

---

# Produktion und Logistik

## Herausgegeben von

B. Fleischmann, Augsburg, Deutschland

M. Grunow, München, Deutschland

H.-O. Günther, Berlin, Deutschland

S. Helber, Hannover, Deutschland

K. Inderfurth, Magdeburg, Deutschland

H. Kopfer, Bremen, Deutschland

H. Meyr, Hohenheim, Deutschland

Th. S. Spengler, Braunschweig, Deutschland

H. Stadtler, Hamburg, Deutschland

H. Tempelmeier, Köln, Deutschland

G. Wäscher, Magdeburg, Deutschland

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

### **Herausgegeben von**

Professor Dr. Bernhard Fleischmann  
Universität Augsburg

Professor Dr. Herbert Meyr  
Universität Hohenheim

Professor Dr. Martin Grunow  
Technische Universität München

Professor Dr. Thomas S. Spengler  
Technische Universität Braunschweig

Professor Dr. Hans-Otto Günther  
Technische Universität Berlin

Professor Dr. Hartmut Stadler  
Universität Hamburg

Professor Dr. Stefan Helber  
Universität Hannover

Professor Dr. Horst Tempelmeier  
Universität Köln

Professor Dr. Karl Inderfurth  
Universität Magdeburg

Professor Dr. Gerhard Wäscher  
Universität Magdeburg

Professor Dr. Herbert Kopfer  
Universität Bremen

### **Kontakt**

Professor Dr. Hans-Otto Günther  
Technische Universität Berlin  
H 95, Straße des 17. Juni 135  
10623 Berlin

---

Jörg Wansart

# Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe

Ein systemdynamischer Ansatz  
am Beispiel der kalifornischen Gesetz-  
gebung

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Thomas S. Spengler



Springer Gabler

RESEARCH

Jörg Wansart  
Braunschweig, Deutschland

Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2012

ISBN 978-3-8349-4498-6

ISBN 978-3-8349-4499-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-8349-4499-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-gabler.de](http://www.springer-gabler.de)

Für meine Eltern

## Geleitwort

Die in den letzten Jahren zu beobachtenden steigenden gesetzlichen Anforderungen an Automobilhersteller hinsichtlich der Reduktion von Fahrzeugemissionen stellen diese vor wachsende technische und planerische Herausforderungen. Insbesondere die Reduktion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der in einem Jahr verkauften Pkw gestaltet sich als schwierig, da diese sogenannten CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen nur durch technisch aufwändige Maßnahmen oder durch die Veränderung der Absatzstruktur gesenkt werden können. Parallel wird zunehmend gefordert, dass Automobilhersteller Fahrzeuge mit elektrifizierten Antrieben entwickeln und vermarkten sollen, die keine lokalen Emissionen ausstoßen. Insbesondere der U.S.-Bundesstaat Kalifornien gilt in Bezug auf seine Richtlinien für die Reduktion von Abgas- und Treibhausgasemissionen, unter die CO<sub>2</sub> fällt, weltweit als Vorreiter. Überdies wird Großserienherstellern vorgeschrieben, dass ein stetig steigender Anteil ihres Neufahrzeugabsatzes so genannte Zero Emission Vehicles (ZEV) umfassen muss. Dabei handelt es sich um Fahrzeuge, die im Betrieb geringe oder keine lokalen Emissionen verursachen. Das sind im wesentlichen Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge, deren aktuell von vielen Experten prognostiziertes Absatzpotential signifikant unter den gesetzlichen Vorgaben liegt. Vor diesem Hintergrund ist die Automobilindustrie gezwungen, Strategien zur termingerechten und dauerhaften Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen sowie der Markteinführung elektrifizierter Antriebe unter Berücksichtigung unternehmerischer Zielsetzungen zu entwickeln, die nicht zu unerwünschten Nebeneffekten führen. Die hinsichtlich der Art und Weise der Umsetzung offen gehaltene Formulierung der kalifornischen Gesetze sowie der hohe Produktdiversifikationsgrad in der Automobilindustrie lassen eine Vielzahl unterschiedlicher Strategien zu. Daraus resultiert jedoch auch große Unsicherheit bei der Antizipation der Wirkungssicherheit einer Strategie, insbesondere auch aufgrund der Infrastrukturabhängigkeit der alternativen Antriebstechnologien. Potentiell zielführende Strategien müssen deshalb im Rahmen einer Wirkungsanalyse hinsichtlich ihres Potentials zur Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen und zur Erreichung der unternehmerischen Ziele unter Berücksichtigung der unsicheren dynamischen Randbedingungen ex ante evaluiert werden. Zu diesem Zweck ist jedoch eine problemadäquate Systembeschreibung erforderlich, die bisher existierende Ansätze nicht bieten. Entweder werden nicht alle relevanten Akteure berücksichtigt oder deren Verhalten nicht in ausreichender Detaillierung und Konsistenz abgebildet. Bisher fehlt die umfassende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dynamisch komplexen Planungsproblemen der oben erläuterten Art.

Dieser Herausforderung stellt sich die von Herrn Wansart vorgelegte Dissertation. Vor dem Hintergrund der Einführung der kalifornischen Gesetzgebung zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen bei gleichzeitiger Markteinführung elektrifizierter Antriebe besteht die Zielsetzung primär in der Entwicklung eines simulationsbasierten Ansatzes zur Untersuchung der dynamischen Wirkung potentieller Strategien von Großserienherstellern von Pkw zur Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben in Kalifornien. Des Weiteren wird der erarbeitete Ansatz im Rahmen einer umfangreichen Simulationsstudie beispielhaft angewendet, um Empfehlungen für unternehmerische und politische Entscheidungsträger abzuleiten. Zunächst

werden zu diesem Zweck die gegebenen ökologischen, technischen, gesetzlichen und sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen sowie grundlegende strategische Optionen der Automobilindustrie zur Einhaltung der dargelegten gesetzlichen Anforderungen erläutert. Als problemadäquater methodischer Ansatz wird System Dynamics identifiziert. Da keiner der im Folgenden diskutierten Modellierungsansätze zur Abbildung der dynamischen Interaktion zwischen den relevanten Akteuren im Automobilmarkt den Anforderungen an eine ausreichend detaillierte Systembeschreibung gerecht wird, entwickelt Herr Wansart dynamische Modelle zur Beschreibung des Verhaltens der Automobilindustrie bei der Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen, zum Gesetzgeber hinsichtlich der Bewertung des Verhaltens der Automobilindustrie, zum Kaufverhalten der Endkunden in Abhängigkeit der angebotenen Fahrzeuge und ihrer Eigenschaften sowie zur koevolutionären Entwicklung der komplementären Infrastruktur für die angebotenen alternativen Antriebe. Das entwickelte systemdynamische Modell wird anschließend im Rahmen einer umfangreichen Simulationsstudie auf Basis von Marktdaten für Kalifornien exemplarisch angewendet und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Würdigung der entwickelten Ansätze, Implikationen für unternehmerische und politische Entscheidungsträger sowie der Erläuterung weiteren Forschungsbedarfs.

Die von Herrn Wansart vorgelegte Dissertation deckt eine sowohl unter theoretischen als auch praxisorientierten Gesichtspunkten äußerst anspruchsvolle Thematik ab. Der akademische Neuheitsgrad ergibt sich zum einen aus seinem systemdynamischen Modellierungsansatz des Automobilmarktes, der eine theoriekonforme Kombination diskreter Auswahlmodelle auf Basis der „Discrete Choice-Theorie“ mit kontinuierlichen Diffusionsmodellen zur Abbildung eines angebotsabhängigen und zeitvariablen Kundenverhaltens ermöglicht, und zum anderen aus der problemadäquaten Abbildung der komplexen kalifornischen Gesetzgebung und der hierauf basierenden Fallstudie. Es gelingt Herrn Wansart damit, eine nicht nur wissenschaftlich überzeugende, sondern auch in der Praxis bedeutsame Arbeit anzufertigen, die er bereits ausführlich auf einschlägigen internationalen Tagungen präsentiert und mit zahlreichen Experten in der Automobilindustrie diskutiert hat. Es ist ihm auch gelungen, wesentliche Inhalte seiner Arbeit in der renommierten Zeitschrift „System Dynamics Review“ zu veröffentlichen. Insgesamt hat Herr Wansart das Thema der systemdynamischen Strategieanalyse und Folgenabschätzung mit seiner Dissertation einen wichtigen Schritt vorangebracht und gleichzeitig die interdisziplinäre Forschung an der TU Braunschweig gestärkt.

Univ.-Prof. Dr. Thomas S. Spengler

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion (AIP) und am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA) der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Die parallele Arbeit an einem ingenieur- und einem wirtschaftswissenschaftlichen Institut wurde durch ein gemeinsames Forschungsprojekt in Kooperation mit der Volkswagen AG ermöglicht. Diese überaus spannende, aber auch fordernde Zeit hat mich sehr geprägt. Ich habe vielfältige Einblicke in die verschiedenen Forschungsgebiete und Wissenschaftskulturen bekommen und durfte Theorie und Praxis an der Schnittstelle zwischen Technik und Ökonomie verknüpfen. Ich möchte deshalb an dieser Stelle allen herzlich danken, die mich in dieser Zeit begleitet und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Doktorvätern Herrn Prof. Dr. Thomas S. Spengler, Leiter des AIP, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder, Leiter des iVA, danke ich für die vielfältigen fachlichen Anregungen, die konstruktiven Diskussionen und die persönliche Unterstützung während meiner Zeit an ihren Instituten. Die anregende Arbeitsatmosphäre und die Freiräume, die sie mir gewährt haben, werden mir in guter Erinnerung bleiben. Sehr herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Frau Prof. Dr. Grit Walther, Lehrstuhl für Operations Management an der RWTH Aachen, für die Übernahme des Drittreferats und insbesondere für ihre Unterstützung und Aufmunterung während ihrer Zeit als meine Arbeitsgruppenleiterin am AIP in Braunschweig. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Axmann bin ich für den Beisitz in der Prüfungskommission und die hervorragende Betreuung meines Forschungsprojektes bei der Volkswagen AG großen Dank schuldig. Die Anregungen aus der Praxis haben meine Arbeit entscheidend voran gebracht. Herrn Prof. Dr. Gernot Sieg, Leiter des Instituts für Volkswirtschaftslehre, danke ich für den Beisitz in der Prüfungskommission. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission möchte ich Herrn Prof. Dr. Wolfgang Fritz, Leiter des Instituts für Marketing, danken.

Ein herzlicher Dank gilt meinen ehemaligen Kollegen am AIP, die mich fachlich wie persönlich begleitet haben. Allen voran danke ich Karsten Kieckhäfer als großartigem „Sparringspartner“ und Motivator für seine Geduld und seinen Anschlag. Auch allen anderen Mitgliedern meiner Arbeitsgruppe „Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke“ Dr. Anne Schatka, Dr. Jenny Steinborn, Kerstin Schmidt, Claas Hoyer und Katharina Wachter sowie Dr. Eberhard Schmid, Dr. Grischa Meyer, Dr. Marcus Schröter und Britta Engel danke ich. Nicht vergessen möchte ich auch die Kollegen der weiteren Arbeitsgruppen, vor allem Dr. Thomas Volling, Dr. Niklas Labitzke, Dr. André Hintsches, Matthias Wichmann, Martin Grunewald, Andreas Matzke, Kai Wittek sowie Dr. Stefan Rehkopf.

Genauso herzlich möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen am iVA für ihre fachliche und persönliche Begleitung bedanken. Die Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. Uwe Becker, Dr.-Ing. Tobias Ständer, Dr.-Ing. Jörg May, Dr.-Ing. Jörn Drewes, Dr. Jörg Müller, Dr.-Ing. Stefan Detering, Dr.-Ing. Matthias Hübner, Daniel Beisel, Tobias Lück, Dr.-Ing. Lisandro Mariano Quiroga, Hansjörg Manz, Felix Reinbold, Marco Wegener, Geltmar von



Buxhoeveden und Patrick Diekhake hat mir sehr viel Freude bereitet. Die ehemaligen Mitarbeiter Dr.-Ing. Marc Horstmann, Dr.-Ing. Stefan König und Imma Braun hatten zudem wesentlichen Anteil daran, dass ich den Weg der Promotion tatsächlich eingeschlagen habe.

In ihrer Bedeutung für die tägliche Arbeit nicht zu unterschätzen sind die Geschäftszimmer der Institute und der Fakultät sowie die Mitarbeiter aus EDV und Technik. Mein besonderer Dank gilt hierbei vor allem Regine Stegemann und Birgit Haupt, Stefanie Pitschmann sowie Sylvia Glowania und Sarah-Romina Pesenecker für ihre freundliche und unkomplizierte Hilfe bei allen administrativen Belangen. Dr. Akbar Shah, Arno Schielke, Lukasz Dunst, Kevin Wieloch, Christian Cholewa, Sven Schulze und insbesondere Christian Neldner haben mir bei allen EDV-Fragen zur Seite gestanden, so wie Andreas Siepmann bei technischen Belangen. Meinen studentischen Hilfskräften Marina Jankowski, Tim Heinemann, David Chrupalla, Nico Schebesta und Sinja van Doren gilt ein großes Dankeschön für ihre Unterstützung meiner Tätigkeit in Forschung und Lehre. Danke auch den Studierenden Folko Rohde, Volker Labenski, David Irigoyen Ezcurra, Martin Vogel, Philipp Hentrich und Lennart Schaar, die wichtige Vorarbeiten für die Entstehung dieser Dissertation geleistet haben.

Das Thema dieser Arbeit ist im Wesentlichen motiviert durch das Forschungsprojekt „Gesetzesfolgenabschätzung mit systemdynamischem Ansatz“ in Kooperation mit der Volkswagen AG. Ich bedanke mich für ihr Vertrauen in meine Arbeit bei Herrn Dr. Schäfer, Herrn Dr. Seyfried, Herrn Müller-Pietralla, Herrn Dr. Stauss und Herrn Dr. Prätorius. Für viele konstruktive Hinweise und Ideen danke ich auch Herrn Dr. Rosenau-Tornow, Frau Wiedemann, Herrn Dr. Block, Herrn Dr. Gessner, Herrn Dr. Bäuml und Herrn Kottsierper.

Für wertvolle Diskussionen und Gespräche in gemeinsamen Projekten danke ich den (ehemaligen) Braunschweiger Doktoranden Jafet Sanchez, Ingo Kucz, Dr. Christian Berger und Dr.-Ing. Thomas Krüger. Für die anregenden Gespräche und vielen guten Ratschläge während der unfreiwilligen gemeinsamen Rückreise von Peking nach Moskau mit der Transsibirischen Eisenbahn danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hesselbach und seiner Frau Ulrike, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann.

Letzten Endes hat das persönliche Umfeld den entscheidenden Einfluss auf den erfolgreichen Abschluss einer Dissertation. Meinen tiefen Dank nicht nur für viele aufmunternde Worte möchte ich deshalb Sebastian Sedlacek, Christian und Christina Böstler, Jens und Kathrin Lüddecke, Sarah und Felix Würtenberger, Dr. Wiebke und Christian Junge, Jan Sladeczek, Leif Strauß, Dr. Kathryn Viemann, Lena Kähler, Daniela Ibsch, Dr. Martin Hibbeln, Armin Twardy, Stefanie Kubissa sowie Katrin Beuthner aussprechen. Für ihren besonderen Beistand danke ich außerdem Marion Block, Birgitt Harren, Inge Kolvenbach, Dagmar Meyer, Helene Lammermann, den Fechter des TSV Kenten e. V. und insbesondere Herrn Dr. Helmut Scholle sowie Herrn Joachim Hempel.

Meiner Familie Yvonne und Bernd mit Arne, Barbara und Burkhard, Hildegard und Lothar und Birte und Knut danke ich für ihre in all der Zeit nie nachlassende Unterstützung und Ihre Hilfe in allen Lebenslagen. Ich bin sehr froh, Euch an meiner Seite zu haben. Zu guter Letzt gilt mein tiefer Dank meiner Frau Astrid. Danke für Deine Geduld und Deine Liebe. Ohne Dich wäre ich nicht so weit gekommen. Danke.

## **Inhaltsübersicht**

<b>Geleitwort.....</b>	<b>VII</b>
<b>Vorwort .....</b>	<b>IX</b>
<b>Inhaltsübersicht .....</b>	<b>XI</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XXI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>Einheitenverzeichnis .....</b>	<b>XXV</b>
<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>XXVII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Rahmenbedingungen aus ökologischer, technischer, gesetzlicher und sozio- ökonomischer Sicht .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Strategien der Automobilindustrie zur Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen in Kalifornien .....</b>	<b>33</b>
<b>4 Methodenwahl und relevante Vorarbeiten.....</b>	<b>59</b>
<b>5 Konzeption und Entwicklung eines Modells für die Strategieberatung .....</b>	<b>79</b>
<b>6 Exemplarische Anwendung auf das Fallbeispiel Kalifornien .....</b>	<b>135</b>
<b>7 Würdigung und Ausblick .....</b>	<b>181</b>
<b>8 Zusammenfassung.....</b>	<b>189</b>
<b>9 Literatur .....</b>	<b>193</b>
<b>10 Anhang .....</b>	<b>211</b>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Geleitwort</b> .....	<b>VII</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>IX</b>
<b>Inhaltsübersicht</b> .....	<b>XI</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>Einheitenverzeichnis</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
<b>2 Rahmenbedingungen aus ökologischer, technischer, gesetzlicher und sozio- ökonomischer Sicht</b> .....	<b>7</b>
2.1 Wirkung und Entstehung von CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	7
2.1.1 Umweltwirkung von CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	7
2.1.2 Bedeutung des Straßenverkehrs für die Entstehung von CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	8
2.1.3 Möglichkeiten zur Minderung von CO <sub>2</sub> -Emissionen im Straßenverkehr .....	9
2.2 Automobilantriebe als Quelle von CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	10
2.2.1 Energieverbrauch und -intensität im Automobil.....	10
2.2.2 Verbrennungsmotorische Automobilantriebe .....	14
2.2.3 Alternative Antriebe für Automobile .....	16
2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen hinsichtlich der CO <sub>2</sub> -Emissionen von Pkw .....	19
2.3.1 Anforderungen an Automobilhersteller in der Europäischen Union .....	19
2.3.2 Anforderungen an Automobilhersteller in den USA.....	21
2.3.3 Anforderungen an Automobilhersteller im U.S.-Bundesstaat Kalifornien .....	22
2.4 Sozio-ökonomische Rahmenbedingungen des Automobilmarktes.....	27
2.4.1 Wettbewerbssituation im Automobilmarkt .....	28
2.4.2 Käuferverhalten.....	29
2.4.3 Marktentwicklung von Produktinnovationen.....	29
2.4.4 Infrastrukturabhängigkeit von Kraftfahrzeugen.....	30
<b>3 Strategien der Automobilindustrie zur Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen in Kalifornien</b> .....	<b>33</b>
3.1 Strategische Planung der Automobilindustrie.....	33
3.1.1 Strategie im unternehmerischen Kontext .....	33

3.1.2	Grundlagen der strategischen Planung .....	35
3.1.3	Bezugsrahmen für die strategische Planung zur Einhaltung der Anforderungen der GHG- und ZEV-Gesetzgebung in Kalifornien .....	38
3.2	Einzelmaßnahmen zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben in Kalifornien .....	39
3.2.1	Maßnahmen zur Reduktion der CO <sub>2</sub> -Flottenemissionen .....	39
3.2.2	Maßnahmen zur Generierung von ZEV-Credits .....	44
3.2.3	Umgang mit zusätzlichen Stückkosten .....	47
3.3	Strategien zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben in Kalifornien .....	48
3.3.1	Notwendigkeit der Strategieentwicklung .....	48
3.3.2	Strategien zur Reduktion der CO <sub>2</sub> -Flottenemissionen auf Basis konventioneller Antriebe .....	49
3.3.3	Strategien zur Markteinführung elektrischer Antriebe .....	50
3.4	Bewertung von Reduktionsstrategien .....	52
3.5	Klassifizierung des Planungsproblems und resultierende Anforderungen an den methodischen Ansatz für die Strategieanalyse .....	53
3.5.1	Eigenschaften des Planungsproblems .....	53
3.5.2	Resultierende Anforderungen .....	55
3.5.3	Vorgehen zur Erfüllung der Anforderungen .....	57
<b>4</b>	<b>Methodenwahl und relevante Vorarbeiten .....</b>	<b>59</b>
4.1	Simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung .....	59
4.2	System Dynamics als systemische Strukturtheorie .....	60
4.3	Anforderungen an das zu entwickelnde Modell .....	62
4.4	Analyse bestehender Modellierungsansätze .....	65
4.4.1	Kaufverhalten .....	65
4.4.2	Strategieanalyse .....	70
4.4.3	Marktentwicklung alternativer Antriebe .....	72
4.4.4	Gesetzesfolgenabschätzung .....	74
4.5	Entwicklungsbedarf .....	75
<b>5</b>	<b>Konzeption und Entwicklung eines Modells für die Strategieanalyse .....</b>	<b>79</b>
5.1	Methodisches Vorgehen .....	79
5.1.1	Modellierung .....	79
5.1.2	Validierung formaler Modelle .....	81
5.2	Konzeptentwicklung .....	84
5.2.1	Dynamische Hypothese .....	84
5.2.2	Modellgrenzen .....	86
5.3	Modellentwicklung .....	89
5.3.1	Modul „Kunde/Fahrer“ .....	89
5.3.2	Modul „Hersteller“ .....	99
5.3.2.1	Übersicht .....	99
5.3.2.2	Produktion und Lagerbestände von Neufahrzeugen .....	101
5.3.2.3	Technische Produktmerkmale .....	105
5.3.2.4	Produktionsstückkosten angebotener Fahrzeuge .....	108
5.3.2.5	Garantieleistungen für Traktionsbatterien .....	111

5.3.2.6	Anpassung des Kaufpreises.....	112
5.3.3	Modul „Infrastruktur“ .....	115
5.3.4	Modul „Gesetzgeber“ .....	121
5.3.4.1	Übersicht .....	121
5.3.4.2	Kontrolle der Anforderungen der GHG-Gesetzgebung .....	122
5.3.4.3	Kontrolle der Anforderungen der ZEV-Gesetzgebung .....	126
5.4	Struktur- und Parametervalidierung .....	130
<b>6</b>	<b>Exemplarische Anwendung auf das Fallbeispiel Kalifornien .....</b>	<b>135</b>
6.1	Ausgangslage in Kalifornien .....	135
6.2	Datenbasis .....	136
6.2.1	Vorgehensweise .....	136
6.2.2	Auswahl einer fiktiven Fahrzeugflotte .....	137
6.2.3	Parametrierung anhand empirischer Daten .....	144
6.2.3.1	Fahrzeugbestand und Infrastruktur.....	144
6.2.3.2	Gesetzgeber .....	145
6.2.3.3	Automobilkäufer .....	145
6.2.3.4	Fahrzeughersteller .....	148
6.2.4	Initialisieren des Modells im Gleichgewicht.....	149
6.3	Verhaltensvalidierung .....	151
6.4	Konzeption der Strategieanalyse .....	155
6.4.1	Im Modell darstellbare Strategien und Szenarien der Marktumwelt .....	155
6.4.2	Implementierte Strategien .....	158
6.4.3	Implementierte Szenarien der Marktumwelt.....	160
6.4.4	Vorgehen bei der Analyse .....	162
6.4.5	Untersuchungszeitraum der Simulation .....	163
6.5	Analyse der Simulationsergebnisse.....	163
6.5.1	Einhaltung der GHG-Anforderungen bei konstanten Randbedingungen .....	164
6.5.2	Einhaltung der ZEV-Anforderungen bei konstanten Randbedingungen .....	166
6.5.3	Gleichzeitige Einhaltung von GHG- und ZEV-Anforderungen bei konstanten Randbedingungen.....	168
6.5.4	Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen bei variierten Randbedingungen ....	174
6.6	Handlungsempfehlungen aus der Simulationsanalyse .....	178
<b>7</b>	<b>Würdigung und Ausblick .....</b>	<b>181</b>
7.1	Kritische Würdigung .....	181
7.2	Implikationen für unternehmerische und politische Entscheidungsträger .....	184
7.2.1	Implikationen für unternehmerische Entscheidungsträger.....	184
7.2.2	Implikationen für politische Entscheidungsträger.....	186
7.3	Forschungsbedarf .....	186
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>189</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>193</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>211</b>
10.1	Erläuterung der Funktion „FORECAST“ .....	211

10.2	Berechnung der Zusammensetzung der Auswahlmenge .....	211
10.3	Herleitung des Logit-Modells diskreter Auswahlentscheidungen .....	213

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau dieser Arbeit im Überblick .....	6
Abbildung 2: Weltweite CO <sub>2</sub> -Emissionen 2008 nach Sektor .....	8
Abbildung 3: Schema der Energiewandlung im Automobil.....	11
Abbildung 4: Aufbau eines Hubkolbenmotors .....	15
Abbildung 5: Verluste im Antriebsstrang eines konventionellen Pkw .....	16
Abbildung 6: Grundlegende Antriebskonzepte.....	18
Abbildung 7: Zielvorgabe für spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen je Neufahrzeug von 2012 bis 2015 .....	20
Abbildung 8: Phase-in der neuen EU-Gesetzgebung für CO <sub>2</sub> -Flottenemissionen – Anteil der Flotte, die den Grenzwert einhalten muss (a) und Zählerfaktor für Fahrzeuge mit besonders geringen Emissionen (b) .....	21
Abbildung 9: Marktdurchdringung eines infrastrukturabhängigen Produktes (qualitativ)...	32
Abbildung 10: Beziehung zwischen Strategie und Entscheidung .....	34
Abbildung 11: Phasen der strategischen Planung.....	37
Abbildung 12: Akteursklassen im Automobilmarkt und ihre Interaktionen.....	39
Abbildung 13: Möglichkeiten der Einflussnahme auf CO <sub>2</sub> -Flottenemissionen.....	41
Abbildung 14: Zusätzliche Herstellkosten für die Reduktion der CO <sub>2</sub> -Fahrzeugemissionen für Benzin- und Diesel-Pkw in kleinen (S), mittleren (M) und großen (L) Modellen .....	43
Abbildung 15: Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Anzahl generierter ZEV-Credits..	45
Abbildung 16: Elektrifizierung des Antriebs im Fahrzeugportfolio .....	51
Abbildung 17: Teilkonzepte von System Dynamics.....	61
Abbildung 18: Einordnung der Literatur zum Kaufverhalten in den Bezugsrahmen .....	65
Abbildung 19: Einordnung der Literatur zur Strategieanalyse in den Bezugsrahmen.....	70
Abbildung 20: Einordnung der Literatur zur Marktentwicklung alternativer Antriebe in den Bezugsrahmen.....	72
Abbildung 21: Einordnung der Literatur zur Gesetzesfolgenabschätzung in den Bezugsrahmen.....	75
Abbildung 22: Iterativer Modellierungsprozess .....	81
Abbildung 23: Transformation vom Realsystem zum implementierten Simulationsmodell..	82
Abbildung 24: Feedback-Struktur der Einhaltung der kalifornischen GHG- und ZEV-Gesetzgebung.....	85
Abbildung 25: Modellstruktur und Modellgrenzen auf der Grundlage der beteiligten Akteure.....	88
Abbildung 26: Dynamische Struktur der Nachfrage nach Fahrzeugen <i>ij</i> .....	90
Abbildung 27: Anpassung konventioneller Fahrzeuge an GHG-Anforderungen und die Auswirkungen.....	100
Abbildung 28: Anpassung an ZEV-Anforderungen mit Hilfe von beispielsweise BEVs und die Auswirkungen .....	101
Abbildung 29: Dynamische Struktur von Fahrzeugbestand und öffentlicher Infrastruktur am Beispiel elektrischer Ladestellen .....	116

Abbildung 30: Qualitative Darstellung des funktionalen Zusammenhangs zwischen räumlicher Verfügbarkeit von Tank- und Ladestellen und dem Anteil der Autofahrer, die sie erreichen können.....	118
Abbildung 31: Qualitative Darstellung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Angebot und Nachfrage nach Ladevorgängen und der zeitlichen Verfügbarkeit der Ladestellen .....	120
Abbildung 32: Struktur des Kontensystems für GHG- und ZEV-Credits .....	121
Abbildung 33: Bestätigung der Einheitenkonsistenz durch automatischen Test (Screenshot) .....	133
Abbildung 34: Vorgehen beim Parametrieren des Modells.....	137
Abbildung 35: Beispielhafte Ergebnisse für konstante Randbedingungen.....	153
Abbildung 36: Beispielhafte Ergebnisse für hohes Bevölkerungswachstum .....	154
Abbildung 37: Schema der im Modell darstellbaren Handlungsoptionen und Marktumfeldentwicklungen.....	157
Abbildung 38: Prozess der Kombination von Strategien und Variation von Randbedingungen .....	163
Abbildung 39: Entwicklung der GHG-Flottenemissionen ohne Anpassung und mit Flottenanpassung .....	164
Abbildung 40: Entwicklung der GHG-Flottenemissionen bei identischer und gewichteter Reduktion je Fahrzeug .....	165
Abbildung 41: Entwicklung der GHG-Flottenemissionen bei Kombination von identischer und gewichteter Reduktion mit Flottenanpassung .....	165
Abbildung 42: Geforderte und generierte Gold-ZEV-Credits für die Strategien „konservativ“ (a) und „progressiv“ (b).....	167
Abbildung 43: Marktentwicklung durch Angebotserweiterung .....	168
Abbildung 44: GHG-Flottenemissionen im Vergleich zum Grenzwert für vier Strategiekombinationen .....	169
Abbildung 45: Generierte ZEV-Credits im Vergleich zu den Anforderungen für die Strategiekombinationen IR/ZEVpro (a), IR+FA/ZEVpro (b), GR/ZEVpro (c) und GR+FA/ZEVpro (d) .....	170
Abbildung 46: Entwicklung des Marktanteils von BEV in Abhängigkeit von der GHG-Strategie .....	171
Abbildung 47: Entwicklung des Marktanteils von HEV (a), PHEV (b) und HFC (c) in Abhängigkeit von der GHG-Strategie .....	172
Abbildung 48: Entwicklung des Marktanteils von PHEV und BEV konservativ (a) und progressiv (b) .....	173
Abbildung 49: Marktanteil von BEV bei Variation der jährlichen Einkommensveränderung .....	174
Abbildung 50: Marktanteil von BEV bei Variation der Wirkung von Mundpropaganda für BEV .....	175
Abbildung 51: Marktanteil BEV bei Variation der Infrastrukturförderung für Elektro-Ladestellen .....	176
Abbildung 52: Marktanteil HFC bei Variation der Infrastrukturförderung von Wasserstoff-Ladestellen.....	176



---

Abbildung 53: Marktanteil von BEV bei Variation der Erfahrungskurve für Batteriestückkosten .....	177
Abbildung 54: Vergleich der Szenarien „Basis“ und „Wachstum“ .....	177

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Energiedichte (Heizwert) und CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Verbrennung.....	14
Tabelle 2:	Einsatz alternativer Energieträger und Antriebe im Automobil.....	17
Tabelle 3:	CAFE-Grenzwerte und äquivalente CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	22
Tabelle 4:	Grenzwerte der GHG-Flottenemissionen für Fahrzeuge bis 3750 lbs. Leergewicht in Kalifornien.....	23
Tabelle 5:	Klassifizierung und Bewertung von ZEVs.....	25
Tabelle 6:	Geforderte Absatzanteile der verschiedenen ZEV-Klassen.....	26
Tabelle 7:	Unterscheidung nach Unternehmensgröße im Rahmen der ZEV-Gesetzgebung.....	26
Tabelle 8:	Anzahl verfügbarer Tank-/Ladestellen.....	31
Tabelle 9:	Klassifizierung und Bewertung beispielhafter technischer Reduktionsmaßnahmen, Stand: 2010.....	42
Tabelle 10:	Beispielhafte Maßnahmen zur Steigerung des Marktanteils von emissionsarmen Fahrzeugen.....	44
Tabelle 11:	Geschätzte Kosten für Komponenten eines teil- oder vollelektrifizierten Antriebs.....	46
Tabelle 12:	Aktuelle Mehrkosten für beispielhafte Fahrzeugkonfigurationen nahe der Marktreife.....	47
Tabelle 13:	Mögliche Strategien zur Reduktion der CO <sub>2</sub> -Flottenemissionen auf Basis konventioneller Antriebe.....	50
Tabelle 14:	Eigenschaften des vorliegenden Planungsproblems und resultierende Anforderungen.....	57
Tabelle 15:	Modellanforderungen und Begründung.....	64
Tabelle 16:	Vergleich existierender Systemmodelle mit den Anforderungen dieser Arbeit..	77
Tabelle 17:	Tests zur Modellvalidierung.....	84
Tabelle 18:	Notation von Wirkbeziehungen in Kausalschleifendiagrammen.....	85
Tabelle 19:	Modellgrenzentabelle.....	87
Tabelle 20:	Zusammenfassung grundsätzlicher Annahmen zum Akteursverhalten im Modell.....	132
Tabelle 21:	Ergebnisse der Modellvalidierung.....	134
Tabelle 22:	Übersicht über verwendete Umrechnungsfaktoren.....	137
Tabelle 23:	Übersicht implementierter Fahrzeugmodelle als Antrieb-Segment- Kombination.....	138
Tabelle 24:	Kaufrelevante Eigenschaften der Referenzfahrzeuge.....	140
Tabelle 25:	Herstellerrelevante Eigenschaften der Referenzfahrzeuge.....	143
Tabelle 26:	Initialwerte des Fahrzeugbestands und der Infrastruktur.....	144
Tabelle 27:	Initialwerte für gesetzliche Rahmenbedingungen.....	145
Tabelle 28:	Präferenzparameter des Kaufmodells.....	146
Tabelle 29:	Parameterwerte für das Käuferverhalten.....	147
Tabelle 30:	Parameterwerte für die Reduktion von CO <sub>2</sub> -Emissionen und die Markteinführung neuer Fahrzeuge.....	148

---

Tabelle 31: Parameterwerte für grundlegende Reaktionen der Automobilindustrie auf dynamische Randbedingungen .....	149
Tabelle 32: Parameterwerte für einen Simulationsstart im Gleichgewicht.....	151
Tabelle 33: Ergebnisse der Modellvalidierung einschließlich Verhaltensprüfung.....	155
Tabelle 34: Vorgehensweisen der Automobilindustrie zur Einhaltung von GHG- und ZEV-Gesetzgebung im Modell .....	156
Tabelle 35: Strategien zur Reduktion der GHG-Flottenemissionen .....	159
Tabelle 36: Strategien zur Markteinführung elektrifizierter Antriebe .....	160
Tabelle 37: Variierte exogene Parameter.....	162

## Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
BEST	Board on Environmental Studies and Toxicology
BEV	Battery Electric Vehicle
BLfU	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BTS	Bureau of Transportation Statistics
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CARB	California Air Resource Board
CDMV	California Department of Motor Vehicles
CDoF	California Department of Finance
CDoT	California Department of Transport
CEC	California Energy Commission
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DC	Discrete Choice
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Department of Energy
dyn.	dynamisch
EC	European Commission
EEA	European Environment Agency
EG	Europäische Gemeinschaft
EPA	Environment Protection Agency
EU	Europäische Union
elektr.	elektrisch
evtl.	eventuell
et al.	et alii
etc.	et cetera
f.	folgende (Singular, bei Seitenangaben)
ff.	folgende (Plural, bei Seitenangaben)
ggf.	gegebenenfalls
Gl.	Gleichung
HEV	Hybrid Electric Vehicle

HFC	Hydrogen Fuel Cell Vehicle
Hrsg.	Herausgeber
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
k. A.	keine Angabe
konv.	konventionell
Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
s.	siehe
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
SD	System Dynamics
sog.	so genannte
spez.	spezifisch
u. a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USA	United States of America (Vereinigte Staaten von Amerika)
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

## Einheitenverzeichnis

### Einheiten

EUR	Euro	Währungseinheit, Europa
\$	Dollar	Währungseinheit, USA
a	Jahr	Zeiteinheit
g	Gramm	Masseinheit
gal	Gallone	Volumeneinheit
h	Stunde	Zeiteinheit
l	Liter	Volumeneinheit
m	Meter	Längeneinheit
mi	Meile	Längeneinheit
min	Minute	Zeiteinheit
N	Newton	Krafteinheit
sec	Sekunde	Zeiteinheit
t	Tonne	Masseinheit
W	Watt	Leistungseinheit

### Größenordnungen

m	Milli	$10^{-3}$
k	Kilo	$10^3$
M	Mega	$10^6$
G	Giga	$10^9$

## Symbolverzeichnis

### Indizes und Mengen

$h$	Index Eigenschaft eines Fahrzeugs $ij$
$i$	Index Antrieb
$j$	Index Fahrzeugmodell
$k$	Index Hersteller
$l$	Index für Summenbildung, unterschiedliche Bedeutungen
$m$	Index für Summenbildung, unterschiedliche Bedeutungen
$n$	Individuum (Käufergruppe)
$q$	Alterskohorte
$t$	Zeitpunkt
$\mathcal{P}$	Potenzmenge
$K$	Kombination
$\mathbb{M}$	Universelle Auswahlmenge
$\mathbb{O}$	Menge aller angebotenen Fahrzeugmodelle
$\mathbb{G}$	Menge aller Teilmengen von $\mathbb{O}$
$\mathbb{C}$	Während der Simulationszeit mögliche Auswahlmenge

### Parameter und Variablen, Energieverbrauch und -intensität im Kraftfahrzeug

$\mathcal{E}_{StrV}^{CO_2}$	Jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen des Straßenverkehrs	t CO <sub>2</sub> /Jahr
$\mathcal{S}_{Fzg}$	Jährliche Fahrleistung der Summe aller Fahrzeuge	km/Jahr
$\bar{C}_{Fzg}^W$	Durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch je Fahrzeug	kWh/km
$\bar{\mathcal{E}}_W^{CO_2}$	Durchschnittliche spezifische Emissionsintensität	t CO <sub>2</sub> /kWh
$E$	Im Motor erzeugte Energie	kWh
$E^*$	Erforderliche Fortbewegungsenergie	kWh
$E^{ls}$	Verlustenergie	kWh
$F_R$	Rollwiderstand	N
$F_L$	Luftwiderstand	N
$F_B$	Beschleunigungswiderstand	N
$f_R$	Rollwiderstandsbeiwert für alle Räder	-
$m$	Fahrzeugmasse	kg

$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m/sec}^2$
$\rho$	Luftdichte	$\text{kg/m}^3$
$v_r$	Anströmgeschwindigkeit der Luft	$\text{m/sec}$
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert, abhängig von der Fahrzeugform	-
$A$	Stirnfläche des Fahrzeugs	$\text{m}^2$
$e$	Drehmassenzuschlagsfaktor	-
$m$	Fahrzeugmasse	$\text{kg}$
$a$	Beschleunigung des Fahrzeugs	$\text{m/sec}^2$
$C$	Kohlenstoff	-
$H$	Wasserstoff	-
$O$	Sauerstoff	-
$x$	Anzahl Kohlenstoffatome	-
$y$	Anzahl Wasserstoffatome	-
$\Delta H_R$	Reaktionsenthalpie	-
$M_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> -Emissionen je erzeugter kWh Energie	$\text{g/kWh}$
$E_{fuel}$	Spezifische Energiedichte	$\text{kWh/l}$
$m_{CH}$	Spezifische Menge Kohlenwasserstoffe je Liter Kraftstoff	$\text{g/l}$

***Parameter und Variablen, Fahrzeugbestand und Infrastruktur***

$F_{ij}$	Bestand je Fahrzeug ij	Fzg
$a_{ij}$	Absatzrate ij	Fzg/Jahr
$e_{ij}$	Entsorgungsrate ij	Fzg/Jahr
$\tau_{ij}^e$	Durchschnittliche Dauer bis zur Entsorgung von ij	Jahr
$a_{ij}^*$	Nachfragerate = gewünschte Absatzrate	Fzg/Jahr
$l_{ij}^{max}$	Maximale Lieferrate	Fzg/Jahr
$F_{total}$	Gesamtfahrzeugbestand: $F_{total}(t) = \sum_{ij} F_{ij}(t)$	Fzg
$F_{total}^*$	Zielgesamtfahrzeugbestand	Fzg
$d$	Gesamtnachfrage nach Fahrzeugen	Fzg/Jahr
$\tau^F$	Durchschnittliche Anpassungsdauer des Fahrzeugbestands	Jahr
$w_{Pr}$	Wirkung des durchschnittlichen Kaufpreises auf die Nachfrage	-
$w_{Ek}$	Wirkung des durchschnittlichen Einkommens auf die Nachfrage	-
$\theta_{Pr}$	Preiselastizität der Gesamtnachfrage	-



$\theta_{Ek}$	Einkommenselastizität der Gesamtnachfrage	-
$e_{total}$	Gesamtentsorgungsrate	Fzg/Jahr
$\overline{Ek}$	Durchschnittliches Haushaltseinkommen	\$/Jahr
$\overline{Prs}$	Durchschnittlicher Kaufpreis	\$/Fzg
<i>Einwohner</i>	Anzahl Einwohner des betrachteten Marktes	Person
$L_i$	Bestand Ladestellen für Antrieb $i$	Lds
$L_i^*$	Gewünschter Bestand Ladestellen für Antrieb $i$	Lds
$\tau_i^L$	Durchschnittliche Anpassungsdauer Ladestellenbestand	Jahr
$L_i^{exg}$	Exogen gegebener Zielbestand an Ladestellen für $i$	Lds
$av_i^{publ}$	Verfügbarkeit von öffentlichen Ladestellen für Fahrzeuge mit Antrieb $i$	-
$av_i^{Raum}$	Räumliche Verfügbarkeit von öffentlichen Ladestellen für $i$	-
$av_i^{zeit}$	Zeitliche Verfügbarkeit von öffentlichen Ladestellen für $i$	-
$S_i$	Länge der Straßen, die mit Ladestellen für Antrieb $i$ ausgestattet sind	mi
$S_{total}$	Gesamtstraßenlänge im Markt	mi
$\overline{R}_i$	Durchschnittliche Reichweite von Fahrzeugen mit Antrieb $i$	mi
$\overline{R}_{ICE}$	Durchschnittliche Reichweite von Fahrzeugen mit Antrieb ICE	mi
$\overline{s}_i$	Durchschnittlicher Weg, den eine Ladestelle für $i$ abdeckt	mi/Lds
$\overline{s}_{ICE}$	Durchschnittlicher Abstand zur nächsten Ladestelle für ICE	mi/Lds
$reload_i^*$	Gewünschte Anzahl Ladevorgänge aller Fahrzeug $i$	1/Jahr
$reload_i^{max}$	Maximale Ladevorgänge je Ladestelle $i$	1/Lds/Jahr
$\phi_{ij}^*$	Angestrebte Anzahl Ladevorgänge je Fahrzeug $ij$	1/Fzg/Jahr
$reload_i^*$	Gewünschte Anzahl Ladevorgänge aller Fahrzeug $i$	1/Jahr
$F_{ij}$	Anzahlg Fahrzeuge $ij$ im Bestand	Fzg
$YMT_{ij}$	Jährlich gefahrene Meilen von $ij$	mi/Jahr
$\sigma_i$	Anteil des Jahres, der zum Laden verwendet wird	1/Lds
$\tau_i^{Lds}$	Durchschnittliche Ladezeit von $ij$	Jahr
$\mathcal{K}_{BEV}^{Bat}$	Durchschnittliche Speicherkapazität der Traktionsbatterie von Batteriefahrzeugen	kWh/Fzg
$\mathcal{P}_{BEV}^{Lds}$	Mittlere übertragbare Energie elektrischer Ladestellen	kWh/(Jahr-Fzg)
$v$	Anteil der Speicherkapazität im Fahrzeug, die während des Ladevorgangs effektiv aufgeladen wird	1/lv

**Parameter und Variablen, Automobilkäufer und -fahrer**

$U_{ij}$	Nutzen von ij	-
$V_{ij}$	Deterministische Nutzenkomponente von ij	-
$\varepsilon$	Stochastische Nutzenkomponente, allg. Störterm	-
$\beta_h$	Käuferpräferenz von Individuum n für Merkmal l	$f(h)$
$x_{nij}$	Ausprägung einer Eigenschaft h des Fahrzeugs ij	$f(h)$
$p_{ij}$	Auswahlwahrscheinlichkeit für ij	-
$A_i$	Anteil Kunden, für die i Teil der Auswahlmenge	-
$A_i^{max}$	Anteil Kunden, für die Ladestellen für i verfügbar sind (maximaler Marktanteil)	-
$r_i^a$	Übergangsrate von i vom Zustand „unbekannt“ zu „akzeptiert“	1/Jahr
$r_i^o$	Übergangsrate von i vom Zustand „akzeptiert“ zu „unbekannt“	1/Jahr
$\alpha_i^e$	Wirkung von exogenen Informationen auf den Übergang von Antrieb i in die Auswahlmenge	1/Jahr
$\alpha_i^a$	Wirkung des Kontaktes zwischen „Kennern“ und „Nichtkennern“ auf den Übergang i in die Auswahlmenge	1/Jahr
$r_{max}^o$	Maximale prozentuale Übergangsrate „Akzeptanz“ nach „unbekannt“	1/Jahr
$\tau_i^o$	Durchschnittliche Dauer bis Antrieb i vergessen wird	Jahr
$p$	Wahrscheinlichkeit	-
$p_{ij}$	Marktanteil von ij	-
$W_{ij}$	Bestand wartender Käufer	Person
$\tau^W$	Durchschnittliche Wartezeit bis zum Auswahlwechsel	Jahr
$\tilde{\alpha}_{ij}^*$	Nachfragerate zweite Wahl	Fzg/Jahr
$\alpha_{ij}^{max}$	Maximale Absatzrate von ij	Fzg/Jahr
$\beta_{Prs,Ek}$	Präferenz für Kaufpreis / ln( Einkommen)	-
$\beta_{ran}$	Präferenz für Reichweite	1/mi
$\beta_{acc}$	Präferenz für Beschleunigung	1/sec
$\beta_{vmax}$	Präferenz für Höchstgeschwindigkeit	1/(mi/h)
$\beta_{relem}$	Präferenz für Relative Emissionen	-
$\beta_{size}$	Präferenz für Fahrzeuggröße	-
$\beta_{be}$	Präferenz für „groß genug“	-
$\beta_{op}$	Präferenz für Kosten je Meile	1/(\$/mi)
$\beta_L$	Präferenz für Verfügbarkeit Ladestellen	-
$\beta_{EV}$	Präferenz für Konstante „Elektrofahrzeug“	-

**Parameter und Variablen, Fahrzeughersteller**

$R_{ij}$	Lagerbestand von $ij$ („retail“)	Fzg
$\tau^a$	Minimale Zeit bis zum Verkauf eines Fahrzeugs	Jahr
$m_{ij}$	Produktionsrate von $ij$	Fzg/Jahr
$m_{ij}^*$	Ziel-Produktionsrate von $ij$	Fzg/Jahr
$K_{ij}$	Produktionskapazität für $ij$	Fzg/Jahr
$ut_{ij}^K$	Auslastung von $K_{ij}$	-
$ut_{ij}^{K*}$	Gewünschte Auslastung von $K_{ij}$	-
$B_{ij}$	Auftragsbestand für $ij$ („orders“)	Fzg
$\tau^m$	Normale Produktionszeit	Jahr
$n_{ij}$	Neuauftragseingang für $ij$	Fzg/Jahr
$n_{ij}^{pull}$	Neuauftragseingang für $ij$ zum Auffüllen des Lagerbestands	Fzg/Jahr
$n_{ij}^{push}$	Neuauftragseingang für $ij$ exogen getrieben	Fzg/Jahr
$n_{ij}^R$	Neuauftragseingang für $ij$ zur Anpassung des Lagerbestands an neuen Zielbestand	Fzg/Jahr
$a_{ij}^{rep}$	Berichtete Absatzrate von $ij$	Fzg/Jahr
$R_{ij}^*$	Angestrebter Lagerbestand von $ij$	Fzg
$\tau^R$	Verzögerung bis zur Anpassung des Lagerbestands	Jahr
$K_{ij}$	Produktionskapazität von $ij$	Fzg/Jahr
$K_{ij}^*$	Zielkapazität für $ij$	Fzg/Jahr
$K_{ij}^{min}$	Minimale unternehmerisch sinnvolle Kapazität für $ij$	Fzg/Jahr
$\tau^K$	Mittlere Anpassungszeit von $K$	Jahr
$\mathcal{L}$	Operator für Erlang-verteilte Verzögerung	-
$\tau_K^{avg}$	Berücksichtigte Vergangenheitsspanne für $K$	Jahr
$\tau_K^{fore}$	Prognosehorizont für $K$	Jahr
$\mathcal{E}_{Flotte}^{GHG}$	GHG-Flottenemissionen	g/mi
$\mathcal{E}_{ij}^{GHG}$	GHG-Emissionen eines Fahrzeugs mit Antrieb $i$ in Segment $j$	g/mi
$\mathcal{E}_{ij}^{GHG*}$	Angestrebte GHG-Fahrzeugemissionen	g/mi
$\mathcal{E}_{Flotte}^{GHG*}$	Angestrebte GHG-Flottenemissionen	g/mi
$\mathcal{E}_{Benzin}^{GHG}$	GHG-Emissionen je verbrauchter Gallone Kraftstoff	(g/mi)/ (gal/mi)
$\mathcal{C}_{ij}^{Benzin}$	Kraftstoffverbrauch von $ij$	gal/mi
$\mathcal{R}_{ij}^{el}$	Elektrische Reichweite des Fahrzeugs $ij$	mi

$\mathcal{K}_{ij}^{Bat}$	Energiespeicherkapazität einer Traktionsbatterie im Fahrzeug $ij$	kWh
$\mathcal{K}_{ij}^{H_2}$	Energiespeicherkapazität eines Wasserstofftanks im Fahrzeug $ij$	kWh
$\mathcal{C}_{ij}^{el}$	Durchschnittlicher Energieverbrauch von Fahrzeug $ij$	kWh/mi
$m_{ij}^{Bat}$	Masse des Energiespeichers in Fahrzeug $ij$	kg
$\mathcal{D}_{Bat}$	Energiedichte des Energiespeichers in Antrieb $i$	kWh/kg
$\psi$	Technologiespezifische Konstante	1/kWh
$M_{Bat}$	Kumulierte Produktion von Traktionsbatterien	kWh
$\mathcal{D}_{Bat}^{max}$	Maximal mögliche Energiedichte von Traktionsbatterien	kWh/kg
$\vartheta$	Wirkung von Erfahrung auf die Lebensdauer von Traktionsbatterien	-
$k_{ij}$	Produktionsstückkosten für Fahrzeug $ij$	\$/Fzg
$k_{ij}^{Body}$	Produktionsstückkosten für Fahrzeug $ij$ ohne Antrieb	\$/Fzg
$k_{ij}^{ICE}$	Produktionsstückkosten für einen konventionellen Antrieb für $ij$	\$/Fzg
$k_{ij}^{CO_2}$	Zusätzliche Stückkosten für die CO <sub>2</sub> -Reduktion für $ij$	\$/Fzg
$k_{ij}^{EA}$	Produktionsstückkosten für einen elektrischen Antrieb in Fahrzeug $ij$	\$/Fzg
$k_{ij}^{Bat}$	Zusätzliche Stückkosten für eine Traktionsbatterie für $ij$	\$/Fzg
$k_{ij}^{HFC}$	Zusätzliche Stückkosten für eine H <sub>2</sub> -Brennstoffzelle für $ij$	\$/Fzg
$k_{ij}^{GHG+}$	Zunahmerate zusätzlicher Stückkosten für die GHG-Reduktion	(\$/Fzg)/Jahr
$k_{ij}^{GHG-}$	Abnahmerate zusätzlicher Stückkosten für die GHG-Reduktion	(\$/Fzg)/Jahr
$\Delta \mathcal{E}_{ij}^{GHG}$	Nicht negative Differenz zwischen aktuellen und angestrebten Fahrzeugemissionen	g/mi
$\omega_k$	Prozentuale Abnahmerate für zusätzliche Stückkosten	1/Jahr
$\rho$	Erfahrungskoeffizient Batterie	-
$k_{kWh}^{Bat}$	Kosten des Energiespeichers je kWh Kapazität	\$/kWh
$M_{kWh}^{Bat}$	Kumulierte Produktion von Traktionsbatteriekapazität	kWh
$\mathcal{P}_{ij}^{HFC}$	Leistung einer Brennstoffzelle in Fahrzeug $ij$	kW/Fzg
$k_{kW}^{HFC}$	Kosten der Brennstoffzelle je kW Leistung	\$/kW
$M_{kW}^{HFC}$	Kumulierte Produktion von Brennstoffzellenleistung	kW
$\sigma$	Erfahrungskoeffizient für Brennstoffzellen	-
$\mathcal{K}_{total}^{Bat}$	Summe der in allen Fahrzeugen installierten Batteriekapazität	kWh
$\tau^{Bat}$	Durchschnittliche Lebensdauer von Traktionsbatterien	Jahr
$\tau_{Gar}^{Bat}$	Garantiezeit für Traktionsbatterien	Jahr
$k_{Gar}^{Bat}$	Kosten für die auszutauschende Batteriekapazität pro Jahr	\$/Jahr
$k_{kWh}^{Bat}$	Produktionskosten für Traktionsbatterien je kWh	\$/kWh

$db_{total}$	Gesamtdeckungsbeitrag	\$/Jahr
$erl_{total}$	Gesamterlöse	\$/Jahr
$k_{total}$	Gesamtkosten	\$/Jahr
$Prs_{ij}$	Kaufpreis für Fahrzeug $ij$	\$/Fzg
$ren_{total}$	Gesamtrendite der Fahrzeughersteller	-
$ren^*(t)$	Angestrebte Rendite der Fahrzeughersteller	-
$Prs_{ij}^*$	Angestrebter Kaufpreis eines Fahrzeugs $ij$	\$/Fzg
$\tau^{Pr}$	Durchschnittliche Anpassungszeit des Kaufpreises	Jahr
$Prs_{ij}^k$	Kostenabhängiger Zielpreis	\$/Fzg
$ut_{ij}^{K^*}$	Gewünschte Auslastung von $K_{ij}$	-
$a_i^*$	Zielabsatz pro Jahr für Fahrzeug $ij$	Fzg/Jahr
$z$	Anteil der Stückkosten eines Fahrzeugs $ij$ als minimaler Kaufpreis	-
$\gamma^k$	Sensibilität für die Abweichung von Stückkosten und Kaufpreis	-
$\gamma^s$	Sensibilität für die Abweichung von Ziel- und Ist-Absatz	-
$\gamma^r$	Sensibilität für die Abweichung von Soll- und Ist-Rendite	-
$\gamma^u$	Sensibilität für die Abweichung von Soll- und Ist-Auslastung	-

### **Parameter und Variablen, Gesetzgeber**

$Crdt_q^{GHG}$	Kumulierte GHG-Credits des Alters $q$	Fzg:g/mi
$crdtin_q^{GHG}$	Zunahmerate der GHG-Credits der Alterskohorte $q$	(Fzg:g/mi)/ Jahr
$crdtout_q^{GHG}$	Abnahmerate der GHG-Credits der Alterskohorte $q$	(Fzg:g/mi)/ Jahr
$Q$	Anzahl Alterskohorten; für GHG-Credits gilt $Q = 5$	-
$q$	Alterskohorte, $q \in \mathbb{Z} \geq 0$	-
$crdtin_0^{GHG}$	Zunahmerate der GHG-Credits der Alterskohorte 0	(Fzg:g/mi)/ Jahr
$\delta$	Delta-Distribution (Dirac-Impuls)	-
$t^{GHG}$	Beginn der Gültigkeit der GHG-Anforderungen	Jahr
$T^{GHG}$	Kontrollzeitraum für GHG-Credits, entspricht der Abtastperiode	Jahr
$n$	Natürliche nichtnegative Zahl, $n \in \mathbb{Z} \geq 0$	-
$eqlzn_q^{GHG}$	Ausgleich defizitärer GHG-Credits in der Alterskohorte $q$ durch neu generierte GHG-Credits	(Fzg:g/mi)/ Jahr
$eqlzo_q^{GHG}$	Ausgleich defizitärer GHG-Credits in der Alterskohorte $q$	(Fzg:g/mi)/

	durch bestehende überzählige GHG-Credits	Jahr
$k_{Strafe}^{GHG}$	Strafkosten für GHG	\$/Fzg
$Crdt^{ZEV*}$	Gesetzliche vorgeschriebene ZEV-Credits	Credit/Jahr
$ZEVReq$	Prozentuale Basisquote für ZEVs	-
$crdt_{ij}^{ZEV}$	ZEV-Credit je Fahrzeug $ij$	Credit/Fzg
$Crdt_q^{ZEV}$	Kumulierte ZEV-Credits des Alters $q$	Credit
$crdtin_q^{ZEV}$	Zunahmerate der ZEV-Credits der Alterskohorte $q$	Credit/Jahr
$crdtout_q^{ZEV}$	Abnahmerate der ZEV-Credits der Alterskohorte $q$	Credit/Jahr
$\chi$	Vielfaches der Abnahmeraten, $\chi \in \mathbb{R}$	-
$t^{ZEV}$	Beginn der Gültigkeit der ZEV-Anforderungen	Jahr
$T^{ZEV}$	Kontrollzeitraum für ZEV-Credits, entspricht der Abtastperiode, hier 1 Jahr	Jahr
$n$	Natürliche nichtnegative Zahl, $n \in \mathbb{Z} \geq 0$	-
$eqlzn_q^{ZEV}$	Ausgleich defizitärer ZEV-Credits in der Alterskohorte $q$ durch neu generierte ZEV-Credits	(g/mi)-Credit / Jahr
$eqlzo_q^{ZEV}$	Ausgleich defizitärer ZEV-Credits in der Alterskohorte $q$ überzählige ZEV-Credits	(g/mi)-Credit / Jahr
$\mathcal{E}_{Flotte}^{NMOG*}$	Flottengrenzwert for NMOG-Emissionen	g/mi
$k_{Strafe}^{ZEV}$	Strafkosten für ZEV	\$/Fzg
$Rbt^{ZEV}$	Budget für Rabatte für den Kauf von Silber Plus- und Gold ZEVs	\$/Fzg
$rbt_i^{ZEV}$	Rabattzahlung für ein Fahrzeug mit Antrieb $i$	\$/Fzg