

Gesamtwirtschaftliche Kosteneinsparpotenziale durch das automatisierte Fahren

Eine ökonomische Abschätzung für Deutschland

Michael Roos, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Lehrstuhl für Makroökonomik, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

(michael.roos@rub.de),  orcid.org/0000-0002-5465-9893

Marvin Siegmann, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Lehrstuhl für Makroökonomik

(marvin.siegmann@rub.de),  orcid.org/0000-0003-3954-768X

23

In dieser Studie wird abgeschätzt, welche gesamtwirtschaftlichen Kosteneinsparungen das automatisierte Fahren für Deutschland bringen könnte. Durch automatisiertes Fahren können Unfälle und Staus vermieden werden. Zudem ist zu erwarten, dass der Parkverkehr in den Innenstädten zurückgeht. Insgesamt ergibt unsere Abschätzung ein Einsparpotenzial von 24,9 Mrd. Euro pro Jahr bei einer mittleren Marktdurchdringung. Dies entspricht etwa 0,8 % des deutschen Bruttoinlandsprodukts im Jahr 2016. Gemessen am Wirtschaftswachstum von 1,9 % im Jahr 2016 ist dies erheblich. Von besonderem Interesse ist auch die Kostenersparnis je Pkw, da somit private Kosten der Anschaffung mit sozialen Erträgen verglichen werden können. Im mittleren Szenario erhalten wir eine Kostenersparnis von 1.351 Euro pro Jahr und Pkw.

Macroeconomic Cost Saving Potentials through Automated Driving An Economic Estimation for Germany

This study estimates the macroeconomic cost saving potentials, that might be achieved through automated driving in Germany. The new technologies of autonomous vehicles can contribute to accident and congestion reductions and might also lower parking problems in inner cities. Our assessment shows an annual cost saving potential of 24.9 bill. Euro at mid-level market penetration. This corresponds to 0.8 % of the German GDP in 2016, which is considerably high compared to the economic growth of 1.9 % in the same year. Of particular interest here are also cost savings per car in order to compare private costs with socially realized benefits. We estimate cost savings of 1,351 Euro per year and car at mid-level market penetration.

Keywords: *autonomous vehicles, automated driving, safety, congestion, macroeconomic cost reduction*

This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License CCBY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
<https://doi.org/10.14512/tatup.27.2.23>
Submitted: 09.03.2018. Peer reviewed. Accepted: 28.05.2018

Seit einiger Zeit erproben zahlreiche Automobilhersteller und Technologieunternehmen die Funktionsweise autonomer Fahrzeuge, die durch den Einsatz technischer Assistenzsysteme ohne menschliches Einwirken operieren können. Autonome Fahrzeuge versprechen eine Aufwertung der Fahrtzeit, ein deutlich erhöhtes Sicherheitsniveau, eine zeit- und kraftstoffeffizientere Fortbewegung bei reduziertem Emissionsausstoß und sollen auch älteren und körperlich beeinträchtigten Personen den Zugang zum Individualverkehr ermöglichen. Die serienreife Einführung dieser neuen Fahrzeugart könnte sowohl die Personenbeförderung als auch den Gütertransport auf der Straße revolutionieren. Während in der Bevölkerung eine gewisse Skepsis gegenüber selbstfahrenden Autos besteht, erwarten Vertreter der Automobilbranche, von Interessensverbänden und aus der Politik erhebliche gesellschaftliche Vorteile von der neuen Technologie. So schrieb der Bundesverkehrsminister Alexander Dobrindt am 24. 6. 2015 in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung: „Deshalb ist es wichtig, dass Deutschland bei der nächsten großen Mobilitätsrevolution vorangeht: dem autonomen und vernetzen Fahren. Damit bekommt Mobilität eine völlig neue Dimension. Das Auto wird zum *Third Place*, einem weiteren Lebensmittelpunkt neben Büro und Zuhause. Das Fahren entwickelt sich von der zweckgebundenen Notwendigkeit zu einem neuen, produktiven Zeitfenster. Gleichzeitig macht Echtzeit-Daten-Kommunikation zwischen Autos und Infrastruktur den Verkehr vorhersehbar – und vermeidet Stau und Unfälle.“

In dieser Studie wird abgeschätzt, welche gesamtwirtschaftlichen Kosteneinsparungen das automatisierte Fahren für Deutschland bringen könnte. Wir beschränken uns dabei auf Kosten, die mit von Menschen gesteuerten Fahrzeugen durch Unfälle, Staus und das Parken in Ballungsräumen entstehen und durch den Einsatz von selbstfahrenden Autos vermieden werden könnten. Weitere Auswirkungen, wie etwa die Umgestaltung innerstädtischer Nutzungsflächen als Folge eines verringerten Ver-

kehrsaufkommens oder Veränderungen der produzierten Emissionsmengen an Treibhausgasen, werden an dieser Stelle ausgeklammert. Ebenfalls ausgespart werden Beschäftigungs- und Einkommenseffekte in der Automobilindustrie und anderen von der Technologie betroffenen Branchen wie der Logistik oder dem Personentransportwesen. Die vernachlässigten Auswirkungen sind wahrscheinlich von erheblicher Größenordnung, jedoch ist ihre Ermittlung schwierig und kann nicht im Rahmen dieser Studie geleistet werden. Die hier ermittelten Kosteneinsparpotentiale sollten daher nicht als Ergebnis einer umfassenden Kosten-Nutzen-Analyse interpretiert werden, sondern als erste Abschätzung möglicher Größenordnungen der direkten Effekte.

unter anderem auf gegenwärtigen Daten für das jährliche Unfall- und Stauaufkommen sowie Kraftstoffverbräuchen verschiedener Fahrzeugarten und berücksichtigt Schätzungen darüber, welchen Einfluss menschliches Verhalten auf diese Größen hat. Unter der Annahme, dass die Parameter und das Verhalten gleichbleiben, werden die Daten dann herunterskaliert, indem ein Teil der von Menschen gesteuerten Fahrzeuge durch autonome Fahrzeuge ersetzt wird. Diese Methode vernachlässigt weitgehend, dass sich Preise und Kosten und damit Verhalten auf Grund der neuen Technologie ändern können. Solche Änderungen könnten nur in einem Modell abgebildet werden. Daher ist unsere Studie auch nicht als Zukunftsprojektion zu verstehen, sondern

Insgesamt ergibt unsere Abschätzung ein Einsparpotenzial von 24,9 Mrd. Euro pro Jahr bei einer mittleren Marktdurchdringung autonomer Fahrzeuge. Dies entspricht etwa 0,8 % des deutschen Bruttoinlandsprodukts im Jahr 2016.

Die makroökonomischen Aspekte des autonomen Autofahrens sind bisher kaum erforscht. So ist bemerkenswert, dass der von der Daimler und Benz Stiftung geförderte Sammelband zum autonomen Fahren (Maurer et al. 2015) sich auf die technischen, rechtlichen und gesellschaftlichen Aspekte konzentriert und die ökonomischen Aspekte weitgehend außen vorlässt. Unseres Wissens gibt es bisher keine Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen des autonomen Fahrens für Deutschland. Auch die internationale Forschungsliteratur bietet bisher wenig Erkenntnisse zu ökonomischen Fragen. Der Unternehmensberatungszweig strategy & von PricewaterhouseCoopers nimmt sich in seinem Bericht zum autonomen Fahren (strategy & 2016) eine betriebswirtschaftliche Analyse der Chancen und Risiken der globalen Automobilindustrie vor. Eine Delphi-Studie im Rahmen des EU-geförderten Projekts CityMobil2 (Sessa et al. 2015) betrachtet zwar auch ökonomische Effekte, jedoch nur qualitativ und ohne den Versuch, ökonomische Größen quantitativ abzuschätzen.

Die einzige uns bekannte Studie, die versucht, den makroökonomischen Nutzen des autonomen Autofahrens zu ermitteln, ist Fagnant und Kockelman (2015). Diese Studie extrapoliert für die USA, welche gesamtwirtschaftliche Kosten durch Unfälle, Staus und Parken bei unterschiedlicher Marktdurchdringung autonomer Autos eingespart werden könnten. Wir wenden diese Methode auf deutsche Daten an und nehmen damit die erste makroökonomische Abschätzung für Deutschland vor. Dabei berechnen wir verschiedene Szenarien, indem wir jeweils einen niedrigen, einen mittleren und einen hohen Marktanteil autonomer Fahrzeuge unterstellen. Die Berechnungen basieren dabei auf Extrapolationen aktueller Daten, was für eine erste Abschätzung akzeptabel erscheint. Diese Methode basiert

als Vergleich der gegenwärtigen Situation mit und ohne selbstfahrende Autos.

Insgesamt ergibt unsere Abschätzung ein Einsparpotential von 24,9 Mrd. Euro pro Jahr bei einer mittleren Marktdurchdringung. Dies entspricht etwa 0,8% des deutschen Bruttoinlandsprodukts im Jahr 2016. Gemessen am Wirtschaftswachstum von 1,9% im Jahr 2016 ist dies erheblich. Fagnant und Kockelman (2015) kommen für die USA auf eine ähnliche Größenordnung. Von besonderem Interesse ist auch die Kostenersparnis je Pkw, da somit private Kosten der Anschaffung mit sozialen Erträgen verglichen werden können. Im mittleren Szenario erhalten wir eine Kostenersparnis von 1.351 Euro pro Jahr und Pkw.

Potenziale der Unfallvermeidung

Allgemeine Unfallstatistiken

Zur Bestimmung möglicher Potenziale der Unfallvermeidung durch autonome Fahrzeuge gehen wir von den gegenwärtigen deutschen Unfallstatistiken aus. Die Polizei erfasste im Jahr 2016 etwa 2,56 Millionen Unfälle im deutschen Straßennetz (Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 2016), bei denen 3.206 Personen ums Leben kamen (Statistisches Bundesamt, 2017). Etwa 86% aller Unfallursachen können auf menschliches Fehlverhalten von Kraftfahrzeug- und Fahrradfahrern und 4% auf ein solches von Fußgängerinnen und Fußgängern zurückgeführt werden. Allgemein schlechte Straßenzustände sowie widrige Wetterverhältnisse sind nur in 9% und technische Mängel in 1% der Fälle die Ursache (Hütter 2013, S. 38). Baum et al. (2010) beziffern in einem Bericht die volkswirtschaftlichen Kosten der Straßenverkehrsunfälle in Deutsch-

land. Die Berechnungen umfassen nicht nur die direkten Reproduktionskosten der Sachschäden, sondern auch Polizei- und Rechtssprechungskosten, Verwaltungskosten der Versicherungen, Ressourcenausfälle durch Personenschaden, Rückgänge außermarktwirtschaftlicher Wertschöpfung, humanitäre Verluste und weitere Kostenstellen. Demnach lag der volkswirtschaftliche Schaden im Jahr 2005 bei 31,477 Mrd. Euro (Baum et al. 2010, S. 87)¹. Setzt man diesen Wert aus dem Jahr 2005 mit den korrespondierenden Unfallzahlen ins Verhältnis und überträgt dieses auf das Jahr 2016, ergeben sich geschätzte Kosten in Höhe von 36,104 Mrd. Euro. Damit machen die Unfallkosten knapp 1,15% des Bruttoinlandsproduktes von Deutschland aus.

Unfallvermeidung

Autonome Fahrzeuge können menschliche Fehler als Unfallursache eliminieren, da sie Verkehrssituationen besser überblicken, aggressive Fahrweisen ausgeschlossen werden und Gefahrensituationen durch den Datenaustausch mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur antizipiert werden können. Es wird angenommen, dass ein einziges autonomes Fahrzeug, es sei also ein Marktanteil von quasi 0% unterstellt, die Unfallwahrscheinlichkeit mit einem anderen Fahrzeug um den Faktor 0,5 verringern kann. Denn es kann zwar eigene Fahrfehler im besten Fall vermeiden, nicht aber die Fehler des anderen (menschlichen) Fahrers korrigieren. Eine Unfallwahrscheinlichkeit von 0,5 ist auch insofern annehmbar, als dass sich die Unfallschuld im Mittel gleichmäßig auf alle Kraftfahrer verteilt und somit durch ein autonomes Fahrzeug bei einem drohenden Unfall mit zwei Fahrzeugen halbiert. Ausgehend von dieser Annahme werden nun die Unfallwahrscheinlichkeiten für verschiedene Marktanteile autonomer Fahrzeuge ermittelt. Wir folgen anderen Studien, die bei vergleichbaren Abschätzungen Marktanteile in Höhe von 10, 50 und 90% gewählt haben (Fagnant und Kockelman 2015; Shladover et al. 2012).

Bei einem Marktanteil von 10% trifft ein autonomes Fahrzeug in praktisch 10% der Fälle² auf ein weiteres seiner Art, und ein Unfall, der auf menschliche Fehler zurückführbar wäre, könnte vermieden werden. Die oben unterstellte Unfallwahrscheinlichkeit von 0,5 bei einem Marktanteil von nahe 0% verringert sich also um 10% auf 0,45. Vermieden wird ein Unfall daher mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - 0,45 = 0,55$. Der Berechnungsansatz könnte alternativ auch wie folgt lauten: In 10% der Fälle trifft ein autonomes Fahrzeug auf ein weiteres seiner Art, so dass ein durch menschliches Versagen herbeige-

	Marktanteil autonomer Fahrzeuge		
	10 %	50 %	90 %
Anzahl autonomer Fahrzeuge	4.684.363	19.070.478	26.535.675
Gerettete Leben (p. a.)	159	1.082	2.467
Weniger Unfälle (p. a.)	127.974	872.548	1.989.409
Volkswirtschaftliche Kostenersparnisse (in Euro, p. a.)	1.787.152.630	12.185.131.566	27.782.099.970
Je autonomen Fahrzeug (in Euro, p. a.)	382	639	1.047

Tab. 1: Unfallvermeidungspotenziale durch autonome Fahrzeuge.

Quelle: Eigene Darstellung

fürter Unfall mit der Wahrscheinlichkeit 1 vermieden wird. In allen anderen Fällen, also 90%, verringert sich die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls, wie beschrieben, um 50%, also $0,1 \times 1 + 0,9 \times 0,5 = 0,55$. Für einen Marktanteil von 50% gilt analog $0,5 + 0,5 \times 0,5 = 0,75$ und für einen von 90% gilt $0,9 + 0,1 \times 0,5 = 0,95$.

Die in menschlichen Fehlern begründeten Unfälle könnten also bei einem Marktanteil von 10% autonomer Fahrzeuge um den Faktor 0,55 verringert werden. Der Ansatz lautet daher:

$$2.585.327 (\text{Unfälle}) \times 90\% (\text{menschliche Fehler}) \times 10\% (\text{Marktanteil AF}) \times 0,55 (\text{Unfallvermeidungsfaktor}) = 127.974 \quad [1]$$

In der Konsequenz könnten jährlich fast 128.000 Unfälle verhindert werden. Die volkswirtschaftlichen Kostenersparnisse ergeben sich analog und liegen bei einer Marktdurchsetzung von 10% bei

$$36,104 \text{ Mrd. €} (\text{Volksw.Schaden}) \times 90\% (\text{menschliche Fehler}) \times 10\% (\text{Marktanteil AF}) \times 0,55 (\text{Unfallvermeidungsfaktor}) \approx 1,787 \text{ Mrd. €} \quad [2]$$

Die korrespondierenden Werte für die Marktanteile von 50% und 90% werden, auf ganze Zahlen gerundet, in Tabelle 1 aufgeführt, ebenso wie die geretteten Leben, die analog ermittelt wurden.

Darüber hinaus sind die volkswirtschaftlichen Kostenersparnisse pro autonomem Fahrzeug von besonderem Interesse. In der Bundesrepublik Deutschland gab es zum 1. Januar 2017 einen Fahrzeugbestand von 45.803.560 Personenkraftwagen, 78.949 Kraftomnibussen, 2.911.907 Lastkraftwagen und 2.170.335 Sattelzugmaschinen, was einer Gesamtanzahl von 48.996.400 Fahrzeugen entspricht (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017, S. 1). Die Anzahl aller autonomen Fahrzeuge wird durch Multiplikation dieses Bestandes an herkömmlichen Kraftfahrzeugen mit dem jeweiligen Marktanteil autonomer Fahrzeuge bestimmt. Es ist wahrscheinlich, dass sich auf Grund von Kosten- und Verhaltensänderungen der Fahrzeugbestand ändern wird, jedoch ist eine Abschätzung dieser Änderung schwierig. Sinkende Kosten, z. B. durch Kraftstoffeinsparungen und geringere Versicherungsprämien, könnten zu mehr Fahrzeugen führen. Car-Sha-

¹ Leider gibt es keine aktuelleren Zahlen, was am hohen Berechnungsaufwand liegen dürfte.

² Das eigene Fahrzeug ist in den 10% inbegriffen.

ring, das vor allem in den Innenstädten attraktiv ist, könnte vor allem die Zahl der Personenkraftwagen verringern. Wir ignorieren hier mögliche Änderungen bei den anderen Fahrzeugklassen und nehmen eine Verringerung der Personenkraftwagen durch Car-Sharing an.

Durch Car-Sharing können zum einen Kosten gespart werden, weil Versicherungs- und Wartungskosten auf mehrere Fahrer aufgeteilt werden können (Barter 2013). Zum anderen wären weniger Fahrzeuge erforderlich, um dieselbe Transportleistung zu erzielen. Eine Studie der Universität von Columbia hat beispielsweise gezeigt, dass eine Flotte von etwa 9.000 autonomen Automobilen ausreicht, um jedes Taxi in New York City

tenwert von 7,695 Euro, im Rahmen des Arbeitsweges von 9,18 Euro und bei Dienstfahrten von 25,07 Euro (HEATCO 2005)⁴. Im Folgenden wird zwischen privaten Fahrten und solchen für berufliche Zwecke differenziert, letztere beiden Werte werden deshalb zu 17,125 Euro gemittelt. Nach einem Bericht des Umweltbundesamtes liegt der Verkehrsaufwand für berufliche Zwecke bei etwa 18,1 % (Umweltbundesamt 2012, S. 28). Die Potenziale der Stauvermeidung ergeben sich vor allem aus dem monetären Gegenwert der im Stau verbrachten Zeit und den Kosten des im Stau verschwendeten Kraftstoffs. Anhand der genannten Statistiken ermitteln wir nachfolgend diese Kosten.

Autonome Fahrzeuge können menschliche Fehler als Unfallursache eliminieren, da sie Verkehrssituationen besser überblicken, nicht aggressiv fahren und durch Datenaustausch Gefahrensituationen antizipieren.

zu ersetzen. Die Verbraucher würden im Schnitt nur 36 Sekunden auf ein freies Fahrzeug warten und etwa 50 US-Cent pro gefahrene Meile zahlen. Eine solche *Transportation Cloud* könnte aufgrund der hohen Verfügbarkeit und geringeren Kosten den Besitz eines eigenen Autos für manche überflüssig machen und eine attraktive Alternative zum klassischen Personennahverkehr darstellen (Kanter, 2015). Fagnant und Kockelman (2015, S. 175) nehmen an, dass sich vor allem durch Car-Sharing von autonomen Fahrzeugen die Gesamtzahl der Pkw bei einem Marktanteil von 10 % um 4,7 %, bei 50 % um 23,7 % und bei 90 % um 42,6 % verringert. Wir übernehmen diese Annahme und berechnen die Anzahl der autonomen Fahrzeuge anhand des jeweiligen Marktanteils bezogen auf die verminderte Gesamtzahl der Pkw.

Potenziale der Stauvermeidung

Allgemeine Staustatistiken

In Deutschland gibt es, gemessen an der Zahl der gültigen Führerscheine, etwa 36 Millionen Kraftfahrer (Statista 2017e), von denen jeder im bundesweiten Durchschnitt jährlich etwa 30 Stunden im Stau steht (INRIX 2016). Daraus ergibt sich eine zeitliche Staubelastung von insgesamt 1,08 Mrd. Stunden. Dabei werden alleine in Staus auf Autobahnen rund 321,792 Millionen Liter Kraftstoffe vergeudet (Die Welt 2009)³. Der durchschnittliche Preis für einen Liter Benzin lag 2016 bei 129,6 Cent (Statista 2017c) und der für einen Liter Diesel bei 107,2 Cent (Statista 2017d). Jede Zeitstunde, die im Stau verbracht wird, hat im Mittel bei Privatfahrten einen wirtschaftlichen Kos-

Stauvermeidung

Die technischen Assistenzsysteme autonomer Fahrzeuge stellen sicher, dass die Fahrgeschwindigkeit optimal an die Verkehrslage angepasst und ineffizientes Brems- und Beschleunigungsverhalten vermieden wird. Hoch frequentierte Streckenabschnitte können durch den Datenaustausch mit vorausfahrenden Fahrzeugen frühzeitig erkannt und umfahren werden. Diese Funktionen führen zu Einsparungen der Kraftstoffmengen. Hier gelten also viele der Vorteile, die bereits zuvor bei den Potenzialen der Unfallvermeidung angeführt wurden. Stern et al. (2017) konnten in einem Praxisversuch zeigen, dass bereits ein einziges autonomes Fahrzeug in einem Testfeld mit insgesamt zwanzig Fahrzeugen den Verkehrsfluss signifikant verbessern kann. Die Potenziale der Stauvermeidung fallen also nicht nur exklusiv autonomen Fahrzeugen zu, sondern allen Verkehrsteilnehmern. Die Kraftstoffeffizienz verbessert sich schätzungsweise um 23–39 % und die Fahrgeschwindigkeit bei stockendem Verkehr erhöht sich um 8–13 %, je nach Marktanteil autonomer Fahrzeuge (Fagnant und Kockelman 2015, S. 170). Die Straßenauslastung könnte unter anderem durch das autonome Fahren in Konvois bei einem Marktanteil von 10 % um 1 %, bei 50 % um 21 % und bei 90 % um 80 % erhöht werden (Shladover et al. 2012). Fagnant und Kockelman (2015) formulieren eine vorsichtigeren Schätzung und tragen dabei auch gegenteiligen Effekten Rechnung, wie beispielsweise der Erhöhung des allgemeinen Verkehrsaufkommens aufgrund der steigenden Mobilität. Sie unterstellen bei einem Marktanteil von 10 % Staureduktionsfaktoren in Höhe von 15 % und 5 %, bei 50 % Markt-

³ Die Daten wurden hier extrapoliert und an das Verkehrsaufkommen in 2016 angepasst.

⁴ Die Verwendung von Zeitkostensätzen unterstellt eine andernfalls effiziente Nutzung dieser Zeit, die nicht gegeben sein muss. Daher werden die Zeitkosten bei diesem Ansatz tendenziell überschätzt. Wir danken einem der Gutachter für den Hinweis.

durchsetzung von 35 % und 10 % und bei 90 % Markterfolg von 60 % und 15 %, jeweils differenziert für Autobahnen und andere Straßen außerhalb von Ortschaften sowie dem innerstädtischen Bereich.

Zeitersparnis

Eine Verbesserung des Verkehrsflusses führt zu impliziten Zeitersparnissen. Bei einem Marktanteil autonomer Fahrzeuge in Höhe von 10 % könnte sich das Stauaufkommen also für alle Verkehrsteilnehmer außerorts⁵ um 15 % und im innerstädtischen Bereich um 5 % reduzieren (Fagnant und Kockelman 2015). Laut Umweltbundesamt (2011) erfolgt etwa 30 % des Straßenpersonenverkehrs und 25 % des Straßengüterverkehrs innerorts. Werden diese Werte mit den bereits angeführten Fahrzeugbeständen gewichtet, kann für den gesamten Verkehr ein Wert von schätzungsweise 29,7 % zugrunde gelegt werden. Dementsprechend findet 70,3 % des deutschen Verkehrs außerorts statt. Die effektive Zeitersparnis durch autonome Systeme läge bei einem Marktanteil von 10 % bei

$$\begin{aligned} & (1,08 \text{ Mrd. h (Stau)} \times 15 \% (\text{Faktor außerorts}) \times 70,3 \%) \\ & + (1,08 \text{ Mrd. h (Stau)} \times 5 \% (\text{Faktor innerorts}) \times 29,7 \%) \\ & \approx 130 \text{ Mio. h (Zeitersparnis)} \end{aligned} \quad [3]$$

In einem nächsten Schritt wird dieser Wert mit den zuvor erwähnten Kosten einer Stautunde verrechnet. Für einen Anteil von 18,1 % gilt der Kostensatz einer Fahrt für berufliche Zwecke, für den Rest gilt der einer privaten Fahrt. Die Rechnung lautet:

$$\begin{aligned} & (130 \text{ Mio. h} \times 18,1 \% (\text{Berufl. Zwecke}) \times 17,125 \text{ €} \\ & (\text{Kosten berufl. Zwecke})) + (130 \text{ Mio. h} \times (1 - 18,1 \%) \\ & \times 7,695 \text{ € (Kosten Privatf.)}) \approx 1,222 \text{ Mrd. €} \end{aligned} \quad [4]$$

Bei einem Marktanteil von 10 % könnte die zeitliche Staubelastung um rund 130 Mio. Stunden reduziert werden, was einem finanziellen Gegenwert von 1,222 Mrd. Euro entspricht.

Kraftstoffeinsparungen

Bei der Bemessung der Kraftstoffeinsparungen durch Staureduzierungen wird zunächst analog zu [3] verfahren:

$$\begin{aligned} & (321,792 \text{ Mio. l (Treibstoff)} \times 15 \% (\text{Faktor} \\ & \text{außerorts}) \times 70,3 \%) + (321,792 \text{ Mio. l (Treibstoff)} \\ & \times 5 \% (\text{Faktor innerorts}) \times 29,7 \%) \\ & \approx 38,717 \text{ Mio. l (Treibstoffeinsparungen)} \end{aligned} \quad [5]$$

Der Anteil der Pkw mit Dieselmotoren liegt bei 32,2 (Kraftfahrt-Bundesamt 2017, S. 1), unter Lkw bei 88 (Statista 2017b) und unter Kraftomnibussen bei 97,5 % (Statista 2017a). Unter Sattelzugmaschinen liegt dieser schätzungsweise bei dem der

	Marktanteil autonome Fahrzeuge		
	10 %	50 %	90 %
Anzahl autonomer Fahrzeuge	4.684.363	19.070.478	26.535.675
Zeitersparnis (in Stunden, p. a.)*	129.943.189	297.857.972	503.744.349
Kostensparnis Zeit (in Euro, p. a.)	1.221.826.306	2.800.690.895	4.736.593.766
Kraftstoffeinsparungen (in Litern, p. a.)*	38.717.295	88.748.437	150.093.427
Kostensparnis Kraftstoffe (in Euro, p. a.)	47.056.826	107.864.452	182.422.877
Kostensparnis gesamt (in Euro, p. a.)	1.268.883.133	2.908.555.347	4.919.016.643
Je autonomen Fahrzeug (in Euro, p. a.)	271	153	185

*inklusive der Einsparungen für nicht-autonome Fahrzeuge.

Tab.2: Zeit-, Kraftstoff- und Kostensparnisse durch Staureduktionen.

Quelle: Eigene Darstellung

Kraftomnibusse. Daraus ergibt sich, gewichtet mit den zuvor angeführten Fahrzeugbeständen der jeweiligen Typklassen, ein Durchschnitt von knapp 36 %. Die in [5] berechneten Spritzeinsparungen werden nun anteilig mit den durchschnittlichen Literpreisen für Diesel und Benzin verrechnet:

$$\begin{aligned} & (38,717 \text{ Mio. l (Spriteinsp.)} \times 36 \% (\text{Anteil Dieself.}) \\ & \times 1,072 \text{ € (Literp. Diesel)}) + (38,717 \text{ Mio. l (Spriteinsp.)} \\ & \times (1 - 36 \% (\text{Anteil Benziner}) \times 1,296 \text{ € (Literp. Benzin)}) \\ & \approx 47,057 \text{ Mio. €} \end{aligned} \quad [6]$$

Insgesamt könnten durch die Stauvermeidung bei einem Marktanteil von 10 %, folgernd aus der Addition von 1,222 Mrd. Euro aus den Zeitersparnissen und 47,057 Mio. Euro aus den Kraftstoffeinsparungen, rund 1,269 Mrd. Euro eingespart werden. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für alle Marktanteilsszenarien.

Potenziale der Parkkostenreduzierung

Das Parken eines Fahrzeugs ist insbesondere in Ballungsräumen mit Kosten und Zeitaufwand verbunden. In Deutschland liegt der durchschnittliche Preis für die Nutzung eines Parkhauses bei 1,45 Euro pro Stunde (Reichwein 2016). Die Suche nach einem geeigneten Abstellplatz dauert im Durchschnitt zehn Minuten und macht rund ein Drittel des innerstädtischen Verkehrs aus. Zudem werden etwa 40 % aller Unfälle mit Sachschaden beim Ein- und Ausparken verursacht. Einige Automobilhersteller und -zulieferer arbeiten deshalb an technischen Lösungen für das autonome Parken von Fahrzeugen. Die ersten Konzepte werden bereits in praxisnahen Umgebungen erprobt und versprechen eine deutlich erhöhte Effizienz gegenüber dem manuellen Einparken (Zeit Online 2012). Durch die Nutzung der autonomen Fahrfähigkeiten der Fahrzeuge könnten diese darüber hinaus nach Absetzen der Insassen eigenständig günstigere Parkflächen außerhalb des Stadtkerns suchen. Litman (2016) geht davon aus, dass durch eine solche Praxis unter Berücksichtigung der Bau-, Landnutzungs- und Betriebskosten einer Parkfläche

⁵ Wir erfassen alle Straßen außerhalb von Ortschaften, wie Autobahnen und Fernstraßen, aber auch Kreis- und Landstraßen.

die jährlichen Aufwendungen für das Parken um etwa 57% gesenkt werden könnten. Gleichzeitig stehen die innerstädtischen Parkplatzflächen zukünftig für anderweitige Verwendungen, beispielsweise für Wohnraum oder Grünflächen, zur Verfügung.

Die Abschätzungen zu möglichen Potenzialen der Parkkostenreduzierung beziehen sich an dieser Stelle nur auf private Pkw und klammern alle andere Fahrzeugarten aus. Für die nachfolgenden Berechnungen wird deshalb die Anzahl autonomer Pkw und nicht die aller autonomen Fahrzeuge als Basis herangezogen. Wie oben erläutert unterstellen wir eine Verringerung der Anzahl der Pkw durch Car-Sharing.

Fagnant und Kockelman (2015) nehmen für die amerikanischen Autofahrer pauschal eine Ersparnis in Höhe von 250 USD pro autonomen Pkw an, weil autonome Fahrzeuge selbständig auf günstigeren Stellplätzen parken⁶. Laut INRIX (2017) liegen die durchschnittlichen Parkkosten für zwei Stunden in den USA bei 4 USD und in Deutschland bei 3 €. Skaliert man die pauschale Kosteneinsparung von 250 USD mit dem Verhältnis der Parkkosten in Deutschland und in den USA erhält man eine Kosteneinsparung in Deutschland von 187,5 € pro Jahr. Dieser Wert ist vielleicht etwas hoch. Laut einer Studie von APCOA (2013) zahlen deutsche Autofahrer pro Jahr durchschnittlich 60 € für Parkhäuser. Zudem fallen im Schnitt 16 € pro Jahr an Kosten für Strafzettel wegen Falschparkens an. INRIX (2017) gibt an, dass Autofahrer pro Jahr 98 € zu viel an Parkgebühren bezahlen, um Strafzettel zu vermeiden. Zusammen ergibt dies Kosten in Höhe von 174 €, die überwiegend in Innenstädten anfallen dürften. Wir unterstellen daher eine Pauschale von 174 € durch effizienteres Parken. Die potenziellen Kostenersparnisse ergeben sich aus der Anzahl autonomer Pkw multipliziert mit dieser Pauschale:

$$4.365.079 \text{ (Anzahl aut. Pkw bei 10\%)} \times 174 \text{ € (Pauschale)} \approx 759,524 \text{ Mio. €} \quad [7]$$

Zusätzlich soll der Zeitverlust aus der Parkplatzsuche bestimmt und monetär bewertet werden. Laut der Studie von INRIX (2017) verbringen die Deutschen jährlich rund 41 Stunden mit der Parkplatzsuche. Demnach ergäbe sich bei einem Marktanteil von 10% autonomer Fahrzeuge eine Zeitersparnis von

$$(4,37 \text{ Mio. (aut. Pkw bei 10\%)} \times 41 \text{ h (p. a.)}) \approx 179 \text{ Mio. h} \quad [8]$$

⁶ Fagnant und Kockelman und auch einer der Gutachter dieses Artikels weisen darauf hin, dass den geringeren Parkkosten höhere Fahrleistungen gegenüberstehen, die gegengerechnet werden müssten. Ohne zu wissen, wohin die Parkflächen aus den Innenstädten verlagert werden, ist die sehr schwierig. Daher verzichten wir hier auf eine Gegenrechnung.

	Marktanteil autonome Fahrzeuge		
	10 %	50 %	90 %
Anzahl autonome Pkw	4.365.079	17.474.058	23.662.119
Kostenersparnis Parken pro autonomem Pkw (in Euro, p. a.)	174	174	174
Kostenersparnis Parken (in Euro, p. a.)	759.523.793	3.040.486.116	4.117.208.723
Zeitersparnis Parkplatzsuche (in Stunden, p. a.)	178.968.250	716.436.384	970.146.883
Kostenersparnis Parkplatzsuche (in Euro, p. a.)	1.682.797.829	6.736.488.685	9.122.070.917
Kostenersparnis gesamt (in Euro, p. a.)	2.442.321.621	9.776.974.802	13.239.279.640
Je autonomen Pkw (in Euro, p. a.)	560	560	560

Tab. 3: Zeit- und Kostenersparnisse durch die autonome Parkplatzsuche.

Quelle: Eigene Darstellung

Der finanzielle Gegenwert dieser Zeitersparnis wird analog zu [4] berechnet:

$$\begin{aligned} & (179 \text{ Mio. h (Zeitersparnis)} \times 18,1 \% \text{ (Ant. berufl. Zwecke)} \times 17,125 \text{ € (Kosten berufl. Zwecke)}) \\ & + (179 \text{ Mio. h (Zeitersparnis)} \times (1-18,1 \%)) \\ & \times 7,695 \text{ € (Kosten private Zwecke)} \\ & \approx 1,683 \text{ Mrd. €} \quad [9] \end{aligned}$$

Bereits bei einem Marktanteil von nur 10% könnten jährlich etwa 179 Millionen Stunden eingespart werden. Dies entspricht einem finanziellen Gegenwert von 1,683 Mrd. Euro. Hinzu kommen rund 759,524 Millionen Euro an direkten Einsparungen bei den Parkkosten. Die Ergebnisse werden in Tabelle 3 für alle Marktanteile zusammengefasst. Der Ansatz berücksichtigt implizit, dass nicht alle Wegstrecken mit einem Kraftfahrzeug zurückgelegt werden. Jedoch darf angenommen werden, dass der Besitz eines autonomen Fahrzeugs auch seine Nutzung bedingt. Grundlage der Berechnungen ist hier deshalb nicht die Anzahl der gültigen Fahrerlaubnisse, sondern die der autonomen Pkw.

Fazit

Die Kostenersparnisse durch Stauvermeidung, Kraftstoffeinsparungen und autonome Parkkonzepte können sowohl für alle Fahrzeugarten als auch nur für Pkw zu Gesamtsummen addiert werden, siehe Tabelle 4. Bei der gesonderten Ausweisung der Gesamtersparnisse, die allein durch private Pkw erzielt werden könnten, werden die Unfall- und Stauvermeidungspotenziale nur anteilig berücksichtigt, nämlich mit dem prozentualen Anteil autonomer Pkw am Gesamtbestand autonomer Fahrzeuge in den jeweiligen Marktanteilsszenarien. Durch den Verkehr autonomer Fahrzeuge könnten in der Bundesrepublik Deutschland bei einem Marktanteil von 50% schätzungsweise 1.082 Leben gerettet, rund 872.500 Unfälle vermieden und jährlich fast

24,9 Mrd. Euro eingespart werden. Diese finanzielle Gesamtersparnis setzt sich zu etwa 49 % aus der Vermeidung von Unfällen, zu 11,7 % aus der Verminderung des Stauaufkommens und zu 39,3 % aus den Einsparungen der Parkkosten zusammen. Unsere Berechnungen beruhen auf einer Reihe von vereinfachenden Annahmen, die man bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen muss. Abgesehen von einer verstärkten Nutzung von Car-Sharing unterstellen wir, dass das Nutzungsverhalten von Fahrzeugen weitgehend gleichbleibe. Durch Kostensenkungen könnten aber Reboundeffekte durch eine erhöhte Nutzung von Fahrzeugen entstehen. Ebenso könnte es zu Beschäftigungs- und Einkommenseffekten in der Automobilwirtschaft oder auch der Verkehrsdienstleistungsbranche kommen, die man für eine Gesamtbetrachtung gegenrechnen müsste. Die hier angestellten Berechnungen sind nur als Ausgangspunkt für weitere Abschätzungen zu verstehen und sollten zukünftig umfangreich erweitert werden.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind die autonomen Assistenzsysteme noch sehr kostenintensiv und stellen deshalb eine Hürde für den Durchbruch auf dem Massenmarkt dar (Fagnant und Kockelman 2015, S. 176). Laut Dellenback (2013) lagen die zusätzlichen Kosten noch vor wenigen Jahren bei über 100.000 USD pro Fahrzeug. Bei größerer Marktdurchsetzung, und dementsprechend höherer Produktionsausgabe, dürften diese jedoch mittelfristig auf bis zu 1.000 bis 3.000 USD fallen. Fagnant und Kockelman gehen davon aus, dass die zusätzlichen Kosten bei einem Marktanteil von 10 % bei 10.000, bei 50 % bei 3.000 und bei 90 % bei nur noch 3.000 USD liegen. Die Werte werden hier eins zu eins in die Euro-Währung übertragen. Auf Grundlage einer solchen Annahme, lässt sich die Amortisationsdauer der zusätzlichen Anschaffungskosten bestimmen. Diese liegt bei einem Marktanteil von 10 % bei rund 8,3, bei 50 % bei 3,7 und bei 90 % bei unter 1,7 Jahren. Die Amortisationsdauern wurden allein auf der Basis der Gesamtersparnisse durch Pkw berechnet, um die Ergebnisse aus Verbrauchersicht bewerten zu können. Einige der angesetzten Kosten, wie zum Beispiel die der Rechtsprechung oder der Polizeieinsätze, die in die Bemessung des volkswirtschaftlichen Schadens einfließen, werden von öffentlicher Hand und somit nur indirekt vom privaten Verbraucher getragen.

Eine Verringerung dieser Kosten wandelt sich also nicht unmittelbar in ein finanzielles Kaufargument für autonome Fahrzeuge um. Der größte Teil der Kosten fällt jedoch für den privaten Nutzer direkt an. Die niedrigen Amortisationsdauern lassen daher vermuten, dass für die Verbraucher ein durchaus großer finanzieller Anreiz in der Anschaffung und Nutzung autonomer Fahrzeuge besteht.

	Marktanteil autonomer Fahrzeuge		
	10 %	50 %	90 %
Anzahl autonome Fahrzeuge	4.684.363	19.070.478	26.535.675
Anzahl autonome Pkw	4.365.079	17.474.058	23.662.119
Veränderung (Annahme, p. a.)	-4,7 %*	-23,7 %*	-42,6 %*
Summierte Kostenersparnisse alle Fahrzeuge (in Euro, p. a.)	5.498.357.384	24.870.661.714	45.940.396.252
Summierte Kostenersparnisse nur Pkw (in Euro, p. a.)	5.290.059.422	23.607.145.221	42.399.182.791
Summierte Kostenersparnisse je autonomem Pkw (in Euro, p. a.)	1.212	1.351	1.792
Amortisationsdauer der autonomen Technologien je autonomem Pkw (in Jahren)	8,25	3,70	1,67

*(Fagnant und Kockelman 2015, S. 175).

Tab. 4: Gesamtersparnisse autonomer Fahrzeuge und weitere Faktoren.

Quelle: Eigene Darstellung

Literatur

- Auto und Verkehr (2016): Parkgebühren in deutschen Städten vergleichsweise niedrig. Online verfügbar unter <http://auto-und-verkehr.de/parkgebuehren-deutschen-staedten-vergleichsweise-niedrig/>, zuletzt geprüft am 23.05.2018.
- Barter, Paul (2013): „Cars are parked 95% of the time“. Let's check! In: Blog Reinventing Parking. Online verfügbar unter <http://www.reinventingparking.org/2013/02/cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html>, zuletzt geprüft am 23.05.2018.
- Baum, Herbert; Kranz, Thomas; Westerkamp, Ulrich (2010): Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Mensch und Sicherheit, HeftM (208). Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft.
- Dellenback, Steven (2013): Director, Intelligent Systems Department, Automation and Data Systems Division, Southwest Research Institute. Communication by Email, 26.05.2013.
- Die Welt (2009): Rasende Autofahrer senken das Staurisiko. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/motor/article4252977/Rasende-Autofahrer-senken-das-Staurisiko.html>, zuletzt geprüft am 23.05.2018.
- Fagnant, Daniel; Kockelman, Kara (2015): Preparing a nation for autonomous vehicles. Opportunities, barriers and policy recommendations. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 77, S. 167–181.
- HEATCO – Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment (2005): Deliverable 5. Proposal for harmonised guidelines. Online verfügbar unter http://heatco.ier.uni-stuttgart.de/HEATCO_D5.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2018.
- Kanter, Zack (2015): How Uber's autonomous cars will destroy 10 million jobs and reshape the economy by 2025. Blog. Online verfügbar unter <http://zackkanter.com/2015/01/23/how-ubers-autonomous-cars-will-destroy-10-million-jobs-by-2025>, zuletzt geprüft am 23.05.2018.
- Litman, Todd (2016): Parking management. Strategies, evaluation and planning. Victoria Transport Policy Institute. Online verfügbar unter: http://www.vtpi.org/park_man.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2018.

- Maurer, Markus; Gerdas, Christian; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (2015): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin: Springer.
- Sessa, Carlo et al. (2015): D27.2 Results on the on-line DELPHI survey. CityMobil2. Online verfügbar unter: <http://www.citymobil2.eu/en/upload/Deliverables/PU/D27%202%20Results%20on%20the%20on-line%20DELPHI%20survey.pdf>, zuletzt geprüft am 08. 06. 2018.
- Shladover, Steven; Su, Dongyan; Lu, Xiao-Yun (2012): Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (2324), S. 63-70.
- Statistisches Bundesamt (2013): Verkehr auf einen Blick. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Stern, Raphael et al. (2017): Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles. Field experiments. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies (89), S. 205-221.
- strategy& (Hg.) (2016): Connected car report 2016. Opportunities, risk, and turmoil on the road to autonomous vehicles. Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/media/file/Connected-car-report-2016.pdf>, zuletzt geprüft am 07. 06. 2018.
- Umweltbundesamt (2011): Klimaschutz im Stadtverkehr. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz-im-stadtverkehr>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Zeit Online (2012): So parken wir morgen. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/mobilitaet/2016-04/autonomes-fahren-parken-bosch>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- 1972 bis 2017 (Cent pro Liter Superbenzin). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/776/umfrage/durchschnittspreis-fuer-superbenzin-seit-dem-jahr-1972/>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Statista (2017 d): Durchschnittlicher Preis für Dieseldieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2017* (Cent pro Liter). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieseldieselkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Statista (2017 e): Statistiken zum Thema Autofahrer. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/themen/759/autofahrer/>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Statistisches Bundesamt (2017) 2016. Mehr Unfälle, aber weniger Verkehrstote als jemals zuvor. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/07/PD17_230_46241.pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Umweltbundesamt (2012): Daten zum Verkehr. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.

Forschungsdaten

- APCOA PARKING (2013): Jede Parkplatz-Suche verschlingt unnötig viel Zeit und Geld. Online verfügbar unter <http://www.apcoa.de/nachrichten/extra-news/parking-studie.html>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- INRIX (2016): Global traffic scorecard. Ein Leitfaden zur Stausituation in Deutschland. Online verfügbar unter <http://inrix.com/resources/inrix-2016-traffic-scorecard-germany/>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- INRIX (2017): The impact of parking pain in the US, UK and Germany. Online verfügbar unter <http://www2.inrix.com/research-parking-2017>, zuletzt geprüft am 06. 05. 2018.
- Institut der deutschen Wirtschaft Köln (2016): Verkehrsunfälle. Anzahl. Online verfügbar unter <https://www.deutschlandin zahlen.de/?621>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2017): Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2017 gegenüber 1. Januar 2016. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2017_b_ueberblick_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Statista (2017 a): Bestand an Kraftomnibussen mit Diesel-Motor in Deutschland von 1996 bis 2017 (in 1.000 Stück). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/251774/umfrage/bestand-an-kraftomnibussen-mit-diesel-motor-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Statista (2017 b): Bestand an Lkw mit Diesel-Motoren in Deutschland von 1998 bis 2017 (in 1.000 Stück). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/251786/umfrage/bestand-an-lkw-mit-diesel-motor-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 23. 05. 2018.
- Statista (2017 c): Durchschnittlicher Benzinpreis in Deutschland in den Jahren



PROF. DR. MICHAEL ROOS

ist seit 2009 Inhaber des Lehrstuhls für Makroökonomik an der Ruhr-Universität Bochum und arbeitet vor allem in den Bereichen Komplexitätsökonomik, agentenbasierte Modellierung, Nachhaltigkeit und ökonomische Methodologie.



MARVIN SIEGMANN

hat einen Bachelor of Science, studiert Ethics – Economics, Law and Politics im Masterprogramm der Ruhr-Universität Bochum und arbeitet am Lehrstuhl für Makroökonomik in den Bereichen automatisiertes Fahren und agentenbasierte Modellierung.