sweda, Timothy; Klabjan, Diego (2011): An agent-based decision support system for electric vehicle charging infrastructure deployment. In: IEEE (Hg.): Proceedings of the 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Chicago, IL, USA. Chicago, S. 1–5. Online verfügbar unter http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6043201, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

The Boston Consulting Group (Hg.) (2011): Powering Autos to 2020. The Era of the Electric Car? Boston, MA, USA. Online verfügbar unter http://www.bcg.de/documents/file80920.pdf.

Thiel, Christian; Perujo, Adolfo; Mercier, Arnaud (2010): Cost and CO2 aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. In: *Energy Policy* 38 (11), S. 7142–7151. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.07.034.

Transport & Mobility Leuven (2007): TREMOVE. Final Report. Hg. v. Transport & Mobility Leuven. Leuven. Online verfügbar unter http://www.tmleuven.be/methode/tremove/Final_Report_TREMOVE_9July2007c.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Turton, Hal (2006): Scenario and policy analysis of sustainable energy systems and automobile transportation. Dissertation. ETH Zuerich, Zuerich. Online verfügbar unter http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:29075?q=(keywords_en:FUEL%20TECHNOLOGY)&lang=de, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

UN Department of Economic and Social Affairs (Hg.) (2011): Global Overview of Fuel Efficiency and Motor Vehicle Emission Standards: Policy Options and Perspectives for International Cooperation. Online verfügbar unter http://www.un.org/esa/dsd/resources/res_pdfs/csd-19/Background-paper3-transport.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2013.

VDI (2000): VDI-Richtlinie 3780: Technikbewertung - Begriffe und Grundlage. Berlin: Beuth.

Volkswagen AG (2008): Der Golf - Umweltprädikat. Hg. v. Volkswagen AG. Wolfsburg. Online verfügbar unter

http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2008/09/umweltpraedikat_golf.bin.html/binarystorageitem/file/180908_Golf+VI_Umweltpraedikat.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Volkswagen AG (2009): Der Polo - Umweltprädikat. Hg. v. Volkswagen AG. Wolfsburg. Online verfügbar unter http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/umweltpraedikate/2009-09_vw_polo_umweltpraediktatdk5/_jcr_content/renditions/rendition.file/umweltpraedikate_par_0041_file.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013.

Volkswagen AG (2012): 0% Emissionen. 100% Emotionen. Auf dem Weg zur Elektromobilität. Hg. v. Volkswagen AG. Wolfsburg. Online verfügbar unter http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/Elektromobilitt/Null_Emissionen/_jcr_content/renditions/rendition.file/final_vw_emob_20120404_komplett_de.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2013.

Wachter, Katharina; Spengler, Thomas S. (2012): Innovation diffusion under competition: simulative strategy development for the introduction of alternatively powered vehicles. In: Student Chapter of the International System Dynamics Society (Hg.): PhD Colloquium - 2012 Proceedings. Unter Mitarbeit von Nicolas Escalante und Chris Browne. St. Gallen, Switzerland, 22.07.2012. Online verfügbar unter http://student.systemdynamics.org/wp/wp-content/ulf/colloquia/2012-proceedings/R1449.pdf, zuletzt geprüft am 14.11.2013.

Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt; Olschewski, Ingo (2009): Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden (ATZ-MTZ-Fachbuch).

Walther, Grit; Meyer, Grischa; Spengler, Thomas S.; Wansart, Jörg (2008a): Regulatory Impact Assessment for the Transportation Sector. Case Study Germany. Plenary Presentation. Annual International Conference of the System Dynamics Society. Athen, 20.07.2008.

Walther, Grit; Schmid, Eberhard; Spengler, Thomas S. (2007): Multi-agent systems for decision making in reverse logistics networks. In: KERP Center of Excellence Electronics & Environment (Hg.): Proceedings on the 2nd International Conference ECO-X 2007. Wien, S. 155–162.

Walther, Grit; Schmid, Eberhard; Spengler, Thomas S. (2008b): Negotiation-based coordination in product recovery networks. In: *International Journal of Production Economics* 111 (2), S. 334–350. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.12.069.

Walther, Grit; Wansart, Jörg; Kieckhäfer, Karsten; Schnieder, Eckehard; Spengler, Thomas S. (2010): Impact assessment in the automotive industry: mandatory market introduction of alternative powertrain technologies. In: *Syst. Dyn. Rev.* 26 (3), S. 239–261. DOI: 10.1002/sdr.453.

Wang, Haikun; Fu, Lixin; Bi, Jun (2011a): CO2 and pollutant emissions from passenger cars in China. In: *Energy Policy* 39 (5), S. 3005–3011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.03.013.

Wang, Yunshi; Teter, Jacob; Sperling, Daniel (2011b): China's soaring vehicle population: Even greater than forecasted? In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3296–3306. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.03.020.

Wang, Zhao; Jin, Yuefu; Wang, Michael Q.; Wei, Wu (2010): New fuel consumption standards for Chinese passenger vehicles and their effects on reductions of oil use and CO2 emissions of the Chinese passenger vehicle fleet. In: *Energy Policy* 38 (9), S. 5242–5250. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.05.012.

Wansart, Jörg (2012): Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO2-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe. Techn. Univ, Wiesbaden, Braunschweig.

Wansart, Jörg; Walther, Grit; Spengler, Thomas S. (2008): Limiting motor vehicles' CO2 emissions – a manufacturer's challenge. In: International System Dynamics Society (Hg.): Proceedings of 2008 International System Dynamics Conference. Athen.

Wansart, Jörg; Walther, Grit; Spengler, Thomas S. (2009): Modellbasierte Entwicklung von Strategien für die Umsetzung von Emissionsgesetzen im Automobilbereich. In: Frank Heyde (Hg.): Methods of multicriteria decision theory and applications. Aachen: Shaker (Industriemathematik und angewandte Mathematik), S. 205–228.

Weikl, Robert (2010): Simulationen zur Abschätzung der Marktanteilsentwicklung unterschiedlicher Antriebsvarianten am deutschen Fahrzeugmarkt. Techn. Univ, Chemnitz, Chemnitz.

Wesseling, J. H.; Faber, J.; Hekkert, M. P. (2013): How competitive forces sustain electric vehicle development. In: *Technological Forecasting and Social Change. DOI:* 10.1016/j.techfore.2013.02.005.

Whitefoot, Kate S.; Skerlos, Steven J. (2012): Design incentives to increase vehicle size created from the U.S. footprint-based fuel economy standards. In: *Energy Policy* 41, S. 402–411. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.10.062.

Wüstenhagen, Rolf; Sammer, Katharina (2007): Wirksamkeit umweltpolitischer Anreize zum Kauf energieeffizienter Fahrzeuge: eine empirische Analyse Schweizer Automobilkunden. In: *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung (Journal of Environmental Research)* 18 (1), S. 61–78. Online verfügbar unter https://www.alexandria.unisg.ch/publications/Rolf_Wuestenhagen/40497.

Yan, Xiaoyu; Crookes, Roy J. (2010): Energy demand and emissions from road transportation vehicles in China. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (6), S. 651–676. DOI: 10.1016/j.pecs.2010.02.003.

Yao, Mingfa; Liu, Haifeng; Feng, Xuan (2011): The development of low-carbon vehicles in China. In: *Energy Policy* 39 (9), S. 5457–5464. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.05.017.

Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (2008): Impact of service station networks on purchase decisions of alternative-fuel vehicles. Hg. v. Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung. Mannheim (ZEW Discussion Paper).

Zhang, Ting; Gensler, Sonja; Garcia, Rosanna (2011): A Study of the Diffusion of Alternative Fuel Vehicles: An Agent-Based Modeling Approach*. In: *Journal of Product Innovation Management* 28 (2), S. 152–168. DOI: 10.1111/j.1540-5885.2011.00789.x.

Zheng, Jie; Mehndiratta, Shomik; Guo, Jessica Y.; Liu, Zhi (2012): Strategic policies and demonstration program of electric vehicle in China. In: *Transport Policy* 19 (1), S. 17–25. DOI: 10.1016/j.tranpol.2011.07.006.

Zhou, Guanghui; Ou, Xunmin; Zhang, Xiliang (2013): Development of electric vehicles use in China: A study from the perspective of life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions. In: *Energy Policy* 59, S. 875–884. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.057.