

Wie ändern sich Mobilitätskosten durch die Automatisierung im Verkehr?

Eckhard Szimba ^{1*}, Lukas Leisener ¹

¹ *Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Volkswirtschaftslehre (ECON), Karlsruhe, Deutschland*

* *Corresponding author: szimba@kit.edu*

Kurzfassung

Die Nutzerkosten von Mobilitätsalternativen sind eine wichtige Einflussgröße für das Mobilitätsverhalten, wie die Ziel- und Verkehrsmittelwahl, und beeinflussen somit entscheidend die ökologische Nachhaltigkeit des Verkehrssystems. Daher widmet sich dieser Beitrag den Wirkungen des autonomen Fahrens auf die Nutzerkosten, indem sämtliche variablen und ggf. fixen Kosten für unterschiedliche Fahrzeug- und Antriebstypen für nicht-autonom fahrende und autonom fahrende Fahrzeuge vergleichend gegenübergestellt werden. Die Abschätzungen beziehen sich auf privat genutzte Pkws, Taxis sowie Busse im öffentlichen Verkehr. Die Ergebnisse zeigen, dass autonome Mobilitätsangebote das Potenzial haben, die Nutzerkosten für die motorisierte Mobilität spürbar zu verringern. Durch die Einsparung von Fahrpersonal können insbesondere Mobilitätsdienstleistungen des öffentlichen Verkehrs sowie Taxidienste wesentlich kostengünstiger erbracht werden (Einsparungspotenzial 39–58%). Auch die Nutzerkosten des motorisierten Individualverkehrs werden sich durch die Automatisierung verringern. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Reisezeiteinsparungspotenzials könnten sich Pendlerkosten mit dem autonomen Privat-Pkw um rund 20% verringern. Um die Chancen der Automatisierung für eine nachhaltigere Mobilität zu nutzen, und gleichzeitig involvierte Risiken – zum Beispiel die Entstehung induzierten Verkehrs durch die Verbesserung des Angebots, häufige Leerfahrten, oder die Verlagerung von Nachfrage vom öffentlichen Verkehr zum motorisierten Individualverkehr – zu vermeiden, ist eine flankierende Begleitung durch die Politik unbedingt erforderlich. Aufgrund der Interdependenzen zwischen Verkehrsangebot und strategischen Entscheidungen wie Wohn- und Standortwahl, erfordert die Automatisierung des Verkehrs zudem eine besonders enge Verzahnung von Raum-, Stadt- und Verkehrsplanung.

1 Einleitung

Das autonome Fahren bietet nicht nur eine Vielzahl neuer Mobilitätsmöglichkeiten, sondern bietet Potenziale, durch eine Erhöhung der Infrastrukturkapazität, die Verringerung von Energieverbräuchen und Emissionen sowie einer verbesserten Verkehrssicherheit, den Verkehr effizienter und nachhaltiger zu gestalten (z. B. Stephens et al., 2016; Wadud, MacKenzie & Leiby, 2016; Szimba und Orschiedt, 2017). Ein Wechsel von der Rolle als Fahrzeuglenker im konventionell fahrenden Pkw zum Passagier im autonomen Fahrzeug verändert zudem die Bewertung der Reisezeit (z. B. Kolarova, Steck und Bahamonde-Birke, 2019; Correia et al. 2019).

Somit ist zu erwarten, dass sich durch die Automatisierung auch die Kosten für die Nutzerinnen und Nutzer verändern werden. Die Nutzerkosten von Mobilitätsalternativen sind eine wichtige Einflussgröße für das Mobilitätsverhalten, wie die Ziel- und Verkehrsmittelwahl (z. B. Ortúzar und Willumsen, 2013), und beeinflussen daher entscheidend die ökologische Nachhaltigkeit des Verkehrssystems. Daher widmet sich dieser Beitrag den Wirkungen des autonomen Fahrens auf die Nutzerkosten, indem sämtliche variablen und ggf. fixen Kosten für unterschiedliche Fahrzeug- und Antriebstypen für nicht-autonom fahrende und autonom fahrende Fahrzeuge vergleichend gegenübergestellt werden. Die Abschätzungen beziehen sich auf privat genutzte Pkws, Taxis sowie Busse im öffentlichen Verkehr.

Nach einer Übersicht über die betrachteten Referenzfahrzeuge und berücksichtigte Kostenkomponenten in Kapitel 2 werden in Kapitel 3 die Auswirkungen auf die monetären Kosten, und in Kapitel 4 auf die Zeitkosten untersucht. In Kapitel 5 werden die ermittelten Kostenveränderungen auf eine beispielhafte Pendlerrelation zwischen Graben-Neudorf und Karlsruhe-Oststadt angewandt. Der Beitrag schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und Folgerungen für die Politik.

2 Referenzfahrzeuge und berücksichtigte Kostenkomponenten

Für die Analyse der Kostenveränderung durch Automatisierung werden die folgenden Fahrzeugtypen betrachtet:

- VW Golf 1,0l TSI OPF 85kw (Benzin-Golf)

- VW Golf 1,6l TDI SCR 85kw (Diesel-Golf)
- VW eGolf 100kw

Als exemplarisches Taxi-Fahrzeug wird ein Mercedes-Benz E 220 d (Dieselantrieb) ausgewählt.

Als ÖPNV-Fahrzeuge werden Kleinbusse des Typs Mercedes-Benz Sprinter sowie Großraumbusse des Typs Mercedes-Benz Citaro mit Diesel- und Elektroantrieb zugrunde gelegt:

- Mercedes-Benz Sprinter 319 CDI
- Mercedes-Benz „eSprinter“
- Mercedes-Benz Citaro (Euro VI)
- Mercedes-Benz eCitaro

Für die autonom betriebenen Fahrzeuge wird der höchste Automatisierungsgrad (Level 5) unterstellt, in dem das Fahrzeug alle Steuerungs- und Kontrollfunktionen vollkommen autark erfüllt und ein Eingreifen des Passagiers nicht erwartet wird (SAE, 2018).

Für den Kostenvergleich werden folgende Kostenkomponenten berücksichtigt:

- Abschreibung/ Wertverlust
- Versicherung
- Kfz-Steuern
- Kraftstoff-/ Energieverbrauch
- Wartung und Reifen
- Parken und Reinigung

Zusätzlich werden für die Taxis und öffentlichen Verkehrsmittel folgende Kostenbestandteile einbezogen:

- Personalkosten
- Gemeinkosten
- Umsatzsteuer
- Gewinnmarge

Die Kostenschätzungen beziehen sich auf Marktstrukturen in Deutschland im Bezugsjahr 2019.

3 Monetäre Kosten

3.1 Annahmen

Für die autonomen Varianten wird ein Technikaufpreis von 8.000€ angenommen, was zu höheren Abschreibungskosten führt. Ein erwarteter Rückgang der Unfälle resultiert in 50% geringere Versicherungskosten (Bösch et al., 2018). Ferner verbrauchen die autonomen Fahrzeuge aufgrund angepasster Fahrprofile 10% weniger Kraftstoff bzw. Energie (Stephens et al., 2016), wobei sich beim Laden des E-Golfs die variablen Kostenbestandteile verringern, nicht aber die fixen Kosten des unterstellten Tarifmodells. Durch den verringerten Kraftstoffverbrauch sinken die CO₂-Emissionen, was zu geringeren Kfz-Steuern des privat genutzten Benzin- und Diesel-Pkw und des Taxis führt. Die Reifenkosten für autonome Fahrzeuge sinken aufgrund einer schonenderen Fahrweise um 10% (Bösch et al., 2018). Bei Park- und Wartungskosten werden im Rahmen dieser Untersuchung keine Veränderungen angenommen (Harper, 2019; Bösch et al., 2018). Unter der Annahme, dass ein verändertes Verhalten der Fahrgäste in einem Taxi ohne Fahrer häufigere Innenreinigungen erfordert, erhöhen sich die Reinigungskosten eines autonomen Taxis um 350% (Bösch et al., 2018). In Tabelle 3.1 sind die Annahmen bezüglich der relativen Kostenveränderung durch die Automatisierung zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Angenommene Veränderung einzelner Kostenkomponenten durch die Automatisierung

	Pkw im Privatbesitz	Taxi	ÖPNV
Anschaffungskosten	Golf (Benzin): +32 % Golf (Diesel): +29 % Golf (Elektro): +24 %	E-Klasse (Diesel): +19 %	Sprinter (Diesel): +11 % Sprinter (Elektro): +8 % Citaro (Diesel): +3 % Citaro (Elektro): +1 %
Prozentualer Wertverlust	+/-0 %	+/-0 %	+/-0 %
Versicherung	-50 %	-50 %	-50 %
Kfz-Steuern	Golf (Benzin): -30 % Golf (Diesel): -12 % Golf (Elektro): +/-0 %	E-Klasse (Diesel): -10 %	alle Fahrzeuge: +/-0 %
Kraftstoff-/ Energieverbrauch	Golf (Benzin): -10 % Golf (Diesel): -10 % Golf (Elektro): -9,25 %	-10 %	-10 %
Wartung	+/-0 %	+/-0 %	+/-0 %
Reifen	-10 %	-10 %	-10 %
Parken	+/-0 %	+/-0 %	+/-0 %
Reinigung	+/-0 %	+350 %	+/-0 %

Für das Taxi und den ÖPNV sind weitere Kostenkomponenten zu berücksichtigen (siehe Tabelle 3.2): Bei beiden Verkehrsangeboten entfallen die Kosten des Fahrpersonals. Die Gemeinkosten eines Taxiunternehmens verringern sich um 4% (Bösch et al., 2018), während die des ÖPNV-Betriebs als unverändert angenommen werden. Auch die Umsatzsteuer und die Gewinnmarge bleiben unverändert.

Tabelle 3.2: Angenommene Veränderung einzelner Kostenkomponenten durch die Automatisierung (kommerzielle Angebote)

	Taxi	ÖPNV
Personalkosten (Fahrpersonal)	-100%	-100%
Gemeinkosten	-4 %	+/-0 %
Umsatzsteuer	+/-0 %	+/-0 %
Gewinnmarge	+/-0 %	+/-0 %

3.2 Ergebnisse

Auf Basis der erläuterten Annahmen sowie den zugrunde liegenden absoluten Werten für die berücksichtigten Kostenkomponenten können die Nutzerkosten pro Personenkilometer (Pkm) abgeschätzt werden. Beim Pkw in Privatbesitz (Tabelle 3.3) sind moderate Einsparungen um 2,6 bis 3,6% zu erwarten. Für das autonome Taxi sowie die autonomen Busangebote sind die Kosteneinsparungen hingegen beträchtlich und reichen von rund 39 bis knapp 58 Prozent (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.3: Nutzerkosten für Pkw in Privatbesitz

	Golf (Diesel)	Golf (Benzin)	Golf (Elektro)
Konventionell [€/Pkm]	0,286	0,28	0,266
Autonom [€/Pkm]	0,276	0,27	0,259
Prozentuale Kosteneinsparung	-3,5 %	-3,6 %	-2,6 %

Tabelle 3.4: Nutzerkosten für Taxi und Busse (ÖPNV)

	Taxi (E-Klasse Diesel)	Sprinter (Diesel)	Sprinter (Elektro)	Citaro (Diesel)	Citaro (Elektro)
Konventionell [€/Pkm]	2,406	1,36	1,385	0,151	0,175
Autonom [€/Pkm]	1,02	0,581	0,608	0,085	0,107
Prozentuale Kosteneinsparung	-57,6 %	-57,3 %	-56,1 %	-43,7 %	-38,9 %

4 Zeitkosten

Der „Value of Time“ (VoT) spiegelt die Differenz aus den Opportunitätskosten der Fahrzeit und dem Nutzen, der während der Fahrt entsteht, wider (siehe z. B. Kouwenhoven und de Jong, 2018). Für den Fahrgast im autonomen Taxi und ÖPNV bleiben – im Vergleich zu konventionall verkehrenden Angeboten – sowohl die Opportunitätskosten der Fahrzeit als auch der während der Fahrt entstehende Nutzen gleich, sodass sich keine Änderungen des VoT ergeben. Im autonomen Privat-Pkw hingegen sind während der Fahrt keinerlei Steuer- oder Kontrollfunktionen durch die Fahrzeuginsassen erforderlich, so dass die Fahrzeit anderweitig genutzt werden kann (z. B. für die Kommunikation oder zum Arbeiten) und sich der während der Fahrt entstehende Nutzen verändert, was wiederum zu einer Veränderung des VoT führt (siehe z. B. van den Berg und Verhoef, 2016; Wadud, MacKenzie & Leiby, 2016; Stephens et al., 2016). Arbeiten, in denen die Auswirkungen autonom fahrender Pkw auf den VoT untersucht wurden (Kolarova, Steck und Bahamonde-Birke, 2019; Loeff et al., 2018; Correia et al., 2019; Szimba und Hartmann, 2020), legen einen Rückgang des VoT für berufliche Fahrtzwecke um 14 bis 41% nahe, während der VoT für Fahrten in der Freizeit unverändert bleibt oder sich um bis zu 32% erhöht.

Neben der Veränderung des VoT können sich durch die Automatisierung auch die Reisezeiten verändern. Dies wird im folgenden Abschnitt am Beispiel einer Pendlerrelation verdeutlicht.

5 Anwendung auf die Pendlerrelation Graben-Neudorf – Karlsruhe Oststadt

Um die in den Kapitel 3 und 4 ermittelten Kostenveränderungen zu veranschaulichen, werden die Nutzerkosten für die Pendlerrelation Graben-Neudorf – Karlsruhe Oststadt bei Benutzung eines Privat-Pkw abgeschätzt. Hierzu werden die folgenden drei Routenvarianten zugrundegelegt (vgl. Abbildung 5.1):

- **Autobahn:** B35, Auffahrt Bruchsal, A5, Ausfahrt Karlsruhe-Durlach **(26,4 km)**
- **Bundesstraße:** B36 über Eggenstein-Leopoldshafen **(20,3 km)**
- **Land- und Kreisstraßen:** Über Neuthard, Stutensee, Hagsfeld **(20,6 km)**

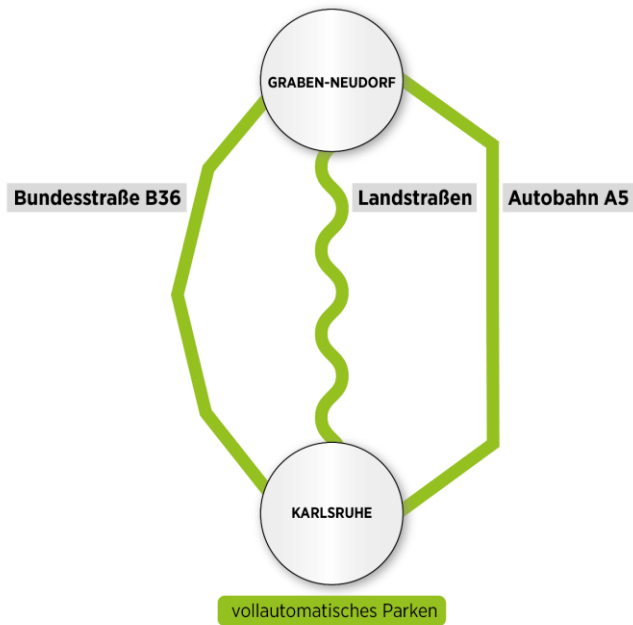


Abbildung 5.1: Routenoptionen zwischen Graben-Neudorf und Karlsruhe

Die Reisezeiten für autonom und nicht-autonom fahrende Pkw wurden für jede Route mit Hilfe eines Mikrosimulationsmodells ermittelt, mit dem der Verkehrsfluss an Kreuzungen, an Auf- und Abfahrten von Autobahnen, und auf freier Strecke separat modelliert wurde (siehe Szimba und Hartmann 2020). Ferner wurden Reisezeiteinsparungen durch den Wegfall des Parksuchverkehrs in der Karlsruher Oststadt hergeleitet. Die unterstellten Reisezeiteinsparungen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Reisezeiteinsparungen für die Nutzung autonomer Pkw pro Strecke und Richtung

	Reisezeiteinsparungen auf der Strecke [min]	Reisezeiteinsparung durch Wegfall des manuellen Parkens [min]	Summe [min]
Autobahn	6	2	8
Bundesstraße	3,5	2	5,5
Landstraßen	6	2	8

Unter Berücksichtigung der geschätzten Reisezeiteinsparungen und unter Verwendung der in Kapitel 3 ermittelten Kosten pro Personenkilometer, eines um 30% niedrigeren

Value-of-Time für autonomes Fahren im privaten Pkw¹ für den Fahrtzweck Pendeln (Abschnitt 1.4) sowie der Annahme, dass jährlich 220 Pendlerfahrten durchgeführt werden, können die jährlichen Pendlerkosten abgeschätzt werden (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Jährliche Pendlerkosten im Privat-Pkw (€/Jahr)

		Golf (Benzin)	Golf (Diesel)	Golf (Elektro)
Konventionell	Autobahn	4.770	4.840	4.608
	Bundesstraße	4.095	4.148	3.970
	Landstraßen	4.157	4.212	4.030
Autonom	Autobahn	3.916	3.985	3.788
	Bundesstraße	3.333	3.386	3.234
	Landstraßen	3.297	3.352	3.198

Die prozentuale Kosteneinsparung durch die Automatisierung des Privat-Pkw beläuft sich auf 17,7 bis 20,7%, je nach gewählter Route und Antriebstechnologie (siehe Tabelle 5.3). Den wichtigsten Beitrag zu den Kosteneinsparpotenzialen liefern die Reisezeitverringereungen.

Tabelle 5.3: Prozentuale Kosteneinsparung durch Automatisierung

	Golf (Benzin)	Golf (Diesel)	Golf (Elektro)
Autobahn	17,9 %	17,7 %	17,8 %
Bundesstraße	18,6 %	18,4 %	18,5 %
Landstraßen	20,7 %	20,4 %	20,7 %

6 Zusammenfassung und Implikationen für die Politik

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass autonome Mobilitätsangebote das Potenzial haben, die Nutzerkosten für die motorisierte Mobilität spürbar zu verringern. Durch die Einsparung von Fahrpersonal können insbesondere Mobilitätsdienstleistungen des öffentlichen Verkehrs sowie Taxidienste wesentlich kostengünstiger erbracht werden. ÖPNV-

¹ Als Zeitwert für die Fahrt im nicht autonom fahrenden Fahrzeug für den Fahrtzweck Pendeln wird, in Einklang mit den in der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) verwendeten Werten, 6,90 €/h angenommen (TNS Infratest/IVT, 2013).

Angebote könnten mit deutlich weniger Subventionen erstellt, beziehungsweise, bei konstant bleibenden Subventionen, erweitert werden.

Auch die Nutzerkosten des motorisierten Individualverkehrs werden sich durch die Automatisierung verringern, so dass auch der motorisierte Individualverkehr im Wettbewerb mit ÖPNV und Fahrrad Marktanteile gewinnen könnte. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Reisezeiteinsparungspotenzials könnten sich Pendlerkosten mit dem autonomen Privat-Pkw um rund ein Fünftel verringern. Geringere Kosten beim Pendeln machen – im Zusammenspiel mit hohen Immobilienpreisen und Mieten in Großstädten – das Leben im Umland großer Städte attraktiver und können eine Verlagerung von urbanen Wohnstandorten in das Umland bewirken. Dies würde nicht nur eine weitere Zersiedelung der Landschaft sowie Versiegelung des Bodens fördern, sondern durch längere Pendlerstrecken auch zusätzliche Verkehrsnachfrage induzieren.

Einerseits können durch die Nutzung von Kostensenkungspotenzialen im ÖPNV die Tarife gesenkt oder das Angebot ausgebaut werden, so dass der ÖPNV das Potenzial hat, an Wettbewerbsfähigkeit zu gewinnen. Andererseits werden sich auch die Nutzerkosten des motorisierten Individualverkehrs verringern. Die Wirkungen der Automatisierung hängen wesentlich davon ab, inwieweit es dem öffentlichen Verkehr gelingen wird, das Angebot für die Kunden noch attraktiver zu gestalten (zum Beispiel, indem ÖPNV-Haltestellen durch autonome Shuttledienste bedient und durchgehende Tür-zu-Tür-Verkehre angeboten werden). Um die Chancen der Automatisierung für eine nachhaltigere Mobilität zu nutzen, und gleichzeitig involvierte Risiken – zum Beispiel die Entstehung induzierten Verkehrs durch die Verbesserung des Angebots, häufige Leerfahrten, oder die Verlagerung von Nachfrage vom öffentlichen Verkehr zum motorisierten Individualverkehr – zu vermeiden, ist eine flankierende Begleitung durch die Politik unbedingt erforderlich. Aufgrund der Interdependenzen zwischen Verkehrsangebot und strategischen Entscheidungen wie Wohn- und Standortwahl, erfordert die Automatisierung des Verkehrs zudem eine besonders enge Verzahnung von Raum-, Stadt- und Verkehrsplanung.

Literatur

Bösch, P. M. , Becker, F. , Becker, H. & Axhausen, K. W. (2018). Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy* 64, pp. 76–91. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.09.005.

Correia, G. H. de A. , Loeff, E. , van Cranenburgh, S. , Snelder, M. & van Arem, B. (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. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 119, pp. 359–382. DOI: 10.1016/j.tra.2018.11.016.
- Harper, C. (2019). Driverless cars could spell the end for downtown parking - and cities need to plan ahead, CityMetric. Webpage (last accessed: 12.01.2020).
<https://www.citymetric.com/transport/driverless-cars-could-spell-end-downtown-parking-and-cities-need-plan-ahead-4767>
- Kolarova, V. , Steck, F. & Bahamonde-Birke, F. J. (2019). Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 129, pp. 155–169. DOI: 10.1016/j.tra.2019.08.011.
- Kouwenhoven, M. & Jong, G. de (2018). Value of travel time as a function of comfort. *Journal of Choice Modelling* 28, pp. 97–107. DOI: 10.1016/j.jocm.2018.04.002.
- Ortúzar, J. d. D. & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*. Fourth edition. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, West Sussex, United Kingdom.
- SAE International (2018). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Standard J3016_201806. DOI: 10.4271/J3016_201806.
- Stephens, T. S. , Gonder, J. , Chen, Y. , Lin, Z. , Liu, C. & Gohlke, D. (2016). Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of Connected and Automated Vehicles. DOI: 10.2172/1334242.
- Szimba, E. & Hartmann, M. (2020). Assessing travel time savings and user benefits of automated driving – A case study for a commuting relation. *Transport Policy* 98, pp. 229–237. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.03.007.
- Szimba, E. & Orschiedt, Y. (2017). How beneficial is fully automated driving in urban areas? Proceedings of the Conference "Future City 2017: Urban Sustainable Development and Mobility". University of Transport and Communications. Hanoi, Vietnam.
- TNS Infratest/IVT (2013). Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. DOI: 10.3929/ethz-b-000089615.
- van den Berg, V. A.C. & Verhoef, E. T. (2016). Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity. *Transportation Research Part B: Methodological* 94, pp. 43–60. DOI: 10.1016/j.trb.2016.08.018.
- Wadud, Z. , MacKenzie, D. & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.tra.2015.12.001.