

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

VON BENJAMIN KICKHÖFER UND JENS BROKATE

## 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

---

*Anschrift der Verfasser:*

Dr.-Ing. Benjamin Kickhöfer  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Verkehrsforschung  
Rutherfordstraße 2  
12489 Berlin  
E-Mail benjamin.kickhoefer@dlr.de

Dipl.-Wi.-Ing. Jens Brokate  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart  
E-Mail: jens.brokate@dlr.de

<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.

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 abhängen. 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.

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

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

## 2. Vergleich ausgewählter Modellansätze

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

### 2.1 MODELLTYPEN

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

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

Al-Alawi und Bradley (2013) beschreiben, dass in *agentenbasierten Modellen* i. d. R. eine virtuelle Umgebung geschaffen wird, in welcher Aktionen und Interaktionen einzelner Agenten simuliert werden. Die Agenten können z. B. Individuen oder Organisationen abbilden, die sich durch Eigenschaften und Präferenzen unterscheiden, was wiederum deren jeweiliges Handeln in den gewählten Systemgrenzen bestimmt.

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

Das Ziel von *Diffusionsmodellen* ist die Nachahmung von Produktlebenszyklen im Zeitverlauf. Diffusion bezeichnet dabei den Prozess, in dem sich neue Technologien oder

---

<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.

Produkte in einem Markt durchsetzen (Rogers 1983). Die Diffusionsrate stellt dabei die Geschwindigkeit dar, mit der sich ein neues Produkt durchsetzt. Die klassischen Ansätze hierfür sind unter anderem die Charakterisierung von Adopter-Typen oder der Einsatz einer S-Kurve zur Abbildung der Diffusionsrate. Für die Modellierung der Diffusion von Technologieinnovationen im Pkw-Bestand wird häufig das Modell von Bass (1969) genutzt. Es benötigt historische Zeitreihen von Absatzmengen und beruht auf der Annahme, dass Produkte sich in Generationen weiterentwickeln.

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

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

Für eine modellendogene Berechnung zukünftiger Fahrzeug- oder Komponentenkosten kann die auf den Flugzeugbau (Wright 1936) zurückgehende Lernkurven-Methode genutzt werden, die einen Zusammenhang zwischen Herstellungskosten und kumulierter Produktionsmenge herstellt. Im Zuge der Erweiterung der Theorie um zusätzliche Einflussfaktoren wird in der Literatur der verallgemeinernde Begriff der Erfahrungskurve verwendet (Jamasp und Köhler 2007). Bei einer solchen endogenen Kostenberechnung dient der simulierte Fahrzeugabsatz des Vorjahres als Input für den aktuellen Zeitschritt. Somit entsteht eine Rückkopplung zwischen den Ergebnissen zweier Berechnungsschritte.

## 2.2 BESTEHENDE MODELLE

### 2.2.1 OPTUM

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

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

Im Rahmen des Projektes ‚Renewability III‘, welches Optionen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2050 untersuchte, wurde OPTUM weiterentwickelt (Zimmer et al. 2016). Der Ansatz ist als zielgetrieben zu charakterisieren, d. h., die Dekarbonisierung des Verkehrssektors musste in allen Szenarien erreicht werden. Bei der Modellierung der Neuzulassungen werden die Nutzer nach Haltergruppe und Jahresfahrleistung differenziert und wählen in einem Discrete-Choice-Modell basierend auf den Total Cost of Ownership (TCO) ein Fahrzeug. Die Parameter des Modells wurden aus dem Fahrzeugdatensatz der

---

<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.

MiD 2008 für Diesel und Benzinfahrzeuge geschätzt, für andere Antriebe über die reale Absatzentwicklung zwischen 2010 und 2014 abgeleitet. Die technologische Entwicklung wird im Gegensatz zur ursprünglichen Variante von OPTUM nicht mehr durch eine einfache Dämpfungsfunktion, sondern über Kostenkurven einer eigens entwickelten Technologiedatenbank abgebildet. Diese stellt die Kosten verschiedener Technologien zu verschiedenen Zeitpunkten in der Zukunft dar, koppelt aber im Gegensatz zu VECTOR21 (siehe Abschnitt 2.2.3) die Kostenminderungen nur rudimentär an die Stückzahlen einer bestimmten Technologie. Da der Gesamt-Pkw-Bestand (abgebildet über eine Prognose der Motorisierungsrate) eine exogene Größe ist, kann nicht modelliert werden, welche Änderungen sich bspw. durch neue Mobilitätsangebote ergeben würden. Derartige Entwicklungen können nur indirekt über die Motorisierungsrate berücksichtigt werden. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

### 2.2.2 ALADIN

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

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

Die Energieverbräuche konventioneller Antriebe sind der Literatur entnommen, ihnen wird pauschal eine lineare Verbesserung im Laufe des Betrachtungszeitraums unterstellt. Hierbei werden die dem Kunden zur Auswahl stehenden Varianten konventionell betriebener

---

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

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

Fahrzeuge vernachlässigt. Damit entfällt auch der Einfluss spezifischer Kundencharakteristika auf die Technologiewahl und auf die Emissionsreduktion im Gesamtmarkt. Ebenso verhält es sich mit den Varianten elektrifizierter Antriebe, insbesondere da bedarfsgerechte Fahrzeugauslegungen und verschiedene Betriebsstrategien keine Berücksichtigung finden. Das Modell ist eines der am besten dokumentierten Modelle, es ist jedoch nicht öffentlich verfügbar.

### 2.2.3 VECTOR21

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

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

### 2.2.4 TREMOD

Das Modell TREMOD (TRansport EMISSION Estimation MODe) entstand in den 1990er Jahren im Rahmen eines Vergleichs und einer Konsolidierungsphase verschiedener Modelle zur Emissionsberechnung, aus der zunächst das „Handbuch für die Berechnung von Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge“ (HBEFA) hervorging. Sowohl das Modell als auch das Handbuch werden seitdem regelmäßig aktualisiert, wobei ersteres auch die

---

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

Möglichkeit bietet, die Auswirkung von Maßnahmen auf die Schadstoffemissionen des Verkehrs für zukünftige Jahre mittels Szenarien zu modellieren (siehe z. B. Knörr et al. 2012). Dies beinhaltet auch die Vorhersage des Pkw-Bestands inklusive technischer Differenzierung auf der Grundlage von Fahrzeugkonzepten.

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

### 2.2.5 Shell-Studien

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

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

### 2.2.6 Marktmodellierung Elektromobilität (MMEM)

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



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

#### 2.2.7 DEFINE

Ziel des durch die Europäische Union (EU) geförderten Projektes DEFINE war die Untersuchung ökonomischer Effekte einer erhöhten Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in mehreren europäischen Ländern, darunter auch Deutschland (DEFINE 2014). Im Rahmen einer für Österreich durchgeführten Haushaltsumfrage wurden Präferenzen von Haushalten zu Kauf und Nutzung von Elektrofahrzeugen erhoben und ein diskretes Entscheidungsmodell geschätzt (Bahamonde-Birke und Hanappi 2016). DEFINE integriert diese Schätzungen in das Käufermodell von OPTUM (siehe Abschnitt 2.2), um das Marktpotenzial der Elektromobilität abzuschätzen. Mittels eines Diffusionsmodells wird dann die Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge berechnet. Damit berücksichtigen die Autoren, dass die Vorhersage der Marktentwicklung nicht durch ein im Ist-Zustand kalibriertes Discrete-Choice-Modell ausgedrückt werden kann, da im Ist-Zustand der Marktanteil von Elektrofahrzeugen zu gering ist, um gültige Entwicklungen für die Zukunft vorherzusagen (Jensen et al. 2016). Insofern lässt sich die Vorgehensweise bei DEFINE gut als Ausgangspunkt für eine Modellentwicklung verwenden. Einzig das Emissionsreduktionspotenzial konventioneller Antriebe ist nur rudimentär abgebildet, da deren Entwicklung nicht bottom-up modelliert wird. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

#### 2.2.8 DISCO

Kihm (2014) und Kihm und Trommer (2014) untersuchen mit dem am Institut für Verkehrsforschung des DLR entwickelten Modells DISCO (DISaggregated Car

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

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

#### 2.2.9 Modell von Kieckhäfer

Ziel des von Kieckhäfer (2013) und Kieckhäfer et al. (2014) entwickelten Modells ist die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Gestaltung zukünftiger Fahrzeugportfolios in der Automobilindustrie. Mittels agentenbasierter Modellierung werden Marktanteile auf Basis des Verhaltens individueller Agenten abgebildet. Dabei werden die Kaufentscheidungen der Agenten mittels eines Discrete-Choice-Modells abgebildet. Diese Entscheidungen beeinflussen das aggregierte Systemverhalten, welches – basierend auf dem Ansatz von Wansart und Schnieder (2010) – in einem systemdynamischen Simulationsmodell umgesetzt ist. Die Anzahl der Neuzulassungen ist exogen vorgegeben und das Modell berechnet die Marktdurchdringung der zur Auswahl stehenden Antriebsalternativen unter Berücksichtigung der Kaufentscheidung, der Entwicklung von Antriebstechnologien und der Infrastruktur. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

#### 2.2.10 Modell von Plötz et al.

Die Arbeiten von Plötz et al. (2012) sind als Vorläufer des Modells ALADIN zu sehen. Die Autoren verwenden ein TCO-Neuwagenkäufermodell zur Abbildung des Neuwagenmarktes in Bezug auf verschiedene Antriebstechnologien. Mit dem TCO-Modell wird die Antriebswahl beim Neufahrzeugkauf deterministisch kostenminimierend bestimmt. Segmentabhängig werden die Marktanteile auf Basis von

Fahrleistungsverteilungen ermittelt. Die Daten für letztere stammen aus dem Deutschen Mobilitätspanel (MOP) und werden mit einer Log-Normalverteilung approximiert. Für die Hochrechnung auf den Fahrzeugbestand wurden die Bestandsstatistiken des KBA der Jahre 2001 bis 2009 ausgewertet. Die Daten aus den Jahren 2010 und 2011 wurden nicht herangezogen, um einen drastischen Verjüngungseffekt im Bestand aufgrund der Umweltprämie nicht in der Funktion abzubilden. Die gewonnene Funktion beschreibt die Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter und wurde mit einer Weibull-Verteilung approximiert. Ähnlich wie in den meisten anderen der vorgestellten Modelle findet eine Umschichtung der gebrauchten Fahrzeuge statt, die nach einem gewissen Alter mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit aus der Flotte ausscheiden. Eine Differenzierung der Kunden über die Fahrleistung und Fahrzeugsegmentierung hinaus wird nicht vorgenommen. Das Modell ist nicht öffentlich verfügbar.

#### 2.2.11 Weitere Modelle

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

Mit einem nutzenbasierten Ansatz schlägt Redelbach (2016) eine Veränderung von VECTOR 21 vor, bei welcher der deutsche Pkw-Neuzulassungsmarkt modelliert wird, um die zukünftige technologische Entwicklung alternativer Antriebe und ihre wichtigsten Einflussfaktoren zu untersuchen. Die Kaufentscheidungen werden mittels eines Discrete-Choice-Modells abgebildet, das neben Kosten auch technische und ökologische Kriterien einbezieht. Für die Abbildung der Heterogenität der Nutzer in Bezug auf ihr Fahrverhalten und ihre Präferenzen beim Pkw-Kauf wird ein stochastischer Ansatz zur Generierung repräsentativer Käuferprofile (Agenten) genutzt. Die hierfür notwendigen Häufigkeitsverteilungen der relevanten Nutzercharakteristika innerhalb der Gesamtbevölkerung werden auf Basis empirischer Daten zum Mobilitäts- und Konsumverhalten abgeleitet (MiD 2008 und VerbraucherAnalyse 2012). Eine Berechnung

---

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

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

des Fahrzeugbestandes sowie die Zuordnung von Fahrzeugen zu den entsprechenden Käuferagenten werden allerdings nicht vorgenommen.

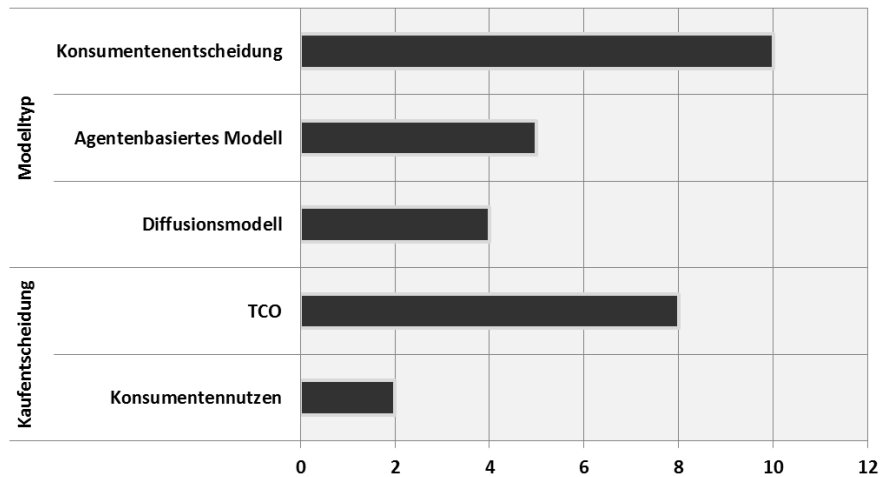
In den Pkw-Marktsimulationen von Weigl (2010) stehen einer heterogenen Käufergruppe von Neufahrzeugen verschiedene Antriebskonzepte zur Auswahl, die sich hinsichtlich ihrer ökonomischen Eigenschaften und Verwendung unterscheiden. Reichweite, Umweltverträglichkeit, die Verfügbarkeit von Infrastruktur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

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

### 2.3 SYNTHESE UND BEWERTUNG DER VORGESTELLTEN MODELLANSÄTZE

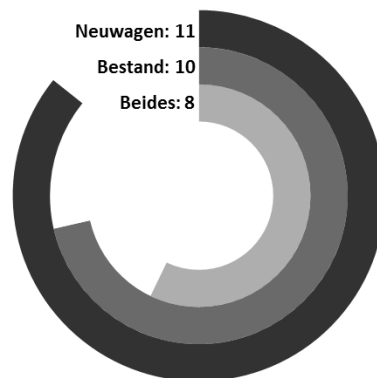
Die Auswertung der Literatur zeigt, dass etwa seit dem Jahr 2009 der deutsche Fahrzeugmarkt intensiv modelliert wird, vor allem im Hinblick auf die Abbildung des Neuwagenmarktes für alternative Antriebe. In Meta-Studien zu Marktmodellen für alternative Antriebe existieren bereits verschiedene Ansätze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

Wie Abbildung 1 zeigt, modellieren zehn Modelle Konsumentenentscheidungen, fünf davon mittels eines agentenbasierten Ansatzes. Vier können als Diffusionsmodelle beschrieben werden, sechs sind als hybride Modelle zu bezeichnen. Diese sind in der gezeigten Übersicht mehrfach aufgeführt.



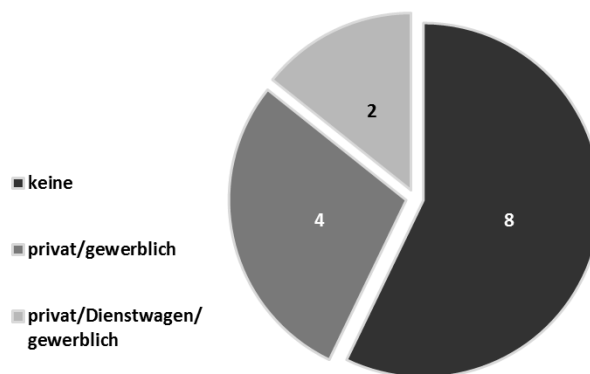
**Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Modelle nach Modelltyp und Art der modellierten Kaufentscheidung**

Elf der betrachteten Modelle berechnen die Durchdringung von alternativen Antrieben für den Neuwagenmarkt (ca. 3 Mio. Pkw p. a.). Zehn Modelle bilden den Pkw-Bestand ab (ca. 45 Mio. Pkw in 2016). Acht der zehn Modelle simulieren sowohl den Neuwagenmarkt als auch den Bestand. Keines der Modelle berechnet die Zahl der jährlichen Neuzulassungen endogen, und auch die Interaktion zwischen Neu- und Gebrauchtwagenmarkt wird an keiner Stelle abgebildet.



**Abbildung 2: Überblick des Betrachtungsgegenstandes in den untersuchten Modellen**

Bezüglich der Differenzierung von Fahrzeugnutzern gibt es verschiedene Aspekte, die in den genannten Modellen betrachtet werden. Lediglich sechs der Modelle unterscheiden gewerbliche oder private Haltergruppen. Zwei davon heben darüber hinaus hervor, ob gewerbliche Halter Pkw auch privat nutzen können (Dienstwagen).



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

Ein weiterer Aspekt der Nutzerdifferenzierung betrifft die Abbildung der Jahresfahrleistung im Modell. Dies gilt insbesondere für die Modelle mit TCO-basierter Kaufentscheidung, da die variablen Kosten maßgeblich durch die Laufleistung bestimmt werden. Jedoch werden in nur wenigen der Studien detaillierte Angaben zur Differenzierung der Nutzer nach Laufleistung gemacht, sodass ein entsprechender Vergleich nicht möglich ist. Darüber hinaus werden in fünf Modellen die Nutzer nach regionaler Herkunft oder Raumtyp ihres Wohnortes differenziert. Keines der untersuchten Modelle kann jedoch regional spezifische Regulierungen wie Umweltzonen abbilden. Obwohl soziodemographische Informationen verfügbar wären, vernachlässigen die meisten der betrachteten Modelle eine detailliertere Abbildung der Nachfrageseite (z. B. Alterung, Führerscheinbesitz, Präferenzänderungen). Bestenfalls fließen demografische Trends in die Berechnung der verwendeten Motorisierungsrate mit ein (siehe z. B. Adolf et al. 2014).

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

Durch den starken Fokus auf Antriebsstränge berücksichtigt keines der untersuchten Modelle die möglichen Wirkungen neuer Mobilitätskonzepte (z. B. hervorgerufen durch

zunehmende Automatisierung und Vernetzung). In keinem der gelisteten Modelle ist eine Schnittstelle oder Kopplung zu einem Verkehrsmodell vorgesehen, um die Fahrleistung der Nutzer im Zusammenhang konkurrierender Verkehrsträger zu untersuchen. Des Weiteren ist keines der Modelle öffentlich verfügbar (open source), was einen Vergleich der Ergebnisse deutlich erschwert.

Zusammenfassend lassen sich folgende Lücken in der deutschen Modelllandschaft identifizieren:

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

### 3. Vorstellung eines evolutionären Modellansatzes

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

#### 3.1 VERFÜGBARE DATEN

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

Das KBA veröffentlicht auf seiner Webseite<sup>10</sup> verschiedene amtliche Statistiken über alle nach der Fahrzeugzulassungsverordnung in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. Das Datenangebot umfasst bspw. Neuzulassungen, Bestand und Besitzumschreibungen. Dabei wird u. a. zwischen privat und gewerblich zugelassenen Fahrzeugen unterschieden, allerdings nicht erhoben, wie die Fahrzeuge tatsächlich genutzt werden. Dies ist für das zu entwickelnde Modell insbesondere in Bezug auf Dienstwagen problematisch, da unklar ist, welche gewerblich zugelassenen Pkw (überwiegend) privat genutzt werden. Detaillierte

---

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

Sonderauswertungen können beim KBA kostenpflichtig bestellt werden. Nachteilig ist die fehlende Verknüpfung der Fahrzeugdaten mit ergänzenden Informationen über die Halter (Haushalte oder Unternehmen), wodurch die Betrachtung sozio-ökonomischer Einflussfaktoren nicht möglich ist.

### 3.1.2 Mobilität in Deutschland (MiD)

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

### 3.1.3 Deutsches Mobilitätspanel (MOP)

Auch das MOP<sup>14</sup> wird von einigen der vorgestellten Modelle verwendet, z. B. zur Ableitung von Fahrprofilen, die durch ein Elektroauto ersetzt werden können. Der Vorteil gegenüber der MiD ist, dass es sich um eine seit 1994 jährlich wiederholte Befragung von Haushalten über Mobilitätsverhalten im Alltag (keine Urlaubszeiten) und Pkw-Nutzung handelt, die sich im Gegensatz zum Stichtag der MiD auf eine gesamte Woche beziehen. Somit können Trends besser erforscht und mehrere Jahrgänge für Analysen des Autobesitzes zusammengefasst werden (siehe z. B. Woldeamanuel et al. 2009). Allerdings bleiben Haushalte maximal drei Jahre im Panel, so dass eine Längsschnittbetrachtung über Pkw-Käufe und -Verkäufe nicht möglich ist, da die durchschnittliche Haltedauer von Pkw zwischen 4 und 10 Jahren liegt. Ein weiterer Nachteil ist der im Vergleich zur MiD deutlich geringere Stichprobenumfang, was z. B. Hochrechnungen schwierig und räumliche Differenzierungen unmöglich macht. Die Daten sind ebenfalls über die Clearingstelle Verkehr des DLR verfügbar.<sup>15</sup>

---

<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>.

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



### 3.1.4 Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS)

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

### 3.1.5 Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)

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

### 3.1.6 Weitere Informationsquellen

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

- Die Deutsche Automobil Treuhand (DAT) gibt einen jährlichen Bericht heraus, der mittels einer Befragung von knapp 4.000 Privatpersonen deren Autokauf und Werkstattverhalten analysiert (DAT 2017). Gewerblich zugelassene Fahrzeuge werden nicht berücksichtigt. Der Datensatz ist nicht frei verfügbar.
- Die Firma Dataforce20 verwendet die Fuhrparkdatenbank FleetBase und detaillierte, kostenpflichtige Daten des KBA für Analysen des Automobil- und Flottenmarktes in Deutschland. Mittels dieser Daten wurde im Rahmen des Projektes ‚Renewbility III‘ eine sehr detaillierte Abbildung der Neuzulassungen nach Haltergruppe möglich (Zimmer et al. 2016, S. 51). Allerdings sind auch diese Daten nicht öffentlich verfügbar.

---

<sup>16</sup> Siehe [<sup>17</sup> Siehe <http://www.forschungsdatenzentrum.de/bestand/evs/index.asp>.](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Met<h3>hoden/Einkommens_Verbrauchsstichprobe.html</a>.</p></div><div data-bbox=)

<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>.

- Für die bessere Abbildung der Verschrottung von Fahrzeugen schlagen Mehlhart et al. (2011) vor, zwischen einer Ausflottungsrate und einer Verschrottungsrate zu unterscheiden. Erstere beinhaltet letztere, aber eben auch ins Ausland ausgeführte Fahrzeuge. Um eine bessere Datenbasis zu schaffen wäre u. a. eine Analyse von Statistiken des Zolls sowie der Abfallwirtschaft hilfreich. Inwieweit solche Daten verfügbar wären, müsste erst noch geprüft werden.

## 3.2 MODELLAUFBAU

### 3.2.1 Verwendete Datengrundlage

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

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

### 3.2.2 Ziele und Struktur

Das Hauptziel des hier vorgestellten Pkw-Bestandsmodells ist es, typische Pfade für Fahrzeuge im Verlauf ihres Lebenszyklus aufzuzeigen, z. B. welche Fahrzeuge mit welchen Eigenschaften tendenziell bei welchen Haushaltstypen gehalten werden und wann sie von diesen wieder abgestoßen werden. Zudem soll das Modell reagibel auf Änderungen der sozio-ökonomischen Eigenschaften der Haushalte sein, wobei die Anzahl der Neuzulassungen und Halterwechsel nicht als Eingangsgrößen in das Modell eingehen, sondern ein Modellierungsergebnis darstellen soll. Vor diesem Hintergrund bietet sich die Modellierung von Haushalten als Akteure über die Zeit an. Dies resultiert – im Gegensatz

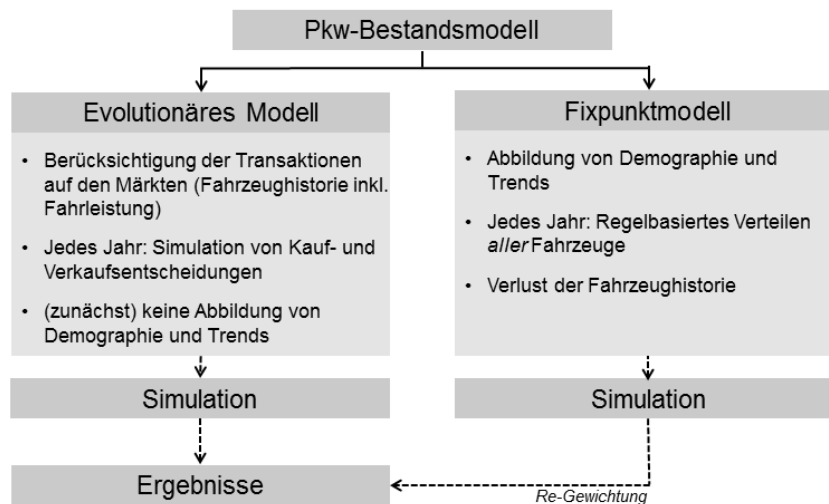
---

<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.

zu Zustandsmodellen – in einem evolutionären Ansatz, bei dem sich der Fahrzeugbestand nur langsam über die Jahre verändert und Technologieinnovationen somit auch nur langsam in den Markt diffundieren können.

Abbildung 4 zeigt die zweiteilige Modellstruktur des neuen Pkw-Bestandsmodells. Auf der einen Seite werden mittels eines evolutionären Modells alle Transaktionen auf dem Neu- und Gebrauchtwagenmarkt simuliert. Demographische Veränderungen und Trends werden nicht an dieser Stelle berücksichtigt, sondern stattdessen im parallel laufenden Fixpunktmodell (siehe Abschnitt 3.3.3). Für die Kaufentscheidung wird ein Discrete-Choice-Modell auf Basis der MiD 2008 geschätzt, welches für jeden Haushalt die Wahrscheinlichkeit eines Pkw-Kaufs auf Basis der im Jahr 2007 erworbenen Pkw berechnet.

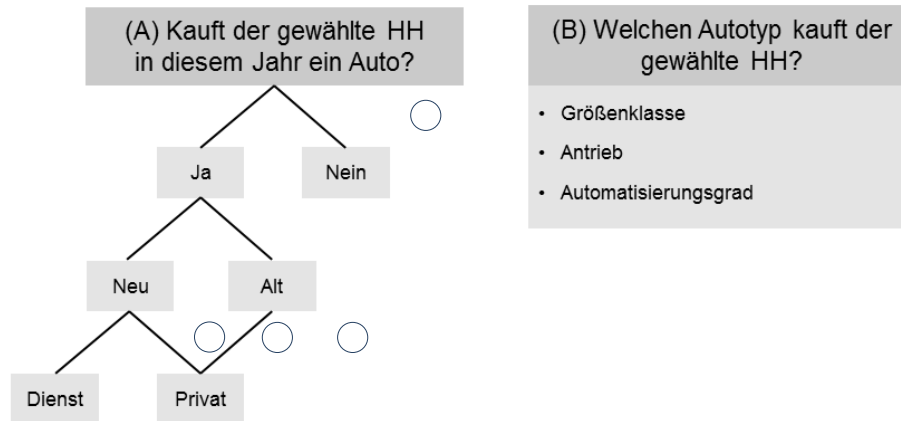


**Abbildung 4: Zweiteilige Modellstruktur des Pkw-Bestandsmodells.**

Abbildung 5 zeigt auf der linken Seite (A) die im Modell zur Verfügung stehenden vier Alternativen der ersten Stufe:

- Wahl 0: kein Kauf
- Wahl 1: Kauf Pkw gebraucht, Zulassung privat
- Wahl 2: Kauf Pkw neu, Zulassung gewerblich
- Wahl 3: Kauf Pkw neu, Zulassung privat

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



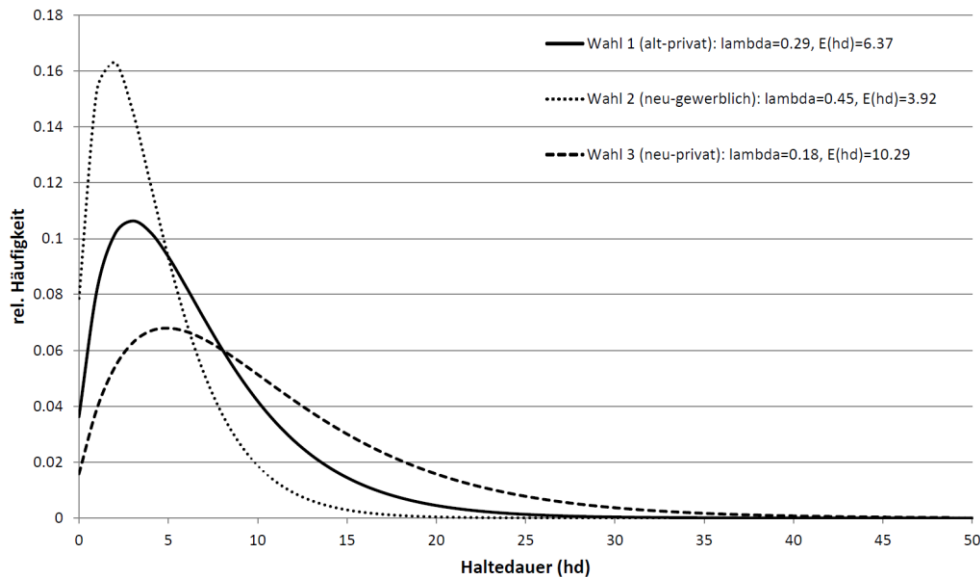
**Abbildung 5: Zweistufige Abbildung der Kaufentscheidung im evolutionären Modell.**

### 3.3 HERAUSFORDERUNGEN

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

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

<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



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

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

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

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.

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

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

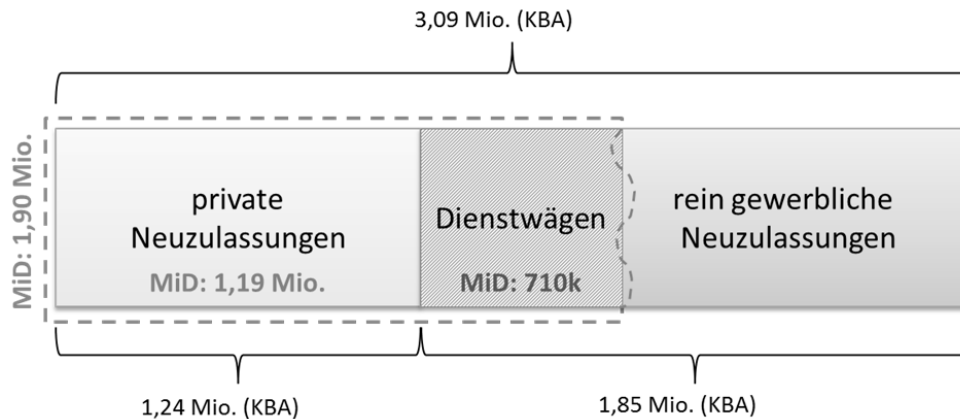
Die originale Hochrechnung des MiD-Datensatzes führt zu zweierlei Herausforderungen: Zum einen ist eine Aufteilung des Bestandes und der Neuzulassungen auf die Nutzersegmente „privat“, „Dienstwagen“ und „rein gewerblich“ nicht ohne weiteres möglich, zum anderen ist die Anzahl der hochgerechneten Pkw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

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

---

<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.

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



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

Ein Problem mit den originalen Hochrechnungsfaktoren der MiD ergibt sich aus dem Vergleich mit den KBA-Daten: Rechnet man die Anzahl der Pkw über den Haushaltsdatensatz der MiD mit den Hochrechnungsfaktoren der Haushalte hoch, übersteigt die berechnete Zahl (ca. 46 Mio.) die beim Kraftfahrtbundesamt als vom KBA ausgewiesene Zahl zugelassener Pkw von ca. 41 Mio. deutlich. Die Hochrechnung über den MiD-Fahrzeugdatensatz (es werden nur bis zu drei Pkw je Haushalt erfasst) und die gebildeten Fahrzeuggewichte ergibt in der Summe genau die KBA-Bestandszahl. Dies ist auf einen Fehler bei der Bestimmung der Hochrechnungsfaktoren des Fahrzeugdatensatzes zurückzuführen, bei der die rein gewerblich genutzten Fahrzeuge nicht berücksichtigt wurden. Dies bedeutet aber auch, dass die Häufigkeitsverteilung von Pkw je Haushalt in der MiD nicht korrekt sein kann, da der Erwartungswert „Anzahl Pkw je Haushalt“ zu hoch für den tatsächlichen Bestand ist (vgl. Tabelle 1).

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

	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

**Tabelle 1: Anzahl Pkw je Haushalt nach verschiedenen Datenquellen.**

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

- Anzahl der Haushalte je Raumtyp (urban, suburban, ländlich)
- Anzahl der Personen je Haushalt
- Anzahl der Pkw je Haushalt

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

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

<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).



### 3.3.3 Abbildung der demographischen Entwicklung und mobilitätsrelevanter Trends

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

Als Ausweg bietet sich an, die Haushalte im Modell nicht fortzuschreiben, sondern die Haushaltsstrukturen während des simulierten Zeitraums konstant zu lassen. Alternativ könnte man die Haushalte für jedes Jahr neu erzeugen und ihnen die Fahrzeuge in jedem Jahr neu zuteilen. Dazu müsste der in der MiD verwendete Hochrechnungsfaktor zur Bestimmung der Anzahl der Haushalte in der Grundgesamtheit für jedes Jahr neu erzeugt werden. Ersteres hätte den Vorteil, dass eine Längsschnitorientierung des Modells beibehalten werden könnte, allerdings ohne Abbildung der demographischen Entwicklung und weiterer mobilitätsrelevanter Trends. Erzeugte man die Haushalte jedes Jahr mit aktualisierten Hochrechnungsfaktoren neu, könnte man beides abbilden, würde allerdings die Analysemöglichkeiten des Modells stark einschränken. Dieser Nachteil wird im hier vorgestellten Modell durch eine Zweiteilung behoben, welche versucht, beide Lösungen zu integrieren: Auf der einen Seite werden Haushaltsstrukturen konstant gelassen (evolutionäres Modell), parallel werden jedoch jährlich neue Hochrechnungsfaktoren je Haushalt berechnet (Fixpunktmodell). Am Ende der Simulation werden die Ergebnisse zusammengeführt, wodurch die Effekte demographischer Veränderungen und mobilitätsrelevanter Trends separat von jenen der Kaufverhaltensänderungen der Ausgangspopulation analysiert werden können.

### 3.3.4 Regionalisierung

Im Rahmen des Modellaufbaus wird auch eine Regionalisierung getestet. Differenziert nach Region werden die Effekte möglicher regionaler Regulierungen wie z. B. (Ein-)Fahrverbote oder City-Maut auf den Fahrzeugkauf und -bestand abgeschätzt. Dazu werden regional aufgelöste KBA-Daten in das Modellsystem von VECTOR21 integriert. Neben der Berücksichtigung überregionaler CO<sub>2</sub>-Regulierungen kann so beispielsweise die Auswirkung lokaler Regulierungsmaßnahmen zur Luftreinhaltung auf die Marktanteile alternativer Antriebskonzepte untersucht werden. Im Allgemeinen hängt die Wirksamkeit lokaler Regulierungsmaßnahmen stark von der Anzahl betroffener Fahrzeuge ab. Der im Modell VECTOR21 verwendete Ansatz zur Regionalisierung stützt sich daher auf die offiziellen Fahrzeugstatistiken des KBA sowie auf Pendlerstatistiken, um die Anzahl der

von einer lokalen Regulierung betroffenen Fahrzeuge auf einer räumlich differenzierten Ebene zu berechnen. Mittels eines in einem geografischen Informationssystem implementierten Gravitationsmodells wird die Auswirkung von Einfahrverboten in spezifischen Regionen auf die umliegenden Regionen berechnet.

#### 4. Zusammenfassung

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

##### 4.1 IDENTIFIZIERTE LÜCKEN IN DER MODELLLANDSCHAFT

Es wurde eingangs gezeigt, dass es auf Bundesebene kein Modell gibt, welches in der Lage ist, den Einfluss sich verändernder technologischer und (verkehrs-)politischer Rahmenbedingungen auf Pkw-Besitz und Nutzung vorherzusagen. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden von verschiedenen Forschungsinstituten Modelle entwickelt, die vorgestellt und verglichen wurden. Die dabei identifizierten Lücken in der Modelllandschaft beinhalten unter anderem, dass alle betrachteten Modelle die Anzahl der Neuzulassungen als exogene Variable benötigen, z. B. über eine Vorhersage der Motorisierungsraten. Bei ähnlich hohen Verschrottungs- und Exportraten ergibt sich daraus implizit ein stabiler Bestand. Es geht bei den bestehenden Modellen also in erster Linie um die Aussage, *welche Art* von Fahrzeugen zugelassen wird, nicht um deren *Anzahl*. Außerdem fehlt den Modellen eine Rückkopplung zwischen Gebraucht- und Neuwagenmarkt, auf denen verschiedene Käufertypen mit verschiedenen Anforderungen agieren. Dies ist insofern kritisch zu beurteilen, weil neue Technologien sich nicht nur auf dem Neuwagenmarkt (und bei deren Nutzern mit spezifischen Einsatzmustern) durchsetzen müssen, sondern auch auf dem nachgelagerten Gebrauchtwagenmarkt. Würden sie sich dort nicht durchsetzen, würde dies direkt den Wiederverkaufswert beeinflussen. Generell ist der Gebrauchtwagenmarkt bislang wenig untersucht, insbesondere der Übergang von Neufahrzeugen in den Gebrauchtwagenmarkt. Darüber hinaus fehlt es den Modellen an einem räumlichen Bezug, so dass bspw. eine Abbildung des Einflusses von Einfahrtsbeschränkungen für Diesel-Pkw in Innenstädte auf den regionalen Markt nicht möglich ist. Auch fokussieren sich die meisten Modelle auf Emissionsmodellierung und/oder die Modellierung verschiedener Antriebstechnologien, sodass eine Analyse der Wirkung neuer Mobilitätskonzepte (z. B. autonomes Carsharing) nicht möglich ist.

Schließlich stützt sich die Präsentation der Modelle auf die jeweils veröffentlichten Projektdokumentationen; die Implementierung der Berechnungsvorschriften, also der

Quellcode, ist in den allermeisten Fällen leider nicht verfügbar, wodurch die Vergleichbarkeit der Modelle eingeschränkt ist. Anstrengungen in Richtung von open-source Code sollten in der Forschungsförderung daher von Seiten der Geldgeber deutlich mehr gefordert werden. Insgesamt ist also zu konstatieren, dass die in Deutschland vorhandenen Modelle zur Vorhersage des Pkw-Bestandes deutliche Schwächen aufweisen um insbesondere die Zulassungszahl und relevante Interaktionen zwischen Änderungen im Verkehrsangebot und Fahrzeugbesitz und Fahrzeugnutzung vorherzusagen.

#### 4.2 ANSÄTZE ZUR SCHLIESSUNG DER LÜCKEN UND HERAUSFORDERUNGEN

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

Das vorgestellte, sich noch in der Entwicklung befindliche Modell verwendet als Hauptdatenbasis die MiD 2008, wodurch die Möglichkeit zur Aktualisierung auf Basis regelmäßig erhobener und frei verfügbarer Daten gegeben ist. Zudem ermöglicht die deutschlandweite Ausrichtung des MiD-Datensatzes eine ebensolche Modellierung der Pkw-Entscheidungen mit Bezug zu Haushalts- und Fahrzeugeigenschaften. Das Modell besteht aus einem evolutionären Längsschnittmodell (bei dem die Fahrzeuge im Zeitverlauf verfolgt werden können) und einem Fixpunktmodell (bei dem die Fahrzeuge den Haushalten jedes Jahr aufs Neue zugeordnet werden). Das evolutionäre Längsschnittmodell umfasst zwei Entscheidungsebenen, die Ebene der Anschaffungsentscheidung und die Ebene der Typenwahl. Das Modell auf Ebene der Anschaffungsentscheidung löst einige Probleme bestehender Modelle: Erstens erlaubt es eine endogene Modellierung der Absatzzahl privat gehaltener Neu- und Gebrauchtwagen sowie gewerblich zugelassener, aber überwiegend privat genutzter Dienstwagen. Damit ist eine Verbindung zwischen Gebrauchtwagen- und Neuwagenmarkt und den jeweiligen Nutzerattributen hergestellt, die je nach Datenlage in der Zukunft verfeinert werden kann. Zweitens kann so die Fahrzeughistorie abgebildet werden, wodurch abrupte Änderungen im modellierten Gesamtbestand verhindert werden, da die Entscheidungen der Haushalte einer gewissen zeitlichen Trägheit unterliegen. Das Modell auf Ebene der Pkw-Typenwahl steht vor der Herausforderung, den Markthochlauf von Technologieinnovationen, die einen sehr geringen oder noch gar keinen Marktanteil haben (z. B. alternative Antriebe oder Automatisierungskomponenten), unter verschiedenen Rahmenbedingungen vorherzusagen. Da reine Discrete-Choice-Modelle, die auf Basis des Ist-Zustands kalibriert werden, die

zukünftige Entwicklung von Innovationen systematisch unterschätzen, wird auf ein hybrides Modell (Discrete-Choice- und Diffusionsmodell) zurückgegriffen.

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

## Danksagung

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

## 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.

## Literatur

- Adolf, J., C. Balzer, A. Joedicke, U. Schabla, K. Wilbrand, S. Rommerskirchen, N. Anders, A. A. d. Maur, O. Ehrentraut, L. Krämer und S. Straßburg (2015). „Shell Pkw-Szenarien bis 2040: Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität“. Shell Deutschland, Prognos.
- Al-Alawi, B. M., und T. H. Bradley (2013). „Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21:190-203. doi:10.1016/j.rser.2012.12.048.
- Bahamonde-Birke, F. J. und T. Hanappi (2016). „The potential of electromobility in Austria: Evidence from hybrid choice models under the presence of unreported information“. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 83:30-41.
- Bass, F. M. (1969). „A New Product Growth for Model Consumer Durables“. *Management Science* 15:215-27.
- DAT (2017). DAT Report 2017, Deutsche Automobil Treuhand GmbH.
- DEFINE (2014). „DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility Synthesebericht“. IHS Wien, Umweltbundesamt, TU Wien, DIW Berlin, Öko-Institut, CASE.
- Destatis (2011). Zensus 2011, Haushalte nach Haushaltsgrößen - Stichtag 09.05.2011 - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte (12111-31-01-4). Abgerufen am 09.11.2017

- im Internet unter  
<https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=6EC7A6B76837DC29F8AE20C3F8E0231E.reg1?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=12111-31-01-4&levelindex=0&levelid=1510241655274&index=31>
- Diekmann, L., E. Gerhards, S. Klinski, B. Meyer, S. Schmidt, und M. Thöne (2011). „Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland“. FiFo Köln, Report Nr. 13.
- EPA - Environmental Protection Agency (2011). „FEV Inc. Report ‚Light Duty Technology Cost Analysis, Power-Split and P2 Hybrid Electric Vehicle Case Studies‘ - Response to Peer Reviewer Comments“.
- ESMT (2011). „Marktmodell Elektromobilität“. European School of Management and Technology.
- Follmer, R., D. Gruschwitz, B. Jesske, S. Quandt, B. Lenz, C. Nobis, K. Köhler und M. Mehlin (2010). „Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht Struktur-Aufkommen-Emissionen-Trends“. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Gnann, T. (2015). „Market Diffusion of Plug-in Electric Vehicles and Their Charging Infrastructure“. Fraunhofer Verlag, Stuttgart.
- Gnann, T., und P. Plötz (2015). „A review of combined models for market diffusion of alternative fuel vehicles and their refueling infrastructure“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47:783-93. doi:10.1016/j.rser.2015.03.022.
- Gnann, T., T. Stephens, Z. Lin, P. Plötz, C. Liu, und J. Brokate (2017). „What drives the market for plug-in electric vehicles?“ European Electric Vehicle Congress.
- de Haan, P., M. G. Mueller und R. W. Scholz (2009). „How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars - Part II: Forecasting effects of feebates based on energy-efficiency“. *Energy Policy* 37(3): 1083-1094.
- Jamasb, T., und J. Köhler (2007). „Learning Curves for Energy Technology: A Critical Assessment“. Cambridge Working Papers in Economics.
- Jensen, A. F., E. Cherchi, S. L. Mabit, und J. de Dios Ortúzar (2016). „Predicting the potential market for electric vehicles.“ *Transportation Science* 51(2): 427-440.
- de Jong, G., J. Fox, A. Daly, M. Pieters und R. Smit (2004). "Comparison of car ownership models". *Transport Reviews* 24(4): 379-408.
- de Jong, G., J. Fox, M. Pieters, L. Vonk und A. Daly (2002). „Audit of Car Ownership Models“.
- KBA (2012). „Privat und gewerblich zugelassene Personenkraftwagen (Pkw) - der kleine Unterschied“. Abgerufen am 09.11.2017 im Internet unter

[https://www.kba.de/DE/Statistik/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)

- KBA (2017a). „Bestand in den Jahren 2008 bis 2017 nach ausgewählten Fahrzeugklassen mit dem Durchschnittsalter der Fahrzeuge“. Abgerufen am 20.07.2017 im Internet unter [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)
- KBA (2017b). „Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2007 bis 2016 nach ausgewählten Kraftstoffarten“. Abgerufen am 20.07.2017 im Internet unter [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)
- KBA (2017c). „Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2007 bis 2016 nach ausgewählten Haltergruppen“. Abgerufen am 10.11.2017 im Internet unter [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)
- Kieckhäfer, K. (2013). „Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios“. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Kieckhäfer, K., T. Volling, und T. S. Spengler (2014). „A Hybrid Simulation Approach for Estimating the Market Share Evolution of Electric Vehicles“. *Transportation Science*. doi:10.1287/trsc.2014.0526.
- Kihm, A. (2014). „DISCO: DISaggregate Car Ownership“. Jacobs University Bremen.
- Kihm, A. und S. Trommer (2014). „The new car market for electric vehicles and the potential for fuel substitution“. *Energy Policy* 73: 147-157.
- Knörr, W., C. Heidt und A. Schacht (2012). „Aktualisierung „Daten-und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011)“. Endbericht, ifeu Institut.
- Mehlhart, G., C. Merz, L. Akkermans und J. Jordal-Joergensen (2011). „European second-hand car market analysis“. Öko-Institut.
- Mock, P. (2010). „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR 21)“. Universität Stuttgart.
- Mueller, M. G. und P. de Haan (2009). „How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars - Part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation“. *Energy Policy* 37(3): 1072-1082.

- Nitsch, J., T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt und M. Sterner (2012). „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE).
- Plötz, P., T. Gnann, und M. Wietschel (2012). „Total ownership cost projection for the German electric vehicle market with implications for its future power and electricity demand“. Enerday, 7th Conference on Energy Economics and Technology "Infrastructure for the Energy Transformation".
- Plötz, P., T. Gnann, A. Kühn und M. Wietschel (2013). „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).
- Plötz, P., T. Gnann und M. Wietschel (2014). „Modelling Market Diffusion of Electric Vehicles with Real World Driving Data, Part I: Model Structure and Validation“. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).
- Propfe, B. (2016). „Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen“. Universität Stuttgart.
- Redelbach, M. (2016). „Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative Pkw-Antriebskonzepte“. Universität Stuttgart.
- Rogers, E. M (1983). „Diffusion of Innovations“. New York; London: Free Press; Collier Macmillan.
- Schlesinger, M., P. Hofer, A. Kemmler, A. Kirchner, S. Strassburg, D. Lindemberger, S. Nagl, M. Paulus, J. Richter, J. Trüby, C. Lutz, O. Khorushun, U. Lehr und I. Thobe (2010). „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG; EWl; GWS.
- Schubert, M., T. Kluth, G. Nebauer, R. Ratzenberger, S. Kotzagiorgis, B. Butz, W. Schneider und M. Leible (2014). „Verkehrverflechtungsprognose 2030“. BVU, Intraplan, IVV, Planco.
- VerbraucherAnalyse (2012). „VA 2012 Klassik I Märkte“, Axel Springer AG und Bauer Media Group.
- Wansart, J., und E. Schnieder (2010). „Modeling market development of electric vehicles“, 4th Annual IEEE San Diego Systems Conference. doi:10.1109/systems.2010.5482453.
- Weikl, R. (2010). „Simulation zur Abschätzung der Marktanteilsentwicklung unterschiedlicher Antriebsvarianten am deutschen Fahrzeugmarkt“. Technische Universität Chemnitz.



- Weiss, C., B. Chlond, M. Heilig und P. Vortisch (2014). „Capturing the usage of the German car fleet for a one year period to evaluate the suitability of battery electric vehicles—a model based approach.” *Transportation Research Procedia* 1(1): 133-141.
- Woldeamanuel, M. G., R. Cyganski, A. Schulz und A. Justen (2009). „Variation of households’ car ownership across time: application of a panel data model”. *Transportation* 36(4): 371-387.
- Wright, T. P (1936). “Factors Affecting the Cost of Airplanes”, *Journal of the Aeronautical Sciences* 3(4): 122-128.
- Zimmer, W., M. Buchert, S. Dittrich, F. Hacker, R. Harthan, H. Hermann, W. Jenseits, P. Kasten, C. Loreck und K. Götz (2011). „OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“. Öko-Institut e.V. und Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE).
- Zimmer, W., R. Blanck, T. Bergmann, M. Mottschall, R. von Waldenfels, R. Cyganski, A. Wolfermann, C. Winkler, M. Heinrichs und F. Dünnebeil (2016). „Endbericht RENEWABILITY III-Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors“.