

# Modellierung autonomer Fahrzeuge durch veränderte Verkehrsmittelwahlparameter – Fallbeispiel Karlsruhe-Oststadt

Gabriel Wilkes<sup>1\*</sup>, Eckhard Szimba<sup>2</sup>, Martin Kagerbauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen (IFV), Karlsruhe, Deutschland,*

<sup>2</sup> *Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Volkswirtschaftslehre (ECON), Karlsruhe, Deutschland*

\* *Corresponding author: gabriel.wilkes@kit.edu*

## Kurzfassung

Autonomes Fahren ist eine der zentralen Entwicklungen im Verkehr. In der vorliegenden Untersuchung werden die direkten ökonomischen Auswirkungen des autonomen Fahrens – geringere Nutzerkosten und geringerer Value of Time (VoT) für bestimmte Wegezwecke – als Parameteranpassungen in ein mikroskopisches und agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell des Planungsraums Karlsruhe-Oststadt eingefügt. Als Ergebnis zeigt sich, dass unter der Annahme, dass sich die Nutzerkosten durch die Automatisierung um 3,1% verringern und der VoT um 30% abnimmt, die Anzahl durchgeführter Pkw-Fahrten um ca. 2,5% steigt. Die Ergebnisse werden inhaltlich und methodisch diskutiert. Für die Abbildung komplexerer Eigenschaften und Wirkungen des autonomen Fahrens ist weitergehende Forschung erforderlich, gleichwohl zeigt sich, dass das Modell grundsätzlich zur Bearbeitung der Fragestellung geeignet ist.

## 1 Hintergrund und Fragestellung

Die Vorstellung selbstfahrender Straßenfahrzeuge ist eine der am meisten diskutierten Visionen im Verkehr. Automobilhersteller stellen immer wieder Konzeptfahrzeuge vor (z. B. Volvo 360c, BMW iNEXT), in denen keine Person mehr aktiv fahren muss, sondern sich die Insassen vom Fahrzeug fahren lassen können und sich anderen Tätigkeiten widmen können. Die Entwicklung rückt allmählich näher an die Realität, fahrerlose Systeme werden bereits in den USA in Piloten getestet (z. B. waymo) und werden auch in Deutschland konkreter (z. B. MOIA AD, Mercedes Drive Pilot). Da die Zeit im Fahrzeug durch

andere Tätigkeiten „aktiv“ genutzt werden kann, kann das Fahren im Auto attraktiver werden, als es aktuell ist. Hierdurch kann sich durch autonome Fahrzeuge auch die Verkehrsnachfrage verändern.

Im folgenden Beitrag wird mit Anpassungen eines bestehenden Verkehrsnachfragemodells untersucht, welche Auswirkungen autonomes Fahren (Level 5 nach der Definition von SAE, 2021) auf die Verkehrsnachfrage hat. Als Grundlage dafür wird in einer ökonomisch-orientierten Analyse abgeschätzt, wie sich die Parameter eines Verkehrsmittelwahlmodells ändern müssen, um autonome Personenkraftwagen (Pkw) abzubilden. Die Simulationsergebnisse werden dargestellt und diskutiert, abschließend wird ein Fazit gezogen.

## 2 Methodik

### 2.1 Verkehrsnachfragemodellierung mit mobiTopp

Verkehrsnachfragemodelle bilden den Verkehr eines definierten Raums ab. Auf dieser Grundlage können die Auswirkungen eines veränderten Verkehrsangebots vor der Umsetzung von Maßnahmen ermittelt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird das Verkehrsnachfragemodell mobiTopp verwendet (Mallig et al., 2013; Mallig et al., 2017). mobiTopp ist ein agentenbasiertes (Bonabeau, 2002) mikroskopisches Verkehrsnachfragemodell, das jede Person, jeden Haushalt und jeden Pkw des Planungsraums modelliert. Personen sind als selbstständig agierende Agenten repräsentiert, welche Entscheidungen individuell und situationsabhängig basierend auf den aktuellen Gegebenheiten und ihrer soziodemographischen Eigenschaften treffen.

In mobiTopp werden im Sinne des 4-Stufen-Prozesses der Verkehrsplanung die Schritte Verkehrserzeugung, Zielwahl und Verkehrsmittelwahl simuliert (siehe Abbildung 2.1). Hierzu werden jeweils unterschiedliche Teilmodelle eingesetzt. Die Simulation läuft chronologisch für den zu simulierenden Zeitraum ab (z.B. von Montag 0:00 Uhr bis Sonntag 23:59 Uhr). Die Agenten, die zum jeweiligen Simulationszeitpunkt eine Aktivität beenden, entscheiden anschließend sequenziell das Ziel und das Verkehrsmittel zum Erreichen der folgenden Aktivität. In mobiTopp werden derzeit 28 unterschiedliche Aktivitäten differenziert. Somit modelliert mobiTopp alle Wege und Aktivitäten aller Personen im Planungsraum minutenfein über eine ganze Woche mit allen genutzten Verkehrsmitteln. Dabei werden unter anderem die Verkehrsmittel des ÖV, Carsharing, Bikesharing, Ridepooling, Pkw (fahrend und mitfahrend), Fahrrad und zu Fuß Gehen berücksichtigt.

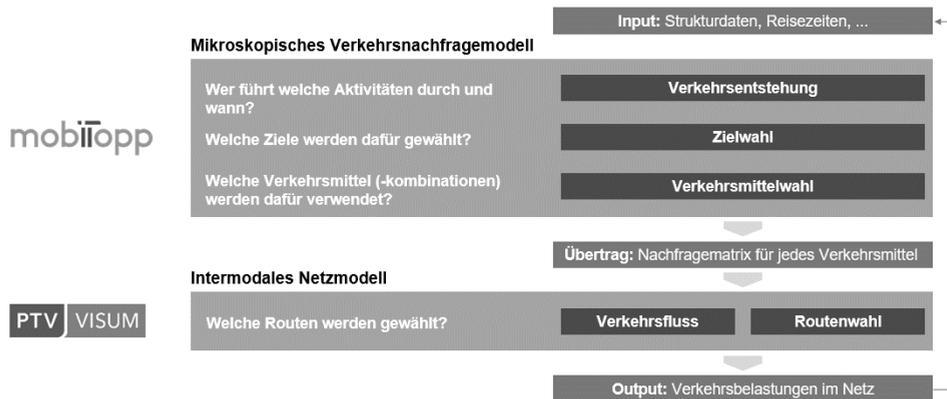


Abbildung 2.1: Ablauf der Verkehrsnachfragemodellierung mit mobiTopp

Von großer Bedeutung für diese Studie ist das Teilmodell der Verkehrsmittelwahl. Die Verkehrsmittelwahl in mobiTopp basiert auf der Theorie der Nutzenmaximierung in Verbindung mit einer Auswahlfunktion. Es wird der Nutzen aller zur Verfügung stehenden Alternativen berechnet. Damit können die zum entsprechenden Zeitpunkt dem Agenten zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel, die zur entsprechenden Quelle-Ziel-Beziehung vorliegenden Eigenschaften der Alternativen (Zeit, Kosten) sowie die soziodemographischen Eigenschaften des Agenten bei der Verkehrsmittelwahl zugrunde gelegt werden. Die Verfügbarkeit wird je nach Modus unterschiedlich eingeschränkt – insbesondere stehen Pkw nur solchen Personen zur Verfügung, die erstens einen Führerschein besitzen (Personen-Eigenschaft), und zweitens einem Haushalt angehören, in dem mindestens ein Pkw zur Verfügung steht (Haushalts-Eigenschaft). Dieser kann dabei auch nur von einem Haushaltsmitglied gleichzeitig als Fahrer verwendet werden.

Für alle zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel wird deren Nutzen bzw. Eignung zum Durchführen des entsprechenden Weges mittels einer Nutzenfunktion bewertet. Deren Bewertungsparameter wurden auf Basis von regionalem, beobachtetem Verkehrsverhalten ermittelt und können daher vergleichbares Verhalten wiedergeben. Bewertet werden unter anderem die Qualitätsstufe des Verkehrsmittels (Reisezeit, Kosten, Umstiege, ...), besondere Rahmenbedingungen (Topographie, Parksituation, bisherige Nutzung eines Verkehrsmittels, ...), die Verkehrsmittel generell in Abhängigkeit persönlicher Eigenschaften (Alter, Tätigkeitsstatus, Einkommen, Wohnort, ...) und die Eignung für die Nutzung zu einem bestimmten Zweck.

## 2.2 Verwendetes Verkehrsmodell

Im Rahmen dieser Studie wurde ein mobiTopp-Modell der Region Karlsruhe verwendet (Wörle et al., 2021; Regionalverband Mittlerer Oberrhein, 2021). In dem Modell werden rund 2,1 Mio. Personen in 950.000 Haushalten modelliert. Neben der Stadt Karlsruhe umfasst es die umliegenden Landkreise und Städte.

Für die vorliegende Studie wurde analog zu den weiteren Arbeiten im Rahmen des Projekts der Stadtteil Oststadt als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Die betreffenden Verkehrszellen sind in Abbildung 2.2 hervorgehoben. Das Modell betrachtet die Einwohner dieses Stadtteils. In diesem Gebiet sind im Modell 19.470 Personen in 12.795 Haushalten, welche über 9.922 Pkw verfügen.

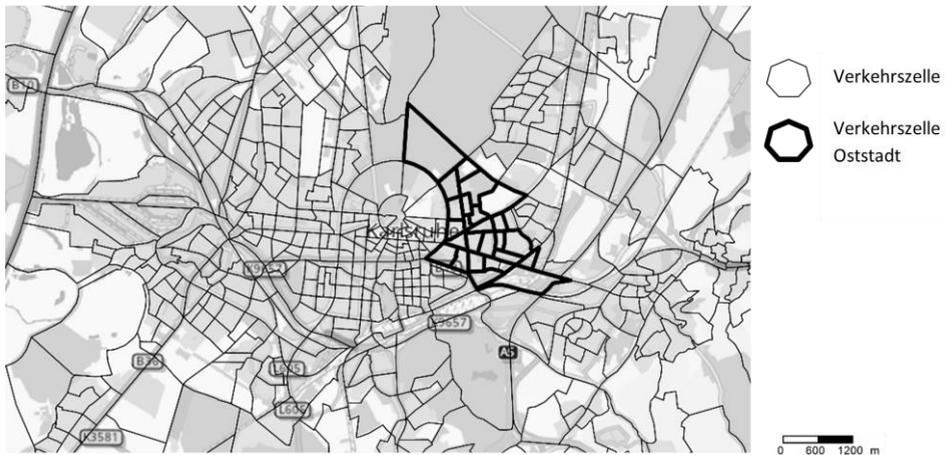


Abbildung 2.2: Ausschnitt aus den Zonen des Verkehrsmodells im Stadtgebiet Karlsruhe

Das Verkehrsmittelwahlmodell im vorliegenden Verkehrsmodell wurde auf Basis von Daten der Erhebung *Mobilität in Deutschland* aus dem Jahre 2017, einer lokalen Haushalts-erhebung der Region Karlsruhe aus 2012 sowie einer lokalen Stated-Choice-Erhebung zu Zu- und Abgangswegen aus 2019 erstellt. Letztere wurde verwendet, um intermodales Verkehrsverhalten in Bezug auf den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) und das stationsbasierte Carsharing abzubilden. Zusätzlich basiert das Modell auf Mixed Logit-Auswahlfunktionen, um stabiles und variables Verhalten und somit eine angemessene Multimodalität der Agenten sicherzustellen. 212 Parameter fließen in diese Funktionen ein. Diese beziehen sich auf Altersgruppe, Geschlecht, Berufstätigkeit, Haushaltsgröße, Wegezweck, Fahrzeit, Fahrkosten und andere. Um einen realitätsnahen Verkehrszustand

zu erzeugen, wurden sowohl das Zielwahl- als auch das Verkehrsmittelwahlmodell mittels der genannten Erhebungen und lokaler Verkehrszählungen kalibriert. Somit stellt das Gesamtmodell grundsätzlich eine geeignete Grundlage für die Bewertung verkehrlicher Effekte innerhalb des Planungsraumes dar.

## 2.3 Modellierung der autonomen Fahrzeuge

Wie im vorangegangenen Beitrag von Szimba und Leisener erläutert, ändern sich durch die Automatisierung des Straßenverkehrs die Kosten für die Nutzenden. Unter Berücksichtigung der Kostenkomponenten Abschreibung des Fahrzeugs, Versicherung, Steuern, Kraftstoff-/ Energieverbrauch, Wartung, Reifen, Parken und Reinigung verringern sich die Nutzungskosten durch die Vollautomatisierung bei einem Mittelklasse-Fahrzeug des Typs VW Golf zwischen 2,6% (E-Golf) und 3,6% (Golf Benzin). Unter der Annahme, dass der Anteil der Fahrzeuge mit Elektroantrieb auf rund 50% ansteigen wird, nehmen wir in dem Szenario eine Kosteneinsparung pro Personenkilometer von 3,1% für die Nutzung autonomer Pkw in Privatbesitz an.

Darüber hinaus ändern sich durch die Automatisierung die Kosten für die Reisezeit. Im autonomen Fahrzeug (Level 5) sind während der Fahrt keinerlei Steuer- oder Kontrollfunktionen durch die Fahrzeuginsassen erforderlich, so dass die Fahrzeit anderweitig genutzt werden kann, beispielsweise zur Kommunikation oder zum Arbeiten. Dies führt dazu, dass sich die wahrgenommenen „Kosten“ für die Reisezeit bzw. der „Value of Time“ (VoT) verändert (van den Berg und Verhoef, 2016; Wadud et al., 2016; Stephens et al., 2016). In weiteren Arbeiten wurden die Auswirkungen auf den VoT genauer untersucht: Kolarova, Steck und Bahamonde-Birke (2019) ermitteln einen um 41% niedrigeren VoT für alle Fahrten im Zusammenhang mit dem Fahrtzweck Arbeit, während sich der VoT für andere Fahrtzwecke nicht ändert. Loeff et al. (2018) identifizieren einen Rückgang des VoT für berufliche Fahrtzwecke um 25 bis 38%, und eine Erhöhung des VoT für Fahrten in der Freizeit um 24 bis 32%. Correia et al. (2019) konstatieren einen um 26% niedrigeren VoT für berufliche Fahrten, und eine Erhöhung im Freizeitverkehr um 9%. Die Ergebnisse der Fallstudie von Szimba and Hartmann (2020), in der eine Veränderung des VoT über Zahlungsbereitschaften für zusätzliche Aktivitäten während der Fahrt abgeleitet wurde, resultieren in einen um rund 14% niedrigeren VoT für Berufspendler.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wird für das Szenario der VoT für Berufspendelnde, Geschäftsreisende, und Pendelnde zu Hochschulen, Universitäten sowie beruflichen und berufsbegeleitenden Weiterbildungseinrichtungen bei der Wahl des Pkw um 30% verringert. Für alle anderen Fahrtzwecke bleibt der VoT unverändert.

Die Parameter zur Verkehrsmittelwahl werden für die Einwohnenden des Planungsraums daher zusammenfassend wie folgt angepasst:

1. Für alle geschäftlichen Wege, sowie Wege zur Arbeit und tertiären Bildungsstätten wird der Value of Time des Pkw um 30% verringert.
2. Die Pkw-Fahrtkosten werden für alle Wegezwecke um 3,1% reduziert.

Für die vorliegende Studie wird die Verfügbarkeit von Pkw nicht verändert: alle Personen, die aktuell einen Pkw besitzen, besitzen auch im Szenario mit autonomen Fahrzeugen einen, andere Personen können das Verkehrsmittel Pkw (als Fahrer) nicht nutzen. Veränderungen sind daher ausschließlich auf die veränderten Parameter für Value of Time sowie Nutzerkosten (Fahrtkosten) zurückzuführen.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Simulationsergebnisse

Es wurden zwei Simulationsszenarien berechnet: zum einen ohne obige Änderungen (Status quo), zum anderen mit obigen Änderungen (Szenario „Autonome Fahrzeuge“). Alle folgenden Auswertungen beziehen sich immer nur auf die Einwohnenden des Planungsraums (Karlsruhe-Oststadt).

Die Anzahl der durchgeführten Wege je Verkehrsmittel in beiden Simulationen sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass im Szenario autonomer Fahrzeuge das Verkehrsmittel Pkw<sup>1</sup> häufiger genutzt wird, die anderen Verkehrsmittel werden in gleicher Weise weniger genutzt. Die größte relative Verringerung gibt es beim Verkehrsmittel ÖV, während die Verkehrsmittel zu Fuß oder Fahrrad von der Einführung autonomer Pkw deutlich weniger betroffen sind.

Die mittlere Fahrtweite des Verkehrsmittels Pkw erhöht sich von 10,34 auf 10,45 km. Es zeigt sich daher, dass etwas längere Fahrtweiten mit dem Pkw attraktiver werden. Die Pkw-Fahrleistung steigt um ca. 6.000 Fzg.-km und damit um ca. 3,6%. Die im vorherigen Absatz genannte besonders große Auswirkung auf den ÖV, im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln, kann mit einer ähnlich großen mittleren Fahrtweite erklärt werden: Beim

---

<sup>1</sup> Es ist hier und im folgenden bei Pkw stets das Verkehrsmittel „Pkw als Fahrer/in“ gemeint. Das Verkehrsmittel „Pkw als Mitfahrer/in“ ist unter „Sonstige“ subsummiert.

ÖV beträgt sie 9,5 km, bei zu Fuß und Fahrrad ist sie mit unter 3 km deutlich geringer (Entfernungen gelten für beide Szenarien).

Tabelle 3.1: Wegehäufigkeiten nach Verkehrsmittel

Verkehrsmittel	Status quo	Szenario „Autonome Fzg.“	Differenz (absolut)	Veränderung
Fahrrad	20.447	20.378	-69	-0,34%
Pkw	16.448	16.857	+409	+2,49%
zu Fuß	15.760	15.670	-90	-0,57%
ÖV	14.788	14.559	-229	-1,55%
Sonstige (bspw. Carsharing, Bikesharing)	3.255	3.236	-19	-0,58%

Tabelle 3.2: Wegehäufigkeiten nach Wegezweck, nur Wege mit Verkehrsmittel Pkw

Wegezweck	Status quo	Szenario „Autonome Fzg.“	Differenz (absolut)	Veränderung
zur Arbeit	3.300	3.458	+158	+4,8%
dienstlich	1.033	1.079	+46	+4,5%
Bildung, tertiär	377	379	+2	+0,5%
einkaufen, tägl. Bedarf	934	950	+16	+1,7%
Freizeit	718	732	+14	+1,9%
nach Hause	6.605	6.753	+148	+2,2%
sonstige	3.481	3.506	+25	+0,7%

### 3.2 Diskussion

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz basiert auf kleinen Anpassungen einiger Parameter des Verkehrsnachfragemodells. Die Veränderung der Parameter zeigt aber Wirkung – autonome Pkw werden häufiger genutzt als konventionelle Pkw. Die Größe des Effekts mag zunächst überraschen: Die Anzahl der mit Pkw durchgeführten Wege steigt um lediglich 2,5%, die Fahrleistung um 3,6%.

Gleichwohl muss beachtet werden, dass die Größe der Veränderungen der Eingabedaten auch gering ist: die Reisekosten werden um lediglich rund 3% geringer, der VoT für

bestimmte Wegezwecke reduziert sich um immerhin 30%. Da die Anpassung des VoT proportional zur Reisezeit ist, muss die Reisezeit eine gewisse Größe aufweisen, damit sie gegenüber anderen Einflüssen im Verkehrsmittelwahlmodell Wirkung zeigt. Jedoch sind 80% aller Pkw-Fahrten und 78% derjenigen Pkw-Fahrten, für die auch der VoT angepasst wurde, kürzer als 20 min. Der Einfluss von reisezeitbezogenen Aspekten auf die Wahlentscheidung ist daher beschränkt.

Zusätzlich kann es modellmethodische Gründe geben – das Verhalten der Agenten im Verkehrsnachfragemodell könnte träger sein, als es in Realität auftreten würde. Die Größe dieses Einflusses ist derzeit jedoch nicht quantifizierbar.

Die Modellergebnisse weisen insgesamt darauf hin, dass bei den aktuellen Rahmenbedingungen für die gegenwärtigen Pkw-Wege die Effekte autonomer Fahrzeuge eher gering sind, insbesondere für Einwohnende eines Stadtteils wie der Karlsruher Oststadt, da diese hauptsächlich kurze Wege durchführen.

Offen ist jedoch die Frage, was passiert, wenn weitere Rahmenbedingungen mit autonomen Fahrzeugen modelliert werden: Zum einen, dass nicht mehr nur Personen, die einen Führerschein besitzen, Auto fahren könnten, sondern alle Menschen (Kinder oder Menschen, die heute fahruntauglich sind) autonome Fahrzeuge nutzen. Zum anderen, dass generell Autos vermehrt geteilt werden, da sie nach Beendigung der Fahrt für eine Person von einer weiteren Person genutzt werden könnten (neuartige Mobilitätsdienste). Weiterhin kann die Nutzung der Fahrzeit für andere Aktivitäten auch dazu führen, längere Wege durchzuführen sowie neue Aktivitäten durchzuführen. Nicht zuletzt kann auch die Parksuchzeit wegfallen, wenn sich die Pkw selbständig weiterbewegen. Derartige weiterführende Effekte werden beispielsweise im Projekt bwirkt (Kagerbauer et al. 2021) behandelt.

## 4 Fazit

Autonomes Fahren kann für einen Attraktivitätsgewinn des Pkw sorgen. Auch in der vorliegenden Studie, in der autonom fahrende Pkw mit einem einfachen Ansatz in einem Verkehrsnachfragemodell eingeführt wurden, zeigt sich dieser Effekt. Gleichwohl fällt die Veränderung der durchgeführten Wege mit einem Plus von ca. 2,5% gering aus. Hieran zeigt sich, dass unter den getroffenen Annahmen – u.a. Ersetzung der gegenwärtigen Pkw mit autonomen Pkw, jedoch keine veränderten Ziele – die Auswirkungen autonom fahrender Pkw relativ gering sind. Grundsätzlich konnte mit dieser Studie gezeigt werden,

dass agentenbasierte Verkehrsnachfragemodelle geeignet sind, diese Fragestellungen zu bearbeiten und ökonomische Analysen in das Modell integrierbar sind. Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, komplexere Eigenschaften und Wirkungen des autonomen Fahrens im Verkehrsnachfragemodell zu berücksichtigen.

## Literatur

- Bonabeau, Eric (2002): Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99: S.7280-7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Correia, Gonçalo Homem de Almeida/de Looft, Erwin/van Cranenburgh, Sander/Snelder, Maaïke/van Arem, Bart (2019): On the Impact of Vehicle Automation on the Value of Travel Time While Performing Work and Leisure Activities in a Car: Theoretical Insights and Results from a Stated Preference Survey, in: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 119: S.359–82. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.016>
- de Looft, Erwin/Correia, Gonçalo Homem de Almeida/van Cranenburgh, Sander/Snelder, Maaïke/van Arem, Bart (2018): Potential Changes in Value of Travel Time as a Result of Vehicle Automation: A Case-Study in the Netherlands, in: *Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, United States*
- Kagerbauer, Martin/Wilkes, Gabriel/Barthelmes, Lukas (2021): *bwirkt - Begleit- und Wirkungsforschung zum automatisierten und vernetzten Fahren auf dem TAF BW*. [https://www.ifv.kit.edu/forschungsprojekte\\_1035.php](https://www.ifv.kit.edu/forschungsprojekte_1035.php)
- Kolarova, Viktoriya/Steck, Felix/Bahamonde-Birke, Francisco J. (2019): Assessing the Effect of Autonomous Driving on Value of Travel Time Savings: A Comparison between Current and Future Preferences, in: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 129: S.155–69. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.011>
- Mallig, Nicolai/Kagerbauer, Martin/Vortisch, Peter (2013): *mobiTopp – A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework*. *Procedia Computer Science*, 19, 854–859. doi:10.1016/j.procs.2013.06.114
- Mallig, Nicolai/Vortisch, Peter (2017): *Modeling travel demand over a period of one week: The mobiTopp model*. <http://arxiv.org/pdf/1707.05050v1>
- Regionalverband Mittlerer Oberrhein (2021): *regiomove – Vernetzte Mobilität für die Region Mittlerer Oberrhein*. <https://regiomove.de>
- SAE International (2021): *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles - J3016\_202104* (ursprünglich veröffentlicht 2016) [https://doi.org/10.4271/J3016\\_202104](https://doi.org/10.4271/J3016_202104)
- Stephens, Thomas S./Gonder, Jeff/Chen, Yuche/Lin, Zhenhong/Liu, Chang/Gohlke, David (2016): *Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of*

- Connected and Automated Vehicles, National Renewable Energy Laboratory (NREL). Webpage (last accessed: 11.12.2019). <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67216.pdf>
- Szimba, Eckhard/Hartmann, Martin (2020): Assessing travel time savings and user benefits of automated driving – A case study for a commuting relation, in: Transport Policy, Volume 98, S.229–237. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.007>
- van den Berg, Vincent A.C./Verhoef, Erik T. (2016): Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: the effects on capacity, value of time and preference heterogeneity, in: Transportation Research Part B: Methodological 94: S.43–60. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.08.018>
- Wadud, Zia/MacKenzie, Don/Leiby, Paul (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles, in: Transportation Research Part A: Policy and Practice 86. S.1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- Wörle, Tim/Briem, Lars/Heilig, Michael/Kagerbauer, Martin/Vortisch, Peter (2021): Modeling intermodal travel behavior in an agent-based travel demand model. In: The 12th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.020>