

# Die Entwicklung des deutschen Pkw-Bestandes: Ein Vergleich bestehender Modelle und die Vorstellung eines evolutionären Simulationsansatzes

Benjamin Kickhöfer<sup>\*</sup>,<sup>1</sup>, Jens Brokate<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Verkehrsforschung

<sup>2</sup>Institut für Fahrzeugkonzepte

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

\*Kontaktadresse: benjamin.kickhoefer@dlr.de

20. Dezember 2017

## Hinweis:

*Dieser Artikel ist von der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft (siehe [www.z-f-v.de](http://www.z-f-v.de)) zur Veröffentlichung angenommen worden und wird dort in Kürze erscheinen.*

## Abstract

Heutige Pkw-Kaufentscheidungen durch private Haushalte und durch Firmen bestimmen die Größe und Zusammensetzung der nationalen Pkw-Flotte für lange Zeiträume. Die adäquate Abbildung dieser Entscheidungen ist somit wichtig für Verkehrsplanung und Politikmaßnahmenentwicklung. In Deutschland existieren mehrere Ansätze zur Abschätzung des zukünftigen Pkw-Bestandes und zur Ableitung von Flottenzusammensetzung, Fahrleistung, Energieverbrauch und Emissionen. Vor dem Hintergrund möglicher disruptiver Veränderungen des Verkehrsmarktes durch die Automatisierung von Pkw stellt sich die Frage, inwieweit die bestehenden Modelle in der Lage sind, den Einfluss technologischer und (verkehrs-)politischer Veränderungen auf den Pkw-Bestand in Deutschland vorherzusagen.

Der vorliegende Artikel stellt daher die bekanntesten Modellansätze zur Abbildung der deutschen Pkw-Flotte sowie einige der zur Modellierung geeigneten Datenquellen vor. Der Vergleich der Modelle zeigt, dass häufig lediglich Punktvorhersagen bereitgestellt werden, ohne die Transformation explizit zu modellieren, und darüber hinaus die Entwicklung der Neuzulassungszahl als exogene Variable benötigt wird. Auch weisen die Modelle Lücken bei der Behandlung demographischer Entwicklungen und Trends oder der Betrachtung des Gesamtmarktes (Interdependenz zwischen Neu- und Gebrauchtwagenmarkt und der jeweiligen Anforderungen der Käufertypen) auf. Im zweiten Teil des Artikels wird ein neuartiger evolutionärer Simulationsansatz vorgeschlagen, der einige der identifizierten Probleme löst und es perspektivisch ermöglichen wird, die Einflüsse regional differenzierter Regulierungen oder (geteilter) autonomer Fahrzeugen auf Pkw-Besitz und -nutzung vorherzusagen.

**Schlagwörter:** *Fahrzeugbestand, Fahrzeugbesitz, Fahrzeugkauf, Flottenmodellierung, Literaturübersicht, Agentenbasierte Simulation, Evolutionäres Modell*

# 1 Einleitung

Zwischen den Jahren 2008 und 2017 stieg das Durchschnittsalter der in Deutschland zugelassenen Pkw von 8,0 auf 9,3 Jahre (KBA 2017a). Dies deutet darauf hin, dass auch die durchschnittliche Lebensdauer der Fahrzeuge zunimmt. Bei einer nahezu konstanten Anzahl an Neuzulassungen von ca. 3–3,5 Mio. Pkw pro Jahr impliziert dies ein Wachstum der gesamtdeutschen Pkw-Flotte (KBA 2017b). Diese Beobachtung steht im Widerspruch zur der Wahrnehmung, dass neue Verkehrsangebote, wie z. B. stationsgebundenes oder free-floating<sup>1</sup> Carsharing, einen Trend in Richtung einer Sharing Economy angestoßen haben, bei dem die Nutzer das Fahrzeug nicht mehr selbst besitzen, sondern nur bei Bedarf nutzen. Derartige Angebote wurden in den letzten Jahren insbesondere in Großstädten stark ausgebaut und verfügen mittlerweile über eine solide Nutzerbasis. Ungeklärt ist bislang, ob sie privaten Pkw-Besitz und/oder Pkw-Nutzung reduzieren. Im Hinblick auf neue Geschäftsmodelle im Rahmen automatisierter Carsharing-Flotten könnten solche Entwicklungen den (privaten) Pkw-Markt in Zukunft jedoch stark beeinflussen.

Für Verkehrsplanung und die Entwicklung politischer Maßnahmen ist es in jedem Fall äußerst relevant, den deutschen Pkw-Bestand und dessen Nutzung vorherzusagen. So ist bspw. die Motorisierungsrate eine wichtige Eingangsgröße für viele Verkehrsmodelle, die zur Infrastrukturplanung verwendet werden. Außerdem werden zeitlich differenzierte Energieverbräuche der Fahrzeuge in Zukunft wichtige Eingangsgrößen für Emissionsmonitoring und – bei zunehmender Elektrifizierung – für die Ladeinfrastrukturplanung darstellen, also für die Kopplung von Verkehrs- und Energiesystem. Während sich Automobilhersteller vor allem für zukünftige Absatzentwicklungen interessieren, stellt sich Kommunen eher die Frage, ob ggf. nicht mehr benötigter Parkraum für andere Nutzungen freigegeben werden kann.

Bisher werden derartige Szenarien von den für die Infrastrukturplanung in Deutschland verwendeten Modellen nicht oder nur ungenügend abgebildet. So erstellten z. B. Schubert, Kluth et al. (2014) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) eine langfristige Prognose des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland für das Jahr 2030 (VP 2030). Diese berücksichtigt alle Verkehrsmittel und bildet u. a. die Basis für den Bundesverkehrswegeplan 2030, welcher der Bewertung aller größeren Investitionen des Bundes in landgebundene Verkehrsinfrastruktur dient. Die Autoren der VP 2030 verwenden eine Funktion mit sinkenden Skalenerträgen (Gompertz-Funktion) und prognostizieren damit für einen Zeitraum von 20 Jahren eine Vergrößerung der deutschen Pkw-Flotte um insgesamt 9,8% (0,5% p. a.), also eine geschätzte Vergrößerung der Flotte von 42,30 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2010 auf 45,91 Mio. im Jahr 2030. Die Autoren folgen mit diesem Ansatz der Argumentation, dass Pkw-Besitzentscheidungen in Industrieländern unabhängig von makroökonomischen Variablen seien und deshalb lediglich von der Zeit abhingen. Zur Berechnung der Anteile verschiedener Antriebe in der Flotte stützen sich die Autoren auf Studien von Nitsch et al. (2012), Schlesinger et al. (2010) und Zimmer et al. (2011). Diese drei Studien versuchen ihrerseits eine Vorhersage der deutschen Pkw-Flotte, weshalb die jeweils zugrunde liegenden Modelle in diesem Artikel genauer vorgestellt werden.

---

<sup>1</sup> Beim free-floating Carsharing kann das Fahrzeug in einem definierten Bereich der Stadt im öffentlichen Straßenraum angemietet und abgegeben werden. Im Gegensatz dazu finden Ausleihe und Rückgabe beim stationsgebundenen Carsharing nur an vorgegebenen Orten statt.

39 Insgesamt stellt sich die Frage, inwieweit die für die Vorhersage der deutschen Pkw-Flotte  
40 verfügbaren Modelle in der Lage sind, den Einfluss technologischer und (verkehrs-)politischer  
41 Veränderungen auf den Pkw-Bestand in Deutschland vorherzusagen, insbesondere vor dem  
42 Hintergrund möglicher disruptiver Veränderungen des Verkehrsmarktes durch die Automatisierung  
43 von Pkw. Der vorliegende Artikel hat daher zunächst zum Ziel, die bekanntesten Modellansätze sowie  
44 einige der zur Modellierung verfügbaren Datenquellen vorzustellen und Lücken in der  
45 Modelllandschaft zu identifizieren. Basierend auf dieser Analyse wird dann ein neuartiger  
46 evolutionärer Modellansatz vorgeschlagen, der es perspektivisch ermöglichen soll, diese Lücken zu  
47 schließen und bspw. Einflüsse regionaler Regulierungen oder (geteilter) autonomer Fahrzeuge auf  
48 Pkw-Besitz und -nutzung vorherzusagen.

49 Der vorliegende Artikel ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 werden ausgewählte, in Deutschland  
50 verfügbare Modelle zur Abbildung der Pkw-Märkte vorgestellt, deren Schwerpunkte beleuchtet und  
51 Lücken in der Modelllandschaft identifiziert. Abschnitt 3 erläutert die Modellstruktur eines sich  
52 aktuell in der Entwicklung befindlichen evolutionären Simulationsansatzes einschließlich der zur  
53 Modellierung geeigneten Datenquellen. Dabei wird auch auf Herausforderungen eingegangen, die  
54 sich im Rahmen dieser Entwicklung bislang ergeben haben. Abschnitt 4 fasst die wichtigsten  
55 Erkenntnisse dieses Artikels zusammen und gibt einen Ausblick auf daraus abgeleitete relevante  
56 Forschungsfragen, die im Rahmen der Modellweiterentwicklung berücksichtigt werden sollten.

## 57 **2 Vergleich ausgewählter Modellansätze**

58 In diesem Abschnitt werden in Deutschland bestehende Modelle<sup>2</sup> vorgestellt, die die Abbildung der  
59 deutschen Pkw-Märkte zum Ziel haben. Die Autoren stützen sich dabei auf Literaturrecherchen zu  
60 den beschriebenen Modellen, ein Anspruch auf einen allumfassenden Überblick wird nicht erhoben.  
61 Die Vorstellung beschränkt sich auf die Konzepte der Modelle, eine Betrachtung und Vergleich der  
62 jeweiligen Ergebnisse erfolgt nicht.<sup>3</sup>

### 63 **2.1 Modelltypen**

64 Nach Al-Alawi und Bradley (2013) lassen sich Modelltypen in Bezug auf die Nachfrageseite wie folgt  
65 kategorisieren:

- 66 • Agentenbasierte Modelle (engl. *agent-based models*)
- 67 • Konsumentenentscheidungsmodelle (engl. *consumer choice models*)
- 68 • Diffusionsmodelle (engl. *diffusion rate models*)

69 Al-Alawi und Bradley (2013) beschreiben, dass in *agentenbasierten Modellen* i. d. R. eine virtuelle  
70 Umgebung geschaffen wird, in welcher Aktionen und Interaktionen einzelner Agenten simuliert  
71 werden. Die Agenten können z. B. Individuen oder Organisationen abbilden, die sich durch

---

<sup>2</sup> Die Begriffe „Arbeiten“, „Studien“ und „Modelle“ werden nachfolgend synonym verwendet.

<sup>3</sup> Die Modellvorstellungen sind dabei relativ ausführlich, so dass detailliertere Leser und Modellierer in die Lage versetzt werden, die jeweiligen Stärken und Schwächen der Modelle – auch auf technischer Ebene – zu identifizieren. Weniger detailliertere Leser können direkt ab Abschnitt 2.3 weiterlesen, wo eine Synthese und Bewertung der vorgestellten Modelle durchgeführt wird.

72 Eigenschaften und Präferenzen unterscheiden, was wiederum deren jeweiliges Handeln in den  
73 gewählten Systemgrenzen bestimmt.

74 Unter dem Begriff *Konsumentenentscheidungsmodelle* verstehen die Autoren diskrete  
75 Entscheidungsmodelle (Discrete-Choice-Modelle). Diese Modelle beschreiben das Verhalten von  
76 Individuen oder Kollektiven, die sich aus einer endlichen und diskreten Menge an Alternativen  
77 entscheiden. Mit Hilfe realer Beobachtungen (engl. revealed preferences [RP]) oder Befragungen  
78 (engl. stated preferences [SP]) kann der Einfluss bestimmter Attribute der verfügbaren Alternativen  
79 oder sich ändernder Rahmenbedingungen auf die Auswahlwahrscheinlichkeiten abgeleitet werden,  
80 wobei zur Kalibrierung historische Verteilungen vorliegen müssen. Da in den Modellen i. d. R. nicht  
81 alle Einflüsse auf die Kaufentscheidung abgebildet werden können, setzen sich die Modelle  
82 üblicherweise aus einer deterministischen und einer stochastischen Komponente zusammen.

83 Das Ziel von *Diffusionsmodellen* ist die Nachahmung von Produktlebenszyklen im Zeitverlauf.  
84 Diffusion bezeichnet dabei den Prozess, in dem sich neue Technologien oder Produkte in einem  
85 Markt durchsetzen (Rogers 1983). Die Diffusionsrate stellt dabei die Geschwindigkeit dar, mit der sich  
86 ein neues Produkt durchsetzt. Die klassischen Ansätze hierfür sind unter anderem die  
87 Charakterisierung von Adopter-Typen oder der Einsatz einer S-Kurve zur Abbildung der  
88 Diffusionsrate. Für die Modellierung der Diffusion von Technologieinnovationen im Pkw-Bestand  
89 wird häufig das Modell von Bass (1969) genutzt. Es benötigt historische Zeitreihen von  
90 Absatzmengen und beruht auf der Annahme, dass Produkte sich in Generationen weiterentwickeln.

91 Die drei genannten Modelltypen können auch miteinander kombiniert werden. Solche Hybride  
92 vereinen mindestens zwei Modelltypen und versuchen so, bekannte Schwächen eines einzelnen  
93 Modelltyps zu überwinden. So zeigen bspw. Jensen et al. (2016), dass es problematisch ist, die  
94 Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen ausschließlich durch ein Discrete-Choice-Modell  
95 abzubilden, welches anhand tatsächlicher Marktanteile kalibriert wurde: Ist der Marktanteil einer  
96 Option gering, erhält diese Option eine stark negative Konstante. Eventuelle Verbesserungen der  
97 Attribute dieser Option bleiben unberücksichtigt, sodass zukünftige Marktanteile dieser Option  
98 systematisch unterschätzt werden. Eine Ergänzung des Discrete-Choice-Modells um ein  
99 Diffusionsmodell kann diesen Nachteil ausgleichen (vgl. Jensen et al. 2016).

100 In Bezug auf die Angebotsseite, also das im Modell hinterlegte Technologieangebot, kann zwischen  
101 zwei Ansätzen für die Berechnung der Produktionskosten und des Fahrzeugverbrauches  
102 unterschieden werden. In einem Top-down-Ansatz werden Kosten und Energieverbräuche pauschal  
103 für ganze Fahrzeuge oder den Marktdurchschnitt bestimmt. Für die Abbildung des Status quo dienen  
104 meist Marktrecherchen als Grundlage. Die zukünftige Entwicklung wird basierend auf Trendlinien  
105 und Expertenmeinungen abgeschätzt. Im Bottom-up-Ansatz hingegen werden die Kosten auf Ebene  
106 der Fahrzeugkomponenten bestimmt. Mittels Fahrzeugsimulationen kann der Einfluss einzelner  
107 Komponenten des Antriebs auf den Energieverbrauch bestimmt werden. Als wesentliche Vorteile des  
108 Bottom-up-Ansatzes gelten die Transparenz im Vorgehen und die Unabhängigkeit bezüglich der  
109 verwendeten Datengrundlage. Im Vergleich zum Top-down-Ansatz gilt der Bottom-up-Ansatz daher  
110 als besseres Vorgehen in der Technologiebewertung (EPA 2011).

111 Für eine modellendogene Berechnung zukünftiger Fahrzeug- oder Komponentenkosten kann die auf  
112 den Flugzeugbau (Wright 1936) zurückgehende Lernkurven-Methode genutzt werden, die einen

113 Zusammenhang zwischen Herstellungskosten und kumulierter Produktionsmenge herstellt. Im Zuge  
114 der Erweiterung der Theorie um zusätzliche Einflussfaktoren wird in der Literatur der  
115 verallgemeinernde Begriff der Erfahrungskurve verwendet (Jamasb und Köhler 2007). Bei einer  
116 solchen endogenen Kostenberechnung dient der simulierte Fahrzeugabsatz des Vorjahres als Input  
117 für den aktuellen Zeitschritt. Somit entsteht eine Rückkopplung zwischen den Ergebnissen zweier  
118 Berechnungsschritte.

## 119 **2.2 Bestehende Modelle**

### 120 **2.2.1 OPTUM**

121 Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt (BMU) erstellten das Öko-Institut und das  
122 Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) eine Studie zur ‚Optimierung der  
123 Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen‘ (OPTUM), in der Fahrzeugnutzung und  
124 Energiewirtschaft integriert betrachtet werden (Zimmer et al. 2011).<sup>4</sup> Interessant ist hierbei  
125 insbesondere, dass zukünftige Marktpotenziale von Elektrofahrzeugen bezogen auf bestimmte  
126 Nutzergruppen (Einsatzmuster) bestimmt werden und dabei die Kaufentscheidung für Neuwagen  
127 modelliert wird. Als empirische Grundlage für diese Modellierung dienen eine qualitative  
128 Untersuchung mittels Fokusgruppen sowie eine standardisierte Stated-preference-Befragung (SP)  
129 von Neuwagenkäufern.

130 Zunächst definieren die Autoren ein Maximalpotenzial für Elektrofahrzeuge, differenziert nach  
131 Fahrzeuggrößenklassen. Dieses beschreibt den theoretisch maximal durch Elektrofahrzeuge (BEV und  
132 PHEV) substituierbaren Anteil des deutschen Pkw-Bestandes bei gegebenen Einsatzmustern und  
133 angenommener (Lade-)Infrastrukturentwicklung. Dabei stützt sich die Studie auf die berichteten  
134 Wege der Befragung ‚Mobilität in Deutschland 2008‘ (MiD 2008, vgl. Follmer et al. 2010) und ergänzt  
135 diese um unregelmäßig vorkommende Fahrten, die ggf. oberhalb der Reichweite von  
136 batterieelektrisch angetriebenen Pkw liegen. Über die Kopplung mit den Ergebnissen der SP-  
137 Befragung leiten die Autoren ein Marktpotenzial ab, das die Obergrenze des möglichen Marktanteils  
138 von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen (und damit auch im Bestand) darstellt. Dies ist auch  
139 insofern als Obergrenze zu interpretieren, weil die relevanten Parameter der Fahrzeugtechnologien  
140 abgeschätzt und nicht über Rückkopplung mit den Stückzahlen berechnet werden und so die  
141 Unsicherheiten bei der Kaufentscheidung nur unzureichend abgebildet werden. Es findet bei diesem  
142 Dieser Ansatz verfolgt demnach eine Modellierung des Pkw-Neuwagenmarktes mit fixierter  
143 Neuzulassungszahl und fixierter Aufteilung auf die Größenklassen, eine Interaktion mit dem  
144 Gebrauchtwagenmarkt, der die neuen Fahrzeuge nach einigen Jahren aufnehmen müsste, fehlt.

145 Im Rahmen des Projektes ‚Renewability III‘, welches Optionen zur Dekarbonisierung des  
146 Verkehrssektors bis 2050 untersuchte, wurde OPTUM weiterentwickelt (Zimmer et al. 2016). Der  
147 Ansatz ist als zielgetrieben zu charakterisieren, d. h., die Dekarbonisierung des Verkehrssektors  
148 musste in allen Szenarien erreicht werden. Bei der Modellierung der Neuzulassungen werden die  
149 Nutzer nach Haltergruppe und Jahresfahrleistung differenziert und wählen in einem Discrete-Choice-

---

<sup>4</sup> Dies ist eine der drei Studien, auf die sich die VP 2030 bzgl. der Flottendurchdringung mit verschiedenen Antrieben stützt. Die beiden anderen Studien sind zum einen die *Leitstudie* von Nitsch et al. (2012), bei der VECTOR21 zur Anwendung kam (siehe Abschnitt 2.2.3), zum anderen die *Energiestudie* von Schlesinger et al. (2010), welche allerdings keine Pkw-Marktmodellierung vornimmt.

150 Modell basierend auf den Total Cost of Ownership (TCO) ein Fahrzeug. Die Parameter des Modells  
151 wurden aus dem Fahrzeugdatensatz der MiD 2008 für Diesel und Benzinfahrzeuge geschätzt, für  
152 andere Antriebe über die reale Absatzentwicklung zwischen 2010 und 2014 abgeleitet. Die  
153 technologische Entwicklung wird im Gegensatz zur ursprünglichen Variante von OPTUM nicht mehr  
154 durch eine einfache Dämpfungsfunktion, sondern über Kostenkurven einer eigens entwickelten  
155 Technologiedatenbank abgebildet. Diese stellt die Kosten verschiedener Technologien zu  
156 verschiedenen Zeitpunkten in der Zukunft dar, koppelt aber im Gegensatz zu VECTOR21 (siehe  
157 Abschnitt 2.2.3) die Kostenminderungen nur rudimentär an die Stückzahlen einer bestimmten  
158 Technologie. Da der Gesamt-Pkw-Bestand (abgebildet über eine Prognose der Motorisierungsrate)  
159 eine exogene Größe ist, kann nicht modelliert werden, welche Änderungen sich bspw. durch neue  
160 Mobilitätsangebote ergeben würden. Derartige Entwicklungen können nur indirekt über die  
161 Motorisierungsrate berücksichtigt werden. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

## 162 **2.2.2 ALADIN**

163 Im Auftrag der ‚Nationalen Plattform Elektromobilität‘ (NPE) erstellte das Fraunhofer-Institut für  
164 System- und Innovationsforschung (ISI) eine Studie zu ‚Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge‘  
165 (Plötz et al. 2013; Plötz et al. 2014). Das darin entwickelte Modell ALADIN (ALternative Antriebe  
166 Diffusion und INfrastruktur)<sup>5</sup> analysiert einzelne Fahrprofile von Fahrzeugen in mindestens einer für  
167 die Nutzung repräsentativen Woche, wodurch Kaufentscheidungen nicht auf Basis durchschnittlicher  
168 Jahresfahrleistungen modelliert werden müssen. Damit ähnelt die Herangehensweise jener von  
169 OPTUM, wobei für den Privatverkehr auf Daten des Deutschen Mobilitätspanels (MOP, siehe  
170 Abschnitt 3.1.3) und für den Wirtschaftsverkehr unter ausschließlicher Berücksichtigung reiner  
171 Flottenfahrzeuge auf Daten des Projekts ‚Regional Ecomobility 2030‘ (REM2030)<sup>6</sup> zurückgegriffen  
172 wird.

173 Auch hier dienen Neuzulassungen von Pkw als Eingangsgröße für die Modellierung; diese werden auf  
174 Grundlage historischer Daten und qualitativer Überlegungen extern bestimmt und auf 3,1 Mio. Pkw  
175 pro Jahr fixiert. Die Aufteilung auf verschiedene Größenklassen und Haltergruppen wird ebenfalls  
176 anhand historischer Daten bestimmt und wird über den Modellierungszeitraum hinweg als konstant  
177 angenommen (Plötz et al. 2013, S. 40-44). Eine Rückkopplung der Neuzulassungen mit dem  
178 Gebrauchtwagenmarkt und eine Modellierung der dortigen Transaktionen finden ebenso wenig statt  
179 wie eine direkte Berücksichtigung der Preise der Technologien in Abhängigkeit von Stückzahlen;  
180 diese Abhängigkeit wird über Szenarien und entsprechende Lernkurven approximiert.

181 Die Energieverbräuche konventioneller Antriebe sind der Literatur entnommen, ihnen wird pauschal  
182 eine lineare Verbesserung im Laufe des Betrachtungszeitraums unterstellt. Hierbei werden die dem  
183 Kunden zur Auswahl stehenden Varianten konventionell betriebener Fahrzeuge vernachlässigt.  
184 Damit entfällt auch der Einfluss spezifischer Kundencharakteristika auf die Technologiewahl und auf  
185 die Emissionsreduktion im Gesamtmarkt. Ebenso verhält es sich mit den Varianten elektrifizierter  
186 Antriebe, insbesondere da bedarfsgerechte Fahrzeugauslegungen und verschiedene  
187 Betriebsstrategien keine Berücksichtigung finden. Das Modell ist eines der am besten  
188 dokumentierten Modelle, es ist jedoch nicht öffentlich verfügbar.

---

<sup>5</sup> Siehe auch Wietschel et al. (2013) sowie Gnnan (2015) für weiterführende Beschreibungen des Modells.

<sup>6</sup> Siehe <http://www.rem2030.de/rem2030-de/>.

### 189 **2.2.3 VECTOR21**

190 Das Vehicle Technologies Scenario Modell (VECTOR21), welches am Institut für Fahrzeugkonzepte  
191 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wird, geht auf die Dissertation von  
192 Mock (2010) zurück und wurde bereits in vielen Forschungs- und Beratungsprojekten verwendet. Im  
193 Fokus von VECTOR21 stand ursprünglich die Vorhersage zukünftiger Marktanteile verschiedenartiger  
194 Pkw, die sich hinsichtlich Fahrzeugtechnologie, Antrieb und resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen  
195 unterscheiden. Dafür werden Entwicklungspfade verschiedener Antriebstechnologien simuliert, die  
196 sich über eine Rückkopplung mit Kaufentscheidungen auf dem Neuwagenmarkt im Zeitverlauf in  
197 unterschiedlichem Maße durchsetzen. Die Absatzzahl des Vorjahres bestimmt den Stückpreis eines  
198 Pkw im Folgejahr mit Hilfe von Lernkurven.

199 Für die Modellierung der Neuwagen-Kaufentscheidungen wird ein TCO-Modell<sup>7</sup> verwendet, wobei  
200 Kundengruppen anhand der von ihnen gewünschten Fahrzeug-Größenklasse, Jahresfahrleistung und  
201 Adoptionsbereitschaft (Rogers 1983) differenziert werden. Im Gegensatz zu OPTUM handelt es sich  
202 nicht um einen nutzenbasierten Ansatz mit Zufallsterm (Logit-Modell), sondern um einen Ansatz der  
203 deterministischen Kostenminimierung. Die Anzahl von Pkw-Neuzulassungen ist eine exogene  
204 Eingangsgröße für die Modellierung und muss extern bestimmt werden; die Aufteilung auf die  
205 verschiedenen Antriebe erfolgt im Verlauf der Modellierung durch VECTOR21. Nicht berücksichtigt  
206 werden dabei Nutzungsprofile, die sich auf unregelmäßige längere Fahrten beziehen und sich bei  
207 bestimmten Antrieben auf den Wiederverkaufswert (Restwert) und damit auf die Diffusion der  
208 Technologie insgesamt auswirken könnten. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

### 209 **2.2.4 TREMOD**

210 Das Modell TREMOD (TRansport Emission Estimation MODel) entstand in den 1990er Jahren im  
211 Rahmen eines Vergleichs und einer Konsolidierungsphase verschiedener Modelle zur  
212 Emissionsberechnung, aus der zunächst das „Handbuch für die Berechnung von Emissionsfaktoren  
213 für Kraftfahrzeuge“ (HBEFA) hervorging. Sowohl das Modell als auch das Handbuch werden seitdem  
214 regelmäßig aktualisiert, wobei ersteres auch die Möglichkeit bietet, die Auswirkung von Maßnahmen  
215 auf die Schadstoffemissionen des Verkehrs für zukünftige Jahre mittels Szenarien zu modellieren  
216 (siehe z. B. Knörr et al. 2012). Dies beinhaltet auch die Vorhersage des Pkw-Bestands inklusive  
217 technischer Differenzierung auf der Grundlage von Fahrzeugkonzepten.

218 Die Entwicklung der Fahrzeugflotten wird in TREMOD mit Hilfe eines Umschichtungsmodells  
219 berechnet, welches Annahmen über die jährlichen Neuzulassungen und  
220 Überlebenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Fahrzeugsegmente benötigt. Die Autoren betonen  
221 hierbei, dass die resultierenden Zahlen keine Bestandsprognosen sind. Es wird keine Marktsimulation  
222 durchgeführt, vielmehr werden Szenarien zum Pkw-Absatz und zur Struktur der Neuzulassungen  
223 erstellt. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar, allerdings wird die Weiterentwicklung durch  
224 Kooperationspartner ideell und finanziell getragen; dazu zählen unter anderem das  
225 Umweltbundesamt (UBA), verschiedene Bundesministerien, der Verband der Automobilindustrie  
226 (VDA), der Mineralölwirtschaftsverband und die Deutsche Bahn AG.

---

<sup>7</sup> Mock (2010) spricht von Relevant Cost of Ownership (RCO) und berücksichtigt nur die marginalen Kosten, also keine Fixkosten.

## 227 **2.2.5 Shell-Studien**

228 Seit 1979 verwendet Shell Deutschland Szenarien, um Einflussfaktoren auf die zukünftige  
229 Entwicklung des Pkw-Verkehrs zu untersuchen. Dazu zählen auch Szenarien zur Entwicklung des Pkw-  
230 Bestandes, des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gegenstand der Betrachtung in der  
231 neuesten Shell-Studie ist die Situation in Deutschland im Zeithorizont von 2013 bis 2040 (Adolf et al.  
232 2015).

233 Die Anzahl der Neuzulassungen wird über Motorisierungsraten (Punktprognosen) abgeleitet, in die  
234 demographische und sozio-ökonomische Veränderungen detailliert eingehen. Nicht abgebildet  
235 werden hingegen Rückkopplungseffekte zwischen veränderten Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen  
236 und Pkw-Besitz und -Nutzung abgebildet. Kosten und Verbräuche neuzugelassener Pkw werden auf  
237 Basis der Kosten und Verbräuche des Bestandes und nicht bottom-up pro Fahrzeug berechnet. Über  
238 Auf- und Abschläge zur Referenz Ottoantrieb werden Kosten und Verbräuche aller betrachteten  
239 Antriebe berechnet. Somit kann der Einfluss der Kundenentscheidung auf die Emissionsreduktion  
240 nicht abgebildet werden. Die Entwicklung der Infrastruktur alternativer Antriebe ist nicht  
241 berücksichtigt. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

## 242 **2.2.6 Marktmodellierung Elektromobilität (MMEM)**

243 In der durch das BMU geförderten Studie „Marktmodellierung Elektromobilität“ (MMEM) wird eine  
244 Kopplung zwischen Discrete-Choice- und Diffusionsmodell genutzt, um die Marktdurchdringung von  
245 Elektrofahrzeugen zu berechnen (ESMT 2011). Das Modell bildet das Verhalten der Hauptakteure im  
246 System der Elektromobilität ab. Neben den durch die Politik vorgegebenen Rahmenbedingungen und  
247 den Nutzern sind die Fahrzeughersteller, der Energiesektor und die Infrastrukturbetreiber mit ihren  
248 Wechselwirkungen untereinander berücksichtigt.

249 Der Ergebnisbericht (ESMT 2011) beschreibt das verwendete Modell nicht ausreichend, um den  
250 Ansatz vollständig nachvollziehen zu können. Die Autoren geben jedoch an, dass die  
251 Kaufentscheidung der modellierten Kunden diskret, nutzenmaximierend und unter Berücksichtigung  
252 der TCO erfolgt. Dem Modell selbst liegen keine SP-Befragungen zugrunde, vielmehr basieren die  
253 Zahlungsbereitschaften der Kunden für alternative Antriebe auf einer Meta-Analyse vorhandener SP-  
254 Befragungen. Die weiteren Nutzenattribute alternativer Antriebe sind geschätzt, wobei unklar ist, auf  
255 welche Weise dies geschieht. Den modellierten Kunden wird eine Auswahl von neun  
256 Antriebskonzepten in den elf Segmenten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) gegenübergestellt.  
257 Vermutlich wird dann durch eine vorgegebene Wahrscheinlichkeitsfunktion für jeden Modellkunden  
258 die Auswahlwahrscheinlichkeit jeder Fahrzeugoption berechnet. Der Marktanteil jeder  
259 Fahrzeugoption wird auf Basis dieser Auswahlwahrscheinlichkeit und eines Bass-Diffusionsmodells  
260 hochgerechnet. Die Einzelheiten dieses hybriden Modells bleiben jedoch unklar: So wird die  
261 Kostendegression von Traktionsbatterien mit Hilfe von Lernkurven berechnet, jedoch nicht explizit  
262 erläutert, inwieweit hierfür Simulationsergebnisse als Input genutzt werden und somit eine  
263 dynamische Kostendegression realisiert wird. Technologiekosten und  
264 Verbrauchsminderungspotenziale sind nicht bottom-up berechnet. Das Modell ist nicht öffentlich  
265 verfügbar.

266



### 267 **2.2.7 DEFINE**

268 Ziel des durch die Europäische Union (EU) geförderten Projektes DEFINE war die Untersuchung  
269 ökonomischer Effekte einer erhöhten Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in mehreren  
270 europäischen Ländern, darunter auch Deutschland (DEFINE 2014). Im Rahmen einer für Österreich  
271 durchgeführten Haushaltsumfrage wurden Präferenzen von Haushalten zu Kauf und Nutzung von  
272 Elektrofahrzeugen erhoben und ein diskretes Entscheidungsmodell geschätzt (Bahamonde-Birke und  
273 Hanappi 2016). DEFINE integriert diese Schätzungen in das Käufermodell von OPTUM (siehe  
274 Abschnitt 2.1), um das Marktpotenzial der Elektromobilität abzuschätzen. Mittels eines  
275 Diffusionsmodells wird dann die Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge berechnet. Damit  
276 berücksichtigen die Autoren, dass die Vorhersage der Marktentwicklung nicht durch ein im Ist-  
277 Zustand kalibriertes Discrete-Choice-Modell ausgedrückt werden kann, da im Ist-Zustand der  
278 Marktanteil von Elektrofahrzeugen zu gering ist, um gültige Entwicklungen für die Zukunft  
279 vorherzusagen (Jensen et al. 2016). Insofern lässt sich die Vorgehensweise bei DEFINE gut als  
280 Ausgangspunkt für eine Modellentwicklung verwenden. Einzig das Emissionsreduktionspotenzial  
281 konventioneller Antriebe ist nur rudimentär abgebildet, da deren Entwicklung nicht bottom-up  
282 modelliert wird. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

### 283 **2.2.8 DISCO**

284 Kihm (2014) und Kihm und Trommer (2014) untersuchen mit dem am Institut für Verkehrsforschung  
285 des DLR entwickelten Modells DISCO (DISaggregated Car Ownership) das  
286 Emissionsreduktionspotenzial von Elektrofahrzeugen bis ins Jahr 2030 für Deutschland. Den  
287 Ergebnissen liegen kostengetriebene Besitzentscheidungen der deutschen Bevölkerung auf Basis der  
288 MiD 2008 zugrunde. Dies ermöglicht den Einbezug spezifischer Nutzercharakteristika wie Wohnort  
289 und Mobilitätsverhalten sowie eine Unterscheidung der Fahrzeugnutzung, wobei zwischen den  
290 Besitzern von Privatfahrzeugen, Firmenwagen und rein gewerblichen Flotten unterschieden wird. Bei  
291 dem Modell handelt es sich um ein statisches Discrete-Choice-Besitzmodell, was zwei grundsätzliche  
292 Probleme mit sich bringt: (i) es wird eine sehr große Anzahl von Alternativen modelliert, welche  
293 zusätzlich auch noch stark korreliert sind; dadurch sind die Ergebnisse tendenziell instabil; (ii) die  
294 statische Besitzentscheidung ignoriert den evolutionären Charakter des Pkw-Marktes. Die von den  
295 Autoren getroffenen Schlussfolgerungen zu Auswirkungen von bspw. Einkommensänderungen auf  
296 den Pkw-Besitz wären nur dann gültig, wenn alle Haushalte im Betrachtungsjahr ihren Pkw-Besitz  
297 überdenken und anpassen würden; dies ist nicht realistisch.

298 Schließlich ist im Modell die Emissionsreduktion durch eine Substitution konventionell gefahrener  
299 durch elektrisch gefahrene Kilometer Gegenstand der Analyse. Dadurch werden die Verbesserung  
300 konventioneller Antriebe und die damit einhergehende Emissionsreduktion aller Neuzulassungen  
301 vernachlässigt. Zudem wird bei der Betrachtung der durch Elektrofahrzeuge substituierten Strecken  
302 der tatsächlich elektrisch gefahrene Streckenanteil von Hybridfahrzeugen nicht berücksichtigt. Das  
303 Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

### 304 **2.2.9 Modell von Kieckhäfer**

305 Ziel des von Kieckhäfer (2013) und Kieckhäfer et al. (2014) entwickelten Modells ist die Ableitung von  
306 Handlungsempfehlungen zur Gestaltung zukünftiger Fahrzeugportfolios in der Automobilindustrie.  
307 Mittels agentenbasierter Modellierung werden Marktanteile auf Basis des Verhaltens individueller  
308 Agenten abgebildet. Dabei werden die Kaufentscheidungen der Agenten mittels eines Discrete-

309 Choice-Modells abgebildet. Diese Entscheidungen beeinflussen das aggregierte Systemverhalten,  
310 welches – basierend auf dem Ansatz von Wansart und Schnieder (2010) – in einem  
311 systemdynamischen Simulationsmodell umgesetzt ist. Die Anzahl der Neuzulassungen ist exogen  
312 vorgegeben und das Modell berechnet die Marktdurchdringung der zur Auswahl stehenden  
313 Antriebsalternativen unter Berücksichtigung der Kaufentscheidung, der Entwicklung von  
314 Antriebstechnologien und der Infrastruktur. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

#### 315 **2.2.10 Modell von Plötz et al.**

316 Die Arbeiten von Plötz et al. (2012) sind als Vorläufer des Modells ALADIN zu sehen. Die Autoren  
317 verwenden ein TCO-Neuwagenkäufermodell zur Abbildung des Neuwagenmarktes in Bezug auf  
318 verschiedene Antriebstechnologien. Mit dem TCO-Modell wird die Antriebswahl beim  
319 Neufahrzeugkauf deterministisch kostenminimierend bestimmt. Segmentabhängig werden die  
320 Marktanteile auf Basis von Fahrleistungsverteilungen ermittelt. Die Daten für letztere stammen aus  
321 dem Deutschen Mobilitätspanel (MOP) und werden mit einer Log-Normalverteilung approximiert.  
322 Für die Hochrechnung auf den Fahrzeugbestand wurden die Bestandsstatistiken des KBA der Jahre  
323 2001 bis 2009 ausgewertet. Die Daten aus den Jahren 2010 und 2011 wurden nicht herangezogen,  
324 um einen drastischen Verjüngungseffekt im Bestand aufgrund der Umweltprämie nicht in der  
325 Funktion abzubilden. Die gewonnene Funktion beschreibt die Überlebenswahrscheinlichkeit in  
326 Abhängigkeit vom Fahrzeugalter und wurde mit einer Weibull-Verteilung approximiert. Ähnlich wie  
327 in den meisten anderen der vorgestellten Modelle findet eine Umschichtung der gebrauchten  
328 Fahrzeuge statt, die nach einem gewissen Alter mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit aus der  
329 Flotte ausscheiden. Eine Differenzierung der Kunden über die Fahrleistung und  
330 Fahrzeugsegmentierung hinaus wird nicht vorgenommen. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

#### 331 **2.2.11 Weitere Modelle**

332 Neben den vorgestellten Modellen gibt es weitere Ansätze, die den deutschen Pkw-Bestand oder den  
333 deutschen Neuwagenmarkt hinsichtlich der Diffusion alternativer Antriebe beleuchten, z. B. das  
334 Roadmap-Modell<sup>8</sup> des International Council on Clean Transportation (ICCT) und TREMOVE<sup>9</sup> von  
335 Transport and Mobility Leuven, welches durch die Europäische Kommission gefördert wurde. Das  
336 besondere an beiden Modellen ist, dass sie frei verfügbar und somit deutlich transparenter sind als  
337 alle anderen aufgeführten Modelle. Das Roadmap-Modell nimmt keine explizite Flottenmodellierung  
338 vor, sondern schätzt ähnlich der VP 2030 die Verkehrsnachfrage über Motorisierungsraten in  
339 Abhängigkeit von der Wirtschaftsentwicklung verschiedener Länder. TREMOVE modelliert den  
340 Fahrzeugbestand relativ klassisch mittels eines Neuzulassungs-Umschichtungs-Modells; der Pkw-  
341 Absatz berechnet sich dabei über die Differenz zwischen der Anzahl von Fahrzeugen im Bestand und  
342 den Fahrzeugen, die nötig sind, um die Verkehrsnachfrage zu bedienen.

343 Mit einem nutzenbasierten Ansatz schlägt Redelbach (2016) eine Veränderung von VECTOR 21 vor,  
344 bei welcher der deutsche Pkw-Neuzulassungsmarkt modelliert wird, um die zukünftige  
345 technologische Entwicklung alternativer Antriebe und ihre wichtigsten Einflussfaktoren zu  
346 untersuchen. Die Kaufentscheidungen werden mittels eines Discrete-Choice-Modells abgebildet, das  
347 neben Kosten auch technische und ökologische Kriterien einbezieht. Für die Abbildung der

---

<sup>8</sup> Siehe <http://www.theicct.org/global-transportation-roadmap-model>.

<sup>9</sup> Siehe <http://www.tmleuven.be/methode/tremove/home.htm>.

348 Heterogenität der Nutzer in Bezug auf ihr Fahrverhalten und ihre Präferenzen beim Pkw-Kauf wird  
349 ein stochastischer Ansatz zur Generierung repräsentativer Käuferprofile (Agenten) genutzt. Die  
350 hierfür notwendigen Häufigkeitsverteilungen der relevanten Nutzercharakteristika innerhalb der  
351 Gesamtbevölkerung werden auf Basis empirischer Daten zum Mobilitäts- und Konsumverhalten  
352 abgeleitet (MiD 2008 und VerbraucherAnalyse 2012). Eine Berechnung des Fahrzeugbestandes sowie  
353 die Zuordnung von Fahrzeugen zu den entsprechenden Käuferagenten werden allerdings nicht  
354 vorgenommen.

355 In den Pkw-Marktsimulationen von Weikl (2010) stehen einer heterogenen Käufergruppe von  
356 Neufahrzeugen verschiedene Antriebskonzepte zur Auswahl, die sich hinsichtlich ihrer ökonomischen  
357 Eigenschaften und Verwendung unterscheiden. Reichweite, Umweltverträglichkeit, die Verfügbarkeit  
358 von Infrastruktur und die angebotene Modellpalette sind neben den Fahrzeugkosten hierbei als  
359 Faktoren berücksichtigt. Der Bewertung der unterschiedlichen Antriebskonzepte liegen  
360 Expertenschätzungen zur Kosten- und Verbrauchsentwicklung zugrunde. Die Kundenentscheidung  
361 erfolgt nach Weikl nutzenorientiert und ist abhängig von deren Fahrleistung, was auf die  
362 Verwendung eines Discrete-Choice-Modells hindeutet. Die Werte für die Fahrleistungen werden der  
363 Literatur entnommen, eine Berücksichtigung realer Fahrprofile erfolgt nicht. Die  
364 Modellberechnungen sind auf den Pkw-Neuwagenmarkt beschränkt.

365 Im Ausland werden weitere Ansätze zur Modellierung des Pkw-Bestands verfolgt, auf die an dieser  
366 Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden kann. Es sei lediglich erwähnt, dass im  
367 deutschsprachigen Raum insbesondere Mueller und de Haan (2009) und de Haan et al. (2009) die  
368 Entwicklung vorangetrieben haben. Eine etwas ältere Übersicht über verschiedene Modelle geben de  
369 Jong et al. (2002) und de Jong et al. (2004).

### 370 **2.3 Synthese und Bewertung der vorgestellten Modellansätze**

371 Die Auswertung der Literatur zeigt, dass etwa seit dem Jahr 2009 der deutsche Fahrzeugmarkt  
372 intensiv modelliert wird, vor allem im Hinblick auf die Abbildung des Neuwagenmarktes für  
373 alternative Antriebe. In Meta-Studien zu Marktmodellen für alternative Antriebe existieren bereits  
374 verschiedene Ansätze Modelle zum Zweck einer besseren Vergleichbarkeit zusammenzufassen (siehe  
375 z. B. Al-Alawi und Bradley 2013, Gnann und Plötz 2015, Gnann et al. 2017). Der Vergleich der  
376 dargestellten Modellansätze ist nur eingeschränkt möglich: Während ein Teil der Modelle auf die  
377 möglichst genaue Prognose des Fahrzeugabsatzes zielt, für die mögliche Rahmenbedingungen mit  
378 Wahrscheinlichkeiten belegt werden, untersuchen andere Modelle definierte Szenarien, die nicht  
379 selten die Bandbreite möglicher verschiedener Rahmenbedingungen widerspiegeln sollen.

380 Wie Abbildung 1 zeigt, modellieren zehn Modelle Konsumentenentscheidungen, fünf davon mittels  
381 eines agentenbasierten Ansatzes. Vier können als Diffusionsmodelle beschrieben werden, sechs sind  
382 als hybride Modelle zu bezeichnen. Diese sind in der gezeigten Übersicht mehrfach aufgeführt. Elf  
383 der betrachteten Modelle berechnen die Durchdringung von alternativen Antrieben für den  
384 Neuwagenmarkt (ca. 3 Mio. Pkw p. a.). Zehn Modelle bilden den Pkw-Bestand ab (ca. 45 Mio. Pkw in  
385 2016). Acht der zehn Modelle simulieren sowohl den Neuwagenmarkt als auch den Bestand. Keines  
386 der Modelle berechnet die Zahl der jährlichen Neuzulassungen endogen, und auch die Interaktion  
387 zwischen Neu- und Gebrauchtwagenmarkt wird an keiner Stelle abgebildet.

388 Bezüglich der Differenzierung von Fahrzeugnutzern gibt es verschiedene Aspekte, die in den  
389 genannten Modellen betrachtet werden. Lediglich sechs der Modelle unterscheiden gewerbliche  
390 oder private Haltergruppen. Zwei davon heben darüber hinaus hervor, ob gewerbliche Halter Pkw  
391 auch privat nutzen können (Dienstwagen). Ein weiterer Aspekt der Nutzerdifferenzierung betrifft die  
392 Abbildung der Jahresfahrleistung im Modell. Dies gilt insbesondere für die Modelle mit TCO-basierter  
393 Kaufentscheidung, da die variablen Kosten maßgeblich durch die Laufleistung bestimmt werden.  
394 Jedoch werden in nur wenigen der Studien detaillierte Angaben zur Differenzierung der Nutzer nach  
395 Laufleistung gemacht, sodass ein entsprechender Vergleich nicht möglich ist. Darüber hinaus werden  
396 in fünf Modellen die Nutzer nach regionaler Herkunft oder Raumtyp ihres Wohnortes differenziert.  
397 Keines der untersuchten Modelle kann jedoch regional spezifische Regulierungen wie Umweltzonen  
398 abbilden. Obwohl soziodemographische Informationen verfügbar wären, vernachlässigen die meisten  
399 der betrachteten Modelle eine detailliertere Abbildung der Nachfrageseite (z. B. Alterung,  
400 Führerscheinbesitz, Präferenzänderungen). Bestenfalls fließen demografische Trends in die  
401 Berechnung der verwendeten Motorisierungsrate mit ein (siehe z. B. Adolf et al. 2014).

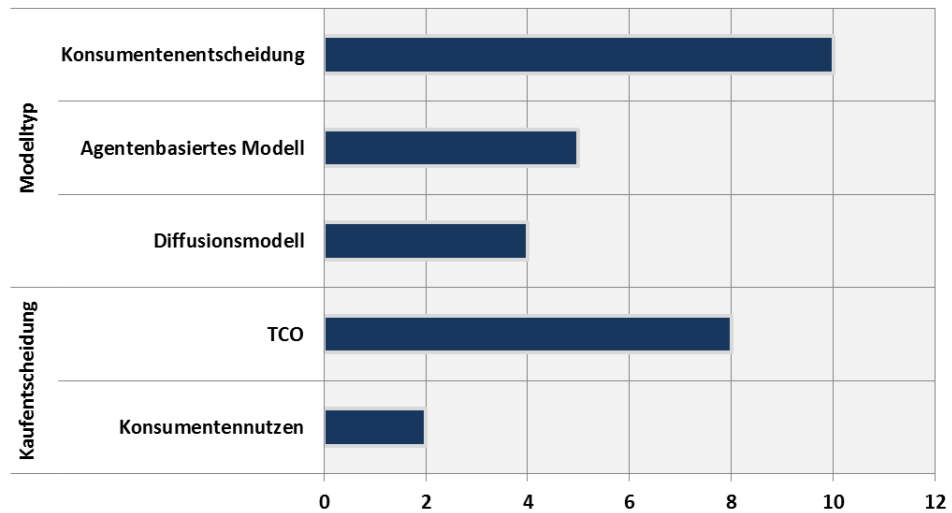
402 Angebotsseitig nutzen fünf der vierzehn Modelle die unter Abschnitt 2 beschriebene Verknüpfung  
403 von Absatzmenge, Produktions- und Produktkosten mit Hilfe von Lernkurven. Hinsichtlich der  
404 Detaillierung der Fahrzeugtechnologien bleibt die Mehrheit der Studien vage. Eine Bottom-up-  
405 Abbildung der Fahrzeugtechnologien unter Berücksichtigung zukünftiger Effizienztechnologien findet  
406 sich lediglich in den Arbeiten von Mock (2010) und Redelbach (2016).

407 Durch den starken Fokus auf Antriebsstränge berücksichtigt keines der untersuchten Modelle die  
408 möglichen Wirkungen neuer Mobilitätskonzepte (z. B. hervorgerufen durch zunehmende  
409 Automatisierung und Vernetzung). In keinem der gelisteten Modelle ist eine Schnittstelle oder  
410 Kopplung zu einem Verkehrsmodell vorgesehen, um die Fahrleistung der Nutzer im Zusammenhang  
411 konkurrierender Verkehrsträger zu untersuchen. Des Weiteren ist keines der Modelle öffentlich  
412 verfügbar (open source), was einen Vergleich der Ergebnisse deutlich erschwert.

413 Zusammenfassend lassen sich folgende Lücken in der deutschen Modelllandschaft identifizieren:

- 414 • Anzahl der Neuzulassungen ist immer eine exogene Variable (z. B. über Motorisierungsraten)
- 415 • Rückkopplung zwischen Gebrauchtwagen- und Neuwagenmarkt fehlt (verschiedene Käufertypen)
- 416 • Regionalisierung lediglich als Variable (z. B. keine Abbildung der Auswirkungen lokaler  
417 Regulierungen möglich)
- 418 • Fokus auf Antriebsstränge; Wirkung neuer Mobilitätskonzepte bisher nicht abgebildet (z. B.  
419 autonome private Pkw oder autonomes Carsharing)
- 420 • Keine öffentliche Verfügbarkeit der Modelle (open source)

421



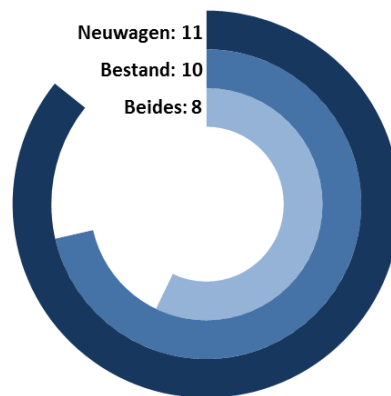
422

423

Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Modelle nach Modelltyp und Art der modellierten Kaufentscheidung

424

425

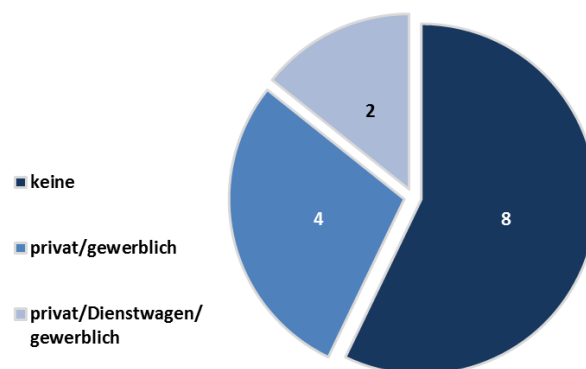


426

427

Abbildung 2: Überblick des Betrachtungsgegenstandes in den untersuchten Modellen

428



429

430

Abbildung 3: Überblick der Differenzierung in Haltertypen in den untersuchten Modellen.

### 431 **3 Vorstellung eines evolutionären Modellansatzes**

432 Im Folgenden wird das Konzept eines neuen Modells erläutert, welches einige der identifizierten  
433 Lücken schließen soll und die Abbildung der evolutionären Diffusion von  
434 Fahrzeugtechnologieinnovationen und damit der Entwicklung des Pkw-Bestandes in Deutschland  
435 ermöglichen soll. Zunächst werden verschiedene Datenquellen vorgestellt und bewertet, die  
436 prinzipiell als Modellinput in Frage kommen. Anschließend wird der Modellaufbau präsentiert und  
437 abschließend werden Herausforderungen für die Modellbildung identifiziert und erste  
438 Lösungsansätze vorgeschlagen.

#### 439 **3.1 Verfügbare Daten**

##### 440 **3.1.1 Fahrzeugstatistiken des Kraftfahrtbundesamtes (KBA)**

441 Das KBA veröffentlicht auf seiner Webseite<sup>10</sup> verschiedene amtliche Statistiken über alle nach der  
442 Fahrzeugzulassungsverordnung in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. Das Datenangebot umfasst  
443 bspw. Neuzulassungen, Bestand und Besitzumschreibungen. Dabei wird u. a. zwischen privat und  
444 gewerblich zugelassenen Fahrzeugen unterschieden, allerdings nicht erhoben, wie die Fahrzeuge  
445 tatsächlich genutzt werden. Dies ist für das zu entwickelnde Modell insbesondere in Bezug auf  
446 Dienstwagen problematisch, da unklar ist, welche gewerblich zugelassenen Pkw (überwiegend) privat  
447 genutzt werden. Detaillierte Sonderauswertungen können beim KBA kostenpflichtig bestellt werden.  
448 Nachteilig ist die fehlende Verknüpfung der Fahrzeugdaten mit ergänzenden Informationen über die  
449 Halter (Haushalte oder Unternehmen), wodurch die Betrachtung sozio-ökonomischer  
450 Einflussfaktoren nicht möglich ist.

##### 451 **3.1.2 Mobilität in Deutschland (MiD)**

452 Da es sich bei dem zu entwickelnden Modell um ein nationales Pkw-Bestandsmodell handelt, wird  
453 die MiD<sup>11</sup> als größte deutschlandweite Mobilitätserhebung des Personenverkehrs als Datengrundlage  
454 in Erwägung gezogen, auch weil sie von mehreren der vorgestellten Modelle verwendet wird.<sup>12</sup> Sie  
455 wurde 2002 und 2008 erhoben und ab 2018 wird eine weitere Erhebung dieser Zeitreihe fortsetzen.  
456 Der Datensatz bietet u. a. detaillierte Angaben zu den in einem Haushalt vorhandenen Fahrzeugen.  
457 Zudem werden auch gewerblich zugelassene, jedoch überwiegend oder ausschließlich privat  
458 genutzte Fahrzeuge (Dienstwagen) erfasst, was den Abgleich mit den Daten des KBA schwierig  
459 macht. Die Daten sind über die Clearingstelle Verkehr des DLR verfügbar.<sup>13</sup>

##### 460 **3.1.3 Deutsches Mobilitätspanel (MOP)**

461 Auch das MOP<sup>14</sup> wird von einigen der vorgestellten Modelle verwendet, z. B. zur Ableitung von  
462 Fahrprofilen, die durch ein Elektroauto ersetzt werden können. Der Vorteil gegenüber der MiD ist,  
463 dass es sich um eine seit 1994 jährlich wiederholte Befragung von Haushalten über

---

<sup>10</sup> Siehe <http://www.kba.de>.

<sup>11</sup> Siehe <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de>.

<sup>12</sup> Die sehr ähnliche Mobilitätserhebung „System repräsentativer Verkehrsverhaltensbefragungen“ (SrV) konzentriert sich auf die Mobilität der städtischen Wohnbevölkerung und scheint deshalb nicht als Datengrundlage für ein bundesweites Modell geeignet.

<sup>13</sup> Siehe <http://daten.clearingstelle-verkehr.de>.

<sup>14</sup> Siehe <http://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu>.

464 Mobilitätsverhalten im Alltag (keine Urlaubszeiten) und Pkw-Nutzung handelt, die sich im Gegensatz  
465 zum Stichtag der MiD auf eine gesamte Woche beziehen. Somit können Trends besser erforscht und  
466 mehrere Jahrgänge für Analysen des Autobesitzes zusammengefasst werden (siehe z. B.  
467 Woldeamanuel et al. 2009). Allerdings bleiben Haushalte maximal drei Jahre im Panel, so dass eine  
468 Längsschnittbetrachtung über Pkw-Käufe und -Verkäufe nicht möglich ist, da die durchschnittliche  
469 Haltedauer von Pkw zwischen 4 und 10 Jahren liegt. Ein weiterer Nachteil ist der im Vergleich zur  
470 MiD deutlich geringere Stichprobenumfang, was z. B. Hochrechnungen schwierig und räumliche  
471 Differenzierungen unmöglich macht. Die Daten sind ebenfalls über die Clearingstelle Verkehr des DLR  
472 verfügbar.<sup>15</sup>

### 473 **3.1.4 Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS)**

474 Die EVS<sup>16</sup> wird alle fünf Jahre vom Statistischen Bundesamt erhoben (z. B. 1998, 2003, 2008, 2013).  
475 Privater Haushalte werden gebeten, detailliert über ihre finanzielle Situation, die Ausstattung mit  
476 Gebrauchsgütern sowie ihre Konsumausgaben zu berichten. In Bezug auf Mobilitätskosten werden  
477 z. B. Ausgaben für Treibstoff, Kfz-Versicherung oder den Kauf von Kraftfahrzeugen erhoben. Anders  
478 als in den typischen Mobilitätshebungen fehlen jedoch mobilitätsrelevante Variablen wie z. B.  
479 Führerscheinbesitz. Die Daten sind über die Forschungsdatenzentren der Statistischen Ämter des  
480 Bundes und der Länder kostenpflichtig verfügbar.<sup>17</sup>

### 481 **3.1.5 Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)**

482 Im Gegensatz zur MiD erhebt die KiD<sup>18</sup> (2002 und 2010) sowohl den Wirtschafts- als auch den  
483 Privatverkehr über das zentrale Fahrzeugregister des KBA. Datengrundlage sind also die Fahrzeuge  
484 und nicht die Haushalte. Dabei wird ebenfalls zwischen privaten und gewerblichen Haltern  
485 unterschieden, allerdings finden sich auch hier keine Informationen darüber, ob es sich bei den  
486 gewerbliche zugelassenen Fahrzeugen um Dienstwagen handelt, die auch oder überwiegend privat  
487 genutzt werden. Die Daten sind über die Clearingstelle Verkehr des DLR verfügbar.<sup>19</sup>

### 488 **3.1.6 Weitere Informationsquellen**

489 Über die oben genannten Datenquellen hinaus gibt es weitere Untersuchungen und Berichte, die für  
490 eine Modellentwicklung relevant sein könnten:

- 491 • Die Deutsche Automobil Treuhand (DAT) gibt einen jährlichen Bericht heraus, der mittels  
492 einer Befragung von knapp 4.000 Privatpersonen deren Autokauf und Werkstattverhalten  
493 analysiert (DAT 2017). Gewerblich zugelassene Fahrzeuge werden nicht berücksichtigt. Der  
494 Datensatz ist nicht frei verfügbar.
- 495 • Die Firma Dataforce<sup>20</sup> verwendet die Fuhrparkdatenbank FleetBase und detaillierte,  
496 kostenpflichtige Daten des KBA für Analysen des Automobil- und Flottenmarktes in  
497 Deutschland. Mittels dieser Daten wurde im Rahmen des Projektes ‚Renewability III‘ eine sehr

---

<sup>15</sup> Siehe <http://daten.clearingstelle-verkehr.de>.

<sup>16</sup> Siehe [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Methoden/Einkommens\\_Verbrauchsstichprobe.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Methoden/Einkommens_Verbrauchsstichprobe.html).

<sup>17</sup> Siehe <http://www.forschungsdatenzentrum.de/bestand/evs/index.asp>.

<sup>18</sup> Siehe <http://www.kid2010.de>.

<sup>19</sup> Siehe <http://daten.clearingstelle-verkehr.de>.

<sup>20</sup> Siehe <http://www.dataforce.de>.

498 detaillierte Abbildung der Neuzulassungen nach Haltergruppe möglich (Zimmer et al. 2016,  
499 S. 51). Allerdings sind auch diese Daten nicht öffentlich verfügbar.  
500 • Für die bessere Abbildung der Verschrottung von Fahrzeugen schlagen Mehlhart et al. (2011)  
501 vor, zwischen einer Ausflottungsrate und einer Verschrottungsrate zu unterscheiden. Erstere  
502 beinhaltet letztere, aber eben auch ins Ausland ausgeführte Fahrzeuge. Um eine bessere  
503 Datenbasis zu schaffen wäre u. a. eine Analyse von Statistiken des Zolls sowie der  
504 Abfallwirtschaft hilfreich. Inwieweit solche Daten verfügbar wären, müsste erst noch geprüft  
505 werden.

## 506 **3.2 Modellaufbau**

### 507 **3.2.1 Verwendete Datengrundlage**

508 Für das aufzubauende Modell wird als Hauptdatenbasis die MiD 2008 verwendet. Sowohl für ein  
509 *evolutionäres Längsschnittmodell* (bei dem die Fahrzeuge im Zeitverlauf verfolgt werden können) als  
510 auch für ein *Fixpunktmodell* (bei dem die Fahrzeuge den Haushalten im Zeitverlauf immer wieder neu  
511 zugeordnet werden) ist die Verbindung zwischen Haushalts- und Fahrzeugeigenschaften zwingend  
512 notwendig.<sup>21</sup> Dies ist bei den meisten anderen der vorgestellten Datenquellen nicht gegeben. Auch  
513 ist häufig der Stichprobenumfang zu gering, um ein deutschlandweites Käufermodell abzuleiten oder  
514 diese Informationen sind aufgrund der Nichtverfügbarkeit der Datengrundlage nicht überprüfbar.  
515 Andere der Quellen beziehen sich lediglich auf den Neuwagenmarkt und enthalten nur wenige oder  
516 gar keine Informationen über den Pkw-Bestand.

517 Ein weiterer Grund für die Wahl der MiD ist, dass das aufzubauende Modell möglichst auf *frei*  
518 *verfügbaren* und vor allem *regelmäßig aktualisierten Daten* aufsetzen soll, sodass es in Zukunft (i)  
519 relativ einfach aktualisiert und (ii) von Dritten genutzt werden kann.<sup>22</sup> Ergänzt wird der zum  
520 Modellaufbau verwendete Datenbestand durch andere der erwähnten Datenquellen. Dies wird an  
521 den relevanten Stellen im weiteren Verlauf explizit erwähnt.

### 522 **3.2.2 Ziele und Struktur**

523 Das Hauptziel des hier vorgestellten Pkw-Bestandsmodells ist es, typische Pfade für Fahrzeuge im  
524 Verlauf ihres Lebenszyklus aufzuzeigen, z. B. welche Fahrzeuge mit welchen Eigenschaften  
525 tendenziell bei welchen Haushaltstypen gehalten werden und wann sie von diesen wieder  
526 abgestoßen werden. Zudem soll das Modell reagibel auf Änderungen der sozio-ökonomischen  
527 Eigenschaften der Haushalte sein, wobei die Anzahl der Neuzulassungen und Halterwechsel nicht als  
528 Eingangsgrößen in das Modell eingehen, sondern ein Modellierungsergebnis darstellen soll. Vor  
529 diesem Hintergrund bietet sich die Modellierung von Haushalten als Akteure über die Zeit an. Dies  
530 resultiert – im Gegensatz zu Zustandsmodellen – in einem evolutionärem Ansatz, bei dem sich der  
531 Fahrzeugbestand nur langsam über die Jahre verändert und Technologieinnovationen somit auch nur  
532 langsam in den Markt diffundieren können.

---

<sup>21</sup> Für weitere Details zu den verschiedenen Modellansätzen siehe Abschnitt 3.2.

<sup>22</sup> Einschränkend ist hier zu erwähnen, dass bei der sich aktuell im Feld befindlichen MiD 2016 wohl Änderungen bzgl. der Fahrzeugstatistik zu erwarten sind, da nur noch ein Teil der Haushalte detailliert über die im Haushalt vorhandenen Fahrzeuge berichtet.



533 Abbildung 4 zeigt die zweiteilige Modellstruktur des neuen Pkw-Bestandsmodells. Auf der einen Seite  
534 werden mittels eines evolutionären Modells alle Transaktionen auf dem Neu- und  
535 Gebrauchtwagenmarkt simuliert. Demographische Veränderungen und Trends werden nicht an  
536 dieser Stelle berücksichtigt, sondern stattdessen im parallel laufenden Fixpunktmodell (siehe  
537 Abschnitt 3.3.3). Für die Kaufentscheidung wird ein Discrete-Choice-Modell auf Basis der MiD 2008  
538 geschätzt, welches für jeden Haushalt die Wahrscheinlichkeit eines Pkw-Kaufs auf Basis der im Jahr  
539 2007 erworbenen Pkw berechnet. Abbildung 5 zeigt auf der linken Seite (A) die im Modell zur  
540 Verfügung stehenden vier Alternativen der ersten Stufe:

- 541 • Wahl 0: kein Kauf
- 542 • Wahl 1: Kauf Pkw gebraucht, Zulassung privat
- 543 • Wahl 2: Kauf Pkw neu, Zulassung gewerblich
- 544 • Wahl 3: Kauf Pkw neu, Zulassung privat

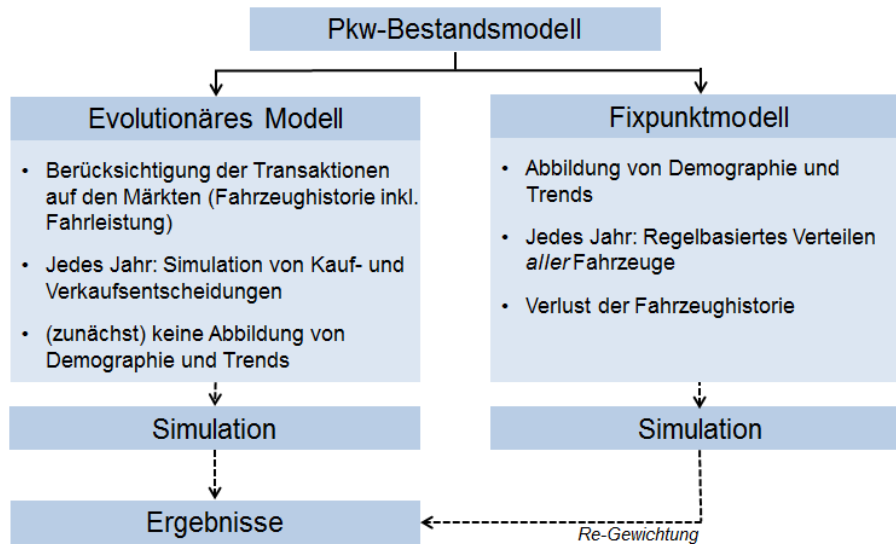
545 Welchen Pkw-Typ der Haushalt erwirbt, wird in einem zweiten Schritt (B) ermittelt, wobei hier die  
546 Variablen Größenklasse, Antrieb (und später Automatisierungsgrad) sowie die jeweiligen Investitions-  
547 und variablen Kosten eingehen.

548

549

550

551



552

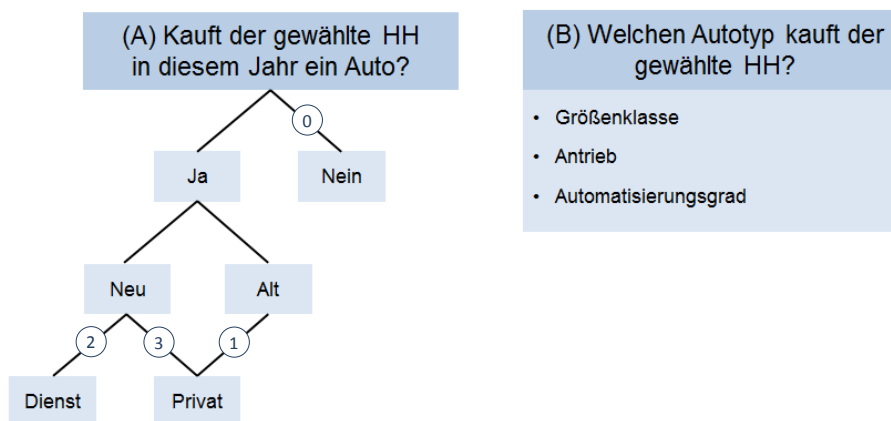
553

Abbildung 4: Zweiteilige Modellstruktur des Pkw-Bestandsmodells.

554

555

556



557

558

Abbildung 5: Zweistufige Abbildung der Kaufentscheidung im evolutionären Modell.

559

### 560 3.3 Herausforderungen

#### 561 3.3.1 Ermittlung von Haltedauern, Kopplung Kauf-Verkauf, Gebrauchtwagenmarkt

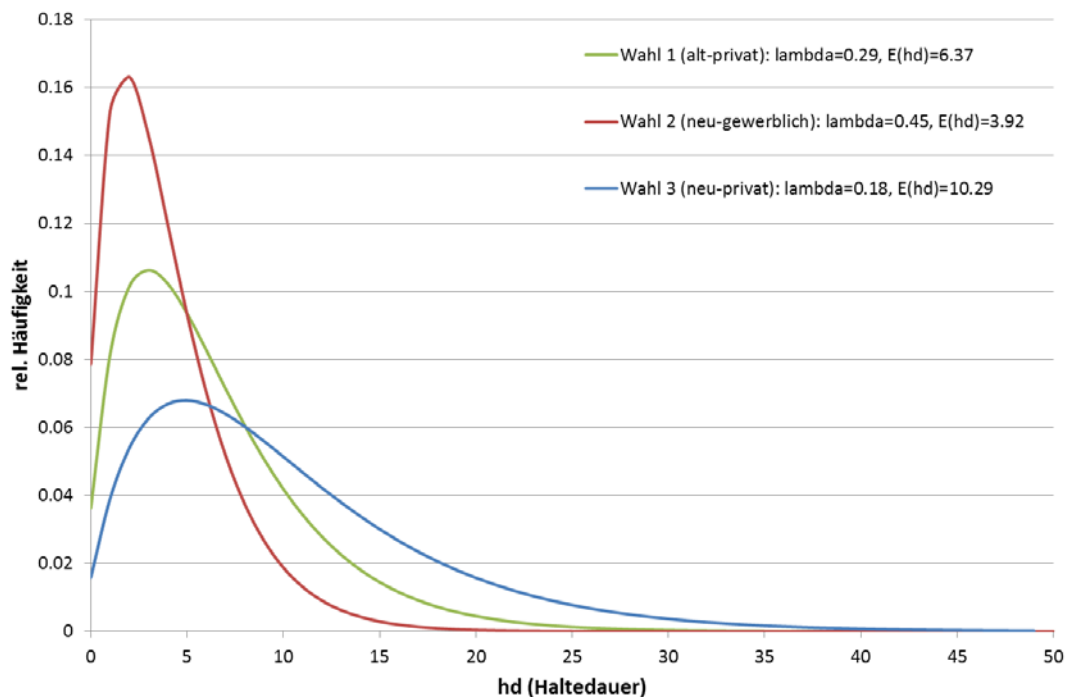
562 In der Realität ist die Entscheidung für den Erwerb eines Pkw meist im Zusammenhang mit einem  
563 Pkw-Verkauf oder einer Verschrottung zu beobachten. So sind 72 % der Gebrauchtwagenkäufer  
564 Wiederbeschaffungskäufer, bei Neuwagenkäufern sind dies sogar 85 % (DAT 2017, S. 43). Demnach  
565 sollte die Kaufwahrscheinlichkeit abhängig von der Verkaufsentscheidung modelliert werden. Da  
566 hierfür jedoch keine empirischen Daten zu Verfügung stehen, werden Kauf- und  
567 Verkaufsentscheidung im Modell separat betrachtet: Die Kaufentscheidung wird über ein diskretes  
568 Wahlmodell abgebildet (siehe Abschnitt 3.2.2). Die Verkaufs- oder Verschrottungsentscheidung wird  
569 über Haltedauerverteilungen der drei Käufertypen (1) privater Gebrauchtwagenkäufer, (2)  
570 gewerblicher Neuwagenkäufer und (3) privater Neuwagenkäufer abgebildet. In Anlehnung an DAT  
571 (2017) werden für (1) und (3) die durchschnittlichen Haltedauern von 77 Monaten (6,42 Jahre) und  
572 122 Monaten (10,17 Jahre) herangezogen und durch den Erwartungswert einer  
573 Exponentialverteilung beschrieben (siehe Abbildung 6). Für (2) wird eine durchschnittliche  
574 Haltedauer von 3,92 Jahren angenommen.<sup>23</sup>

575 Verschrottungsfunktionen werden üblicherweise als Weibull-Verteilungen in Abhängigkeit vom  
576 Fahrzeugalter approximiert (siehe z. B. Plötz et al. 2013; Plötz et al. 2014). Etwas exakter wäre eine  
577 Verschrottung oder Ausflottung basierend auf Alter und Laufleistung des Fahrzeugs. Der hier  
578 gewählte Ansatz ließe dies prinzipiell zu, nur dass bereits die Haltedauerverteilung das Abstoßen  
579 eines Fahrzeugs beschreibt und dieses, falls es über eine bestimmte Zeit nicht wieder einen neuen  
580 Abnehmer findet, verschrottet oder ins Ausland exportiert wird. Eine explizite  
581 Verschrottungsfunktion wäre in diesem Falle also nicht nötig.

582 Für die Modellierung der Markträumung des kapazitätsbeschränkten Gebrauchtwagenmarktes,  
583 wären empirische Daten zu den Transaktionen nötig, die bislang nicht vorliegen. Nur mit solchen  
584 Daten könnte eine Zweitpreisauktion implementiert werden, wobei Nutzenfunktionen (sofern in  
585 Geldeinheiten definiert) die maximale Zahlungsbereitschaft eines Haushalts ausdrücken würden. Dies  
586 ließe prinzipiell eine Rückkopplung des Gebrauchtwagenmarktes auf den Neuwagenmarkt zu.

---

<sup>23</sup> Redelbach (2016, Anhang C) leitet in seinem Ansatz die Verteilung der Haltedauern von der Verteilung der Besitzdauern zum Befragungszeitpunkt ab. Dies funktioniert methodisch relativ gut, allerdings sind dabei (i) die ungleiche Anzahl der Neuzulassungen in allen vergangenen Jahren zu korrigieren und (ii) die Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen Haltedauer für die Zuordnung zu den Jahresintervallen zu berücksichtigen. Ohne diese Anpassungen ergäbe die MiD-Datenbasis u. a. eine starke Unterschätzung der in 2008 zugelassenen Fahrzeuge, was zu unplausiblen Schätzern und damit zu unplausiblen Durchschnittshaltedauern führte. Aus diesem Grund wurde für das evolutionäre Modell die Beschreibung der Haltedauern über die genannten DAT-Durchschnittswerte und dazu passende Exponentialverteilungen der Besitzdauern gewählt.



587

588

Abbildung 6: Haltedauerverteilung in den verschiedenen Märkten.<sup>24</sup>

589

### 3.3.2 Korrektur Hochrechnung MiD 2008, private und gewerbliche Halter

590

Die originale Hochrechnung des MiD-Datensatzes führt zu zweierlei Herausforderungen: Zum einen ist eine Aufteilung des Bestandes und der Neuzulassungen auf die Nutzersegmente „privat“, „Dienstwagen“ und „rein gewerblich“ nicht ohne weiteres möglich, zum anderen ist die Anzahl der hochgerechneten Pkw nicht korrekt.

593

594

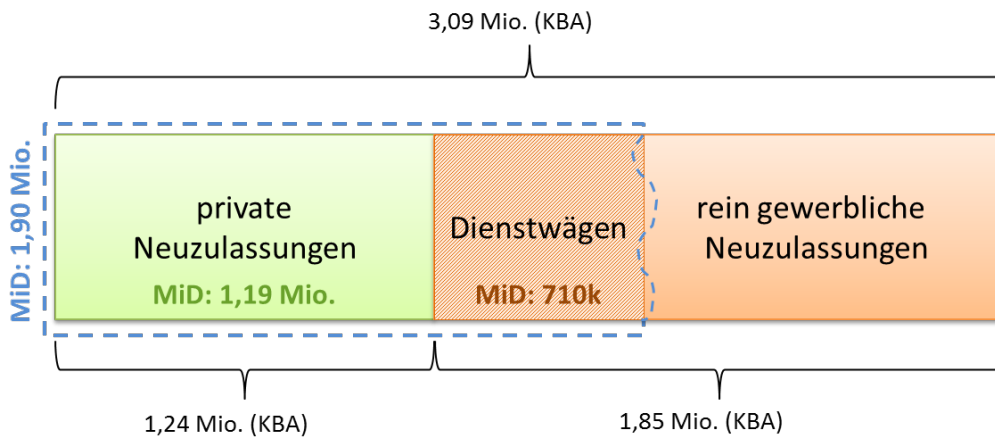
Wie auch das KBA unterscheidet die MiD in privat und gewerblich zugelassene Fahrzeuge.<sup>25</sup> Die gewerblich zugelassenen Fahrzeuge der MiD sind überwiegend (privat genutzte) *Dienstwagen* und machen ca. 9 % der Pkw aus. Die übrigen 91% sind *privat* zugelassen und werden vermutlich überwiegend privat genutzt. Über die Randsummen der KBA-Zulassungsstatistik lässt sich prinzipiell der Anteil der *rein gewerblich* genutzten Pkw ermitteln, welche aufgrund der Fokussierung auf Privathaushalte nicht in der MiD berücksichtigt sind. Wie Abbildung 7 zeigt, wurde diese Berechnung anhand der Haushaltshochrechnungsfaktoren und des Fahrzeugdatensatzes der MiD 2008 für die Neuzulassungen in 2008 durchgeführt. In den jährlichen Neuzulassungen nach KBA (2017c) ist zu erkennen, dass ca. 60 % der Neuzulassungen gewerbliche Zulassungen sind (1,85 von 3,09 Millionen Pkw) und die restlichen 40 % direkt von Privatpersonen zugelassen werden. Die Abschätzung über eine Kreuzung mit MiD-Daten zeigt, dass etwa 23 % aller Neuzulassungen Dienstwagen sind (0,71 von 3,09 Millionen Pkw), womit der reale Anteil privat genutzter Fahrzeuge auf 63 % steigt und der rein

605

<sup>24</sup> Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Durchschnittshaltedauern von DAT (2017) unter Annahme von Exponentialverteilungen der Besitzdauern.

<sup>25</sup> Konzeptionell unterscheidet die MiD 2008 zwischen privaten und sonstigen Zulassungen. Für etwa 20% der Fahrzeuge liegt diese Information jedoch nicht vor, da sie über eines der möglichen Befragungsinstrumente – den rein schriftlichen Haushaltsfragebogen (PAPI – Paper-and Pencil) nicht abgefragt wurde. Dies stellt so lange kein Problem dar, wie die Verteilung zwischen privaten und gewerblichen Zulassungen in den zwei Teilmengen nicht signifikant unterschiedlich ist.

606 gewerbliche Anteil auf 37 % sinkt.<sup>26</sup> Nimmt man darüber hinaus an, dass ca. 25-35 % der  
 607 Neuzulassungen von Autoherstellern und Händlern selbst zugelassen werden (KBA 2012) und  
 608 innerhalb eines Jahres als *junge Gebrauchte* an Privathaushalte weiterverkauft werden, reduziert sich  
 609 der tatsächlich rein gewerbliche Anteil auf 2-12 %. Dies impliziert auch, dass in Deutschland mit ca.  
 610 33 % ein erheblicher Anteil der Pkw-Neuzulassungen als Besitzumschreibungen doppelt gezählt wird,  
 611 das erste Mal als Neuzulassung der Hersteller und Händler und das zweite Mal als  
 612 Besitzumschreibung auf meist private Kunden, die häufig ein neuwertiges Auto mit sehr geringer  
 613 Fahrleistung zu einem geringeren Preis kaufen.



614  
 615 Abbildung 7: Abschätzung der Aufteilung der Neuzulassungen 2008 nach den Typen „privat“,  
 616 „Dienstwagen“ und „rein gewerblich“.<sup>27</sup>

617  
 618 Tabelle 1: Anzahl Pkw je Haushalt nach verschiedenen Datenquellen.

|  | MiD 2008 | EVS 2008 | KBA 01.01.2009 |
|--|----------|----------|----------------|
| 0 Pkw [%]  | 17,81    | 22,31    | NA             |
| 1 Pkw [%]  | 52,97    | 55,59    | NA             |
| 2 Pkw [%]  | 24,17    | 19,24    | NA             |
| 3+ Pkw [%]                                       | 5,05     | 2,86     | NA             |
| (approx.) Erwartungswert [Pkw/Haushalt]          | 1,16     | 1,0265   | NA             |
| Anzahl Haushalte [Mio]                           | 39,73    | 39,41    | NA             |
| Anzahl Pkw [Mio]                                 | 46,27    | 40,45    | NA             |
| Anzahl rein gewerblicher Pkw [Mio] <sup>28</sup> | 1,70     | 1,70     | NA             |
| Summe Pkw [Mio]                                  | 47,97    | 42,15    | 41,32          |

619  
 620 Ein Problem mit den originalen Hochrechnungsfaktoren der MiD ergibt sich aus dem Vergleich mit  
 621 den KBA-Daten: Rechnet man die Anzahl der Pkw über den Haushaltsdatensatz der MiD mit den  
 622 Hochrechnungsfaktoren der Haushalte hoch, übersteigt die berechnete Zahl (ca. 46 Mio.) die beim

<sup>26</sup> Diese Abschätzung ist aufgrund eines im nächsten Absatz beschriebenen Problems bzgl. der Hochrechnungsfaktoren möglicherweise instabil.

<sup>27</sup> Quelle: eigene Analysen auf Basis der MiD 2008 und KBA (2017c) für 2008.

<sup>28</sup> Eigene Berechnungen auf Basis von Dieckmann et al. (2011).

623 Kraftfahrtbundesamt als vom KBA ausgewiesene Zahl zugelassener Pkw von ca. 41 Mio. deutlich. Die  
624 Hochrechnung über den MiD-Fahrzeugdatensatz (es werden nur bis zu drei Pkw je Haushalt erfasst)  
625 und die gebildeten Fahrzeuggewichte ergibt in der Summe genau die KBA-Bestandszahl. Dies ist auf  
626 einen Fehler bei der Bestimmung der Hochrechnungsfaktoren des Fahrzeugdatensatzes  
627 zurückzuführen, bei der die rein gewerblich genutzten Fahrzeuge nicht berücksichtigt wurden. Dies  
628 bedeutet aber auch, dass die Häufigkeitsverteilung von Pkw je Haushalt in der MiD nicht korrekt sein  
629 kann, da der Erwartungswert „Anzahl Pkw je Haushalt“ zu hoch für den tatsächlichen Bestand ist (vgl.  
630 Tabelle 1).

631 Damit sowohl die Gesamtzahl der Pkw in Deutschland im Ausgangszustand 2008 als auch die  
632 Verteilung der Anzahl Pkw je Haushalt richtig zu treffen, muss der Datensatz der MiD neu gewichtet  
633 werden. Dies wird einerseits über die Korrektur der Hochrechnungsfaktoren für den  
634 Ausgangszustand in 2008 mittels eines Iterative Proportional Fitting (IPF)-Ansatzes gelöst, wobei  
635 folgende Verteilungen berücksichtigt werden:

- 636 • Anzahl der Haushalte je Raumtyp (urban, suburban, ländlich)
- 637 • Anzahl der Personen je Haushalt
- 638 • Anzahl der Pkw je Haushalt

639 Die ersten beiden Zielverteilungen stammen aus dem Zensus 2011 (Destatis 2011), letztere, wie in  
640 Tabelle 1 dargestellt, aus der EVS 2008<sup>29</sup>.

### 641 **3.3.3 Abbildung der demographischen Entwicklung und mobilitätsrelevanter Trends**

642 Dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Ansatz einer Modellierung auf Haushaltsbasis steht ein Mangel  
643 an Daten zur demographischen Bevölkerungsentwicklung und zur zeitlichen Entwicklung  
644 mobilitätsrelevanter Trends (z. B. Führerscheinbesitzquoten im Zeitverlauf) entgegen. Üblicherweise  
645 sind in Bevölkerungsvorhersagen wie z. B. jener des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und  
646 Raumforschung (BBSR) nur Randsummen bekannt (z. B. zur voraussichtlichen Verteilung der  
647 Haushaltsgrößen im jeweiligen Prognosejahr). Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den  
648 verschiedenen Haushaltstypen, z. B. durch Eheschließung, Geburt oder Trennung fehlen. Das MOP  
649 stellt zwar im Prinzip Daten bereit, die Pkw-Anschaffungs- und Abschaffungsentscheidungen an  
650 solche Lebensereignisse koppeln, allerdings sind die Fallzahlen dort sehr gering, insbesondere dann,  
651 wenn man nach Pkw-Antrieben und Größenklassen differenzieren will.

652 Als Ausweg bietet sich an, die Haushalte im Modell nicht fortzuschreiben, sondern die  
653 Haushaltsstrukturen während des simulierten Zeitraums konstant zu lassen. Alternativ könnte man  
654 die Haushalte für jedes Jahr neu erzeugen und ihnen die Fahrzeuge in jedem Jahr neu zuteilen. Dazu  
655 müsste der in der MiD verwendete Hochrechnungsfaktor zur Bestimmung der Anzahl der Haushalte  
656 in der Grundgesamtheit für jedes Jahr neu erzeugt werden. Ersteres hätte den Vorteil, dass eine  
657 Längsschnittorientierung des Modells beibehalten werden könnte, allerdings ohne Abbildung der  
658 demographischen Entwicklung und weiterer mobilitätsrelevanter Trends. Erzeugte man die  
659 Haushalte jedes Jahr mit aktualisierten Hochrechnungsfaktoren neu, könnte man beides abbilden,  
660 würde allerdings die Analysemöglichkeiten des Modells stark einschränken. Dieser Nachteil wird im

---

<sup>29</sup> Siehe [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Methoden/Einkommens\\_Verbrauchsstichprobe.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Methoden/Einkommens_Verbrauchsstichprobe.html).

661 hier vorgestellten Modell durch eine Zweiteilung behoben, welche versucht, beide Lösungen zu  
662 integrieren: Auf der einen Seite werden Haushaltsstrukturen konstant gelassen (evolutionäres  
663 Modell), parallel werden jedoch jährlich neue Hochrechnungsfaktoren je Haushalt berechnet  
664 (Fixpunktmodell). Am Ende der Simulation werden die Ergebnisse zusammengeführt, wodurch die  
665 Effekte demographischer Veränderungen und mobilitätsrelevanter Trends separat von jenen der  
666 Kaufverhaltensänderungen der Ausgangspopulation analysiert werden können.

### 667 **3.3.4 Regionalisierung**

668 Im Rahmen des Modellaufbaus wird auch eine Regionalisierung getestet. Differenziert nach Region  
669 werden die Effekte möglicher regionaler Regulierungen wie z. B. (Ein-)Fahrverbote oder City-Maut  
670 auf den Fahrzeugkauf und -bestand abgeschätzt. Dazu werden regional aufgelöste KBA-Daten in das  
671 Modellsystem von VECTOR21 integriert. Neben der Berücksichtigung überregionaler CO<sub>2</sub>-  
672 Regulierungen kann so beispielsweise die Auswirkung lokaler Regulierungsmaßnahmen zur  
673 Luftreinhaltung auf die Marktanteile alternativer Antriebskonzepte untersucht werden. Im  
674 Allgemeinen hängt die Wirksamkeit lokaler Regulierungsmaßnahmen stark von der Anzahl  
675 betroffener Fahrzeuge ab. Der im Modell VECTOR21 verwendete Ansatz zur Regionalisierung stützt  
676 sich daher auf die offiziellen Fahrzeugstatistiken des KBA sowie auf Pendlerstatistiken, um die Anzahl  
677 der von einer lokalen Regulierung betroffenen Fahrzeuge auf einer räumlich differenzierten Ebene zu  
678 berechnen. Mittels eines in einem geografischen Informationssystem implementierten  
679 Gravitationsmodells wird die Auswirkung von Einfahrverboten in spezifischen Regionen auf die  
680 umliegenden Regionen berechnet.

## 681 **4 Zusammenfassung**

682 Gegenstand des vorliegenden Artikels sind in Deutschland genutzte Modelle , welche die Vorhersage  
683 der Entwicklung des deutschen Pkw-Bestandes unter Berücksichtigung verschiedener  
684 technologischer und (verkehrs-)politischer Rahmenbedingungen zum Ziel haben. Sowohl der  
685 Fahrzeugbestand als auch die Pkw-Verfügbarkeit in Haushalten, die sich aus dynamischen  
686 Einzelentscheidungen der Verbraucher und aus realisierten Technologiepfaden ergibt, stellen  
687 wichtige Eingangsgrößen für viele Verkehrsmodelle dar, die zur Infrastrukturplanung verwendet  
688 werden.

### 689 **4.1 Identifizierte Lücken in der Modelllandschaft**

690 Es wurde eingangs gezeigt, dass es auf Bundesebene kein Modell gibt, welches in der Lage ist, den  
691 Einfluss sich verändernder technologischer und (verkehrs-)politischer Rahmenbedingungen auf Pkw-  
692 Besitz und Nutzung vorhersagen. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden von verschiedenen  
693 Forschungsinstituten Modelle entwickelt, die vorgestellt und verglichen wurden. Die dabei  
694 identifizierten Lücken in der Modelllandschaft beinhalten unter anderem, dass alle betrachteten  
695 Modelle die Anzahl der Neuzulassungen als exogene Variable benötigen, z. B. über eine Vorhersage  
696 der Motorisierungsraten. Bei ähnlich hohen Verschrottungs- und Exportraten ergibt sich daraus  
697 implizit ein stabiler Bestand. Es geht bei den bestehenden Modellen also in erster Linie um die  
698 Aussage, *welche Art* von Fahrzeugen zugelassen wird, nicht um deren *Anzahl*. Außerdem fehlt den  
699 Modellen eine Rückkopplung zwischen Gebraucht- und Neuwagenmarkt, auf denen verschiedene  
700 Käufertypen mit verschiedenen Anforderungen agieren. Dies ist insofern kritisch zu beurteilen, weil  
701 neue Technologien sich nicht nur auf dem Neuwagenmarkt (und bei deren Nutzern mit spezifischen

702 Einsatzmustern) durchsetzen müssen, sondern auch auf dem nachgelagerten Gebrauchtwagenmark.  
703 Würden sie sich dort nicht durchsetzen, würde dies direkt den Wiederverkaufswert beeinflussen.  
704 Generell ist der Gebrauchtwagenmarkt bislang wenig untersucht, insbesondere der Übergang von  
705 Neufahrzeugen in den Gebrauchtwagenmarkt. Darüber hinaus fehlt es den Modellen an einem  
706 räumlichen Bezug, so dass bspw. eine Abbildung des Einflusses von Einfahrtsbeschränkungen für  
707 Diesel-Pkw in Innenstädte auf den regionalen Markt nicht möglich ist. Auch fokussieren sich die  
708 meisten Modelle auf Emissionsmodellierung und/oder die Modellierung verschiedener  
709 Antriebstechnologien, sodass eine Analyse der Wirkung neuer Mobilitätskonzepte (z. B. autonomes  
710 Carsharing) nicht möglich ist.

711 Schließlich stützt sich die Präsentation der Modelle auf die jeweils veröffentlichten  
712 Projektdokumentationen; die Implementierung der Berechnungsvorschriften, also der Quellcode, ist  
713 in den allermeisten Fällen leider nicht verfügbar, wodurch die Vergleichbarkeit der Modelle  
714 eingeschränkt ist. Anstrengungen in Richtung von open-source Code sollten in der  
715 Forschungsförderung daher von Seiten der Geldgeber deutlich mehr gefordert werden. Insgesamt ist  
716 also zu konstatieren, dass die in Deutschland vorhandenen Modelle zur Vorhersage des Pkw-  
717 Bestandes deutliche Schwächen aufweisen um insbesondere die Zulassungszahl und relevante  
718 Interaktionen zwischen Änderungen im Verkehrsangebot und Fahrzeugbesitz und Fahrzeugnutzung  
719 vorherzusagen.

## 720 **4.2 Ansätze zur Schließung der Lücken und Herausforderungen**

721 Das vorgestellte Modellkonzept soll perspektivisch die Beseitigung der genannten Schwachstellen  
722 ermöglichen. Dafür wurden zunächst einige relevante Datenquellen vorgestellt, die für die  
723 Modellierung herangezogen werden können. Die Datenlage erscheint durchaus ergiebig, lediglich  
724 Längsschnittdaten zu Anschaffungsentscheidungen sind nicht verfügbar; diese wären äußerst  
725 hilfreich, um Modelle zu schätzen, die die Kopplung von Abschaffung und Anschaffung – also den  
726 Ersatz eines Fahrzeugs – abbilden oder diese sogar mit demographischen Lebensereignissen  
727 verknüpfen. Für den Gebrauchtwagenmarkt wäre dabei die Betrachtung tatsächlicher Transaktionen  
728 wünschenswert, da bislang anstelle der realisierten nur die Angebotspreise verfügbar sind.

729 Das vorgestellte, sich noch in der Entwicklung befindliche Modell verwendet als Hauptdatenbasis die  
730 MiD 2008, wodurch die Möglichkeit zur Aktualisierung auf Basis regelmäßig erhobener und frei  
731 verfügbarer Daten gegeben ist. Zudem ermöglicht die deutschlandweite Ausrichtung des MiD-  
732 Datensatzes eine ebensolche Modellierung der Pkw-Entscheidungen mit Bezug zu Haushalts- und  
733 Fahrzeugeigenschaften. Das Modell besteht aus einem evolutionären Längsschnittmodell (bei dem  
734 die Fahrzeuge im Zeitverlauf verfolgt werden können) und einem Fixpunktmodell (bei dem die  
735 Fahrzeuge den Haushalten jedes Jahr aufs Neue zugeordnet werden). Das evolutionäre  
736 Längsschnittmodell umfasst zwei Entscheidungsebenen, die Ebene der Anschaffungsentscheidung  
737 und die Ebene der Typenwahl. Das Modell auf Ebene der Anschaffungsentscheidung löst einige  
738 Probleme bestehender Modelle: Erstens erlaubt es eine endogene Modellierung der Absatzzahl  
739 privat gehaltener Neu- und Gebrauchtwagen sowie gewerblich zugelassener, aber überwiegend  
740 privat genutzter Dienstwagen. Damit ist eine Verbindung zwischen Gebrauchtwagenmarkt  
741 und den jeweiligen Nutzerattributen hergestellt, die je nach Datenlage in der Zukunft verfeinert  
742 werden kann. Zweitens kann so die Fahrzeughistorie abgebildet werden, wodurch abrupte  
743 Änderungen im modellierten Gesamtbestand verhindert werden, da die Entscheidungen der



744 Haushalte einer gewissen zeitlichen Trägheit unterliegen. Das Modell auf Ebene der Pkw-Typenwahl  
745 steht vor der Herausforderung, den Markthochlauf von Technologieinnovationen, die einen sehr  
746 geringen oder noch gar keinen Marktanteil haben (z. B. alternative Antriebe oder  
747 Automatisierungskomponenten), unter verschiedenen Rahmenbedingungen vorherzusagen. Da reine  
748 Discrete-Choice-Modelle, die auf Basis des Ist-Zustands kalibriert werden, die zukünftige Entwicklung  
749 von Innovationen systematisch unterschätzen, wird auf ein hybrides Modell (Discrete-Choice- und  
750 Diffusionsmodell) zurückgegriffen.

751 Abschließend wurden einige Herausforderungen diskutiert, die sich bei der Umsetzung des  
752 Modellkonzepts ergaben. Neben einigen Validierungsproblemen und dem bereits diskutierten Fehlen  
753 von Paneldaten zu Anschaffungs- oder Abschaffungsentscheidungen, den zugehörigen Transaktionen  
754 und deren Kopplung an Lebensereignisse, betrifft dies insbesondere die Regionalisierung des  
755 Modells, um Aussagen über die Wirkungen regionaler Regulierungen auf den Fahrzeugabsatz zu  
756 berechnen. So ist anzunehmen, dass die Präferenzen und Zahlungsbereitschaften der Verbraucher  
757 regional in Deutschland stark variieren, weshalb regionale Modelle auf Basis regionaler Daten  
758 geschätzt werden müssten. Solche Daten liegen bislang jedoch nicht vor. Darüber hinaus ist  
759 anzunehmen, dass zukünftige Innovationen die Verkehrsmitteloptionen regional unterschiedlich  
760 verändern werden, was die aktuelle Diskussion über autonomes Car- oder Ridesharing zeigt. Um  
761 differenziert vorherzusagen, wie derartige Veränderungen ggf. den Fahrzeugbesitz und die  
762 Fahrzeugnutzung beeinflussen werden, sind empirische Untersuchungen notwendig, um besser zu  
763 verstehen, unter welchen Bedingungen private Haushalte tatsächlich in Erwägung ziehen, sich keinen  
764 privaten Pkw mehr anzuschaffen. Eine rein kostengetriebene Betrachtung auf Basis von  
765 Stichtagsmobilitätsmustern greift hier sehr wahrscheinlich zu kurz. Es wird mindestens eine  
766 Rückkopplung mit einem Verkehrsmodell nötig sein, das auch seltene Ereignisse wie beispielsweise  
767 Urlaubsfahrten betrachtet. Schließlich muss von Modellierern besser verstanden werden, welche  
768 Kosten tatsächlich für die Fahrzeugnutzung anfallen und welche (intangiblen) Nutzen hinter dieser  
769 beobachteten Zahlungsbereitschaft stehen.

## 770 **Danksagung**

771 Die Arbeiten an der Modellentwicklung und an vorliegendem Artikel wurden im Rahmen der  
772 institutionellen Förderung „Verkehrsentwicklung und Umwelt (VEU) II“ des Deutschen Zentrums für  
773 Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich bei Tobias Kuhnimhof, Falko  
774 Nordenholz, Francisco J. Bahamonde-Birke, Lars Kröger und Marie-Sophie Bolz (alle DLR) für  
775 hilfreiche Diskussionen und inhaltliche Zuarbeit. Außerdem bedanken sich die Autoren bei Till Gnann  
776 (Fraunhofer ISI) für ein äußerst konstruktives Review des Artikels, sowie bei Angelika Schulz (DLR) für  
777 das intensive Korrekturlesen des Artikels. Die Verantwortung für verbleibende Fehler liegt allein bei  
778 den Autoren.

## 779 **Literatur**

780 Adolf, J., C. Balzer, A. Joedicke, U. Schabla, K. Wilbrand, S. Rommerskirchen, N. Anders, A. A. d. Maur,  
781 O. Ehrentraut, L. Krämer und S. Straßburg (2015). „Shell Pkw-Szenarien bis 2040: Fakten, Trends und  
782 Perspektiven für Auto-Mobilität“. Shell Deutschland, Prognos.

783 Al-Alawi, B. M., und T. H. Bradley (2013). „Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle  
784 market modeling Studies“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21:190-203.  
785 doi:10.1016/j.rser.2012.12.048.

786 Bahamonde-Birke, F. J. und T. Hanappi (2016). „The potential of electromobility in Austria: Evidence  
787 from hybrid choice models under the presence of unreported information“. *Transportation Research*  
788 *Part A: Policy and Practice* 83:30-41.

789 Bass, F. M. (1969). „A New Product Growth for Model Consumer Durables“. *Management Science*  
790 15:215-27.

791 DAT (2017). DAT Report 2017, Deutsche Automobil Treuhand GmbH.

792 DEFINE (2014). „DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of  
793 Electromobility Synthesebericht“. IHS Wien, Umweltbundesamt, TU Wien, DIW Berlin, Öko-Institut,  
794 CASE.

795 Destatis (2011). Zensus 2011, Haushalte nach Haushaltsgrößen - Stichtag 09.05.2011 - regionale  
796 Tiefe: Kreise und krfr. Städte (12111-31-01-4). Abgerufen am 09.11.2017 im Internet unter  
797 [https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=6EC7A6B76837DC29F8AE20C3F8E0](https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=6EC7A6B76837DC29F8AE20C3F8E0231E.reg1?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=12111-31-01-4&levelindex=0&levelid=1510241655274&index=31)  
798 [231E.reg1?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=12111-31-01-](https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=6EC7A6B76837DC29F8AE20C3F8E0231E.reg1?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=12111-31-01-4&levelindex=0&levelid=1510241655274&index=31)  
799 [4&levelindex=0&levelid=1510241655274&index=31](https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=6EC7A6B76837DC29F8AE20C3F8E0231E.reg1?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=12111-31-01-4&levelindex=0&levelid=1510241655274&index=31)

800 Diekmann, L., E. Gerhards, S. Klinski, B. Meyer, S. Schmidt, und M. Thöne (2011). „Steuerliche  
801 Behandlung von Firmenwagen in Deutschland“. FiFo Köln, Report Nr. 13.

802 EPA - Environmental Protection Agency (2011). „FEV Inc. Report ‚Light Duty Technology Cost Analysis,  
803 Power-Split and P2 Hybrid Electric Vehicle Case Studies‘ - Response to Peer Reviewer Comments“.

804 ESMT (2011). „Marktmodell Elektromobilität“. European School of Management and Technology.

805 Follmer, R., D. Gruschwitz, B. Jesske, S. Quandt, B. Lenz, C. Nobis, K. Köhler und M. Mehlin (2010).  
806 „Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht Struktur-Aufkommen-Emissionen-Trends“.  
807 Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

808 Gnann, T. (2015). „Market Diffusion of Plug-in Electric Vehicles and Their Charging Infrastructure“.  
809 Fraunhofer Verlag, Stuttgart.

810 Gnann, T., und P. Plötz (2015). „A review of combined models for market diffusion of alternative fuel  
811 vehicles and their refueling infrastructure“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47:783-93.  
812 doi:10.1016/j.rser.2015.03.022.

813 Gnann, T., T. Stephens, Z. Lin, P. Plötz, C. Liu, und J. Brokate (2017). „What drives the market for plug-  
814 in electric vehicles?“ European Electric Vehicle Congress.

815 de Haan, P., M. G. Mueller und R. W. Scholz (2009). „How much do incentives affect car purchase?  
816 Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars - Part II: Forecasting effects of feebates  
817 based on energy-efficiency“. *Energy Policy* 37(3): 1083-1094.

818 Jamasb, T., und J. Köhler (2007). „Learning Curves for Energy Technology: A Critical Assessment“.  
819 Cambridge Working Papers in Economics.

820 Jensen, A. F., E. Cherchi, S. L. Mabit, und J. de Dios Ortúzar (2016). „Predicting the potential market  
821 for electric vehicles.“ *Transportation Science* 51(2): 427-440.

822 de Jong, G., J. Fox, A. Daly, M. Pieters und R. Smit (2004). "Comparison of car ownership models".  
823 Transport Reviews 24(4): 379-408.

824 de Jong, G., J. Fox, M. Pieters, L. Vonk und A. Daly (2002). "Audit of Car Ownership Models".

825 KBA (2012). „Privat und gewerblich zugelassene Personenkraftwagen (Pkw) - der kleine Unterschied“.  
826 Abgerufen am 09.11.2017 im Internet unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/  
827 Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2012/2012\\_n\\_firmenwagen\\_pdf.pdf? blob=publicationFile&v=9](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2012/2012_n_firmenwagen_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=9)

828 KBA (2017a). „Bestand in den Jahren 2008 bis 2017 nach ausgewählten Fahrzeugklassen mit dem  
829 Durchschnittsalter der Fahrzeuge“. Abgerufen am 20.07.2017 im Internet unter  
830 [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/b\\_alter\\_kfz\\_z.html?nn=645784](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/b_alter_kfz_z.html?nn=645784)

831 KBA (2017b). „Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2007 bis 2016 nach ausgewählten  
832 Kraftstoffarten“. Abgerufen am 20.07.2017 im Internet unter  
833 [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n\\_umwelt\\_z.html?nn=652326](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/n_umwelt_z.html?nn=652326)

834 KBA (2017c). „Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2007 bis 2016 nach ausgewählten  
835 Haltergruppen“. Abgerufen am 10.11.2017 im Internet unter  
836 [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/z\\_n\\_halter.html?nn=652344](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/z_n_halter.html?nn=652344)

837 Kieckhäfer, K. (2013). „Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios“.  
838 Wiesbaden: Springer Gabler.

839 Kieckhäfer, K., T. Volling, und T. S. Spengler (2014). „A Hybrid Simulation Approach for Estimating the  
840 Market Share Evolution of Electric Vehicles“. Transportation Science. doi:10.1287/trsc.2014.0526.

841 Kihm, A. (2014). „DISCO: DISaggregate Car Ownership“. Jacobs University Bremen.

842 Kihm, A. und S. Trommer (2014). „The new car market for electric vehicles and the potential for fuel  
843 substitution“. Energy Policy 73: 147-157.

844 Knörr, W., C. Heidt und A. Schacht (2012). „Aktualisierung "Daten-und Rechenmodell:  
845 Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030"  
846 (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011)“.  
847 Endbericht, ifeu Institut.

848 Mehlhart, G., C. Merz, L. Akkermans und J. Jordal-Joergensen (2011). „European second-hand car  
849 market analysis“. Öko-Institut.

850 Mock, P. (2010). „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile  
851 und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR 21)“. Universität Stuttgart.

852 Mueller, M. G. und P. de Haan (2009). „How much do incentives affect car purchase? Agent-based  
853 microsimulation of consumer choice of new cars - Part I: Model structure, simulation of bounded  
854 rationality, and model validation“. Energy Policy 37(3): 1072-1082.

855 Nitsch, J., T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt  
856 und M. Sterner (2012). „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien  
857 in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“. Deutsches Zentrum für  
858 Luft- und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES);  
859 Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE).

- 860 Plötz, P., T. Gnann, und M. Wietschel (2012). „Total ownership cost projection for the German  
861 electric vehicle market with implications for its future power and electricity demand“. Enerday, 7th  
862 Conference on Energy Economics and Technology "Infrastructure for the Energy Transformation".
- 863 Plötz, P., T. Gnann, A. Kühn und M. Wietschel (2013). „Markthochlaufszszenarien für  
864 Elektrofahrzeuge“. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).
- 865 Plötz, P., T. Gnann und M. Wietschel (2014). „Modelling Market Diffusion of Electric Vehicles with  
866 Real World Driving Data, Part I: Model Structure and Validation“. Fraunhofer-Institut für System- und  
867 Innovationsforschung (ISI).
- 868 Propfe, B. (2016). „Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von  
869 technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen“. Universität Stuttgart.
- 870 Redelbach, M. (2016). „Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur  
871 Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative Pkw-Antriebskonzepte“. Universität  
872 Stuttgart.
- 873 Rogers, E. M (1983). "Diffusion of Innovations". New York; London: Free Press; Collier Macmillan.
- 874 Schlesinger, M., P. Hofer, A. Kemmler, A. Kirchner, S. Strassburg, D. Lindenberger, S. Nagl, M. Paulus,  
875 J. Richter, J. Trüby, C. Lutz, O. Khorushun, U. Lehr und I. Thobe (2010). „Energieszenarien für ein  
876 Energiekonzept der Bundesregierung“. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Prognos  
877 AG; EWI; GWS.
- 878 Schubert, M., T. Kluth, G. Nebauer, R. Ratzenberger, S. Kotzagiorgis, B. Butz, W. Schneider und M.  
879 Leible (2014). „Verkehrverflechtungsprognose 2030“. BVU, Intraplan, IVV, Planco.
- 880 VerbraucherAnalyse (2012). „VA 2012 Klassik I Märkte“, Axel Springer AG und Bauer Media Group.
- 881 Wansart, J., und E. Schnieder (2010). „Modeling market development of electric vehicles“, 4th  
882 Annual IEEE San Diego Systems Conference. doi:10.1109/systems.2010.5482453.
- 883 Weikl, R. (2010). „Simulation zur Abschätzung der Marktanteilsentwicklung unterschiedlicher  
884 Antriebsvarianten am deutschen Fahrzeugmarkt“. Technische Universität Chemnitz.
- 885 Weiss, C., B. Chlond, M. Heilig und P. Vortisch (2014). „Capturing the usage of the German car fleet  
886 for a one year period to evaluate the suitability of battery electric vehicles—a model based approach.“  
887 Transportation Research Procedia 1(1): 133-141.
- 888 Woldeamanuel, M. G., R. Cyganski, A. Schulz und A. Justen (2009). „Variation of households' car  
889 ownership across time: application of a panel data model“. Transportation 36(4): 371-387.
- 890 Wright, T. P (1936). "Factors Affecting the Cost of Airplanes", Journal of the Aeronautical Sciences  
891 3(4): 122-128.
- 892 Zimmer, W., M. Buchert, S. Dittrich, F. Hacker, R. Harthan, H. Hermann, W. Jenseits, P. Kasten, C.  
893 Loreck und K. Götz (2011). „OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von  
894 Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“. Öko-  
895 Institut e.V. und Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE).
- 896 Zimmer, W., R. Blanck, T. Bergmann, M. Mottschall, R. von Waldenfels, R. Cyganski, A. Wolfemann,  
897 C. Winkler, M. Heinrichs und F. Dünnebeil (2016). „Endbericht RENEWABILITY III-Optionen einer  
898 Dekarbonisierung des Verkehrssektors“.