

Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr

Auswirkungen auf den
Modal-Split, das Verkehrssystem und
die Siedlungsstrukturen



Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr

Auswirkungen auf den
Modal-Split, das Verkehrssystem und
die Siedlungsstrukturen

Herausgeber



Autoren



Mit finanzieller Unterstützung von:



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4	3.1.4.3 Szenario 2: „Neue Mobilitätskonzepte“	37
Management Summary	6	3.2 Güterverkehr	40
1 Ausgangslage und Zielsetzung	10	3.3 Automatisierung und Elektromobilität: Wirkungen auf Emissionen	42
Erwartete Wirkungen des automatisierten Fahrens	12	4 Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Siedlungsstruktur und gebaute Umwelt.....	48
Stufen der Automatisierung	13	4.1 Auswirkungen auf Raumstrukturen	50
Zielsetzung der Studie	17	4.2 Die Perspektive kommunaler Akteure – Ergebnisse einer ExpertInnenbefragung	52
2 Direkte und systemische Auswirkungen der Automatisierung auf das Verkehrssystem	18	5 Fazit	58
2.1 Personenverkehr	20	5.1 Automatisierung im Straßenverkehr – Herausforderungen und Chancen	60
2.2 Güterverkehr	24	5.2 Handlungsempfehlungen und Steuerungsalternativen	61
2.2.1 Automatisierter Straßengüterfernverkehr	25	5.2.1 Personenverkehr	61
2.2.2 Einsatz automatisierter Fahrzeuge auf der letzten Meile	27	5.2.2 Güterverkehr	62
3 Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Modal-Split und CO₂-Emissionen	28	6 Literaturverzeichnis	64
3.1 Personenverkehr	30	Abbildungsverzeichnis	68
3.1.1 Neue Nutzergruppen	31	Tabellenverzeichnis	70
3.1.2 Neue Reisezeitbewertung	31	Abkürzungsverzeichnis	71
3.1.3 Neue Anwendungsfälle	31	Publikationen der e-mobil BW	72
3.1.4 Die Szenarien	33		
3.1.4.1 Fahrzeugdiffusion	34		
3.1.4.2 Szenario 1: „Privatflotte“	34		

Vorwort



Elektrifizierung und Digitalisierung stellen das Geburtsland der Mobilitätsindustrie vor eine immense Herausforderung. Nicht nur durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, sondern auch durch die zunehmende Vernetzung und Automatisierung der Fahrzeuge wird sich die Art und Weise, wie wir uns von A nach B bewegen, in den kommenden Jahren stark verändern.

Wer wird letztendlich selbstfahrende Autos herstellen – die traditionelle Automobilindustrie oder neue Wettbewerber? Welche Auswirkungen wird die fortschreitende Automatisierung auf unser Mobilitätssystem haben?

Hochautomatisierte Fahrzeuge versprechen ein hohes Maß an Sicherheit, eine Verbesserung des Verkehrsflusses und modernen Komfort. Vorteile, die wir gerne für mehr Lebensqualität der Menschen realisieren möchten. Aber für einen verantwor-

tungsbewussten Umgang mit Technik ist es notwendig, frühzeitig zu klären, ob diese Versprechungen nicht auch mit möglichen negativen Auswirkungen für den Verkehr einhergehen. Es ist notwendig, Wechselwirkungen zu identifizieren und die richtigen Weichenstellungen und Rahmenbedingungen zu diskutieren, damit die Technologie in der Gesellschaft eine insgesamt positive Wirkung entfalten kann.

Viele Fragen sind derzeit noch offen: Wie wird die rechtliche Grundlage für die Zulassung autonomer Fahrzeuge geregelt sein? Wer übernimmt im Schadensfall die Haftung? Wie wird die notwendige Kommunikationsinfrastruktur realisiert und von wem wird sie finanziert? Welche Rolle spielt die Elektromobilität bei der Umsetzung autonomer Konzepte? Wie lässt sich zukünftig automatisierte Mobilität als Beitrag zu Ressourceneffizienz und Klimaschutz nutzen? Wer profitiert von der Automatisierung und wer sind die Verlierer?

Die vorliegende Studie wurde vom Ministerium für Verkehr gefördert und von der Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie e-mobil BW GmbH in Auftrag gegeben. Sie gibt Einblick in den nationalen und internationalen Kenntnisstand. Die Untersuchung umfasst im Wesentlichen modellbasierte und teils diametrale mögliche Auswirkungen des automatisierten Fahrens im Hinblick auf die Verkehrsmittelwahl, die Umwelt und das Verkehrsgeschehen.

Die Studie gibt Handlungsempfehlungen auf der Basis eigener Modellrechnungen zum Verkehrsmittelwahlverhalten, wenn die Option autonomes Fahren zur Verfügung steht. Die Studie zeigt im Kern, dass noch erheblicher Untersuchungsbedarf besteht und dass praktische Erprobungen und Erfahrungen sowie Belege zweckmäßig sind, um auch für die öffentliche Hand gute Grundlagen für die noch notwendigen investiven und strategischen Entscheidungen zur Förderung des automatisierten und des autonomen Fahrens aus verkehrlicher Sicht zu erhalten.

Winfried Hermann MdL
Minister für Verkehr Baden-Württemberg

Franz Loogen, Geschäftsführer
e-mobil BW GmbH

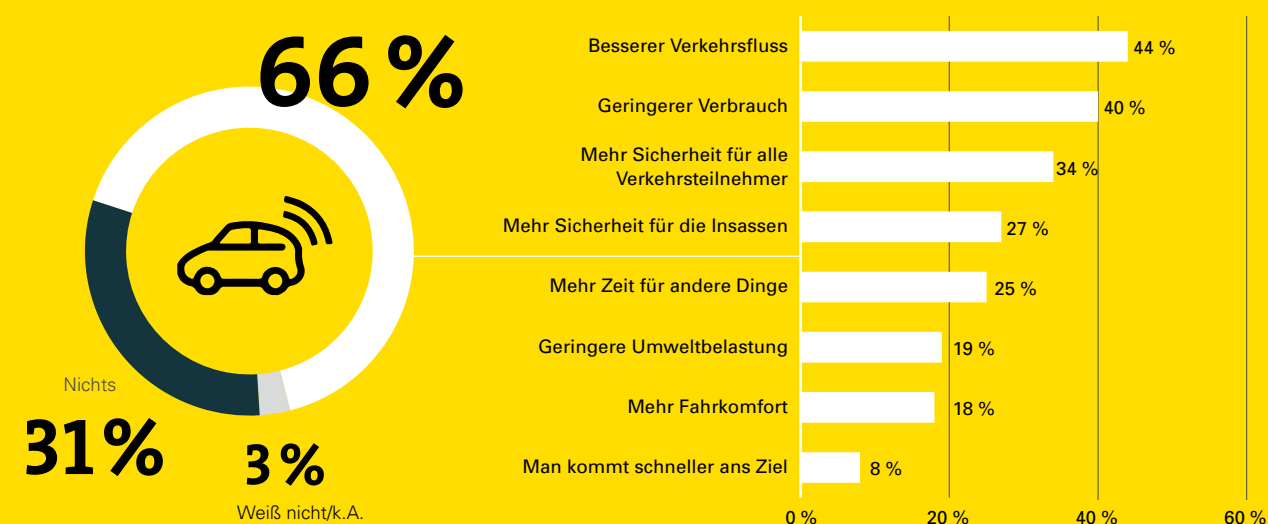
Management Summary

Automatisiertes Fahren bietet Potenziale, wachsenden Anforderungen an Sicherheit, Flexibilität, Komfort und Zuverlässigkeit von Mobilität gerecht zu werden.

Die möglichen Auswirkungen der Technik auf das Verkehrssystem gehen dabei weit über Änderungen im Verkehrsfluss, in der Fahrzeitverwendung oder ein Mehr an Verkehrssicherheit hinaus. Eine systemische Betrachtung von Entwicklungen und ihren Folgen ist in diesem Zusammenhang unerlässlich, wurde bisher aber noch kaum unternommen.

Zwei Drittel sehen Vorteile durch autonome Autos

Was spricht aus Ihrer Sicht für selbstfahrende Autos?*



Basis: Alle Befragten (N=1006), Quelle: Bitkom Research, *Mehrfachnennungen möglich

Die vorliegende Studie analysiert Wirkungen des vollautomatisierten Fahrens auf die Verkehrsmittelwahl, auf die Umwelt, auf das Verkehrssystem und auf die Stadt. Basis der Analysen sind Auswertungen der vorhandenen Fachliteratur und bestehender Roadmaps zum automatisierten Fahren sowie Gespräche mit Experten. Darauf aufbauend wurden mögliche Effekte des automatisierten Fahrens sowohl im Personals als auch im Güterverkehr ausgehend von Szenarien für das Jahr 2035 berechnet. Zusätzlich wurde über eine empirische Erhebung die Sicht kommunaler Akteure auf Implikationen der Automatisierung adressiert.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass neben den häufig thematisierten Potenzialen der Technik auch negative Effekte identifiziert und viele der Vorteile kurz- und mittelfristig noch nicht oder nur teilweise aktiviert werden können. So wird durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge z. B. mit Effizienzsteigerungen im Verkehr gerechnet, die auch zu einem Rückgang der CO₂-Emissionen führen können. Die Ergebnisse der Studie weisen allerdings darauf hin, dass diese Effizienzsteigerungen derzeit noch Unsicherheiten unterworfen

sind, die ganz wesentlich vom Grad der Durchdringung der Flotte mit automatisierten Fahrzeugen abhängen. Automatisiertes Fahren ermöglicht, das ist ein weiteres Potenzial der Technik, außerdem neue attraktive Mobilitätsangebote zu konkurrenzfähigen Preisen sowie insgesamt einer erweiterten Nutzergruppe den Zugang zur motorisierten Individualmobilität. Andererseits kann es durch die Attraktivitätssteigerung von automatisierten Individualfahrzeugen insgesamt zu einer Zunahme des motorisierten Individualverkehrs bei gleichzeitiger Schwächung des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) kommen.

Ist autonomes Fahren in Kommunen ein Thema?

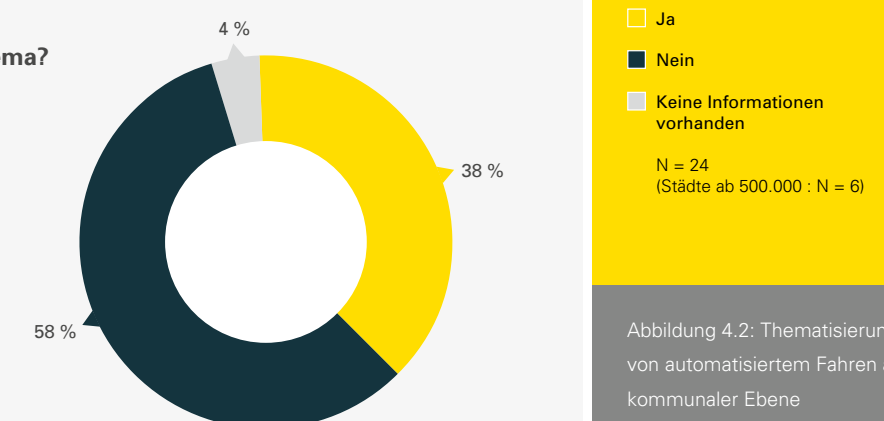


Abbildung 4.2: Thematisierung von automatisiertem Fahren auf kommunaler Ebene



Automatisiertes Fahren und Elektromobilität können in Kombination positive Wirkung für Verkehr und Umwelt entfalten.

Um solche Effekte zu begrenzen und gleichzeitig die Vorteile der Technologie zu nutzen, müssen von politischer Seite frühzeitig geeignete Steuerungsalternativen in den Blick genommen werden. Nachfolgend werden die zentralen Empfehlungen aus der Studie zusammengefasst.

- Die Einführung des automatisierten Fahrens ohne Elektrifizierung des Antriebsstrangs erscheint angesichts möglicher Wirkungen – z. B. einer Erhöhung der Fahrleistung im Straßenpersonen- und -güterverkehr – kontraproduktiv. Die Entwicklung eines automatisierten Verkehrssystems sollte daher unbedingt in Verbindung mit der Bevorzugung und **Förderung alternativer Antriebe** erfolgen. Ziel muss es sein, generell die straßengebundene Verkehrsleistung durch schadstoffärmere Fahrzeuge zu erbringen (z. B. durch konsequente Elektrifizierung aller automatisierten Fahrzeuge).
- Die Automatisierung des Verkehrs geht mit besonderen Potenzialen, aber auch Herausforderungen für den ÖV einher. Aus diesem Grund sind eine **weitere Stärkung und Innovation des ÖV** erforderlich. Dies bedeutet auch, dass das Thema „Automatisierung des Verkehrs“ seitens der ÖV-Betreiber, der Politik sowie der Raum-, Stadt- und

Verkehrsplanung (im Sinne einer integrierten Planung) in den Blick genommen werden muss. Damit einher geht auch die **Förderung und Erprobung geeigneter neuer Mobilitätskonzepte**. Mit der Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte im ÖV muss die **Erarbeitung von Konzepten zur Reorganisation des öffentlichen Straßenraums** erfolgen. Dies betrifft sowohl die Frage nach den Infrastrukturen, die im Rahmen der Automatisierung notwendig sind, als auch die Neuauslegung und Gestaltung des Stadtraums.

- Regionen und Kommunen sollten sich deutlich stärker als bisher in die Entwicklung, die sich aus der Automatisierung des Verkehrs ergibt, als aktiv Beteiligte einbinden. Das bedeutet gleichzeitig, dass die **Wahrnehmung der bevorstehenden Herausforderungen bei Stadt- und Regionalplanung** geschärft werden sollte. Dies gilt umso mehr, als die Befragung kommunaler Akteure aus der Stadt- und Verkehrsplanung gezeigt hat, dass diese Akteure bislang noch kaum angesprochen wurden. Dialogprozesse zwischen Industrie, Politik, Kommunen, Wissenschaft und Zivilgesellschaft sind jedoch angesichts der zu erwartenden Veränderungen und des Bedarfs an Identifikation von Chancen und Risiken unumgänglich.
- Hand in Hand mit der politischen Steuerung sollte die Automatisierung auch von Seiten der Forschung begleitet werden. Dabei müssen **Gestaltungsmöglichkeiten** identifiziert und **mögliche Wirkungen** frühzeitig erkannt werden, um sie – je nach Wirkungsrichtung – zu verstärken oder zu begrenzen. Eine besondere Bedeutung haben hierfür realitätsnahe Feldtests und Experimentierfelder, z. B. in Form von Reallaboren, in denen die Umsetzbarkeit von Technologien und neuen Bedienformen ermittelt werden kann und im Rahmen derer gleichzeitig alle beteiligten Akteursgruppen in den Entwicklungsprozess einbezogen werden können. Zur Beantwortung solcher Fragestellungen bedarf es eines zuverlässigen Analyse- und Bewertungsinstrumentariums; dazu müssen vorhandene Instrumente der Verkehrsforschung substanziell weiterentwickelt werden. Darüber hinaus sollte Forschung be-

reits im Vorfeld einer Automatisierung dazu beitragen, Aufgaben wie die Stärkung des ÖV, z. B. durch neue Bedienkonzepte, oder die **Erprobung und Einführung neuer Mobilitätskonzepte** zu unterstützen, indem die daraus resultierenden Wirkungen und ihr Potenzial in einem zunehmend automatisierten Verkehr analysiert und bewertet werden.

- Derzeit gibt es noch kaum Erkenntnisse im Güterverkehrsbereich zu **Optionen und Nutzen des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen**. Hier besteht ein deutlicher (Nachhol-)Bedarf, spezifische Einsatzkonzepte und Einsatzbereiche eines automatisierten Güterverkehrs aufzuzeigen, um beispielsweise Aussagen treffen zu können, welche Kosteneinsparungen oder Gewinnsteigerungen und welche Effekte hinsichtlich der Entwicklungsziele, speziell im Zusammenhang mit dem Erreichen von Klimazielen, erzielt werden können. Wenn die **Schiene als Verkehrsträger** im Güterverkehr vor dem Hintergrund der Automatisierung von Lkw konkurrenzfähig bleiben soll, darf außerdem auch im Bereich Schienengüterverkehr sowie an der Schnittstelle zwischen Straße und Schiene die **(Technologie-)Entwicklung** nicht aus dem Blick geraten.



01

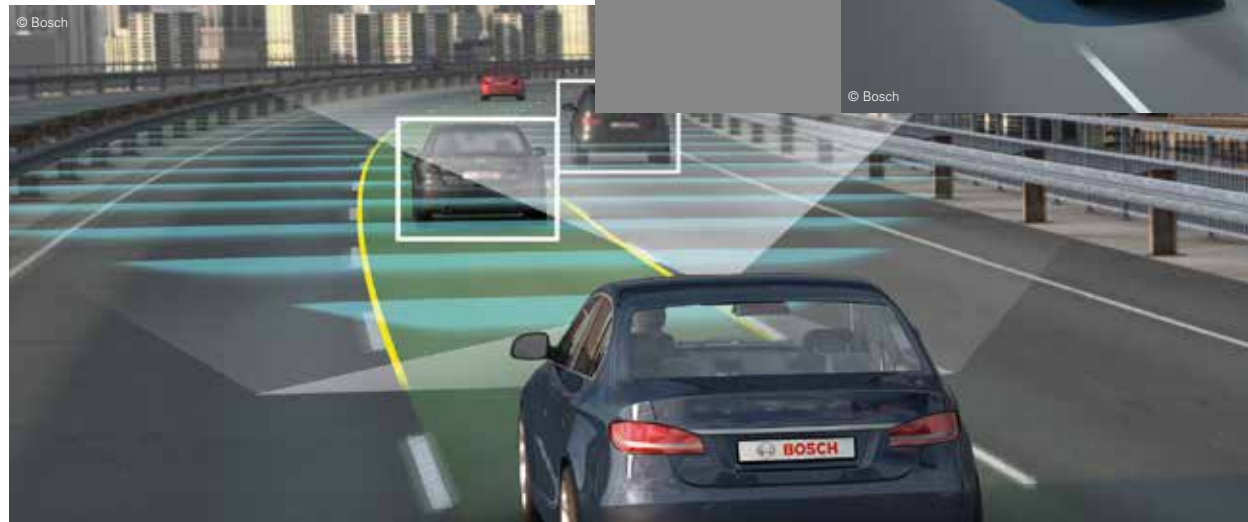
Ausgangslage und Zielsetzung



01

Ausgangslage und
Zielsetzung

Algorithmen
berechnen schnell
die passenden
Fahrmanöver



Verbesserte Sensorik hilft Unfälle zu vermeiden

Die Automatisierung des Straßenverkehrs eröffnet neue Möglichkeiten, den Anforderungen des stetig wachsenden Bedarfs an Mobilität mit höherem Komfort, mehr Flexibilität und mehr Sicherheit bei geringeren Kosten gerecht zu werden. Die Einführung von Systemen des automatisierten Fahrens könnte vor diesem Hintergrund einen wesentlichen Beitrag leisten.

Die zunehmende Automatisierung von Straßenfahrzeugen wird aller Voraussicht nach einem evolutionären Entwicklungspfad folgen. Viele Fahrzeuge sind bereits heute mit Fahrerassistenzsystemen, wie z. B. Spurhalteassistenten und automatischen Geschwindigkeitsregelanlagen, ausgestattet. Die Zahl der Fahrzeuge mit diesen Funktionen an Bord nimmt stetig zu und die Technik wird auch zunehmend in Fahrzeugen unterhalb des Premiumsegmentes eingesetzt. Darüber hinaus sind erste Fahrzeuge mit sogenannten hochautomatisierten Funktionen für die nächsten Jahre angekündigt. Diese Systeme erlauben eine zeitweise Über-

lassung der Fahraufgabe an das Fahrzeug. Neben technologischen Hürden sind insbesondere rechtliche Fragen, z. B. bezüglich der Haftung im Falle eines Unfalls durch das automatisierte Fahrzeug, zu klären.

Erwartete Wirkungen des automatisierten Fahrens

Automatisierte Fahrzeugtechnologien haben das Potenzial, das Verkehrssystem im Personen- und Güterverkehr tiefgreifend zu verändern. Obwohl bisher unklar ist, wie der Entwicklungspfad hin zu einer zunehmenden Vernetzung und Automatisierung im Straßenverkehr konkret aussehen wird, und noch zahlreiche Unsicherheiten vor dem Hintergrund technischer, rechtlicher, ökonomischer und gesellschaftlicher Aspekte existieren, werden derzeit mögliche Potenziale in den Blick genommen, die mit diesen Entwicklungen verbunden sind. Das betrifft z. B.

- die Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr für alle Verkehrsteilnehmenden;
- die Erhöhung der Verkehrseffizienz und ein verbessertes Verkehrsmanagement sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr;
- die Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen;
- die Ausweitung von Multi- und Intermodalität im Sinne einer verbesserten Kombination von Verkehrsmitteln des (motorisierten) Individualverkehrs und des ÖV;
- die Aufrechterhaltung bzw. Steigerung von Flexibilität und Individualität im Personenverkehr bei gleichzeitiger Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Pkw (insbesondere in innerstädtischen Gebieten);
- die Effizienzsteigerung im Güterverkehr im Sinne der Erhöhung von Produktivität, Zuverlässigkeit und Flexibilität durch automatisierte, vernetzte und dezentralisierte Lösungen.

Dabei ist die Art und Weise der Wirkung nicht zuletzt abhängig vom Grad der Automatisierung sowie vom Anteil automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtfahrzeugflotte.

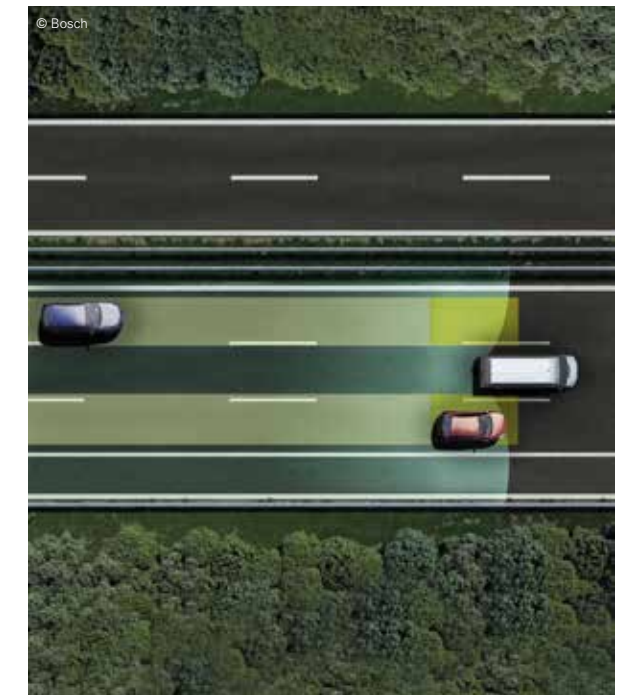
Stufen der Automatisierung

Die zunehmende Automatisierung von Straßenfahrzeugen wird, aller Voraussicht nach, stufenweise erfolgen. Die Stufen zeigen dabei an, in welcher Weise der Mensch in die Fahrzeugführung und Systemüberwachung eingebunden ist. Die Stufen 0 bis 3 reichen von der dauerhaften Fahrzeugführung und -bedienung bis zu einer umfangreichen Abgabe von Fahrfunktionen an die Maschine, bei der jedoch das System ständig zu überwachen ist. Die Stufen 4 und 5 beschreiben die Entwicklung hin zur vollständigen Übergabe aller Fahr- und Überwachungsfunktionen an das Fahrzeug (vgl. VDA 2015, SAE 2014, NHTSA 2013, Gasser et al. 2012). Abbildung 1.1 zeigt die Stufen der Fahrzeugautomatisierung in einer schematischen Übersicht.

Wesentliche Effekte der Fahrzeugautomatisierung auf den Modal-Split (anteilige Nutzung der Verkehrsmittel), die Verkehrseffizienz und Emissionsbelastungen sowie die gebaute Umgebung und Raumstrukturen sind erst ab einer höheren Automatisierungsstufe sowie einem höheren Durchdrin-

gungsgrad zu erwarten; z. B. ist erst mit einer veränderten Reisezeitbewertung und damit einem veränderten Modalwahlverhalten zu rechnen, wenn Fahrzeugnutzerinnen und -nutzer dauerhaft die Hände vom Steuer nehmen und ihre Aufmerksamkeit anderen Aktivitäten zuwenden können (vgl. Maurer et al. 2015). Ähnliches gilt für Implikationen im Zusammenhang mit Effizienzsteigerungen des Verkehrsflusses: Signifikante Kapazitätzunahmen sind insbesondere bei zunehmender Durchdringung der Fahrzeugflotte mit automatisierten Fahrzeugen sowie einer stärkeren Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit der Infrastruktur zu erwarten (vgl. Friedrich 2015, Bierstedt et al. 2014).

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen werden innerhalb der Studie im Wesentlichen die Stufen 4 („Vollautomatisiert“) und 5 („Fahrerlos“) im Zusammenhang mit der Automatisierung von Fahrzeugen betrachtet – siehe Abbildung 1.1 – ohne dabei jedoch den (evolutionären) Entwicklungspfad aus dem Blick zu verlieren. Im Folgenden wird der Begriff „automatisiert“ für die Stufen 4 und 5 verwendet.



Automatisiertes Fahren auf der Autobahn

Stufen	Funktion Fahrer	Funktion System
0 Keine Auto- matisierung	Dauerhafte gesamte Fahrzeugführung.	
1 Assistiert	Dauerhaft Quer- oder Längsführung.	Jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt.
2 Teil- automatisiert	Dauerhafte Systemüberwachung und dauerhafte Bereitschaft zur Übernahme.	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Fahrsituationen.
3 Hoch- automatisiert	Keine dauerhafte Systemüberwachung erforderlich. Bei Bedarf Übernahme mit ausreichender Zeitreserve.	Übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Fahrsituationen. Verlängerter Übergabezeitraum.
4 Voll- automatisiert	Keine dauerhafte Systemüberwachung erforderlich.	Übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Fahrsituationen. Rückführung in risikominimalen Zustand durch System.
5 Fahrerlos	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig. Das System ist in allen Situationen in der Lage, das Fahrzeug sicher zu steuern. Das Fahrzeug kommt ganz ohne Fahrer aus.	

Abbildung 1.1: Stufen der Fahrzeugautomatisierung (in Anlehnung an e-mobil BW, „Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch.“)

Bereits heute sind am Markt erhältliche Fahrzeuge zunehmend mit dem Internet verbunden – vornehmlich zur Bereitstellung von sogenannten Infotainment-Angeboten, aber auch, um Fahrzeugherstellern Informationen über Nutzung und Zustand des Fahrzeugs zu übermitteln. Eine Vernetzung von Fahrzeugen untereinander bzw. von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur oder anderen Verkehrsteilnehmern hingegen (üblicherweise als V2X- oder C2X-Kommunikation bezeichnet) befindet sich noch in den Anfängen der Umsetzungsphase. Generell besteht keine zwingende Notwendigkeit der Vernetzung von automatisierten Fahrzeugen, jedoch kann das volle Potenzial dieser Technologie in Bezug auf Sicherheit, Effizienz und Komfort wohl erst durch die Kombination ausgeschöpft werden (e-mobil BW 2015). Damit verbunden

sind dann auch erhöhte Anforderungen im Bereich Datenschutz bzw. -transparenz, die allerdings in diesem Bericht nicht Gegenstand der Betrachtung sind.

Es wird erwartet, dass erste Automatisierungssysteme mit Stufe-4-Funktionalitäten noch in dieser Dekade in den Markt kommen. Dabei handelt es sich vornehmlich um Lösungen, die ein automatisiertes Parken ermöglichen. Der für ca. 2020 angekündigte „Autobahnpilot“ wird den Fahrern ermöglichen, die Fahraufgabe auf der gesamten Wegstrecke einer Autobahnfahrt dem Fahrzeug zu überlassen. Das Fahrzeug wird den Fahrenden dann nicht mehr auffordern, die Kontrolle über das Fahrzeug in bestimmten Fahrsituationen zu übernehmen.

Infobox

Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Januar 2017 hat die Bundesregierung einen Gesetzesentwurf beschlossen, der eine Änderung im Straßenverkehrsgesetz vorsieht, um den Einsatz automatisierter Systeme auf deutschen Straßen zu regeln. Damit „dürfen künftig auch solche Fahrzeuge im Einsatz sein, die für eine bestimmte Zeit und in bestimmten Situationen die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen“ (Die Bundesregierung 2017). Der Mensch soll allerdings weiterhin die Kontrolle über das Fahrzeug und damit auch „die letzte Verantwortung behalten“, indem die Fahrzeuge jederzeit „übersteuerbar und deaktivierbar“ sind (ebenda), sogenannte hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge.

Da erwartet wird, dass sich für den Fahrer erst ab der dritten Automatisierungsstufe ein deutlich höherer Nutzwert ergibt, betrachtet die vorliegende Studie Systeme, die vollautomatisiert bzw. in der höchsten Stufe sogar fahrerlos (soge-

nannte „autonome“ Fahrzeuge) bedienbar sind. Derzeit sind solche fahrerlosen Fahrzeuge mit den gesetzlichen Vorgaben noch unvereinbar – damit sie auf deutschen Straßen zugelassen werden können, müssten die gesetzlichen Rahmenbedingungen also erst noch angepasst werden. Eine Anpassung wird sich maßgeblich an der technischen Reife von autonomen Systemen orientieren. Darüber hinaus stellt diese im Rahmen der Strategie der Bundesregierung zum automatisierten und vernetzten Fahren im Handlungsfeld Recht aber auch einen Kernaspekt für die erfolgreiche Implementierung dar: „Die Bundesregierung wird die rechtlichen Rahmenbedingungen des automatisierten und vernetzten Fahrens überprüfen und, wo nötig, an die neuen Entwicklungen anpassen. Es ist zu prüfen, ob das Verkehrsrecht den Sachverhalt abbilden muss, dass in bestimmten Situationen nicht mehr der Fahrer, sondern das System die Fahraufgabe wahrnimmt“ (BMVI 2015).

Das vollautomatisierte Fahrzeug, das die Bedienung in allen Fahrsituationen von Tür zu Tür ermöglicht und auch in der Lage ist, ohne Fahrer Wege zurückzulegen, wird nicht vor 2028 erwartet (ERTRAC, 2015; VDA, 2015; EPoSS, 2015; OECD/ITF & CPB, 2015; PWC, 2015). Verschiedene Roadmaps zu Einfüh-

rungszeiträumen wurden dazu bereits in der Vergangenheit veröffentlicht (siehe Abbildung 1.2). Die Mehrheit folgt dabei einem evolutionären Pfad. Diese Roadmaps sowie Gespräche mit Experten bilden die Basis für die in dieser Studie entwickelten Szenarien der Automatisierung des Straßenverkehrs.

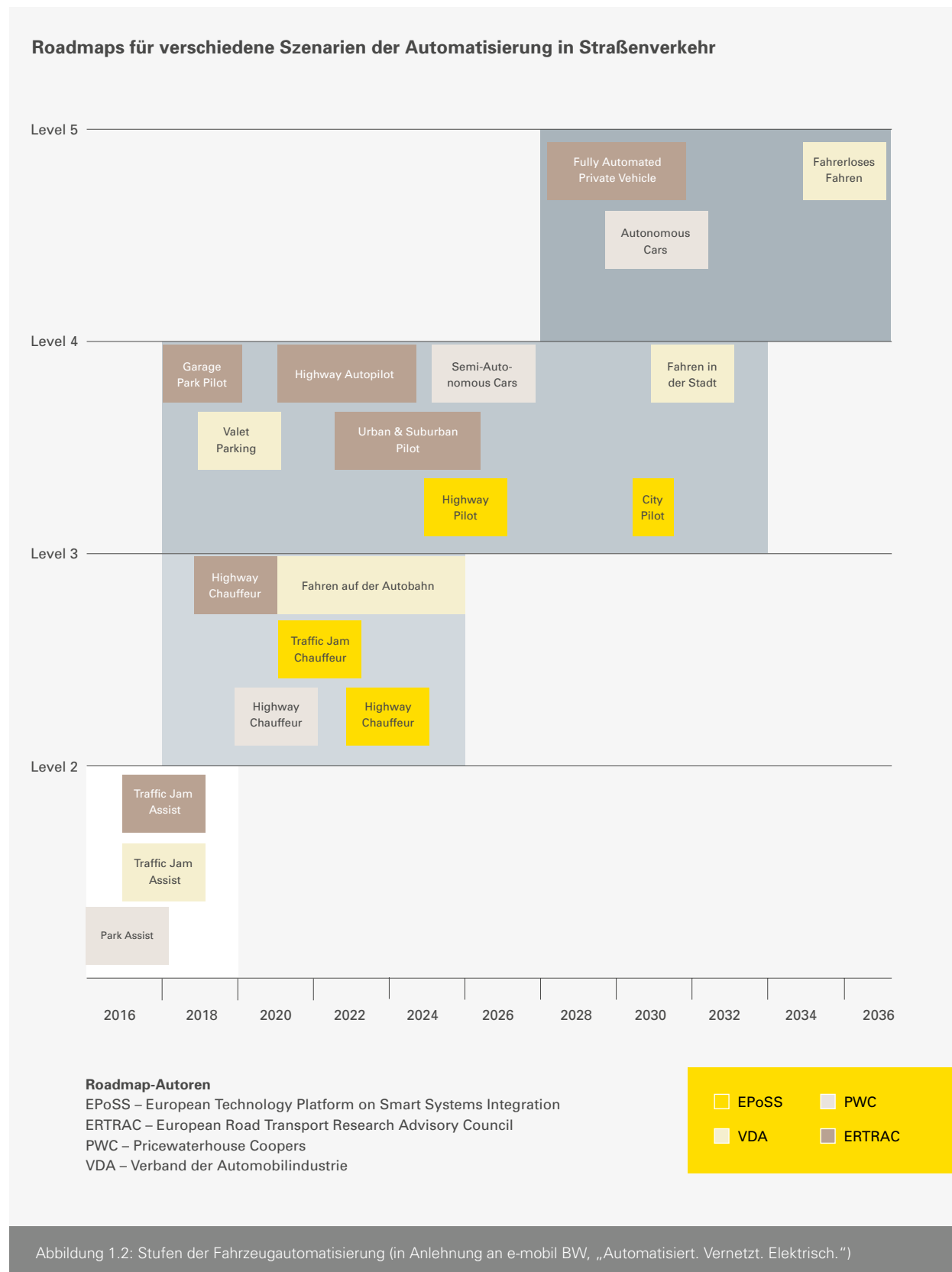


Abbildung 1.2: Stufen der Fahrzeugautomatisierung (in Anlehnung an e-mobil BW, „Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch.“)

Zielsetzung der Studie

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, wesentliche Implikationen der Automatisierung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland zu untersuchen. Die möglichen Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Verkehrssystem gehen dabei weit über Änderungen im Verkehrsfluss, in der Fahrzeitverwendung oder ein Mehr an Verkehrssicherheit hinaus. Eine systemische Betrachtung von Entwicklungen und ihren Folgen ist in diesem Zusammenhang unerlässlich, wurde bisher aber noch kaum unternommen. Die Studie adressiert eine solche Perspektive und analysiert Wirkungen des vollautomatisierten Fahrens (Stufe 4 und 5 der Fahrzeugautomatisierung) auf die Verkehrsmittelwahl (Modal-Split), auf die Umwelt (CO₂-Emissionen), das Verkehrssystem und die Stadt.

Methodisch setzt die Studie dabei auf ein quantitativ-modellgestütztes Verfahren, das mit Hilfe von Szenarien für das Jahr 2035 mögliche Effekte des automatisierten Fahrens im Personen- und Güterverkehr auf die Verkehrsnachfrage und die Umwelt berechnet. Parallel wurde eine empirische Erhebung durchgeführt, die sich mit den Implikationen der Automatisierung für die städte- und straßenbauliche Gestaltung auseinandersetzt. Unterstützt werden die Arbeiten durch eine Aufarbeitung der verfügbaren Literatur im Kontext der Wirkungen der Automatisierung auf das Verkehrssystem.

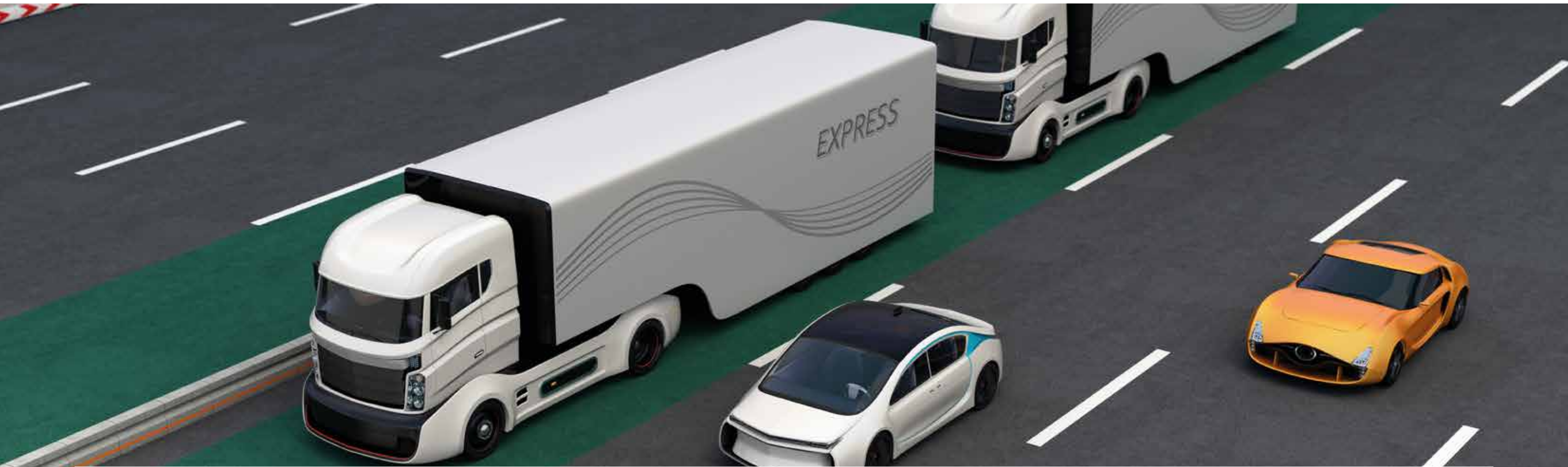
Der vorliegende Bericht ist dabei wie folgt aufgebaut:

- Kapitel 2 analysiert anhand einer Literaturstudie mögliche verkehrliche Wirkungen bei der Einführung automatisierter Fahrzeuge und berücksichtigt dabei insbesondere Aspekte wie Verkehrssicherheit, Einfluss auf die Straßenkapazität und neue Mobilitätsangebote.
- Kapitel 3 berechnet unter Nutzung von Modellen mögliche Auswirkungen bei der Einführung automatisierter Systeme auf den Modal-Split und die Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr für das Jahr 2035. Dabei wird ein szenariobasierter Ansatz verwendet, der eine bestimmte Durchdringung der Flotte von automatisierten Fahrzeugen annimmt. Für den Personenverkehr wird darüber hinaus eine Modellierung des Einflusses auf die verkehrsbedingten Emissionen vorgenommen.
- Kapitel 4 betrachtet den möglichen Einfluss automatisierter Fahrzeuge innerhalb des Verkehrssystems auf die stadtstrukturelle Entwicklung, ebenfalls mithilfe einer

Literaturstudie. Ergänzt wird die Betrachtung durch die Ergebnisse einer Befragung kommunaler Akteure zum erwarteten Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Ziele der Stadt- und Verkehrsplanung.

- Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel in Form von Handlungsempfehlungen für Politik und Forschung zusammen. Ziel der Empfehlungen ist es, Rahmenbedingungen zu schaffen, die einen möglichst hohen gesellschaftlichen Nutzen durch die Automatisierung des Verkehrs fördern und dabei etwaige negative Auswirkungen möglichst gering halten.





02

Direkte und systemische
Auswirkungen der Automatisierung
auf das Verkehrssystem

02

Direkte und systemische
Auswirkungen der Automatisierung
auf das Verkehrssystem



Im folgenden Kapitel werden die verkehrlichen Auswirkungen der Einführung von automatisierten Fahrzeugen betrachtet und qualitativ beschrieben. Die Analyse der Wirkungen im Personen- und im Güterverkehr erfolgt in getrennten Abschnitten. Dies ist in erster Linie der Tatsache geschuldet, dass für beide Bereiche derzeit ein unterschiedliches Niveau an Voruntersuchungen vorliegt: Während die Implikationen eines automatisierten Straßenverkehrs für den Personenverkehr bereits im Form zahlreicher Studien in der Fachliteratur Berücksichtigung gefunden haben und für Kapitel 2.1 ausgewertet wurden, ist dies für den Güterverkehr noch kaum erfolgt. Bisher liegen nur erste grobe Einschätzungen möglicher Folgen vor.

Das Kapitel adressiert die Fahrzeugautomatisierung der Stufen 4 und 5 – der Fokus liegt dabei auf Szenarien mit hohen Durchdringungsraten und Fahrzeugen der Automatisierungsstufe 5 („fahrerlos“).

2.1 Personenverkehr

Auswirkungen der Einführung von automatisierten Fahrzeugen auf Verkehrssysteme sind in der Vergangenheit bereits in der Fachliteratur thematisiert worden – dabei wurden vor allem mögliche Vorteile der neuen Technologie ausführlich geschildert und diskutiert (e. g. Pinjari et al., 2013; Litman, 2014; e-mobil BW GmbH, 2015; Fagnant und Kockelman, 2015; Anderson et al., 2016; unter vielen anderen). Die folgenden Aspekte finden in diesem Zusammenhang immer wieder Berücksichtigung.

- Automatisierte Fahrzeuge sollen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen (Anderson et al., 2016; e-mobil BW GmbH, 2015). Laut dem Statistischen Bundesamt (2015) sind über 90 % der Verkehrsunfälle in Deutschland auf menschliches Versagen zurückzuführen – diese Werte entsprechen auch den Ergebnissen aus den USA (National Highway Traffic Safety Administration, 2008). Es wird er-

wartet, dass der Einsatz von automatisierten computergesteuerten Fahrzeugen solche Werte deutlich reduziert (aufgrund der Reduktion der Reaktionszeit, des Wegfalls menschlicher Aufmerksamkeitsschwankungen usw.). Fagnant und Kockelman (2015) gehen beispielsweise von einer Reduktion von 50 % der Verkehrsunfälle bei einer Flottendurchdringung von lediglich 10 % vollautomatisierter Fahrzeuge aus. Bei einer Marktdurchdringung von 90 % ließe sich eine Abnahme der Verkehrsunfälle um 90 % erwarten.

- Automatisierte Fahrzeuge ermöglichen ihren Nutzern, die im Auto verbrachte Zeit mit alternativen Tätigkeiten zu verbringen (vgl. Fraedrich et al., 2016; Cyganski et al., 2015; Munsch, 2014; Schulz, 2014; Sokolow, 2013). Häufig geht es in der Debatte um Zeitnutzung um die Produktivität und Effizienz beim Unterwegssein, also zum Beispiel um die Möglichkeit, während der Fahrt zu arbeiten.
- Ein weiterer prominenter Aspekt im Zusammenhang mit möglichen Vorteilen des automatisierten Fahrens ist die (Auto-)Mobilisierung von neuen Nutzergruppen, die wegen spezifischer Einschränkungen – z. B. aufgrund von körperlichen Behinderungen oder aufgrund des Alters – vor der Einführung fahrerloser Fahrzeuge nicht individuell mobil sein können. Automatisiertes Fahren könnte solchen Personengruppen einfache, flexible und komfortable individuelle Mobilität bieten (Chapman, 2012; Silberg et al., 2012; Bradshaw-Martin & Easton, 2014).
- Einige Studien gehen davon aus, dass die Einführung automatisierter Fahrzeuge mit einer Erhöhung der Kapazität auf Fahrbahnen bzw. des maximalen Verkehrsflusses der Verkehrswege einhergeht (Tampere et al., 2009; Shladover et al., 2012; Hoogendoorn, 2014). Eine solche Effizienzsteigerung wird durch Nutzung von Abstandsregeltempomaten (Adaptive Cruise Control – ACC; Kesting et al., 2007) bzw. von kooperativen Abstandsregeltempomaten (Cooperative Adaptive Cruise Control – CACC; Schakel und v. Arem, 2010) und Kreuzungskontrollsystemen (Reservation Based Intersection Control, RBIC; Dresner und Stone, 2005) möglich. Wenngleich einige Autoren konstatieren, dass signifikante Verbesserungen erst bei hohen Anteilen an automatisierten Fahrzeugen in der Gesamtfahrzeugflotte zu erwarten seien, sind andere überzeugt, dass schon ein geringer Anteil zu einem beachtlich höheren Verkehrsfluss führen würde.¹ Eine solchermaßen erhöhte Kapazität würde wiederum weniger Verkehrsstau

und geringere Fahrtzeiten zur Folge haben (Litman, 2014; Heinrichs und Cyganski, 2015).

- In diesem Zusammenhang wird argumentiert, dass die effizientere Fahrweise der automatisierten Fahrzeuge auch zur Verringerung von Kraftstoffkosten und Emissionen beitragen könnte, da eine Homogenisierung des Verkehrs (z. B. durch Kolonnenfahrten) zur Vermeidung von unnötigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen führt (Bullis, 2011; Klaußner und Irtenkauf, 2013; e-mobil BW GmbH, 2015).
- Fagnant und Kockelman (2015) legen darüber hinaus dar, dass in Folge der Homogenisierung des Verkehrsflusses und der Geschwindigkeit hohe Automatisierungsanteile zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Fahrtzeit führen können.
- Die Einführung von automatisierten Straßenfahrzeugen könnte auch zu einer wesentlichen Reduktion der Betriebskosten von Unternehmen der Einzelpersonenbeförderung (insbesondere Taxiunternehmen) sowie von Personenbeförderungsunternehmen des Ö(P)NV führen, wenn kein Fahrer/keine Fahrerin mehr benötigt wird, um das Fahrzeug zu navigieren und zu steuern (Litman, 2014; Lenz und Fraedrich, 2015).
- Automatisiertes Fahren bietet, so die Annahme, insgesamt Chancen für den ÖPNV, wenn durch den Einsatz von selbstfahrenden Minibussen oder geteilten Pkw (sogenanntes Ridesharing bzw. Car Pooling) das Angebot flexibilisiert und individualisiert werden kann. So könnten z. B. fixe Routenpläne im Stadtkern mit jeweils individuellen Zielen kombiniert werden (Lenz und Fraedrich, 2015; Yap et al., 2016). Eine solche Neugestaltung des ÖPNV-Angebots könnte auch eine Erhöhung der Attraktivität von intermodalen Fahrten zur Folge haben.
- Eine sogenannte Valet-Parken- (bzw. Parkpilot-)Funktion, bei der das Fahrzeug selbstständig den Einparkvorgang übernimmt, so dass die Nutzerin/der Nutzer direkt am Ziel aus- bzw. einsteigen kann, könnte zu einer bedeutenden Reduktion der generalisierten Parkkosten² führen. So könnten sowohl Parkgebühren als auch Suchzeit reduziert werden (Fraedrich et al., 2015; Chapin, 2016).
- Das automatisierte Fahren bietet darüber hinaus erhebliche Potenziale, die heute übliche städte- und straßenbau-

¹ | Shladover et al. (2012) und Bierstedt et al. (2014) legen dar, dass das Phänomen mit einem Skaleneffekt assoziiert sei (d. h. je größer der Anteil automatisierter Fahrzeuge, desto größer die Kapazitätswirkungen; Kesting et al. (2007) wiederum gehen davon aus, dass der maximale Verkehrsfluss proportional zum Anteil der automatisierten Fahrzeuge steigt: D. h., es wären keine Skaleneffekte zu erwarten und ein Anstieg von z. B. 5 % auf 10 % hätte einen vergleichbaren Effekt wie ein Anstieg von 85 % auf 90 %.

² | Unter generalisierten Kosten versteht man die monetarisierte, d. h. in Geldwert angegebene Summe der Ressourcenverbräuche, die mit einer Aktivität verbunden sind. Solche Ressourcen sind u. a. tatsächliche Kosten für Fahrzeug und Kraftstoff oder der Zeitaufwand.

liche Gestaltung neu zu denken: Der Stellplatzbedarf für Fahrzeuge könnte sinken, wenn diese z. B. nach dem Absetzen einer Passagierin weiter zum nächsten Nutzer führen oder weil eine permanent verfügbare, Taxi-ähnliche Flotte den Pkw-Besitz von Haushalten spürbar reduzieren könnte (Heinrichs, 2015: 233). Auch könnten Umstiegs-, Zu- und Ausstiegszonen – vor dem Hintergrund einer möglichen Zunahme an komplementären, intermodalen Kombinationen – die Beschaffenheit und Ausgestaltung von Mobilitätsknotenpunkten und damit das Stadtbild verändern (ebenda: 233 ff.).

Während die beschriebenen direkten Auswirkungen der Automatisierung bereits in einer Reihe von Arbeiten analysiert wurden, sind vor allem die systemischen Interaktionen zwischen den einzelnen Effekten bisher kaum betrachtet worden. Es ist aber nicht auszuschließen, dass die aufgelisteten Effekte nur in abgeschwächter Form oder gar nicht eintreten, wenn weitere Einflussfaktoren mitberücksichtigt werden. Zum Beispiel könnten die Erhöhung der Kapazität von Verkehrswegen oder die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen von Pkw von geringerer Größenordnung sein, wenn man in Betracht zieht, dass automatisierte Fahrzeuge im urbanen Bereich nicht nur mit nicht-automatisierten Fahrzeugen interagieren müssen (Mischverkehr), sondern auch mit Fußgängern, Radfahrern, in zweiter Reihe haltenden Fahrzeugen oder entladenden bzw. beladenden Lkw usw. Daher ist es notwendig, eine Perspektive einzunehmen, bei der die Interaktionen solcher Effekte und Einflussfaktoren in den Blick genommen und die Auswirkungen nicht isoliert evaluiert werden.

Die folgenden Überlegungen zielen (ohne Anspruch auf eine allgemeine Gültigkeit) darauf ab, eine Synthese des heutigen Standes der Forschung darzustellen und dabei auch Erkenntnisse aus der systemischen Betrachtung von Verkehrssystemen einzubeziehen.

Zunächst wird angenommen, dass die allgemeine Verkehrsnachfrage nach motorisierten Alternativen konstant bleibt (obgleich die Nachfrage nach den vorhandenen Alternativen untereinander variieren kann) und dass die Automatisierung keinen Effekt auf den subjektiven Wert der Fahrtdauer (Subjective Value of Time; VoT) hat; diese beiden modelltechnischen Einschränkungen werden in den Kapiteln 3 und 4 aufgehoben. Es werden in diesem Abschnitt auch noch keine spezifischen Maßnahmen kommunaler Behörden betrachtet, die möglichen negativen Effekten der Automatisierung steu-

ernd entgegenwirken – solche Maßnahmen werden in Kapitel 5 thematisiert. Außerdem wird bei den nun folgenden Analysen ein Schwerpunkt auf den Automatisierungsgrad der Stufe 5 gelegt – d. h. zum Beispiel, dass sowohl Taxis als auch Verkehrsmittel des ÖPNV keine Fahrerin/keinen Fahrer mehr benötigen würden.

Wie bereits weiter oben beschrieben, zieht die Automatisierung eine Reduktion der generalisierten Kosten von Taxis (kein Fahrer bedeutet kosteneffizienteres Fahren) und Pkw (kosteneffizienteres Fahren, geringere generalisierte Parkkosten) sowie der Betriebskosten im ÖPNV (kein Fahrer bedeutet kosteneffizienteres Fahren) nach sich. Dadurch ließe sich eine Flexibilisierung und ggf. Ausweitung des ÖPNV-Angebots erreichen (durch die Individualisierung des Angebots am Zielort, das Bereithalten von kleineren Fahrzeugen usw.). Kapazitätssteigernde Fahrzeugtechnologien (z. B. adaptive Geschwindigkeitsregulierung, Kreuzungskontrollsysteme) gehen, so die oben adressierte Annahme, außerdem mit einer Erhöhung des maximalen Verkehrsflusses einher und wirken daher staumindernd, so dass die Automatisierung auch zu einer Reduktion der Schadstoffemissionen führen könnte.

Gleichzeitig kann aber ein vergrößerter Nutzerkreis für Pkw angenommen werden, wenn mit der Einführung fahrerloser Fahrzeuge künftig auch jene einen Pkw nutzen könnten, die bisher aufgrund einer Mobilitätseinschränkung (z. B. Menschen mit Sehbehinderung) oder ihres Alters (z. B. Kinder und Jugendliche) keine Fahrerlaubnis hatten. Diese neuen Nutzer könnten z. T. vorhandene Pkw im Haushalt nutzen oder auf Fahrzeuge einer autonomen Fahrzeugflotte zurückgreifen. Denkbar sind auch zusätzliche Fahrten, die heute eher nicht mit dem Pkw durchgeführt werden, weil sie mühsam sind oder gesetzliche Regeln brechen; z. B. Nachtfahrten oder Fahrten unter dem Einfluss von die Aufmerksamkeit beeinträchtigenden Substanzen wie Medikamenten oder Alkohol.

■ Diese Effekte haben wiederum Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage bzw. auf die Verkehrsmittelwahl: So führen geringere generalisierte Fahrtkosten bei Taxi- bzw. Pkw-Fahrten zu einer Erhöhung der Nachfrage nach solchen Verkehrsmitteln. Ein erweiterter Pkw-Nutzerkreis wirkt sich wiederum positiv auf die Nachfrage nach Pkw-Fahrten und negativ auf den ÖPNV aus (in geringerem Maße auch auf die Nachfrage nach Taxifahrten, aber aufgrund der Größenordnung wird dieser Effekt hier nicht berücksichtigt). Vor dem Hintergrund von Auswirkungen auf die Nachfrage nach unterschiedlichen Verkehrsalter-

nativen kommt es in der Folge zu Effekten im Zusammenhang mit dem ÖPNV-Angebot; in der Literatur wird dieser Effekt als sogenannter „Vicious or Virtuous Circle of Public Transport“ (VCPT) bezeichnet (Ortúzar und Willumsen, 2011). Der VCPT beschreibt, dass ein besseres ÖPNV-Angebot zu einer größeren Nachfrage führt, die wiederum geringere Betriebskosten pro Person zur Folge hat, was insgesamt zu einem noch besseren Angebot führt. Im Gegensatz dazu verringert aber ein schlechteres ÖPNV-Angebot die Nachfrage und erhöht somit die Kosten pro Person, was wiederum zu einem insgesamt noch schlechteren Angebot führt. Dabei ist zu beachten, dass höhere Betriebskosten nicht unbedingt eine unmittelbare Wirkung auf das Angebot haben müssen, z. B. dann, wenn das System subventioniert wird, um ein bestimmtes Angebot und die Daseinsvorsorge zu erhalten. Vorerst könnte die Automatisierung von Straßenfahrzeugen, wie bereits weiter oben beschrieben, positiv auf den ÖPNV wirken, indem durch den Wegfall des Fahrpersonals die Betriebskosten gesenkt würden, während gleichzeitig eine erhöhte Flexibilität zu einem verbesserten Angebot führt. Ein gegenteiliger Effekt könnte allerdings dann eintreten, wenn die Nachfrage nach Verkehrsmitteln des ÖPNV sinkt, weil die Vollautomatisierung die Attraktivität des Privat-Pkw deutlich erhöht. Eine geringere Nachfrage nach Verkehrsmitteln des ÖPNV hätte (bei gleichem Angebot) höhere Kosten pro Person zur Folge, was wiederum zu einer Beschränkung des Angebotes führen kann.

■ Darüber hinaus wirkt sich eine erhöhte Nachfrage nach einem bestimmten motorisierten Verkehrsmittel negativ auf die Nachfrage nach anderen Verkehrsmitteln aus, zumindest dann, wenn – wie in den getroffenen Annahmen – die allgemeine Verkehrsnachfrage nach motorisierten Alternativen (MIV und ÖPNV) konstant bleibt. Solche Änderungen in der Verkehrsmittelwahl (Verlagerung der Nachfrage von einer Alternative zu einer anderen) wirken wiederum auf das System (sogenannte „Rebound Effects“): Eine Erhöhung der Nachfrage nach Pkw und Taxis würde (unter der Annahme von „ceteris paribus“) demnach zu einer höheren Verkehrsbelastung auf den Straßen und damit zu mehr Stau und Schadstoffemissionen führen. Dabei würden sich Emissionsbelastungen sogar doppelt negativ auswirken: Zum einen führen mehr Fahrten mit dem MIV zu einer Zunahme der Emissionen pro Personenkilometer;³ zum anderen stiege dadurch auch die Kapazitätsauslastung auf den Straßen, was wiederum mehr Stau, längere Fahrtzeiten und damit weitere Emissionen nach sich ziehen könnte.

■ Aber auch, wenn die allgemeine Verkehrsnachfrage konstant bliebe, könnte mit einer Erhöhung der Verkehrsleistung gerechnet werden, nämlich dann, wenn vermehrt Leerfahrten zum Zweck der Repositionierung von fahrerlosen Fahrzeugen durchgeführt werden. Solche taxiähnlichen Fahrzeuge können zwar mehr Nutzer im Tagesverlauf bedienen – was insgesamt durchaus zu Reduzierungen der Pkw-Flotten führen könnte. Sie würden dafür aber auch zusätzliche Strecken zurücklegen müssen, in denen sie nicht besetzt wären. Dies trifft zwar in ähnlichem Maße auch schon für die heute existierenden Taxis zu, die ja ebenfalls auf dem Weg zu neuen Nutzern Fahrten durchführen, bei denen sie, bis auf die Taxifahrerin/den Taxifahrer, nicht besetzt sind. Allerdings kann, wie weiter oben beschrieben, von einer deutlichen Zunahme dieser taxiähnlichen Fahrten ausgegangen werden, z. B., wenn mehrere Mitglieder eines Haushaltes ein Fahrzeug im Tagesverlauf „teilen“. Denkbar ist darüber hinaus, dass fahrerlose Pkw nicht mehr direkt in der Nähe des Fahrtzieles abgestellt werden, sondern z. B. dort, wo es nach ökonomischen Kriterien sinnvoll erscheint (gegebenenfalls auf dem eigenen Parkplatz zu Hause oder auch überhaupt nicht, wenn nämlich der Aufenthalt am Zielort nur kurz ist und sich der Pkw währenddessen – gewissermaßen in einer Warteschleife – weiter im fließenden Verkehr bewegt).

Mittlerweile gibt es erste Untersuchungen, die solche Effekte betrachtet haben (OECD/ITF & CPB, 2015; Trommer et al., 2016; Maciejewski und Bischoff, 2016). Levin et al. (2016) und Maciejewski und Bischoff (2016) haben Simulationen durchgeführt, in denen die bestehende Nachfrage nach Pkw-Fahrten komplett durch sogenannte Shared Autonomous Vehicles (SAV), also taxiähnliche Fahrzeuge, bedient wurde. Im Ergebnis haben sie eine durchschnittliche Erhöhung der Fahrtzeit der Nutzer im Vergleich mit der Basissituation konstatiert, weil die Effekte der Repositionierungsfahrten auf die Verkehrsauslastung größer sind als eventuelle Kapazitätsgewinne durch die Automatisierung. Solche Effekte könnten in der Realität noch verstärkt werden, da in den Simulationen keine Leerfahrten zum Zwecke des Parkens und keine eventuellen Verschiebungen der Nachfrage berücksichtigt wurden, die die Verkehrsauslastung der Straßen erhöhen könnten.

³ In diesen Betrachtungen wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge in Bezug auf ihre Antriebstechnologie der heutigen Fahrzeugflotte entsprechen, dass der Anteil an elektrischen Fahrzeugen also praktisch zu vernachlässigen ist. Diese Einschränkung wird in Kapitel 3 aufgehoben.

- Die Tatsache, dass Kapazitätserhöhungen nicht unbedingt in einer geringeren Verkehrsauslastung (und somit in weniger Stau und einer geringeren durchschnittlichen Fahrtzeit) resultieren, wurde bereits umfassend diskutiert und ist in der Literatur als Downs-Thomas-Paradox bekannt (Downs, 1962; Thomson, 1972; Cairns et al., 1998; Cairns et al., 2002; Goodwin und Nolan, 2003; Duranton und Turner, 2011). Dieses Phänomen beschreibt, dass höhere Kapazitäten zuerst den MIV begünstigen. Dies führt zu einer Verlagerung der Verkehrsnachfrage zugunsten des MIV und somit zu mehr Stau. Mit der Einführung automatisierter Fahrzeuge könnten Personen vermehrt zum MIV wechseln, weil die Fahrtzeiten zunächst sinken würden. Die Zunahme des MIV hat allerdings mehr Stau und längere Fahrtzeiten zur Folge.

In ländlichen Räumen und in kleineren Städten mit nur wenig Verkehrsstaus werden solche negativen externen Effekte wohl von geringer Größenordnung sein, so dass automatisierte Fahrzeuge hier möglicherweise einen größeren Nutzen bringen könnten (selbst ohne Anpassungen des regulatorischen Rahmens). In größeren Städten mit einem hohen Stauaufkommen besteht dagegen das Risiko, dass zusätzlicher Stau und steigende Emissionen einen gravierenden Effekt ausüben, der den Nutzen der Technologie übersteigen könnte.



Die Logistikbranche ist sehr an automatisierten Fahrfunktionen interessiert

- Die Vollautomatisierung von Straßenfahrzeugen stellt möglicherweise ein erhebliches Risiko für den ÖPNV dar: Einerseits könnten verringerte generalisierte Kosten von automatisierten Pkw und Taxis dazu führen, dass diese für die Nutzer attraktiver würden. Andererseits scheinen aber auch jene (intermodalen) Szenarien, in denen ÖPNV-Betreiber eigene automatisierte Fahrzeugflotten als Ergänzung zu den Massenverkehrsmitteln bereithalten – etwa, um die Nutzer auf der sogenannten letzten und ersten Meile zu transportieren – weniger Potenzial zu bieten als vermutet. Empirische Untersuchungen konnten zeigen, dass Umsteigevorgänge als besonders negativ wahrgenommen und bewertet werden (Train, 1979; Frank et al., 2008; Bahamonde-Birke, 2016; unter vielen anderen). Auf Basis dieser Untersuchungen ist die Annahme, dass die Attraktivität des ÖPNV für eine größere Anzahl an Nutzern durch den zusätzlichen Einsatz von automatisierten Fahrzeugen steigt, möglicherweise noch einmal kritisch zu hinterfragen.

Wie oben dargestellt, hat die Einführung von automatisierten Fahrzeugen das Potenzial, mit positiven Entwicklungen (Erhöhung der Verkehrssicherheit, der Mobilität, der Fahreffizienz usw.) einherzugehen. Allerdings würden vollautomatisierte Fahrzeuge substantielle Änderungen im Verkehrssystem verursachen. Daher wird es notwendig sein, den regulatorischen Rahmen den neuen Umständen anzupassen. Sollten keine entsprechenden Maßnahmen implementiert werden, besteht das Risiko, dass die oben erwähnten positiven Entwicklungen von möglichen negativen Entwicklungen überschattet werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass automatisierte Fahrzeuge viele Änderungen verursachen werden und für die Verkehrs- und Stadtplanung eine große Herausforderung darstellen, da neue Konzepte erarbeitet werden müssen, um solche Fahrzeuge sinnvoll in das Verkehrssystem zu integrieren.

2.2 Güterverkehr

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge wird allgemein als einer der zukunftsweisenden Trends im Verkehrsmarkt gesehen (ZF Friedrichshafen AG, 2016; ZF Friedrichshafen AG, 2014; Janssen et al., 2015). Dabei wird insbesondere auf Seiten der Fahrzeughersteller davon ausgegangen, dass Automatisierungsfunktionen im Bereich der Nutzfahrzeuge ein starker Werttreiber sein werden. Die Entwicklung entsprechender Technologien kann Wettbewerbsvorteile sichern

und wird daher verstärkt durch die Fahrzeughersteller umgesetzt und in den Markt gebracht (McKinsey & Company, 2016; Roland Berger, 2016). Nutzfahrzeuge sind aufgrund ihrer hohen Fahrleistung prädestiniert für das automatisierte Fahren. Während ein Pkw in Deutschland jährlich im Durchschnitt etwa 14.000 Kilometer zurücklegt, sind es beim Nutzfahrzeug im Fernverkehr etwa 100.000 Kilometer (VDA, 2015). Aufgrund der hohen Fahrleistung können schnellere Amortisationen erreicht werden (siehe Absatz „Kosten“).

Die Identifizierung und Bewertung der Effekte des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge im Güterverkehr ist bisher allerdings noch kaum thematisiert worden. Die wenigen für den Bereich des Güterverkehrs vorliegenden Arbeiten haben bislang fast ausschließlich die Automatisierung des Straßengüterverkehrs in den Blick genommen. Dabei sind die Einsatzszenarien von automatisierten Fahrzeugen vielfältig und reichen vom Valet-Parken über das Self-Driving Parcel und die mobile Abholstation bis hin zum selbstfahrenden Lkw. Je nach Anwendungsfall und Konzept können die Effekte variieren. Im folgenden Abschnitt werden direkte und indirekte Effekte für die verschiedenen Einsatzszenarien im Güterverkehr beschrieben. Daran anschließend soll ein kurzer Einblick in ein mögliches urbanes Einsatzszenario auf der sogenannten letzten Meile gegeben werden.

2.2.1 Automatisierter Straßengüterfernverkehr

Die heutigen Erwartungen an die Automatisierung von Güterfahrzeugen gehen dahin, dass schon relativ kurzfristig betriebliche Vorteile im Bereich der Fernverkehre erreichbar wären. Ein Einfallstor für diesen Einsatzbereich stellen die Autobahnen dar, auf denen es angesichts ihrer Bauweise („anbaufreie Richtungsfahrbahnen“) technisch und rechtlich schon bald möglich sein könnte, automatisiert zu fahren. Zentraler Anwendungsfall für die Umsetzung automatisierten Fahrens im Güterverkehr auf der Autobahn ist die elektronische Verkettung mehrerer Lkw zu einem Konvoi, das sogenannte Platooning (Flämig, 2015). Lkw sind mit dem vorausfahrenden Lkw und auch untereinander elektronisch gekoppelt; dies erlaubt verkürzte Fahrzeugabstände. Je nach Variante legen alle Lkw die gleiche Strecke zurück bzw. können sich einzelne Fahrzeuge flexibel dem Konvoi anschließen oder ihn auch wieder verlassen.

Zwar sind einzelne Projekte zur elektronischen Kopplung von Fahrzeugen mit dem Fokus auf den Güterverkehr durchgeführt worden,⁴ die Auswirkungen automatisierten Fahrens im

Güterverkehr auf das Verkehrssystem sind bisher jedoch eher selten betrachtet worden. Mehrfach wurde das Thema allerdings von Unternehmensberatungen thematisiert (McKinsey & Company, 2016; Nowak et al., 2016; Roland Berger, 2016). Die wesentlichen Auswirkungen, die erwartet werden, sind – wie in Kapitel 2.1 dargestellt – auch im Güterverkehr in der Verkehrssicherheit, der Verkehrseffizienz und den Umweltwirkungen zu sehen. Hinzu kommen speziell für den Güterverkehr erhebliche Auswirkungen im Bereich der Kosten.

- Verkehrseffizienz:** In Deutschland stehen Autofahrerinnen und Autofahrer heute im Schnitt 36 Stunden im Jahr im Stau (VDA, 2015). Angesichts des erwarteten Verkehrszuwachses – im Straßengüterverkehr plus 39 % Verkehrsleistung bis 2030 im Vergleich zu 2010 (BMVI, 2014) – wird sich diese Situation kaum verändern. Mit dem automatisierten Fahren könnte die vorhandene Straßeninfrastrukturkapazität durch den geringeren Flächenbedarf und durch die gleichmäßigere Geschwindigkeit mindestens verdoppelt werden (Flämig, 2015). Durch einen verbesserten Verkehrsfluss lässt sich eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit erzielen.

Während die Straßenkapazitäten durch das vollautomatisierte Fahren besser genutzt werden können, kann es gleichzeitig zu einer Zunahme der pro Lkw zurückgelegten Strecke kommen. Der automatische Fahrzeugpilot braucht keine Ruhezeiten. Damit fallen die derzeit für Lkw-Fahrer geltenden Lenk- und Ruhezeiten weg, was Änderungen in der Tourenplanung ermöglicht (Flämig, 2015). Veränderungen könnten sich in längeren Fahrtweiten ausdrücken sowie in der zeitlich präziseren Planung logistischer Abläufe dank eines staureduzierten verbesserten Verkehrsflusses. Damit gingen geringere Wartezeiten an den Rampen einher (Mercedes-Benz next, 2014; Flämig, 2015; VDA 2015).

- Kosten:** Die Motivation zur Umsetzung automatisierten Fahrens im Güterverkehr hängt in erster Linie davon ab, ob sich ein positives Geschäftsszenario entwickeln lässt (Janssen et al., 2015). Denn für Unternehmen steht in Hinblick auf den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen die Frage nach den möglichen Kosteneinsparungen oder Gewinnsteigerungen im Vordergrund – auch angesichts vermutlich erhöhter Anschaffungskosten für automatisierte Fahrfunktionen von bis zu über 20.000 US-Dollar bei Automatisierungsstufe 5 (Roland Berger, 2016). Den größten Anteil der vergleichsweise höheren Anschaffungskosten automatisierter Fahrzeuge macht dabei die Software aus.

4 | Projekte sind u. a. CHAUFFEUR, KONVOI, SATRE, EFAS und Energy ITS (Tsugawa, 2014; Müller, 2012).

Im Straßengüterverkehr könnten durch die Automatisierung (gemeint ist hier die Stufe 5) Reduktionen in den Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge zwischen 27 % und 35 % im Jahr 2025 und darüber hinaus im Vergleich zu 2016 und der derzeit vorherrschenden Fahrzeugtechnologie und Einsatzbedingungen ermöglicht werden (Nowak et al., 2016; McKinsey & Company, 2016). Dabei tragen vor allem die geringeren Personalkosten, die sich aufgrund des Wegfalls des Fahrers ergeben, zu Kosteneinsparungen bei (Janssen, 2015; Nowak et al., 2016; McKinsey & Company, 2016). Allerdings beschränken sich die Aufgaben des Lkw-Fahrers nicht nur auf das Fahren allein. Er ist zudem für die Überwachung des Be- und Entladens, die Kontrolle der Fracht und das Führen der Dokumente zuständig. Bei Wegfall des Fahrers müssen diese Aufgabenbereiche in anderer Weise realisiert werden.⁵ Sollte dies durch entsprechendes Personal geschehen, verschieben sich die fahrzeugseitig eingesparten Personalkosten in andere Bereiche.

Es wird davon ausgegangen, dass neben geringeren Personalkosten auch Effizienzsteigerungen bei der Fahrzeugführung möglich sind und so zu den Kosteneinsparungen beitragen. Die verkürzten Fahrabstände führen durch eine verbesserte Aerodynamik zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und damit zu einer optimierten Energieeffizienz. Diese kann je nach Position in der Kolonne und weiteren Faktoren (z. B. gefahrene Geschwindigkeit, Abstand und Anzahl der Fahrzeuge, Fahrzeuggröße, Witterungsverhältnisse) 8 % bis 18 % weniger Energieverbrauch bedeuten (Janssen et al., 2015; Tsugawa et al., 2016; Müller, 2012 und Lu and Shladover, 2011). Automatisierte Fahrzeuge lassen sich somit ökonomischer betreiben, und die Kosteneinsparungen könnten höhere Anschaffungskosten rechtfertigen. Dies würde einen Wettbewerbsvorteil gegenüber dem Gütertransport auf den anderen Verkehrsträgern bedeuten. Wie groß die entsprechenden Auswirkungen auf den Modal-Split wären, wird in Kapitel 3.2 dargestellt.

- **Verkehrssicherheit:** Auch im Güterverkehr ist der Großteil der Unfälle (90 %) auf menschliche Fehler zurückzuführen (Janssen et al., 2015). Automatisierte Lkw – und dies gilt schon bei niedrigeren Automatisierungsstufen – sind mit einer Vielzahl an Sensoren und Kameras ausgestattet. Zudem kommuniziert der automatische Lkw-Pilot ständig mit den anderen Fahrzeugen in seinem Umfeld, wertet Informationen von dreidimensionalen Karten aus

und „weiß“ auf diese Weise mehr über das Fahrzeugumfeld als der menschliche Fahrer, was sich wiederum auf die Verkehrssicherheit auswirkt (Mercedes-Benz next, 2014). Durch die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander können so beispielsweise gefährliche Stauenden oder liegengebliebene Fahrzeuge erkannt werden. Geringere Unfallquoten könnten über entsprechend angepasste Versicherungsbeiträge ebenfalls zu Kosteneinsparungen beitragen (Roland Berger, 2016).

- **Infrastruktur:** Die physische Infrastruktur, wie sie derzeit besteht, kann das Platooning behindern (Janssen et al., 2015). Beispielsweise sind Autobahn-Auf- und -Ausfahrten für das Durchfahren mit elektronisch aneinandergeschlossenen Fahrzeugen räumlich nicht geeignet.

Ein weiterer Aspekt, in dem die Infrastruktur gegenwärtig nicht den Anforderungen eines automatisierten Güterverkehrs auf der Autobahn entspricht, ist der Datentransfer. In der Kommunikation der Fahrzeuge untereinander (Vehicle to Vehicle, V2V), wie sie beim Platooning notwendig ist, werden in einem umfangreichen Maße Daten produziert. Diese Kommunikation und der auftretende Datenaustausch müssen bewerkstelligt werden. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist, eine flächendeckende Ausstattung mit Funktechnologie und technischen Netzwerken, die die entsprechenden Kapazitäten in Schnelligkeit und Abdeckung ermöglichen (McKinsey & Company, 2016).

Eine infrastrukturelle Anpassungsmaßnahme an den automatisierten Güterverkehr auf Autobahnen könnte beispielsweise die Schaffung von separaten Fahrspuren beinhalten (Flämig, 2015). Auch mit Blick auf die zusätzlich zu verarbeitenden Datenmengen, die die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander verursacht, sind infrastrukturelle Anpassungsmaßnahmen notwendig. Eine entsprechende digitale Infrastruktur muss in der Lage sein, die Daten dauerhaft und fehlerfrei zu übermitteln und zu be- und verarbeiten. Die Datensicherheit ist dabei ein wesentlicher Faktor für das Funktionieren der Technologie und der Einsatzkonzepte im Güterverkehr (Janssen et al., 2015).

- **Umweltwirkungen:** Mit den Einsparungen im Kraftstoffbereich sind nicht nur Kosteneffekte verbunden, vielmehr kann damit auch ein Beitrag zu den Klimazielen geleistet werden. Entsprechende Aussagen sind derzeit kaum vor-

handen. Emissionsreduktionen werden aus den Einsparungen an Dieselmotoren, die durch die Fahrten in einem Platoon ermöglicht werden, abgeleitet. Die Emissionsreduktion hängt dabei von verschiedenen Randbedingungen, wie der gefahrenen Geschwindigkeit, dem Abstand zwischen den Lkw und den Fahrzeuggrößen sowie dem Verbrauch der Lkw, aber auch der Anzahl der hintereinander fahrenden Fahrzeuge ab.

Eine Studie zur Effektivität von Platooning im Rahmen des Projekts Energy ITS, eines der im Bereich Platooning durchgeführten Pilotprojekte, kam zu folgendem Ergebnis: Wenn 40 % der schweren Lkw auf Autobahnen in Platoons unterwegs sind, ist je nach Abstand zwischen den Fahrzeugen (ob 4 m oder 10 m) eine CO₂-Einsparung von 2,1 % bis 4,8 % auf den Autobahnen möglich (Tsugawa, 2014).

Während im ersten Abschnitt die direkten Auswirkungen der Vollautomatisierung im Güterverkehr thematisiert wurden, geht es im Folgenden um zusätzliche und indirekte Effekte, die mit der Automatisierung einhergehen können.

- **Logistikstrukturen:** Die Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrzeuge haben – wie aufgezeigt – Auswirkungen auf die Tourenplanung, den Energieverbrauch und den Personaleinsatz. Diese Auswirkungen sind mit erheblichen Kosteneinsparungen bzw. Gewinnsteigerungen verbunden. Die Automatisierung des Güterverkehrs wird unter diesen Voraussetzungen auch Auswirkungen auf die Akteure im Logistikmarkt, auf Logistikprozesse und Logistikstrukturen haben. Besondere Bedeutung wird der Tatsache zukommen, dass Transport- und Logistikprozesse über digitale Plattformen gesteuert werden können. Um der zunehmenden Komplexität, die mit der Automatisierung auf höchster Stufe einhergeht, gerecht zu werden, gehen Experten davon aus, dass es zur Marktkonzentration in Güterverkehr und Logistik kommen wird – so z. B. in Form von Zusammenschlüssen und konzentrierten Netzwerken von Unternehmen (e. g. Flämig, 2015; Janssen et al. 2015; Roland Berger, 2016; Mercedes-Benz next, 2014; McKinsey & Company, 2016). Die Infrastruktur und die automatisierten Fahrzeuge erzeugen in ihrer Kommunikation Daten und damit Informationen, die u. a. für eine optimierte Routenwahl herangezogen werden können. Durch eine derartige dynamische Optimierung können Transporte sicherer und schneller abgewickelt werden. Eine weitere Option zukünftiger Logistikprozesse ist die Nutzung der sogenann-

ten „Crowd Logistics“, bei der u. a. Privatpersonen als (Mikro-)Logistikanbieter auftreten (Nowak et al., 2016). Ein Beispiel für einen entsprechenden Dienst ist UBERCargo, der seit dem Jahr 2015 in den USA und in großen Städten in Asien verfügbar ist. Die Kompetenzen und Rollen zwischen den derzeitigen Akteuren im Logistikmarkt können damit nicht mehr klar abgegrenzt werden. Die traditionellen Logistikanbieter sehen sich auf diese Weise mit einem Druck konfrontiert, der sie dazu drängt, sich mit dem Thema Digitalisierung und Automatisierung intensiv auseinanderzusetzen und ihre Geschäftsmodelle dahingehend anzupassen. Das bezieht sich sowohl auf den Güterfernverkehr als auch auf die Zustellung in der letzten Meile.

- **Industrie 4.0:** Unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ ergeben sich durch die Automatisierung des Güterverkehrs zudem neue Möglichkeiten zur Organisation der Transportlogistik und der mit ihr verbundenen Bereiche der innerbetrieblichen Logistik in Produktions- und Handelsunternehmen. Die Änderungen in den Abläufen der Supply Chain können zu einem nachgelagerten Effekt führen, insbesondere zur Anpassung von Produktionsstrukturen. Just-in-time-Produktion kann optimiert und Lagerhaltung weiter abgebaut werden (Nowak et al., 2016).

2.2.2 Einsatz automatisierter Fahrzeuge auf der letzten Meile

Ein weiterer Einsatzbereich automatisierter Fahrzeuge im Gütertransport ist die sogenannte letzte Meile und damit der städtische Verkehr. Szenarien eines automatisierten Güterverkehrs in urbanen Räumen werden im Zuge von Umweltzielen vornehmlich in Kombination mit Elektromobilität gedacht (Alessandrini et al., 2015).

Angesichts der Vielzahl von unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern und deren individuellen Bewegungsmustern im städtischen Straßenverkehr stellt die Automatisierung der letzten Meile eine besondere Herausforderung für die zuverlässige und sichere Ausführung der Automatisierungsfunktionen dar (DHL, 2016; McKinsey & Company, 2016). Erste Konzepte zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge im städtischen Gütertransport, z. B. mobile Abholstationen, liegen bereits vor (McKinsey & Company, 2016; DHL, 2016; DPD, 2016). Denkbare Effekte liegen eher im Mikrobereich, so bspw. in der Reduzierung des Parkens in der zweiten Reihe für die Be- und Entladung.

⁵ | Vorschläge dazu siehe Flämig 2015.

03

**Auswirkungen des
automatisierten Fahrens auf
Modal-Split und CO₂-Emissionen**

03

Auswirkungen
des automatisierten
Fahrens auf Modal-
Split und CO₂-
Emissionen

Fahrerlose Fahr-
zeuge ermöglichen
neuen Nutzergrup-
pen, mobil zu sein



Die Einführung des vollautomatisierten Fahrens kann sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr zu Verschiebungen bei der Verkehrsmittelwahl führen. Es ist möglich, dass es aufgrund der neuen Technologie bevorzugt zur Wahl des Pkw im Personenverkehr und des Lkw im Güterverkehr kommt. Aus diesen möglichen modalen Verschiebungen in Verbindung mit neuen Betriebskonzepten können auch klimarelevante Effekte resultieren. Im Folgenden werden die Ursachen und Wirkungen der Verkehrsnachfrageänderungen separat für den Personen- und Güterverkehr für mögliche Entwicklungen beschrieben und quantifiziert.

3.1 Personenverkehr

Die Berechnung der Auswirkungen des vollautomatisierten Fahrens im Personenverkehr erfolgt unter Berücksichtigung der im Folgenden genannten Aspekte in zwei aufeinander aufbauenden Szenarien. Zunächst werden mögliche Auswirkungen auf den Modal-Split und die Fahrleistung im Straßenverkehr aufgrund der Einführung privater⁶ vollautomatisierter Fahrzeuge in den Markt quantifiziert. Im zweiten Schritt werden zusätzlich mögliche Auswirkungen der Einführung eines mit vollautomatisierten Fahrzeugen betriebenen neuen Mobilitätskonzeptes „Vollautomatisiertes Car-Pooling“ (AP) beschrieben. Als Referenzszenario dient die Berechnung der Verkehrsnachfrage für das Jahr 2035 mit der Annahme des Fehlens vollautomatisierter Fahrzeuge.

Infobox

Verkehrsnachfragemodell

Für die Modellierung kommt ein aggregiertes Verkehrsnachfragemodell mit einem vorgelagerten Fahrzeugtechnologie-Diffusionsmodell zum Einsatz. Mithilfe des Diffusionsmodells werden nach Fahrzeugklassen differenziert Durchdringungsraten vollautomatisierter Fahrzeuge für Neuzulassungen und die Flotte bis ins Szenariojahr 2035 errechnet. Das Verkehrsnachfragemodell ist an konventionelle 4-Stufen-Modelle der Verkehrsnachfragemodellierung angelehnt. Es umfasst die Schritte der Verkehrserzeugung, Zielwahl und

Verkehrsverteilung. Die Umlegung in einem Verkehrsnetz mit der Ausgabe von Verkehrsaufkommen je Straßenabschnitt erfolgt nicht. Die Verkehrserzeugung dient der Berücksichtigung der demographischen Bevölkerungsentwicklung bis ins Szenariojahr 2035 (differenziert nach Raumtypen, Altersgruppen und Geschlecht). Die Diffusionsraten der vollautomatisierten Fahrzeuge dienen als Input für die Festlegung von Pkw-Verfügbarkeiten; diese haben Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl.

3.1.1 Neue Nutzergruppen

Fahrerlose Fahrzeuge (Stufe 5) machen es neuen Nutzergruppen möglich, sich automobil fortzubewegen. Hierzu könnten Personen ohne Führerschein, darunter Teenager (bzw. Kinder), sowie mobilitätseingeschränkte Personen und damit verstärkt auch Hochbetagte (Anderson et al., 2016: 16f.) zählen. Diese Nutzungsmöglichkeit wird allerdings erst mithilfe fahrerloser Fahrzeuge (Stufe 5) erreicht, da erst dann zu keinem Zeitpunkt mehr ein Eingriff durch den Fahrenden notwendig ist, das Fahrzeug also in allen Verkehrsbereichen (außerorts, innerorts, Autobahn) fahrerlos fahren kann. Personen, die aufgrund ihres Alters, ihrer verminderten Sehfähigkeit oder anderer Einschränkungen keinen Führerschein zum Steuern konventioneller bis vollautomatisierter (Stufe 4) Fahrzeuge erwerben dürfen, könnten dadurch eine zusätzliche Verkehrsmitteloption erhalten. Offen ist in diesem Zusammenhang, inwiefern zukünftig für derartige Fahrzeuge eine dem Führerschein äquivalente Fahrerlaubnis erworben werden muss („Führungserlaubnis“), welche spezifischen Voraussetzungen dafür erfüllt sein müssen (z. B. eine Altersuntergrenze) und ob neue Nutzergruppen mit Einschränkungen auch schon auf Fahrzeuge mit eingeschränkten vollautomatisierten Funktionen (Stufe 4), z. B. im Stadtverkehr, Zugriff haben können.

3.1.2 Neue Reisezeitbewertung

Vollautomatisierte Fahrzeuge könnten zukünftig die Ausübung anderer Tätigkeiten während der Fahrt ermöglichen. Geschäftsreisende beispielsweise können während einer Autofahrt Termine vorbereiten, Privatpersonen können die Zeit nutzen, um ein Buch zu lesen, einen Film anzuschauen oder sich auszuruhen. Reisende Personen können sich unterhalten, ohne dass einer der Beteiligten parallel dazu der Fahraufgabe nachgehen muss. Die Möglichkeiten der alternativen Nutzung der Fahrzeit wird voraussichtlich mit einer positiveren Bewertung der im Auto verbrachten Zeit zum Ausdruck gebracht (van den Berg/Verhoef 2016). Dadurch würde der Pkw gegenüber anderen Verkehrsmitteln bei der Auswahl des Verkehrsmittels wiederum attraktiver, was in der Folge beispielsweise zu der Bereitschaft, längere Wege zurückzulegen oder auch für kürzere Wege den Pkw zu nutzen, führen könnte.

3.1.3 Neue Anwendungsfälle

Mithilfe fahrerloser Fahrzeuge könnten solche Mobilitätskonzepte stärker Verbreitung finden, bei denen öffentlich zugängliche⁷ Fahrzeuge geteilt werden. Diese Mobilitätskonzepte

könnten die Automobilooption denjenigen neuen Nutzergruppen ermöglichen, die von der Nutzung konventioneller Pkw bisher ausgeschlossen sind und die innerhalb des Haushalts keinen Zugriff auf einen vollautomatisierten Pkw haben. Als Erweiterung konventioneller Fahrzeuge und des konventionellen öffentlichen Nahverkehrs sind Konzepte des vollautomatisierten Car-Sharing und des vollautomatisierten Car-Pooling denkbar. Hemmnisse konventioneller Car-Sharing-Konzepte können überwunden werden, indem die Zuverlässigkeit des Angebots verbessert und die Zugangszeit zum System reduziert werden (Krueger et al., 2016). Gerade im ländlichen Raum werden nichtstationsbasierte Systeme dadurch erst mit einem wirtschaftlichen Betrieb ermöglicht (Lenz und Fraedrich, 2015).

Aus Sicht der Betreiber ermöglicht eine automatisierte Repositionierung der Fahrzeuge eine verbesserte Auslastung und vereinfachte Instandhaltung der Fahrzeuge. Das Laden elektrifizierter Fahrzeuge kann bei automatisierter Durchführung ebenfalls vereinfacht werden. Vollautomatisiertes Car-Sharing nutzt die Eigenschaften eines Taxis, ohne dass dabei Personalkosten für eine Fahrerin/einen Fahrer anfallen. Beim vollautomatisierten Car-Pooling könnten darüber hinaus mehrere Fahrtwünsche mit naheliegenden Start- und Zielorten kombiniert werden. Vollautomatisiertes Car-Pooling könnte auf diese Weise als Ergänzung, aber auch als Alternative zum konventionellen ÖV gesehen werden (Lenz und Fraedrich, 2015). Raum- und zeitabhängig ist es denkbar, dass vollautomatisiertes Car-Pooling für den Betreiber als ergänzendes Angebot neben dem konventionellen ÖV gewinnbringend bei Nutzerpreisen vergleichbar mit jenen des ÖV betrieben werden kann (Burns et al., 2013). Die Prognosen zu den Möglichkeiten derartiger Angebote an neuen Mobilitätskonzepten in der Zukunft, aber auch die Vorhersage der zukünftigen Nachfrage durch die Nutzer unterliegen jedoch Unsicherheiten. Denn die Akzeptanz der Bündelung von Fahrtwünschen in einem System außerhalb des konventionellen ÖV ist unsicher und außerdem sind gesetzliche Anpassungen für das Erlauben von fahrerlosen Leerfahrten notwendig (Gasser, 2015).

Das vollautomatisierte Car-Pooling hat das Potenzial, die Gesamtfahrleistung zu reduzieren, was jedoch nur bei günstigen Gegebenheiten und einer daraus resultierenden starken Bündelungswirkung möglich ist. Dabei würden auf der einen Seite Verlagerungen von Wegen des Umweltverbundes (Fuß, Rad, ÖV) und zusätzliche Leerfahrten und auf der anderen Seite erhöhte Besetzungsgrade auch bei Wechslern vom konventionellen MIV entstehen. Die Umweltauswirkungen neuer Mobi-

6 | „Privat“ schließt hier auch die gewerblichen Fahrzeuge ein; die private und gewerbliche Nutzung ist nicht immer klar abgrenzbar. „Privat“ bezieht sich in diesem Szenario auf die Abgrenzung zu Fahrzeugen von Mobilitätsanbietern, die für Nutzer des Angebots öffentlich zugänglich sind und somit geteilt genutzt werden.

7 | „Öffentlich zugänglich“ schließt in diesem Zusammenhang eine Registrierung zum System ein. Derartige Systeme können jedoch auch Bestandteil einer verkehrsträgerübergreifenden Mobilitätskarte mit einem zentralen Buchungssystem sein.

litätskonzepte hängen darüber hinaus von der Fahrzeugflotte ab. Vollautomatisierte Car-Sharing- und Car-Pooling-Fahrzeuge können bei hohen Auslastungsgraden hohe Tageskilometerfahrleistungen erreichen. Aufgrund der Verlagerung von Fahrten auch von Haltern privater Pkw könnte die Fahrleistung verstärkt hin zu Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien erfolgen und so zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen

beitragen. Wirkungen vollautomatisierten Fahrens auf die Umwelt – insbesondere im Zusammenhang mit der Elektrifizierung von Antrieben – werden des Weiteren in Kapitel 3.3 betrachtet. Abbildung 3.1 stellt die auf den vorherigen Darstellungen aufbauenden Effekte und deren Auswirkungen auf die Fahrleistungsänderung und die Umwelt schematisch als Gegenüberstellung der im Folgenden beschriebenen Szenarien dar.

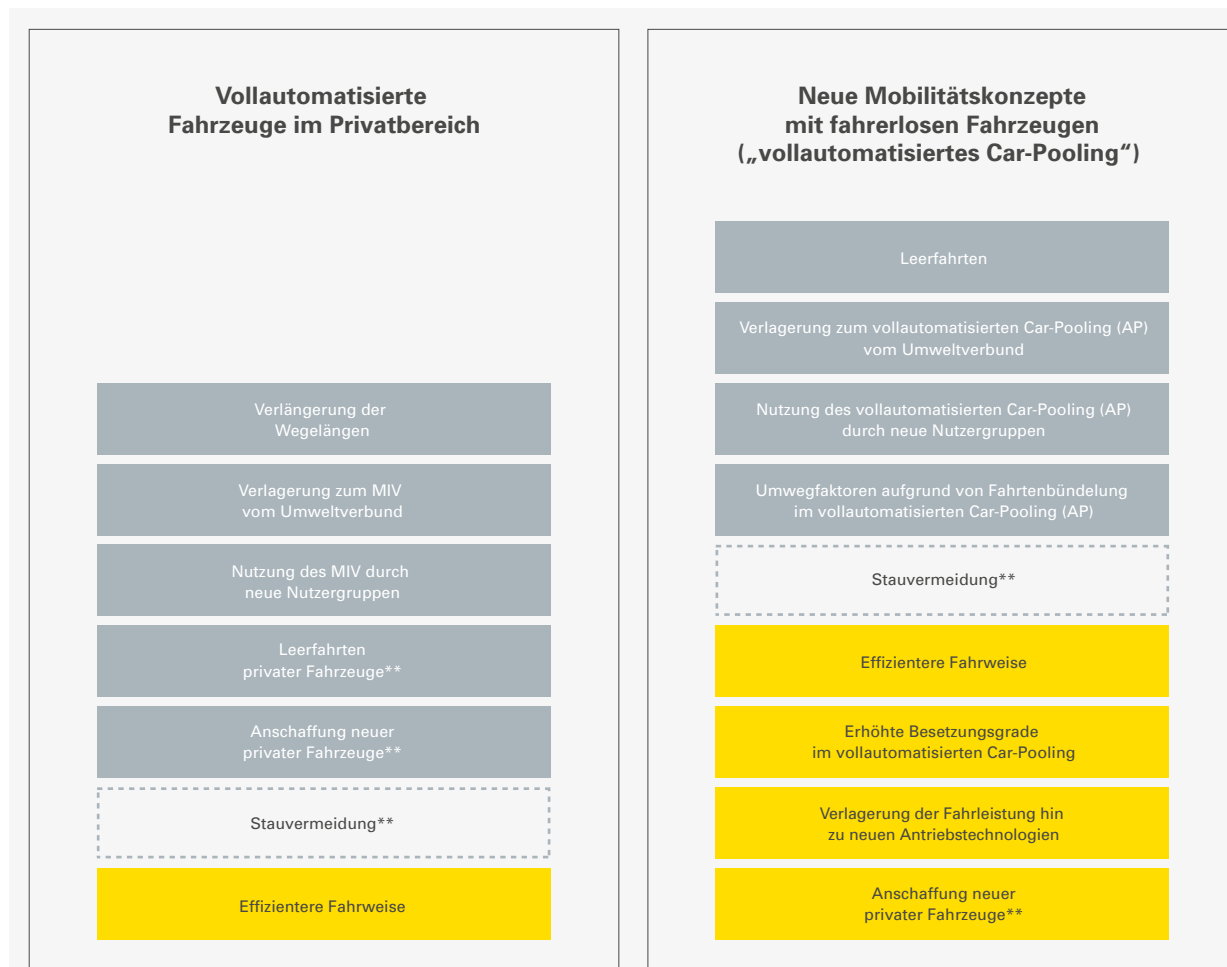


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Auswirkungen auf die Fahrleistung im Straßenverkehr und der daraus resultierenden Umwelteffekte durch die Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge in die Privatflotte und in die Flotte neuer Mobilitätskonzepte

(Grau dargestellte Auswirkungen führen zu einem Anstieg der Fahrleistung und damit verbundenen negativen Umwelteffekten. Gelb dargestellte Auswirkungen führen zu einer Umweltentlastung. Unsichere Auswirkungen sind grau gestrichelt dargestellt. (In den hier vorliegenden Szenarienrechnungen nicht berücksichtigte Effekte sind mit ** markiert.)

3.1.4 Die Szenarien

Innerhalb der nächsten beiden Jahrzehnte werden Fahrzeuge mit Automatisierungstechnologien auf den deutschen Fahrzeugmarkt gelangen und sowohl in der privaten Fahrzeugflotte als auch in Flotten von Mobilitätsanbietern zum Einsatz kommen. Analog zu technologischen Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen in der Vergangenheit könnten solche Fahrzeuge in der Privatflotte zunächst in den oberen Fahrzeugklassen Marktreife erlangen und nach und nach auch in unteren Fahrzeugklassen, durch sinkende Preise für solche Systeme, angeboten werden (Litman, 2014).

Die hier dargestellten Szenarien wurden unter der Annahme eines schnellen Hochlaufs der Technologien für vollautomatisierte Fahrzeuge entwickelt. In den knapp 15 Jahren nach Einführung der Technologie bis zum Szenariojahr 2035 hat diese sich in allen Fahrzeugklassen etabliert. Den Automatisierungstechnologien zugesprochene Sicherheitsgewinne konnten realisiert werden und sowohl der Gesetzgeber als auch Versicherungsunternehmen begünstigen Kauf und Nutzung entsprechender Fahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen. Vormalig befürchtete technologische Probleme mit schwerwiegenden Unfallfolgen sind nicht eingetreten. Der Nutzen der neuen Technologien wird von der Mehrheit als positiv bewertet und hat die Integration in die serienmäßige Produktion beschleunigt. Neue Akteure haben den herkömmlichen Autoherstellern Konkurrenz gemacht und die Marktentwicklungen forciert.

Der aus den Annahmen der Diffusionskurven der neuen Technologie resultierende Marktanteil und die Durchdrin-

gungsrates der Flotte mit vollautomatisierten Fahrzeugen im Szenariojahr 2035 stellen dabei eine progressive Entwicklung dar. Die hier beschriebenen Szenarien bauen im Wesentlichen auf den Annahmen der Szenarien „Technology Breakthrough“ und „Rethinking (Auto)mobility“ des Berichts zum ifmo-Projekt zum Einfluss des vollautomatisierten Fahrens auf die Verkehrsnachfrage auf (Trommer et al., 2016).⁸

Die Einführung von vollautomatisierten Fahrzeugen in die Fahrzeugflotte ist in verschiedenen Formen denkbar. Zum einen in der Privatflotte, zum anderen auch in Flotten von Mobilitätsanbietern mit geteilten Fahrzeugen (sog. „Neue Mobilitätskonzepte“). Zur Abgrenzung der Effekte werden hier zwei aufeinander aufbauende Szenarien beschrieben (vgl. Tabelle 3.1). In Szenario 1 wird die Auswirkung der Diffusion von vollautomatisierten Fahrzeugen für die „private“ Fahrzeugflotte beschrieben. Die Beschränkung auf die Privatflotte ist einer modelltechnischen Einschränkung im Zusammenhang mit rechtlichen Rahmenbedingungen geschuldet: Leerfahrten von vollautomatisierten Fahrzeugen sind in diesem Szenario (noch) nicht zulässig. Szenario 2 baut auf Szenario 1 auf, zusätzlich wird aber ein neues Mobilitätsangebot als Verkehrsmittelalternative mitberücksichtigt: Geteilte vollautomatisierte Fahrzeuge werden dabei in ein vollautomatisiertes Car-Pooling-Konzept eingebracht. Nutzer können für ihren Fahrtwunsch ein Fahrzeug bestellen, das sie dann am Startort abholt und zum gewünschten Zielort bringt. Nachfrageabhängig kommt es zu einer Bündelung von Fahrtwünschen, so dass sich zur selben Zeit in einem Fahrzeug mehrere Nutzer mit unterschiedlichen Start- und Zielorten befinden können.

Szenario 1	Szenario 2
Einführung von vollautomatisierten Fahrzeugen in die Privatflotte ab 2022 (Stufe 4 ab 2022, Stufe 5 ab 2025)	Annahmen entsprechend Szenario 1
Nutzung durch neue Nutzergruppen (z. B. Teenager, Mobilitätseingeschränkte)	Zusätzlich: Einführung eines neuen Mobilitätskonzeptes „Vollautomatisiertes Car-Pooling“ als zusätzliche Verkehrsmittelalternative
Reduktion der Value-of-travel-time-Savings um 25 % ⁹ aufgrund der Verfügbarkeit der Fahrzeit für alternative Tätigkeiten	

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der hier beschriebenen Szenarien des automatisierten Fahrens

⁸ | Abweichungen der hier vorliegenden Ergebnisse der Modellierung zu den Ergebnissen in Trommer et al., 2016 resultieren aus modelltechnischen Weiterentwicklungen und Anpassungen, z. B. in Form einer Berücksichtigung unterschiedlicher Raumtypen.

⁹ | Der Differenzwert von 25 % basiert auf dem Vergleich der Values-of-travel-time-Savings für den ÖV und den MIV. Gucwa (2014) setzt eine Reduktion von 25 % auf Basis des Vergleichs mit der Nutzung von Hochgeschwindigkeitszügen.

Bei den Auswertungen wird der Vergleich zu einem Referenzszenario hergestellt, in dem keine vollautomatisierten Fahrzeuge berücksichtigt werden. Die Diffusion von elektrifizierten Fahrzeugen, die für die Berechnung der CO₂-Emissionen relevant ist, ist im Referenzszenario und den Szenarien 1 und 2 gleich.

3.1.4.1 Fahrzeugdiffusion

Im ersten Modellierungsschritt wird ein Fahrzeugdiffusionsmodell genutzt, um für den Zeitraum bis zum Szenariojahr 2035 Anteile vollautomatisierter Fahrzeuge bei den Neuzulassungen und in der Flotte zu bestimmen. In der hier vorliegenden Modellierung wird aufbauend auf der KBA-Klassifizierung (KBA, n. d.) zwischen den Fahrzeugklassen Klein, Kompaktklasse, Mittelklasse und Oberklasse unterschieden. Das Jahr der Markteinführung für Stufe-4-Fahrzeuge wird dabei nach Fahrzeugklassen differenziert zwischen 2022 und 2025 und für Stufe-5-Fahrzeuge zwischen 2025 und 2028 angenommen. Derartige Einführungszeiträume lassen sich auf Basis von Analysen der Roadmaps von Fahrzeugherstellern und Zulieferern sowie Angaben von Verbänden – wie in Kapitel 1

dargestellt – annehmen (vgl. ERTRAC, 2015; VDA, 2015; EPoSS, 2015; OECD/ITF & CPB, 2015).

Für das Szenariojahr 2035 ergibt sich bei den Neuzulassungen ein Anteil von rund 80 % vollautomatisierter Fahrzeuge (vgl. Abbildung 3.2). Bezogen auf die Gesamtflotte führt dies zu einer Durchdringungsrate von gut 40 % vollautomatisierter Fahrzeuge im Jahr 2035, wobei sich die Durchdringungsrate zwischen den Fahrzeugklassen deutlich unterscheiden. Bei den kleinen Fahrzeugen liegt der Anteil vollautomatisierter Fahrzeuge bei etwa 30 %, bei den Oberklassefahrzeugen dagegen bei etwa 65 %.

3.1.4.2 Szenario 1: „Privatflotte“

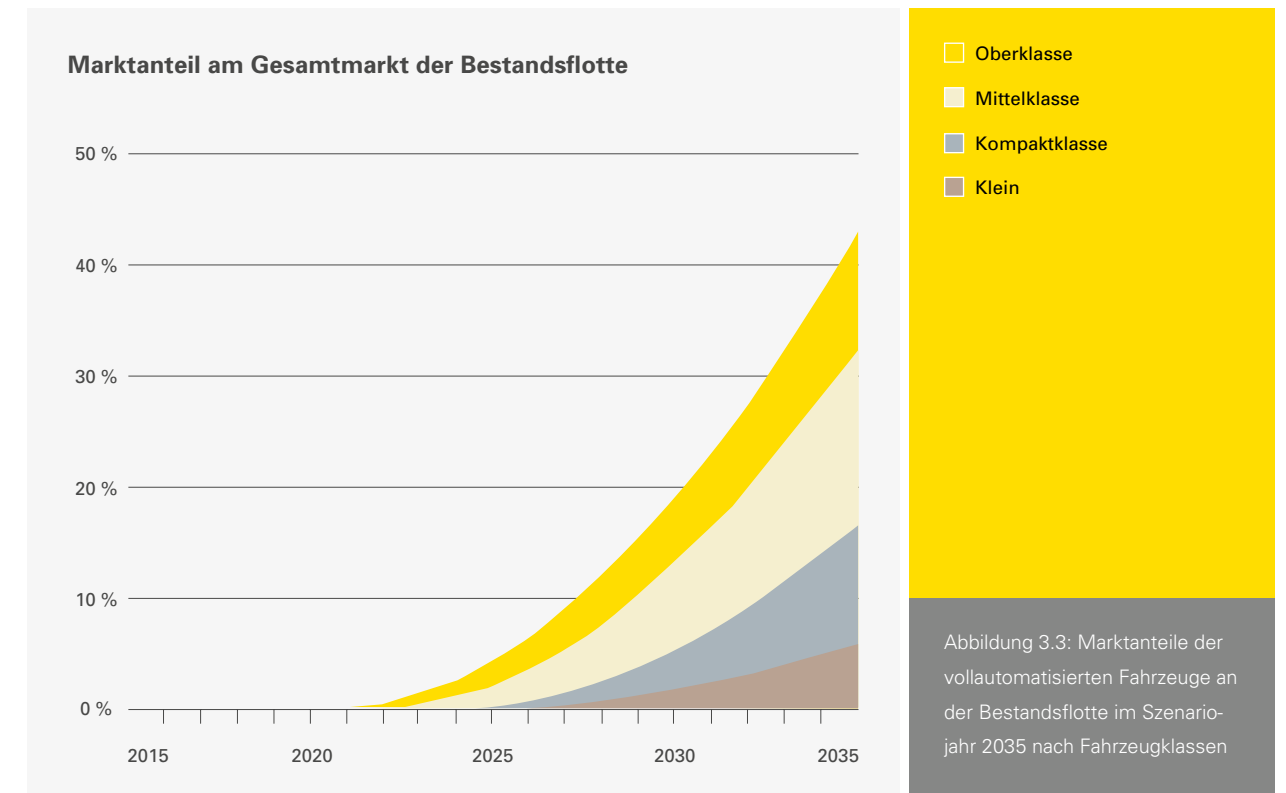
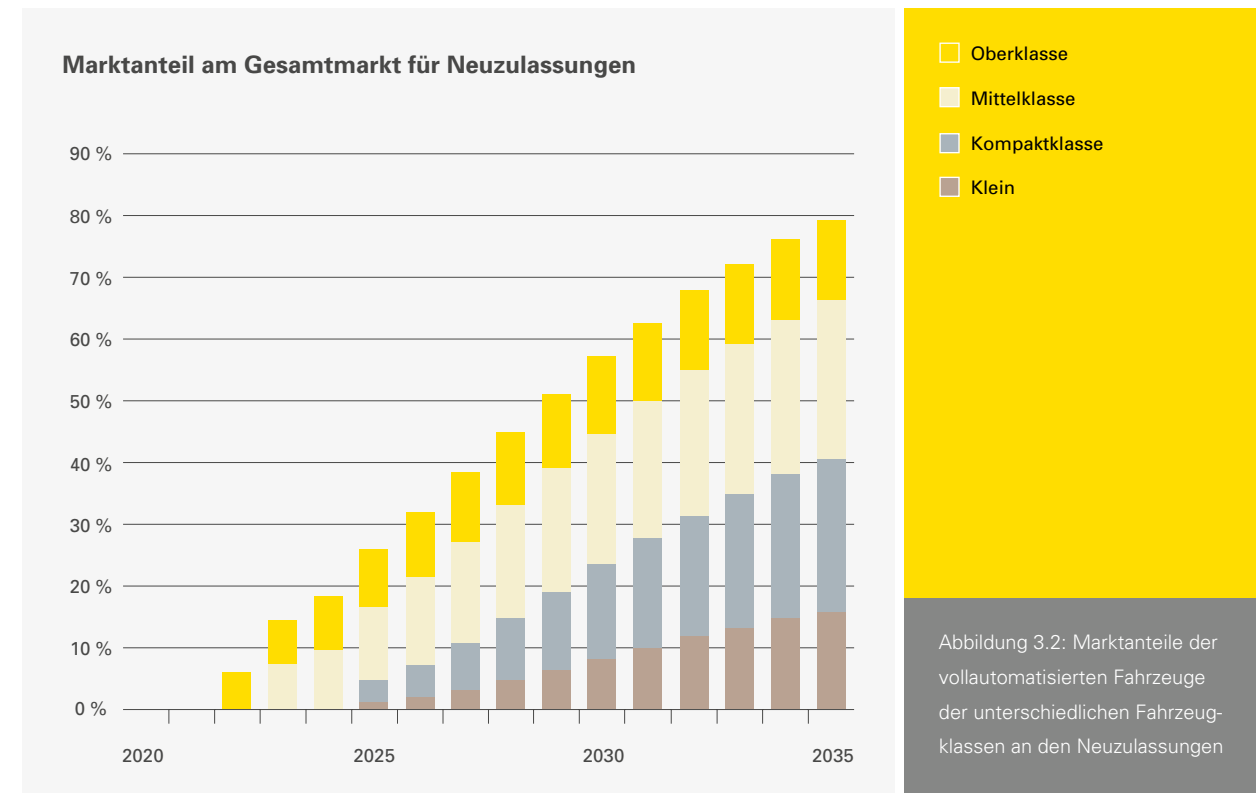
Die Durchdringung der privaten Pkw-Flotte mit vollautomatisierten Fahrzeugen führt unter den hier gesetzten Annahmen zu einem Anstieg der Fahrleistung im Straßenverkehr um etwa 10 %. Der Anstieg ist in städtischen Räumen mit etwa 12 % stärker als in suburbanen und ländlichen Räumen mit etwa 11 % bzw. 8 % (vgl. Abbildung 3.3). Dieser Anstieg setzt sich zusammen aus den modalen Verlagerungen (insbe-

sondere aufgrund neuer Nutzer wie Jugendlicher, Menschen mit körperlichen Einschränkungen und Hochbetagten) sowie einer veränderten Distanzwahl, also des Hinnehmens längerer Wege. Der relative Anstieg des Modal-Split-Anteils bezogen auf den Wahlanteil im Referenzszenario als MIV-Fahrer beträgt etwa 4 %, wobei auch hier der Anstieg im urbanen und suburbanen Raum höher ist als im ländlichen Raum. Vollautomatisiertes Fahren erwirkt modale Verlagerungen von allen anderen Verkehrsmitteln. Die stärksten Verschiebungen erfolgen dabei vom ÖV. Der relative Rückgang der Nachfrage des ÖV liegt bei etwa 8 %, die Reduktion des nichtmotorisierten Verkehrs liegt bei etwa 2–5 % (vgl. Abbildung 3.4).

Im städtischen Bereich ist das Ausgangsniveau des Verkehrsmittelanteils des MIV am geringsten, zugleich sind die zurückgelegten Entfernungen im Durchschnitt am niedrigsten. Die Vorteile der Automatisierung schlagen hier stärker durch. Weitere Aspekte, die zu einem Anstieg der Fahrleistung führen können, im städtischen Bereich aber einen geringeren Einfluss aufweisen, sind zum einen ein erhöhter Anteil neu zu mobilisierender Bevölkerungsgruppen sowie die Flottenanteile von Fahrzeugklassen mit höheren Durchdringungsrate. Zeitkos-

ten gehen zur Bewertung einer Verkehrsmittelwahlalternative in die generalisierten Kosten ein, die im Verkehrsmittelwahlmodell berücksichtigt werden. Die Zeitkostenvorteile des vollautomatisierten Fahrens wirken bei längeren Wegen stärker als bei kürzeren Wegen, bei kurzen Wegen können keine alternativen Tätigkeiten ausgeübt werden. Der ÖPNV wird insbesondere von Nutzern ohne Pkw-Verfügbarkeit in Anspruch genommen, allerdings aufgrund der Zugangswege und Bedienfrequenzen vermindert bei den kurzen Wegen (bei sehr kurzen Wegen ist der Anteil des NMIV besonders hoch). Die Verlagerung vom ÖPNV ist daher insgesamt stärker als die vom nichtmotorisierten Verkehr.

Bei sehr kurzen Wegen kommt es verstärkt zu einer Verlagerung von den nichtmotorisierten Verkehrsmitteln. Es wurde hier eine leichte Reduktion der MIV-Zu- und Abgangszeiten bei vollautomatisierten Fahrzeugen angenommen, die Zu- und Abgangszeit zum Fahrzeug kann im Nahbereich ein wesentliches Hemmnis gegenüber den nichtmotorisierten Fahrzeugen darstellen. Der Einfluss der Automatisierung auf die Zugangszeit zum MIV hat daher einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsmittelwechsel von den nichtmotorisierten Verkehrsmitteln im Nahbereich.



Relativer Anstieg der Fahrleistung

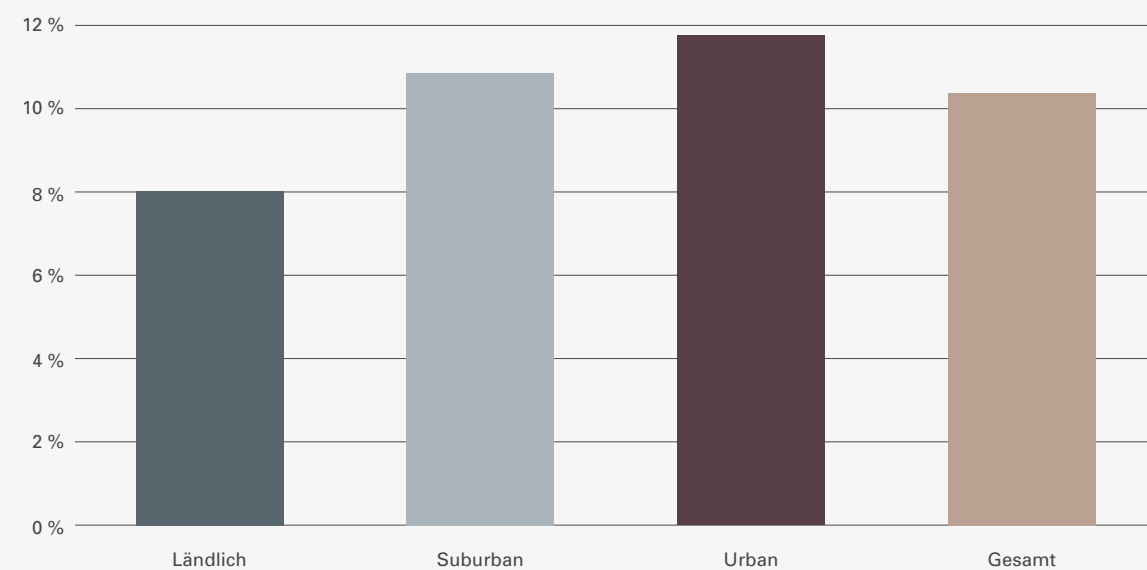


Abbildung 3.4: Relativer Anstieg der Fahrleistung auf der Straße in Szenario 1

Relative Veränderung der Modal-Split-Werte

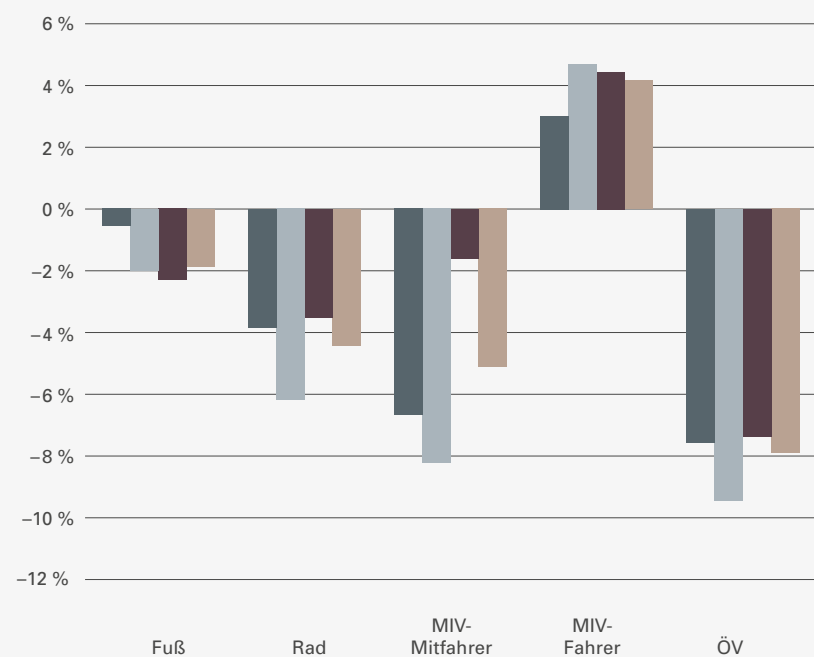


Abbildung 3.5: Relative Veränderung der Modal-Split-Werte (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) in Szenario 1 gegenüber einem Szenario ohne vollautomatisierte Fahrzeuge

3.1.4.3 Szenario 2: „Neue Mobilitätskonzepte“

In der hier durchgeführten Szenariorechnung für das Jahr 2035 wurde die Einführung eines vollautomatisierten Car-Pooling-Systems mit räumlich differenzierten distanzbasierten Nutzerpreisen angenommen. Der Nutzerpreis reicht dabei von 0,15 € je Nutzerkilometer im urbanen Raum über 0,25 € je Nutzerkilometer im suburbanen Raum bis zu 0,35 € je Nutzerkilometer im ländlichen Raum. Auch die Flottendichte unterscheidet sich zwischen den Raumtypen, im städtischen Raum beträgt sie vier vollautomatisierte Pooling-Fahrzeuge je 1.000 Einwohner, im suburbanen Raum 3,5 Fahrzeuge je 1.000 Einwohner und im ländlichen Raum 2,5 Fahrzeuge je 1.000 Einwohner.¹⁰ Die unterschiedlichen Angebote stellen in den Raumtypen unter den gegebenen Annahmen¹¹ eine ergänzende Alternative zum konventionellen ÖV dar. Die Operateure können dieses Angebot jeweils an der Gewinnschwelle betreiben. Gründe für unterschiedliche Angebotsparameter bei den Kosten und der Fahrzeugverfügbarkeit liegen im Wesentlichen in der Bevölkerungsdichte, daraus resultierend in der Häufigkeit der Überlagerung von Fahrtwünschen und des Auftretens von Betreiber-Leerfahrten sowie zusätzlich in der unterschiedlichen Ausstattung mit privaten Pkw und Unterschieden im ÖV-Angebot nach Raumtypen bzgl. Taktfrequenzen und des Linienangebots.

In diesem Szenario werden die vollautomatisierten Fahrzeuge der Flotte als fahrerlose Fahrzeuge (Stufe 5) angenommen, betriebsbedingte Leerfahrten werden zugelassen. Im Modell werden die Bündelung von Fahrten und damit verbundene Umwege sowie Wartezeiten in Abhängigkeit von der Nutzungshäufigkeit und Flottendichte abgebildet. Betriebsbedingte Leerfahrten werden bei der Fahrzeugverfügbarkeit ebenfalls berücksichtigt. Die hier dargestellten Angebotskombinationen können als zusätzliche Verkehrsmittelalternative unter den gegebenen Angebotsbedingungen an der Gewinnschwelle betrieben werden. Ohne preispolitische Eingriffe sind räumlich differenzierte Preismodelle zukünftig denkbar.

Die Einführung neuer Mobilitätskonzepte weist im urbanen Raum ein stärkeres Verlagerungspotenzial auf als im suburbanen und ländlichen Raum. Dies lässt sich zum einen mit der verminderten Ausstattung mit privaten Pkw und zum anderen mit den möglichen Angebotskonzepten erklären. Der Modal-Split-Anteil der neuen Verkehrsmittelalternative im urbanen Raum erreicht etwa 10 %, im ländlichen und suburbanen Raum dagegen nur 3 % bzw. 4 % (vgl. Abbildung 3.5). Die Bündelung aufgrund der gleichzeitigen Nachfrage auf Einzelrelationen und die damit verbundene Kostenersparnis führen aufgrund der

Siedlungsdichte im urbanen Raum zu deutlich verbesserten Angebotsbedingungen gegenüber dem ländlichen und suburbanen Raum.

Neue vollautomatisierte Mobilitätskonzepte erzeugen Verkehrsmittelwechsel von allen Verkehrsmitteln aus. Dies schließt insbesondere auch Wechsel vom Privat-Pkw zum Car-Pooling ein. In diesem Szenario ist wiederum die Wechselrate mit einer Reduktion der ÖV-Wege um 10–20 % in Bezug auf das Szenario 1 am höchsten, auch aufgrund der ähnlichen Systemeigenschaften bzgl. Fahrtzeiten und -kosten (vgl. Abbildung 3.6).¹² Derartige Systeme stellen über die Neunutzergenerierung in Szenario 1 hinaus eine neue automobilen Mobilitätsoption für Verkehrsteilnehmer dar, die nicht Nutzer konventioneller Fahrzeuge sind und in deren Haushalt kein vollautomatisiertes Fahrzeug angeschafft wird.

Die Einführung des vollautomatisierten Car-Pooling führt unter den gegebenen Annahmen zu einem leichten zusätzlichen Anstieg der Fahrleistung auf der Straße gegenüber Szenario 1, wobei die Fahrleistung der privaten Pkw gegenüber Szenario 1 abnimmt. Der zusätzliche Anstieg der Fahrleistung beträgt etwa 1 %, bezogen auf das Referenzszenario ohne vollautomatisierte Fahrzeuge, was zu einem Gesamtanstieg von etwa 11 % führt (vgl. Abbildung 3.8). Im urbanen Raum kommt es zu einem minimalen Rückgang von 0,2 % gegenüber Szenario 1, was bedeutet, dass der Rückgang der in Privatfahrzeugen zurückgelegten Fahrzeugkilometer größer ist als die zusätzlichen Fahrzeugkilometer der Car-Pooling-Fahrzeuge (vgl. Abbildung 3.7). Dies ist aber nur bei hohen Besetzungsgraden zu erreichen.

Im ländlichen und suburbanen Raum weisen derartige neue Mobilitätskonzepte das Potenzial auf, in den konventionellen ÖV integriert zu werden und damit ein neuartiges, effizientes und besonders attraktives Angebot zu schaffen. Im städtischen Raum deutet einiges darauf hin, dass Akteure gewinnbringende Angebote auf den Markt bringen könnten, die aus Sicht der Nutzer Alternativen zum konventionellen ÖV darstellen. Die Auswirkungen eines solchen Angebots auf das Verkehrssystem gerade für Zeiträume mit hohen Verkehrsbelastungen („Peak-Hours“) bedarf detaillierter Untersuchungen.

¹⁰ | Daraus ergibt sich eine Fahrzeugflotte in Deutschland von rund 300.000 Fahrzeugen.

¹¹ | Annahme dieses Szenarios ist die Fahrzeuggröße eines Klein- bis Mittelklassewagens. Die Besetzungszahl hat Einfluss auf die Angebotsparameter (z. B. Wartezeit auf andere Fahrgäste und Umwegfaktoren), die Fahrzeuggröße wird von der tageszeitlichen Nachfrageschwankung beeinflusst.

¹² | Aus modellierungstechnischen Gründen wurde der Anteil der MIV-Mitfahrer hier fixiert. Die Verkehrsmittelwahl MIV-Mitfahrer ist daher auch die Mitfahrt bei einem Nutzer des vollautomatisierten Car-Poolings mit einer gemeinsamen Buchung. Schon heute erlauben Anbieter wie Uber oder Lyft die Mitnahme einer weiteren Person bei gleicher Start- und Zielwahl ohne Aufpreis in den jeweiligen Pooling-Konzepten „UberPOOL“ und „Lyft Line“ (vgl. Uber, 2016; Lyft, 2016).

Modal-Split-Anteil des vollautomatisierten Car-Poolings

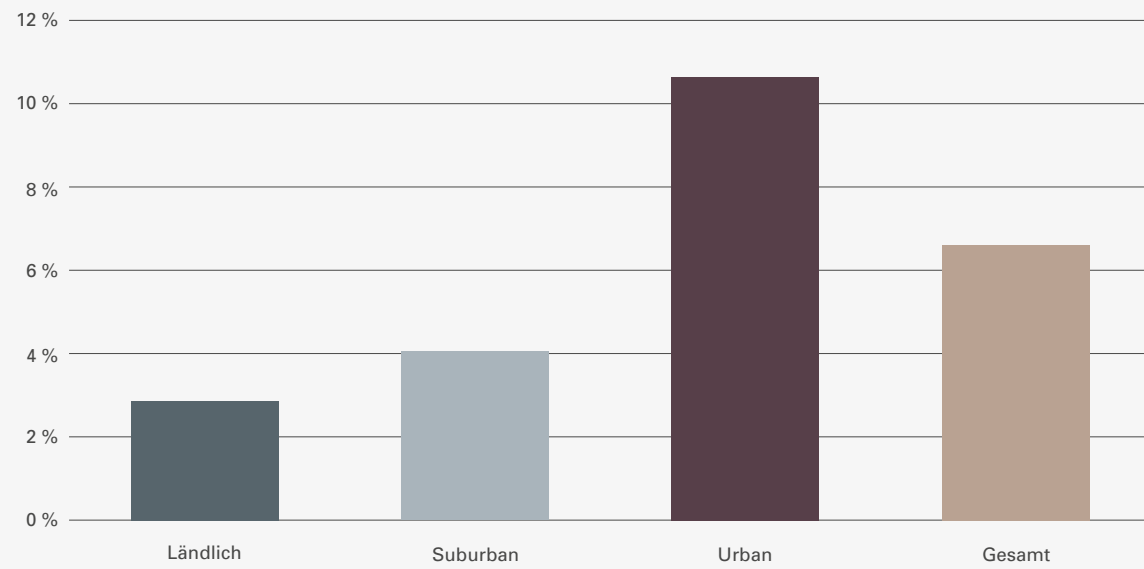


Abbildung 3.6: Modal-Split-Anteile (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) des vollautomatisierten Car-Poolings

Relativer Anstieg der Fahrleistung

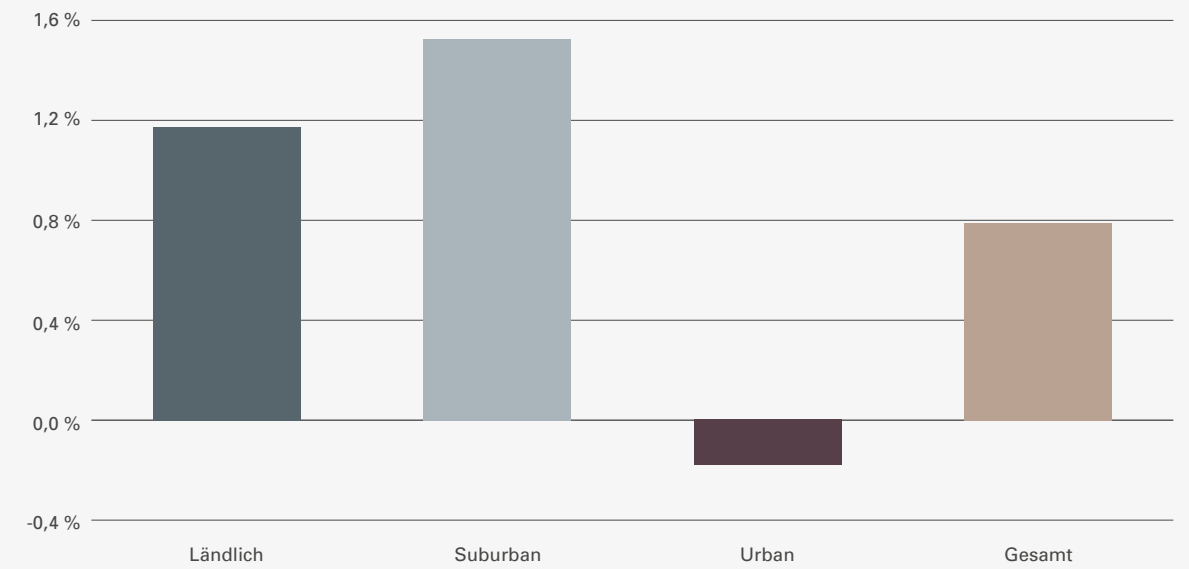
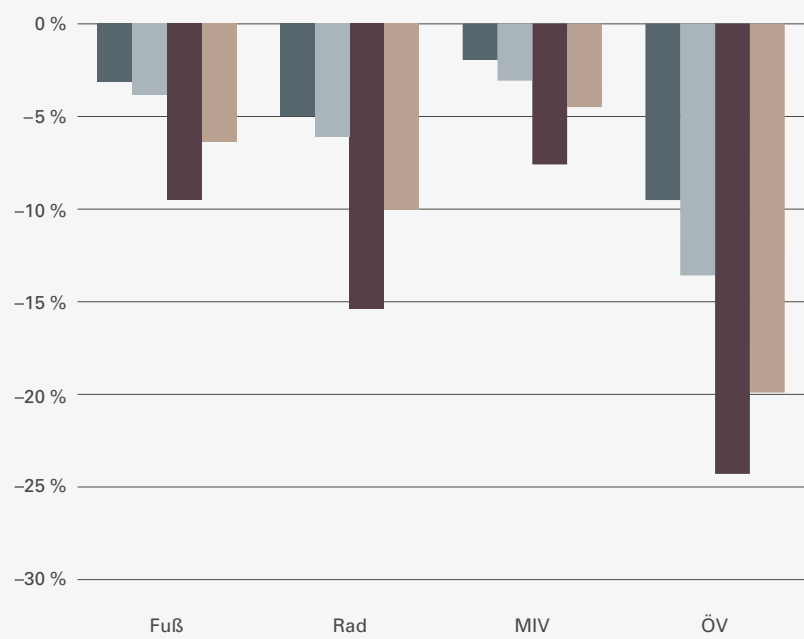


Abbildung 3.8: Relativer Anstieg der Fahrleistung auf der Straße in Szenario 2 gegenüber Szenario 1

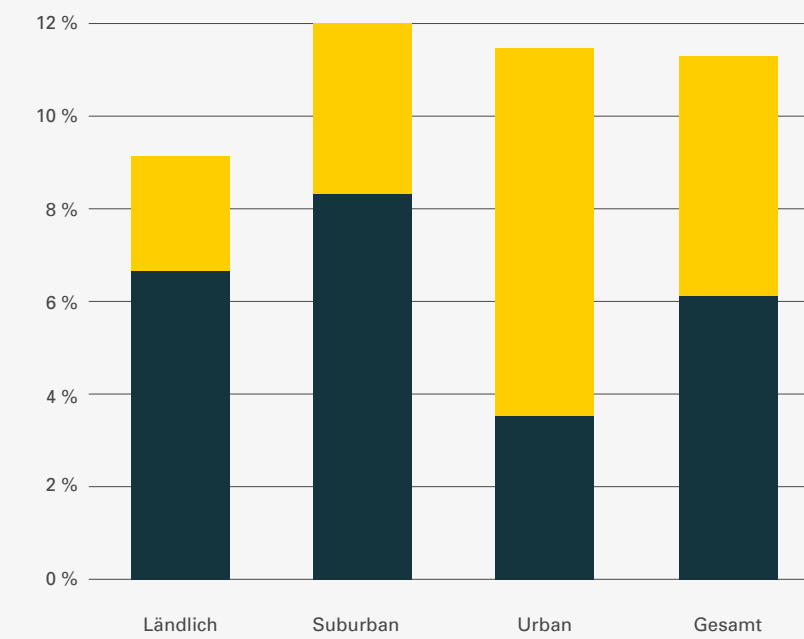
Relative Veränderung der Modal-Split-Werte



- Ländlich
- Suburban
- Urban
- Gesamt

Abbildung 3.7: Relative Veränderung der Modal-Split-Werte (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) in Szenario 2 gegenüber Szenario 1

Relativer Anstieg der Fahrleistung



- Anstieg durch vollautomatisiertes Car-Pooling
- Anstieg durch konventionellen MIV

Abbildung 3.9: Relativer Anstieg der Fahrleistung auf der Straße in Szenario 2

3.2 Güterverkehr

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.2 betrachteten Wirkungen – insbesondere im Hinblick auf die Effizienz und mögliche Kosteneinsparungen – ist davon auszugehen, dass eine Automatisierung des Straßengüterverkehrs vor allem negative Auswirkungen auf den Schienengüterverkehr haben wird. Bei den Güterverkehren auf den Binnenwasserstraßen – zu nennen ist dabei insbesondere das Rheinsystem – handelt es sich zum Großteil um Massengüter- und um langsame Hafen-Hinterland-Verkehre, die nur in geringer Konkurrenz mit dem Lkw stehen. Um den Effekt automatisierter Lkw auf den Schienengüterverkehr abzuschätzen, werden im folgenden drei Szenarien formuliert, mit deren Hilfe die Bandbreite möglicher Verlagerungseffekte ausgelotet werden kann. In allen Szenarien wurde angenommen, dass die Transporttarife auf der Straße im Jahr 2035 um 30 % bezogen auf das heutige Preisniveau sinken werden (siehe dazu Kapitel 2.2.1). Dieser Tarifrückgang basiert auf dem durch die Automation bedingten Wegfall des Fahrers und auf erweiterten Möglichkeiten der Tourenplanung mit der Folge geringerer Kapitalkosten für die Fahrzeugvorhaltung.

- In Szenario 1 („Kostenreduzierung Lkw“) wird von kurzfristigen Reaktionen ausgegangen. Kurzfristig bedeutet dies, dass Firmen, die sowohl Lkw als auch Güterzüge nutzen, vermehrt die Straße verwenden, ohne dass sie dafür organisatorische Umstellungen leisten müssen.
- Szenario 2 („Anpassung Logistikprozesse Lkw“) geht von mittelfristigen Reaktionen aus. Das bedeutet, dass Transportsysteme und Logistikprozesse konsequent auf die Möglichkeiten automatisierter Lkw umgestellt werden. In diesem Szenario geben viele Verloader ihren Schienenanschluss auf.
- Szenario 3 („Leistungsreduzierung Schiene“) geht davon aus, dass die Eisenbahnverkehrsunternehmen aufgrund des Nachfragerückgangs ihre Leistungen einschränken. Dies beinhaltet die Aufgabe der Bedienung bestimmter Regionen und eine Reduzierung der Abfahrtsfrequenz, um angesichts geringerer Transportvolumina immer noch volle Züge fahren zu lassen.

Die drei Szenarien wurden mit Hilfe des Modells von Liedtke und Sonntag berechnet.¹³ Es handelt sich um ein strategisches Verkehrsmittelwahlmodell zur Analyse der Auswirkungen kostensteigernder und -senkender politischer Maßnahmen und technologischer Entwicklungen auf Straße und Schiene, das im

Wesentlichen auf den gleichen Verhaltensmodellen, wie sie in der Projektbewertung der Bundesverkehrswegeplanung verwendet werden, beruht (BVU, TNS Infratest, KIT, 2014). Das Modell wurde um ein Modul ergänzt, das die Angebotsgestaltung in Abhängigkeit von der Transportnachfrage auf der Schiene so lange variiert, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Die Modellergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Transportleistung bezieht sich auf das Staatsgebiet der Bundesrepublik Deutschland.

Die Modellergebnisse zeigen generell einen Rückgang in der Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs bei der Umsetzung eines automatisierten Straßengüterverkehrs unter den getroffenen Annahmen (siehe Abbildung 3.9). Insgesamt reduziert sich die Verkehrsleistung kurzfristig auf der Schiene um 16 %. Folgen auf diesen kurzfristigen Effekt Anpassungen der Logistikorganisation von Unternehmen und Leistungsreduzierungen des Angebots im Bereich des Schienengüterverkehrs, ist langfristig ein Rückgang der Verkehrsleistung auf der Schiene von bis zu 55 % zu erwarten. Die Höhe der Rückgänge der Verkehrsleistung auf der Schiene bezieht sich daher auf die jeweiligen Anpassungsreaktionen der Marktakteure.

Der Schienengüterverkehr kann in verschiedene Teilmärkte aufgliedert werden. Da der automatisierte Straßengüterfernverkehr sich auf die einzelnen Teilmärkte unterschiedlich auswirken kann, wurde der Rückgang in der Verkehrsleistung zusätzlich separat für jeden Teilmarkt ausgegeben. Die Teilmärkte des Schienengüterverkehrs sind der kombinierte Verkehr und der konventionelle Schienengüterverkehr. Beide Teilmärkte lassen sich in weitere Segmente untergliedern. Beim kombinierten Verkehr handelt es sich zum einen um den Zu- und Ablauf von Seecontainern zwischen den Seehäfen und Umschlagsanlagen des kombinierten Verkehrs im Hinterland („Maritimer kombinierter Verkehr“). Zum anderen handelt es sich um internationale Verkehre mit Wechselbrücken jeglicher Art zwischen deutschen Terminals und Anlagen im europäischen Ausland. Zusätzlich zu den europäischen Verkehren gibt es momentan zunehmende Transportbeziehungen mit Asien wie z. B. auf der Relation zwischen Duisburg und China. Sie werden unter dem Teilmarkt „Kontinentaler kombinierter Verkehr“ zusammengefasst. Der konventionelle Schienengüterverkehr besteht vereinfacht aus zwei Segmenten – dem Einzelwagenladungsverkehr und dem Ganzzugverkehr. Beim Einzelwagenverkehr handelt es sich um einzelne Waggons oder Gruppen von Waggons, die an Rangierbahnhöfen zu längeren Zügen zusammengestellt

Relativer Rückgang der Verkehrsleistung der Schiene

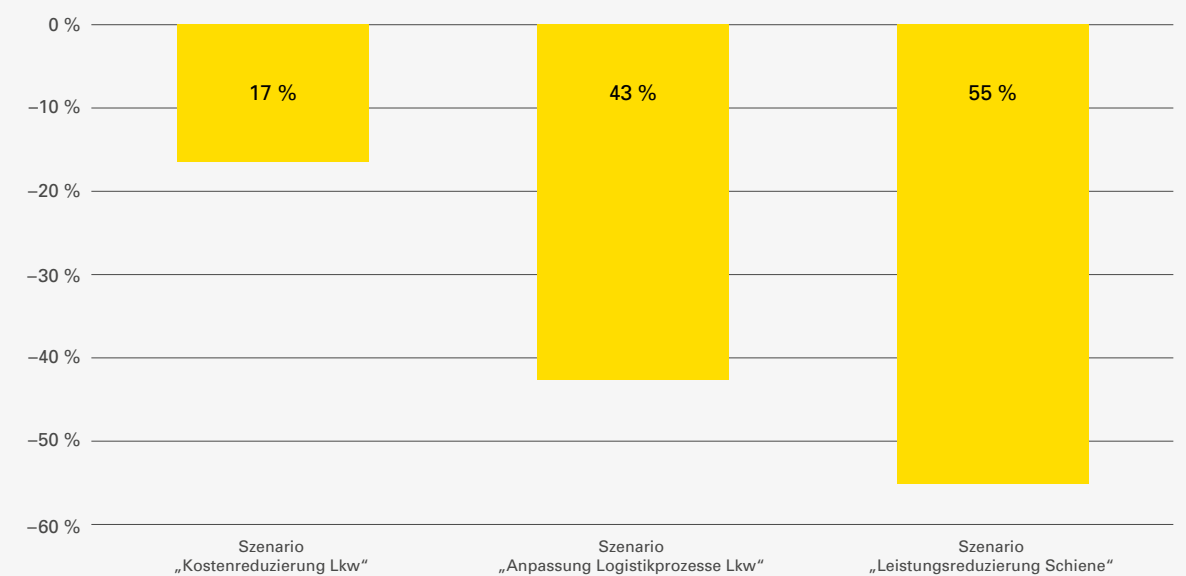


Abbildung 3.10: Relativer Rückgang der Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs unter den drei Umsetzungsszenarien des automatisierten Straßengüterverkehrs für das Jahr 2035 im Vergleich zu 2010

werden und in der Zielregion wieder vereinzelt werden. Der Ganzzugverkehr speist sich vor allem aus Massenguttransporten (Kohle, Getreide, Stahlbarren), während der Einzelwagenverkehr auch höherwertige Transportgüter umfasst.

Die Modellrechnungen ermöglichen es, segmentfein die Auswirkungen eines automatisierten Straßengüterverkehrs und die dadurch möglichen Kosteneinsparungen ausgeben zu lassen (siehe Abbildung 3.10). Im Szenario „Kostenreduzierung Lkw“ kann sowohl im Maritimen als auch im Kontinentalen kombinierten Verkehr mit einem Rückgang der Transportnachfrage auf der Schiene von 16 % gerechnet werden. Unter den Annahmen des Szenarios der „Anpassung der Logistikprozesse Lkw“ zeichnet sich sogar ein Rückgang von knapp 51 % ab. Unter Berücksichtigung von Angebotseinstellungen und Frequenzreduktionen (langfristige Wirkungen des Szenarios „Leistungsreduzierung Schiene“) kann damit gerechnet werden, dass der Rückgang der Transportleistung auf der Schiene in beiden kombinierten Verkehren ca. 61 % betragen wird. Besonders negativ betroffen sind Verkehre mit kleineren intermodalen Terminals.

Im Bereich des konventionellen Schienengüterverkehrs ist unter Berücksichtigung des kurzfristigen Effektes mit einem

Rückgang der Transportleistung um 6 % beim Ganzzugverkehr sowie 31 % beim Einzelwagenverkehr auszugehen (Szenario 1, „Kostenreduzierung Lkw“). Mittelfristig steigert sich aufgrund von Anpassungen in den Logistikprozessen der Rückgang des Einzelwagenverkehrs auf knapp über 70 %. Dieser Rückgang führt unter Berücksichtigung von Angebotsreduktionen im Schienengüterverkehr sogar zu einem kompletten Rückzug der Güterbahnen aus diesem Marktsegment (Szenario „Leistungsreduzierung Schiene“). Es zeigt sich somit in den Szenarien, dass im Bereich des Schienengüterverkehrs der Einzelwagenverkehr am stärksten von einer Automatisierung des Straßengüterverkehrs betroffen wäre. Das liegt nahe, da im Einzelwagenverkehr einzelne Wagen durch Kunden beladen werden (FIS, 2016). Teilladungen können eher auf die Straße verlagert werden als Ganzzugverkehre, die sich aufgrund der Sendungsgröße dafür weniger eignen. Daher sind Ganzzugverkehre deutlich weniger von der Automatisierung der Straße betroffen, und Angebotsreduktionen spielen hier kaum eine Rolle. Der maximale Rückgang liegt hier bei 13 %. Zudem entstehen im Einzelwagenverkehr aufgrund von Zugbildungsprozessen zusätzliche Kosten, die beim Ganzzugverkehr wegfallen. Der Einzelwagenverkehr ist damit sensibler gegenüber einer Kostensenkung des Straßengüterverkehrs, wie sie hier angenommen wurde.

¹³ Vgl. http://www.dvz.de/fileadmin/user_upload/pdf/studie-verlagerung-riesen-lkw-th-wildau-tu-berlin.pdf

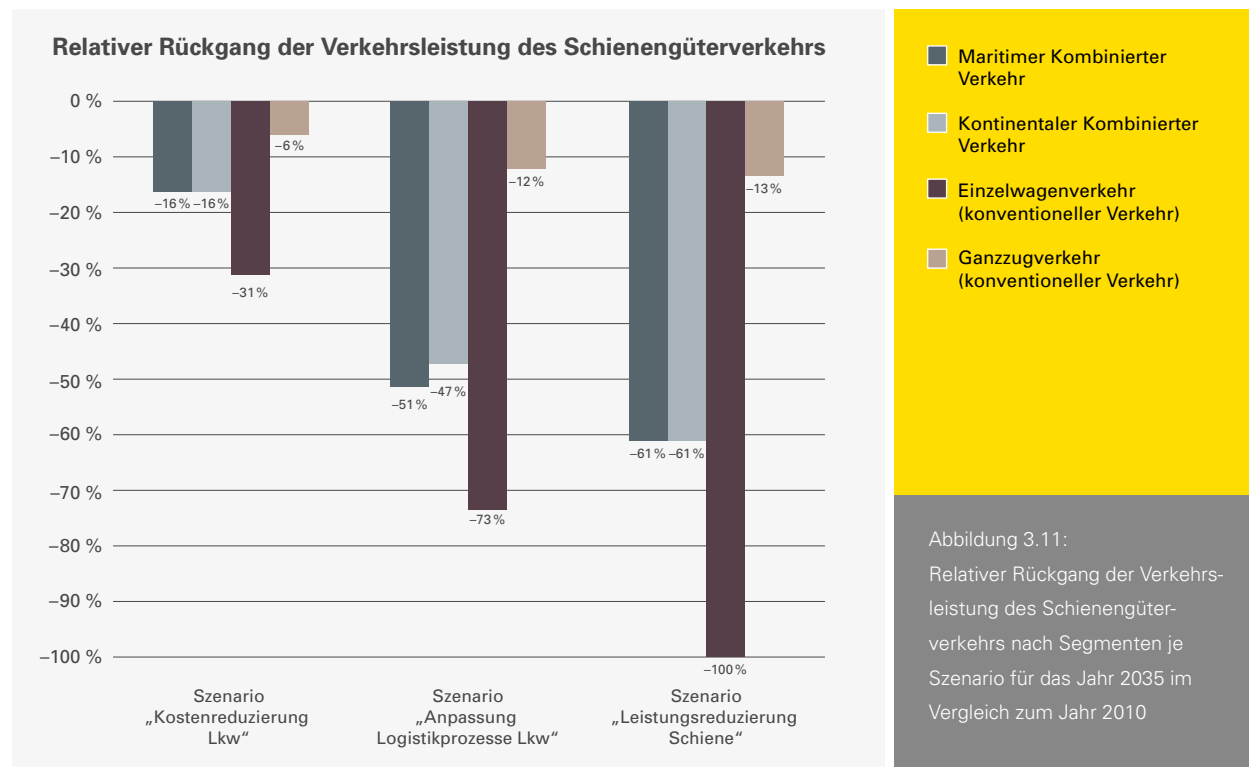


Abbildung 3.11: Relativer Rückgang der Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs nach Segmenten je Szenario für das Jahr 2035 im Vergleich zum Jahr 2010

In der Verkehrsprognose 2030 wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsleistung auf der Straße bis ins Jahr 2030 um 39 % im Vergleich zum Stand 2010 steigt (BMVI, 2014). Die Einführung der Automatisierung des Straßengüterverkehrs ist in dieser Prognose nicht berücksichtigt, kann aber umfangreiche Auswirkungen auf den Modal-Split des Güterverkehrs haben. Wie aufgezeigt, wäre davon vor allem der Schienengüterverkehr betroffen. Zu dem bereits prognostizierten Anstieg des Straßengüterverkehrs ist unter den hier getroffenen Annahmen bei einer Automatisierung des Straßengüterverkehrs und der damit verbundenen Senkung der Transportkosten um 30 % mit einem weiteren Anstieg der Verkehrsleistung auf der Straße zu rechnen.

3.3 Automatisierung und Elektromobilität: Wirkungen auf Emissionen

Die Ausstattung der privaten Fahrzeugflotte mit vollautomatisierten Fahrzeugen führt mit hoher Wahrscheinlichkeit, das zeigen die Ausführungen und Berechnungen, zu einem Anstieg der Fahrleistung auf der Straße. Die Implementierung neuer Mobilitätskonzepte mit vollautomatisierten Fahrzeugen kann – je nach Raumtyp – zu einer zusätzlichen Nachfra-

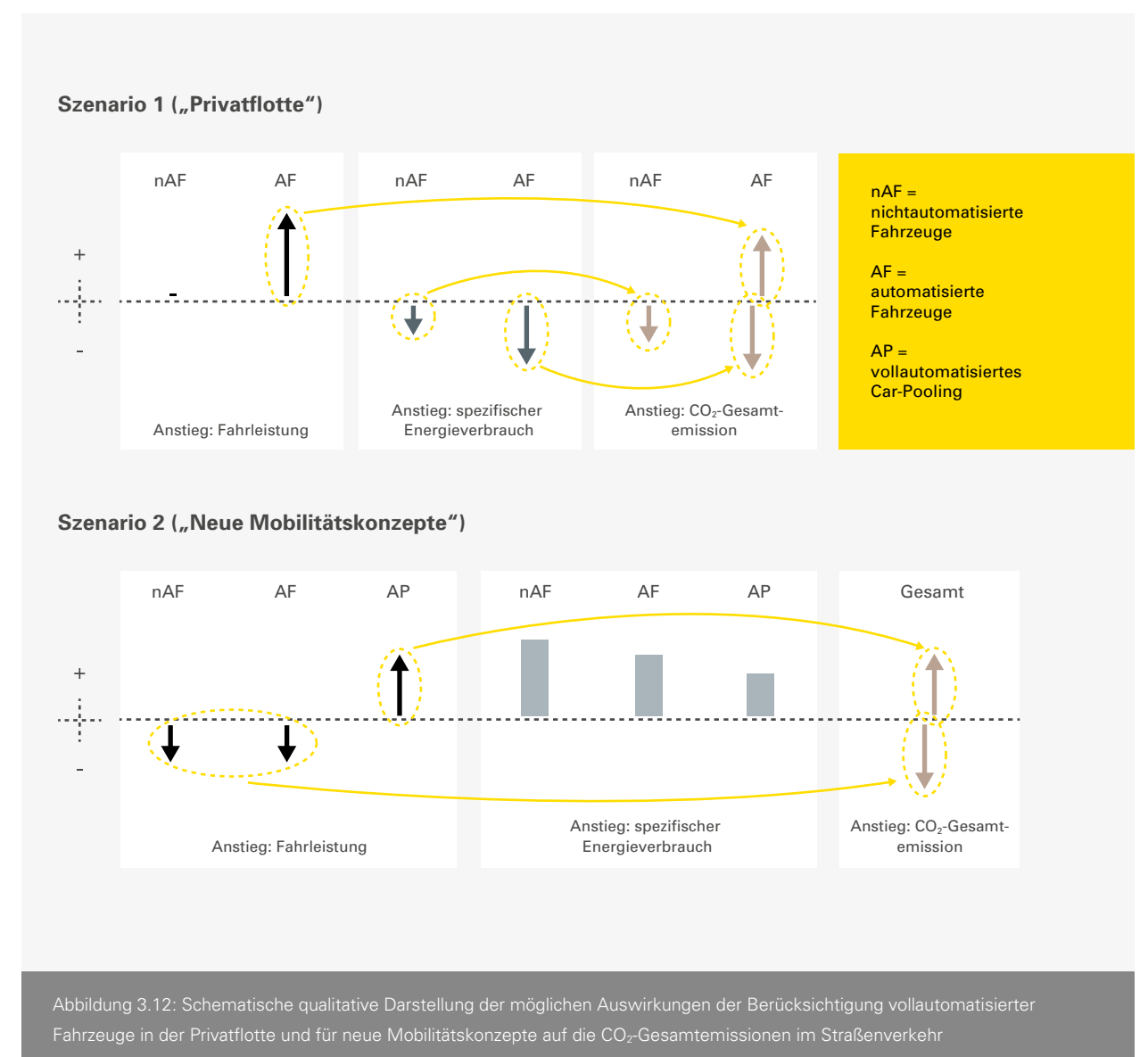
ge bzw. leichten Reduktion führen, verglichen mit dem Szenario mit privaten vollautomatisierten Fahrzeugen. Insgesamt ist jedoch unter den hier getroffenen Annahmen in allen Raumtypen mit einem Anstieg der Fahrleistung im Vergleich zum Referenzszenario ohne vollautomatisierte Fahrzeuge zu rechnen.

Eine mögliche Folge der steigenden Fahrleistung ist ein proportionaler Anstieg der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen.¹⁴ Dies ist jedoch von den tatsächlich realisierten Wirkungen autonomer Fahrzeugtechnologien auf den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch sowie bei höheren Durchdringungsraten auf die Verkehrseffizienz abhängig. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, können eine effizientere Fahrweise der vollautomatisierten Fahrzeuge sowie ein Rückgang der Verkehrsstaus (aufgrund der erhöhten Kapazität, des verbesserten Fahrverhaltens und des damit verbundenen geringeren Kraftstoffbedarfs) die negativen Auswirkungen des Verkehrswachstums zumindest teilweise oder vollständig kompensieren oder sogar zu einem Rückgang führen.

Die Effizienzsteigerung der Fahrweise und des Verkehrsablaufs betrifft dabei zum einen direkt die vollautomatisierten

Fahrzeuge und indirekt in abgeschwächter Form auch die nicht vollautomatisierten Fahrzeuge. Für die Gesamtbetrachtung ist in Szenario 1 zudem entscheidend, welche Fahrzeuge einen Fahrleistungsanstieg aufweisen, zum einen bzgl. der Antriebstechnologie, zum anderen bzgl. des spezifischen Energieverbrauchs abhängig z. B. von der Fahrzeuggröße. In Szenario 2 kommt es nach Einführung neuer Mobilitätsangebote darauf an, inwieweit die verlagerte Verkehrsleistung auf emissionsärmere Fahrzeuge erfolgt und welche Fahrzeuge darüber hinaus eine verminderte bzw. erhöhte Verkehrslei-

stung aufweisen. In Abbildung 3.11 sind schematisch die wechselseitigen Effekte aus Verkehrsleistungsverlagerung, Effizienzsteigerungen und unterschiedlichen spezifischen Energieverbräuchen auf die CO₂-Gesamtemission dargestellt. Um solche Effekte abzubilden, wird im vorliegenden Szenario den vollautomatisierten Fahrzeugen ein Effizienzgewinn bzgl. des Energieverbrauchs von 10 % und den übrigen Fahrzeugen von 2,5 % zugewiesen; für eine detaillierte Analyse der Emissionswirkungen auf Grundlage des Verkehrsablaufes würde es einer Mikrosimulation bedürfen.



¹⁴ | Zur Berechnung der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr werden Durchschnittsemissionswerte angenommen. Die Berücksichtigung von Marginalemissionswerten ist ein alternatives Verfahren.

Einen wesentlichen Einfluss bildet zudem die Zusammensetzung der Flotte hinsichtlich der Antriebstechnologien. Ein Anstieg der Anzahl an batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybride (PHEV) auf 6 Mio. in Deutschland wird bis 2030 angestrebt (BReg, 2011), aufbauend auf dem Ziel von 1 Mio. elektrifizierter Fahrzeuge bis zum Jahr 2020. Ein Anstieg darüber hinaus bis 2035 ist zu erwarten, ein großer Teil dieser Fahrzeuge wird auch in der Privatflotte verfügbar sein. Eine Fortschreibung der Zielstellung bis zu dem hier gesetzten Szenariojahr 2035 liegt nicht vor. Es wird daher auf den Prognosewert aus dem Referenzszenario des DLR-Projekts „Verkehrsentwicklung und Umwelt (VEU)“ (Henning et al., 2016) zurückgegriffen. Hierauf aufbauend wird ein Wert von 8,4 Mio. Fahrzeugen¹⁵ verwendet, bei einem Anteil an BEVs in Höhe von 15% an den elektrifizierten Fahrzeugen insgesamt.

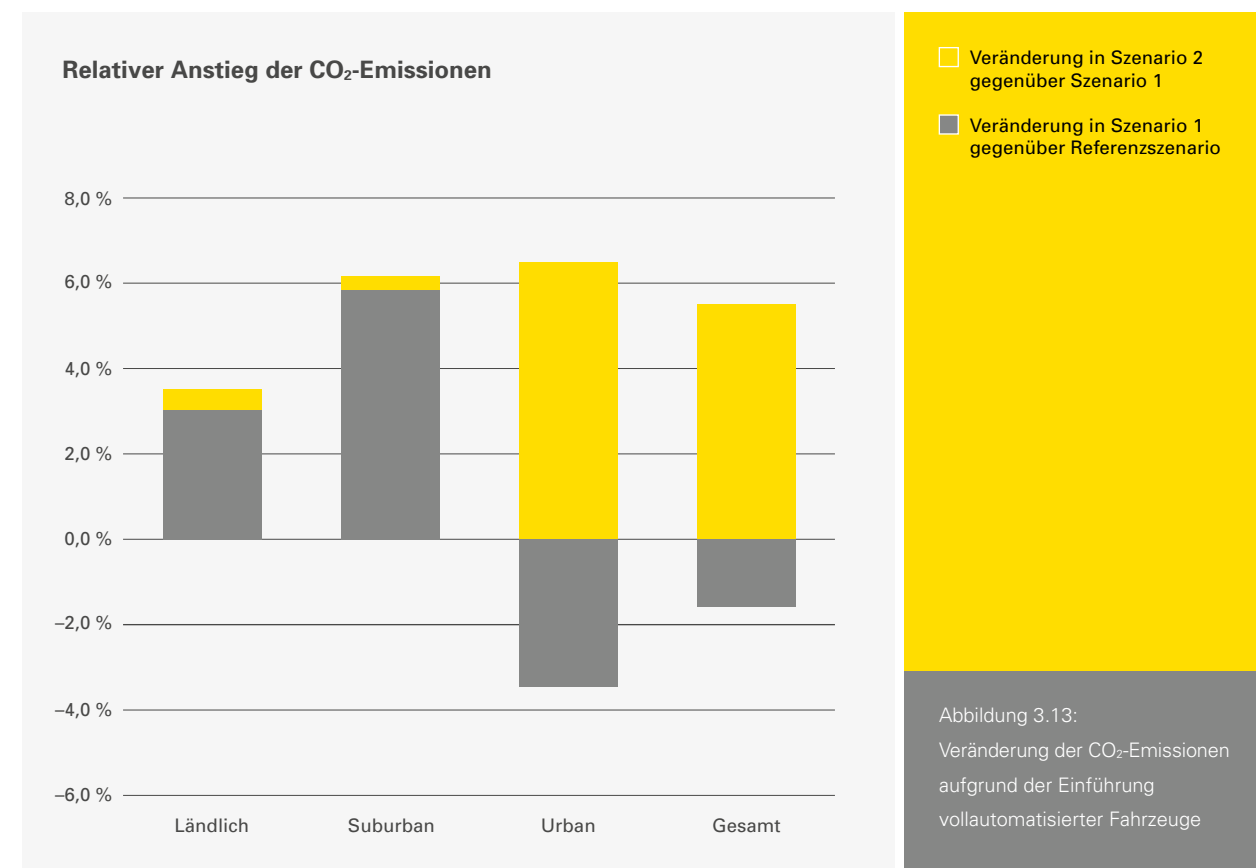
Es gibt Wechselwirkungen zwischen der Automatisierung der Fahrzeuge und der Elektromobilität, die eine überdurchschnittliche Durchdringung der automatisierten Flotte mit E-Fahrzeugen erwarten lassen (vgl. e-mobil BW GmbH, 2015). In den Szenarien wird eine überproportionale Durchdringung mit BEVs und PHEVs in der vollautomatisierten Fahrzeugflotte angenommen, u. a. aufgrund des niedrigeren durchschnittlichen Alters der Fahrzeuge mit automatischen Systemen im Szenariojahr 2035 gegenüber der Gesamtflotte. Zugleich wird allerdings auch – wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben – angenommen, dass die Durchdringungsraten der automatisierten Fahrzeuge in den Oberklassesegmenten – mit einem höheren durchschnittlichen spezifischen Verbrauch – am höchsten sind, diese werden für die zusätzliche Verkehrsleistung demzufolge am stärksten genutzt. Für die Fahrzeuge in der Flotte des vollautomatisierten Car-Pooling in Szenario 2

wird dagegen angenommen, dass ausschließlich BEVs zum Einsatz kommen, da aufgrund der Leerfahrten ein Ladevorgang an einer Induktionsladestelle ohne Personalaufwand möglich wäre und aufgrund der hohen Fahrleistungen bei einem rein elektrischen Betrieb Kostenvorteile bestehen sollten. Da die Fuhrparkgröße eines derartigen Systems, das mit elektrischen Fahrzeugen betrieben wird, stark von der Ausstattung und Effizienz der Ladeinfrastrukturen abhängt (Chen et al., 2016), wird davon ausgegangen, dass eine ausreichende Schnellladeinfrastruktur zur Verfügung steht.

Die Analyse der CO₂-Emissionen für die beiden Szenarien im Vergleich zu einem Szenario ohne Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge im Betrachtungsjahr 2035 zeigt auf, dass es unter den beschriebenen Rahmenbedingungen in beiden Szenarien zu einem leichten Anstieg der verkehrsbedingten

CO₂-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario kommt (vgl. Abbildung 3.13). Dieser fällt im Szenario 1 mit 5 % etwas höher aus als im Szenario 2 (3 %). Der geringere Zuwachs in Szenario 2 ist im Wesentlichen damit zu begründen, dass ein Teil der in Szenario 1 mit konventionellen Pkw und PHEVs durchgeführten Fahrten auf die ausschließlich mit BEVs betriebenen vollautomatisierten Car-Pooling-Fahrzeuge verlagert wurde und es dabei insbesondere in Ballungsräumen zu einer Bündelung von Fahrtwünschen kommt. Diese gehen mit einer Erhöhung des Besetzungsgrades in den Fahrzeugen einher. Daraus resultiert eine Verlagerung der Fahrleistung hin zu elektrifiziert zurückgelegten Fahrzeugkilometern.

Eine Reduktion des Angebots des konventionellen schienen- bzw. straßengebundenen ÖV wird hier im Rahmen der Mo-



¹⁵ | Der Wert entspricht dem Wert des VEU-Referenzszenarios für 2040 (Henning et al., 2016). Unter den ebenfalls progressiven Annahmen der Durchdringung mit vollautomatisierten Fahrzeugen erscheint er schon für 2035 praktikabel.

dellierung weder bei der Verkehrsnachfragemodellierung noch bei der Berechnung der Verkehrsemissionen angenommen. Potenziell könnte es jedoch aufgrund der verminderten Nachfrage durch Verlagerung von Fahrten auf private bzw. in Szenario 2 auch auf geteilte automatische Fahrzeuge zu einem Angebotsrückgang kommen. Dies kann Angebotsparameter wie Zuglängen und Fahrzeuggrößen, Bedienfrequenzen, aber auch die Aufrechterhaltung ganzer öffentlicher Nahverkehrslinien oder sogar -netze betreffen. Ähnliche notwendige Anpassungen sind auch im öffentlichen Fernverkehrsangebot möglich.

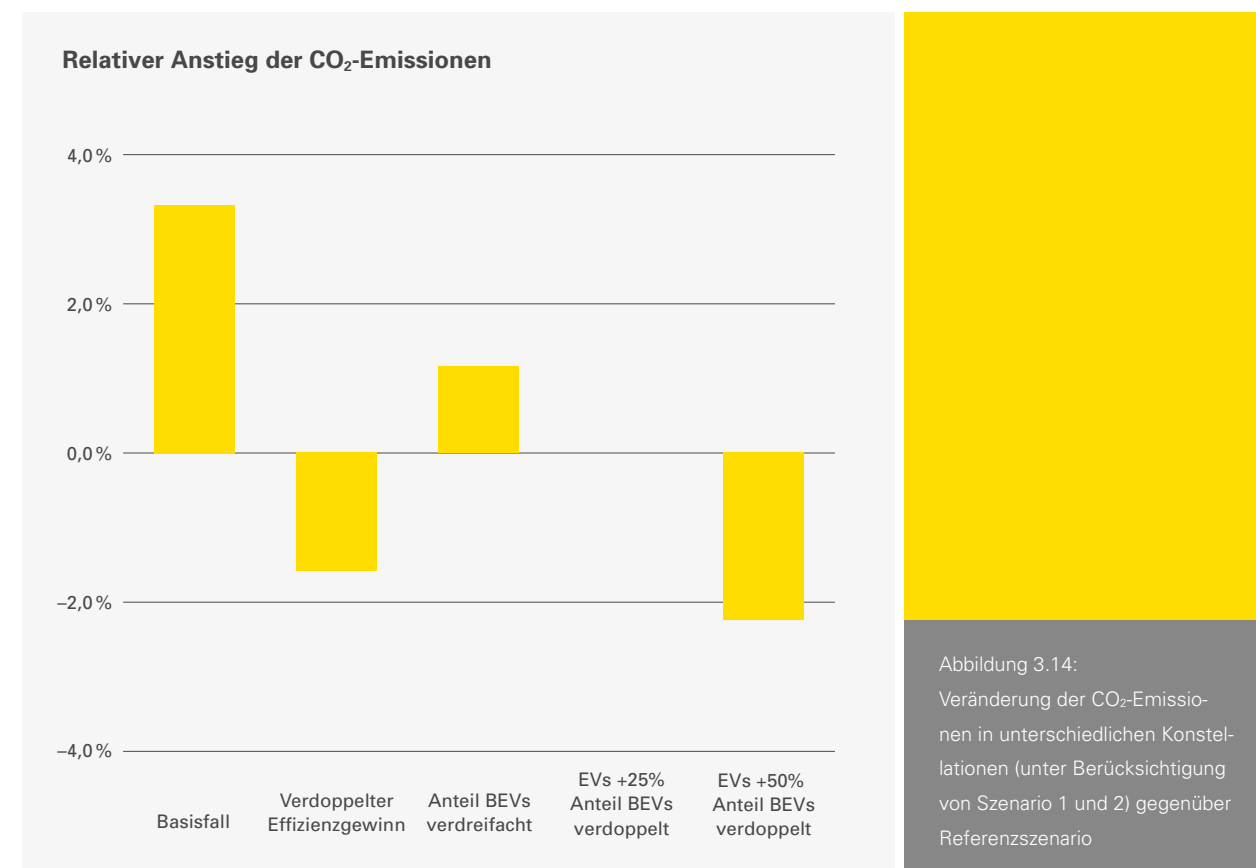
Wie die Modellrechnungen zeigen konnten, bewirkt die Einführung von vollautomatisierten Fahrzeugen im Privatbereich sehr wahrscheinlich einen Anstieg der Fahrleistung. Dieser Anstieg steht hinsichtlich der Kapazitätsbeschränkungen des

Netzes in Wechselwirkung mit einer möglichen effizienteren Fahrweise und dadurch erhöhten Kapazität. Die tatsächlichen Auswirkungen auf die Straßenkapazitäten und damit auf eine Zu- oder Abnahme von Verkehrsstaus lassen sich nur mit Unsicherheiten abschätzen, da sich erhöhende, aber auch vermindernde Effekte z. B. aufgrund des durchgängig regelkonformen Fahrverhaltens und der z. T. weniger aggressiven Fahrweise gegenüberstehen und es zu erwarten ist, dass es im Jahr 2035 noch einen Mischverkehr von konventionellen, teil-, hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen sowie – insbesondere in dichteren Stadtgebieten – einen Mischverkehr mit nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Radfahrern geben wird. Diese Unsicherheiten gelten ebenso für die daraus resultierenden Umweltauswirkungen. Die Höhe der Energieverbrauchs-Effizienzsteigerung aufgrund der Automatisierungstechnologie hat einen entschei-

denden Einfluss auf die Aussage bzgl. eines Anstiegs oder Rückgangs der CO₂-Gesamtemissionen. Erst ab Effizienzsteigerungen von rund 15–20 % bei den vollautomatisierten Fahrzeugen und rund 5 % bei den nicht vollautomatisierten Fahrzeugen ist unter Berücksichtigung der Verkehrsnachfragewirkungen ein Rückgang der CO₂-Gesamtemissionen zu erwarten. Der Effizienzgewinn ist bei Fahrzeugen ohne Rekuperation – also die Rückgewinnung von Bremsenergie – am höchsten. Da auch bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen (Diesel/Benzin) in zunehmendem Maße derartige Technologien integriert werden (Mild-/Full-Hybrid) wird der potenzielle Effizienzgewinn der Fahrzeuge zukünftig geringer. Die notwendigen genannten Effizienzsteigerungen beziehen sich auf die Ausgangswerte des spezifischen Energieverbrauchs im Jahr 2035. Inwiefern es zu einer Eingrenzung des Anstiegs oder sogar zu einem Rückgang der CO₂-Emissionen mit Einführung automatischer Fahrzeuge kommen kann, hängt also maßgeblich von der Flottenzusammensetzung und der Durchdringung mit alternativen Antriebstechnologien ab. Dabei kommt den Fahrzeugen der geteilten automatischen Flotte sowie Privatfahrzeugen mit hohen Fahrleistungen (Mittelklasse- bis Oberklassensegment) eine besonders wichtige Rolle zu.

Fahrleistungszuwachs also kompensiert. Eine Steigerung um 50 % auf 12,6 Mio. Fahrzeuge mit Verdopplung des BEV-Anteils auf 30 % würde zu einem Rückgang der CO₂-Gesamtemissionen von etwa 2 % gegenüber dem Referenzszenario führen. Eine Steigerung des Anteils der BEVs an der automatisierten Fahrzeugflotte alleine führt ebenfalls zu einer Reduktion gegenüber dem Szenariowert, eine Verdreifachung auf 45 % würde allerdings noch nicht ausreichen, um den Wert des Referenzszenarios zu unterschreiten (relativer Anstieg gegenüber dem Referenzszenario von 1 %).

Abbildung 3.14 zeigt die Auswirkungen auf den relativen Anstieg der CO₂-Gesamtemissionen für die zuvor diskutierten Einflüsse der verstärkten Effizienzsteigerung und einer möglichen Wirkung auf die elektrifizierte Flotte. Es wird deutlich, dass die tatsächliche Energieverbrauchs-Effizienzsteigerung und eine mögliche Steigerung des Anteils elektrifizierter automatischer Fahrzeuge einen starken Einfluss darauf haben können, ob die CO₂-Gesamtemissionen der möglichen zusätzlichen Fahrleistung kompensiert werden können.



Bei Flotten, die in neuen Mobilitätskonzepten zum Einsatz kommen, besteht ein erhebliches Potenzial für den Einsatz von BEVs – und damit ein Potential, den spezifischen Energieverbrauch je Fahrzeugkilometer zu senken. Entscheidend ist zudem die Flottenzusammensetzung bei den zusätzlich mit vollautomatisierten Privat-Pkw zurückgelegten Strecken – resultierend aus dem Anteil von PHEVs und BEVs an den vollautomatisierten Privat-Pkw. Eine Zunahme der Durchdringung der Gesamtflotte mit elektrifizierten Fahrzeugen (EVs) als Folge der Automatisierung der Flotte (Push-Wirkung) könnte auch bei niedrigen Effizienzgewinnen aufgrund der Automatisierung zu einer Kompensation der CO₂-Gesamtemissionen der zusätzlichen Fahrleistung führen.

In einer Sensitivitätsbetrachtung soll nachfolgend das Potenzial einer zusätzlichen Reduktion der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen durch eine höhere Durchdringung der automatischen Fahrzeugflotte mit Elektroantrieben untersucht werden. Bei einer Steigerung der elektrifizierten Flotte gegenüber dem Referenzszenario um 25 % auf 10,5 Mio. E-Fahrzeuge und einem zugleich verdoppelten Anteil von BEVs an den elektrifizierten Fahrzeugen auf 30 % würde sich nahezu der Wert der CO₂-Gesamtemissionen des Referenzszenarios¹⁶ ergeben, die zusätzlichen CO₂-Emissionen würden durch den

¹⁶ | Die Erhöhung der Anzahl der elektrifizierten Flotte wurde hier nur für das Szenario und nicht für den Referenzfall angenommen. Sie resultiert aus einer möglichen Push-Wirkung für die Elektromobilität aufgrund der Korrelation mit den vollautomatisierten Fahrzeugen.



04

**Auswirkungen des automatisierten
Fahrens auf Siedlungsstruktur und
gebaute Umwelt**



04

Auswirkungen des automatisierten Fahrens
auf Siedlungsstruktur und gebaute Umwelt



4.1 Auswirkungen auf Raumstrukturen

Automatisiertes Fahren kann sich erheblich auf die gebaute Umwelt und auf Siedlungsstrukturen auswirken. Überlegungen zu automatisierten Fahrzeugen und deren Integration in das (städtische) Verkehrssystem beziehen sich derzeit allerdings noch mehrheitlich auf die Entwicklung der Fahrzeugtechnik, die direkten Wirkungen auf den Verkehrsfluss und Verbesserungen der Verkehrssicherheit.

Daneben sind bisherige Arbeiten hauptsächlich von der Frage geprägt, wie sich die gebaute Umwelt mit der Zeit anpassen muss, damit automatisierte Fahrzeuge integriert werden können. Nicht gefragt wird hingegen, auf welche Weise sich Automatisierung im Verkehr sinnvoll und ergänzend in vorhandene Infrastrukturen integrieren lässt oder, gleichermaßen wichtig, welche langfristigen Auswirkungen sie auf die Gestaltung und Nutzung städtischer Räume haben kann. Um mögliche siedlungsstrukturelle Entwicklungen unter dem

Einfluss eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen zu betrachten, müssen diese ganzheitlich in den Blick genommen werden. Heinrichs (2015) entwickelte dazu aus der vorhandenen Literatur drei Szenarien (Tabelle 4.1 stellt die Szenarien und deren Charakteristiken dar), die aufzeigen, wie automatisierte Straßenfahrzeuge in das städtische System integriert werden könnten: die regenerative und intelligente Stadt, die hypermobile Stadt und die endlose Stadt. Die regenerative und intelligente Stadt zeichnet sich durch einen starken und flexiblen ÖPNV, die Reduktion des Flächenverbrauchs und die Herausbildung von Mobilitätsknoten aus. Bei der hypermobilen Stadt sind die Verdichtung der Innenstädte und ein Wachstum von dünn besiedelten Vororten zu erwarten, die von hoch integrierten automatisierten Taxi-Flotten bedient würden. Die endlose Stadt zeichnet sich durch geographische Ausweitung, die Abnahme der Siedlungsdichte und die Verlängerung der Fahrtstrecken aus.

Szenario	Ausprägung autonomen Fahrens	Stadtstruktur	Treiber
Regenerative Stadt	<ul style="list-style-type: none"> Flexibles, multimodales und vernetztes öffentliches Verkehrssystem als Rückgrat der städtischen Mobilität (Teil-)autonome Pkw (Autopilot) auf Autobahnen 	<ul style="list-style-type: none"> Herausbildung von intermodalen Mobilitätsknoten Reduktion des Flächenverbrauchs für Stellflächen im Stadtraum durch neue Parksysteme 	<ul style="list-style-type: none"> Technologische Entwicklung (im Energiesystem) Bewusster und verantwortlicher Umgang mit Ressourcen Gesetzgebung und Akzeptanzförderung durch den Staat
Hypermobile Stadt	<ul style="list-style-type: none"> Hoch integrierte (autonome) Massentaxi-Systeme Autonome Pkw auf Autobahnen mit hohem Transitaufkommen oder Pendlerstrecken auf reservierten Guided Lanes 	<ul style="list-style-type: none"> Stark verdichtete Innenstädte Wachstum suburbaner Gebiete geringer Dichte 	<ul style="list-style-type: none"> Zunehmende Akzeptanz von Informations- und Kommunikationstechnologien aufgrund ihrer Vorteile für Lebensstil und Handel Kooperation von Staat und Privatsektor, um erforderliche IKT-Technologien zu entwickeln
Endlose Stadt	<ul style="list-style-type: none"> Auto-dominiertes Modell vorherrschend Geringe Integration des ÖV (hoher Anteil informeller Paratransit-Angebote) Keine nennenswerten Entwicklungen hin zu automatisiertem Fahren 	<ul style="list-style-type: none"> Wachstum suburbaner Gebiete Generelle Abnahme der Siedlungsdichte 	<ul style="list-style-type: none"> Fehlende Steuerungsfähigkeit des Staates Technologische Entwicklung beschränkt auf Effizienzgewinne einzelner Bereiche

Tabelle 4.1: Szenarien zur Stadt von morgen unter dem Einfluss eines automatisierten Verkehrssystems (Heinrichs, 2015: 227)

Unterschiedliche Ballungsräume können im Zusammenhang mit Verkehrsauslastung, Landnutzung, Aktivitätsmuster, Regulierung usw., jeweils unterschiedliche Entwicklungen nehmen. Die systemischen Auswirkungen der Automatisierung müssen daher in ihrem jeweils spezifischen Kontext betrachtet werden.

Im Folgenden werden mögliche Entwicklungen im System Stadt und in seinen Infrastrukturen diskutiert. Die in Kapitel 1 thematisierten Effekte bilden dafür die Grundlage. Darüber hinaus werden auch Entwicklungen wie die räumliche Verlagerung der Parkraumnachfrage oder eine veränderte Wahrnehmung der Fahrtzeit u. a. angesichts ihrer Wirkungen (unter Ceteris-paribus-Annahmen) auf das Verkehrs- und Stadtsystem thematisiert.

Automatisierte Fahrzeuge haben, wie bereits in Kapitel 1 diskutiert, beispielsweise das Potenzial, wesentliche Änderungen in Bezug auf die Parkraumnutzung zu verursachen. Die vorliegenden Studien thematisieren in diesem Zusammenhang mehrheitlich Effizienzgewinne, beispielsweise durch die Möglichkeiten einer flächeneffizienten Bündelung von Parkflächen wie z. B. in Parkhäusern (e. g. Kummerle et al., 2009; Mitchell et al. 2010; Heinrichs, 2015; Heinrichs und Cyganski, 2015 und Li and Shao, 2015). Unklar ist allerdings, ob diese Effizienzgewinne tatsächlich eintreten werden. Eine Bereitstellung von privater Parkinfrastruktur (z. B. Parkhäuser) in dichten Stadtgebieten ist teuer. Die Nutzungskosten könnten ggf. die entstehenden Fahrtkosten überschreiten. Automatisierte Fahrzeuge könnten beispielsweise nach dem Absetzen von Personen entweder an einen kostengünstigeren bzw. kostenfreien Parkplatz fahren oder ganz im fließenden Verkehr verbleiben. Dies könnte dazu führen, dass die Parknachfrage in dünn besiedelte und preiswerte Randge-

bierte verlagert wird (Chapin et al., 2016), wo das Parkraumangebot weniger knapp ist. Hinzu kommt eine mögliche Erhöhung bzw. Verlängerung der Fahrten aufgrund von „Leerfahrten“.

- Werden automatisierte, taxiähnliche Fahrzeuge eingesetzt („Vehicle on Demand“; Wachenfeld et al., 2015), kann hingegen angenommen werden, dass sich die Parkraumnachfrage insgesamt verringern wird (Heinrichs, 2015). Eine solche Verringerung des Parkraumbedarfs in dichten Stadtkernen würde zu einer wesentlichen Reduzierung des benötigten Parkraums führen. Beispielsweise zeigt die bereits weiter oben zitierte OECD/ITF-Studie (2015), dass der komplette Ersatz der heutigen Fahrzeugflotte durch taxiähnliche automatisierte Fahrzeuge das Potenzial hat, die Parkraumnachfrage auf 6–16 % gegenüber dem derzeitigen Bedarf zu senken. Freiwerdender städtischer (Park-)Raum könnte dann neu gestaltet und anderweitig genutzt werden (Chapin et al., 2016). Beispiele solcher nachhaltigeren Nutzungen sind die Umwidmung in exklusive Fahrspuren für den ÖPNV, breitere bzw. bessere Geh- und Fahrradwege oder Parks und Grünanlagen (Hass-Klau, 2014). Zusätzlich schlagen Chapin et al. (2016) die Einführung von festgelegten Haltepunkten für automatisierte Fahrzeuge vor, die dazu dienen, Zu-, Um- und Ausstiegsvorgänge zu ermöglichen, ohne den fließenden Verkehr zu beeinträchtigen.

- Einen noch bedeutenderen Effekt auf die Siedlungsstruktur könnte eine Neubewertung der Reisezeit im vollautomatisierten Fahrzeug haben. Wenn die Zeit im Fahrzeug nicht mit Fahraufgaben verbracht werden muss, sondern andere, für die Fahrenden sinnvollere Aktivitäten ermöglicht (Silberg et al., 2012; Heinrichs, 2015), sinkt der sogenannte „Value of Travel Time“ für Nutzer. Eine Folge davon könnte die Bereitschaft sein, mehr Zeit im Pkw zu verbringen und damit längere Wege zu fahren. Eine solche Entwicklung könnte sich nicht nur in der Verkehrsmittelwahl niederschlagen (siehe Kapitel 3.1), sondern auch auf die Wahl von Zielen (Einkaufs-, Freizeit-, Ausbildungs-orten) und letztendlich sogar auf die Wahl des Wohnorts. Die Folgen könnten weitreichende Veränderungen der Siedlungsstrukturen bewirken, bis hin zu einer verstärkten Suburbanisierung. Allerdings sind derartige Effekte in bisherigen systemischen Analysen nicht berücksichtigt, da sie eher mittel- bzw. langfristiger Natur sind. Des Weiteren ist zu erwarten, dass sich eine Neubewertung der Reisezeit mit Blick auf unterschiedliche Nutzergruppen und

auch für unterschiedliche automatisierte Mobilitätsformen (eigener Pkw, ÖPNV, Taxi) deutlich unterscheiden würde und damit je spezifische Varianten der hier beschriebenen Effekte eintreten dürften.

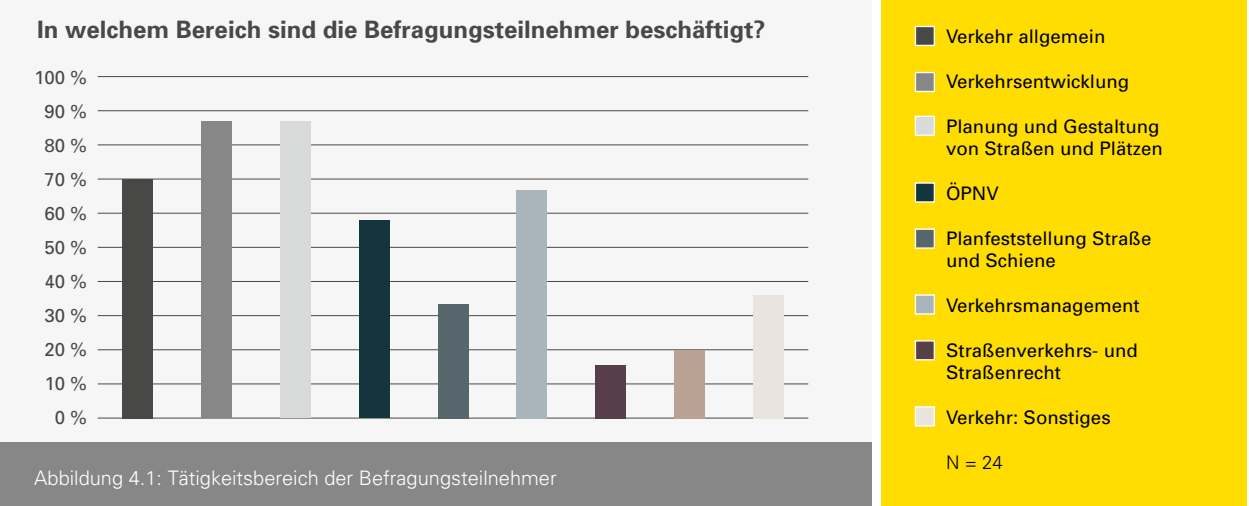
4.2 Die Perspektive kommunaler Akteure – Ergebnisse einer Expertenbefragung

Wenn die Einführung automatisierter Fahrzeuge über die in der Literatur bisher untersuchten direkten Implikationen hinausgeht, hat sie damit auch das Potenzial, urbane Verkehrssysteme zu verändern. Vor diesem Hintergrund werden zuständige Behörden nicht umhinkommen, Antworten auszuarbeiten und Strategien zu entwickeln, die sich mit der neuen Technologie auseinandersetzen. In diesem Zusammenhang sind vor allem Perspektiven sowie Zielsetzungen der Akteure im Bereich (kommunaler) Raum- und Infrastrukturplanung von Bedeutung.

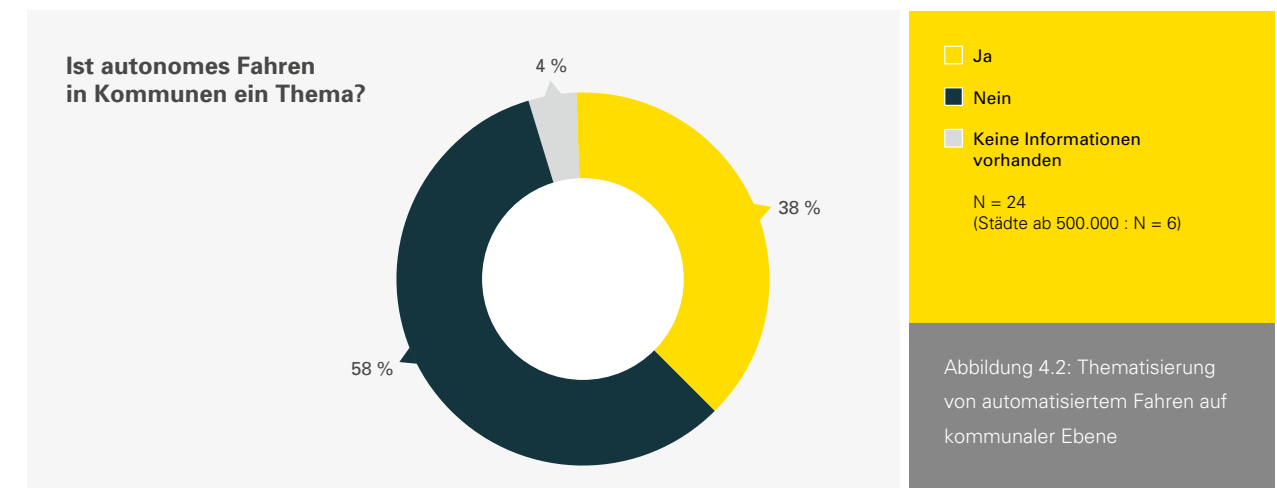
Um diese Themen zu adressieren, wurde im Rahmen der Studie eine empirische Erhebung durchgeführt, die sich an Mitglieder der Fachkommission „Verkehr“ des Deutschen Städtetags in einer zweistufigen, an das Delphi-Verfahren angelehnten Befragung richtete. Die sogenannte Delphi-Methode ist ein häufig verwendetes Instrument, um einen Dialog zwischen Experten zu Zukunftsthemen zu eröffnen – meist im Zusammenhang mit dem expliziten Ziel, Auswirkungen neuer Technologien abzuschätzen sowie ein konsensuales Verständnis zu zukünftigen Entwicklungen zu generieren (Schulz und Renn, 2009).

Im Rahmen dieser Erhebung wurden die Mitglieder der Fachkommission im September 2016 in einer Online-Studie befragt. Die Größe der Netto-Stichprobe beträgt 24 Personen (etwa die Hälfte der Kommission), davon sechs aus Großstädten (mehr als 500.000 Einwohner) und 18 aus Mittelstädten (50.000–500.000 Einwohner).¹⁷

Der Tätigkeitsbereich der Befragungsteilnehmer wird in Abbildung 4.1 dargestellt (Mehrfachnennungen waren möglich). Die Mehrheit der Befragungsteilnehmer (über 80 %) ist im Planungsbereich tätig (Verkehrsentwicklungsplanung, Planung und Gestaltung von Straßen und Plätzen, Planfeststellung von Straßen und Schienen). Darüber hinaus sind viele Akteure (über 50 %) im Verkehrsbereich allgemein und im ÖPNV-Bereich tätig.



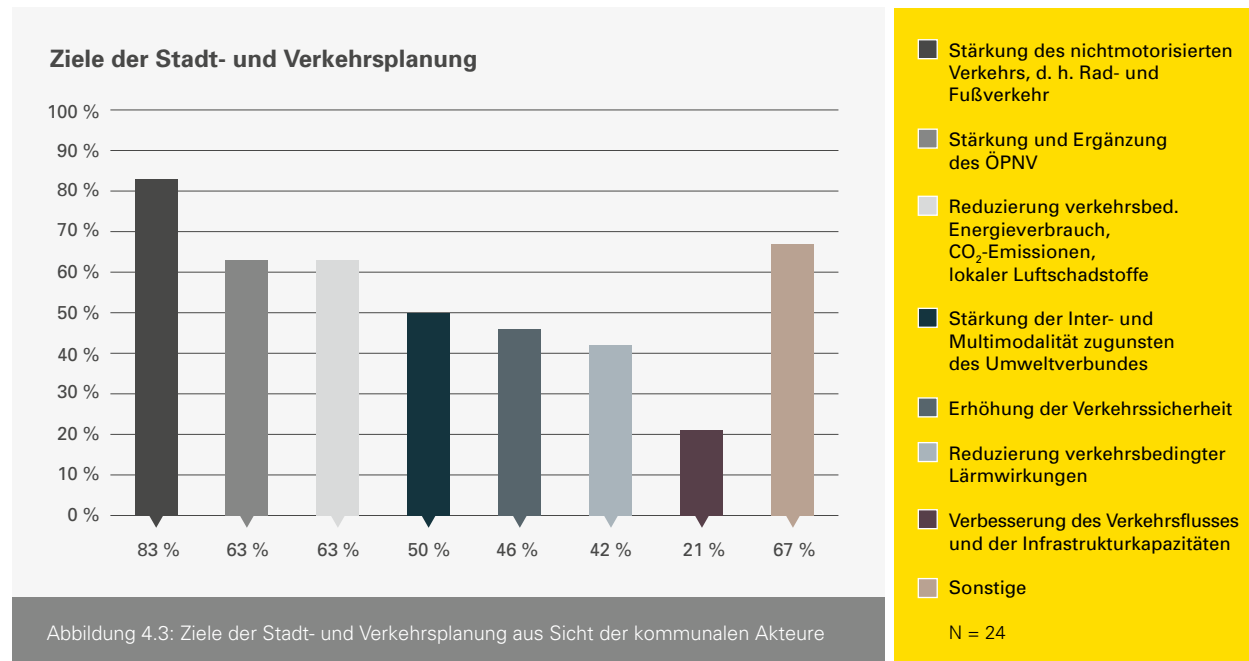
Die Frage, ob auf kommunaler Ebene Aktivitäten bezogen auf die Einführung von automatisierten Fahrzeugen bereits durchgeführt wurden, derzeit laufen oder in Planung sind, wird für etwa zwei Drittel der Städte negativ beantwortet. Dabei ist auch zu beachten, dass es offensichtlich keinen Unterschied zwischen Groß- und Mittelstädten gibt.



Die Befragten wurden aufgefordert, die fünf wichtigsten Ziele für die Stadt- und Verkehrsentwicklung in ihren jeweiligen Kommunen anzugeben. Die Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs (83 %), die Förderung der öffentlichen Verkehrsmittel (63 %) sowie die Reduzierung der Schadstoffemissionen (63 %) zählen dabei zu den wichtigsten Zielen der Stadt- und Verkehrsplanung. Die Stärkung von Intermodalität, die Erhöhung der Verkehrssicherheit und die Reduzierung der Lärmbelastigung gehören zu den Primärzielen in ungefähr der Hälfte der Kommunen. Die Verbesserung des Verkehrsflusses ist dagegen nur für ca.

20 % der Befragten ein Hauptziel. Einige Kommunen scheinen auch andere Ziele (darunter z. B. die Reduzierung des motorisierten Verkehrsaufwandes und der Reisezeiten, die Reduzierung der Motorisierungsrate, die Herstellung gleicher Mobilitätschancen für alle Schichten der Bevölkerung usw.) anzustreben (67 %); bei den letztgenannten Zielen sind aber keine gemeinsamen Nenner zu erkennen. Zusammenfassend legen die Experten überwiegend den Fokus auf die Reduzierung des MIV und der damit einhergehenden Belastungen sowie die Verwirklichung gleicher Mobilitätschancen für die gesamte Bevölkerung.

¹⁷ | Da einzelne Personen befragt wurden, spiegelt sich hier die Sicht der Befragten wider, und es handelt sich nicht notwendigerweise um eine innerhalb der Kommunen abgestimmte Meinung.



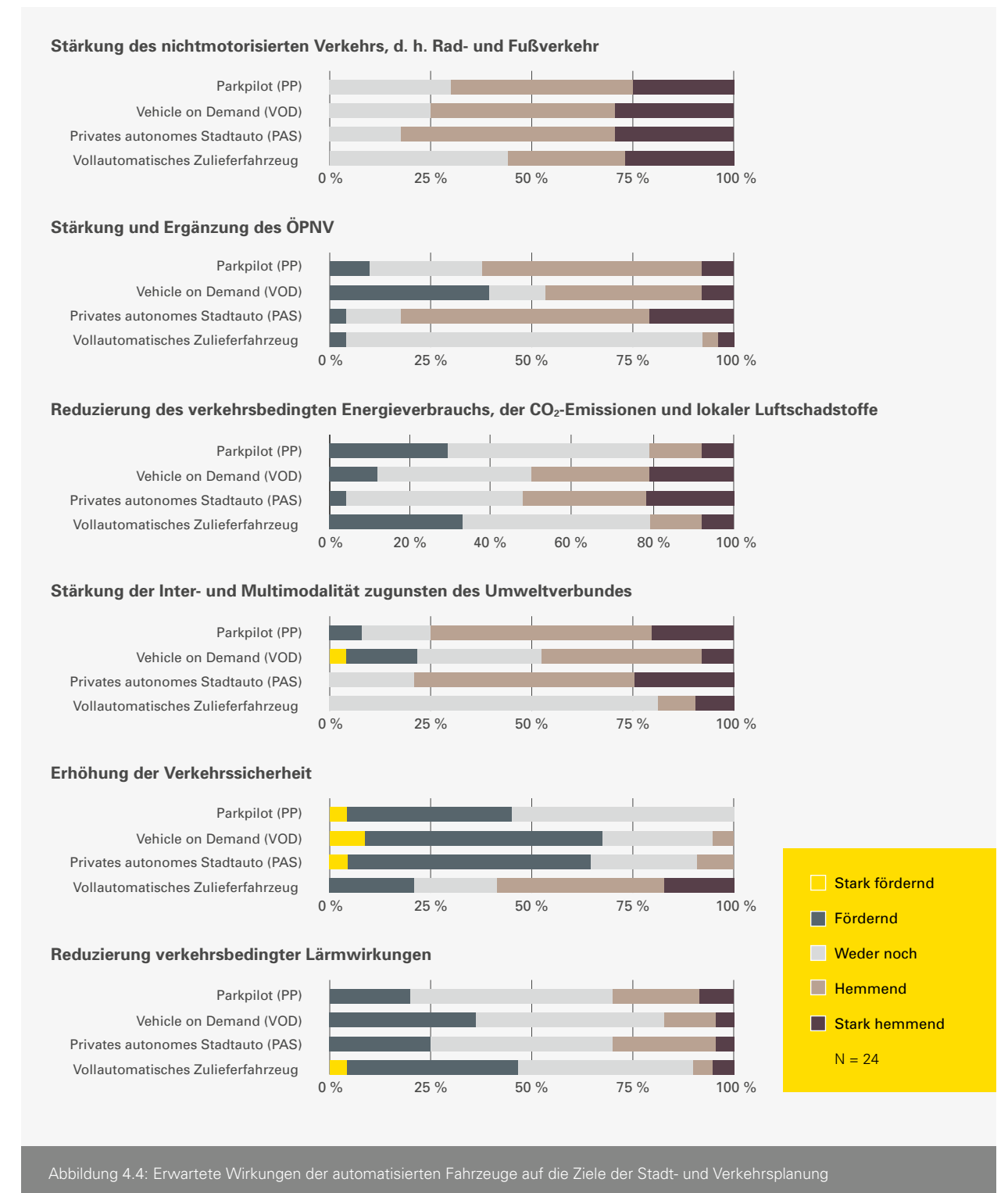
In Anlehnung an vorherige Untersuchungen (vgl. Fraedrich et al., 2016; Heinrichs, 2015; Wachenfeld et al., 2015) wurden Anwendungsfälle (Use Cases) des automatisierten Fahrens skizziert, die aufzeigen, auf welche Weise automatisierte Fahrzeuge innerhalb des städtischen Umfelds zum Einsatz kommen könnten. Bei der Befragung wurden die folgenden vier Anwendungsfälle adressiert.



- **Parkpilot (PP):** Nachdem alle Insassen ausgestiegen sind, kann das Fahrzeug alleine zu einem vorher festgelegten Parkplatz fahren und von dort auch wieder zurück zu einer Abholadresse.
- **Vehicle on Demand (VOD):** Ein Vehicle on Demand ist ein Fahrzeug, das seine Insassen ohne Fahrer fährt. Menschen können in einem solchen Fahrzeug nicht mehr selbst fahren – im Innenraum des Fahrzeugs gibt es daher auch kein Lenkrad und keine Pedalerie mehr.
- **Privates autonomes Stadtauto (PAS):** Auf Wunsch oder bei Bedarf kann das Fahrzeug die Fahraufgabe übernehmen. Der Fahrer muss in dieser Zeit nicht auf den Verkehr achten und kann anderen Tätigkeiten nachgehen.
- **Vollautomatisches Zulieferfahrzeug (VZF):** Ein kleines selbstfahrendes Fahrzeug, das sich bedarfsweise auch auf Geh- oder Fahrradwegen fortbewegt, übernimmt die letzte Meile für Warenauslieferungen an die Kunden bzw. an Paketboxen.

Die Befragten sollten daraufhin Aussagen treffen, inwieweit die unterschiedlichen Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens zum Erreichen der von ihnen erwähnten Ziele der Stadt- und Verkehrsplanung einen relevanten Beitrag leisten könnten.

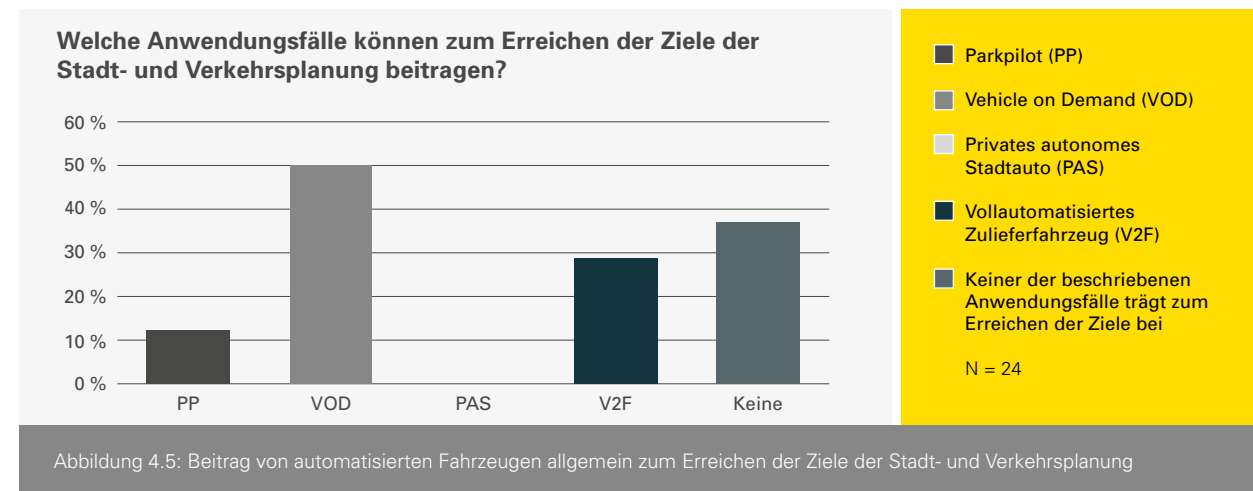
Welche Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens adressieren das Erreichen der folgenden Ziele?



Insgesamt zeigt sich, dass die Experten mehrheitlich negative Konsequenzen des automatisierten Fahrens für die primären Ziele ihrer Kommune erwarten. Besonders hemmend wirkt sich die Technologie nach ihrer Einschätzung auf die Ziele der Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs, des ÖPNV und der Intermodalität sowie der Reduktion von Schadstoffemissionen aus. Ein positiver Effekt der Automatisierung wird hingegen im Hinblick auf die Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Reduktion der Lärmbelastung und die

Verbesserung des Verkehrsflusses und der Infrastrukturkapazität erwartet. Die Meinungen bezüglich der Effekte des Anwendungsfalls Vehicle on Demand auf die Entwicklung des ÖPNV und der Intermodalität sind geteilt.

Zusammenfassend wurde gefragt, welche der dargestellten Anwendungsfälle zum Erreichen der Ziele der Stadt- und Verkehrsentwicklung im Allgemeinen beitragen könnten. Die Ergebnisse werden in Abbildung 4.5 dargestellt.



Die Hälfte der Befragten geht davon aus, dass der Anwendungsfall Vehicle on Demand sich insgesamt fördernd auf die Ziele der Kommune auswirken könnte. Im Gegensatz dazu assoziiert keine der befragten Personen das private autonome Stadtauto mit einer positiven Entwicklung des Verkehrssystems. 40 % der befragten Kommunalakteure erwarten insgesamt keine positiven Auswirkungen im Zusammenhang mit der Einführung des automatisierten Fahrens – durch keinen der Anwendungsfälle.

Vor dem Hintergrund der Frage, in welchen Bereichen der kommunalen Planung akuter und künftiger Handlungsbedarf besteht, damit automatisiertes Fahren einen bestmöglichen Beitrag zu den stadt- und verkehrsplanerischen Zielen leistet, wurden in der Befragung die folgenden Bereiche adressiert.

Verkehrsplanung

- Überarbeitung des Verkehrsentwicklungsplanes inklusive des Nahverkehrskonzeptes
- Anpassung der Rad- und Fußverkehrsstrategie
- Anpassung bestehender Wirtschaftsverkehrskonzepte
- Erstellung von Wirkungsabschätzungen der Automatisierung (z. B. Erweiterung städtischer Modelle, Erhebungen, Befragungen)

Verkehrskontrolle und -steuerung

- Überarbeitung der Einfahrtsbedingungen (Road Pricing, regionale Zufahrtsbeschränkung für spezifische Fahrzeugtypen usw.)
- Anpassung der Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Anpassung der Bevorrechtigungen (right-of-way)

Infrastrukturplanung

- Sicherung und Qualifizierung von Verkehrsinfrastrukturen (Straßenausbau)
- Anpassung vorhandener Ausbaupläne (z. B. spezieller Haltezonen)
- Umgestaltung von Straßenräumen (Spurzuweisungen und -breiten, Haltestellen, Umbau von Knotenpunkten)

Stadtplanung

- Überarbeitung des Stadtentwicklungsplans
- Überarbeitung der Flächennutzungsplanung
- Anpassung der kommunalen Stellplatz- und Parkraummanagementsatzungen
- Erarbeitung neuer räumlicher Konzepte zum Parken (dezentrale Parkplätze, Parkplätze außerhalb der Wohngebiete)

Partizipation

- Förderung der gesellschaftlichen Diskussion über Nach- und Umnutzung innerstädtischer Verkehrsflächen
- Förderung der gesellschaftlichen Diskussion über Automatisierung mit dem Ziel der Akzeptanzsteigerung innerhalb der Bevölkerung

Andere Aspekte

- Einrichtung von Testfeldern des automatisierten Fahrens im ÖV und MIV
- Definition von Datenanforderungen und Datenstandards

Der Handlungsbedarf, wie ihn die Befragten mehrheitlich sehen, wird in Tabelle 4.2 zusammengefasst (wobei die Kreise Größenproportional zum Handlungsbedarf sind).

N = 24	Sofort/kurzfristig	Mittelfristig (3–10 Jahre)	Langfristig (10–20 Jahre)	Kein Handlungsbedarf
Verkehrsplanung		●	●	●
Verkehrskontrolle		●	●	●
Infrastrukturplanung	●	●	●	●
Stadtplanung		●	●	●
Partizipation	●	●		●
Andere	●	●	●	

Tabelle 4.2: Von Stadt- und Verkehrsplanern erwarteter Planungsbedarf für den Fall der Einführung des automatisierten Fahrens

Abgesehen von der Errichtung von Testfeldern und der Definition von Datenprotokollen sehen die Befragten keinen kurzfristigen Handlungsbedarf in Bezug auf die Automatisierung. Allerdings wird das Thema Partizipation im Sinne der Beteiligung und Förderung einer gesellschaftlichen Diskussion bereits kurz- und mittelfristig als wichtig erachtet. Eine Mehrheit der Befragten ist der Meinung, dass die Automatisierung auf der Ebene der Verkehrs-, Infrastruktur- und Stadtplanung

mittelfristig angegangen werden sollte. Auffallend ist, dass ein kleiner Teil der befragten Personen bereits kurzfristig einen Baubedarf sieht, selbst wenn sie Anpassungen im Bereich Verkehrs- und Stadtplanung als mittelfristige Aufforderung einordnen. Ein größerer Teil der Befragten gibt an, es bestehe kein Handlungsbedarf, was die Verkehrskontrolle bzw. die Verkehrssteuerung angeht.



05

Fazit

05

Die Erprobung
neuer ÖV-Konzepte
bietet Chancen



© Chesky_W/istockphoto



Platooning reduziert den Ressourcenverbrauch

5.1 Automatisierung im Straßenverkehr – Herausforderungen und Chancen

Mit dem Technologiewandel rund um die Implementierung automatisierter Fahrzeuge in das Straßenverkehrssystem wird ein Prozess angestoßen, der das Verkehrssystem grundlegend verändern könnte. Die Automatisierung des Straßenverkehrs lässt tiefgreifende Auswirkungen auf die Organisation des Verkehrs erwarten und hat damit u. a. auch Einfluss auf Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung. Wesentlich ist hierbei, dass momentan ein technologischer Pfad beschritten wird, der noch zahlreiche Gestaltungsmöglichkeiten bietet und auch verlangt. Vor diesem Hintergrund war es das Ziel der vorliegenden Studie, wesentliche Wirkungen der Automatisierung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland zu untersuchen. Dazu wurden mit unterschiedlichen Methoden (Literaturstudie, Szenarien-basierte Berechnungen mithilfe von Verkehrsnachfragemodellen, empirische Befragung) mögliche Effekte der Vollautomatisierung im Ver-

kehr für das Jahr 2035 im Personen- und Güterverkehr identifiziert und hinsichtlich ihrer Implikationen für die Verkehrsmittelwahl von Personen und Unternehmen, für die Umwelt und für die Entwicklung räumlicher Strukturen analysiert.

Grundsätzlich wird erwartet, dass die Automatisierung des Verkehrs sowohl Chancen als auch Risiken beinhaltet. So bieten automatisierte Fahrzeuge zahlreiche Potenziale, die den Verkehr insgesamt sicherer, komfortabler, flexibler, effizienter und kostengünstiger machen können. Viele dieser Vorteile, das haben die Analysen gezeigt, können allerdings bis zum Jahr 2035 noch nicht oder nur zum Teil aktiviert werden, da Wirkungen, wie z. B. eine Verbesserung der Verkehrseffizienz, vom Grad der Durchdringung der Flotte mit automatisierten Fahrzeugen abhängig sind. Darüber hinaus – das haben insbesondere die Modellberechnungen gezeigt – kann automatisiertes Fahren zu einer Zunahme des motorisierten Individualverkehrs (MIV) führen und damit auch dessen negative externe Effekte vergrößern (Stau, Umweltbelastungen

etc.) bzw. Effizienzgewinne dieser Technologie absorbieren. Zeitgleich entfallen (im urbanen Raum) typische Maßnahmen zur Steuerung der Verkehrsnachfrage: Für automatisierte Fahrzeuge sind Fahrziel und Abstellplatz nicht mehr unbedingt aneinandergelockt, so dass eine Bepreisung von Fahrzeugstellflächen als wesentliches Steuerungselement an Bedeutung verliert. Eine Steigerung der Nachfrage nach Transport mit Individualfahrzeugen bietet zudem das Risiko, dass der ÖV zunehmend unter Druck gerät und sein Angebot in der bestehenden Form bzw. im Sinne der Daseinsvorsorge nicht wird aufrechterhalten können.

5.2 Handlungsempfehlungen und Steuerungsalternativen

In Anbetracht der Vielzahl an möglichen Effekten geht es darum, diese frühzeitig zu identifizieren und Steuerungsmöglichkeiten zu entwickeln bzw. den Rahmen entsprechend anzupassen, damit die Potenziale der Technologie ausgeschöpft und negative Begleiterscheinungen abgemildert oder gänzlich abgewendet werden können.

5.2.1 Personenverkehr

Eine Erhöhung der Nachfrage nach Fahrten mit automatisierten Pkw bei gleichzeitig sinkenden Zeitkosten im MIV im Vergleich zu nichtautomatisierten Fahrzeugen kann, so wurde in der vorliegenden Studie argumentiert, zu einer Verlagerung der Mobilitätsnachfrage zugunsten des MIV mit unerwünschten Folgen wie beispielsweise der Erhöhung der Verkehrsleistung oder der Emissionen führen. Gleichzeitig ist es wahrscheinlich, dass die Attraktivitätssteigerung des MIV negativ auf den ÖPNV wirkt. Um zu verhindern, dass die beschriebenen Effekte die positiven Wirkungen des automatisierten Fahrens aufheben, müssen frühzeitig geeignete Steuerungsalternativen in den Blick genommen sowie deren Umsetzbarkeit und Wirksamkeit adressiert werden. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend Handlungsempfehlungen ausgesprochen, zunächst an die Adresse von Politik und Planung, dann – in Verbindung damit – an die Forschung.

1) Politik und Planung (Bundes-, Landes- und kommunale Ebene)

a) Eine Einführung des automatisierten Fahrens ohne Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist in Anbetracht möglicher kurzfristiger negativer Effekte kontraproduktiv. Die Entwicklung eines automatisierten Verkehrssystems sollte

daher, vor allem im ÖV und bei Fahrzeugflotten, die für neue Mobilitätskonzepte eingesetzt werden, in Verbindung mit der Bevorzugung und Förderung alternativer Antriebe erfolgen. Ziel muss es sein, generell die straßengebundene Verkehrsleistung durch schadstoffärmere Fahrzeuge zu erbringen. Der Einsatz von alternativen Antrieben für neue Mobilitätskonzepte kann in Verbindung mit den zu erwartenden hohen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge in derartigen Flotten besonders positiv wirken, vor allem dann, wenn es gelingt, mit den neuen Mobilitätskonzepten die Nutzung des privaten Pkw zu ersetzen.

- b) Die Automatisierung des Verkehrs bedeutet eine besondere Herausforderung für den ÖV – sowohl für den Nahverkehr als auch für den Fernverkehr. Aus diesem Grund ist eine weitere Stärkung des Ö(PN)V erforderlich, verbunden mit der frühzeitigen Auseinandersetzung mit dem Thema „Automatisierung des Verkehrs“ seitens der Ö(PN)V-Betreiber ebenso wie seitens der Politik sowie der Raum-, Stadt- und Verkehrsplanung (im Sinne einer integrierten Planung). Ziel muss es sein, proaktiv die neuen Möglichkeiten des automatisierten Verkehrs in den Ö(PN)V zu integrieren und sich dabei eng an den Bedürfnissen unterschiedlicher Nutzergruppen in unterschiedlichen Raumkategorien zu orientieren, gleichzeitig aber auch Geschäftsmodelle zu entwickeln, die dazu beitragen können, die Wirtschaftlichkeit des ÖV zu erhöhen.
- c) Hand in Hand mit der Stärkung des ÖV sollte die Erprobung und Einführung neuer Mobilitätskonzepte vorangetrieben werden, insbesondere vor dem Hintergrund einer möglichen Komplementarität und Ergänzung zum Ö(PN)V. Dazu wird es notwendig sein, die mit den neuen Konzepten verbundenen Geschäftsmodelle einer kritischen Betrachtung zu unterziehen.
- d) Die intensive Berücksichtigung auch des ÖV im Rahmen der Automatisierung des Verkehrs mündet fast zwangsläufig in die Ausweitung der Betrachtung auf alle motorisierten Modi bzw. alle Verkehrsträger. Diese Ausweitung beinhaltet einerseits Fragen der Automatisierung innerhalb der betrachteten Modi, andererseits unterstützt sie die Entwicklung neuartiger intermodaler Konzepte, die angesichts der Automatisierung neue Qualitäten erzielen können, die heute bestehende konventionelle Angebote nicht bereithalten.

- e) Hand in Hand mit der Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte und neuer Bedienformen des Ö(PN)V muss die Erarbeitung von Konzepten zur Reorganisation des öffentlichen Straßenraums erfolgen. Dies betrifft sowohl die Frage nach den Infrastrukturen, die im Rahmen der Automatisierung notwendig sind, als auch die Neuauslegung und Gestaltung des Stadtraums.
- f) Regionen und Kommunen sollten deutlich stärker und möglichst frühzeitig in die Entwicklung, die sich aus der Automatisierung des Verkehrs ergibt, als aktiv Beteiligte eingebunden werden. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Wahrnehmung der bevorstehenden Herausforderungen bei Stadt- und Regionalplanung geschärft werden sollte. Dies gilt umso mehr, als die Befragung kommunaler Akteure aus der Stadt- und Verkehrsplanung gezeigt hat, dass diese Akteure bislang noch kaum adressiert wurden. Dialogprozesse zwischen Industrie, Politik, Kommunen, Wissenschaft und Zivilgesellschaft sind jedoch angesichts der zu erwartenden Veränderungen und der Notwendigkeit, Chancen und Risiken zu identifizieren, unumgänglich.
- g) Vor dem Hintergrund der möglichen Effekte der Automatisierung wird es mittel- und längerfristig für die Identifikation und Entwicklung von Maßnahmen notwendig sein, diese Effekte – je nach Zielsetzung – zu stärken oder zu vermindern. Denkbar sind dabei Maßnahmen der Incentivierung, wie z. B. eine spezifische Preisgestaltung von Ö(PN)V-ergänzenden Mobilitätskonzepten, oder der Regulierung, wie bspw. Zugangsbeschränkungen oder Einfuhrverbote für nichtautomatisierte oder nichtelektrifizierte Fahrzeuge in Innenstadtgebiete und die Einführung eines fahrleistungs- und/oder zeitbezogenen Mautsystems. Um gegenläufige Effekte zu vermeiden, bedarf es der Wirkungsbetrachtung und Bewertung dieser Maßnahmen (s. u. „Forschungsbedarf“).

2) Forschungsbedarf

- a) Eine der wesentlichen Aufgaben der Forschung wird es sein, die Einführung der Automatisierung des Verkehrs dahingehend zu begleiten, dass Gestaltungsmöglichkeiten identifiziert und mögliche Wirkungen frühzeitig erkannt werden, um sie – je nach Wirkungsrichtung – zu verstärken oder zu begrenzen. Darüber hinaus sollte Forschung bereits im Vorfeld der Automatisierung dazu beitragen, Aufgaben wie die Stärkung des Ö(PN)V, z. B. durch neue Bedienkonzepte, oder die Erprobung und Einführung neuer Mobilitätskonzepte zu unterstützen, indem die dar-

aus resultierenden Wirkungen und ihr Potenzial in einem zunehmend automatisierten Verkehr analysiert und bewertet werden. Eine besondere Bedeutung haben hierfür realitätsnahe Feldtests und Experimentierfelder, z. B. in Form von Reallaboren, in denen die Umsetzbarkeit von Technologien und neuen Bedienformen ermittelt werden können, und gleichzeitig alle beteiligten Akteursgruppen in den Entwicklungsprozess einbezogen werden können.

- b) Derzeit ist noch kaum geklärt, welche Wirkungen verschiedene Angebote von ÖV-Betreibern, aber auch von gewerblichen Betreibern in einem automatisierten Verkehrssystem neben automatisierten Privatfahrzeugen entfalten. Unter anderem geht es dabei um die Fragen, ab welchem Durchdringungsgrad der Fahrzeugflotte mit automatisierten Fahrzeugen Wirkungen „sichtbar“ werden, wann also z. B. mit messbaren Sicherheits- und Effizienzgewinnen zu rechnen ist. Unsicherheit herrscht derzeit auch bzgl. der Frage, welche Wirkungen Mischszenarien aufweisen. Zur Beantwortung solcher Fragestellungen bedarf es eines zuverlässigen Analyse- und Bewertungsinstrumentariums; dazu müssen vorhandene Instrumente der Verkehrsforschung substanziell weiterentwickelt werden.

5.2.2 Güterverkehr

1) Politik und Planung (europäische, Bundes- und Landesebene)

- a) Vor dem Hintergrund eines automatisierten Straßengüterverkehrs müssen rechtliche Regelungen angepasst und (neu) geschaffen werden: Bisher fahren automatisierte Fahrzeuge nur auf Betriebsgeländen und werden dementsprechend „nach der Maschinenrichtlinie behandelt, mit entsprechenden Ausgestaltungen von Sicherheits- und Personenschutzkonzepten“ (Flämig 2015: 394); solche Richtlinien müssen überarbeitet und an die Gegebenheiten im öffentlichen Straßenverkehrsraum angepasst werden. Rechtliche Rahmenbedingungen fehlen derzeit auch im Bereich des Platooning: Hier sind Gesetzesänderungen erforderlich, die beispielsweise den erforderlichen Sicherheitsabstand zwischen den Lkw regeln bzw. heruntersetzen, die maximal erlaubte Länge eines Platoon oder die Zeiten, in denen solche Fahrzeugkolonnen überhaupt auf öffentlichen Straßen fahren dürfen, definieren (Janssen, 2015).
- b) In Hinblick auf Energieeffizienz ist eine Zunahme des Straßengüterverkehrs als Folge der Automatisierung mit eini-

gen Nachteilen verbunden: Aufgrund des niedrigen Rollwiderstands und der Möglichkeit der direkten Verwendung regenerativen Stroms zeigt der Schienengüterverkehr in allen wesentlichen Indikatoren nur halb so große Ressourcenverbräuche wie die Straße. Möchte man den Schienengüterverkehr als eine effiziente Transportalternative zur Straße beibehalten, müsste die Schiene ebenso wie die Straße einen Technologiesprung erfahren. Hierbei ist insbesondere die Förderung multimodaler Verkehre zu nennen. Spezielle Handlungsfelder sind:

- die Entwicklung massenleistungsfähiger Umschlagsanlagen für multimodale Transporte und für jegliche Art von Transportfällen kleiner als eine Lkw-Ladung,
- die Nutzung automatisierter multimodaler Umschlagsanlagen, gekoppelt an Systeme der Lagerhaltung, transportbedingter Pufferung und Mehrwertdienstleistung,
- technologische Entwicklungen beim Rollmaterial (automatisches Kuppeln, Selbstantrieb, Abschaffung der Pneumatik, Selbstdiagnosesysteme, Tracking und Tracing, niedrige Geräuschemissionen und Fahrwiderstände u. a.) sowie
- begleitende Informations-, Kommunikations- und Planungssysteme.

2) Forschungsbedarf

- a) Derzeit gibt es nur wenige Forschungsarbeiten, die sich im Güterverkehrsbereich mit Optionen und Nutzen des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen auseinandersetzen. Hier besteht ein deutlicher (Nachhol-)Bedarf, spezifische Einsatzkonzepte und Einsatzbereiche eines automatisierten Güterverkehrs aufzuzeigen, um beispielsweise Aussagen treffen zu können, welche Kosteneinsparungen oder Gewinnsteigerungen und welche Effekte hinsichtlich der Entwicklungsziele, speziell im Zusammenhang mit dem Erreichen von Klimazielen, erzielt werden können.
- b) Darüber hinaus bedarf es ausführlicher Überlegungen zu den Konsequenzen der Automatisierung für die Gestaltung von Transportabläufen und Logistik sowie zu der Frage, wie sich die Veränderung der Aufgaben des Fahrzeugführers auf die Fahrzeugausstattung auswirkt. Entsprechende Analysen müssen auch berücksichtigen, welche Anforderungen solche neuen Logistikkonzepte an Fahrzeuge, Infrastrukturen und Rahmenbedingungen des Verkehrsablaufes stellen und welche (zusätzlichen) Kosten dadurch entstehen. Dabei ist der Tatsache Rechnung zu tragen, dass Gütertransporte und Transportlogistik aus-

gesprochen vielfältige Organisationsformen aufweisen. Aufgabe zukünftiger wissenschaftlicher Forschung muss es daher sein, organisatorische Prozesse und Kostenstrukturen über Unternehmensgrenzen hinweg zu strukturieren, zu systematisieren und damit vergleichbar zu machen und die Auswirkungen auf die Gestaltung der Logistik und des Verkehrssystems als Ganzes aufzuzeigen und zu bewerten.

- c) Daran schließen sich Fragen nach der Akzeptanz automatisierten Gütertransports an. Es ist zu klären, welche Faktoren und Rahmenbedingungen die Akzeptanz eines automatisierten Güterverkehrs auf öffentlichen Straßen hemmen bzw. fördern – hier könnte man sich an Erfahrungen mit bestehenden Transportsystemen auf Betriebsgeländen orientieren (vgl. Flämig, 2015). Akzeptanz beschränkt sich dabei gleichwohl nicht nur auf die unternehmerischen Akteure entlang der Lieferkette, sondern betrifft auch Verkehrsteilnehmer allgemein (sowohl die automobilen als auch die nichtmotorisierten), die von einem automatisierten Güterverkehr in unterschiedlichen Formen betroffen sein werden.
- d) Neben Aspekten der Akzeptanz durch andere Verkehrsteilnehmer geht es des Weiteren um Veränderungen für die Berufsgruppe der Lkw-Fahrer, bei denen die Automatisierung von Fahrzeugen zu einem grundlegenden Wandel der Arbeitstätigkeiten führen wird – möglicherweise verschwindet der Beruf des Fernfahrers langfristig sogar vollständig. Seitens der Unternehmen wird zu definieren sein, welche Aufgaben und Tätigkeiten der Fahrer künftig übernehmen kann und soll. Bei einer Neudefinition wird eine besondere Herausforderung auch darin bestehen, ein zukunftsfähiges, attraktives Berufsbild aufzubauen (Mercedes-Benz next, 2014; Flämig, 2015).

6 Literaturverzeichnis

- Autonomes Fahren & Co. (AFC) (2014). Autonomes Fahren ab 2025 | VW, BMW, Daimler, Continental & Google, <http://www.autonomes-fahren.de/autonomes-fahren-ab-2025-vw-bmw-daimler-continental-google/>.
- Alessandrini, A., Campagna, A., Delle Site, P., Filippi, F. and Persia, L. (2015). Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities. In SIDT Scientific Seminar 2013, Transportation Research Procedia 5, 145–160.
- Anderson, J.M., Kalra N., Stanley, K.D., Sorensen, P., Samaras, C. and Oluwatola, O.A. (2016). Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers. Santa Monica, CA: RAND Corporation, http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-2.html.
- Bahamonde-Birke, F.J. (2016). Does Transport Behavior Influence Preferences for Electromobility? An Analysis Based on Person- and Alternative-Specific Error Components. In 14th World Conference on Transport Research, Shanghai, PR China, 10–15, July, 2016.
- Bierstedt, J., Gooze, A., Gray, C., Peterman, J., Raykin, L. and Walters, J. (2014). Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity. FP Think.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2014). Forschungsbericht FE-Nr. 96.980-2011; Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung der Ergebnisse. Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, Berlin. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile.
- Die Bundesregierung (BReg) (2011). Regierungsprogramm Elektromobilität.
- Bullis, K. (2011). How vehicle automation will cut fuel consumption. In MIT's Technology Review, October, 24.
- Burns, L.D., Jordan, W.C. and Scarborough, B.A. (2013). Transforming personal mobility. The Earth Institute at Columbia University, <http://sustainablemobility.ei.columbia.edu/files/2012/12/Transforming-Personal-Mobility-Jan-27-20132.pdf>.
- BVU, TNS Infratest and KIT (2014). Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung. Endbericht, Projekt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Information, FE 96.1002/2012.
- Cairns, S., Hass-Klau, C. and Goodwin, P.B. (1998). Traffic impact of highway capacity reductions: Assessment of the evidence. Landor Publishing.
- Cairns, S., Atkins, S. and Goodwin, P. (2002). Disappearing traffic? The story so far. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer 151(1), 13–22, London: Published for the Institution of Civil Engineers by Thomas Telford Services.
- Camagni, R., Gibelli, M.C. and Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. In Ecological economics, 40(2), 199–216.
- Chapin, T., Stevens, L., Crute, J., Crandall, J., Rokyta, A. and Washington, A. (2016). Envisioning Florida's Future: Transportation and Land Use in an Automated Vehicle World. Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Chen, T.D., Kockelman, K.M. and Hanna, J.P. (2016). Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. In 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- DHL (2016). Self-driving vehicles in logistic, Trend Report. http://www.dhl.com/en/about_us/logistics_insights/dhl_trend_research/self_driving_vehicles.html.
- Downs, A. (1962). The law of peak hour expressway congestion. In Traffic Quarterly 16(3), 393–409.
- DPD (2016). Autonomes Fahren in der Paketzustellung. The-senpapier, https://www.dpd.com/de/home/ueber_dpd/presse_center/presse_mitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/kommt_das_paket_bald_von_alleine_dpd_und_aachener_automobil_experten_praesentieren_zukunftsszenarien_zum_automaten_fahren.
- Dresner, K. and Stone, P. (2005). Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism. In Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, 471–477.
- Durantou, G. and Turner, M.A. (2011). The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. The American Economic Review 101(6), 2616–2652.
- e-mobil BW GmbH (2015). Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg. Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, Stuttgart.
- EPoSS – European Technology Platform on Smart Systems Integration (2015). European Roadmap Smart Systems for Automated Driving. Berlin, Germany, http://www.smart-systems-integration.org/public/documents/publications/EPoSS%20Roadmap_Smart%20Systems%20for%20Automated%20Driving_V2_April%202015.pdf.
- ERTRAC – European Road Transport Research Advisory Council (2015). Automated Driving Roadmap. Brussels: ERTRAC, http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id38/ERTRAC_Automated-Driving-2015.pdf.
- Fagnant, D.J. and Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. In Transportation Research Part A: Policy and Practice 77, 167–181.
- Flämig, H. (2015). Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B., Winner, H. (eds) Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, Springer Vieweg, Wiesbaden, 377–399.
- Fraedrich, E., Cyganski, R., Wolf, I. and Lenz, B. (2016): User Perspectives on Autonomous Driving. A Use-Case-Driven Study in Germany. Arbeitsberichte, Heft 187, Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Fraedrich, E., Beiker, S. and Lenz, B. (2015). Transition pathways to fully automated driving and its implications for the sociotechnical system of automobility. In European Journal of Futures Research 3(1), 1–11.
- Frank, L., Bradley, M., Kavage, S., Chapman, J. and Lawton, T.K. (2008). Urban form, travel time, and cost relationships with tour complexity and mode choice. In Transportation 35(1), 37–54.
- Gasser, T.M. (2015). Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge. In Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B. and Winner, H. (eds) Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, Springer Vieweg, Wiesbaden, 543–574.
- Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore. In Journal of Transport Geography 10(1), 29–38.
- Goodwin, P. and Noland, R.B. (2003). Building new roads really does create extra traffic: a response to Prakash et al. In Applied Economics 35(13), 1451–1457.
- Hass-Klau, C. (2014). The pedestrian and the city. Routledge, New York, USA and London, UK.
- Heinrichs, D. (2015): Autonomes Fahren und Stadtstruktur. In Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B. and Winner, H. (eds) Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer Vieweg, Wiesbaden, 219–239.
- Heinrichs, D. and Cyganski, R. (2015). Automated Driving: How It Could Enter Our Cities and How This Might Affect Our Mobility Decisions. In disP-The Planning Review 51(2), 74–79.
- Henning, A., Plohr, M., Özdemir, E., Hepting, M., Keimel, H., Sanok, S., Sausen, R., Pregger, T., Seum, S., Heinrichs, M., Müller, S., Winkler, C., Neumann, T., Seebach, O., Matthias, V., Vogel, B. (2016). The DLR Transport and the Environment Project – Building competency for a sustainable mobility future. In Proceedings of the 4th International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC-4). DLR-Forschungsbericht 2015-38, 192–198.
- Hoogendoorn, R., van Arem, B. and Hoogendoorn, S. (2014). Automated Driving, Traffic Flow Efficiency, and Human Factors: Literature Review. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2422, 113–120.
- Janssen, R., Zwijnenberg, H., Blankers, I. and de Kruijff, J. (2015). Truck Platooning. Driving the future of transportation. Februar 2015, TNO Whitepaper, <https://www.tno.nl/en/about>.

tno/news/2015/3/truck-platooning-driving-the-future-of-transportation-tno-whitepaper/.

Kraftfahrtbundesamt (KBA) (n. d.). Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html.

Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., Kranke, F. and Helbing, D. (2007). Jam-avoiding adaptive cruise control (ACC) and its impact on traffic dynamics. In *Traffic and Granular Flow '05*, 633-643, Springer Berlin Heidelberg.

Klaußner, S. and Irtenkauf, P. (2013). Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen – Stand der Technik, Umsetzung, Auswirkungen auf den Verkehrsfluss. Studienarbeit 21, Universität Stuttgart.

Krueger, R., Rashidi, T.H. and Rose, J.M. (2016). Preferences for shared autonomous vehicles. In *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 69(1), 343–355.

Kummerle, R., Hahnel, D., Dolgov, D., Thrun, S. and Burgard, W. (2009). Autonomous driving in a multi-level parking structure. In *12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 3395–3400.

Lenz, B. and Fraedrich, E. (2015). Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung. In Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B. and Winner, H. (eds) *Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 175–196.

Levin, M.W., Li, T., Boyles, S.D. and Kockelman, K.M. (2016). A general framework for modeling shared autonomous vehicles. In *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Li, B. and Shao, Z. (2015). A unified motion planning method for parking an autonomous vehicle in the presence of irregularly placed obstacles. In *Knowledge-Based Systems* 86, 11–20.

Litman, T. (2014). Autonomous Vehicle Implementation Predictions. In *Victoria Transport Policy Institute* 28.

Lu, X-Y. and Shladover, S.E. (2011). Automated truck platoon control. Univ. California, Berkeley, CA, USA, California PATH Res. Rep. UCB-ITS-PRR-2011-13.

Lyft (2016). Meet Lyft Line. <https://www.lyft.com/line>.

Maciejewski, M. and Bischoff, J. (2016). Congestion effects of autonomous taxi fleets. In *VSP working paper*, 16–11, <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.

McKinsey & Company (2016). Delivering Change. Die Transformation des Nutzfahrzeugsektors bis 2025. *Advanced Industries*, September 2016, <http://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/delivering-change-the-transformation-of-commercial-transport-by-2025>.

Mercedes-Benz next (2014). The Long-Haul Truck of the Future. *Magazin für Innovation, Technologie, Mobilität*, <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/innovation/the-long-haul-truck-of-the-future/>.

Mitchell, W.J., Boronni-Bird, E. and Burns, L.D. (2010). Reinventing the Automobile. *Personal Urban Mobility for the 21st Century*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Müller, S. (2012). Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße Telematik – Eine Methodenarbeit und Beispielumsetzung mit Cooperative Adaptive Cruise Control Systemen im Güterverkehr. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

National Highway Traffic Safety Administration (2008). National Motor Vehicle Crash Causation Survey. Report DOT HS 811 059, U.S. Department of Transportation.

Nowak, G., Maluck, J., Stürmer, C. and Pasemann, J. (2016). The era of digitized trucking. Transforming the logistic value chain. *PwC Strategy&*, <http://www.strategyand.pwc.com/reports/era-of-digitized-trucking>.

OECD/ITF & CPB (2015). Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic. In *International Transportation Forum*, Paris, http://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf.

Ortúzar, J. de D. and Willumsen, L.G. (2011). *Modelling Transport*. Fourth Edition, John Wiley and Sons, Chichester.

Peterson, R.W. (2012). New Technology – Old Law: Autonomous Vehicles and California's Insurance Framework. *Santa Clara L. Rev.* 52, 101–153.

Pinjari, A.R., Augustin, B. and Menon, N. (2013). Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles: An Assessment. Centre for Urban Transportation Research, Florida, USA.

PWC (2015): Connected Car Study 2015. Racing with autonomous cars and digital innovation.

Roland Berger (2016). Automated Trucks. The next big disruptor in the automotive industry? Chicago/München, https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_automated_trucks_20160517.pdf.

Schakel, W.J., van Arem, B. and Netten, B.D. (2010). Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability. In *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 759–764.

Schulz, M. and Renn, O. (2009). *Das Gruppendelphi: Konzept und Fragebogenkonstruktion*. Springer-Verlag, Wiesbaden, BRD.

Shladover, S., Su, D. and Lu, X-Y. (2012). Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2324, 63–70.

Silberg, G., Wallace, R., Matuszak, G., Plessers, J., Brower, C. and Subramanian, D. (2012). Self-driving cars: The next revolution. In *White paper*, KPMG LLP & Center of Automotive Research.

Smith, B.W. (2012). Managing Autonomous Transportation Demand. In *Santa Clara Law Review* 52(4), 1401–1422.

Statistisches Bundesamt (2015). Verkehrsunfälle 2014. In *Fachserie* 8(7), Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

Tampère, C.M., Hoogendoorn, S.P. and van Arem, B. (2009). Continuous traffic flow modeling of driver support systems in multiclass traffic with intervehicle communication and drivers in the loop. In *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 10(4), 649–657.

Thomson, J.W. (1972). Methods of traffic limitation in urban areas. No. 3 Work Paper.

Train, K.E. (1979). A comparison of the predictive ability of mode choice models with various levels of complexity. In

Transportation Research Part A: General 13(1), 11–16.

Trommer, S., Kolarova, V., Fraedrich, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T., Lenz, B. and Phleps, P. (2016). Autonomous driving: The impact of vehicle automation on mobility behavior. *Institut für Mobilitätsforschung (ifmo)*.

Tsugawa, S., Jeschke, S. and Shladovers, S.E. (2016). A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings. In *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 1(1), 68–77.

Tsugawa, S. (2014). Results and Issues of an Automated truck Platoon within the Energy ITS Project. In *IEEE Intelligence Vehicles Symposium*, June 8–11, 2014, Dearborn, Michigan, 642–647.

Uber (2016). UberPool. Teile deine Fahrt mit anderen. <https://www.uber.com/de/ride/uberpool/>.

van den Berg, V.A.C. and Verhoef, E.T. (2016). Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity. In *Transportation Research Part B: Methodological* 94, 43–60.

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) (2015). *Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. Berlin, <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>.

Wachenfeld, W., Winner, H., Gerdes, C.G., Lenz, B., Maurer, M., Beiker, S., Fraedrich, E. and Winkle, T. (2015). Use-Cases des autonomen Fahrens. In Maurer, M., Gerdes, J.C., Lenz, B. and Winner, H. (eds) *Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 9–37.

Yap, M.D., Correia, G. and van Arem, B. (2016). Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips. In *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94, 1–16.

ZF Friedrichshafen AG (2016). *ZF – Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0. Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt*. <http://www.zf-zukunftsstudie.de/zukunftsstudie-2016/>.

ZF Friedrichshafen AG (2014). *ZF – Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0. Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt*. Friedrichshafen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Stufen der Fahrzeugautomatisierung (modifizierte Darstellung, in Anlehnung an e-mobil BW „Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch.“)	14	Abbildung 3.10: Relativer Rückgang der Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs unter den drei Umsetzungsszenarien des automatisierten Straßengüterverkehrs für das Jahr 2035 im Vergleich zu 2010	41
Abbildung 1.2: Stufen der Fahrzeugautomatisierung (modifizierte Darstellung, in Anlehnung an e-mobil BW „Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch.“)	16	Abbildung 3.11: Relativer Rückgang der Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs nach Segmenten je Szenario für das Jahr 2035 im Vergleich zum Jahr 2010	42
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Auswirkungen auf die Fahrleistung im Straßenverkehr und die daraus resultierenden Umwelteffekte durch die Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge in die Privatflotte und in die Flotte neuer Mobilitätskonzepte	32	Abbildung 3.12: Schematische qualitative Darstellung der möglichen Auswirkungen der Berücksichtigung vollautomatisierter Fahrzeuge in der Privatflotte und für neue Mobilitätskonzepte auf die CO ₂ -Gesamtemissionen im Straßenverkehr	43
Abbildung 3.2: Marktanteile der vollautomatisierten Fahrzeuge der unterschiedlichen Fahrzeugklassen an den Neuzulassungen	34	Abbildung 3.13: Veränderung der CO ₂ -Emissionen aufgrund der Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge	44
Abbildung 3.3: Marktanteile der vollautomatisierten Fahrzeuge an der Bestandsflotte im Szenariojahr 2035 nach Fahrzeugklassen	35	Abbildung 3.14: Veränderung der CO ₂ -Emissionen in unterschiedlichen Konstellationen (unter Berücksichtigung von Szenario 1 und 2) gegenüber Referenzszenario	46
Abbildung 3.4: Relativer Anstieg der Fahrleistung auf der Straße in Szenario 1	36	Abbildung 4.1: Tätigkeitsbereich der Befragungsteilnehmer	53
Abbildung 3.5: Relative Veränderung der Modal-Split-Werte (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) in Szenario 1 gegenüber einem Szenario ohne vollautomatisierte Fahrzeuge	36	Abbildung 4.2: Thematisierung von automatisiertem Fahren auf kommunaler Ebene	53
Abbildung 3.6: Modal-Split-Anteile (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) des vollautomatisierten Car-Poolings [in Prozent]	38	Abbildung 4.3: Ziele der Stadt- und Verkehrsplanung aus Sicht der kommunalen Akteure	54
Abbildung 3.7: Relative Veränderung der Modal-Split-Werte (bezogen auf das Verkehrsaufkommen) in Szenario 2 gegenüber Szenario 1	38	Abbildung 4.4: Erwartete Wirkungen des automatisierten Fahrzeugen auf die Ziele der Stadt- und Verkehrsplanung	55
Abbildung 3.8: Relativer Anstieg der Fahrleistung auf der Straße in Szenario 2 gegenüber Szenario 1	39	Abbildung 4.5: Beitrag von automatisierten Fahrzeugen allgemein zum Erreichen der Ziele der Stadt- und Verkehrsplanung	56
Abbildung 3.9: Relativer Anstieg der Fahrleistung auf der Straße in Szenario 2	39		

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der hier beschriebenen Szenarien des automatisierten Fahrens	33
Tabelle 4.1: Szenarien zur Stadt von morgen unter dem Einfluss eines automatisierten Verkehrssystems (Heinrichs, 2015: 227)	51
Tabelle 4.2: Von Stadt- und Verkehrsplanern erwarteter Planungsbedarf für den Fall der Einführung des automatisierten Fahrens	57

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
AP	vollautomatisiertes Car-Pooling
BEV	Battery Electric Vehicle
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C2X	Car-to-everything
d. h.	das heißt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
e. g.	exempli gratia (zum Beispiel)
EV	Electric Vehicle
ggf.	gegebenenfalls
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
Lkw	Lastkraftwagen
Mio.	Millionen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
n. d.	no Date
NMIV	nichtmotorisierter Individualverkehr
ÖV	öffentlicher Verkehr
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PAS	privates autonomes Stadtauto
PHEV	Plug-in-hybrid Electric Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
PP	Parkpilot
RBIC	Reservation Based Intersection Control
SAV	Shared Autonomous Vehicle
sog.	sogenannt
s. u.	siehe unten
u. a.	unter anderem
USA	United States of America
usw.	und so weiter
VCPT	Vicious oder Virtuous Circle of Public Transport
VEU	Verkehrsentwicklung und Umwelt
Vgl.	vergleiche
VOD	Vehicle on Demand
VoT	(subjective) Value of Time
VZF	vollautomatisches Zulieferfahrzeug
V2X	Vehicle-to-everything
V2V	Vehicle-to-vehicle
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
€	Euro

Publikationen der e-mobil BW



Wissenstransfer leicht gemacht –
alle unsere Studien rund um die Themen Elektromobilität
und Brennstoffzellentechnologie sowie Broschüren, Flyer und
weitere Veröffentlichungen stellen wir kostenlos als PDF oder
als E-Paper zur Verfügung.
www.e-mobilbw.de (Service/Publikationen)



Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Autoren:

Eva Fraedrich, Lars Kröger, Francisco Bahamonde-Birke,
Ina Frenzel, Gernot Liedtke, Stefan Trommer, Barbara Lenz,
Dirk Heinrichs

Redaktion und Koordination der Studie

e-mobil BW GmbH
Isabell Knüttgen
Dr. Wolfgang Fischer
Malte Schmeck

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: Bosch

Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden sich auf der jeweiligen Seite.

Druck

Karl Elser Druck GmbH
Kißlingweg 35
75417 Mühlacker

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45
70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0
Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

August 2017

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



www.e-mobilbw.de

e-mobil BW GmbH

Landesagentur für Elektromobilität und
Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de

