

Working Paper Sustainability and Innovation
No. 13/2014



André Kühn
Patrick Novinsky
Wolfgang Schade

GLOMO – Global Mobility Model
Beschreibung und Ergebnisse

Abstract

The development of both, emerging markets as well as the already established markets (USA, Japan, Europe), is highly relevant for future success of the export-oriented German automotive industry. This paper describes the so called Global Mobility Model (GLOMO) based on the system dynamics approach, which simulates the future development of car sales by segment and drive technology. The modularized model contains population, income and GDP development in order to describe the framework in the most important markets (USA, Japan, EU, Brazil, Russia, India, China and South Africa). According to the changes in framework conditions within these countries, worldwide car sales will nearly double up to 2030 (120 Mio. cars a year), with the most dynamic development in the Chinese market. The simulation results also show that - depending on the chosen scenario - a 40 %- share of alternative drive technologies within the worldwide car sales in 2030 seems to be possible.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Modellbeschreibung	2
2.1 Das Wirtschafts-Modul (economy)	4
2.2 Das Bevölkerungs-Modul (population)	5
2.3 Das Flotten-Wachstums-Modul (car fleet growth)	6
2.4 Das Fahrzeugflotten-Modul (car fleet)	7
2.5 Das Segment- und Technologiewahl-Modul (segment and technology choice)	8
3 Ergebnisse.....	15
4 Fazit.....	17
Anhang.....	0
Literaturverzeichnis	1

1 Einleitung

Die Automobilindustrie als einer der wichtigsten Industriezweige in Deutschland, erwirtschaftet einerseits einen hohen Anteil des Umsatzes des Verarbeitenden Gewerbes und bietet andererseits unter Einbeziehung der Zulieferindustrie eine nicht unerhebliche Anzahl an Arbeitsplätzen. Geprägt ist die Situation, wie auch in anderen Industriezweigen, durch globalen Wettbewerb und die Verschiebung zu neuen absatzstarken Märkten. Hinzu kommen kurze Produktlebenszyklen, hohe Markt- und Kundenanforderungen, individuelle Kundenwünsche sowie neuere Herausforderungen im Zusammenhang mit Ressourcenverknappung und klimapolitischen Vorgaben.

Die strategische Ausrichtung der deutschen Automobilindustrie befindet sich folglich im Zielkonflikt zwischen Ausbau und Engagement in neuen aufstrebenden Märkten und der Entwicklung von alternativen Antriebstechnologien. Dieses Paper stellt auf Basis des Global Mobility Models (GLOMO) eine Möglichkeit dar, die weltweiten Absatzzahlen der wichtigsten Märkte unterteilt nach Segmenten und Antriebstechnologien bis 2030 modellbasiert abzuschätzen. Neben einer detaillierten und transparenten Modellbeschreibung soll im Anschluss kurz auf zwei ausgewählte Szenarien eingegangen werden.

2 Modellbeschreibung

Zur Abschätzung der Entwicklung des globalen Automobilmarktes wird im Folgenden das Global Mobility Model (GLOMO) verwendet, welches als systemdynamisches Prognose-Modell im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) für den Innovationsreport „Zukunft der Automobilindustrie“ entworfen wurde (Schade et al. 2012, S. 164). Einzelne Teile des Modells wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nochmals überarbeitet und im Wesentlichen bezüglich einiger technischer Parameter modifiziert (vgl. Anhang A.1). Der Marktentwicklung liegen dabei demografische und sozioökonomische Entwicklungen, unterteilt nach unterschiedlichen Weltregionen, zu Grunde. Im Vordergrund der Betrachtung stehen neben den klassischen TRIADE¹-Staaten vor allem die aufstrebenden Entwicklungsländer (BRICS²-Staaten) und deren wachsende Märkte (Kühn und Glöser 2013). GLOMO verknüpft die Vorteile der System Dynamics Modellierung (vgl. Kapitel 1) mit der diskreten Entscheidungstheorie (Discrete Choice³) und erlaubt dadurch eine besonders realistische Darstellung des Systems und seiner Umwelt (Kühn und Glöser 2012).

Die Entscheidung zum Kauf eines PKW wird durch ökonomische Faktoren und die Akzeptanz des Käufers gegenüber einer bestimmten Technologie beeinflusst. Auf der Grundlage unterschiedlicher Fahrzeugtechnologien können die ökonomischen Einflussfaktoren in Investitionen und Treibstoffkosten unterschieden werden. Periodisch wiederkehrende Kosten, wie Wartungskosten, sowie der Einfluss von CO₂-Grenzwerten auf die Kaufentscheidung bleiben bei GLOMO unberücksichtigt. Die Kaufentscheidung für einen PKW einer bestimmten Technologie basiert immer auf einem Vergleich der Kosten bzw. der Akzeptanzwerte von alternativ verfügbaren Technologien. Steigende Kosten fließen somit als negativer Nutzen in die Kaufentscheidung ein. Realisiert wird die Entscheidungsfindung durch die Erweiterung des Modells um Feedbackloops, die nutzenbasierte Logit-Theorie (vgl. Gleichung (2.4)) und die Lernkurventheorie,

-
- 1 TRIADE: Überbegriff für die drei größten Wirtschaftsräume der Welt. Dazu zählen die Staaten des Nordamerikanischen Freihandelsabkommens NAFTA (USA, Kanada, Mexiko), die EU und das industrialisierte Ostasien (Japan, Taiwan, Südkorea, Hongkong, Singapur).
 - 2 BRICS: Zusammenschluss der aufstrebenden Entwicklungs- bzw. Schwellenländer Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika.
 - 3 Die Discrete Choice Theorie beschreibt das Entscheidungsverhalten von Personen, wenn diese sich für eine Option aus einer endlichen oder abzählbar unendlichen (diskreten) Menge an Alternativen zu entscheiden haben (Papula 2003, S. 372).

auf welche im Folgenden noch näher eingegangen wird (Kühn und Glöser 2013).

Das Modell selbst wird in fünf Module unterschieden, was eine bessere Übersicht sowie die Möglichkeit, einzelne Teile des Modells modular betrachten zu können, gewährleistet. Abbildung 2–1 liefert einen Überblick über das gesamte Fahrzeugmodell und beinhaltet sowohl ökonomische als auch demografische Einflussfaktoren. Eine Beschreibung der einzelnen Teilmodelle folgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels und orientiert sich an dem Konferenzbeitrag „System-based feedback analysis of e-mobility diffusion“ zur 30th International Conference of the System Dynamics Society in St. Gallen von Kühn und Glöser (2013). Die einzelnen Teilmodelle werden zum besseren Verständnis auf ihre wesentlichen Elemente reduziert, deren Einflüsse und Wechselwirkungen jedoch detailliert beschrieben. Eine Darstellung des tatsächlichen Modells findet sich im Anhang A.2.

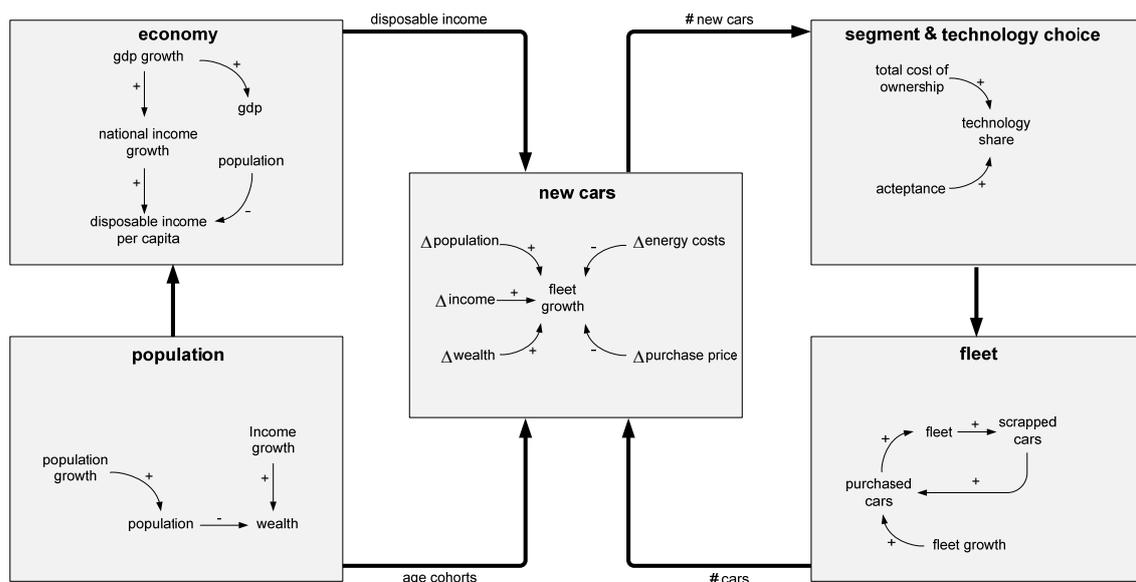


Abbildung 2–1: Grobstruktur von GLOMO (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

2.1 Das Wirtschafts-Modul (economy)

Hauptbestandteil des Wirtschafts-Moduls in GLOMO ist die Berechnung des Bruttoinlandprodukts BIP (*engl. Gross Domestic Product, GDP*) pro Einwohner, welches auf den Prognosen der Weltbank und einer sich darauf beziehenden Studie von PwC (Hawksworth und Tiwari 2011) basiert. Die zugehörige Datengrundlage wird über eine VBA-Schnittstelle aus MS Excel extern eingelesen. Gemäß den Gesetzen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung beeinflusst die Veränderung des BIP das Einkommen der privaten Haushalte und deren Konsum. Das wesentliche Ergebnis des Wirtschafts-Moduls ist die Entwicklung des für den Konsum der Haushalte zur Verfügung stehenden Einkommens (*disposable income per capita*). Dieses ist abhängig von der Ersparnis der Haushalte und kann sich über die Zeit verändern (vgl. Abbildung 2–2) (Rothengatter und Schaffer 2006, S. 31 ff).

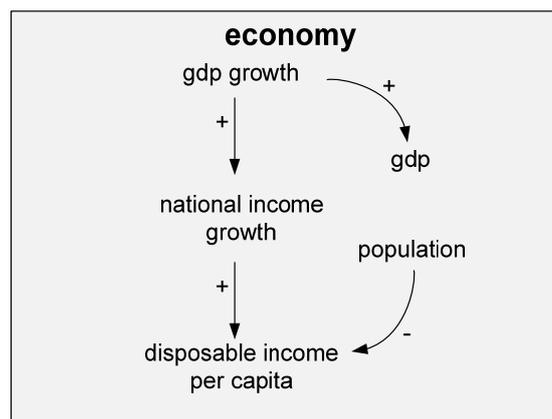


Abbildung 2–2: Das Wirtschafts-Modul (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

2.2 Das Bevölkerungs-Modul (population)

Das zweite Modul innerhalb von GLOMO ist das Bevölkerungs-Modul (vgl. Abbildung 2-3). Es liefert die mit der Zeit veränderliche Verteilung der Bevölkerung auf unterschiedliche Altersgruppen. Die hierfür benötigten Daten entstammen einer Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung bis zum Jahr 2300 der Vereinten Nationen (United Nations 2004) und werden ebenfalls über die VBA-Schnittstelle in GLOMO eingelesen. Zusätzlich wird innerhalb des Moduls eine Unterscheidung zwischen jenem Anteil der Bevölkerung getroffen, dessen Vermögensverhältnisse den Kauf eines PKW erlauben und dem Anteil, dessen Vermögen dies ausschließt. Dieser Aspekt wird durch Hinzuziehen des für Konsum zur Verfügung stehenden Einkommens aus dem Wirtschafts-Modul berücksichtigt.

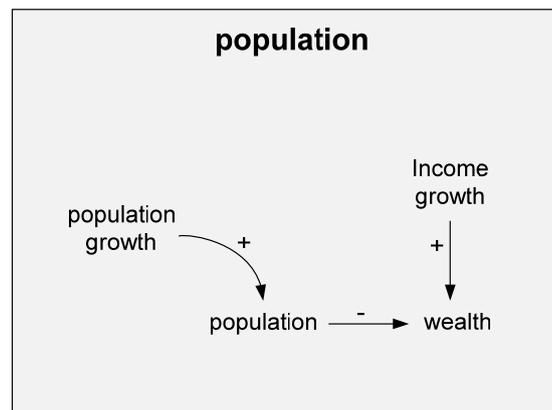


Abbildung 2–3: Das Bevölkerungs-Modul (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

2.3 Das Flotten-Wachstums-Modul (car fleet growth)

Das Flotten-Wachstums-Modul gestaltet sich im Vergleich zu den ersten beiden vorgestellten Modulen als relativ komplex. In das Modul fließen sowohl die Ergebnisse des Wirtschafts-Moduls als auch des Bevölkerungs-Moduls mit ein (vgl. Abbildung 2-4). Ziel des Moduls ist die Berechnung des Flottenwachstums. Da sowohl Einflussfaktoren existieren, die das Wachstum der Flotte positiv beeinflussen, als auch Faktoren, die einen negativen Einfluss auf die Entwicklung ausüben, ist eine möglichst realitätsnahe Gewichtung aller Einflussfaktoren notwendig. Diese Gewichtung wurde in GLOMO durch die Kalibrierung des Modells anhand von historischen Daten umgesetzt. Positive Auswirkungen auf das Flottenwachstum haben steigende Bevölkerungs-, Einkommens- und Vermögensentwicklung, negativ wirken sich steigende Energiekosten und steigende PKW-Verkaufspreise aus.

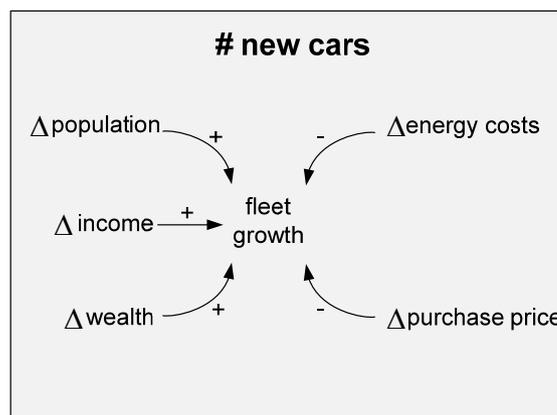


Abbildung 2–4: Das Flotten-Wachstums-Modul (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

Die beiden Faktoren Energiekosten und PKW-Verkaufspreis spielen innerhalb des Moduls eine besondere Rolle, weshalb im Folgenden näher auf die zugehörigen Feedbackloops eingegangen wird. Abbildung 2–5 zeigt den Zusammenhang zwischen Fahrzeugbestand und Energieverbrauch. Dabei führt ein höherer Fahrzeugbestand zu einem steigenden Gesamtenergieverbrauch, der eine Verknappung des Energieangebots und somit steigende Energiepreise zur Folge hat. Höhere Energiepreise wiederum bremsen die Nachfrage nach neuen PKW und der Fahrzeugbestand wird einem negativen Einfluss ausgesetzt.

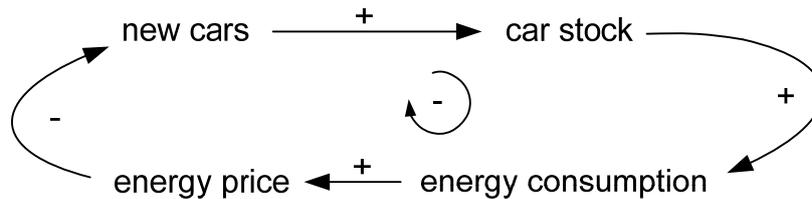


Abbildung 2–5: Feedbackloop zur Berücksichtigung der Energiekosten (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

Analog gilt für eine steigende Nachfrage nach PKW ein Anstieg der PKW-Verkaufspreise (vgl. Abbildung 2–6 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Je höher die Nachfrage, desto wahrscheinlicher ist das Auftreten von Produktionsengpässen. Die entstehende Knappheit auf dem PKW-Markt führt zu höheren Verkaufspreisen, die wiederum ein Abschwächen der Nachfrage zur Folge haben.

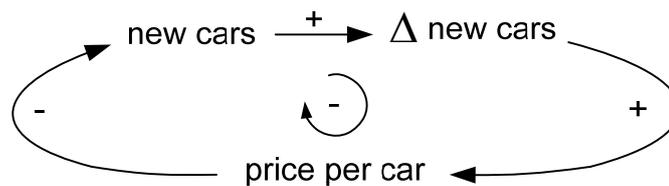


Abbildung 2–6: Feedbackloop zur Berücksichtigung der PKW-Verkaufspreise (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

2.4 Das Fahrzeugflotten-Modul (car fleet)

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Modulen, welche durch ihre Flussvariablen geprägt werden, handelt es sich beim Fahrzeugflotten-Modul um ein klassisches Bestandsmodell. Der Fahrzeugbestand wird durch eine Bestandsvariable mit einem Zufluss durch verkaufte und einem Abfluss durch verschrotete Fahrzeuge realisiert. Die Verweildauer der Fahrzeuge innerhalb des Bestandes basiert auf deren Lebensdauervertelung, die dem Jahresbericht des Verbandes der Automobilindustrie (VDA 2011) entnommen wurde. Eine vereinfachte Darstellung des Moduls mit der in VENSIM verwendeten Symbolik zeigt Abbildung 2–7.

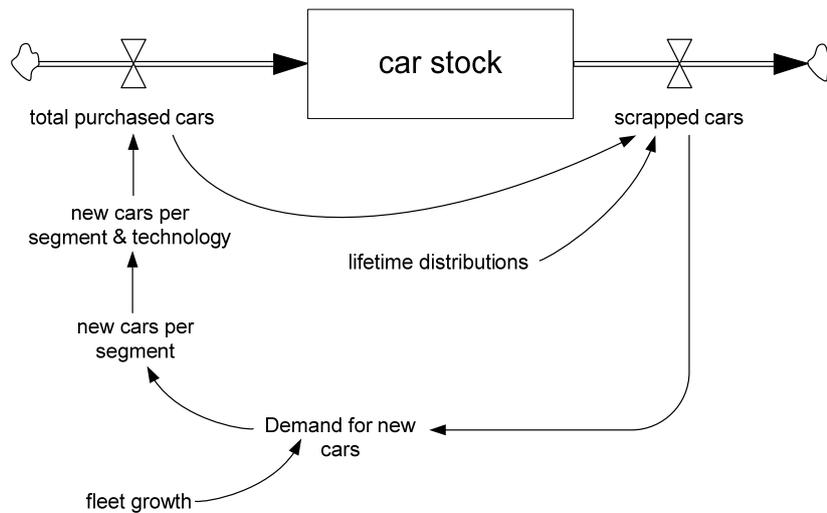


Abbildung 2–7: Vereinfachte Darstellung des Fahrzeugflotten-Moduls in Vensim (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

2.5 Das Segment- und Technologiewahl-Modul (segment and technology choice)

Die Segment- und Technologiewahl innerhalb von GLOMO besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Der Wahl des PKW-Größensegments liegt eine relativ einfache, konstante Verteilungsfunktion aus der Literatur (Frost & Sullivan 2009) zugrunde. Vereinfacht wird außerdem davon ausgegangen, dass Erstkäufer in den unteren beiden PKW-Segmenten in den Markt ein- und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, abhängig von ihrem Einkommenswachstum, innerhalb der Segmente auf- oder absteigen. Die im Modell verwendeten Größensegmente unterscheiden sich in ihrer Verfügbarkeit nach Antriebstechnologien. Einen Überblick liefert Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: In GLOMO verwendete PKW-Größensegmente und deren Verfügbarkeit je Antriebstechnologie

Gruppe	ICE-D	ICE-G	ICE-CNG	Hybrid	PHEV	BEV	FCEV
Basic	X	X	X	X	---	X	---
Small	X	X	X	X	X	X	---
Medium	X	X	X	X	X	X	X
Luxury	X	X	X	X	X	X	X

Komplexer gestaltet sich das Modul der Technologiewahl. Dieses hat eine große Bedeutung bei der Beurteilung des Einflusses von Veränderungen in der Batterietechnologie oder der Verfügbarkeit von Batterierohstoffen. Da nicht jede Batterietechnologie in jedem Fahrzeugsegment verfügbar ist, baut die Technologie- auf der Segmentwahl auf. Der Zusammenhang von Kosten und Akzeptanz bei der Technologiewahl ist vereinfacht in Abbildung 2–8 dargestellt.

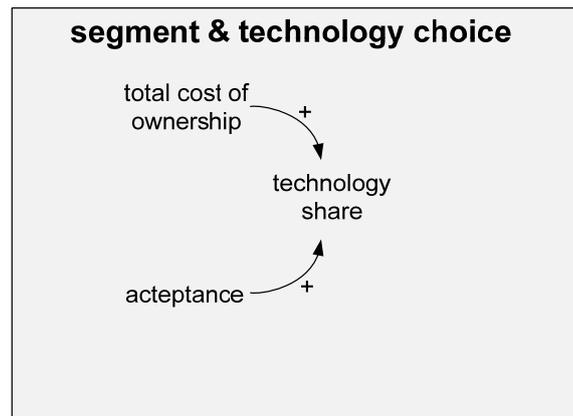


Abbildung 2–8: Das Segment- und Technologiewahl-Modul (eigene Darstellung nach Kühn und Glöser 2013)

Für die weitere Betrachtung der Entscheidungsfindung beim Kauf einer gewissen Fahrzeugtechnologie sind einige Erklärungen zu den volkswirtschaftlichen Grundlagen der neoklassischen Theorie erforderlich. Demnach handelt der Käufer als „Homo Oeconomicus“ streng nutzenbasiert. Zur Feststellung des Nutzens zieht er ökonomische Faktoren heran und vergleicht die ihm entstehenden Kosten der einen Alternative mit den Kosten der anderen. Sein Ziel ist eine rein nutzenbasierte Entscheidung, wobei er sich für die Alternative entscheidet, die ihm den messbar größten Nutzen einbringt (Rothengatter und Schaffer 2006, S. 83). Sämtliche Kosten fließen als negativer Nutzen in die Entscheidung mit ein. Der Nutzen einer Alternative kann als Summe des Nutzens einer konstanten Nutzenfunktion und eines Störfaktors, der den Faktor Unsicherheit berücksichtigen soll, formuliert werden (2.1) (Kühn und Glöser 2013, Varian 1999, S. 50 ff).

$$U = v(x) + \varepsilon \quad (2.1)$$

$$U = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.2)$$

wobei

$x_1 \dots x_n$ = Attribute

$\beta_1 \dots \beta_n$ = Nutzenkoeffizienten

α = Startparameter

ε = Störfaktor

Die Nutzenfunktion selbst kann in einen Startparameter und beliebig viele Attribute mit ihren zugehörigen Nutzenkoeffizienten zerlegt werden (2.2). Art und Anzahl der Attribute können variieren, so dass unterschiedliche Fahrzeugtechnologien durch unterschiedliche Nutzenfunktionen mit eigenen Attributen und Nutzenkoeffizienten beschrieben werden können. Um neben dem auf quantitativen Werten basierenden Nutzerverhalten auch qualitative Einflussfaktoren einbeziehen zu können, wurden Technologieakzeptanzfaktoren als zusätzliches Attribut eingefügt. Diese unterscheiden sich je nach Antriebstechnologie und Nationalität der Nutzer und sind über die Zeit veränderlich. Dies berücksichtigt die Annahme, dass alternative Antriebe derzeit noch hohen Vorbehalten seitens der Nutzer ausgesetzt sind, diese mit der Zeit jedoch abgebaut werden können.

Wie bereits erwähnt, agiert der Käufer in GLOMO als „Homo Oeconomicus“. Er entscheidet sich also genau dann für eine Alternative i gegenüber einer Alternative j , wenn i den höheren Nutzen mit sich bringt. Die Wahrscheinlichkeit, dass er sich für eine Alternative entscheidet, entspricht somit der Wahrscheinlichkeit, mit der er einen höheren Nutzen erzielt (2.3) (Varian 1999, S. 52).

$$P(i) = P(v_i > v_j) \quad (2.3)$$

wobei

v_i, v_j = Nutzenfunktion der Alternativen i, j

Basierend auf den einzelnen Nutzenfunktionen und unter impliziter Berücksichtigung des Störfaktors ε lässt sich Gleichung (2.4) aufstellen, die auch als Logit-Model bekannt ist und zu den bedeutendsten diskreten Entscheidungsmodellen gehört. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit $P(i)$, mit der ein Nutzer sich für eine Alternative i entscheidet und wird unter anderem in der Verkehrsmodellierung angewandt. Unter Berücksichtigung von Zeit und Kosten, die je Verkehrsmittel zum Erreichen eines bestimmten Ziels innerhalb eines Verkehrssystems benötigt werden, liefert die Gleichung den sogenannten *modal split*, der Aus-

kunft darüber gibt, welcher Anteil der Bevölkerung auf welches Verkehrsmittel zurückgreift (De Dios Ortúzar und Willumsen 2006, S. 219 ff).

$$P(i) = \frac{e^{v_i}}{\sum_{j=1}^n e^{v_j}} \quad (2.4)$$

wobei

$v_1 \dots v_n =$ Nutzenfunktion der Alternativen 1 – n

Durch Überführung der Nutzenfunktion in die Logit-Funktion wird der Vergleich einer Option mit allen weiteren Alternativen ermöglicht und der zugehörige Nutzen in einen Wahrscheinlichkeitswert zwischen 0 und 1 transformiert. Charakteristisch für die Funktion ist ein S-förmiger Verlauf der zugehörigen Grafik.

Um sämtliche relevanten und eingangs erwähnten Kosten bei der Berechnung des Nutzens zu berücksichtigen, wird zur Berechnung der Vollkosten pro Fahrzeugkilometer je Fahrzeugtechnologie (C_i) Gleichung (2.5) angewandt.

$$C_i = kC_i + lC_i \quad (2.5)$$

wobei

C = Gesamtkosten pro FzgKm

kC = Anschaffungskosten pro FzgKm

lC = Kraftstoffkosten pro FzgKm

i = Index der unterschiedlichen Technologien

Die Vollkosten für den Kauf eines PKW errechnen sich demnach aus den Anschaffungs- und Treibstoffkosten abhängig von der gewählten Fahrzeugtechnologie. Vor allem die Anschaffungskosten unterscheiden sich dabei zum Teil deutlich. So liegt der Listenpreis eines BMW i3 mit Range Extender knapp 13 % über dem Listenpreis eines sonst identischen BMW i3 mit rein elektrischem Antrieb⁴. Auch der Unterschied zwischen vergleichbaren Fahrzeugen des Typs BMW 3er mit konventionellem und hybridem Antrieb bewegt sich mit 14 % in dieser Größenordnung⁵. Der zweite wesentliche Kostentreiber sind die Kraftstoffkosten, die wiederum von der Technologiewahl abhängen und vor allem beim Vergleich von Elektrizität und Flüssigbrennstoffen, aber auch im internationalen Vergleich große Unterschiede aufweisen. Eine dritte mögliche Kostenart

⁴ Listenpreis BMW i3 E-Motor (125 kW): 34.950 EUR; Listenpreis BMW i3 Range Extender (125 kW): 39.450 EUR (alle Preise inkl. 19 % MwSt) (BMW AG 2013a).

⁵ Listenpreis BMW 335i (225 kW, 8-Gang Automatikgetriebe): 46.200 EUR; Listenpreis ActiveHybrid 3 (250 kW, 8-Gang Automatikgetriebe): 52.850 EUR (BMW AG 2013b).

sind fiskalpolitische Kosten wie Steuern, Zoll oder CO₂-Abgaben, aber auch finanzielle Anreize und Subventionen beim Kauf einer bestimmten Technologie. Diese sind jedoch nur schwer zu prognostizieren und unterliegen vor allem ständigen Schwankungen, abhängig vom politischen Klima, das zum jeweiligen Zeitpunkt in einem bestimmten Land vorherrscht. Aus diesem Grund werden solche Einflussfaktoren derzeit nicht berücksichtigt. GLOMO bietet jedoch theoretisch die Möglichkeit, diesen Aspekt in die Technologiewahl mit aufzunehmen. Eine Erweiterung um entsprechendes Datenmaterial wäre denkbar und für die weitere Betrachtung des Themas außerhalb der vorliegenden Arbeit von Interesse.

Werden nun alle zu berücksichtigenden Kosten als negativen Nutzen aufgefasst und diese mit der die Entscheidung simulierenden Logit-Funktion kombiniert, so erhält man Formel (2.6), welche die Grundlage der Technologiewahl in GLOMO darstellt.

$$P_j = \frac{\exp(-\beta_i \cdot (\lambda_i \cdot C_i + \varepsilon_i))}{\sum_j \exp(-\beta_i \cdot (\lambda_i \cdot C_i + \varepsilon_i))} \quad (2.6)$$

wobei

P = Anteil neu registrierter Fahrzeuge je Technologie

C = Gesamtkosten pro FzgKm

λ = Faktor λ

β = Logit Faktor Beta

ε = Störfaktor

i = Index der unterschiedlichen Technologien

Ergebnis der Berechnung ist der Anteil einer bestimmten Fahrzeugtechnologie an der Gesamtmenge neuzugelassener Fahrzeuge, welcher im weiteren Verlauf im bereits beschriebenen Fahrzeugflottenmodell weiter nach Ländern und Segmenten unterteilt wird.

Neben der Logit-Theorie als Teil der Nutzenbasierten Entscheidungstheorie hat die Lernkurventheorie als weitere ökonomische Grundtheorie großen Anteil an den Berechnungen in GLOMO. Die Theorie entstammt aus der Berechnung der Kosten in der Flugzeugproduktion und beschreibt den Einfluss des Lernprozesses auf die Stückkosten bei steigender Anzahl produzierter Einheiten. Der Theorie zufolge nehmen diese mit steigender Produktivität ab (Wright 1936). Gleichung (2.7) stellt den mathematischen Zusammenhang aus Stückkosten und Gesamtanzahl produzierter Einheiten dar.

$$y = \frac{a}{x^b} = a \cdot x^{-b} \quad (2.7)$$

wobei

y = *Durchschnittliche Produktionskosten für die xte produzierte Einheit*

a = *Kosten für die erste produzierte Einheit*

x = *Anzahl produzierter Einheiten*

b = *Degressionsfaktor*

Zu berücksichtigen ist, dass die Berechnungen Wrights einen idealisierten Prozess beschreiben. In der Realität unterscheidet sich der Einfluss des Lernprozesses auf den Gesamtprozess und somit auf die Kostenentwicklung von Fall zu Fall. Die Berücksichtigung des Lernprozesses ist jedoch insofern von Bedeutung, da davon auszugehen ist, dass die zukünftigen Anschaffungskosten von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben abnehmen werden (Cannata und Jahrow 2012; Romm 2006). Gleichzeitig steht jedoch ein durch Effizienzsteigerungen in der Antriebstechnologie abnehmender Kraftstoffverbrauch steigenden Rohstoffpreisen aufgrund abnehmender Rohstoffressourcen gegenüber.

Eine weitere Berücksichtigung der Lernkurventheorie betrifft die Entwicklung der Batterietechnologien als Energiespeicher in BEVs, PHEVs und Hybriden. Der Erfolg der Elektromobilität hängt in großem Maße mit der technologischen Entwicklung im Batteriesektor zusammen (Döring und Aigner 2011). Größen- und Gewichtsreduktion mit damit einhergehender Kostenreduktion sowie Effizienzsteigerungen sind die Grundlage dafür, Elektromobilität gegenüber herkömmlichen Antrieben konkurrenzfähig zu machen. Aus diesem Grund simuliert GLOMO zusätzlich die Entwicklung im Bereich der Batterietechnologien. Dies geschieht durch Berücksichtigung der Kosten für die Tanktechnologie in PKW im Allgemeinen. Während diese bei konventionellen Antrieben stagnieren, wird bei alternativen Antrieben gemäß der Lernkurventheorie von einer Kostendegression ausgegangen.

Zusammenfassend besteht GLOMO aus zwei wesentlichen Teilbereichen. Der erste Teil dient der Modellierung des nutzenbasierten Entscheidungsprozesses der Konsumenten. Anschaffungs- und Kraftstoffkosten werden darin ebenso berücksichtigt wie die fortschreitende technologische Entwicklung im Bereich der alternativen Antriebe. Der zweite Teil des Modells stellt die Entwicklung des Fahrzeugbestandes im Gesamten dar. Hier fließen ökonomische und demografische Entwicklungen in das Modell mit ein. Der in der Simulation betrachtete Zeithorizont reicht bis in das Jahr 2030. Von einer Betrachtung über diesen Zeitpunkt hinaus wird aufgrund zunehmender Unsicherheiten in der Prognose,

nicht zuletzt aufgrund der Annahme, dass bis dahin auch Brennstoffzellenfahrzeuge ihre endgültige Marktreife erlangt haben (Wallentowitz et al. 2010, S. 68), abgesehen.

Die Kalibrierung des Modells erfolgte auf den für die Vergangenheit verfügbaren Daten. Die bisher begrenzte Erfahrung im Bereich alternativer Antriebe und die daraus resultierende eingeschränkte Datenverfügbarkeit bringen einen gewissen Unsicherheitsfaktor in der Simulation mit sich. Eine im Verlauf der Zeit wachsende Erfahrung mit den entsprechenden Technologien dürfte zu umfangreicherem Datenmaterial und eine erneute Kalibrierung somit zu genaueren Prognosen führen.

3 Ergebnisse

Durch starkes Bevölkerungs- und Einkommenswachstum werden die jährlichen Neuzulassungen bis 2030 deutlich ansteigen. Bis dahin wird der weltweite Absatzmarkt auf etwa 120 Millionen jährlich verkaufte Einheiten anwachsen. Bedingt durch unterschiedliche Bevölkerungsentwicklungen (Wachstum in den BRICS-Ländern, Stagnation in den USA sowie ein Rückgang in der EU) verändert sich auch die regionale Gewichtung der Absatzmärkte deutlich. Tabelle 3-1 stellt die Aufteilung der weltweiten Neuzulassungen auf die einzelnen Ländern und Regionen im zeitlichen Verlauf dar. Der chinesische Markt wird den weltweiten Absatzmarkt demnach ab 2020 deutlich dominieren.

Tabelle 3-1: Anteile an den weltweiten Neuzulassungen (Modellergebnisse)⁶

Land	2005	2015	2020	2025	2030
USA	30%	20%	19%	18%	16%
Japan	9%	6%	6%	5%	4%
Südkorea	2%	2%	2%	1%	1%
Südafrika	0%	0%	1%	1%	1%
Brasilien	1%	6%	7%	8%	10%
Indien	2%	6%	7%	8%	9%
China	5%	22%	27%	28%	32%
Russland	3%	4%	4%	3%	2%
EU	35%	22%	17%	15%	12%

In GLOMO wird zwischen zwei Szenarien unterschieden, die eine unterschiedliche Entwicklung der alternativen Antriebe berücksichtigen. Szenario 1 geht von einer pessimistischen Entwicklung, insbesondere der batterieelektrisch betriebenen Antriebe aus. Sowohl die Fahrzeuganschaffungskosten, als auch die technologische Entwicklung der Antriebe stagnieren dabei nahe dem heutigen Niveau. Auch ein zu geringer Ausbau der Versorgungsinfrastruktur für elektrisch betriebene Fahrzeuge wirkt sich negativ auf den Erfolg alternativer Antriebe

⁶ Differenz zu 100%: restliche weltweiten PKW-Verkäufe

aus. Lediglich die derzeit bereits zu gewissen Anteilen im Markt befindlichen Hybridantriebe werden sich behaupten können und ihren Marktanteil bis zum Jahr 2030 auf rund 15 % ausbauen.

Szenario 2 geht dagegen von einer starken Marktdurchdringung sämtlicher Antriebskonzepte aus, wobei die Entwicklung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb sich erst zeitlich versetzt ab dem Jahr 2025 auf den Markt auswirkt. Grundlage für dieses Szenario ist eine optimale wirtschaftliche und politische Förderung alternativer Antriebe, so dass bis zum Jahr 2030 der Anteil konventioneller Antriebe auf unter 60 % zurückgeht (vgl. Abbildung 2-9).

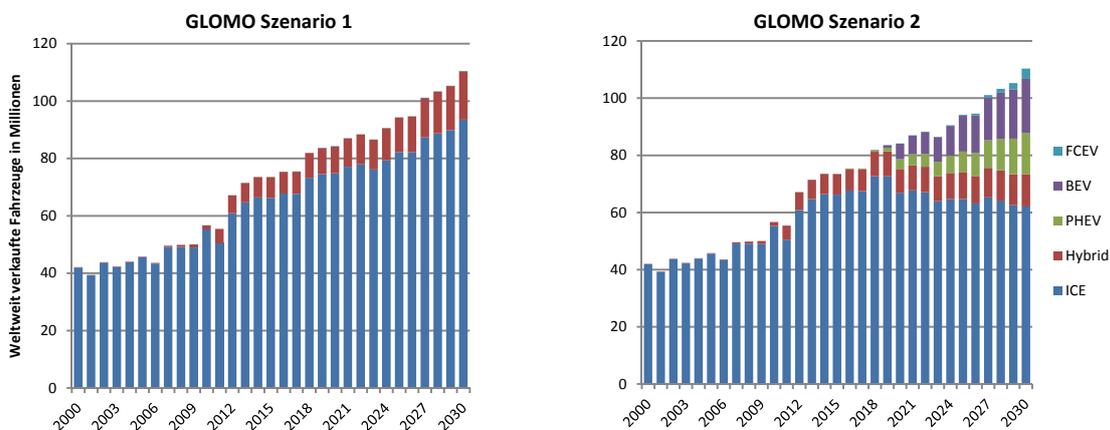


Abbildung 2-9: Szenarien der Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien in GLOMO

Beide Szenarien werden durch die wachsende Bedeutung der BRICS-Märkte beeinflusst. Während die Absatzzahlen in den TRIADE-Staaten kaum anwachsen, ist in den Schwellenländern ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Insbesondere China und Indien verfügen dabei über ein großes Potential an Erstkäufern, bei denen von einer größeren Akzeptanz gegenüber alternativen Antrieben auszugehen ist. Indien wird zudem von einem relativ hohen Anteil an verkauften Fahrzeugen der Kategorie basic und small beeinflusst, die für eine Elektrifizierung des Antriebes besonders geeignet sind. In Brasilien existiert hingegen mit der als *Flexible Fuel Vehicles*⁷ bezeichneten Antriebstechnologie eine weitere Besonderheit, die implizit in der Gruppe der konventionellen Verbrennungsmotoren berücksichtigt wird, jedoch die Verbreitung alternativer Antriebe in diesem Land hemmt.

⁷ Konventioneller Verbrennungsmotor, der mit Benzin, Methanol und Ethanol, sowie jeder beliebigen Mischung dieser drei Kraftstoffe betrieben werden kann.

4 Fazit

Während in den vergangenen Jahren der Fokus der Neuzulassungen besonders auf den TRIADE-Märkten lag, werden zukünftig die BRICS-Länder die Anzahl der weltweit verkauften Pkw dominieren. Interessant ist diese Entwicklung im Besonderen für die exportorientierte deutsche Automobilindustrie. Neben dem durch extremes Wachstum getriebenen chinesischen Markt, könnten Brasilien und die USA auch in der Zukunft absatzstarke Märkte darstellen. Stark steigende Motorisierungsraten werden die weltweiten Neuzulassungen bis 2030 auf etwa 120 Millionen Fahrzeuge pro Jahr anwachsen lassen. Verglichen mit derzeitigen Zulassungszahlen wäre dies nahezu eine Verdopplung.

Geht man von einem deutlichen technologischen Fortschritt aus (Szenario 2), so können alternative Antriebskonzepte bis 2030 etwa 1/3 der gesamten weltweiten Neuzulassungen ausmachen. Technologiefördernde Politikmaßnahmen wie in China und den USA derzeit geplant und schon umgesetzt, beschleunigen diese Diffusion erheblich. Während in China die Anteile der alternativen Antriebstechnologien ähnliche Höhen wie auf Europäischen Absatzmärkten erreichen werden, scheinen in Brasilien, Russland und Indien mittelfristig konventionelle Antriebstechnologien zu dominieren.

Anhang

A.1 Batteriegrößen

Tabelle A.1.1: Batteriegrößen nach Antriebstechnologie und Größensegment in kWh. Quelle: eigene Zusammenstellung nach (Plötz et al. 2013; ADAC 2013)

Gruppe	ICE-D	ICE-G	ICE-CNG	Hybrid	PHEV	BEV	FCEV
Basic	0	0	0	1.5	0	15	0
Small	0	0	0	1.5	10	20	0
Medium	0	0	0	1.5	13	34	0
Luxury	0	0	0	1.5	16	73	0

Literaturverzeichnis

- ADAC (2013): Elektroautos: Marktübersicht/Kenndaten (2013). Online verfügbar unter http://www.adac.de/_mmm/pdf/27373_46583.pdf, zuletzt geprüft am 11.12.2013.
- BMW AG (2013a): Der neue BMW i3. Preisliste. Produktbroschüre. BMW AG. München.
- BMW AG (2013b): Die BMW 3er Limousine. Preisliste. Produktbroschüre. BMW AG. München.
- Cannata, Mario; Jahrow, Holger (2012): Design of Electric Vehicles with Reduced Background Noise. In: *ATZ worldwide*, 114(7), S. 26–29.
- De Dios Ortúzar, Juan; Willumsen, Luis G. (2006): Modelling transport. 3. ed., reprint. 2006. Chichester: Wiley.
- Döring, Thomas; Aigner, Birgit (2011): E-mobility: realistic vision or hype. An economic analysis. In: *Przeгляд Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 87(3), S. 37-40. Online verfügbar unter <http://pe.org.pl/articles/2011/3/10.pdf>, zuletzt geprüft am 10.02.2014.
- Frost & Sullivan (2009): Strategic Review of Chinese Passenger Car Market in 2008. Frost & Sullivan Ltd. Mountain View, USA.
- Hawksworth, John; Tiwarin, Anmol (2011): The World in 2050. The accelerating shift of global economic power: challenges and opportunities. London: PwC.
- Kühn, André; Glöser, Simon (2012): System-based feedback analysis of e-mobility diffusion in China. Proceeding of the 30th International Conference of the System Dynamics Society. St. Gallen.
- Kühn, André; Glöser, Simon (2013): The Influence of Potential Raw Material Shortages on the Market Penetration of Alternative Drives. Proceeding of the 15th World Conference on Transport Research (WCTR). Rio De Janeiro.
- Papula, Lothar (2003): Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Mit Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel. 8., durchges. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (Studium).

- Plötz, Patrick; Gnann, Till; Kühn, André; Wietschel, Martin (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Romm, Joseph (2006): The car and fuel of the future. In: Energy Policy 34 (17), S. 2609–2614.
- Rothengatter, Werner; Schaffer, Axel (2006): Makro kompakt. Grundzüge der Makroökonomik. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg (Physica-Lehrbuch).
- Schade, Wolfgang; Zanker, Wolfgang; Kühn, André; Kinkel, Steffen; Jäger, Angela; Hettesheimer, Tim; Schmall, Thomas (2012): Arbeitsbericht Nr.152 - Zukunft der Automobilindustrie. Hg. v. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).
- United Nations (2004): World Population to 2300. New York: United Nations.
- Varian, Hal R. (1999): Grundzüge der Mikroökonomik. 4., überarb. und erw. Aufl. München, Wien: R. Oldenbourg.
- Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) (2011): Jahresbericht 2011. Berlin.
- Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt; Olschewski, Ingo (2010): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Wright, T. P. (1936): Factors Affecting the Cost of Airplanes. In: *Journal of the Aeronautical Sciences (Institute of the Aeronautical Sciences)*, 3(4), S. 122–128.



Autoren

André Kühn

Patrick Novinsky

Wolfgang Schade

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI),
Karlsruhe

Kontakt: André Kühn

Fraunhofer Institut für System- und
Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)

Breslauer Straße 48

76139 Karlsruhe

Germany

Tel.: +49 / 721 / 6809-467

Fax: +49 / 721 / 6809-135

E-Mail: andre.kuehn@isi.fraunhofer.de

URL: www.isi.fraunhofer.de

Karlsruhe 2014