

Autonomes Fahren

Aktueller Stand, Potentiale und Auswirkungsanalyse

Studie

**für den
Deutschen Industrie- und
Handelskammertag e.V.**

Dr. Klaus Esser
Dr. Judith Kurte

KE-CONSULT
Kurte & Esser GbR

Köln, April 2018

INHALTSVERZEICHNIS

1. Ausgangslage und Zielsetzung der Untersuchung	5
2. Definition und Abgrenzung des automatisierten Fahrens	7
3. Mobilitäts- und Transportkosten im Straßenverkehr	12
3.1 Güterverkehr	14
3.1.1 Fahrzeugkosten im Straßengüterverkehr	14
3.1.2 Kosteneinsparungen im Straßengüterverkehr	15
3.2 Personenverkehr	20
3.2.1 Fahrzeugkosten im Pkw-Verkehr	21
3.2.2 Kraftstoffeinsparungen	21
3.2.3 Zeitkosten im MIV	23
3.2.4 Zeitbewertung im MIV	27
3.2.5 Versicherung, Wartung und Reparatur	28
3.2.6 Pkw-Bestand im MIV	29
3.3 Umweltwirkungen	30
3.4 Zusammenfassung der Wirkungen auf Mobilitäts- und Transportkosten	31
4. Infrastrukturwirkungen	35
5. Verkehrssicherheit (Unfallzahlen, Unfallschwere)	38
6. Modal Split-Wirkungen und städtischer Verkehr	45
7. Raumwirkungen (Attraktivität des ländlichen Raums und Flächenbedarf)	50
8. IT-Sicherheit und Datenschutz	54
9. Konsequenzen für Deutschland und zusammenfassende Bewertung	58
Glossar	66
Quellen und Studien	67

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Klassifizierung der Automatisierung nach SAE	9
Tabelle 2:	Wirkungskomponenten der automatisierten Fahrzeuge im Bereich Mobilitäts- und Transportkosten für den Güterverkehr und MIV	13
Tabelle 3:	Einspareffekte und Amortisationsdauer von Platooning und autonomen Fahren auf dem Straßennetz der USA	17
Tabelle 4:	Ausgestaltung der Szenarien zu unterschiedlichen Entwicklungspfaden hin zu fahrerlosen Fahren	19
Tabelle 5:	Einspareffekte bei Treibstoffkosten durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im Personenverkehr	22
Tabelle 6:	Zeitkostensparnisse durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im MIV	25
Tabelle 7:	Verminderung der Treibhausgas- und Luftschadstoffkosten durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im Personenverkehr	31
Tabelle 8:	Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf Mobilitäts- und Transportkosten	34
Tabelle 9:	Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf die Infrastrukturkapazität	37
Tabelle 10:	Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr in Deutschland	39
Tabelle 11:	Verkehrssicherheitseffekte durch Abstandsregeltempomaten und Auffahrkollisionswarnung	40
Tabelle 12:	Unfallvermeidungspotentiale unterschiedlicher Assistenz- und Automatisierungsfunktionen	42
Tabelle 13:	Unfallkostensparnis durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im Personenverkehr	42
Tabelle 14:	Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf die Verkehrssicherheit	44
Tabelle 15:	Verkehrliche Auswirkungen autonomer geteilter Fahrzeugflotten im Stadtverkehr am Beispiel Lissabon	48
Tabelle 16:	Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf den Modal Split und städtischen Verkehr	50
Tabelle 17:	Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Raum- und Flächenwirkungen	54
Tabelle 18:	Mögliche Auswirkungen für Deutschland - Überblick	62

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Untersuchungs- und Analysegegenstände zum automatisierten Fahren	7
Abbildung 2:	Definition der Automatisierungsgrade nach BAST	8

1. Ausgangslage und Zielsetzung der Untersuchung

In die Entwicklung und Einführung des automatisierten und in der Endphase autonomen Fahrens werden derzeit erhebliche Anstrengungen und finanzielle Mittel von privaten Unternehmen, aber auch durch die öffentliche Hand investiert. Aus diesem Engagement und der Einführung der entwickelten Technologien am Markt werden von Seiten der Wissenschaft, der Forschung, der Politik und der Unternehmen vielfältige Chancen und zahlreiche positive Effekte erwartet.

Auf der Unternehmensebene und im Bereich der Automobilwirtschaft werden damit zuvorderst eine Stärkung der Innovationskraft im Bereich Fahrzeug- und Systemtechnologien sowie die Technologieführerschaft der Unternehmen auf den internationalen Märkten angestrebt. Deutschland – und das ist erklärtes Ziel der Politik – soll Leitanbieter in diesem Bereich werden. Darüber hinaus werden durch die Nutzung und Anwendung des autonomen Fahrens vor allem positive verkehrliche, infrastrukturpolitische sowie Klima- und Umwelteffekte erwartet.

Über die konkreten Auswirkungen, Konsequenzen und Effekte im Einzelnen und in ihrer Gesamtheit herrscht jedoch noch Unsicherheit. Dies liegt zum einen daran, dass viele Funktionen und Anwendungen noch in der Entwicklungsphase bzw. in der Testphase sind und erst ein Teil der Funktionen des automatisierten Fahrens im Markt eingeführt sind. Insofern beruhen die Auswirkungsanalysen und Bewertungen vor allem auf Modell- und Simulationsrechnungen, Demonstrationsvorhaben und Feldversuchen. Zum anderen werden im Rahmen von Evaluationen bzw. von Auswirkungsanalysen zum Teil nur einzelne Funktionen oder lediglich singuläre bzw. einzelne Effekte (z.B. auf den Verkehrsfluss, auf die Verkehrssicherheit) untersucht.

Einigkeit herrscht allgemein jedoch darüber, dass man es mit einer disruptiven Technologie zu tun hat, die die Mobilität, den Verkehrsablauf, die Logistik und das gesellschaftliche Leben nachhaltig verändern wird. Insgesamt entfaltet das automatisierte bzw. autonome Fahren vielfältige Wirkungen, die sich auf unterschiedlichen Feldern erstrecken. Hierzu zählen vor allem die Bereiche:

- Mobilitäts- und Transportkosten für Bürger und Wirtschaft,
- Modal Split,
- Infrastruktur,

- Verkehrssicherheit,
- Beschäftigung und Wertschöpfung,
- Raumwirkungen,
- IT-Sicherheit und Datenschutz.

Ziel der Studie ist es, die in vielfältigen Quellen und Untersuchungen verstreuten Informationen zu den Auswirkungen und Konsequenzen des autonomen Fahrens zu sammeln und thematisch zusammenzuführen, die möglichen Konsequenzen herauszuarbeiten sowie in einer anschaulichen und eingängigen Darstellung aufzubereiten.

Die Herausforderungen und Aufgaben, die sich aus der Heranziehung vieler verschiedener Quellen, Gutachten und Untersuchungen sowie der Ergebnisse der Expertengespräche ergeben, sind u.a.:

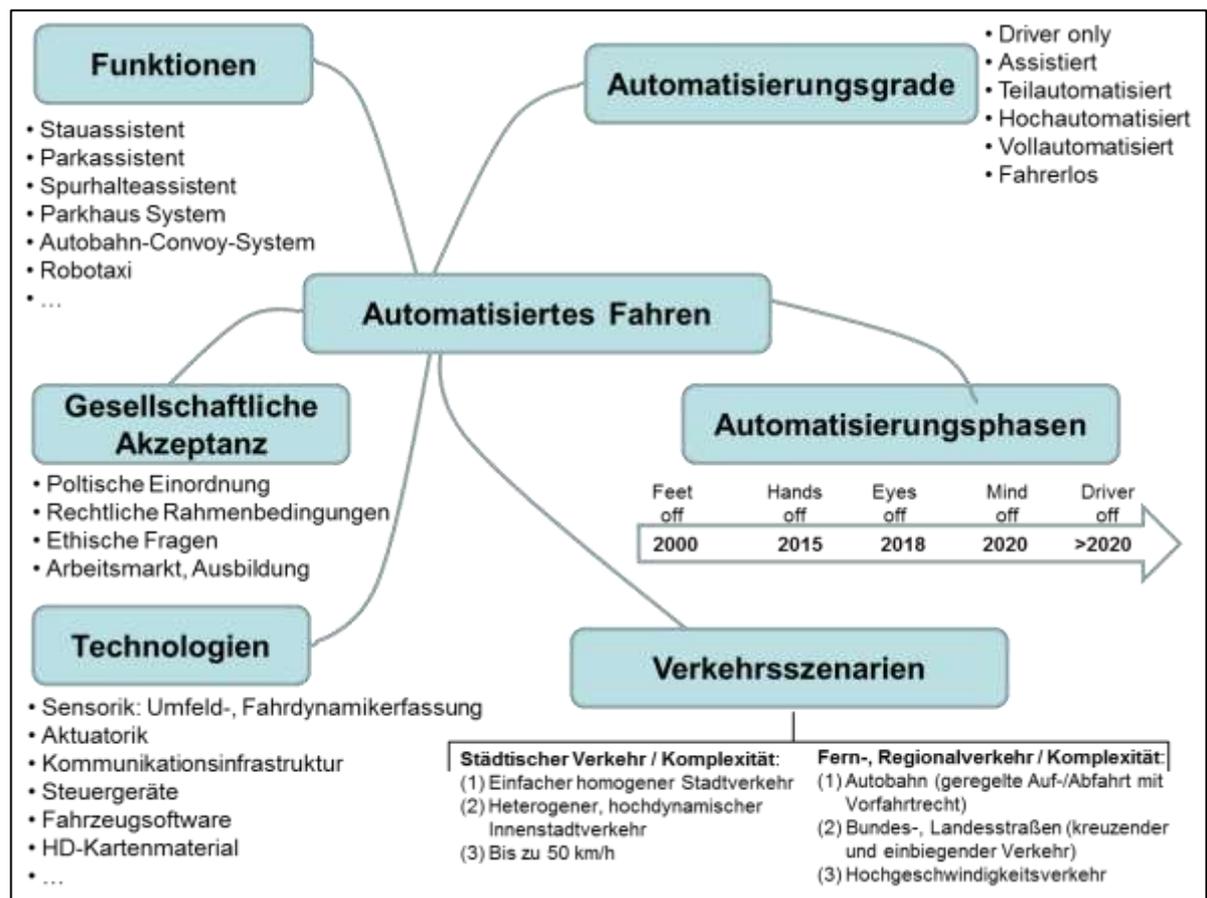
- die Definition und Abgrenzung der Stufen der Automatisierung und deren „Verknüpfung“ mit den ermittelten Wirkungen,
- die Berücksichtigung des Untersuchungs-, Wirkungszeitraums und der unterstellten „Marktdurchdringung“,
- die Auswertung der Studien und Systematisierung nach Wirkungsfeldern und
- die Übertragbarkeit z.B. internationaler Studienergebnisse auf Deutschland und Abschätzung der Konsequenzen für Deutschland.

Deshalb wird ein erstes konzeptionelles Arbeitspaket vorangestellt. In den weiteren Arbeitspaketen rücken die Wirkungsfelder in den Vordergrund.

2. Definition und Abgrenzung des automatisierten Fahrens

Unter dem automatisierten Fahren „versteht man das selbständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeugs im realen Verkehr mit bordeigenen Sensoren, nachgeschalteter Software und im Fahrzeug gespeichertem Kartenmaterial für die Erfassung der Fahrzeugumgebung“.¹ Das Thema des automatisierten Fahrens weist sehr unterschiedliche Facetten, Fragestellungen und Untersuchungsgegenstände auf. Einen Überblick und eine Auswahl der wesentlichen Themenbereiche gibt die nachfolgende Abbildung.

Abbildung 1: Untersuchungs- und Analysegegenstände zum automatisierten Fahren



Quelle: Eigene Darstellung.

Die einzelnen Aspekte haben für die Wirkungen und Konsequenzen des automatisierten Fahrens eine unterschiedliche Bedeutung. Im Einzelnen lässt sich folgendes festhalten:

¹ VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, S. 19.

- Die Wirkungen und Potentiale, die dem automatisierten Fahren in Studien und Veröffentlichungen zugeschrieben, sind in ihrer Struktur und im Umfang vom jeweils betrachteten **Automatisierungsgrad** abhängig. Insofern ist die Einstufung des automatisierten Fahrens wichtig, anhand derer die Wirkungen dann kenntlich gemacht werden können. Um die Automatisierungsgrade der einzelnen Systeme zu klassifizieren, wurden auf nationaler und internationaler Ebene mehrere Stufen von „driver only“ bis „fahrerlos“ definiert.

Gängige und häufig verwendete Einstufungen und Klassifizierungen liegen von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) und der SAE International (Society of Automotive Engineers) vor. Dabei sind die Stufen der Automatisierung - nach Definition der BASt² - wie folgt definiert:

Abbildung 2: Definition der Automatisierungsgrade nach BASt



Quelle: Eigene Darstellung nach BASt Bundesanstalt für Straßenwesen.

² BASt Bundesanstalt für Straßenwesen, Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Forschung kompakt 11/12, Bergisch Gladbach 2012.

Eine ähnliche, nur leicht abweichende Klassifizierung nimmt die SAE International (Society of Automotive Engineers) vor.

Tabelle 1: Klassifizierung der Automatisierung nach SAE

SAE-Level	Bezeichnung der Stufen	Beschreibung
Fahrer überwacht das Fahrumfeld		
Level 0:	No Automation	Übernahme der dynamischen Fahrfunktionen vollständig durch den Fahrer
Level 1:	Driver Assistance	Lenken oder Bremsen/Beschleunigen durch ein Fahrerassistenzsystem in bestimmten Fahrsituationen
Level 2:	Partial Automation	Lenken und Bremsen/Beschleunigen durch ein Fahrerassistenzsystem in bestimmten Fahrsituationen
Automatisierungssystem überwacht das Fahrumfeld		
Level 3:	Conditional Automation	Übernahme aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem in bestimmten Fahrsituationen, Fahrer reagiert angemessen, auf die Aufforderung einzugreifen
Level 4:	High Automation	Übernahme aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem in bestimmten Fahrsituationen; auch wenn der Fahrer nicht angemessen reagiert, auf die Aufforderung einzugreifen
Level 5:	Full Automation	Vollständige Übernahme aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem in allen Fahrsituationen

Quelle: SAE, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, Standard J3016, 2014.

- Die Wirkungen und Effekte hängen von den betrachteten **Funktionen** ab, die in den Fahrzeugen zum Einsatz kommen und in den Studien jeweils Grundlage spezifischer Auswirkungsanalysen sind. Dabei geht es um Fahrerassistenzfunktionen sowie um Funktionen der Lokalisierung, der Interaktion und Kooperation. Die Funktionen können wiederum den Automatisierungsgraden zugeordnet werden. Ferner liegen den jeweiligen Funktionen sehr unterschiedliche **Einführungszeiträume** (Automatisierungsphasen) zugrunde. Beispielhaft können folgende

Funktionen und Einführungszeiträume den Automatisierungsgraden zugordnet werden:³

- Stufe 1 - Fahrerassistenzsysteme wie z.B. ACC (Adaptive Cruise Control) und Spurhalteassistent sind bereits am Markt eingeführt und etabliert.
 - Stufe 2 - teilautomatisierte Systeme wie Schlüsselparken, Parkmanöverassistent und Stauassistent, deren Einführungszeitraum zwischen den Jahren 2015 und 2020 liegt.
 - Stufe 3 - hochautomatisierte Systeme wie Staufolgefahren / Fahren im Stau und Fahren auf der Autobahn, deren Einführungszeitraum – eine entsprechende rechtliche Rahmengesetzgebung vorausgesetzt - zwischen den Jahren 2022 und 2024 zu erwarten ist.
 - Stufe 4 - vollautomatisierte Systeme wie Valet Parking (Fahrerloses Parken) und Fahren in der Stadt, deren Einführungszeitraum – eine entsprechende rechtliche Rahmengesetzgebung vorausgesetzt - ab dem Jahr 2022 und nach dem Jahr 2030 zu erwarten ist.
 - Stufe 5 - fahrerloses Fahren (autonome Fahrzeuge, Robotaxi) dessen Nutzung und Markteinführung deutlich später als das Jahr 2030 angeboten wird.
- Mit den Automatisierungsgraden und den einzelnen Funktionen kommen unterschiedliche **Technologien** in den Fahrzeugen zur Anwendung. Je höher die Stufen der Automatisierung desto umfangreicher und komplexer die technologischen Komponenten, die in die Fahrzeuge integriert werden. Dazu zählen u.a. die Sensorik (Umfeld-Fahrdynamikerfassung), die Aktuatorik, die Kommunikationsinfrastruktur, die Fahrzeugsoftware und das HD-Kartenmaterial. Die notwendigen technologischen Komponenten sind die Grundlage für die Funktionsfähigkeit der Automatisierungssysteme und Funktionen und damit für die Erzielung der positiven Wirkungen (Nutzeneffekte). Auf der anderen Seite beeinflussen sie ebenso die zusätzlich entstehenden Kosten (der Fahrzeugausrüstung) bei der Anschaffung der Fahrzeuge.
 - Ferner bestimmen die Einsatzgebiete und Anwendungsfälle der Systeme des automatisierten Fahrens die erzielbaren Nutzenwirkungen. Dahinter steht die Frage der **Verkehrsszenarien** und der Komplexität der zu

³ Vgl. VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, S. 10ff; Kollasche, I, Schwedes, O., Mobilität im Wandel, Transformationen und Entwicklungen im Personenverkehr, Friedrich-Ebert-Stiftung – Wirtschafts- und Sozialpolitik, WISO Diskurs Heft 14/2016, S. 22.

übernehmenden Fahraufgaben durch die Systeme. Unterschieden werden kann zwischen Fern- / Regionalverkehr und städtischem Verkehr. Im heterogenen und hochdynamischen Innenstadtverkehr (mit entsprechenden Knotenpunktverkehren) stellt sich die Aufgabe für automatisierte Fahrfunktionen im Vergleich zu einem einfachen homogenen Stadtverkehr als viel komplexer dar. Gleiches gilt für den Fernverkehr. Hier kann zwischen dem Autobahnverkehr (mit geregelten Auf- und Abfahrten) und dem komplexeren Verkehr auf Bundes- und Landesstraßen (kreuzender und einbiegender Verkehr) unterschieden werden.

- Je weiter die Automatisierung voranschreitet spielen auch Fragen der **gesellschaftlichen Akzeptanz** eine zunehmend wichtige Rolle. Der Prozess der schrittweisen Einführung des automatisierten Fahrens bedarf der politischen Gestaltung und Begleitung. Automobilindustrie und Nutzer sind auf einen rechtssicheren Rahmen (auf nationaler und internationaler Ebene) angewiesen. Änderungs- bzw. Anpassungsbedarf gibt es vor allem beim „Wiener Übereinkommen“,⁴ im nationalen Straßenverkehrsrecht und im internationalen Kfz-Zulassungsrecht.⁵ Anpassungen und Änderungen sind auch bei den gesetzlichen Haftungsregelungen notwendig. Daneben treten beim (teil-)autonomen Fahren auch ethische Fragen in den Vordergrund. So führt die Ethik-Kommission „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“ in ihrem Bericht aus: „Lässt sich ein Schadensereignis im Straßenverkehr nicht technisch vollständig ausschließen, so wird es bei verstärktem Einsatz automatisierter Fahrsysteme gleichwohl zu Haftungs- und Überwachungsfragen und auch zu dilemmatischen Konfliktentscheidungen in konkreten Verkehrssituationen kommen. (...) Dilemma-Situationen sind dadurch gekennzeichnet, dass ein automatisiertes Fahrzeug vor der Entscheidung steht eines von zwei Übeln notwendigerweise verwirklichen zu müssen.“⁶

⁴ Das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr ist ein internationaler Vertrag zur Standardisierung der Verkehrsregeln. Siehe hierzu: Deutscher Bundestag, Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur (15. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 18/8951 – Entwurf eines Gesetzes zur Änderung der Artikel 8 und 39 des Übereinkommens vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr, Drucksache 18/9780 vom 27.09.2016.

⁵ Vgl. VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, S. 23.

⁶ Ethik-Kommission Automatisiertes und Vernetztes Fahren, eingesetzt durch den Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bericht Juni 2017, S. 15ff.

Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen und ethischen Fragen werden mit der Einführung automatisierter, autonomer und vernetzter Fahrzeuge erhebliche Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt verbunden sein. Dies betrifft im Besonderen das Thema Berufsbild, Ausbildung und Qualifizierung von Arbeitskräften. Das Berufsbild des Kfz-Mechanikers wird sich grundlegend wandeln. So führt die acatech-Studie⁷ aus, dass der Bedarf an Arbeitskräften und Fachleuten für Digitalisierung, E-Mobilität, Smart Mobility und vernetztes Auto deutlich steigen wird. Zu erwarten sind Verschiebungen weg von den klassischen Maschinenbauern hin zu ganz spezifisch ausgebildeten IT-Fachleuten sowie Elektrotechnikern. „Die Berufsbilder werden nicht mehr auf einzelne Technologien fokussiert sein, sondern gestaltungsoffen durch typische Arbeitsabläufe und -prozesse charakterisiert.“ Andererseits besteht damit aber auch die Chance, Jugendliche für die neuen Felder und Themen zu interessieren und für eine Ausbildung zu gewinnen.

Die rechtlichen (Haftungsrecht, Versicherungsrecht) und ethischen Fragen sowie die Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt sind im Weiteren nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

3. Mobilitäts- und Transportkosten im Straßenverkehr

Die Nutzung automatisierter Fahrfunktionen und automatisierter bzw. autonomer Fahrzeuge verändert die Mobilitäts- und Transportkosten in erheblichem Ausmaß. Auf der einen Seite entstehen für die Anwender zusätzliche Kosten der Fahrzeugausstattung (Soft- und Hardware). Auf der anderen Seite sind mit dem Einsatz automatisierter bzw. autonomer Fahrzeuge Kosteneinsparungen für die Nutzer der Fahrzeuge verbunden. Hierüber besteht ein allgemeiner Konsens. Einsparungen bei den Kosten der Mobilität werden dabei sowohl im Güter- und Wirtschaftsverkehr, im gewerblichen Personenverkehr (ÖV und Taxiverkehr), als auch im motorisierten Individualverkehr (MIV) erwartet. Die Ursachen für die Einspareffekte resultieren vor allem aus Effizienzsteigerungen infolge einer Optimierung und Verbesserung der Verkehrsabläufe.

Die Wirkungen im Güterverkehr und speziell im MIV setzen sich jedoch im Einzelnen aus unterschiedlichen Komponenten und Effekten zusammen, die sich in Ausmaß und Struktur deutlich unterscheiden. Der Einsatz und die Nutzung automatisierter Fahrzeuge erfordert Investitionen auf Fahrzeugseite

⁷ Siehe hierzu: Lemmer, K. (Hrsg.): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2016, S. 83f.

und im Bereich der Infrastruktur (einschließlich der IT-Infrastruktur). Damit entstehen Kosten bei den Fahrzeughaltern und bei den Infrastrukturbetreibern. Dem stehen positive Wirkungen (Nutzen aus Kosteneinsparungen) gegenüber. Bei den Nutzenwirkungen stehen im Güterverkehr Einsparungen bei den Betriebs- und Fahrpersonalkosten im Vordergrund. Im MIV spielen die Kraftstoff- und Zeitkostensparnisse neben den anderen Kosten des Fahrzeugunterhalts eine entscheidende Rolle. Zu berücksichtigen ist, dass im Güterverkehr im Vergleich zum MIV bereits ein anderer Umsetzungsstand der Automatisierung erreicht worden ist. Dort kommen bereits Systeme der Fahrerassistenz und teilautomatisierte Systeme verstärkt zum Einsatz.

Betrachtet man die Wirkungen für das gesamte System, so sind zum Teil gegenläufige Effekte zu erwarten, die die Einspareffekte zumindest abschwächen können. Für eine Beurteilung der zu erwartenden Effekte sind die Kenntnis und eine Bewertung der Einzelwirkungen notwendig. Einen Überblick über die einzelnen Wirkungskomponenten gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 2: Wirkungskomponenten der automatisierten Fahrzeuge im Bereich Mobilitäts- und Transportkosten für den Güterverkehr und MIV

Güterverkehr	MIV
Nutzer-, anwenderbezogen, einzelwirtschaftlich	
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugkosten (Soft- und Hardware) • Kraftstoffkosten 	
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrpersonalkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitkosten • Zeitbewertung
<ul style="list-style-type: none"> • Versicherungen • Wartung und Reparatur 	
<ul style="list-style-type: none"> • Kapitalkosten, Abschreibungen • Flottengröße 	<ul style="list-style-type: none"> • Pkw-Besitz / Pkw-Bestand
Systembezogen, gesamtwirtschaftlich	
<ul style="list-style-type: none"> • Infrastrukturkosten (Verkehrs- und IT-Infrastruktur) • Netzeffekte (Ergebnis der einzelwirtschaftlichen Wirkungen) • Mehrverkehr, Induzierter Verkehr 	

Quelle. Eigene Darstellung.

Zu den einzelnen Wirkungskomponenten im Bereich der Mobilitäts- und Transportkosten liegen aus Untersuchungen und Studien Wirkungsabschätzungen in sehr unterschiedlichem Ausmaß und Detailliertheit vor. Diese werden in den nachfolgenden Ausführungen aufgegriffen.

3.1 Güterverkehr

3.1.1 Fahrzeugkosten im Straßengüterverkehr

Die Nutzung automatisierter bzw. autonomer Fahrzeuge erfordert Investitionen auf der Fahrzeugseite von den Nutzern der Fahrzeuge in Soft- und Hardwareanwendungen. Die Ausstattung der Fahrzeuge mit zusätzlicher Technologie und erweiterten Funktionen schlägt sich in einem höheren **Anschaffungspreis der Fahrzeuge** nieder. Dies gilt bei der Beschaffung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen.

Zu den Kosten der Fahrzeugausstattung liegen nur sehr wenige quantitative Abschätzungen vor. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Fahrzeuge im Status von Prototypen befinden und sich hochautomatisierte bis vollautomatisierte Fahrzeuge derzeit allenfalls im kontrollierten und nichtrealweltlichen Probetrieb z.B. auf dem „Digitalen Testfeld Autobahn“ bewegen. Bis zur Vermarktung und dem Verkauf an die Fahrzeugnutzer wird es noch einige Jahre dauern. Insofern können auch noch keine zuverlässigen Abschätzungen zu den Mehrkosten bzw. zu den höheren Anschaffungskosten gegeben werden, die sich im Markt bei entsprechendem Angebot an und Nachfragen nach Fahrzeugen bilden werden. Fahrzeughersteller und Zulieferer gehen jedoch einheitlich von höheren Anschaffungskosten (im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen) aus. Dies zeigen aktuelle Befragungen und Auswertungen von Expertengesprächen.⁸

Eine quantitative Kostenabschätzung auf der Basis von Expertengesprächen liegt für schwere **Nutzfahrzeuge** vor.⁹ Demnach steigen die Kosten der Fahrzeugausstattung (mit Soft- und Hardware) von der Stufe 1 (Assistenzsysteme) mit 1.800 US \$ je Fahrzeug auf bis zu insgesamt 23.400 US \$ je Fahrzeug bei Stufe 5 (autonomes Fahrzeug) an. Dabei ist die Software für 85% und die Hardware für rund 15% der zusätzlichen Kosten verantwortlich.

⁸ Vgl. Dornier Consulting International, Autonomes Fahren, Erwartungen an die Mobilität der Zukunft, Berlin 2017, S. 17.

⁹ Roland Berger, Automated Trucks, The next big disruptor in the automotive industry? Automated Truck Study-Short Version. Chicago / Munich – April 2016, S.11.

Das International Transport Forum beziffert die zu erwartenden zusätzlichen Fahrzeugkosten für fahrerloses Fahren bei Lkws auf unter 5% der Gesamtkosten. Mittel- bis langfristig wird sogar die Chance gesehen, dass die Kosten unter denen für Fahrzeuge des fahrergebundenen Güterverkehrs z.B. infolge baulicher Anpassungen (z.B. kann auf den Bau einer Schlafkabine für den Fahrer verzichtet werden) liegen können.¹⁰

3.1.2 Kosteneinsparungen im Straßengüterverkehr

Den zusätzlichen Anschaffungskosten stehen Nutzen in Form von **Kosteneinsparungen** und Effizienzsteigerungen gegenüber. Dies spielt insbesondere für den **Güterverkehr** eine für die Attraktivität, die Akzeptanz- und Nutzungsbereitschaft und damit für die Marktdurchdringung entscheidende Rolle. Für die Anschaffung automatisierter bzw. autonomer Nutzfahrzeuge ist entscheidend, dass sich die höheren Anschaffungskosten rechnen. Je höher die Nutzenwirkungen (= Kosteneinspareffekte), desto schneller amortisiert sich die Investition in die Fahrzeuge und desto schneller erfolgt eine Marktdurchdringung der Systeme im Lkw-Markt.

Dabei spielt im Güterverkehr eine Vielzahl von Wirkungskomponenten eine Rolle. Ausgehend von einem TCO-Ansatz (Total Cost of Ownership) werden durch das automatisierte bzw. autonome Fahren die Kraftstoffkosten, die Fahrpersonalkosten, die Kosten für Versicherungen, Wartung und Reparatur sowie die Kapitalkosten positiv beeinflusst.

Vor dem Hintergrund der Kostenstrukturen ist der Nutzfahrzeugmarkt vor allem aus zwei Gründen der prädestinierte Adressat autonomer Fahrzeuge. Die Vorteile des automatisierten Fahrens kommen gerade im Nutzfahrzeugbereich aufgrund der hohen Jahresfahrleistungen zum Tragen:

- (1) Automatisierte Fahrfunktionen sind bei hohen Jahresfahrleistungen besonders für Flottenbetreiber von besonderem Interesse. Die Einsparpotentiale beim Kraftstoffverbrauch sind hoch, weil der Verkehr u.a. gleichmäßiger fließen kann.¹¹
- (2) Zum zweiten spielen die Fahrpersonalkosten im Nutzfahrzeugbereich eine wichtige Rolle.

Wirkungsanalysen und Einsparpotentiale des automatisierten bzw. autonomen Fahrens sind in einigen Studien und Marktanalysen abgeschätzt worden.

¹⁰ International Transport Forum, Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport - OECD /ITF 2017, S. 21.

¹¹ Vgl. VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, S. 8.

In einer Szenarienrechnung für die USA analysiert eine Studie von Roland Berger die Wirkungen des Truck Platooning (Stufe 3, hochautomatisiert) und des Fahrerlosen Fahrens (Stufe 5, autonomes Fahren).¹² Dabei wird ab dem Jahr 2020 die Möglichkeit zur Bildung eines Truck-Platoons auf stark frequentierten Highways (mit einer Wahrscheinlichkeit von 40% - 50%) und des vollautomatisierten, fahrerlosen Fahrens in Platoons ab dem Jahr 2040 auf stark frequentierten Highways unterstellt. Die Studie kommt zu dem Schluss:

- Die zunehmende Automatisierung im Schwerlastverkehr (Platooning, automatisiertes Fahren) verringert den Treibstoffverbrauch im Jahr 2020 um 5% und im Jahr 2040 um 10%.
- Die Lkw-Unfallzahlen werden im Jahr 2020 um 30% und im Jahr 2040 um 90% reduziert.
- Der Fahrerbedarf vermindert sich im Jahr 2040 um 10%.
- Weitere Effekte wie die Reduzierung der Staukosten und eine verbesserte Fahrzeugnutzung werden genannt, aber nicht explizit quantifiziert.

Die Modellrechnungen kommen zu einem Einspareffekt von 1,67 US \$ je Meile (nachrichtlich: etwa 0,90 € je Fahrzeugkilometer), wobei mehr als zwei Drittel auf die Einsparungen beim Fahrpersonal und bei den Treibstoffkosten zurückzuführen sind. Auf dieser Basis werden dann für verschiedene Verkehrs- und Einsatzszenarien auf dem Straßennetz der USA die Einspareffekte (je Schwerverkehrs-Lkw) und die Amortisationsdauer berechnet (siehe nachfolgende Tabelle).

¹² Roland Berger, Automated Trucks, The next big disruptor in the automotive industry? Automated Truck Study-Short Version. Chicago / Munich – April 2016.

Tabelle 3: Einspareffekte und Amortisationsdauer von Platooning und autonomen Fahren auf dem Straßennetz der USA

	Stufe 3: Platooning	Stufe 5 autonomes Fahren
Langstreckenverkehr (stark frequentierte Highways)		
Kosteneinsparungen (US \$ pro Jahr und Lkw)	2.400	72.700
Amortisationsdauer	5 ½ Jahre	4 Monate
Regionalverkehr (stark frequentierte Highways)		
Kosteneinsparungen (US \$ pro Jahr und Lkw)	1.400	42.400
Amortisationsdauer	9 1/3 Jahre	7 Monate
Regionalverkehr (schwach frequentierte Straßen)		
Kosteneinsparungen (US \$ pro Jahr und Lkw)	200	900
Amortisationsdauer	mehr als 61 Jahre (737 Monate)	mehr als 24 Jahre (298 Monate)

Quelle: Roland Berger, Automated Trucks, The next big disruptor in the automotive industry? Automated Truck Study-Short Version. Chicago / Munich – April 2016.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass die hohen Einsparungen in Stufe 5 auf stark frequentierten Straßen im Langstrecken- und Regionalverkehr aus der Einsparung von Fahrpersonal resultieren. Die Amortisationsdauer wird daneben von der Möglichkeit, Platooning zu nutzen, determiniert. Auffällig ist die in vielen Fällen lange Amortisationsdauer. Lediglich beim autonomen Fahren im Langstrecken- und Regionalverkehr ist mit einer vergleichsweise schnellen Amortisation der getätigten Investition zu rechnen.

Die Ergebnisse geben einen ersten Eindruck von den (absoluten) Kosteneinspareffekten im Güterverkehr. Ihre Übertragbarkeit auf Deutschland ist jedoch nur eingeschränkt möglich. Dies liegt an dem den Berechnungen zugrunde liegenden Straßennetz, den durchschnittlich unterstellten Transportweiten und der Verkehrsbelastung im Netz.

Vergleichbare Marktanalysen und Berechnungen für die USA und Europa kommen aber ebenfalls auf deutliche Kostensenkungspotentiale. In diesen werden **Einsparpotentiale bei den Betriebskosten** bei einem autonom fahrenden (durchschnittlichen) Lkw ab 2025 von 28% (PwC)¹³, 30%

¹³ PwC Strategy&, Truck Study 2016, The Era of Digitized Trucking, 2016, S. 18.

(International Transport Forum)¹⁴ bis hin zu 35% (bezogen auf die TCO) berechnet (McKinsey)¹⁵. In der zuletzt genannten Studie wird ein noch höherer Einspareffekt für leichte Nutzfahrzeuge durch das autonome Fahren von bis zu 50% erwartet.

In den Marktstudien wird darauf verwiesen, dass sich die Wirkungen vor allem aus Einsparungen bei den Personalkosten und bei den Kraftstoffkosten zusammensetzen. PwC sieht durch Platooning ein Einspareffekt bei den **Kraftstoffkosten** von rund 7%. Roland Berger beziffert den Einspareffekt in Höhe von 8% für das führende Fahrzeug und in Höhe von 14% für die folgenden Fahrzeuge bei einer Geschwindigkeit von 85 km/h.¹⁶ Das International Transport Forum beziffert die Kraftstoffkosteneinsparungen (infolge verbesserten Brems- und Beschleunigungsverhaltens) bei automatisiertem „eco-driving“ (keine Platoons) in Höhe von 4-10%, bei teilweise manuell gesteuerten Platoons in Höhe von 6-10% und bei vollautomatisierten Platoons bei über 10% Einsparungen.

Die sonstigen Kostenbestandteile (insbesondere Abschreibungen, Versicherungen, Wartung) tragen nur in sehr geringem Ausmaß zur Entlastung bei. Die beim hoch- und vollautomatisierten Fahren und in der Endstufe autonomen Fahren entstehenden Kostensenkungen sind danach zu 80-90% auf Einsparungen bei den **Fahrpersonalkosten** und zu 10-15% auf Einsparungen bei den Kraftstoffkosten zurückzuführen.

Die Einsparpotentiale beim Fahrpersonal durch die Nutzung autonomer Fahrzeuge werden durch die Modellrechnungen des International Transport Forum bestätigt. Dort wird durch Bildung von vier Szenarien unterschiedlicher Marktdurchdringung fahrerlosen Fahrens der zukünftige Fahrerbedarf im Güterverkehr abgeleitet. Die vier Szenarien (Baseline-Szenario, konservatives, reguliertes und disruptives Durchdringungsszenario) betrachten unterschiedliche Regionen (Europa, USA), unterschiedliche Grade der Marktdurchdringung (bis 2040) und unterschiedliche Einsatzgebiete (Langstrecke, urbaner Verkehr) für fahrerloses Fahren (siehe nachfolgender Kasten).

¹⁴ International Transport Forum, Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport - OECD /ITF 2017, S. 22.

¹⁵ McKinsey&Company, Delivering change, The transformation of commercial transport by 2025, September 2016, S. 18f.

¹⁶ Roland Berger, On the road toward the autonomous truck, 2015, S. 4.

Tabelle 4: Ausgestaltung der Szenarien zu unterschiedlichen Entwicklungspfaden hin zu fahrerlosen Fahren

<p>A. Baseline Szenario:</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine Zulassung vollautomatisierter Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen in den kommenden 20 Jahren - Nutzung lediglich in nicht-öffentlich zugänglichen, geschlossenen Umgebungen wie Häfen, Minen
<p>B. Konservatives Marktdurchdringungsszenario:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fahrerlose Technologien werden ab dem Jahr 2030 langsam im Markt eingeführt - zuerst auf wenigen Langstrecken-Destinationen, ab 2033 auch in wenigen Städten in Europa und den USA
<p>C. Reguliertes Durchdringungsszenario:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fahrerlose Technologien sind auf allen Langstrecken ab dem Jahr 2028 erlaubt, in Städten ab dem Jahr 2030, - die Technologie ist im Langstreckengüterverkehr innerhalb von drei bis fünf Jahren allgegenwärtig, in den Städten ist die Adaption weniger stark
<p>D. Disruptives Durchdringungsszenario:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fahrerlose Technologie wird bereits auf Mittelstrecken ab 2021 ausgerollt, stark expandierend, und ähnlich in Städten bereits ab 2022

Quelle: International Transport Forum, Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport - OECD /ITF 2017, S. 26f.

Die Szenarienbildung basiert auf Literaturrecherchen, Unternehmensmitteilungen und -ankündigungen sowie auf Stakeholder-Interviews. Der Fahrerbedarf ohne automatisiertes Fahren im Güterverkehr liegt in den USA nach diesen Szenarienrechnungen im Jahr 2030 bei 2,7 Mio. (im Jahr 2040 bei 2,9 Mio.) und in Europa im Jahr 2030 bei rund 3,7 Mio. (im Jahr 2040 bei 3,8 Mio.). Je nach Szenario der Marktdurchdringung werden in den USA im Jahr 2030 zwischen 44% und 66% (im Jahr 2040 zwischen 28%-86%) und in Europa im Jahr 2030 zwischen 59% und 68% (im Jahr 2040 zwischen 21%-87%) weniger Fahrer benötigt. Das kann auch ein Beitrag zur Lösung der Problematik des Fahrermangels sein.

Kosteneinsparungen können sich für Flottenbetreiber im Güterverkehr ferner durch eine **effizientere Nutzung der vorhandenen Fahrzeugkapazitäten** ergeben. Durch das autonome fahrerlose Fahren kann das Nutzfahrzeug intensiver, d.h. länger am Tag genutzt werden. Stillstandzeiten z.B. durch die gesetzlich vorgeschriebenen Pausen des Fahrers können reduziert werden. Dadurch wird eine Senkung der Kapitalkosten (Verringerung des gebundenen Kapitals) möglich. Auf die möglichen Einspareffekte infolge einer Optimierung der Flottenstärken wird auch in verschiedenen Studien verwiesen. Das International Transport Forum erklärt, dass Einsparungen durch reduzierte Flottenstärken infolge längerer täglicher Nutzungszeiten

(z.B. keine Pausennotwendigkeiten) in Höhe von bis zu 50% auf der Langstrecke (bei gleichem Transportaufkommen) durchaus plausibel sind.¹⁷ Allerdings wird auch darauf hingewiesen, dass eine stärkere Nutzung der Fahrzeuge höhere Wartungskosten verursacht, die Nutzungsdauer der Fahrzeuge und damit den Zeitraum bis zum Ersatzbedarf verkürzt und die Ersatzkosten erhöht.¹⁸ Über den letztlichen Saldo, also den Netto-(Entlastungs-)effekt liegen keine quantitativen Angaben vor. Es ist davon auszugehen, dass die Kosteneinsparpotentiale überwiegen.

3.2 Personenverkehr

Im **Motorisierten Individualverkehr (MIV)** spielen anders als im Straßengüterverkehr Fahrpersonalkosten keine Rolle. Anders zu sehen ist die Situation im ÖV und Taxigewerbe, bei denen die Fahrpersonalkosten vergleichbar dem Straßengüterverkehr von Bedeutung sind. Im Zentrum der möglichen Kosteneinsparpotentiale im MIV stehen dagegen vielmehr die Kraftstoffkosten und die Zeitkosten. Kraftstoffkosten- und Zeitkostensparnisse ergeben sich im Personenverkehr vor allem durch eine Verstetigung des Verkehrsflusses und damit durch eine Reduzierung der Stautunden im Pkw-Verkehr.

Die konkreten Wirkungen im Personenverkehr hängen von den in den Fahrzeugen eingesetzten Funktionen und Systemen ab. Während Fahrerassistenzsysteme schon heute in den Fahrzeugen verbaut sind und zur Anwendung kommen, treten teilautonome Systeme gerade erst in den Markt ein (z.B. Parkmanöverassistent, Stauassistent: vgl. Kap. 2). Darüber hinaus werden hoch- und vollautomatisierte sowie autonome Fahrzeuge erst nach dem Jahr 2020 im Markt eingeführt und zur Anwendung kommen. Nach VDA werden in einigen Jahren erste Fahrzeuge mit entsprechender Technologie (Sensorik, Software) ausgerüstet sein, mit der Funktionen der Hoch- und Vollautomatisierung für spezifische Anwendungsszenarien genutzt werden können. Dabei handelt es sich als erstes um Fahrfunktionen für Autobahn- und Staufahrten.¹⁹

Dementsprechend stellt sich auch die Studien- und Quellenlage dar. Während zu bestimmten Fahrerassistenzsystemen bereits quantitative Ergebnisse aus der Nutzung der Systeme im Markt vorliegen, beruhen die

¹⁷ International Transport Forum, Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport - OECD /ITF 2017, S. 22.

¹⁸ McKinsey&Company, Delivering change, The transformation of commercial transport by 2025, September 2016, S. 19.

¹⁹ VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, S. 14.

Aussagen zu den höheren Anschaffungskosten und den Wirkungen von Funktionen der Hoch- und Vollautomatisierung und des autonomen Fahrens – wie bereits im Güterverkehr - vor allem auf ersten Abschätzungen, Modell- und Szenarienrechnungen sowie Simulationen.

3.2.1 Fahrzeugkosten im Pkw-Verkehr

Die Nutzung automatisierter bzw. autonomer Fahrzeuge im Pkw-Verkehr geht mit höheren Anschaffungskosten einher. Diese resultieren aus der Ausstattung der Fahrzeuge mit zusätzlichen Soft- und Hardwareanwendungen. Zu den zu erwartenden Kostensteigerungen im Pkw-Verkehr finden sich jedoch kaum Aussagen. Eine Studie für den amerikanischen Markt schätzt, dass die Mehrkosten der aktuellen Automatisierungsfunktionen und Anwendungen im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug im Zuge der Großserienfertigung auf bis zu 3.000 US \$ reduziert werden könnten.

Zu ähnlichen Größenordnungen kommen alternative Schätzungen zu den zusätzlichen Kosten zur Ausstattung eines Fahrzeugs mit der Technologie für hochautomatisiertes Fahren (Level 4) und autonomes Fahren (Level 5). Diese liegen bei 3.000 bis 6.000 US \$ je Fahrzeug.

Ansonsten werden weniger die zu erwartenden Fahrzeugmehrkosten abgeschätzt, sondern die Nachfrageseite im Rahmen von Akzeptanzanalysen auf ihre Zahlungs- und Kaufbereitschaft untersucht. Kaufinteresse für ein autonomes Fahrzeug wird je nach Untersuchung von 35% - 58% der Befragten in Deutschland, von knapp 60% der Befragten in den USA und von knapp 90% und mehr der Befragten in China bekundet. Offenbar sind die chinesischen Autokäufer technologieaffiner und eher bereit, die neuen Systeme und Funktionen der Automatisierung anzuschaffen und zu nutzen.

Erwartet wird, dass teilautonome Systeme und autonomes Fahren im Pkw-Segment eher im Bereich der Oberklasse und Premiumklasse eingeführt werden. Dort besteht aufgrund der Käufer- und Nutzerstruktur eher eine entsprechend höhere Zahlungsbereitschaft. Insofern kann diesen Segmenten eine Vorreiter- und Erschließungsfunktion für den gesamten Markt zugeschrieben werden.

3.2.2 Kraftstoffeinsparungen

Kraftstoffeinsparungen ergeben sich im Personenverkehr durch eine Steigerung der Verkehrseffizienz im Rahmen einer auf die Verkehrslage

abgestimmten Fahrweise und Routenführung bei Nutzung automatisierter Fahrzeuge. Eine Wirkung tritt auch bereits in Mischverkehren durch weniger Brems- und Beschleunigungsvorgänge ein. Dieser Effekt steigert sich bei zunehmender Marktdurchdringung der Systeme durch weniger Staus und weniger stockenden Verkehr.²⁰

Eine Abschätzung der Kraftstoffeinsparungen und der damit verbundenen Kostenersparnis im Personenverkehr für Deutschland hat das Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) vorgenommen.²¹ Dabei wurden die Wirkungen von drei Funktionen (Stau-Chauffeur Spurwechsel-Chauffeur Autobahn-Chauffeur) der Automatisierungsstufe 3 (nach SAE) auf Autobahnen untersucht. Die Wirkungen wurden dann in Bandbreiten für zwei Szenarien ausgewiesen. Szenario 1 basiert auf der maximalen Marktdurchdringung von Fahrzeugen zum hochautomatisierten Fahren (HAF) in Deutschland („Maximalszenario“, 100% HAF) und Szenario 2 auf der in der Studie ermittelten HAF-Bestandsentwicklung bis 2020 („Szenario 2020“) mit 45.929 Fahrzeugen (0,1% HAF). Auf Basis einer 10-20 prozentigen Reduktion des Treibstoffverbrauchs ergibt sich im Maximalszenario für das Jahr 2020 ein jährliches Kosteneinsparpotential zwischen 361,8 und 723,6 Mio. € und im Minimalszenario zwischen 0,38 und 0,76 Mio. €. Legt man den Effekt auf das einzelne Fahrzeuge um, so ergibt sich ein Einspareffekt je Pkw von 8 bis 16 € pro Jahr.

Tabelle 5: Einspareffekte bei Treibstoffkosten durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im Personenverkehr

Kostenart	Szenario	Minimalwert	Maximalwert
		[in Mio. €/a]	[in Mio. €/a]
Treibstoffverbrauch	100% HAF	361,8	723,6
	0,1 % HAF	0,38	0,76
		[in €/a]	[in €/a]
Kosteneinsparung je Fahrzeug		8	16

Quelle: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, ...a.a.O., S. 272.

²⁰ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten, Berlin, Stand September 2015, S. 8f.

²¹ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, November 2015, S. 264ff.

Neben den Kraftstoffeinsparungen auf Autobahnen werden mit automatisierten Fahrfunktionen insbesondere auch im nachgeordneten Straßennetz und im städtischen Verkehr Einsparpotentiale im Kraftstoffverbrauch erwartet. Eine Verstetigung und Verbesserung des Verkehrsflusses z.B. durch die Nutzung von Abstands- und Geschwindigkeitsregelassistenten (Adaptive-Cruise-Control ACC und Cooperative Adaptive-Cruise-Control CACC) kann gerade im städtischen Verkehr und dort vor allem an Knotenpunkten zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses und damit zu Kraftstoffeinsparungen führen.

Eine Auswertung verschiedener internationaler Studien²² zeigt Einsparungen im Kraftstoffverbrauch von bis zu 31% im städtischen Bereich und bis zu 45% bei einer entsprechend optimierten Knotenpunktsteuerung. Grundlage der Abschätzungen sind Simulations- und Modellrechnungen. Die Höhe der berechneten Kraftstoffverbrauchseinsparungen hängt wesentlich von den dabei unterstellten Automatisierungsstufen, der Marktdurchdringung der Systeme und dem Grad der Vernetzung zwischen den Fahrzeugen und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ab.

3.2.3 Zeitkosten im MIV

Neben den Kraftstoffkosten spielen im MIV die **Zeitkosten** eine wichtige Rolle. **Zeitersparnisse** durch die Nutzung automatisierter Fahrfunktionen bzw. autonomer Fahrzeuge sind ein zentraler positiver Effekt.

Die Bedeutung von Zeitersparnissen für die Nutzer von automatisierten und autonomen Fahrzeugen wird durch Akzeptanz- und Nutzungsanalysen belegt. So kommt eine Befragung von 2.100 deutschen Autofahrern aus 2016 zu dem Ergebnis, dass für 60% der höhere Komfort und der Zeitgewinn die Hauptmotivation der Nutzung derartiger Fahrzeuge wären.²³

Zeitersparnisse ergeben sich zum einen durch eine Optimierung des Verkehrsflusses durch z.B. ein der Verkehrssituation angepasstes Fahrverhalten. Daneben können Zeitkostensparnisse realisiert werden durch weniger Staus infolge einer Verringerung der Unfallzahlen. Schließlich

²² Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 335f.

²³ Deloitte, Autonomes Fahren in Deutschland - wie Kunden überzeugt werden, Stand 9/2016, S. 12.

entsteht ein Zugewinn an Zeit bei der Nutzung eines autonom fahrenden Fahrzeugs. Dieser resultiert daraus, dass der Fahrer keine Fahr- und Lenkungsarbeiten mehr übernehmen muss und die Zeit stattdessen anderweitig nutzen kann. Zu den Zeit- bzw. Zeitkostensparnissen liegen verschiedenen Studien und Abschätzungen vor.

Eine Abschätzung für das Autobahnnetz in Deutschland ist in der Fraunhofer-Studie enthalten.²⁴ Dabei wurden die Wirkungen des hochautomatisierten Fahrens auf die Stauvermeidung durch verkehrsoptimales Fahren und durch eine Reduzierung der Unfallzahlen untersucht. Nach einer Expertenbefragung von Fraunhofer liegen die Effekte in einer Bandbreite zwischen 50% - 80% für die Staureduktion durch verkehrsoptimales Fahren auf Autobahnen. Die Effekte kommen aber erst dann zum Tragen, wenn sich zumindest zehn Prozent der Fahrzeuge verkehrsoptimal verhalten. Dieser Effekt zielt aber nur auf die Staus ab, die ihre Ursache in einer Überlastung bzw. in einem Engpass haben. Bezogen auf diese Stauursache wird daher eine Bandbreite der Stauvermeidung durch verkehrsoptimales Fahren auf Autobahnen im Szenario 1 von 19,5% - 31,2% beziffert. Keine Effekte werden im Szenario 2 aufgrund der geringen Marktdurchdringung erwartet. Für die Unfallvermeidung wird ein Wirkungsgrad von 34,2% - 58,9% benannt, so dass sich entsprechend eine Reduzierung der Staus zwischen 8,8% und 15,3% in Szenario 1 und 0,06% und 0,1% in Szenario 2 ergibt. Fasst man die beiden Wirkungsstränge zusammen (Vermeidung Staus durch Reduzierung der Überlastung und durch Reduzierung der Unfallzahlen) wird eine Verringerung der Staus zwischen 28,3% und 46,5% im Szenario 1 und zwischen 0,06 und 0,1% im Szenario 2 beziffert. Die daraus sich ergebenden Zeitkostensparnisse sind in der nachfolgenden Tabellen aufgeführt.

²⁴ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, November 2015, S. 264ff.

Tabelle 6: Zeitkostensparnisse durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im MIV

Kostenart	Szenario	Minimalwert	Maximalwert
		[in Mio. €/a]	[in Mio. €/a]
Zeit-/Staukostenersparnis	100% HAF	2.981	11.912
	0,1 % HAF	0,27	0,66
		[in €/a]	[in €/a]
Kosteneinsparung je Fahrzeug	100% HAF	67	268
	0,1 % HAF	6	14

Quelle: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, ...a.a.O., S. 272.

Bei in der Studie geschätzten Staukosten in Höhe von 25,61 Mrd. € p.a. für das Jahr 2020 ergibt sich für das Maximalszenario ein Einspareffekt zwischen 12% und 47%. Die Effekte je Fahrzeuge liegen im Maximalszenario zwischen 67 € und 268 € jährlich. Deutlich wird, dass die Marktdurchdringung die Höhe der Einspareffekte entscheidend beeinflusst.

Die Zeitersparnis auf Autobahnen durch hochautomatisiertes Fahren sind für Deutschland, USA und China in einer Studie von Bosch ermittelt worden.²⁵ Danach verbringen die Autofahrer in Deutschland statistisch durchschnittlich 39,5 Stunden pro Jahr auf Autobahnen (USA: 43 Stunden auf Interstates, China: 26 Stunden auf Expressways). Hochautomatisiertes Fahren und gleichzeitige Internetanbindung werde es ab dem Jahr 2025 ermöglichen, etwa 80 Prozent dieser Fahrzeit (in Deutschland also 31 Stunden) hinter dem Steuer für andere Aktivitäten zu nutzen.

Eine detaillierte Analyse zu den Wirkungen von vernetzten bzw. autonomen Fahrzeugen (CAVs) auf den Verkehrsfluss liegt aus Großbritannien vor.²⁶ Im Rahmen einer Mikrosimulation werden die Wirkungen verschiedener Automatisierungsgrade (keine Automatisierung bis autonom) unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens bzw. des Fahrereinfluss (vorsichtig, durchsetzungsfähig) und bestimmter Marktdurchdringungsraten (25% bis 100% CAVs, unterschiedliche Automatisierungsgrade) untersucht. Basis der Simulation ist ein Strategic Road Network (SRN), das Autobahnen, Autobahnkreuze, Auffahrten und Abfahrten abbildet, und ein Urban Road

²⁵ Robert Bosch GmbH, „Connected Car Effect 2025“, Bosch-Studie zeigt: Mehr Sicherheit, mehr Effizienz, mehr freie Zeit durch vernetzte Mobilität, Pressemitteilung Dezember 2016.

²⁶ ATKINS, Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, Summary Report, Department for Transport, May 2016.

Network, das städtische Hauptstraßen, sowie Kreuzungsverkehre und Fußgängerüberwege beinhaltet.

Die Effekte im **Strategic Road Network** resultieren maßgeblich aus der Beibehaltung bzw. der Steigerung der Geschwindigkeit bei reduzierten Fahrzeugabständen. Eine Reduktion der Stauzeiten ist erst ab einer Marktdurchdringung der vernetzten bzw. autonomen Fahrzeuge von 50-75% spürbar. In diesen Fällen liegt die Reduktion der Stauungszeiten bei rund 17%, bei einer vollständigen Marktdurchdringung (100%) bei rund 40% (im Vergleich zur Situation ohne Automatisierung). Die Ersparnis bei den Reisezeiten ist erst ab einer Marktdurchdringung von 75% der vernetzten bzw. autonomen Fahrzeuge relevant (rd. 2% Reisezeitersparnis). Bei einer vollständigen Marktdurchdringung verringert sich die durchschnittliche Reisezeit um 11%.

Im **Urban Road Network** (Städtischer Verkehr) zeigt sich bereits im Fall geringer Marktdurchdringungsraten (25%) eine Reduktion von 12% bei den Stauzeiten im Fall vollständiger Marktdurchdringung beträgt die Reduktion knapp 30%. Bezogen auf die durchschnittliche Reisezeit wird bei geringer Marktdurchdringung (25%) eine Verbesserung von 21% und bei vollständiger Marktdurchdringung von knapp 34% erzielt. Anzumerken ist, dass die ermittelten Effekte immer für das Netz bzw. den gesamten Verkehr gelten. Es profitieren also auch nicht-automatisierte Fahrzeuge von den Wirkungen bzw. dem Fahrverhalten der vernetzten bzw. autonomen Fahrzeuge.

Die Ergebnisse werden durch andere internationale Studien bestätigt. Sie zeigen, dass die Höhe der Zeitersparnisse von allem von den Marktdurchdringungsraten der automatisierten Fahrzeuge und vom betrachteten Straßennetz (Autobahnen, städtisches Netz) abhängt. So wird bei einer Marktdurchdringungsrate in Höhe von 30% von Fahrzeugen mit Abstands- und Geschwindigkeitsregelassistenten (Adaptive-Cruise-Control ACC) auf Autobahnen von einem Einspareffekt von bis zu 35% berichtet. Größere Effekte werden im städtischen Bereich bei einer entsprechend optimierten Knotenpunktsteuerung erwartet. ab.²⁷

Zeitgewinne werden im städtischen Verkehr nicht nur durch einen verbesserten Verkehrsfluss, sondern vor allem auch im **Parksuchverkehr** erwartet. So wird von einer intelligenten Vernetzung von Fahrzeugen und

²⁷ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 329f.

Parkräumen ein erhebliches Potential erwartet, die Suche nach einem Parkplatz deutlich zu verkürzen.²⁸ Diese Effekte sind nicht zwingend mit automatisierten Fahrzeugen verbunden. Konzepten wie Community-based Parking und aktives Parkraummanagement wird im Parksuchverkehr ein Einspareffekt in der Studie von Bosch für die Länder China, USA und Deutschland von bis zu 480 Millionen Kilometer zugeschrieben. Durch vernetzte Parkfunktionen lassen sich ca. 70 Millionen Fahrstunden in den drei Ländern einsparen.

3.2.4 Zeitbewertung im MIV

Weniger deutlich zeigt sich das Bild bei der Frage nach der **Zeitbewertung im MIV**. Die Zeitkostensparnisse ergeben sich im MIV aus einer monetären Bewertung der physischen Zeitersparnisse für die Nutzer des Pkw-Verkehrs. Im Unterschied hierzu werden Zeitersparnisse im ÖV und Taxigewerbe im Rahmen der Fahrpersonalkosten erfasst. Fraglich ist, ob z.B. Reisezeitverluste infolge von Stauungen im Fall des autonomen Fahrens noch entstehen werden. Vielmehr ist zu erwarten, dass die sich durch das autonome Fahren ergebenden Zeitgewinne einer anderen z.B. produktiven Verwendung zugeführt werden. Folgt man diesem Gedankengang wäre eine Reduzierung der durchschnittlichen Zeitbewertung das Ergebnis.²⁹ Andererseits können eine verkehrsverbessernde Steuerung des Verkehrsflusses durch automatisierte Systeme und ein möglicher induzierter Mehrverkehr (siehe hierzu Kapitel 3.4) durch die Attraktivitätssteigerung des MIV reiszeiterhöhend wirken.

Hinweise zur alternativen Verwendung der durch das autonome Fahren gewonnenen Zeit liegen aus verschiedenen Akzeptanz- und Nutzeranalysen vor. Dabei wird deutlich, dass die eingesparte Zeit nur zu einem geringeren Umfang zu einer beruflichen Nutzung verwendet wird. Rund 60% können sich vorstellen, während der Fahrt zu kommunizieren, 50% im Internet zu surfen und nur rund 30% die Zeit zum Arbeiten zu nutzen.³⁰ Zur Zeitbewertung liegen erste Erkenntnisse aus einer Studie für die Niederlande

²⁸ VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, September 2015, S. 19; Dornier Consulting International, Autonomes Fahren, Erwartungen an die Mobilität der Zukunft, Berlin 201; S. 17.

²⁹ Siehe hierzu: Geißler, T., Kulmala, R., Carsten, O., The evolution towards automated driving – Classification of impacts, review of assessments of automated driving functions, challenges for evaluation, CH011 5 August 2016, S. 280.

³⁰ Detecon International GmbH, Autonomes Fahren: Wenn das Lenkrad zur Sonderausstattung wird. Eine empirische Untersuchung der Akzeptanz autonom fahrender Fahrzeuge, Köln, März 2016, S. 18ff; Deloitte, Autonomes Fahren in Deutschland - wie Kunden überzeugt werden, Stand 9/2016, S. 16.

vor, in der je nach Szenario von einem Rückgang zwischen 1% und 31% für die Nutzer von automatisierten Fahrzeugen berichtet wird.³¹ Welcher Effekt sich letztlich ergibt und welche Konsequenzen sich daraus für die Zeitbewertung ergeben, lässt sich aus heutigem Kenntnisstand noch nicht eindeutig beantworten. Dies ist jedoch eine wichtige in der Zukunft zu beantwortende Frage, da die Zeitkosten eine wichtige Rolle bei der Bewertung von Infrastrukturvorhaben spielen.

3.2.5 Versicherung, Wartung und Reparatur

Kostenveränderungen werden auch in den übrigen Bereichen **Versicherungen sowie Wartung und Reparatur** eintreten. Durch zu erwartende geringere Sach- und Schadenskosten z.B. durch vernetzte Assistenzsysteme entstehen Entlastungswirkungen für die Versicherungswirtschaft, die zumindest zum Teil an die Versicherungsnehmer und damit die Fahrzeughalter durch geringere Beiträge weitergegeben werden könnten.

Neben den Versicherungskosten sind auch Veränderungen bei den Kosten für Wartung und Reparatur möglich. Dabei können jedoch unterschiedliche Wirkungen eintreten. Einerseits wird davon ausgegangen, dass durch den Betrieb von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen die Kosten für Wartung und Reparatur sinken werden. Dies liegt zum einen an einer fahrzeufoptimierten und schonenderen Fahrweise. Zudem resultiert aus einer Reduzierung von Unfällen (Anzahl und Schwere der Unfälle) eine Verminderung der Reparaturkosten an den Fahrzeugen. Andererseits könnte eine Erhöhung der Wartungs- und Reparaturkosten dadurch entstehen, dass die automatisierten bzw. autonomen Fahrzeuge intensiver genutzt werden. Eine höhere tägliche Fahrleistung führt tendenziell zu einem steigenden Wartungs- und Reparaturaufwand für die Fahrzeuge. Ferner verkürzt sich der Ersatzzeitraum der Fahrzeuge.

Quantitative Berechnungsergebnisse liegen zu den Versicherungs- und Wartungskosten nicht vor. Fahrzeughersteller und Zulieferer rechnen jedoch mit etwas geringeren Wartungs- und Unterhaltskosten und mit deutlich niedrigeren Versicherungskosten.³² Der sich letztlich ergebende saldierte

³¹ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2017, Vol. 21, No. 4, 329.

³² Vgl. Dornier Consulting International, *Autonomes Fahren, Erwartungen an die Mobilität der Zukunft*, Berlin 2017, S. 17.

Effekt, also eine Nettobelastung oder eine Nettoentlastung ist aus heutiger Sicht noch nicht quantifizierbar.

3.2.6 Pkw-Bestand im MIV

Von besonderem Interesse ist die Frage, inwieweit die Nutzung von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen im Personenverkehr den **Pkw-Bestand** verändern wird. Erheblichen Einfluss auf den Pkw-Bestand wird den autonomen Fahrzeugen zugeschrieben, wenn vor allem im städtischen Umfeld in Kombination mit Sharing-Konzepten (Carsharing, Ridesharing) und einem entsprechenden Angebot des ÖPNV (z.B. Ausbau von autonomen Shuttle-Verkehren) ein dem bisherigen Individualverkehr vergleichbares Mobilitätsangebot etabliert wird. Dann kann die eigene Mobilitätsnachfrage ohne eigenen Pkw in bisher gewohntem Umfang und gewohnter Qualität aufrechterhalten werden und die mit dem Fahrzeugbesitz verbundenen fixen Kosten werden vermieden.

Zu den quantitativen Wirkungen des autonomen Fahrens (einschließlich des Angebots von autonomen Fahrzeugen als Ridesharing-Fahrzeuge und als Carsharing-Flotte: shared mobility-Angebote) auf den Pkw-Bestand liegen einige Ergebnisse aus Modellrechnungen für Beispielstädte vor. In einer Simulationsrechnung für Lissabon wird gezeigt, dass bei einer Umstellung auf ein vollständig organisiertes Ride- und Carsharing-Angebot die Pkw-Flotte um bis zu 90% reduziert werden kann. Demnach können 10% der bisherigen Fahrzeuge das bestehende Mobilitätsangebot garantieren und die Mobilitätsnachfrage bedienen.³³ Dies stellt sicherlich eher eine theoretische und extreme Variante der Modellierung und Simulationsrechnung dar. Dennoch zeigen die Ergebnisse das Potential zur Reduzierung des privaten Pkw-Bestandes, das in der Nutzung von autonomen Fahrzeugen im städtischen Bereich liegen kann. Eine Auswertung weiterer Studien zeigt ebenso das Potential zur Reduzierung des Pkw-Bestandes, das in autonomen Fahrzeugen, die als Ridesharing-Fahrzeuge und als Carsharing-Flotte genutzt werden, liegt. Für Austin (Texas) kommt eine Studie zu dem Ergebnis, dass durch ein autonomes Fahrzeug rund 11 konventionelle Fahrzeuge ersetzt werden können. Für Zürich kommen Simulationsrechnungen zu einem Wert zwischen 10 und 14. Berücksichtigt man jedoch Kosten (Nutzungsgebühren) für die Nutzung des Car- und

³³ International Transport Forum, Urban Mobility System Upgrade, How shared self-driving cars could change city traffic, Paris 2015, S. 19.

Ridesharing Angebotes, so sinkt die Quote der ersetzten Pkw auf 3,7 bis 6,8.³⁴

3.3 Umweltwirkungen

Dem automatisierten Fahren werden auch Potentiale zur Verringerung der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen zugeschrieben. Die positiven Wirkungen ergeben sich auf verschiedene Weise:

- Die Emissionen hängen einerseits direkt vom Kraftstoffverbrauch ab. Eine Verstetigung des Fahrverhaltens (Verringerung von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen) und eine Verbesserung des Verkehrsflusses insgesamt vermindern den Kraftstoffverbrauch und damit die verkehrsbedingten Emissionen. Einspareffekte mobilitätsbedingter Emissionen treten bereits bei geringen Marktdurchdringungsraten in Mischverkehren durch weniger Brems- und Beschleunigungsvorgänge auf. Bei zunehmender Marktdurchdringung der Automatisierungssysteme resultieren die Umweltwirkungen vor allem aus einer Reduzierung der Staus und des stockenden Verkehrs.³⁵ Ein weiterer Einspareffekt kann darin liegen, dass z.B. bei hochautomatisierten Fahrfunktionen auf Autobahnen auf Fahrgeschwindigkeiten oberhalb der Richtgeschwindigkeit systembedingt verzichtet wird. Der Verzicht von hohen Geschwindigkeiten führt zu Einsparungen im Kraftstoffverbrauch, da dieser mit zunehmender Geschwindigkeit überproportional steigt.³⁶

Eine Abschätzung der Potentiale zur Verminderung der Treibhausgas- und Luftschadstoffkosten liegt für das Autobahnnetz in Deutschland aus der Fraunhofer-Studie vor.³⁷ Auf Basis der dort zugrunde gelegten 10-20 prozentigen Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und einer damit einhergehenden Reduzierung der CO₂-Emissionen in gleicher Größenordnung werden die weiteren Emissionswirkungen mit Hilfe des REMOVE-Modells bestimmt und monetarisiert. Es ergibt sich im Maximalszenario für das Jahr 2020 ein jährliches Kosteneinsparpotential

³⁴ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 333.

³⁵ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten, Berlin, Stand September 2015, S. 10.

³⁶ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, November 2015, S. 264.

³⁷ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, November 2015, S. 264ff.

zwischen 55,5 und 111 Mio. € und im Minimalszenario zwischen 0,06 und 0,12 Mio. €.

Tabelle 7: Verminderung der Treibhausgas- und Luftschadstoffkosten durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im Personenverkehr

Kostenart	Szenario	Minimalwert	Maximalwert
		[in Mio. €/a]	[in Mio. €/a]
Ersparnis Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen	100% HAF	55,5	111,0
	0,1 % HAF	0,06	0,12
		[in €/a]	[in €/a]
Kosteneinsparung je Fahrzeug		1,3	2,5

Quelle: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, ...a.a.O., S. 272.

- Ein zweiter Effekt auf die verkehrsbedingten Emissionen ergibt sich daraus, dass insbesondere bei Flottenfahrzeugen eine intensivere Nutzung der Fahrzeuge zu erwarten ist. Der Nutzungszeitraum der Fahrzeuge sinkt, der Ersatzzeitpunkt der Fahrzeuge wird verkürzt. Damit wird ein schnellerer Flottendurchsatz der neuen Technologien erreicht. Mit der schnelleren technologischen Erneuerung ist auch der Einsatz umweltschonenderer und emissionsmindernder Fahrzeuge verbunden. Dies kann vor allem auch im städtischen Umfeld zu einer Entlastung der verkehrsbedingten Emissionen führen.

3.4 Zusammenfassung der Wirkungen auf Mobilitäts- und Transportkosten

Die vorherigen Auswertungen und Analysen zeigen, dass sowohl im Güterverkehr, aber noch viel stärker im Personenverkehr zu den einzelnen Wirkungskomponenten zahlreiche Analysen und Quantifizierungen vorgenommen worden sind. Es bleibt jedoch offen, wie sich die Mobilitäts- und Transportkosten im Straßenverkehr insgesamt im Saldo verändern werden. Hierzu wären folgende Fragen noch abzuklären:

- Unklar bleiben die anfallenden Infrastrukturkosten (Verkehrs- und IT-Infrastruktur), die bei einer Automatisierung und Vernetzung des Straßenverkehrs notwendig werden. Zu erwarten ist, dass erhebliche Investitionen notwendig sind, um die Infrastruktur entsprechend auszurüsten und zu ertüchtigen. Dies kommt vor allem bei der Frage der Vernetzung der automatisierten bzw. autonomen Fahrzeuge zum Tragen.

Die Bundesregierung spricht selbst davon, dass „es eine intelligente und vernetzte Infrastruktur mit High-Speed-Datenübertragung, Sensoren in Bauwerken und Signalanlagen braucht, die Informationen über Verkehrssituation und Umgebung erheben, in Echtzeit mit Fahrzeugen kommunizieren und Belastungen und Verschleißzustände selbständig melden“.³⁸ Das setzt umfangreiche Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur und in die Kommunikationsinfrastruktur voraus. Der sich hieraus ableitende Investitionsbedarf für die nächsten Jahre wird jedoch nicht beziffert.

- Für eine Gesamtschau der Veränderungen der Mobilitäts- und Transportkosten im Straßenverkehr ist es notwendig, zu untersuchen, inwieweit sich die einzelnen Wirkungen überschneiden, sich zum Teil gegenseitig kompensieren oder auch verstärken können. Ferner wird in den Untersuchungen auch keine Gesamtschau der Kostenwirkungen für den Güter- und Personenverkehr in einem Verkehrsnetz durchgeführt. Auch hieraus können sich gegenseitig beeinflussende Wirkungsbeziehungen ergeben.
- Schließlich ist zu untersuchen, ob es durch die Verbesserungen und Optimierungen des Verkehrsablaufs und der zu erwartenden Kosteneinsparungen zu Mehrverkehr (induzierter Verkehr) im Straßenverkehr kommen wird. Dies ist insbesondere im Personenverkehr eine vielfach aufgegriffene Fragestellung. Induzierter Verkehr entsteht dadurch, dass aufgrund der verbesserten Verkehrsbedingungen die Attraktivität des Pkw-Verkehrs zunimmt. Dieser Mehrverkehr auf der Straße ergibt sich ebenso aus einer Verlagerung von Verkehr vom ÖPNV oder vom Fahrradverkehr auf die Straße (modale Verlagerungen). Personen, denen bisher das Taxi zu teuer ist, könnten auf das fahrerlose Taxi wechseln. Eine Zunahme des Pkw-Verkehrs kann sich auch durch eine Verlängerung der Fahrtweiten (z.B. geänderte Zielwahl, Nutzung günstigerer Wohnmöglichkeiten im ländlichen Raum) ergeben. Zudem wird durch neue Mobilitätskonzepte, die durch das automatisierte bzw. autonome Fahren entwickelt werden, eine zusätzliche Nachfrage nach Mobilität geweckt (induzierter Verkehr). Ferner kann sich eine verkehrssteigernde Wirkung dadurch ergeben, dass bisherigen mobilitätseingeschränkten Personen (z.B. ältere Verkehrsteilnehmer) durch das autonome Fahren die Teilnahme am Straßenverkehr wieder ermöglicht wird.

³⁸ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten, Berlin, Stand September 2015, S. 14.

In verschiedenen internationalen Untersuchungen ist versucht worden, die möglichen Fahrleistungssteigerungen im Pkw-Verkehr abzuschätzen. Der Zuwachs an Pkw-Fahrleistungen liegt dabei je nach unterstellter Marktdurchdringungsrate von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen zwischen 3% und 27% (z.B. Szenariorechnungen für die Niederlande).³⁹

Eine Zusammenstellung der wesentlichen Erkenntnisse zu den Wirkungen des automatisierten und autonomen Fahrens auf die Mobilitäts- und Transportkosten ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Für die einzelnen Komponenten werden die zu erwartenden Wirkungen in ihrer Richtung und teilweise auch in ihrem Ausmaß ausgewiesen.

³⁹ zitiert in: Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 332.

Tabelle 8: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf Mobilitäts- und Transportkosten

Verkehrsart	Wirkungskomponente	Wirkungsrichtung	Quantitative Abschätzungen	Quellen
Güterverkehr (Straße)	Fahrzeugkosten		<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Software- und Hardwarekosten von 1.800 [Stufe 1] bis 23.400 US \$ je Lkw [Stufe 5] • Bis 5% der Fahrzeugkosten [Stufe 5] 	R. Berger (2016); ITF (2017)
	Betriebskosten / TCO insgesamt		Ersparnis [Stufe 5] von bis zu... <ul style="list-style-type: none"> • 28% bzw. 0,23 € je Fz.-km • 30% • 35% bzw. bis zu 50% bei leichten Nfz. • 0,90 € je Fz.-km 	PwC (2016), ITF (2017), McKinsey (2016), R. Berger (2016)
	Kraftstoffkosten		<ul style="list-style-type: none"> • 4%-10% durch „eco-driving“ [Stufe 2] • >10% bei vollautomatisierten Platoons [Stufe 3] 	ITF (2017), PwC (2016), ITF; R. Berger (2016)
	Fahrerbedarf		<ul style="list-style-type: none"> • Zwischen 59% - 68% im Jahr 2030 in Europa durch autonomes Fahren [Stufe 5] 	ITF (2017),
Personenverkehr (Straße)	Fahrzeugkosten		<ul style="list-style-type: none"> • Steigerungen hängen von den Automatisierungsstufen ab, bisher wenige Quantifizierungen • Erste Schätzungen für hochautomatisiertes Fahren [Stufe 4] und autonomes Fahren [Stufe 5] gehen von 3.000 bis 6.000 US \$ je Fahrzeug aus 	lfmo (2016)
	Kraftstoffkosten		<ul style="list-style-type: none"> • 10%-20% durch HAF-Funktionen (2020) auf Autobahnen in Deutschland [Stufe 3] • 31%-45% im städtischen Bereich (einschließlich optimierter Knotenpunktsteuerung) [ab Stufe 2] 	Fraunhofer IAO (2015), Milakis et al. (2017)
	Zeitkosten		<ul style="list-style-type: none"> • 28%-47% durch HAF-Funktionen (2020) auf Autobahnen in Deutschland [Stufe 3] • 31h Zeitersparnis auf Autobahnen in Deutschland (2025) [Stufe 1,2] • 2%-11% im Strategic Road Network (Autobahnen einschließlich Auffahrten, Abfahrten) [Stufen1-5] • 21%-34% im Urban Road Network [Stufen1-5] 	Fraunhofer IAO (2015), Bosch (2016), ATKINS (2016)
	Zeitbewertung	?	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungen unklar 	
	Versicherung, Wartung und Reparatur		<ul style="list-style-type: none"> • Leicht geringere Kosten erwartet 	Dornier (2017)
	Pkw-Bestand		<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung um bis zu 90% in Szenarienrechnungen für Lissabon [Stufe 5] • Ersatz von 10-14 konventionellen Fz. durch ein autonomes Fahrzeug; bei autonomen elektrischen Fahrzeugen unter Berücksichtigung der Ladezeiten sinkt die Quote auf 3,7 bis 6,8 [Stufe 5] 	ITF (2015), Milakis et al. (2017)
	Induzierter Verkehr		<ul style="list-style-type: none"> • Mehrverkehr zwischen 3% und 27% u.a. durch Verlagerungen und neuen Verkehr [ab Stufe3] 	Milakis et al. (2017)

Anmerkung: Automatisierungsstufen nach SAE-Definition (s. S. 9 und Tabelle 1).

Quelle: Eigene Darstellung nach Auswertung der Quellen.

Ergebniszusammenfassung zu den Mobilitäts- und Transportkosten

- notwendige Investitions- und Ausrüstungskosten infrastruktur- und fahrzeugseitig noch weitgehend unbekannt
- größte Einspareffekte im Güterverkehr bei den Kraftstoffkosten und Fahrpersonalkosten
- im MIV gibt es größere Einspareffekte bei den Kraftstoffkosten auf Autobahnen und im städtischen Verkehr durch eine Optimierung der Knotenpunktverkehre
- eine - zumindest teilweise - Kompensation der Effekte ist aufgrund von Mehrverkehr infolge der Verbesserung der Verkehrsbedingungen auf der Straße zu erwarten

4. Infrastrukturwirkungen

Bestimmten Funktionen des automatisierten Fahrens werden erhebliche kapazitätssteigernde Infrastrukturwirkungen beigemessen. Die Wirkungen werden dabei auf unterschiedliche Weise ausgelöst.

- Durch eine Verstetigung des Verkehrsflusses vor allem im Autobahnnetz kann die Leistungs- und Aufnahmefähigkeit des Netzes gerade in den Spitzenlastzeiten deutlich erhöht werden. Abstände zwischen den Fahrzeugen werden optimiert, Brems- und Beschleunigungsvorgänge harmonisiert, so dass Wellenbewegungen im Verkehrsfluss deutlich reduziert werden können. Die Effekte sind auch bereits dann realisierbar, wenn nur ein Teil der Fahrzeuge mit derartigen Automatisierungsfunktionen ausgerüstet sind. Je höher die Marktdurchdringung ist, desto größer sind tendenziell die erzielbaren kapazitätssteigernden Wirkungen.
- Überlastungen und Stauungen im Netz sind oft Folge von Verkehrsunfällen. Durch die unfallsenkenden Wirkungen des automatisierten Fahrens werden die Ursachen von Stauungen vermindert. Anzahl und Ausmaß der Überlastungen werden deutlich gesenkt.
- Im nachgeordneten Straßennetz und hier vor allem im städtischen Bereich werden erhebliche kapazitätssteigernde Wirkungen insbesondere im Knotenpunktverkehr erwartet. Dies gilt z.B. bereits durch den Einsatz von CACC-Systemen (Cooperative Adaptive Cruise Control). Durch die Nutzung des Abstandsregeltempomaten und der Vernetzung der Fahrzeuge untereinander sowie mit der Infrastruktur (Lichtsignalanlagen, Verkehrszeichen) werden u.a. Abstand und Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrzeuge berücksichtigt. Ein unrhythmische Anfahren

und Abbremsen wird vermieden. Die Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte kann deutlich gesteigert werden.

- Die zuvor genannten positiven Wirkungen könnten in Teilen durch gegenläufige Effekte abgeschwächt werden. Dies ist dann der Fall, wenn durch die Verbesserung der Verkehrsverhältnisse neuer Verkehr induziert wird, indem
 - zusätzliche Mobilitätsnachfrage generiert (z.B. durch Verbesserung der Verkehrsbedingungen auf der Straße, Zugang zum Individualverkehr für bisher mobilitätseingeschränkte Personen durch das autonome Fahren) wird
 - oder modale Verkehrsverlagerungen von alternativen Verkehrsträgern (z.B. ÖPNV) ausgelöst werden.

Im Ergebnis können sowohl für das Fernstraßennetz, als auch im nachgeordneten Netz (städtischer Bereich) kapazitätssteigernde Wirkungen durch die Nutzung des automatisierten Fahrens realisiert werden. Wie der Nettoeffekt aussieht, also in welcher Höhe gegenläufige Effekte (induzierter Verkehr) die ursprüngliche Wirkung kompensieren, bleibt abzuwarten.

Zu diesen Fragen sind einige Studien und Untersuchungen durchgeführt worden. Dabei beruhen die Ergebnisse jedoch auf (mikro- und makroskopischen) Verkehrssimulationen, auf Simulationen des Fahrverhaltens und auf Feldversuchen. Empirisch beobachtete Daten zu den kapazitätssteigernden Wirkungen liegen nicht vor.

Aussagen zu den Kapazitätswirkungen lassen sich aus der bereits in Kap. 3 aufgeführten Studie zu den Wirkungen von vernetzten bzw. autonomen Fahrzeugen auf den Verkehrsfluss aus Großbritannien ableiten.⁴⁰ Im Rahmen der dort durchgeführten Mikrosimulation werden die Kapazitätswirkungen verschiedener Automatisierungsgrade unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens bzw. des Fahrereinfluss und bestimmter Marktdurchdringungsraten analysiert. Die kapazitätssteigernden und verkehrsoptimierenden Wirkungen werden anhand der Reduktion der Stauzeiten gekennzeichnet. Im **Strategic Road Network** resultiert ab einer Marktdurchdringung der vernetzten bzw. autonomen Fahrzeuge von 50-75% eine Reduktion der Stauungszeiten von rund 17%, bei einer vollständigen Marktdurchdringung von rund 40% (im Vergleich zur Situation ohne Automatisierung). Im **Urban Road Network** (Städtischer Verkehr) zeigt sich

⁴⁰ ATKINS, Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, Summary Report, Department for Transport, May 2016.

bereits im Fall geringer Marktdurchdringungsraten (25%) eine Reduktion von 12% bei den Stauzeiten im Fall vollständiger Marktdurchdringung beträgt die Reduktion knapp 30%.

Die Ergebnisse werden durch andere internationale Studien bestätigt. Sie zeigen, dass die Höhe der berechneten kapazitätssteigernden Effekte vor allem von den Marktdurchdringungsraten der automatisierten Fahrzeuge (ab Stufe 3), vom Grad der Vernetzung zwischen den Fahrzeugen und zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sowie vom betrachteten Netz (Autobahnen, Knotenpunkte) abhängt. Es wird darauf verwiesen, dass merkliche Kapazitätswirkungen auf Autobahnen (>10%) erst ab einer Marktdurchdringungsrate von 40% und mehr von Fahrzeugen mit Abstands- und Geschwindigkeitsregelassistenten (Cooperative Adaptive-Cruise-Control CACC) zu erwarten sind. Bei einer vollständigen Marktdurchdringung kann nach den Berechnungen (theoretisch) eine Verdopplung der Kapazität eintreten. Auch für vollständig automatisierte Knotenpunktverkehre werden eine Verdopplung der Kapazitäten für möglich erachtet.⁴¹

Tabelle 9: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf die Infrastrukturkapazität

Verkehrsart	Wirkungskomponente	Wirkungsrichtung	Quantitative Abschätzungen	Quellen
Straßenverkehr	Kapazität Autobahnen		<ul style="list-style-type: none"> • >10% ab Marktdurchdringungsrate von 40% von Fahrzeugen mit CACC [soweit erkennbar ab Stufe 3] • Verdopplung bei vollständiger Marktdurchdringung • Verminderung der Stauungszeiten von 17%-40% je nach Marktdurchdringungsrate [Stufe 1-5] 	Milakis et al. (2017) ATKINS (2016),
	Kapazität Knotenpunkte		<ul style="list-style-type: none"> • Verdopplung der Kapazitäten für vollständig automatisierte Knotenpunktverkehre [soweit erkennbar ab Stufe 3] • Verminderung der Stauungszeiten von 12%-30% je nach Marktdurchdringungsrate [Stufe 1-5] 	Milakis et al. (2017) ATKINS (2016)

Anmerkung: Automatisierungsstufen nach SAE-Definition (s. S. 9 und Tabelle 1).

Quelle: Eigene Darstellung nach Auswertung der Quellen.

⁴¹ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 327ff.

Die Auswertung der Studien und Literatur zeigt, dass von den automatisierten Fahrzeugen verkehrsoptimierende und kapazitätssteigernde Wirkungen ausgehen. Im Verkehr auf den Fernstraßen resultieren diese Effekte aus einer Harmonisierung und Verstetigung des Verkehrsflusses sowie einer Reduzierung der Unfallzahlen und der damit verbundenen Staus. Im nachgeordneten Netz bzw. im städtischen Verkehr entstehen die Wirkungen aus einer Steigerung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten. Diese Wirkungen können aufgrund der besseren Auslastung der vorhandenen Infrastruktur den Aus- und Neubaubedarf an Straßeninfrastruktur senken. Die daraus resultierenden Kosteneinsparungen sind jedoch derzeit nicht zu quantifizieren, da die Wirksamkeit der automatisierten Fahrfunktionen von einem Ausbau bzw. einer Ertüchtigung der bestehenden Infrastrukturanlagen (z.B. Lichtsignalanlagen) und der IT-Infrastruktur zur Vernetzung abhängen.

Ergebniszusammenfassung zu den Infrastrukturwirkungen

- verkehrsoptimierende Wirkungen durch Harmonisierung und Verstetigung des Verkehrsflusses und damit erhebliche kapazitätssteigernde Effekte
- Erhöhung der Leistungsfähigkeit der bestehenden Infrastruktur senkt tendenziell den Neu- und Ausbaubedarf

5. Verkehrssicherheit (Unfallzahlen, Unfallschwere)

Große Hoffnungen werden mit dem Automatisierten Fahren im Bereich der Verkehrssicherheit verbunden. Mit den einzelnen Automatisierungsfunktionen bzw. dem in der Endstufe autonomen Fahren werden erhebliche Verkehrssicherheitsgewinne verbunden. Sowohl die Anzahl der Verkehrsunfälle als auch deren Schwere werden verringert bzw. vermindert. Der Zuwachs an Verkehrssicherheit wird dadurch erzielt, dass der Risikofaktor Fahrzeugführer als Verursacher von Verkehrsunfällen entfallen wird.

Einen Überblick über das Unfallgeschehen im Straßenverkehr in Deutschland gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 10: Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr in Deutschland

	2016
Polizeilich erfasste Unfälle gesamt	2.585.327
davon:	
Unfälle mit Personenschaden	308.145
Verunglückte gesamt	399.872
davon:	
Getötete	3.206
Schwerverletzte	67.426
Leichtverletzte	329.240

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2016: Mehr Unfälle, aber weniger Verkehrstote als jemals zuvor, Pressemitteilung 230/17 vom 6.07.2017.

Im Jahr 2016 sind in Deutschland knapp 2,6 Mio. Unfälle erfasst worden. Die Anzahl der Verunglückten liegt bei etwa 400.000, die der Getöteten bei 3.206. Die Zahlen zum Unfallgeschehen zeigen, dass durch das automatisierte Fahren noch erhebliche Potentiale zur Erhöhung der Verkehrssicherheit erschlossen werden können.

Über die Größenordnungen der positiven Wirkungen auf die Verkehrssicherheit herrscht teilweise jedoch noch insbesondere dann Unklarheit, wenn es sich um ein hochdynamisch urbanes Verkehrsgeschehen (mit Knotenpunktverkehren) unter Beteiligung von Fahrrädern und Fußgängern handelt. Relativ zuverlässig können hingegen die Wirkungen von bereits in Fahrzeugen implementierten Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit abgeschätzt werden.

Die Technologie der Fahrerassistenzsysteme bietet das Potential, die Zahl von Unfällen und Staus weiter deutlich zu verringern.⁴² Abstandsregeltempomaten etwa verbessern den Verkehrsfluss und tragen erheblich dazu bei, Unfälle zu vermeiden. Automatisiertes Fahren macht den

⁴² Erste Hinweise zu den Unfallzahlen von autonomen Fahrzeugen liegen aus dem Testbetrieb in den USA vor. Bei einem Unfall mit einem Tesla-Fahrzeug kam ein Mensch ums Leben. Dies war der erste Unfalltote bei einem Umfang des Testbetriebs von 210 Millionen Kilometern. Im Vergleich dazu weist die US-Verkehrsunfallstatistik einen Todesfall auf 145 Millionen Kilometern aus. Google gibt für den Zeitraum Oktober 2014 bis November 2015 an, dass es bei 680.000 Testkilometern in 13 Fällen zu Beinahe-Unfällen gekommen wäre. Siehe hierzu: Gent, M., Autopilot von Tesla auch nach 210 Millionen Kilometern nicht sicher, in: <https://www1.wdr.de/wissen/technik/tesla-autopilot-crash-100.html>, Stand 01.07.2016, Zugriff am 05.12.2017; o.V., Mensch, greif ein!, in: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/google-auto-13-kritische-situationen-auf-680-000-testkilometern-a-1071800.html>, 13.01.2016, Zugriff am 05.12.2017.

Verkehr dadurch sicherer, dass die Systeme die Anzahl der kritischen Verkehrssituationen deutlich reduzieren. Die Größenordnungen der Wirkungen für den Abstandsregeltempomaten und die Auffahrkollisionswarnung sind in einer Veröffentlichung von PwC⁴³ für Europa beziffert worden und werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 11: Verkehrssicherheitseffekte durch Abstandsregeltempomaten und Auffahrkollisionswarnung

Fahrzeug-typ	Straßenart	Anteil System eingeschaltet	Reduktion der kritischen Situationen	Reduzierung Auffahrunfälle	Reduzierung Unfälle mit Personenschaden in EU27
Pkw	Autobahn	51%	32 – 82%	16% - 42%	2,2% - 5,8%
Pkw	Landstraße	31%	32 – 45%	10% - 14%	0,47% - 0,65%
Pkw	innerorts	19%	32%	6%	0,14%
Lkw	Autobahn	42%	14 – 36%	6% - 15%	0,2% - 0,6%

Quelle: PwC, The Insurance Monitor: To Be or Not to Be – the Future of Motor Insurance, 2015, S. 30.

Diese Systeme führen demnach zu einer deutlichen Reduzierung der Auffahrunfälle auf allen Straßenkategorien in einer Spannweite zwischen 6% und 42%. Bezogen auf alle Unfälle mit Personenschaden in der EU27 liegt die Reduktion zwischen 0,2% und 5,8%.

Von der Verbesserung der Verkehrssicherheit profitieren nicht nur die Nutzer der automatisierten bzw. autonomen Fahrzeuge. Verkehrssicherheitsgewinne können auch andere Teilnehmer im Straßenverkehr erfahren, da auch nicht automatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr sicherer geführt werden.

Berechnungen zu den Verkehrssicherheitswirkungen von Assistenzsystemen liegen auch aus der Studie von Bosch vor.⁴⁴ Dort wird davon ausgegangen, dass in den Ländern Deutschland, USA und China bis zum Jahr 2025 in bis zu 90 Prozent aller Fahrzeuge ESP eingebaut ist. Ferner wird von sensorbasierten Notbrems- und Spurhalteassistenten in bis zu 40 Prozent

⁴³ PwC, The Insurance Monitor: To Be or Not to Be – the Future of Motor Insurance, 2015, S. 30.

⁴⁴ Robert Bosch GmbH, „Connected Car Effect 2025“, Bosch-Studie zeigt: Mehr Sicherheit, mehr Effizienz, mehr freie Zeit durch vernetzte Mobilität, Pressemitteilung Dezember 2016.

des Pkw-Bestands ausgegangen. Für diesen Ausstattungsgrad wird mit einer Reduzierung der Unfallzahlen mit Personenschaden um 260.000 (Deutschland: 30.000, USA: 210.000, China: 20.000) gerechnet. Dadurch werden 350.000 weniger Verletzte (Deutschland: 37.000, USA: 290.000 und China: 25.000) erwartet. Schließlich rechnen die Autoren damit, dass etwa 11.000 Menschenleben durch vernetzte Assistenzsysteme gerettet werden, könnten (Deutschland: 300, USA: 4.000, China: 7.000). Die durch vernetzte Assistenzsysteme resultierende Kostenersparnis wird mit bis zu 4,43 Milliarden Euro weniger Sach- und Schadenskosten beziffert.

Legt man diese Einspareffekte auf die aktuellen Unfallzahlen in Deutschland um, so reduzieren sich damit im Ergebnis die Unfälle, die Anzahl der Verletzten und der Getöteten in Deutschland um knapp 10%.

Eine Abschätzung für das Autobahnnetz in Deutschland liegt aus der Fraunhofer-Studie vor.⁴⁵ Dabei wurden die Wirkungen des hochautomatisierten Fahrens auf das Unfallgeschehen bewertet. Der Anteil menschlichen Fehlverhaltens am Unfallgeschehen wird allgemein auf 90% geschätzt. Hieran setzten die Systeme der Automatisierung an.

Den verschiedenen Assistenz- und Automatisierungsfunktionen werden sehr unterschiedliche Unfallvermeidungspotentiale zugeschrieben. Einen Überblick über ausgewählte Systeme gibt die nachfolgende Tabelle:

⁴⁵ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, November 2015, S. 268ff.

Tabelle 12: Unfallvermeidungspotentiale unterschiedlicher Assistenz- und Automatisierungsfunktionen

Assistenz- und Automatisierungsfunktionen	Wirkungen
Notbremsassistent	Reduzierung der Unfallhäufigkeit zwischen 10% und 27%
Spurhalteassistent	Unfallvermeidungspotential von 4,4%
Spurwechselassistent	Unfallvermeidungspotential von 1,7%
Kombination von Systemen (ACC, LKA, LDW)	Rückgang der Verunglückten um 27%
Querverkehrsassistent	Reduzierung aller Unfälle im Wirkungsfeld um 73,3%
Spurhalteassistent, Frontkollisionsschutz mit aktivem Notbremsassistent	Unfallvermeidungspotential von bis zu 20%
Notbremsassistent, Fahrstreifenverlassenswarner, Abbiegeassistent, Totwinkelwarner	Unfallvermeidungspotential zwischen 1,7% und 17,8%

Quelle: Studienauswertung in: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, ...a.a.O., S. 269f.

Nach Auswertung verschiedener Literaturquellen, in denen die Wirkungen einzelner Assistenzsysteme bewertet worden sind, kommen die Autoren zu der Ansicht, dass der Wirkungsgrad des hochautomatisierten Fahrens auf das Unfallgeschehen in einer Bandbreite zwischen 34% und 59% abgeschätzt werden kann. Die daraus sich ergebenden Unfallkostensparnisse sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 13: Unfallkostensparnis durch hochautomatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen im Personenverkehr

Kostenart	Szenario	Minimalwert	Maximalwert
		[in Mio. €/a]	[in Mio. €/a]
Unfallkostensparnis	100% HAF	843	1.451
	0,1 % HAF	0,88	1,53
		[in €/a]	[in €/a]
Kosteneinsparung je Fahrzeug		19	33

Quelle: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, ...a.a.O., S. 272.

Die Effekte je Fahrzeuge liegen zwischen 19 € und 33 € jährlich. Deutlich wird, dass die Marktdurchdringung die gesamten Einspareffekte entscheidend beeinflusst.

Auch speziell für den Lkw-Verkehr wird ein wichtiger Nutzenbeitrag im automatisierten Schwerlastverkehr in einer Erhöhung der Verkehrssicherheit gesehen. Die Studie zum Lkw-Verkehr für die USA kommt zu dem Schluss, dass die zunehmende Automatisierung im Schwerlastverkehr (Platooning, autonomes Fahren) die Lkw-Unfallzahlen im Jahr 2020 um 30% und im Jahr 2040 um 90% reduziert.⁴⁶

Insgesamt wird deutlich, dass die Auswirkungen der Fahrerassistenzsysteme auf die Verkehrssicherheit ausführlich in verschiedenen Studien untersucht und ihre Wirksamkeit für bestimmten Situationen und Einsatzgebiete detailliert belegt werden können. Diese Systeme leisten einen erheblichen Beitrag zur Verkehrssicherheit auf den Straßen. Zudem wird deutlich, dass die von den Systemen entfalteteten Wirkungen mit zunehmender Ausstattung der Fahrzeuge (Marktdurchdringung) deutlich ansteigen. Ferner profitieren von den Systemen nicht nur die Nutzer, sondern durch ein vermindertes Unfallgeschehen im Mischverkehr auch Fahrer mit konventionellen Fahrzeugen ohne derartige Funktionen sowie Motorradfahrer und Fußgänger. Dem autonomen Fahren werden noch höhere Effekte zugeschrieben, da hier nach vielfacher Auffassung die Unfälle, die auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen sind, nahezu vollständig vermieden werden können.

⁴⁶ Roland Berger, Automated Trucks, The next big disruptor in the automotive industry? Automated Truck Study-Short Version. Chicago / Munich – April 2016.

Tabelle 14: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf die Verkehrssicherheit

Verkehrsart	Wirkungskomponente	Wirkungsrichtung	Quantitative Abschätzungen	Quellen
Straßenverkehr insgesamt	Anzahl Unfälle		<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung Unfallgeschehen auf Autobahnen in einer Bandbreite zwischen 34% und 59% (Deutschland) [Stufe 3] • Rund 10% weniger Unfälle mit Personenschäden (Deutschland) [Stufe 1, 2] 	Fraunhofer IAO (2015), Bosch (2016)
	Anzahl Verletzte		<ul style="list-style-type: none"> • Rund 9% weniger Verletzte (Deutschland) [Stufe 1, 2] 	Bosch (2016)
	Anzahl Unfalltote		<ul style="list-style-type: none"> • Rund 9% weniger Unfalltote (Deutschland) [Stufe 1, 2] 	Bosch (2016)
Straßengüterverkehr	Anzahl Unfälle		<ul style="list-style-type: none"> • Rund 30% weniger Unfälle im Schwerlastverkehr (USA) bis 2030 [Stufe 3, Platooning] und 90% bis 2040 [Stufe 5, autonomes Fahren] 	Roland Berger (2016)
	Anzahl Auffahrunfälle		<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion um 6% - 15% auf Autobahnen [Stufe 1, 2] 	PwC (2015)
	Anzahl Unfälle mit Personenschaden		<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion Unfälle mit Personenschaden in EU27 um 0,2% - 0,6% [Stufe 1, 2] 	PwC (2015)
Straßenpersonenverkehr	Anzahl Auffahrunfälle		<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion um 6% - 42% je nach Straßenkategorie [Stufe 1, 2] 	PwC (2015)
	Anzahl Unfälle mit Personenschaden		<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion Unfälle mit Personenschaden in EU27 um 0,14% - 5,8% [Stufe 1, 2] 	PwC (2015)

Anmerkung: Automatisierungsstufen nach SAE-Definition (s. S. 9 und Tabelle 1).

Quelle: Eigene Darstellung nach Auswertung der Quellen.

Ergebniszusammenfassung zur Verkehrssicherheit

- Verkehrssicherheit steigt mit zunehmender Ausstattung der Fahrzeuge (Marktdurchdringung) deutlich an
- die Systeme weisen bei bestimmten Unfallarten (z.B. Auffahrunfälle) zweistellige Einsparpotentiale auf
- auch Fahrer mit konventionellen Fahrzeugen sowie Motorradfahrer und Fußgänger profitieren von den Systemen im Mischverkehr
- dem autonomen (fahrerlosen) Fahren werden noch höhere Effekte zugeschrieben

6. Modal Split-Wirkungen und städtischer Verkehr

Die Automatisierung kann aufgrund der damit verbundenen Wirkungen zu Verlagerungseffekten von Gütern vom Schienen- auf den Straßenverkehr (wie auch umgekehrt) und von Personen vom öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) auf den MIV (wie auch umgekehrt) führen.

Für den Güterverkehr liegen derartige Befürchtungen vor. Der Automatisierung des Straßengüterverkehrs und in der Endstufe dem autonomen Fahren werden erhebliche Kostenvorteile vor allem im Kraftstoffverbrauch und bei den Personalkosten (siehe Kap. 3) zugeschrieben. Dies steigert die Effizienz und Zuverlässigkeit und somit die Attraktivität des Verkehrsträgers Straße. Zudem sind auch Kostenvorteile durch geringere Versicherungskosten und eine optimierte Wartung zu erwarten. Die Automatisierung des Verkehrs und in der Endstufe das autonome Fahren im Güterverkehr kann somit eine Anteilsverschiebung in Richtung Straße bewirken. Derzeit herrschen jedoch noch große Unklarheiten über das Ausmaß der induzierten Verkehre und über die Modal Split-Effekte, die bislang kaum untersucht worden sind.

Dem automatisierten bzw. autonomen Fahren werden im Personenverkehr erhebliche Potentiale zur Neugestaltung der Verkehrs- und Mobilitätsstrukturen gerade im städtischen Umfeld zugeschrieben. Im Personenverkehr führt das automatisierte Fahren zu einer Steigerung des Komforts im MIV. Von verschiedener Seite wird befürchtet, dass der öffentliche Verkehr unter dem autonomem Fahren leiden wird. Der VDV spricht von einer „Existenzbedrohung für den ÖV“: das Autofahren wird schneller, günstiger, insgesamt attraktiver. Dies gehe zu Lasten der ÖV-Anteile am Personenverkehrsaufkommen.⁴⁷ Andererseits führt das automatisierte Fahren auch im Bereich des ÖV zu einer besseren Ausnutzung der Fahrzeug- und Infrastrukturkapazitäten und damit zu Effizienzsteigerungen, die wiederum das ÖV-Angebot attraktiver werden lassen. So testet die Schweizer Postauto AG in Sitten einen „Smartshuttle“⁴⁸, der ohne Fahrer auskommt.

Die Ambivalenz der Wirkungen wird in den folgenden Aspekten deutlich:⁴⁹

⁴⁷ VDV, Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge, Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen, Köln, November 2015.

⁴⁸ Przybilla, S. Wie es ist, im Bus ohne Lenkrad mitzufahren, in: Süddeutsche Zeitung vom 03.02.2017.

⁴⁹ Erwartungen von Experten und Verantwortlichen von Städten, Fahrzeugherstellern und Zulieferern, ÖPNV-Unternehmen und privaten Mobilitätsdienstleistern; hierzu: Dornier

- Durch das autonome Fahren werden die Kosten für Mobilitätsangebote durch Personalkosteneinsparungen, eine steigende Auslastung und damit verminderter Betriebskosten sinken. Das macht den ÖV konkurrenzfähiger im Wettbewerb der Verkehrsträger.
- Das autonome Fahren hat erhebliche Auswirkungen auf die Betriebsstruktur und Angebotsplanung des ÖV. Es beeinflusst konkret die Haltestellen- und Linienplanung, die Größe der eingesetzten Fahrzeuge, die Umlauf- und Einsatzplanung der Fahrzeuge. Shuttle-Verkehre werden auch bei geringerer Nachfrage wirtschaftlicher und können in letzter Konsequenz die Schienen- und Straßenbahnverkehre kannibalisieren.
- Das autonome Fahren löst Veränderungen im Angebot öffentlicher und privater Mobilitätsdienstleistungen aus. Durch neuartige Ridesharing- und Carsharing-Angebote und einer damit einhergehenden Individualisierung des öffentlichen Verkehrs wird eine Verschmelzung der bisher am Markt angebotenen Mobilitätsdienstleistungen (von Taxi-, Mietwagen-, Car Sharing-Angeboten) zu beobachten sein. Gerade das Carsharing ist prädestiniert dafür, der Akzeptanz und Nutzung des autonomen Fahrens durch die privaten Haushalte den Weg zu bereiten (vergleichbar den E-Fahrzeugen). So gaben mehr als die Hälfte der Befragten an, dass sie sich gut vorstellen können, autonome Fahrzeuge im Rahmen von Carsharing zu testen.⁵⁰ Eine andere Befragung betont die Bedeutung der eigenen Erfahrung. Dort wird darauf verwiesen, dass 68% der Befragten autonome Fahrzeuge eher nutzen würden, wenn sie es vorher testen könnten.⁵¹
- Auf der anderen Seite wird der private Pkw-Besitz deutlich an Bedeutung verlieren. Nach Ansicht von Experten werden in 2030 25% aller innerstädtischen Pkw-Fahrten mit autonomen Robotaxi zurückgelegt. Der Anteil von Taxi und Car Sharing liegt heute bei 1%.
- Die Chancen für den ÖPNV könnten in einem neuen Selbstverständnis liegen, indem der ÖPNV sich zukünftig nicht als alternatives, ergänzendes Angebot zum Individualverkehr versteht, sondern die Entwicklung von innovativen Angeboten zur Bedienung der

Consulting International, Autonomes Fahren, Erwartungen an die Mobilität der Zukunft, Berlin 2017, S. 22ff.

⁵⁰ Detecon International GmbH, Autonomes Fahren: Wenn das Lenkrad zur Sonderausstattung wird. Eine empirische Untersuchung der Akzeptanz autonom fahrender Fahrzeuge, Köln, März 2016, S. 17f.

⁵¹ Deloitte, Autonomes Fahren in Deutschland - wie Kunden überzeugt werden, Stand 9/2016, S. 9.

Mobilitätsnachfrage selbst gestaltet. In einer Studie der acatech⁵² wird auf diese Chance und das Potential, das darin liegt, verwiesen. In diesem Verständnis tritt der ÖPNV z.B. als Betreiber von Plattformen für ein intermodales Verkehrssystem auf, in dem die strikte Trennung von ÖV und IV aufgehoben wird und die Betreiber des ÖV als Plattformanbieter die Erstellung von Mobilitätsangeboten verkehrsträgerunabhängig über alle Verkehrsmittel hinweg übernehmen (Bereitstellung von ÖV-Shuttles, Carsharing- und Ridesharing-Angeboten, ergänzende Informationsdienstleistungen).

Welche Entwicklungslinien sich einstellen und welche Wirkungen letztlich überwiegen und ob es eine Entwicklung im Personenverkehr „pro Pkw“ oder „pro ÖPNV“ gibt, ist aus heutiger Sicht noch nicht abschließend zu beurteilen.

Die umfassendsten Berechnungen und Quantifizierungen zu den Auswirkungen einer autonomen und geteilten Fahrzeugflotte im städtischen Verkehr sind vom International Transport Forum⁵³ vorgelegt worden. In diesen Simulations- und Szenarienrechnungen für Lissabon wird detailliert untersucht, welche Auswirkungen das autonome Fahren im Personenverkehr in Kombination mit Sharing-Konzepten (Ridesharing- und Carsharing-Angebote) auf das Verkehrsgeschehen in der Stadt hat. Dabei wird versucht, die zu erwartenden sehr unterschiedlichen Wirkungen u.a. auf den Modal Split, das Verkehrsaufkommen im Pkw-Verkehr, die Fahrzeugflotte und den Parkflächenbedarf quantitativ zu kennzeichnen. Unterschieden werden dabei verschiedene Szenarien, bei denen der Anteil der autonomen Fahrzeugflotte differenziert wird. Ferner werden zwei Angebotsfälle im ÖV unterschieden: Im ersten Fall wird die Simulation ohne ein entsprechendes Angebot im Hochleistungs-ÖV (Metro, Tram) und im zweiten Fall mit einem entsprechenden Angebot durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der Simulation sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

⁵² Lemmer, K. (Hrsg.): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2016, S.34ff.

⁵³ International Transport Forum, Urban Mobility System Upgrade, Paris 2015.

Tabelle 15: Verkehrliche Auswirkungen autonomer geteilter Fahrzeugflotten im Stadtverkehr am Beispiel Lissabon

			Modal Split-Anteil ÖV in %	Anzahl privater Pkw in %	Pkw-Fahrleistungen in %	Stellflächenbedarf in %
Basisszenario (Vergleich)			15	100 (203.000)	100 (3,8 Mio. km)	100 (160.000)
100% geteilte autonome Flotte	Ride-sharing	Ohne-ÖV-Fall	0	12,8	122,4	7,2
		Mit-ÖV-Fall	22	10,4	106,4	5,6
	Car-sharing	Ohne-ÖV-Fall	0	22,8	189,4	16,0
		Mit-ÖV-Fall	22	16,8	144,3	10,7
50% geteilte autonome Flotte und 50% private Pkw	Ride-sharing	Ohne-ÖV-Fall	0	102,4	160,2	99,4
		Mit-ÖV-Fall	22	78,2	129,8	75,8
	Car-sharing	Ohne-ÖV-Fall	0	107,0	190,9	103,8
		Mit-ÖV-Fall	22	82,0	150,9	78,8

Anmerkung: Ohne-Fall: Ohne ÖV-Angebot für starkströmende Verkehre.
Mit-Fall: Mit ÖV-Angebot für starkströmende Verkehre.

Quelle: International Transport Forum, Urban Mobility System Upgrade, Paris 2015, S. 18ff..

Die Szenarienrechnungen zeigen bemerkenswerte Ergebnisse:

- Bei Beibehaltung eines leistungsstarken ÖV (Metro, Tram) würde sich der Anteil des ÖV von 15% auf 22% erhöhen.
- Bei einer 100% geteilten autonomen Flotte kann der Pkw-Bestand um bis zu 90% gesenkt werden. Im Mischverkehr kann bei Beibehaltung eines leistungsfähigen ÖV die Anzahl der Pkws um rund 20% reduziert werden.
- Auch bei einer Einstellung des ÖV kann die Mobilitätsnachfrage durch die autonome geteilte Flotte bedient werden. Dies führt in diesem Fall jedoch zu einer Steigerung der Pkw-Fahrleistungen um bis zu 90%.
- Enorme Einspareffekte werden im Stellplatzflächenbedarf für die Fahrzeugflotte erzielt. Dieser kann auf bis auf 6% bis 16% des bestehenden Angebots reduziert werden.
- Ride-Sharing-Konzepte führen zu weniger Autoverkehr, erzeugen aber durch Zu- und Aussteigemöglichkeiten im Mittel 40% Umwegfahrten mit einer Fahrzeitverlängerung von 30%. Car-Sharing-Szenarien führen zur Verkürzung der Fahrzeiten bis zu 38%.

Bei der Bewertung der Studienergebnisse ist festzuhalten, dass diese Resultat der Modellierungen der spezifischen Situation und Rahmenbedingungen der Stadt Lissabon sind. Eine Übertragung auf andere Städte ist daher nur bedingt möglich. Dennoch geben die Ergebnisse erste Hinweise und Informationen über die Richtung und das Ausmaß der Wirkungen, die durch das Angebot autonomer und geteilter Fahrzeugflotten ausgelöst werden können. Ähnliche Simulationen für entsprechende Städte in Deutschland könnten konkretere und wertvolle Informationen über die zu erwartenden Auswirkungen geben. Keine Informationen finden sich zu den Kosten der Fahrzeugnutzung und auch die Bedeutung und Funktion des nicht motorisierten Verkehrs sind nicht hinreichend modelliert worden.⁵⁴

Auch die Auswertung weiterer internationaler Studien macht deutlich, dass im städtischen Verkehr Modal Split-Verlagerungen zugunsten des autonomen Fahrens zu erwarten sind.⁵⁵ Verlagerungen finden zum einen vom liniengebundenen Öffentlichen Verkehr, aber auch vom Rad- und Fußgängerverkehr statt. Die Höhe der Verlagerungseffekte ist dabei wesentlich von den unterstellten Konzepten abhängig. Wird das autonome Fahren im Kontext geteilter Konzepte (Ridesharing, Carsharing) angeboten, so sind tendenziell höhere Verlagerungswirkungen zu erwarten. Einen Überblick über die Modal Split-Wirkungen und die Auswirkungen im städtischen Verkehr gibt die nachfolgende Tabelle.

⁵⁴ Vgl., VDV, Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge, Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen, Köln, November 2015.

⁵⁵ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 332f.

Tabelle 16: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Wirkungen auf den Modal Split und städtischen Verkehr

Verkehrsart	Wirkungskomponente	Wirkungsrichtung	Quantitative Abschätzungen	Quellen
Güterverkehr	Modal Split Straße	?	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungen unklar • Befürchtet wird aufgrund Effizienzsteigerungen Anteilsverschiebung in Richtung Straße 	
Personenverkehr	Modal Split ÖV	?	<ul style="list-style-type: none"> • Im Saldo unklar 	ITF (2015), VDV (2015), Dornier (2017)
			<ul style="list-style-type: none"> • Verlagerungseffekte zum Pkw aufgrund der Attraktivitätssteigerung IV 	ITF (2015), VDV (2015), Dornier (2017)
			<ul style="list-style-type: none"> • Zuwächse im ÖV durch effizientere, wirtschaftlichere Angebote • Neue Angebotsformen und Mobilitätsdienste (ÖV-Shuttle) 	ITF (2015), VDV (2015), Dornier (2017), Detecon (2016), Deloitte (2016), acatech (2015)

Quelle: Eigene Darstellung nach Auswertung der Quellen.

Ergebniszusammenfassung Modal Split-Wirkungen

- kein eindeutiges Bild bei den Modal Split-Wirkungen und den Auswirkungen im städtischen Verkehr
- automatisiertes bzw. autonomes Fahren bietet erhebliche Potentiale zur Neugestaltung der Verkehrs- und Mobilitätsstrukturen gerade im städtischen Umfeld
- neue Angebotsformen und Mobilitätsdienste (ÖV-Shuttle) im ÖV zu erwarten

7. Raumwirkungen (Attraktivität des ländlichen Raums und Flächenbedarf)

In Deutschland steht aktuell einem Bevölkerungsrückgang in vielen ländlichen Regionen ein Bevölkerungszuwachs in den Städten und Ballungsräumen in Deutschland gegenüber. Damit sind erhebliche Probleme in der Bereitstellung einer ausreichenden Infrastruktur und eines angemessenen Angebots an Versorgungs-, Bildungs- und Kultureinrichtungen verbunden. Diese Entwicklungen verschärfen den Trend weiterer Abwanderungen aus den ländlichen Räumen und eines weiteren

Zuzugs in die Ballungsräume. Im Verkehrsbereich sind eine weitere Ausdünnung des Infrastruktur- und Verkehrsangebots im ländlichen Raum und eine zunehmende Überlastung der Netze und des Verkehrsangebots in den Ballungsräumen die Folge.

Hier können Angebote des automatisierten bzw. autonomen Fahrens ansetzen und den ländlichen Raum wieder stärken. Neue wirtschaftlich darstellbare Mobilitätsangebote im Individual- und öffentlichen Verkehr können den Zugang zur Mobilität erleichtern und die Erschließung des ländlichen Raums verbessern. Neue Strukturen, Geschäftsmodelle und Angebote im Wirtschafts-, Liefer- und Zustellverkehr erleichtern die Versorgung des ländlichen Raums mit Waren und Dienstleistungen. Eine verbesserte individuelle Mobilität, ein leichter, schneller und verbesserter Zugang zum ÖPNV und ein verbesserter Zugang zu Versorgungs-, Bildungs- und Kultureinrichtungen können die Attraktivität des ländlichen Raums erhöhen und die Abwanderungstendenzen abschwächen. Diese möglichen raumstrukturellen Auswirkungen einschließlich der Entwicklungsperspektiven der jeweiligen Räume werden in diesem Arbeitsschritt aufgearbeitet.

In der Fachliteratur wird in der Tat von weitreichenden raumstrukturellen Auswirkungen des autonomen Fahrens ausgegangen. Es werden verschiedene raumstrukturelle Wirkungsstränge unterschieden:⁵⁶

- Auswirkungen auf regionaler Ebene ergeben sich aus der verbesserten Zugänglichkeit sowohl im Waren- als auch im Personenverkehr. Verbunden damit sei eine Umkehr der derzeit beobachtbaren Urbanisierung – die „ex-urbanization“, also die Rückkehr in die ländlichen Räume. Auch die Bundesregierung sieht die Potentiale des autonomen Fahrens in der Erhaltung der „Mobilität in ländlichen Räumen“.⁵⁷ Eine Szenarienrechnung für Seattle ergab, dass die Zugänglichkeit („accessibility“) für alle Räume erhöht wurde, dass der Gewinn für ländliche Räume infolge autonomen Fahrens aber weitaus höher ausfiel als für urbane Räume. Im Szenario stieg die Verkehrsnachfrage in ländlichen Räumen um etwa 30%.

Die Erreichbarkeit und damit Attraktivität von Randlagen (Vorstädte, Wohngebiete am Stadtrand) wird durch autonome Fahrzeuge gesteigert.

⁵⁶ Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2017, Vol. 21, No. 4, 333ff.

⁵⁷ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten*, Berlin, Stand September 2015, S. 14

Dies bewirkt zum einen eine Entlastung der Großstädte, zum anderen auch eine Entlastung der privaten Haushalte, indem sie sich nicht in arbeitsplatznahen innerstädtischen Wohngebieten ansiedeln, sondern auf die weiter entfernten, dafür aber wesentlich günstigeren Randlagen ausweichen.

- Auswirkungen werden aber auch auf lokaler Ebene erwartet. Hier sind vor allem der Infrastrukturbedarf und die Nutzung der Infrastruktur von Bedeutung:
 - Die Möglichkeit des autonomen Parkens reduziert den Parkplatzbedarf vor allem in hochverdichteten Ballungsräumen und Stadtzentren. So können Fahrzeuge außerhalb der Stadtzentren und/oder auf kleineren als bisher üblichen Parkplätzen geparkt werden.⁵⁸ US-amerikanische Modell- und Szenarienrechnungen gehen davon aus, dass so bis zu 97% der Parkraumnachfrage in Stadtzentren auf Parkzonen außerhalb verlegt werden können. Freiwerdende Parkplatzkapazitäten können entsprechend für den fließenden Verkehr, für ökonomische Aktivitäten oder auch für Freizeitaktivitäten genutzt werden. Allerdings sind diese Wirkungen von der Rechtslage abhängig: erst die Erlaubnis vollkommen fahrerlosen Fahrens und Parkens ermöglicht die Nutzung von Parkanlagen außerhalb der Zentren.
 - Größere Effekte werden in Modellrechnungen dem automatischen Parken selbstfahrender Fahrzeuge (Valet Parking) zugeschrieben. Valet Parking und gleichzeitige Koordination des Parkraummanagements sorgen für eine optimalere Nutzung des verfügbaren Parkraums. In Tiefgaragen mit Einführung von Zonen für automatisiertes Parken können gut ein Drittel mehr Fahrzeuge als zu früheren Zeiten untergebracht werden.⁵⁹
 - Eher gering eingeschätzt werden die Auswirkungen auf den Parkraumbedarf für Fahrzeuge am Wohnort.⁶⁰ In Wohngebieten mit vorwiegend Einfamilienhäusern und privaten Stellplätzen wird lediglich das bisherige Fahrzeug durch ein autonomes Fahrzeug ersetzt, sofern weiterhin ein eigenes Fahrzeug vorgehalten werden soll. In dichter besiedelten Wohngebieten mit Straßenparken

⁵⁸ Experten gehen davon aus, dass „bis zu 20 Prozent mehr Fahrzeuge ... bei gleicher Fläche abgestellt werden können“, Lossau, N., Parkplatz suchen, einparken, vorfahren – machen Autos bald selbst, in: die Welt vom 26.07.2017, Abruf am 13.11.2017.

⁵⁹ acatech (Hrsg.): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech POSITION), München 2015, S. 28.

⁶⁰ Heinrichs, Dirk, Autonomes Fahren und Stadtstruktur, in: Mauer, M. et al., Autonomes Fahren, 2015.

und/oder Quartiersgaragen werden Möglichkeiten geschaffen werden müssen, die Fahrzeuge in Wohnortnähe parken zu lassen. Hier kommt dann allerdings der sinkende Platzbedarf zur Geltung. Aus Entwicklersicht kann diese Einsparung durch kleinere Parkplätze, die Vermeidung von Rampen und Fahrgassen und die Verringerung von Geschosshöhen zu einer Raumbedarfssenkung um bis zu 60% führen. Dies führt neben der Möglichkeit der alternativen Nutzung des Parkraums zu deutlichen Kosteneinsparungen bei der Entwicklung von Neubaugebieten.

- Die Automatisierung des Verkehrs stellt auch die Kommunen vor eine große Herausforderung. Die Automatisierung und Vernetzung des Verkehrssystems ist von großer Bedeutung für die zukünftige Raum- und Stadtplanung. Dahinter steht z.B. die Frage wie die zukünftigen Straßenflächen, Fahrbahnen, Kreuzungen und Knotenpunkte, aber auch die Flächen für den nicht motorisierten Verkehr gestaltet und konzipiert werden müssen. Zu klären ist beispielsweise, ob es eine Funktionstrennung zwischen den unterschiedlichen Verkehren geben soll und ob es hierfür ein definiertes Netz (hinterlegtes Vorrangnetz) geben soll, auf dem die autonomen Fahrzeuge fahren sollen. Darüber hinaus ist zu untersuchen, inwieweit die Entwicklungen des autonomen Fahrens Auswirkungen auf die Formulierung und Entwicklung von Leitbildern zur Stadtentwicklung haben werden.⁶¹

⁶¹ Heinrichs, Dirk, Autonomes Fahren und Stadtstruktur, in: Mauer, M. et al., Autonomes Fahren, 2015, S. 237.

Tabelle 17: Zusammenfassende Darstellung verschiedener Studien zu den Raum- und Flächenwirkungen

Verkehrsart	Wirkungskomponente	Wirkungsrichtung	Quantitative Abschätzungen	Quellen
Straße	Zugänglichkeit des ländlichen Raums		<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Zugänglichkeit ländlicher Räume • Anstieg Verkehrsnachfrage in ländlichen Räumen bis zu 30% 	Milakis et al. (2017)
	Erreichbarkeit, Attraktivität des ländlichen Raums		<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der Attraktivität von Randlagen (Vorstädte, Wohngebiete am Stadtrand) sofern IT-Infrastruktur (Mindeststandard) vorhanden ist 	Milakis et al. (2017)
	Infrastruktur- / Flächenbedarf im lokalen Umfeld		<ul style="list-style-type: none"> • bis zu 97% der Parkraumnachfrage in Stadtzentren kann auf Parkzonen außerhalb verlegt werden • 20%-33% mehr Fahrzeuge können bei gleicher Fläche abgestellt werden 	Milakis et al. (2017), Lossau (2017), acatech (2015), Heinrichs (2015)

Quelle: Eigene Darstellung nach Auswertung der Quellen.

Ergebniszusammenfassung zu den Raumwirkungen

- Verbesserung der Zugänglichkeit, Erreichbarkeit und Attraktivität des ländlichen Raums wird erwartet
- im städtischen Bereich eine erhebliche Reduzierung des Stellplatzflächenbedarfs für Pkw möglich
- „neu“ gewonnenen Flächen können einer alternativen Verwendung zur Verfügung gestellt werden

8. IT-Sicherheit und Datenschutz

Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen führt zu zusätzlichen Daten- und Informationsflüssen. Ein autonom fahrendes und vernetztes Fahrzeug muss verschiedene Kommunikationswege verwenden, um ausreichend Informationen zu erhalten und weiterzugeben. An dieser Stelle sind auch die sicherheitstechnischen Aspekte von zentraler Bedeutung: Die Datenverschlüsselung, die Einhaltung der Datenschutzrichtlinien, die Abschottung des Fahrzeugs nach außen und die Sicherheit gegen Datenmanipulation durch z.B. Hackerangriffe sind nur ein Auszug der notwendigen Maßnahmen. Abzuklären ist, welche Maßnahmen und Schritte konkret unternommen werden müssen, dass die Gefahr und das Risiko vermieden bzw. minimiert werden, dass unbefugte Dritte die Steuerung der Fahrzeuge mit entsprechenden negativen Auswirkungen auf die Sicherheit

und die Prozesse im Personenverkehr sowie in Transport und Logistik übernehmen können.

Neben der Sicherheit vor Zugriffen von außen spielt auch der Datenschutz eine wichtige Rolle. Die Auto-Bordcomputer erfassen und verarbeiten enorme Datenmengen zur Steuerung und Vernetzung der Automobile. Diese Daten wecken Begehrlichkeiten auf den (exklusiven) Zugriff u.a. bei Herstellern, Versicherungen und Werkstätten. Insofern bedarf es – auch um die Akzeptanz des automatisierten Fahrens beim Kunden zu erhöhen - klarer Regeln über die Hoheit und den Zugriff personenbezogener Daten.

Probleme werden in Fachkreisen und in der Öffentlichkeit vor allem gesehen in:

- Der Offenheit der Systeme - keine absolute Trennung von Infotainment und internem Netzwerk. Damit können Lücken im Infotainmentsystem genutzt werden, um die automatisierten/vernetzten Fahrsysteme anzugreifen.⁶² Die Gefahr von Hackerangriffen ist sehr konkret. So gelang es „White hat“-Hackern in 2015, die Kontrolle über wichtige Fahrfunktionen eines Autos zu übernehmen mit der Möglichkeit, Geschwindigkeit, Bremsverhalten und Lenkung zu manipulieren. Die Lücke lag im Infotainment-System.⁶³
- Vernetzung der Fahrzeuge untereinander ermöglicht enorme Verbreitungsmöglichkeiten von Schadsoftware bzw. Trojanern.⁶⁴
- Einer US-amerikanischen Studie aus dem Jahr 2015⁶⁵ zur Folge sind „spoofing and injection of fake messages into the communication of vehicles“ die beiden üblichsten und gleichzeitig schwerwiegendsten Angriffe auf Fahrzeugkommunikationssysteme. „Spoofing“ bezeichnet dabei die Anwendung von Täuschungsmanövern zur Verschleierung der eigenen Identität. „Injection of fake messages“ bezeichnet die Einschleusung falscher Informationen in das System.

⁶² Deutschlandfunk: Datensicherheit beim autonomen Fahren – Trojaner im Auto, Sendung vom 04.11.2017; Abruf am 09.11.2017.

⁶³ Aus: McKinsey&Company, Wettlauf um den vernetzten Kunden – Überblick zu den Chancen aus Fahrzeugvernetzung und Automatisierung, September 2015, S. 37f.

⁶⁴ Ebenda.

⁶⁵ Vgl. dazu Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 327ff; oder: https://www.academia.edu/8748571/Potential_Cyberattacks_on_Automated_Vehicles.

- Die „feindliche Übernahme“ eines autonomen Fahrzeugs kann dieses Fahrzeug zu einem „Werkzeug für Erpressungen, Bedrohungen und Lauschangriffe“ machen.⁶⁶
- Die Angst vor möglichen Sicherheitsproblemen mindert die Akzeptanz und steigert das Misstrauen gegen autonomes Fahren. In einer Befragung von 643 Personen in Deutschland befürchten mehr als die Hälfte der Befragten, das Fahrzeug könnte gehackt werden und würde sie davon abhalten, ein autonomes Fahrzeug zu nutzen.⁶⁷ Damit wird die Nachfrage nach autonomen Fahren und die Entwicklung autonomer Fahrzeuge deutlich gehemmt.

Entsprechend sieht es die Bundesregierung als ihre Aufgabe, aber auch als Aufgabe der Industrie an, „internationale Standards zu setzen, damit automatisierte und vernetzte Fahrsysteme ihre Funktion über Staatsgrenzen hinweg sicher und verlässlich erfüllen“ unter Gewährleistung des Datenschutzes.⁶⁸: Dies umfasst die folgenden (gestalterischen) Bereiche:

- Standardisierung der IT-Sicherheit durch :
 - **Zertifizierung von Technik, Datenverarbeitungsverfahren, Steuerungssoftware und Überprüfungsmaßnahmen**; werden derzeit geprüft.
 - **Indirekte Verpflichtung der Hersteller durch europaweite Guidelines**; Zustimmung zum Verfahren durch zuständige UNECE-⁶⁹Arbeitsgruppe; momentan: Erarbeitung von „Grundsätzen zum Schutz gegen nicht-autorisiert Zugriffe von außen“. Ausstehend: Vorlage vor der UNECE und Beschluss durch Mitgliedstaaten.
 - Umsetzung **verpflichtender sicherheitsbezogener Vorgaben für die Zulassung automatisierter und vernetzter Fahrsysteme**; internationale Anerkennung der Vorgaben angestrebt; Aufnahme des Digitalanteils in automatisierten und vernetzten Fahrzeugen in die internationale ISO-Norm 26262 („funktionale Sicherheit von sicherheitskritischen elektrischen und elektronischen Komponenten“.
 - Aufnahme des Bereichs „Intelligente Verkehrssystem“ in die nationale „Datenrunde“ der Bundesregierung; Anwendung eines **Schutzprofils**

⁶⁶ Computerwoche: Autonomes Fahren vor dem Aus? Vom 09.05.2017, Abruf vom 09.11.2017.

⁶⁷ Detecon International GmbH, Autonomes Fahren: Wenn das Lenkrad zur Sonderausstattung wird, 2016, S. 16.

⁶⁸ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten, Berlin, Stand September 2015, S. 22ff.

⁶⁹ UN Wirtschaftskommission für Europa.

mit den Schwerpunkten Umgang mit Signaturschlüsseln und sichere Erstellung digitaler Signaturen.

- Datenschutz
 - Forderung nach Einhaltung des **allgemeinen Datenschutzrechts** mit besonderem Augenmerk auf Datensparsamkeit und Zweckbindung.
 - Forderung nach verstärktem Einsatz von **Anonymisierungs- und Pseudonymisierungstechniken**.
 - Bestätigung des **Grundsatzes der informationellen Selbstbestimmung**
 - Forderung nach industrieller Verantwortung bezüglich **datenschutzfreundlicher Systeme**.

Die Ausführungen zeigen, dass gerade in den Bereichen Sicherheit (Angriffe auf die Fahrzeuge von außen und Übernahme der Kontrolle) und Datenschutz noch einiges zu tun ist. Die Akzeptanz von automatisierten Fahrfunktionen bzw. des autonomen Fahrens und damit die Marktdurchdringung hängt vor allem im Personenverkehr wesentlich von der Sicherheit und dem Schutz der persönlichen Daten ab. Dies gilt besonders für Deutschland wie Befragungsergebnisse und Akzeptanzanalysen zeigen.

Ergebniszusammenfassung IT-Sicherheit und Datenschutz

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Akzeptanz des autonomen Fahrens beim Kunden setzt Sicherheit und Datenschutz voraus- Datenverschlüsselung, die Einhaltung der Datenschutzrichtlinien, die Abschottung des Fahrzeugs nach außen und die Sicherheit gegen Datenmanipulation durch z.B. Hackerangriffe sind wichtige Maßnahmen und Voraussetzung für eine erfolgreiche Marktdurchdringung der Systeme |
|---|

9. Zusammenfassende Bewertung und Konsequenzen für Deutschland

Die Auswirkungen des automatisierten bzw. autonomen Fahrens sind in verschiedenen Forschungsstudien und wissenschaftlichen Untersuchungen analysiert worden. Aus der Analyse und Auswertung der Studien lassen sich die folgenden Bewertungen vornehmen und Erkenntnisse zusammenfassend festhalten:

- Zu den technologischen Entwicklungen, den einzelnen Komponenten, den Funktionen des automatisierten Fahrens, den Forschungsanstrengungen und dem Forschungsstand in Deutschland, Europa, Amerika und Asien liegen eine Vielzahl von Studien, Untersuchungen und Forschungsergebnissen vor. Der Entwicklungspfad hin zum fahrerlosen Fahren in der Endstufe wird kenntlich gemacht. Auch die noch offenen Fragen und zu lösenden Probleme (z.B. rechtlicher Rahmen, gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Fragen) sowie die technologischen Herausforderungen, die es noch zu bewältigen gilt, werden thematisiert und ausführlich beschrieben.
- Aus den Studien wird deutlich, dass das automatisierte bzw. autonome Fahren vielfältige Wirkungen entfaltet, die sich auf unterschiedliche Felder erstrecken. Hierzu zählen u.a. die Bereiche der Mobilitäts- und Transportkosten, der Modal Split, die Infrastruktur, die Verkehrssicherheit, die Raumwirkungen und Fragen zur IT-Sicherheit und zum Datenschutz. Für verschiedene Indikatoren und verkehrliche Parameter sind die Wirkungen in ihren Größenordnungen einzeln abgeschätzt worden. Dabei konzentrieren sich die Studien vielfach auf ausgewählte Verkehrsträger, bestimmte Verkehrssituationen (z.B. Autobahnverkehre) sowie auf den Güter- oder auf den Personenverkehr. Es fehlt weitestgehend noch ein ganzheitlicher Ansatz, der modellhaft für die einzelnen Automatisierungsstufen das Wirkungsspektrum insgesamt (einheitlich) kenntlich macht und zumindest in den Größenordnungen quantifiziert und dabei auch bestimmte Wechselwirkungen, komplementäre oder sich teilweise kompensierende Effekte berücksichtigt.
- Deutlich differenzierter zeigt sich das Bild, wenn es um die zu erwartenden Auswirkungen einzelner Funktionen auf bestimmten Stufen des automatisierten Fahrens geht. Zu den Wirkungsabschätzungen von Fahrerassistenzsystemen (zumal bezogen auf ein bestimmtes Einsatzgebiet wie z.B. dem Autobahnverkehr) liegt eine Vielzahl von Wirkungsabschätzungen und Quantifizierungen vor. So lassen sich z.B. zu den Wirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf die

Verkehrssicherheit relativ valide und verlässliche Ergebnisse aus den Studien ableiten. Dies liegt u.a. daran, dass Teile dieser Systeme bereits in den Fahrzeugen verbaut und am Markt eingeführt sind. Zum hoch-/vollautomatisierten und autonomen Fahren gibt es jedoch aus den Untersuchungen deutlich weniger quantitative Wirkungsabschätzungen. Ergänzend zu den quantitativen verkehrlichen Wirkungen liegen eine Vielzahl von Untersuchungen zur Akzeptanz, Kauf- und Nutzungsbereitschaft der privaten Haushalte vor. Diese geben Rückschlüsse auf die weitere Marktdurchdringung und den zeitlichen Entwicklungspfad der Systeme.

- Einigkeit herrscht in den Studien darüber, dass man es mit einer disruptiven Technologie zu tun hat. Alle Untersuchungen formulieren im Ergebnis die einheitliche Erkenntnis, dass sich das Mobilitätssystem, die Transportmärkte, das Angebot und die Nachfrage nach Mobilitäts- und Transportleistungen grundlegend wandeln werden.
- Die Auswertung der vorliegenden Studien zeigt, dass die aus heutiger Sicht erkennbaren Wirkungen vielschichtig und vielfach nicht eindeutig in ihrer Wirkungsrichtung sind. Das bedeutet, über Struktur, Richtung und mögliche Wechselwirkungen sowie die daraus resultierenden Konsequenzen herrscht vielfach noch Unklarheit.
- Die erwarteten Wirkungen und Effekte vor allem des voll-, hochautomatisierten und autonomen Fahrens beruhen noch auf (mikro- und makroskopischen) Verkehrssimulationen, auf Simulationen des Fahrverhaltens, auf Szenarien- und Modellrechnungen sowie der prognostizierten Marktdurchdringung. Hier wird vielfach mit jeweils sehr unterschiedlichen Grundannahmen gearbeitet, die eine Zusammenfassung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht ermöglichen oder zumindest erschweren.
- Die Ergebnisse variieren damit stark in Abhängigkeit vom unterstellten Markthochlauf, den damit zusammenhängenden Marktdurchdringungsraten sowie den zugrunde gelegten Annahmen und definierten Einsatzszenarien der Fahrzeuge. Entsprechend ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur sehr eingeschränkt möglich, selbst wenn es sich um Abschätzungen der Wirkungen von Systemen der gleichen Automatisierungsstufe handelt.
- Es liegen relativ wenige Angaben aus den Studien zu den Kosten (Investitions- und Ausrüstungskosten infrastruktur- und fahrzeugseitig) vor. Dennoch wird einheitlich von höheren Anschaffungskosten (im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen) ausgegangen. Bemerkenswert ist,

dass noch weniger Informationen zu den notwendigen Investitionen auf Seiten der Verkehrsinfrastruktur vorliegen. Sicher ist, dass gerade für die Vernetzung der automatisierten Fahrzeuge erhebliche Investitionen notwendig sind, um die Infrastruktur entsprechend auszurüsten und zu ertüchtigen. Die Systeme des voll-, hochautomatisierten und autonomen Fahrens werden nur bei einer funktionsfähigen Infrastruktur ihre vollständigen Wirkungen entfalten können.

- Eindeutig ist, dass die größten Einspareffekte bei den Mobilitäts- und Transportkosten im Güterverkehr bei den Kraftstoffkosten und in Fahrpersonalkosteneinsparungen gesehen werden. Im MIV gibt es - nach Auswertung der Studien - größere Einspareffekte bei den Kraftstoffkosten auf Autobahnen und im städtischen Verkehr durch eine Optimierung der Knotenpunktverkehre. Daneben werden je nach Szenario erhebliche Einsparungen bei den Zeitkosten erwartet. Eine - zumindest teilweise - Kompensation der Effekte ist dann zu erwarten, wenn es aufgrund der Verbesserung der Verkehrsbedingungen zu Mehrverkehr auf der Straße kommt. Zur Höhe dieser gegenläufigen Effekte und zum zu erwartenden Nettoeffekt liegen aus den Studien aber nur wenige Informationen vor.
- Die Auswertung der Studien zeigt, dass von den automatisierten Fahrzeugen verkehrsoptimierende und damit erhebliche kapazitätssteigernde Wirkungen ausgehen. Auch wenn die Wirkungen von vielen Faktoren abhängen und die Bandbreite der Wirkungen noch relativ hoch ist, lässt sich dennoch festhalten, dass die Leistungsfähigkeit der bestehenden Infrastruktur erhöht wird und dies den Neu- und Ausbaubedarf tendenziell senkt.
- Sicher ist, dass die Automatisierungssysteme einen erheblichen Beitrag zur Verkehrssicherheit auf den Straßen leisten. Die von den Systemen entfaltenen Wirkungen steigen mit zunehmender Ausstattung der Fahrzeuge (Marktdurchdringung) deutlich an. Die Systeme weisen bei bestimmten Unfallarten (z.B. Auffahrunfälle) zweistellige Einsparpotentiale auf.
- Relativ unklar bleibt das Bild bei den Modal Split-Wirkungen und den Auswirkungen im städtischen Verkehr. Zum Teil liegen hierzu keine belastbaren Ergebnisse vor, teilweise werden unterschiedliche Marktentwicklungen und Wirkungsstränge erwartet, zu denen noch keine abschließenden Aussagen darüber getroffen werden können, inwieweit sie den Pkw-Verkehr oder den ÖV begünstigen. Das liegt auch darin begründet, dass dem automatisierten bzw. autonomen Fahren im Personenverkehr erhebliche Potentiale zur Neugestaltung der Verkehrs- und Mobilitätsstrukturen gerade im städtischen Umfeld zugeschrieben werden.

- Eindeutige Aussagen – wenn auch nicht umfassend quantifiziert – finden sich in den Studien zu den Raumwirkungen. Erwartet wird, dass mit dem automatisierten bzw. autonomen Fahren eine Verbesserung der Zugänglichkeit, Erreichbarkeit und Attraktivität des ländlichen Raums einhergeht. Im städtischen Bereich kann vor allem eine erhebliche Reduzierung des Stellplatzflächenbedarfs für Pkw erreicht werden. Die „neu“ gewonnenen Flächen können dann einer alternativen Verwendung zur Verfügung gestellt werden.
- Schließlich lässt sich als Ergebnis festhalten, dass die beim Einsatz automatisierter bzw. autonomer Fahrzeuge auftretenden Probleme und Herausforderungen in den Themenbereichen Sicherheit und Datenschutz überwunden werden müssen. Insbesondere in Deutschland haben die möglichen Nutzer noch erhebliche Vorbehalte. Mangelnde Sicherheit und Datenschutz hemmen die Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft und verzögern eine schnelle Marktdurchdringung der Systeme.

Die Auswertung zeigt, dass für bestimmte Parameter bzw. verkehrliche Indikatoren durchaus belastbare Aussagen zu den zu erwartenden Wirkungen des automatisierten Fahrens zumindest in ihren Größenordnungen getroffen werden können. Für einige dieser Parameter lassen sich die Wirkungskennziffern auf die verkehrliche Ausgangslage in Deutschland beziehen und ein gesamthafter Überblick über die Effekte in der folgenden Tabelle erstellen. Dabei gehen wir von einem eher konservativen Marktdurchdringungsszenario für das Jahr 2030 aus. Bis zum Jahr 2030 werden Systeme der Stufe 3 (hochautomatisiertes Fahren) am Markt verfügbar sein und eingesetzt. Zusätzlich ist zu erwarten, dass einzelne Funktionen der Stufe 4 (z.B. Fahrerloses Parken) zum Einsatz kommen. Die Einführung des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) ist jedoch erst deutlich später nach dem Jahr 2030 zu erwarten. Nähere Erläuterungen zu den Wirkungen folgen im Anschluss an die Tabelle.

**Tabelle 18: Mögliche Auswirkungen für Deutschland – Überblick
(Werte pro Jahr)**

Getötete bei Unfällen: -300 Unfallkosten: -1,8 Mrd. € -5,7 Mrd. €	[Stufe 1-3] [Stufe 3] [Stufe 5]	MIV und Straßengüterverkehr
Kraftstoffkosten: -0,27 Mrd. € CO ₂ -Emissionen: -0,8 Mio. t	[Stufe 3]	Straßengüterverkehr / Platooning
Betriebskosten: -2,5 Mrd. € Personalbedarf: -75.000 Fahrer	[Stufe 5]	Straßengüterverkehr / vollautonomes Fahren
Zeitkosten: -4,1 Mrd. €	[Stufe 3]	MIV (alle Straßen)
Kraftstoffkosten: -1 Mrd. € CO ₂ -Emissionen: -2,6 Mio. t	[Stufe 3]	MIV (BAB)
Kraftstoffkosten: -1,1 Mrd. € CO ₂ -Emissionen: -2,8 Mio. t	[Stufe 3]	MIV (übriges Straßennetz)
		Summe
Monetäre Einsparungen bis 2030 [Stufe 3]		rund 8,3 Mrd. € p.a.
Monetäre Einsparungen anschließend bis Stufe 5		mindestens 15 Mrd. € p.a.
Eingesparte CO₂-Emissionen bis 2030 [Stufe 3]		rund 6,2 Mio. t p.a.

Anmerkung: ohne Berücksichtigung von induziertem Verkehr; dieser ist derzeit nicht abschätzbar

Quelle: Eigene Abschätzung und Darstellung nach Auswertung der Quellen.

(1) Im **Straßengüterverkehr** können in einer ersten Phase durch hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen wie das Platooning Einsparungen bei den Kraftstoffkosten erzielt werden. Die Einspareffekte liegen bei 10%. Bezieht man diesen Einspareffekt auf die Fahrleistungen von Lkw und Sattelzugmaschinen auf Autobahnen in Deutschland und unterstellt man einen Anteil von 40% der Fahrleistungen, bei dem das Platooning genutzt werden kann, so ergibt sich ein Einspareffekt bei den Kraftstoffkosten von etwa 270 Mio. € im Jahr. Bei den Treibhausgasemissionen resultiert

daraus unter Berücksichtigung durchschnittlicher Emissionsfaktoren ein Einspareffekt von knapp 0,8 Mio. t CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel).

Deutlich größer werden die Kosteneinsparungen für das Transportgewerbe in der Endstufe, dem autonomen (fahrerlosen) Fahren. Die zu erwartenden Einspareffekte bei den gesamten Betriebskosten (TCO-Ansatz) liegen für Deutschland bei rund 0,30 € je Fahrzeugkilometer und Lkw. Unterstellt man einen Anteil von 10% autonomen Fahren an den gesamten Lkw-Fahrleistungen in Deutschland ergeben sich Betriebskosteneinsparungen von rund 2,5 Mrd. € im Jahr. Der überwiegende Anteil der Effekte ist auf Einsparungen bei den Fahrpersonalkosten zurückzuführen. Ein um 10% reduzierter Fahrpersonalbedarf bedeutet rund 70.000 Fahrer weniger in Deutschland im gewerblichen Güterkraftverkehr und Werkverkehr. Das ITF geht in seinen Abschätzungen und Szenarienrechnungen für 2030 noch darüber hinaus und erwartet einen um bis zu 60% reduzierten Fahrpersonalbedarf.

- (2) Im **MIV** besteht bei Nutzung hochautomatisierter Fahrfunktionen auf Autobahnen durch eine verkehrsangepasste und stetige Fahrweise ein Einsparpotential bei den **Kraftstoffkosten** von 15%. Die Wirkungen treten auch in Mischverkehren auf. Unterstellt man den Einspareffekt bei 40% der auf Autobahnen zurückgelegten Fahrleistungen, so resultiert daraus eine Kosteneinsparung im MIV von etwas mehr als 1 Mrd. € im Jahr. Bei den Treibhausgasemissionen ergibt sich daraus unter Zugrundelegung durchschnittlicher Emissionsfaktoren ein Einspareffekt von 2,6 Mio. t CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel).

Neben den Wirkungen auf dem Autobahnnetz werden auch Einspareffekte auf dem übrigen Straßennetz durch das automatisierte und vernetzte Fahren erwartet. Dort wird mit Einsparungen von 30% (an bestimmten Stellen wie z.B. Knotenpunktverkehren) und mehr gerechnet, das zeigt die Auswertung verschiedener internationaler Studien. Unterstellt man ferner einen Anteil von 10% der Fahrleistungen im nachgeordneten Straßennetz, bei denen diese positiven Wirkungen realisiert werden können, so ergibt sich rechnerisch ein Einspareffekt bei den Kraftstoffkosten von rund 1,1 Mrd. €. Damit verbunden ist ein Einspareffekt bei den CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) von 2,8 Mio. t.

Fasst man die Wirkungen auf dem Autobahnnetz und dem nachgeordneten Straßennetz zusammen, so liegen die möglichen

Einspareffekte bei 2,1 Mrd. € und 5,4 Mio. t CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel).

- (3) Neben den Kraftstoffkosten spielen die **Zeitkostensparnisse im MIV** eine wichtige Rolle. Zeitersparnisse ergeben sich durch weniger Staus zum einen infolge einer Optimierung des Verkehrsflusses und zum anderen infolge einer Verringerung der Unfallzahlen. Mit der Nutzung hochautomatisierter und vernetzter Fahrfunktionen wird auf Autobahnen ein Einsparpotential von 20% und auf dem nachgeordneten Straßennetz von 15% möglich. Die Effekte kommen aber erst dann spürbar zum Tragen, wenn Marktdurchdringungsraten der automatisierten Fahrfunktionen von 25% und mehr erreicht werden. Für Deutschland werden Staukosten in Höhe von 25,2 Mrd. € für 2013 ermittelt⁷⁰. Eine Aufteilung auf Straßenkategorien erfolgt nicht. Verteilt man die Staukosten nach Fahrleistungsanteilen und legt die prozentualen Einspareffekte zugrunde, so ergeben sich Zeitkostensparnisse von etwa 4,1 Mrd. €.
- (4) Die Berechnungen zeigen beispielhaft das Einsparpotential im MIV im Bereich Kraftstoffkosten und Zeitkosten durch das automatisierte und vernetzte Fahren. Diese Kosteneinsparungen werden jedoch dann abgeschwächt, wenn es durch das automatisierte Fahren und der damit möglichen Attraktivitätssteigerung des MIV zu **induziertem Verkehr** kommt. Verschiedene Untersuchungen und Studien weisen auf diesen Zusammenhang hin. Eine verlässliche quantitative Abschätzung ist aus heutiger Sicht aber noch nicht durchführbar. Im Ergebnis würden sich die ermittelten Einspareffekte abschwächen.
- (5) Mit dem Einsatz von Funktionen der Automatisierung und der Fahrerassistenz werden erhebliche **Verkehrssicherheitsgewinne** erwartet. Sowohl die Anzahl der Verkehrsunfälle als auch deren Schwere werden verringert bzw. vermindert. Die positiven Wirkungen verstärken sich durch die Nutzung des fahrerlosen Fahrens. Unterstellt man einen positiven Effekt der Automatisierungs- und Fahrerassistenzfunktionen in Höhe von 10% auf das Unfallgeschehen (Anzahl Unfälle und Verunglückte), so ergibt sich unter Berücksichtigung der Unfallkostensätze der Bundesanstalt für Straßenwesen⁷¹ eine

⁷⁰ INRIX, Verkehr kostet deutsche Wirtschaft 33 Milliarden Euro im Jahr 2030, in: <http://inrix.com/press-releases/verkehr-kostet-deutsche-wirtschaft-33-milliarden-euro-im-jahr-2030/>, Zugriff am 12.12.2017.

⁷¹ Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland, Bergisch Gladbach 2016.

Unfallkostensparnis von rund 1,8 Mrd. €. Bei einer stärkeren Marktdurchdringung und Nutzung des autonomen Fahrens sind Einsparpotentiale von 30% und mehr zu erwarten. Damit verbunden wären Einsparungen bei den Unfallkosten von 5,7 Mrd. €.

- (6) Fasst man die zuvor genannten Einspareffekte für den Straßengüterverkehr und den MIV zusammen, so ergeben sich **Einspareffekte** in Abhängigkeit der Marktdurchdringungsraten des automatisierten und autonomen Fahrens **zwischen 8,3 Mrd. € und 14,5 Mrd. € im Jahr**. Den Einspareffekten stehen zusätzliche Kosten der Fahrzeugausstattung (Soft- und Hardware) und Infrastrukturausstattung gegenüber. Über deren Höhe lassen sich jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt keine verlässlichen Abschätzungen treffen.

Glossar:

- ACC, CACC:** *Adaptive-Cruise-Control ACC und Cooperative Adaptive-Cruise-Control CACC: der Abstandsregeltempomat ist eine Geschwindigkeitsregelanlage, die zusätzlich automatisch einen zuvor eingestellten Sicherheitsabstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug durch Gasgeben und Bremsen hält.*
- Aktuatorik:** *Die Aktuatorik - mitunter auch als Aktorik bezeichnet - ist ein Teilgebiet der Antriebstechnik und bezeichnet allgemein das Erzeugen einer Bewegung.*
- ESP:** *Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) erkennt kritische Fahrsituationen und Fahrzeuginstabilität anhand von Sensordaten. Es verhindert das Ausbrechen des Fahrzeugs durch den Eingriff in das Bremssystem und das Motormanagement.*
- HD-Karten:** *High Definition (HD)-Karten bieten ein hochgenaues und realistisches 3D-Modell des Straßennetzes und ermöglichen automatisierten Fahrzeugen, sich auf der Straßenkarte selbst zu orientieren.*
- Platooning:** *Unter Platooning (wird auch als elektronische Deichsel bezeichnet) versteht man ein System, bei dem mehrere Fahrzeuge (z.B. LKW) elektronisch miteinander verbunden werden, um in Echtzeit zu kommunizieren, und in sehr geringem Abstand hintereinander fahren können. Werden die Fahrzeuge in einem Konvoi angeordnet, kann das Führungsfahrzeug sein Fahrverhalten auf die Anderen übertragen.*
- TCO-Ansatz:** *Mit dem Total Cost of Ownership-Ansatz werden alle für die Anschaffung eines Fahrzeuges, seine Nutzung und gegebenenfalls seine Entsorgung anfallenden Kosten erfasst.*

Quellen und Studien:

acatech (Hrsg.): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag 2015.

ATKINS, Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, Summary Report, Department for Transport, May 2016.

Bardt, H., Autonomes Fahren. Eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie, in: Institut der deutschen Wirtschaft Köln (Hrsg.), IW-Trends, 43. Jg. Nr. 2, Köln 2016.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Forschung kompakt 11/12, Bergisch Gladbach 2012.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland, Bergisch Gladbach 2016.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten, Berlin, Stand September 2015.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Runder Tisch Automatisiertes Fahren, Bericht zum Forschungsbedarf, AG Forschung.

Computerwoche: Autonomes Fahren vor dem Aus? Vom 09.05.2017, Abruf vom 09.11.2017.

Deloitte, Autonomes Fahren in Deutschland - wie Kunden überzeugt werden, Stand 9/2016.

Detecon International GmbH, Autonomes Fahren: Wenn das Lenkrad zur Sonderausstattung wird. Eine empirische Untersuchung der Akzeptanz autonom fahrender Fahrzeuge, Köln März 2016.

Deutsche Bank Research, Das „digitale Auto“ Mehr Umsatz, mehr Konkurrenz, mehr Kooperation, Frankfurt am Main, Juni 2017.

Deutscher Bundestag, Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur (15. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 18/8951 – Entwurf

eines Gesetzes zur Änderung der Artikel 8 und 39 des Übereinkommens vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr, Drucksache 18/9780 vom 27.09.2016.

Deutschlandfunk: Datensicherheit beim autonomen Fahren – Trojaner im Auto, Sendung vom 04.11.2017; Abruf am 09.11.2017

DHL Customer Solutions & Innovation, DHL Trend Research, Self-Driving Vehicles in Logistics, Troisdorf 2014.

Dornier Consulting International, Autonomes Fahren, Erwartungen an die Mobilität der Zukunft, Berlin 2017.

Ethik-Kommission Automatisiertes und Vernetztes Fahren, eingesetzt durch den Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bericht Juni 2017.

European Transport Safety Council (ETSC), Prioritising the Safety Potential of Automated Driving in Europe, Brussels, April 2016.

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Management Summary, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 18.11.2015.

Geißler, T., Kulmala, R., Carsten, O., The evolution towards automated driving – Classification of impacts, review of assessments of automated driving functions, challenges for evaluation, CH011 5 August 2016.

Gent, M., Autopilot von Tesla auch nach 210 Millionen Kilometern nicht sicher, in: <https://www1.wdr.de/wissen/technik/tesla-autopilot-crash-100.html>, Stand 01.07.2016, Zugriff am 05.12.2017.

Heinrichs, Dirk, Autonomes Fahren und Stadtstruktur, in: Mauer, M. et al., Autonomes Fahren, 2015.

Ifmo Institute for Mobility Research, Autonomous Driving, The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour, 2016.

INRIX, Verkehr kostet deutsche Wirtschaft 33 Milliarden Euro im Jahr 2030, in: <http://inrix.com/press-releases/verkehr-kostet-deutsche-wirtschaft-33-milliarden-euro-im-jahr-2030/>, Zugriff am 12.12.2017.

International Transport Forum, Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport - OECD /ITF 2017.

- Kollosche, I., Schwedes, O., Mobilität im Wandel, Transformationen und Entwicklungen im Personenverkehr, Friedrich-Ebert-Stiftung – Wirtschafts- und Sozialpolitik, WISO Diskurs Heft 14/2016.*
- Lemmer, K. (Hrsg.): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag 2016.*
- Lossau, N., Parkplatz suchen, einparken, vorfahren – machen Autos bald selbst, in: die Welt vom 26.07.2017, Abruf am 13.11.2017.*
- McKinsey&Company, Connected car, automotive value chain unbound, September 2014.*
- McKinsey&Company, Parcel delivery - The future of last mile, Travel, Transport and Logistics, September 2016.*
- McKinsey&Company, Wettlauf um den vernetzten Kunden – Überblick zu den Chancen aus Fahrzeugvernetzung und Automatisierung, September 2015.*
- Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B., Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, Vol. 21, No. 4, 324-348.*
- o.V., Mensch, greif ein!, in: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/google-auto-13-kritische-situationen-auf-680-000-testkilometern-a-1071800.html>, 13.01.2016, Zugriff am 05.12.2017.*
- Przybilla, S. Wie es ist, im Bus ohne Lenkrad mitzufahren, in: Süddeutsche Zeitung vom 03.02.2017.*
- PwC, The Insurance Monitor: To Be or Not to Be – the Future of Motor Insurance, 2015.*
- Robert Bosch GmbH, „Connected Car Effect 2025“, Bosch-Studie zeigt: Mehr Sicherheit, mehr Effizienz, mehr freie Zeit durch vernetzte Mobilität, Pressemitteilung Dezember 2016.*
- Roland Berger, Automated Trucks, The next big disruptor in the automotive industry? Automated Truck Study-Short Version. Chicago / Munich – April 2016.*
- Roland Berger, On the road toward the autonomous truck, January 2015.*

SAE, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, Standard J3016, 2014.

Statistisches Bundesamt, 2016: Mehr Unfälle, aber weniger Verkehrstote als jemals zuvor, Pressemitteilung 230/17 vom 6.07.2017.

Trimble, T. E., Bishop, R., Morgan, J. F., & Blanco, M. (2014, July). Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Past research, state of automation technology, and emerging system concepts. (Report No. DOT HS 812 043). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).

U.S. Department of Transportation, Benefits Estimation Framework for Automated Vehicle Operations, Washington, DC 20590, 2015.

VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren Berlin September 2015.