



Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und ver- netzten Fahrens im Straßenver- kehr

Karlsruhe, 08. Januar 2019

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

Breslauer Str. 48

76139 Karlsruhe, Germany

<http://www.isi.fraunhofer.de>

Dr. Michael Krail

Phone: +49 721 6809 429

Fax: +49 721 77 6809 135

michael.krail@isi.fraunhofer.de

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer ISI

Michael Krail, Jens Hellekes, Uta Schneider, Elisabeth Dütschke

Fraunhofer IML

Maximilian Schellert, David Rüdiger, Alina Steindl

PTV AG

Inga Luchmann

PTV Transport Consult GmbH

Volker Waßmuth

TU Hamburg-Harburg – VPL

Heike Flämig

M-Five

Wolfgang Schade, Simon Mader

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	9
1.1 <i>Ausgangslage und Ziele der Studie</i>	9
1.2 <i>Vorgehensweise der Studie</i>	11
1.3 <i>Betrachtungsrahmen und begriffliche Definitionen</i>	14
1.3.1 Fahrzeugautomatisierung und Automatisierungsstufen.....	15
1.3.2 Vernetztes Fahren	17
2 Technoökonomische Analyse	21
2.1 <i>Technologien des automatisierten Fahrens</i>	23
2.1.1 Auswahl relevanter Fahrerassistenztechnologien.....	23
2.1.2 Zuordnung von Technologien zu Automatisierungsstufen	26
2.1.3 Zuordnung von Technologiebündeln zu Fahrzeugsegmenten.....	28
2.1.4 Komponenten des automatisierten Fahrens	32
2.1.5 Ableitung einer Roadmap	33
2.2 <i>Technologiekosten und Degressionspotenziale</i>	37
3 Akzeptanz des automatisierten Fahrens	41
3.1 <i>Zentrale Erkenntnisse der Analyse</i>	42
4 Verkehrliche Wirkungen der Automatisierung	47
4.1 <i>Ursachen potenzieller Verhaltensänderungen</i>	47
4.2 <i>Änderungen der Einflussgrößen auf das Verkehrsverhalten</i>	50
4.2.1 Transport- bzw. Reisekosten.....	50
4.2.2 Transportzeiten und Kapazität der Straßeninfrastruktur	55
4.2.3 Wahrnehmung des Zeitverlusts im Verkehr	59
4.2.4 Neue Nutzergruppen	59
4.2.5 Neue Mobilitätskonzepte durch automatisiertes und vernetztes Fahren	61
4.2.6 Räumlicher Einsatz des automatisierten Fahrens.....	64
4.2.7 Wechselwirkungen von automatisiertem, vernetztem und elektrischem Fahren	65
4.3 <i>Mobilitätsszenarien</i>	67
4.3.1 Szenario 1 - „Welt des Fahrzeugbesitzes“	71
4.3.2 Szenario 2 - „Welt der Mobilitätsdienstleistungen“	76
5 Diffusion automatisierter Fahrzeuge	83

5.1	<i>Vorgehensweise bei der Abschätzung der Diffusion</i>	83
5.2	<i>Eingangsgroßen des Diffusionsmodells</i>	85
5.2.1	Definition der Fahrzeugsegmente	85
5.2.2	Fahrzeugbestand und Neuzulassungen	87
5.2.3	Mehrpriisbereitschaften	93
5.3	<i>Diffusion automatisierter Fahrzeuge in beiden Szenarien</i>	97
5.3.1	Entwicklung der Kosten der Automatisierung	97
5.3.2	Szenario 1 - Welt des Fahrzeugbesitzes.....	100
5.3.3	Szenario 2 - Welt der Mobilitätsdienstleistungen	110
5.3.4	Vergleich der Szenarien	119
6	Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Treibhausgase und den Endenergieverbrauch	123
6.1	<i>Primäre Potenziale - Energieeffizienz automatisierter und vernetzter Fahrzeuge</i>	125
6.1.1	Abhängigkeit der Potenziale von Verkehrssituationen	125
6.1.2	Primäre Potenziale pro Technologie	127
6.1.3	Berechnung primärer Potenziale pro Automatisierungsstufe.....	130
6.1.4	Primäre Potenziale pro Szenario.....	133
6.2	<i>Sekundäre Effekte - Wirkungen durch Änderungen des Mobilitätsverhaltens</i>	137
6.3	<i>Gesamtwirkungen auf Treibhausgase und den Endenergieverbrauch</i>	147
7	Schlussfolgerungen	153
8	Anhang	159
8.1	<i>Abkürzungen</i>	159
8.2	<i>Glossar zu relevanten Technologien</i>	162
8.3	<i>Akzeptanzanalyse</i>	166
8.3.1	Der Akzeptanzbegriff	166
8.3.2	Vorgehensweise	167
8.3.3	Stand der Forschung zur Akzeptanz des automatisierten Fahrens	167
8.4	<i>Primäre Potenziale einzelner Technologien</i>	186
8.4.1	Automatisiertes Eco-Driving mit Vernetzung.....	186
8.4.2	Park-Technologien	187
8.4.3	Baustellenassistent und Lane Keeping Assist	188
8.4.4	Highway-Technologien	188
8.4.5	Onboard-Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	189
8.4.6	Predictive Cruise Control (PCC).....	191
8.4.7	Platooning.....	192
8.4.8	Traffic Jam-Technologien	194
8.4.9	Urban Pilot.....	195
	Literaturverzeichnis	197

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorgehensweise der Untersuchung	12
Abbildung 2:	5 Stufen der Automatisierung	16
Abbildung 3:	Zusammenhänge Komponenten, Technologien, Automatisierungsstufen	22
Abbildung 4:	Entscheidungsbaum zur Filterung relevanter Technologien	25
Abbildung 5:	Evolutionspfad der Technologien	28
Abbildung 6:	Zugrundeliegende Technologieausstattung verschiedener Fahrzeugklassen bei Pkw	30
Abbildung 7:	Zugrundeliegende Technologieausstattung verschiedener Fahrzeugklassen bei Lkw und Bussen	31
Abbildung 8:	Zuordnung der Komponenten zu Technologien (Quelle: Eigene Darstellung)	33
Abbildung 9:	Roadmap Pkw für Fahrerassistenztechnologien und Automatisierungsstufen	35
Abbildung 10:	Lernraten für relevante Komponenten	38
Abbildung 11:	Kostendegressionseffekte pro Stückzahl am Beispiel eines LiDAR	39
Abbildung 12:	Preisspannen für die Ausstattung eines Pkw (Oberklasse) je Stufe	40
Abbildung 13:	Betriebskostenvergleich pro Mode mit und ohne Automatisierung	51
Abbildung 14:	Verteilung der Pkw-Verkehrssituation in Deutschland je Bundesland	57
Abbildung 15:	Pkw - Anteile der Antriebsarten am Bestand bis 2050	69
Abbildung 16:	LNF - Anteile der Antriebsarten am Bestand bis 2050	70
Abbildung 17:	Busse - Anteile der Antriebsarten am Bestand bis 2050	70
Abbildung 18:	Zusammenspiel der urbanen Logistik	74
Abbildung 19:	Zusammenspiel der Transporte im Straßengüterfernverkehr	75
Abbildung 20:	Hochautomatisierte City-Shuttle versorgen zukünftig den Ballungsraum	79
Abbildung 21:	Zusammenspiel von City- und Konsolidierungs-Hubs der Unternehmen	80
Abbildung 22:	Schematische Darstellung des Diffusionsmodells	84
Abbildung 23:	Berechneter Aufpreis pro Pkw für die Ausstattung mit Stufe 1 bis 5 bei Markteinführung	98
Abbildung 24:	Entwicklung des Aufpreises pro Pkw für die Ausstattung mit Stufe 1 bis 5 am Beispiel der Pkw-Oberklasse	99
Abbildung 25:	Berechneter Aufpreis pro Nutzfahrzeug für die Ausstattung mit Stufe 1 bis 5 bei Markteinführung	100
Abbildung 26:	Pkw Kleinwagen/Kompaktklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	102
Abbildung 27:	Pkw Mittelklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	103
Abbildung 28:	Pkw-Oberklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	104
Abbildung 29:	Leichte Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	105

Abbildung 30:	Schwere Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	106
Abbildung 31:	Stadtbusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	107
Abbildung 32:	Reisebusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1	107
Abbildung 33:	Kleinbusse - Anteile der Automatisierungsstufen bis 2050	108
Abbildung 34:	Pkw-Kleinwagen/Kompaktklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	111
Abbildung 35:	Pkw-Mittelklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	112
Abbildung 36:	Pkw-Oberklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	113
Abbildung 37:	Leichte Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	114
Abbildung 38:	Schwere Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	115
Abbildung 39:	Stadtbusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	116
Abbildung 40:	Reisebusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	117
Abbildung 41:	Kleinbusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2	118
Abbildung 42:	Dekomposition der THG-Wirkung nach primären und sekundären Effekten	124
Abbildung 43:	Vererbung der Reduktionspotenziale	128
Abbildung 44:	THG- und EEV-Reduktionspotenziale aus primären Effekten in Szenario 1	134
Abbildung 45:	THG- und EEV-Reduktionspotenziale aus primären Effekten in Szenario 2	135
Abbildung 46:	THG-Einsparungen aus primären Effekten pro Segment in Szenario 1	135
Abbildung 47:	THG-Einsparungen aus primären Effekten pro Segment in Szenario 2	136
Abbildung 48:	Reduktion der Kraftstoffkosten durch primäre Effekte in beiden Szenarien gegenüber REF	140
Abbildung 49:	Reduktion der Vollkosten durch Rückgang der Fahrerkosten in beiden Szenarien gegenüber REF	141
Abbildung 50:	THG-Einsparungen durch Änderungen des Modal Split in Szenario 1	145
Abbildung 51:	THG-Einsparungen durch Änderungen des Modal Split in Szenario 2	146
Abbildung 52:	Gesamtwirkung des Automatisierten und Vernetzten Fahrens pro Szenario auf die THG Emissionen	148
Abbildung 53:	Gesamte THG-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 1	149
Abbildung 54:	Gesamte THG-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 2	149
Abbildung 55:	Gesamte EEV-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 1	151
Abbildung 56:	Gesamte EEV-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 2	152
Abbildung 57:	Betrachtungsebenen der Akzeptanz	166
Abbildung 58:	Erscheinungsjahre der betrachteten Arbeiten	168
Abbildung 59:	Struktur der identifizierten Arbeiten	169

Abbildung 60: Einschätzung zur zeitlichen Entwicklung automatisierten und autonomen
Fahrens 183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zuordnung von relevanten Fahrerassistenztechnologien zu Automatisierungsstufen.....	26
Tabelle 2:	Kostenvergleich von Pkw-Mobilitätskonzepten mit und ohne AF	52
Tabelle 3:	Anteile der Kostenarten an den Vollkosten bei Nutzfahrzeugen	54
Tabelle 4:	Anteile der Kostenarten an den Vollkosten bei Schienenfahrzeugen.....	55
Tabelle 5:	Anteile der Fahrleistungen nach Straßentyp.....	58
Tabelle 6:	Verteilung der Verkehrssituationen auf Straßen- und Pkw-Segmente	58
Tabelle 7:	Nutzungsformen entsprechend Fahrzeugkategorie und Besitzform.....	63
Tabelle 8:	Entwicklungstendenzen des Personenverkehrs im Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes".....	73
Tabelle 9:	Entwicklungstendenzen des Güterverkehrs im Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes".....	75
Tabelle 10:	Entwicklungstendenzen des Personenverkehrs im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen".....	78
Tabelle 11:	Entwicklungstendenzen des Güterverkehrs im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen".....	81
Tabelle 12:	Entwicklung der deutschen Neuzulassungen in REF und in Szenario 1	88
Tabelle 13:	Entwicklung der deutschen Neuzulassungen in Szenario 2	89
Tabelle 14:	Entwicklung der weltweiten Neuzulassungen im REF und Szenario 1.....	90
Tabelle 15:	Entwicklung der weltweiten Neuzulassungen in Szenario 2.....	90
Tabelle 16:	Markteinführung der Automatisierungsstufen pro Fahrzeugsegment im Modell.....	92
Tabelle 17:	Mehrpreisbereitschaft bei Pkw pro Segment und Automatisierungsstufe in REF und Szenario 1	93
Tabelle 18:	Mehrpreisbereitschaft bei Pkw pro Segment und Automatisierungsstufe in Szenario 2	94
Tabelle 19:	Mehrpreisbereitschaft bei Lkw und Bus pro Segment und Automatisierungsstufe in REF und Szenario 1	95
Tabelle 20:	Mehrpreisbereitschaft bei Lkw und Bus pro Segment und Automatisierungsstufe in Szenario 2.....	96
Tabelle 21:	Fahrzeugbestand und Anteile der Segmente für REF und Szenario 1.....	101
Tabelle 22:	Anteil automatisierter Fahrzeuge am Bestand in Szenario 1.....	109
Tabelle 23:	Absolute Fahrzeugbestände in Fahrzeugtypen und relative Anteile der Segmente in Szenario 2.....	110
Tabelle 24:	Anteil automatisierter Fahrzeuge am Bestand in Szenario 2.....	119
Tabelle 25:	Veränderung der Fahrzeugbestände nach Fahrzeugtypen in Szenarien	120
Tabelle 26:	Anteil der Automatisierung nach Fahrzeugtyp pro Szenario	121
Tabelle 27:	Fahrzeugbestände mit Automatisierungstechnologien nach Fahrzeugtypen und Automatisierungsstufen pro Szenario	122
Tabelle 28:	Primäre Potenziale des ACC für Pkw	129

Tabelle 29:	Primäre Potenziale des ACC für Lkw und Busse.....	130
Tabelle 30:	Primäre Potenziale im Segment Pkw-Mittelklasse für Stufe 5.....	132
Tabelle 31:	Primäre Potenziale im Segment Pkw-Mittelklasse und SNF	133
Tabelle 32:	Änderung der Fahrleistungen im Personenverkehr gegenüber REF.....	143
Tabelle 33:	Änderung der Fahrleistungen im Güterverkehr gegenüber REF	144
Tabelle 34:	Gesamte Einsparungen an THG-Emissionen durch die Automatisierung.....	150
Tabelle 35:	Gesamte Einsparungen am EEV durch die Automatisierung	152
Tabelle 36:	Primäre Potenziale des Automatisierten Eco-Driving mit Vernetzung.....	187
Tabelle 37:	Primäre Potenziale der Highway-Technologien für Pkw.....	189
Tabelle 38:	Primäre Potenziale der Highway-Technologien für Lkw und Busse	189
Tabelle 39:	Primäre Potenziale des Onboard-Navigationssystems mit Echtzeit- Rerouting für Pkw.....	190
Tabelle 40:	Primäre Potenziale des Onboard-Navigationssystems mit Echtzeit- Rerouting für Lkw	191
Tabelle 41:	Primäre Potenziale des PCC für Pkw, Lkw und Busse.....	192
Tabelle 42:	Primäre Potenziale des Platooning für Pkw	193
Tabelle 43:	Primäre Potenziale des Platooning für Lkw und Reisebusse	194
Tabelle 44:	Primäre Potenziale der Traffic Jam-Technologien.....	195
Tabelle 45:	Primäre Potenziale der Traffic Jam-Technologien für Lkw und Busse	195

Zusammenfassung

Der Trend zunehmender Digitalisierung zeichnet sich in besonderer Weise auch im Verkehrssystem ab. Während fahrerlose Transportsysteme in der Industrie seit mehreren Dekaden bereits in Anwendung sind und auch fahrerlose, schienengebundene Verkehrssysteme weltweit seit langem im Einsatz sind, erfährt die Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr seit einigen Jahren einen Boom. Waren vor wenigen Jahren nur Fahrerassistenzsysteme und damit das assistierte Fahren (Stufe 1) oder teil-automatisierte Fahren (Stufe 2) in Straßenfahrzeugen verfügbar, hat man heute bereits den Sprung hin zum hoch-automatisierten Fahren (Stufe 3) auf der Straße vollzogen.

In der Fachliteratur wird das automatisierte und vernetzte Fahren oft als disruptive Technologie oder der Trend zur Automatisierung als disruptiv bezeichnet. Mit dieser Einschätzung geht oft die Vorstellung eines Wandels des Verkehrssystems einher, in manchen Visionen lassen sich gar durch die vollständige Automatisierung des Verkehrs viele Probleme unseres heutigen Verkehrssystems lösen: kostengünstiger, schneller und flexibler Verkehr ohne Staus, mit hundertprozentiger Erreichbarkeit, ohne Unfälle und mit deutlich geringeren Treibhausgas (THG) - und Luftschadstoffemissionen. Ob diese ideale Vision zukünftig tatsächlich eintritt und wann man mit diesen Effekten rechnen kann, darüber sind sich die Experten aber nicht einig. Angesichts dieser Ausblicke und des aktuell zu beobachtenden Trends zur Automatisierung ist ein systemischer Blick auf diese Technologie bereits heute unerlässlich. Im Hinblick auf die ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung für den Sektor Verkehr bis zum Jahr 2030 und 2050 ist eine Abschätzung der Technikfolgen der Automatisierung und Vernetzung wichtig, zum einen wegen potenzieller, direkter Auswirkungen der Technologie auf die THG-Emissionen und Endenergieverbrauch (EEV) zum anderen, um mögliche unerwünschte Reboundeffekte rechtzeitig zu erkennen. Daraus ergeben sich einige zentrale Fragestellungen im Zusammenhang mit der Klimawirkung der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr:

- Ist das automatisierte und vernetzte Fahren auf Straßen in Deutschland bis 2050 technisch machbar?
- Wann wird es möglich sein, fahrerlos in Straßenfahrzeugen unterwegs zu sein?
- Was wird die Ausstattung der Fahrzeuge mit der benötigten Sensorik, Aktorik und Software den Nutzer kosten?
- Wird die Automatisierung und Vernetzung von den heutigen und zukünftigen Kunden akzeptiert und wie kann ein potenzieller Markthochlauf aussehen?
- Welche neuen Mobilitätsdienstleistungen werden durch die Automatisierung in Kombination mit einer Vernetzung der Fahrzeuge positiv beeinflusst?
- Und letztlich: Wie wirkt sich die Technologie auf das Verkehrsverhalten der Menschen bzw. das Verkehrssystem der Zukunft als Ganzes in Deutschland aus und welche Auswirkungen haben diese Änderungen auf die THG-Emissionen und den EEV im Verkehr?

Für die Quantifizierung der Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr in Deutschland bis zum Jahr 2050 sollte die vorliegende Studie Antworten auf alle gestellten Fragen finden. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten, betrachtet die vorliegende Studie die Auswirkungen der Automatisierung und Vernetzung auf die THG-Emissionen und den EEV nicht im eingeschwungenen Zustand mit 100% fahrerlosen und vernetzten Fahrzeugen. Vielmehr wird anhand einer Potenzialanalyse eine bis zum Jahr 2050 realistische Entwicklung der Technologie im Straßenverkehr in Deutschland unter den heutigen und zukünftigen Rahmenbedingungen ermittelt und somit der Prozess der Transition hin zum automatisierten und vernetzten Fahren gezeigt. Der Betrachtungsrahmen ist damit der Zeitraum von 2015 bis zum Jahr 2050 für die folgenden Fahrzeugsegmente:

- Pkw: Kleinwagen/Kompaktklasse, Mittelklasse und Oberklasse,
- Lkw: schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) < 3,5 t zGG,
- Bus: Stadtbusse, Reisebusse und Kleinbusse.

Die Grundlage für die Bewertung der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens stellt eine detaillierte und umfangreiche Auswertung der relevanten, deutschen und englischsprachigen Fachliteratur zum Thema dar. Die Erkenntnisse der Literaturrecherche flossen dabei zunächst in eine Roadmap des automatisierten und vernetzten Fahrens bis zum Jahr 2050. Die Roadmap stellt dabei die evolutionäre Entwicklung der Automatisierung über fünf Stufen der Automatisierung dar und verbindet die Stufen mit den dafür benötigten Fahrerassistenzsystemen. Die Ebene der Fahrerassistenzsysteme wird dabei benötigt, weil es für einzelne Fahrerassistenzsysteme bereits Abschätzungen der Wirkungen auf die Energieeffizienz und damit die THG-Emissionen und den EEV gibt. Auf Ebene der Automatisierungsstufen gibt es anhand von Feldtests auf Autobahnen erste Auswertungen auf die Energieeffizienz bis maximal zur Automatisierungsstufe 3 (Etemad 2017). Neben der vorrangig für klassische Fahrzeugkonzepte zu erwartenden evolutionären Entwicklung gibt es besonders im Bereich des ÖPNV noch neue Fahrzeugkonzepte, bei denen vermutlich keine evolutionäre Entwicklung über die fünf Stufen der Automatisierung zu erwarten ist. Diese sind bereits heute komplett ohne Fahrer konzipiert, spielen auch dann erst ihre Vorteile hinsichtlich Flexibilität aus und werden daher nur ab Stufe 5 eine Rolle spielen.

Die Evaluierung der Fachliteratur wurde genutzt, um den einzelnen Automatisierungsstufen für alle betrachteten Fahrzeugsegmente eine Kombination an Fahrerassistenztechnologien zuzuordnen. Diese Zuordnung ergibt sich aus der per Definition der für die Stufen notwendigen Funktionen. Darüber hinaus ermöglicht diese Zuordnung eine genauere Einschätzung der möglichen Zeitpunkte der Markteinführung. Für die Abschätzung des Markthochlaufs wurde in dieser Studie anhand der Roadmap der früheste Markteintritt des vollautomatisierten Fahrens (Stufe 4) ab dem Jahr 2025, für das fahrerlose und vernetzte Fahren (Stufe 5) ab dem Jahr 2035 angenommen. Auf Grund der hohen Produktionskosten und resultierenden Aufpreise für diese beiden Automatisierungsstufen werden dabei zunächst die Segmente der Pkw Oberklasse, der schweren Nutzfahrzeuge und der Reisebusse und

damit die klassischen Technologieträger bedient. Die Studie geht von einer verzögerten Markteinführung dieser Automatisierungsstufen in der Pkw Mittelklasse und den anderen Pkw, Lkw und Bussegmenten aus.

Da die Aufgabe der Studie darin bestand, realistische Potenziale der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr in Deutschland bis zum Jahr 2050 zu ermitteln, wurden für die Studie die heutigen und zukünftigen Produktionskosten der Automatisierungssysteme abgeschätzt, um die Wirkung auf die Nachfrage einschätzen zu können. Dazu wurden anhand der Fachliteratur und der Befragung von Experten aus der Industrie und Forschung im ersten Fachworkshop zur Studie die Produktionskosten und die Lernraten für einzelne Systemkomponenten der Sensorik, Aktorik und der Software abgeschätzt. Die resultierenden Skaleneffekte eines Markthochlaufs konnten somit für alle Automatisierungsstufen mittels Lernkurven nachgebildet werden.

Um die Nachfrage nach den einzelnen Automatisierungsstufen abbilden zu können, hat die Studie anhand einer Akzeptanzanalyse die generelle Einschätzung der Kunden zur Technologie zusammengefasst und daraus resultierende Mehrpreisbereitschaften für die einzelnen Fahrzeugsegmente abgeleitet. Diese unterscheiden sich deutlich zwischen den privat und kommerziell genutzten Straßenfahrzeugen, da im kommerziellen Bereich ab Automatisierungsstufe 4 bereits die Kosten für den Fahrer reduziert werden können und ab Stufe 5 gänzlich wegfallen. Daraus ergeben sich Vorteile bei einer Vollkostenbetrachtung, die in höheren Bereitschaften zur Bezahlung von Aufpreisen resultieren.

Die Verknüpfung des Angebots bestimmter Automatisierungsstufen für die Fahrzeugsegmente der Pkw, Lkw und der Busse mit der potenziellen Nachfrage konnte über ein Diffusionsmodell gemacht werden. Das Ergebnis ist ein potenzieller Markthochlauf der einzelnen Automatisierungsstufen pro Fahrzeugsegment über den Zeitraum 2015 bis 2050 in Form von Anteilen am gesamten Fahrzeugbestand. Die im Bereich der Kleinwagen/Kompaktklasse bei Pkw vorherrschende hohe Preissensibilität und der spätere Markteintritt im Vergleich zur Oberklasse verhindert das Erreichen höherer Marktanteile bis zum Jahr 2050. Trotz deutlicher Kostendegression ergab die Analyse für die Automatisierungsstufe 5 Aufpreise in Höhe von ca. 5.000 € im Jahr 2050 für Pkw der Oberklasse. Zum Zeitpunkt des Markteintritts (ca. 2035) sind diese mit ca. 11.000 € nur im Bereich der Pkw Oberklasse und besonders für die schweren Nutzfahrzeuge bereits für eine größere Käufergruppe interessant. Daraus resultierend ist die Durchdringung der Flotten im Straßenverkehr mit den Automatisierungsstufen 4 und 5 mit 34 % bis 41 % des Bestandes für den Pkw, mit 42 % bis 44 % für den Lkw und 48 % bis 67 % für den Bus bis zum Jahr 2050 noch moderat. Die Spannweiten der Ergebnisse ergeben sich aus einer Szenarienbetrachtung. Nur maximal 7 % des Pkw-Bestandes sind anhand der Abschätzungen fahrerlos und damit mit Stufe 5 ausgestattet. Dieses bis zum Jahr 2050 noch eingeschränkte Marktpotenzial wirkt sich auch auf die THG-Emissionen und den EEV des Straßenverkehrs aus.

Für die Quantifizierung der Reduktionspotenziale der THG-Emissionen und des EEV durch Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr wurden in dieser Studie die Wirkungen nach sogenannten primären und sekundären Potenzialen unterschieden. Die in ersten Feldtests in der Realität nachgewiesenen hohen Effizienzpotenziale der Automatisierung bis Stufe 3, mussten für die Stufen 4 und 5 auch außerhalb des Bereichs der Autobahnen ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden die durch den Einsatz zentraler Fahrerassistenzsysteme möglichen Effizienzpotenziale aus der betrachteten Fachliteratur, nach Fahrzeugsegment und Fahrsituation (Straßentyp und Verkehrsdichte) differenziert, gesammelt. Auf Basis der für die jeweiligen fünf Automatisierungsstufen benötigten Fahrfunktionen bzw. der Fahrerassistenzsysteme und den Anteilen der Fahrleistung nach Fahrzeugsegment und Fahrsituation konnten die einzelnen Effizienzpotenziale Bottom-up zu einem Gesamtpotenzial verrechnet werden. Die Ergebnisse der Bottom-up Analyse haben gezeigt, dass die Ausstattung und die Nutzung der Automatisierungsfunktionen die Effizienz aller Straßenfahrzeuge schon mit Einführung der Stufe 1 spürbar verbessert. Abhängig von der Verkehrsdichte, des befahrenen Straßentyps und des Fahrzeugsegments ergeben sich Potenziale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Maximalfall von bis zu 42 %. Gemittelt über die Anteile der Fahrten auf den Straßentypen (BAB, Landstraße, Innerortsstraße) und den Verkehrsdichten (flüssig, dicht, stop & go) kann die Automatisierung und Vernetzung den Kraftstoffverbrauch am einzelnen Fahrzeug immerhin noch um bis zu 17 % (für schwere Nutzfahrzeuge) reduzieren. Dieser Wert ist als Effizienzpotenzial zu verstehen, der sich dann realisieren lässt, wenn die Nutzer der Fahrzeuge die Automatisierungsfunktionen auch in allen möglichen, spezifischen Anwendungsfällen benutzen. Übertragen auf die Anteile der Fahrzeuge mit Automatisierung aus dem Markthochlauf ergeben sich alleine durch die primären Potenziale Einsparungen der THG-Emissionen um ca. 10 bis 10,4 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2050.

Die Ergebnisse der Analyse¹ der sekundären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens für die definierten Markthochlauf- und Mobilitätsszenarien haben gezeigt, dass sich der Modal Split durch Kostenvorteile, Effizienzverbesserungen, Komfortgewinne und die Möglichkeit der Ausübung fahrfremder Aktivitäten zu Gunsten des Straßenverkehrs ändern kann. Für die Simulation der Änderung der Verkehrsverteilung und des Modal Split wurden die Änderung der wahrgenommenen (reine Kraftstoffkosten) Kosten im MIV und die Änderung der Vollkosten bei Lkw und Bussen berücksichtigt. Durch den Wegfall des Fahrers ergeben sich bei Lkw und Bussen um 23 bis 33 % reduzierte Vollkosten. Zusätzlich flossen in die Berechnung die Änderungen der Fahrtzeiten, die geänderte Wahrnehmung der Fahrtzeit und sich ändernde Besetzungsgrade und Beladungsfaktoren ein. Entgegen der Darstellung der positiven Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf die Fahrtzeit in einigen Studien, zeigt sich anhand von Mikrosimulationen im Mischverkehr aus menschlich und automatisiert gesteuerten Fahrzeugen keine Verbesserung der Kapazität.

¹ Die Änderungen des Modal Split, der Verkehrsverteilung und der Fahrleistungen wurden mit dem ASTRA Modell abgeschätzt.

Erst das Erreichen sehr hoher Anteile automatisierter Fahrzeuge ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Kapazitäten der Straßen. Dieser Effekt tritt durch den bis 2050 noch begrenzten Anteil an Fahrzeugen mit Stufe 4 und 5 nach dieser Untersuchung erst nach 2050 ein.

Die Ermittlung der Potenziale neuer, automatisierter und geteilter Mobilitätskonzepte war nicht Bestandteil dieser Studie. Da diese die Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr auf THG-Emissionen und den EEV jedoch zukünftig beeinflussen können, wurden in dieser Studie mit zwei Szenarien gearbeitet, die den Unterschied der zukünftigen Nutzung im Personen- und Güterverkehr auf der Straße verdeutlichen sollen. Durch die beschriebene Änderung der Vollkosten im Straßenverkehr ist ein steigender Anteil des MIV und des Straßengüterverkehrs im Modal Split wahrscheinlich, wenn die Intensität der Nutzung und das Angebot an Sharingdienstleistungen für Pkw nicht deutlich steigt und die Logistik nicht weiter optimiert wird. Das für diese Studie entwickelte Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes" (Szenario 1) folgt dieser Annahme und setzt den Status-Quo der geringen Besetzungsgrade im MIV mit dem vorherrschenden Standard des eigenen Pkw, moderater Optimierung der Logistik und einem wenig flexiblen Öffentlichen Verkehr fort. Obwohl der Fokus der Studie auf dem Straßenverkehr liegt, wird bei beiden betrachteten Szenarien von einer ebenfalls zunehmenden Automatisierung sowohl im Schienenpersonen- als auch im Schienengüterverkehr ausgegangen und damit von einer Verbesserung der Vollkosten auf der Schiene. Aus verkehrlichen Gesichtspunkten, vielmehr jedoch aus dem Blickwinkel der Umweltwirkung und des Flächenverbrauchs ist dieses Szenario weit von einem anzustrebenden ressourcenschonenden Zustand entfernt. An diesem Zustand vermag auch die Einführung der beiden Technologien der Automatisierung und der Vernetzung im Straßenverkehr wenig ändern. Die ohnehin schon hohen Anteile des MIV an den gesamten Fahrleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2050 erfahren in Szenario 1 erwartungsgemäß eine Steigerung. Der Verlagerungseffekt fällt in Folge des nach oben begrenzten Markthochlaufs für die Automatisierungsstufen 1 bis 5 jedoch moderat aus. Zusätzlich wird die negative Wirkung durch die angenommene Automatisierung im Öffentlichen Verkehr und auf der Schiene zumindest leicht abgefedert. Aus technischen Aspekten ist die Einführung der Automatisierung im Schienenverkehr durch die vorgegebene Querführung und die weniger intensive Interaktion mit anderen Verkehrsmitteln und Verkehrsteilnehmern einfacher als im Straßenverkehr, einzig die langen Lebenszyklen des rollenden Materials sprechen gegen eine schnelle Diffusion der Automatisierung. Als Kontrast und zur Verdeutlichung der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr in Kombination mit deutlich zunehmenden Anteilen von Car- und Ridesharing im MIV, Optimierung der Logistik im Straßengüterverkehr und einem flexibleren Öffentlichen Verkehr wurde das Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" (Szenario 2) entwickelt.

Die Studie hat sich im Rahmen der sekundären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens auch mit Auswirkungen durch die Einführung neuer Nutzergruppen mit der Einführung des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) beschäftigt. Angesichts der bis zum Jahr 2050 noch

geringen Marktanteile für die Stufe 5 wurde jedoch nicht von einer Steigerung der Fahrleistungen durch die Gruppe der Kinder und mobilitätseingeschränkter Personen ausgegangen. Die Steigerung der Verfügbarkeit des Pkw für Menschen ohne Zugang zu einem privaten Pkw wurde in Szenario 2 berücksichtigt. Die Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf die Vermeidung von Staus durch die Verbesserung der Verkehrssicherheit und der Reduktion der unfallbedingten Staus haben nur marginale Reduktionen der THG-Emissionen zur Folge.

In der Summe aus primären und sekundären Effekten ergeben sich sowohl für das Szenario 1 ("Welt des Fahrzeugbesitzes") als auch für das Szenario 2 ("Welt der Mobilitätsdienstleistungen") substantielle Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen und des EEV im Vergleich zum Referenzszenario (REF). Während in Szenario 1 die Verlagerungseffekte von der Schiene auf die Straße die Wirkungen der primären Potenziale zumindest leicht abschwächen, verstärken sich die Wirkungen der primären Potenziale in Szenario 2 durch die Verknüpfung der Automatisierung und Vernetzung mit neuen, automatisierten Mobilitätsdienstleistungen, den sogenannten Mobility as a Service. Die gesamten THG-Emissionen sinken durch die Automatisierung und Vernetzung gegenüber REF um 7,6 % im Jahr 2050 ohne Berücksichtigung neuer Mobilitätskonzepte und um 11,1 % gegenüber REF im Jahr 2050 mit zunehmender Nutzung von und Angebot an automatisierten Sharingkonzepten. In absoluten Mengen bedeutet dies eine Reduktion der THG-Emissionen um 7,8 Mt. CO_{2äq.} gegenüber REF im Jahr 2050 in Szenario 1. Durch steigende Anteile des Car- und Ridesharing in Szenario 2 lassen sich die THG-Emissionen um 11,5 Mt. CO_{2äq.} gegenüber REF im Jahr 2050 verringern. Der EEV sinkt dadurch um 110 PJ im Jahr 2050 in Szenario 1 und um 174 PJ im Jahr 2050 in Szenario 2. Bereits im Jahr 2030 und damit vor der Einführung des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) im Straßenverkehr für beide Szenarien ergibt sich anhand der Berechnungen in dieser Studie für beide Szenarien ein Minderungspotenzial für THG-Emissionen in Höhe von 5,2 bis maximal 7,6 Mt. CO_{2äq.}

Die Analysen in dieser Studie zeigen zum einen das hohe Potenzial automatisierter und vernetzter Straßenfahrzeuge zur Verbesserung der Energieeffizienz. Sie zeigen jedoch auch, dass negative Verlagerungswirkungen entstehen können, wenn sich keine Änderung des Status quo der Verkehrsmittelwahl in Deutschland ergibt. Steigt die Nachfrage und das Angebot an geteilten Mobilitätsdienstleistungen wie Carsharing oder Ridesharing deutlich, kann auch hier die Automatisierung zu einer zusätzlichen Verbesserung der Effizienz des gesamten Verkehrssystems beitragen. Die Wirkung zeigt sich hierbei durch steigende Besetzungsgrade und insgesamt sinkende Fahrleistungen im MIV, wenn der private Pkw Besitz abnimmt und durch die Nutzung von automatisierten Sharingdienstleistungen und dem Öffentlichen Verkehr substituiert wird. Im Güterverkehr können automatisierte Konzepte ebenfalls zu einer Steigerung der Effizienz beitragen, indem die Zahl der Leerfahrten optimiert wird. Dies führt ebenfalls zu einer Verbesserung der Fahrleistungen.

Die Potenzialabschätzung in dieser Studie beruht wie bei mittel- bis langfristigen Technikfolgenabschätzungen üblich auf einer Vielzahl an Annahmen. Die Wirkung dieser Annahmen auf THG-Emissionen und den EEV sind im Falle des sich ändernden Verkehrsverhaltens und der Nutzung geteilter Mobilitätskonzepte mittels der beiden Szenarien skizziert worden. Darüber hinaus gibt es noch weitere Annahmen, die die Ergebnisse beeinflussen können. So kann beispielsweise ein technologischer Durchbruch und dadurch eine mögliche frühere Einführung der einzelnen Automatisierungsstufen zu einer Verschiebung der höheren THG- und EEV-Reduktionspotenziale führen. Nichtsdestotrotz ist diese Wirkung jedoch durch die nicht beliebig fallenden Kosten für die Technologien beschränkt. Auf Seiten der Kosten können höhere Lernraten für die Komponenten der Automatisierung zu größeren und schnelleren Kostendegressionen führen, was den Markthochlauf beschleunigen kann. Abweichungen von den angenommenen benötigten Systemkomponenten in Stückzahl oder Art können die Kosten und Preise für die Kunden ebenfalls beeinflussen, werden jedoch voraussichtlich nur marginale Änderungen der Markthochläufe und damit der Reduktion der THG-Emissionen und des EEV bewirken.

Die Entwicklung der Akzeptanz der Automatisierung im Straßenverkehr stellt einen wichtigen Hebel bei der Ermittlung der Potenziale dar. Diese kann durch das persönliche Erfahren der Möglichkeiten der Automatisierung zu einer positiven Änderung führen, den Markthochlauf beschleunigen und die Potenziale zusätzlich erhöhen. Im Gegenzug können Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen jedoch das Gegenteil bewirken und die Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen und des EEV verkleinern.

Die Studie geht bei den Potenzialabschätzungen für 2030 und 2050 von steigenden Anteilen an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen aus (siehe Kapitel 4). Fallen diese Anteile zukünftig höher als angenommen aus, ergeben sich zumindest im Falle der absoluten Einsparungen an THG-Emissionen und dem EEV folgerichtig kleinere Reduktionspotenziale.

Letztlich kann die Annahme der parallel im Öffentlichen Verkehr und insbesondere auf der Schiene ebenfalls deutlich zunehmenden Automatisierung die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen. Schafft es der öffentliche Verkehr und die Schiene nicht, mit den Entwicklungen auf der Straße Schritt zu halten, dann steigt die Wettbewerbsfähigkeit der Straßenverkehrsmittel durch die Automatisierung und Vernetzung zusätzlich. Dadurch würden die Modalanteile der Straße weiter steigen und die Potenziale zur Reduktion der THG Emissionen und des EEV deutlich kleiner ausfallen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Ziele der Studie

Bereits seit mehreren Jahrzehnten arbeitet die Automobilindustrie an der Entwicklung automatisiert fahrender Fahrzeuge. Notwendige Komponenten des automatisierten Fahrens werden seit Jahren in sogenannten Fahrerassistenzsystemen zum Teil bereits serienmäßig in Pkw, Lkw und Bussen verbaut. Diese reichen vom Spurhalte- und Notbremsassistenten bis zum Parkassistenten über viele verschiedene Teilsysteme von automatisiertem Fahren. Mittlerweile hat sich sowohl in der Industrie und in der Politik als auch in der Gesellschaft ein wahrer Hype um das Thema „Autonomes Fahren“ herausgebildet. Im Jahr 2014 hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) den Runden Tisch „Automatisiertes Fahren“ ins Leben gerufen, mit dem Ziel, den Schritt vom teil- zum vollautomatisierten Fahren zu unterstützen und Fragestellungen des vernetzten Fahrens zu integrieren. Ähnliche Aktivitäten wurden von einzelnen Länderministerien ergriffen. Durch das „Digitale Testfeld Autobahn“ wurde eine Möglichkeit zum Feldtest von Autonomem Fahren auf der Bundesautobahn A9 geschaffen. Im Juli 2017 wurde ein Gesetz verabschiedet, das die rechtlichen Rahmenbedingungen für das hoch- und vollautomatisierte Fahren regelt. Darüber hinaus hat die Bundesregierung eine Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren entwickelt, mit dem Ziel, Deutschland zum Innovationsführer und Leitmarkt für diese Technologien zu führen. Neben der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie werden dabei auch die Steigerung der Verkehrseffizienz, die Erhöhung der Verkehrssicherheit sowie die Reduktion mobilitätsbedingter Emissionen als Ziele verfolgt.

Assistiertes, teil- und hochautomatisiertes Fahren – insbesondere hinsichtlich der Verkehrseffizienz und der Verkehrssicherheit – sind bereits in wissenschaftlichen Studien und Feldtests, beispielsweise in den Projekten AdaptIVe, AMITRAN oder euroFOT untersucht worden. Inwieweit das Gesamtsystem aber einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten kann, wurde bislang nicht umfassend untersucht. So stellt das US-Energieministerium fest: „Researchers have noted that there are a wide variety of possible effects of a highly automated transportation system, some of which are likely to be beneficial for energy, while others could increase energy demand.“ (U.S. Department of Energy, 2015, S. 2). Der Klimaschutzplan 2050 bekräftigt das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2050 die Treibhausgas-Emissionen sektorübergreifend um 80–95 % im Vergleich zum Basisjahr 1990 zu reduzieren. Als Etappenziel ist für den Sektor Verkehr 40 % bis 42 % Reduktion an THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 vereinbart worden (BMUB 2016).

Die Studie „Energie- und Treibhausgaswirkungen von automatisiertem und vernetztem Fahren im Straßenverkehr“ ist im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) entstanden. Die MKS der Bundesregierung ist ein Instrument, um die festgelegten Klima- und Energieziele für den Verkehrssektor umzusetzen und eine Energiewende und Dekarbonisierung im Verkehr zu erreichen. Dazu hat das

Beratungskonsortium, geleitet vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), mit einem wissenschaftlichen Team die vorab genannten Fragestellungen im Auftrag des BMVI systematisch untersucht. Das interdisziplinäre Team aus Wissenschaftlern setzt sich neben dem Fraunhofer ISI aus dem Fraunhofer IML, der M-Five GmbH, der PTV Group und der Technischen Universität Hamburg-Harburg zusammen.

Während der Großteil der hier zu Grunde gelegten deutschen und internationalen wissenschaftlichen Studien zum automatisierten und vernetzten Fahren die verkehrlichen Wirkungen eines eingeschwungenen Systems mit 100 % fahrerlosen Fahrzeugen (Stufe 5) untersucht hat, fokussiert sich die vorliegende Studie auf den bis zum Jahr 2050 realisierbaren Markthochlauf aller Fahrzeuge auf der Straße in Deutschland, der sich aus bestimmten Rahmenbedingungen ableiten lässt. Die vorliegende Analyse schließt damit auch Wirkungen ein, die auf den Zwischenstufen (Stufe 1 bis Stufe 4) hin zum fahrerlosen und vernetzten Fahren entstehen können.

Das Hauptziel der Studie ist die Quantifizierung der Potenziale des automatisierten Fahrens im Straßenverkehr zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (gemessen in CO_{2äq.}) und des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2050. Dazu wurden realistische Markthochlaufszenarien für die Automatisierungsstufen 1 bis 5 im Bestand bei Pkw, Lkw und Bussen in Deutschland bis zum Jahr 2050 definiert. Die Studie widmet sich nicht den rechtlichen Rahmenbedingungen. Es wird bei der Ermittlung der Potenziale davon ausgegangen, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen zumindest in Deutschland so gesetzt werden, dass diese weder die technisch mögliche Einführung der Technologie verzögern noch die Nutzung aller möglichen Funktionen des automatisierten Fahrens zukünftig einschränken.

Um die Spannweite möglicher Markthochläufe zu illustrieren, wurden zu diesem Zweck die beiden Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" entworfen. Die Basis für die Markthochläufe bilden die Erkenntnisse über wahrscheinliche Markteinführungszeitpunkte und Kosten der Technologie aus einer fundierten technoökonomischen Analyse in Kombination mit Präferenzen und Mehrpreisbereitschaften aus der Auswertung von Akzeptanzstudien.

Die Gesamtwirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf Treibhausgasemissionen und den Endenergieverbrauch stammen aus vielen einzelnen Änderungen innerhalb des Verkehrssystems durch die Einführung der Technologie. Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge sind effizienter und verbrauchsärmer, weil durch die Automatisierung Brems- und Beschleunigungsvorgänge reduziert werden können, das Fahrzeug frühzeitig auf die Topographie und auch den Verkehrsfluss reagieren kann. Diese Effizienzvorteile sind für Fahrzeuge bis Level 3 bereits durch Feldstudien nachgewiesen worden und werden in dieser Studie als "primäre Wirkungen" bezeichnet, weil sie direkt am Fahrzeug entstehen.

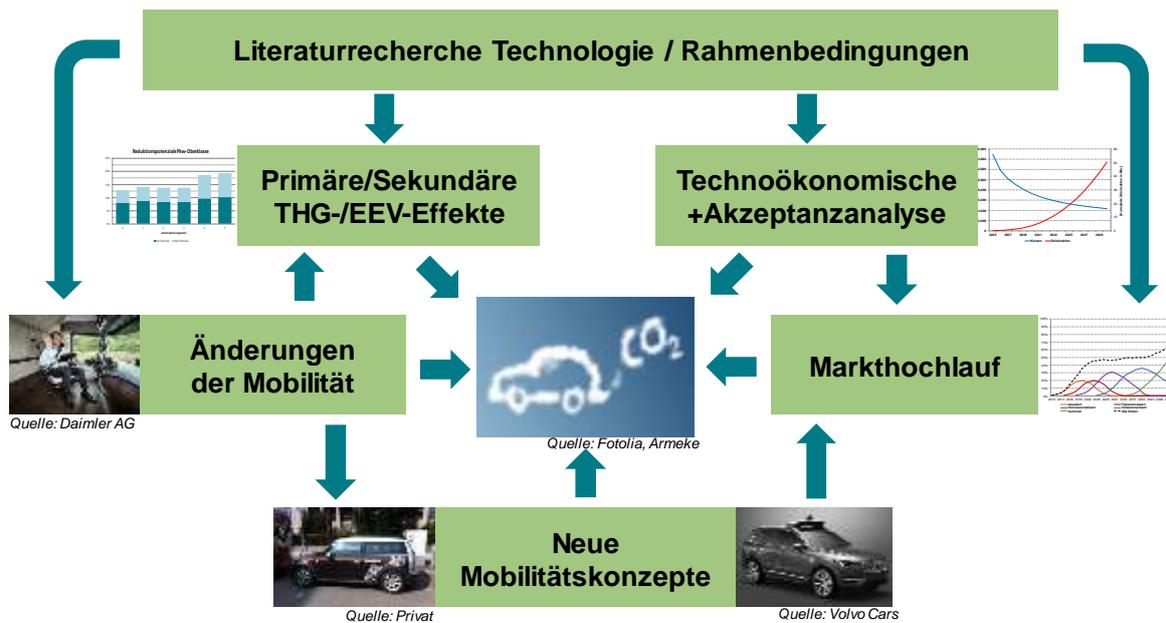
"Sekundäre Wirkungen" des automatisierten und vernetzten Fahrens entstehen durch verkehrliche Änderungen. Dies umfasst beispielsweise die Änderung der Verkehrsmittelwahl und der Verkehrsverteilung bzw. der Distanzen durch sich ändernde Kosten, Fahrzeiten und der Wahrnehmung der Fahrzeit. Darüber hinaus kann sich ab einer hohen Marktdurchdringung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge im Straßenverkehr die Kapazität der Straßen und damit auch der Verkehrsfluss ändern. Stausituationen durch Unfälle können reduziert werden, weil durch die Automatisierung das Unfallrisiko signifikant reduziert werden kann. Letztlich können auch neue Nutzungsmodelle im Straßenverkehr eine verkehrliche und damit auch eine Wirkung auf THG-Emissionen und den Endenergieverbrauch bedeuten. Dies umfasst zum einen neue Nutzergruppen im MIV wie beispielsweise Kinder oder mobilitätseingeschränkte Personen durch neue Mobilitätsdienstleistungen mit fahrerlosen Fahrzeugen oder sich ändernde Mobilitätsmuster durch ein steigendes Angebot an diesen Mobilitätsdienstleistungen. Obwohl der Fokus der Studie auf den Auswirkungen der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr liegen, muss die Entwicklung auf den anderen Verkehrsträgern bei der Analyse der verkehrlichen Wirkungen mitgedacht werden. Die vorliegende Studie untersucht alle genannten Wirkungen teils in qualitativer, teils in quantitativer Weise.

1.2 Vorgehensweise der Studie

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Potenziale des automatisierten und vernetzten Fahrens zur Reduktion von THG-Emissionen und dem EEV zu ermitteln. Die erste Möglichkeit liegt in der Erprobung der Wirkungen mittels Feldtests in Prototypen. Damit lassen sich erste Erkenntnisse in Sachen primäre Effekte (Effizienzpotenziale am Fahrzeug selbst) aufzeigen. Angesichts der Kosten eines Prototyps ist diese Untersuchungsform sehr aufwendig und liefert nur wenige Erkenntnisse über die Wirkungen auf das gesamte Verkehrssystem. Mikrosimulationen stellen eine weitere Option dar, um stark vereinfacht verkehrliche Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens anhand von Beispielsituationen und Strecken zu simulieren. Diese können jedoch ebenfalls nur Ergebnisse zu Teilaspekten der Wirkung des automatisierten und vernetzten Fahrens beitragen. Daher basiert die vorliegende Studie auf einer detaillierten Analyse von mehr als 200 wissenschaftlichen Publikationen, die auch im Rahmen von Feldtests entstanden sind bzw. ihre Erkenntnisse aus Mikrosimulationen gewonnen haben. Der Ablauf der Studie ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Im ersten Teil der Studie (Kapitel 1.3) wird zunächst der Betrachtungsrahmen festgelegt. In der Studie werden die Wirkungen auf allen Stufen der Automatisierung für alle Straßenverkehrsmittel (Pkw, Lkw, Bus) bis zum Jahr 2050 in 10-Jahres Schritten betrachtet. Die Studie unterscheidet dabei fünf Stufen der Automatisierung (siehe Abbildung 2) und geht dabei in der finalen Stufe 5 von fahrerlosen Fahrzeugen aus. Darüber hinaus geht die Untersuchung in dieser Studie von einer Vernetzung der automatisierten Fahrzeuge miteinander (V2V)

aus. Die Vernetzung der Fahrzeuge ermöglicht die Realisierung zusätzlicher Effizienzpotenziale. Daher wird in der Studie davon ausgegangen, dass bereits teilautomatisierte Fahrzeugen zukünftig miteinander vernetzt sein werden. Eine flächendeckende Umrüstung der Verkehrsinfrastruktur für eine Vernetzung mit den Fahrzeugen (V2I) wird bis zum Jahr 2050 aus Kostengründen als unwahrscheinlich eingeschätzt.



Quelle: Fraunhofer ISI, Bilder: Daimler AG, Volvo Cars, Fotolia, Armeke

Abbildung 1: Vorgehensweise der Untersuchung

Eine **technoökonomische Analyse** (siehe Kapitel 2) ausgewählter Publikationen in Kombination mit Gesprächen und Diskussionen mit Experten aus Industrie und Wissenschaft während des 1. Fachworkshops liefert die Grundlage für die Ermittlung der heutigen und zukünftigen Kosten bzw. der Preise für die Ausstattung von Fahrzeugen mit allen fünf Automatisierungsstufen. Dabei betrachtet die Studie die notwendige technische Kombination aus Systemkomponenten der Sensorik, Aktorik und Software und leitet aus dem benötigten Umfang der Ausstattung für jede Automatisierungsstufe und aus der Entwicklung der Einzelkosten die Zusatzkosten pro Fahrzeug und die daraus resultierenden Preise ab.

Die Auswertung der gesellschaftlichen **Akzeptanz** und damit der Bereitschaft der Bevölkerung, automatisierte Fahrzeuge zu kaufen und/oder zu nutzen, bereitet die Grundlage, um auf Basis von Preisprognosen und Mehrpreisbereitschaften der Kunden einen realistischen Markthochlauf unter zwei unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Szenarien) zu simulieren (siehe Kapitel 3).

Die Ableitung des resultierenden **Markthochlaufs von Fahrzeugen**, differenziert nach Segment und nach Automatisierungsstufe, folgt im nächsten Schritt (siehe Kapitel 5). Hierbei spielen potenzielle zukünftige neue Mobilitätsdienstleistungen (sogenannte Mobility as a Service) eine wichtige Rolle. Um die Spannweite der Wirkung dieser noch unsicheren zukünftigen Entwicklung aufzeigen zu können, wird in dieser Studie mit einem Szenarioansatz gearbeitet. In Kapitel 4.3 werden die beiden Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" ausführlich beschrieben. Während das Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes" von einer unveränderten, zukünftigen Nutzungsintensität von Sharing-Konzepten ausgeht, skizziert das Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" einen deutlich steigenden Anteil von Car- und Ridesharing an den gesamten Fahrleistungen im Personen- und im Güterverkehr bis zum Jahr 2050 in Deutschland.

Ein weiterer zentraler Schritt bei der Auswertung der Fachliteratur besteht in der Analyse der verkehrlichen Wirkungen des automatisierten Fahrens. Diese führen zu Änderungen im Verkehrsverhalten im Personen- und im Güterverkehr und damit zu einer Änderung der THG-Emissionen und des EEV (siehe Kapitel 4). Die Ursachen der verkehrlichen Wirkungen werden hier im Einzelnen dargelegt.

Im Kapitel 6 wird zunächst ausführlich die Methodik zur Berechnung der Gesamtwirkungen auf THG-Emissionen und den EEV des automatisierten und vernetzten Fahrens für die ermittelten Markthochlaufszszenarien beschrieben. Dabei werden die Wirkungen unterteilt in fahrzeugbezogene Effizienzpotenziale, nachfolgend auch als **primäre Effekte** bezeichnet, und die Wirkungen, die sich aus einer Änderung des Verkehrsverhaltens ergeben und im Folgenden als **sekundäre Effekte** bezeichnet werden.

Zunächst wird die Methodik zur Ermittlung der Effizienzpotenziale für die Reduktion der THG-Emissionen und des EEV für alle betrachteten Verkehrsmittel (Pkw, Lkw und Busse) differenziert nach Fahrzeugsegmenten, Verkehrssituationen und Straßentypen beschrieben (siehe Kapitel 6.1). Diese Potenziale wurden im Rahmen der Analyse der Fachliteratur mittels eines Auswertungsschemas gesammelt. Der erste Schritt dieser Auswertung besteht in der Auswahl relevanter Technologien von Fahrerassistenzsystemen (FAS), die zur Erreichung der verschiedenen Automatisierungsstufen bei Pkw, Lkw und Bussen benötigt werden. Um identifizierte Lücken in der Literatur zu füllen, wurden die Zwischenergebnisse im Rahmen des Fachworkshops „Automatisiert und vernetzt: grün und günstig im Straßenverkehr der Zukunft“ im März 2017 in Berlin mit Experten aus Wissenschaft, Industrie und der Politik diskutiert und validiert.

Die Methodik und die Ergebnisse zur Ermittlung der **sekundären Effekte** werden in Kapitel 6.2 differenziert nach der Ursache des entsprechenden Effekts beschrieben. Zur Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen, in Form von Änderungen der Verkehrs- und Fahrleistungen sowie der Distanzen, und damit der Verkehrsverteilung wurde das ASTRA-M Modell verwendet. Das ASTRA-M Modell ist eine detailliertere Version der europäischen Variante

des ASTRA Modells². Veränderungen der Verkehrsverteilung und der Verkehrsmittelwahl werden in ASTRA mittels eines Elastizitätenansatzes quantifiziert. Die ermittelten, einzelnen Wirkungen auf die THG-Emissionen und den EEV werden letztlich in Kapitel 6.3 verrechnet.

1.3 Betrachtungsrahmen und begriffliche Definitionen

Mit dem Begriff des automatisierten und vernetzten Fahrens wird das Gesamtsystem bezeichnet, in dem eine konventionelle Fahrzeugflotte eine zunehmende Durchdringung mit automatisierten und vernetzten Fahrzeugen erfährt. Um den Beitrag des Gesamtsystems zur Erreichung der Klimaschutzziele zu ermitteln, werden zunächst zentrale Begriffe definiert und die ITS-Anwendungen, die dem System zuzuordnen sind, beschrieben. Anschließend wird skizziert, wie zur Ableitung der Wirkungen auf die THG-Emissionen und den EEV vorgegangen wird.

Intelligent Transport Systems (ITS) ist der Sammelbegriff für zahlreiche Anwendungen, die im Transportsektor für einen Informationsaustausch innerhalb und zwischen den Verkehrssystemen sorgen. ITS-Anwendungen verbinden die Verkehrsinfrastruktur, die Verkehrsmittel und die Leitsysteme für die Koordinierung der Verkehre mit dem Ziel, den Verkehr effizienter, sicherer und umweltfreundlicher zu gestalten. Anwendungen wie Verkehrsmanagement- und Verkehrsüberwachungssysteme, Navigations- und Reiseinformationssysteme, Systeme zur Fahrerverhaltensbeeinflussung, Logistik- und Flottenmanagementsysteme sowie Sicherheitssysteme können einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten (vgl. de Kievit, 2014, S. 13–14 und Spence et al., 2009, S. 9). Dieser Beitrag fällt für die relevanten ITS-Anwendungen unterschiedlich groß aus.

Dabei wird zwischen der Wirkung auf die THG-Emissionen und auf den EEV eines Fahrzeugs oder der Fahrzeugflotte unterschieden, jeweils bezugnehmend auf den Referenzfall ohne den Einsatz der Anwendung. Diese Trennung ist notwendig, da angesichts wandelnder Antriebskonzepte und einer zunehmend regenerativen Energiegewinnung der EEV und die THG-Emissionen nicht mehr direkt gekoppelt sind.

Wenn von einem **Potenzial** gesprochen wird, so ist damit nicht zwangsläufig eine Reduktion des EEV oder der THG-Emissionen gemeint: Potenziale der Anwendungen können auch dazu führen, dass der EEV bzw. die THG-Emissionen zusätzlich steigen. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden solche negativen Reduktionspotenziale auch für einige Anwendungen aufgezeigt. Um aus der Vielzahl an bereits entwickelten oder sich in der Entwicklung befindlichen ITS-Anwendungen jene zu filtern, die für das Gesamtsystem relevant sind, finden zunächst weitere Begriffsdefinitionen statt.

² Beschreibung des europäischen ASTRA Modells auf www.astra-model.eu

1.3.1 Fahrzeugautomatisierung und Automatisierungsstufen

Evolutionäre Entwicklung versus revolutionäre Fahrzeugkonzepte: es gibt bereits heute Unternehmen wie Local Motors oder Google, die automatisierte Mobilitäts- und Fahrzeugkonzepte nicht evolutorisch über die fünf Stufen der Automatisierung entwickeln, sondern bereits an einer vollständigen Automatisierung der individuellen Personenbeförderung arbeiten, bei der der Nutzer nur noch Passagier statt Fahrer ist. Dies betrifft beispielsweise fahrerlose Ridesharing-Konzepte in kleinen Gefäßen wie beispielsweise der Kleinbus Olli. Der VDA geht jedoch wie noch viele Fahrzeughersteller, Zulieferer und einige Forschungseinrichtungen von einem evolutionären Entwicklungspfad aus, bei dem automatisierende Anwendungen – auch als Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) bezeichnet – schrittweise in Serienfahrzeugen Einzug finden und den Fahrer zuerst auf einer Teilstrecke entlasten, bevor sie mehr und mehr Verkehrssituationen selbstständig bewältigen können. Eine der Begründungen für die evolutorische Entwicklung und Einführung der Automatisierung über die fünf Automatisierungsstufen ist das schrittweise Heranführen der Nutzer an die Automatisierung.

Zur Beschreibung der Automatisierungsstufen von straßengebundenen Fahrzeugen haben die Klassifikationssysteme der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (siehe Gasser, 2012, S. 9), der amerikanischen Behörde National Highway Traffic Safety Administration (siehe NHTSA, 2013, S. 4–5) und der Society of Automotive Engineers (siehe SAE International, 2016, S. 19–24) national und international weite Verbreitung gefunden. Im englischsprachigen Raum wird inzwischen beinahe ausschließlich das Klassifikationssystem der SAE International verwendet (siehe bspw. National Highway Traffic Safety Administration, 2016, S. 9), in Deutschland hat der „Runde Tisch Automatisiertes Fahren“ des BMVI die Definitionen der BASt weitgehend übernommen und eine weitere Automatisierungsstufe hinzugefügt (siehe BMVI, 2015, S. 5–6).

Für die Zwecke der Studie werden die in Deutschland üblichen Bezeichnungen der Automatisierungsstufen des BMVI gewählt. Dazu werden folgende Begriffsdefinitionen verwendet:

- **Stufe 1 - Assistiertes Fahren**

Die Vorstufe auf dem Weg zum automatisierten Fahren ist das assistierte Fahren mittels Fahrassistenzsysteme. Hierbei wird in gewissen Grenzen entweder die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs übernommen, wobei der Fahrer das System dauerhaft überwachen und zum Eingreifen bereit sein muss.

- **Stufe 2 - Teilautomatisiertes Fahren**

Beim teilautomatisierten Fahren übernimmt das System sowohl die Längs- als auch die Querführung des Fahrzeugs für einen gewissen Zeitraum oder in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System jedoch nach wie vor dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe in der Lage sein.

- **Stufe 3 - Hochautomatisiertes Fahren**

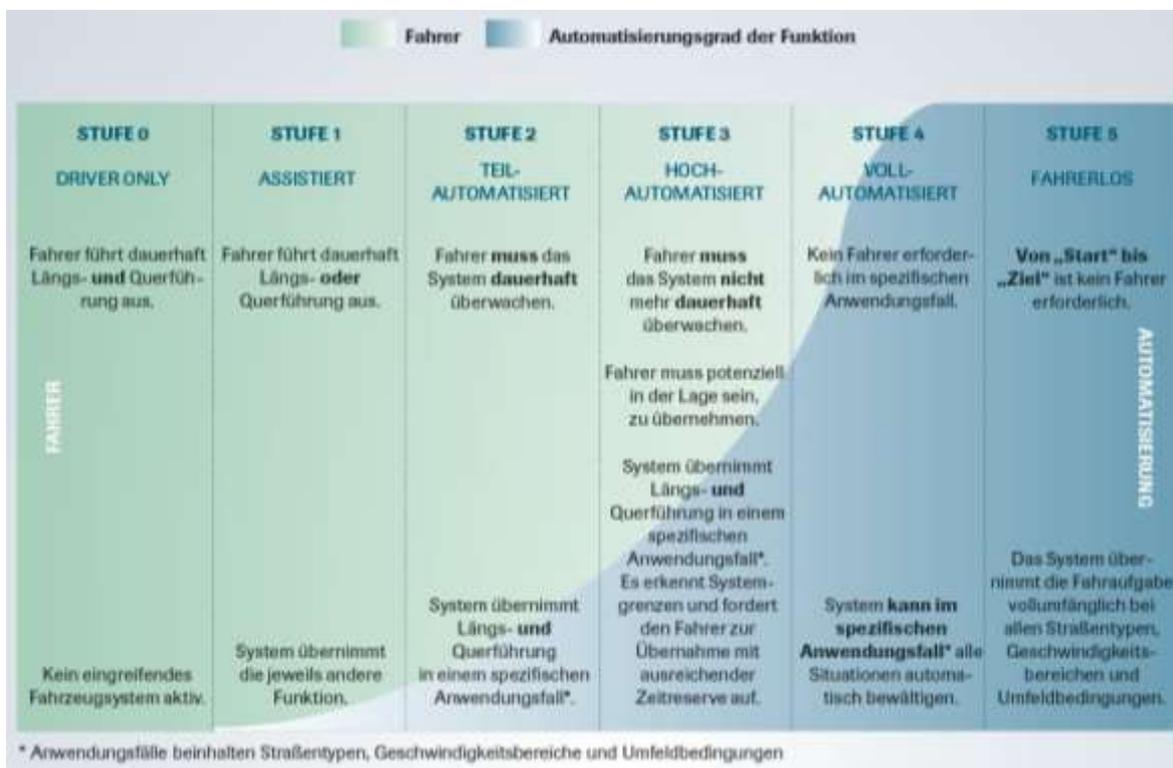
Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal hochautomatisierter Fahrfunktionen im Vergleich zu den vorangegangenen Automatisierungsstufen ist die zeitliche begrenzte Übernahme der Längs- und Querführung durch das Fahrzeug oder in spezifischen Situationen und der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen muss. Er muss dabei jedoch immer in der Lage sein, die Fahraufgabe nach Aufforderung mit einer angemessenen Zeitreserve wieder vollständig und sicher zu übernehmen.

- **Stufe 4 - Vollautomatisiertes Fahren**

Beim vollautomatisierten Fahren übernimmt das System die Fahrzeugführung in einem definierten Anwendungsfall vollständig und bewältigt alle damit verbundenen Situationen automatisch.

- **Stufe 5 - Fahrerloses (autonomes) Fahren**

Beim fahrerlosen (autonomen) Fahren als höchste Stufe der Automatisierung übernimmt das System die Fahrzeugführung vollständig vom Start bis zum Ziel auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und bei allen Umfeld- und Wetterbedingungen. Alle im Fahrzeug befindlichen Personen werden damit zu Passagieren.



Quelle: VDA

Abbildung 2: 5 Stufen der Automatisierung

Neben der Definition der Automatisierungsstufen seien die folgenden Definitionen der SAE International sowie der der National Highway Traffic Safety Administration erwähnt, welche zum Verständnis der Auswertungen innerhalb dieser Studie von Bedeutung sind:

- **Dynamic Driving Task (DDT):** Dieser umfasst alle in Echtzeit ablaufenden Handlungen, die für den Einsatz des Fahrzeugs im Straßenverkehr nötig sind. Diese lassen sich untergliedern in die Längsführung, die Querführung und die OEDR.
- **Object and Event Detection and Response (OEDR):** Die Teilaufgabe der Object and Event Detection and Response (OEDR) beinhaltet die Erkennung aller Objekte (Fahrzeuge, Fußgänger, Fahrradfahrer, Tiere, Gegenstände, etc.), die eine sichere Fahrzeugführung gefährden könnten. Daraus wird eine adäquate Handlung abgeleitet. Zur vollständigen Bewältigung der OEDR gehört auch die Erkennung und entsprechende Reaktion auf seltene Situationen, wie sie bspw. durch Einsatzfahrzeuge oder Wanderbaustellen entstehen können.
- **Operational Design Domain (ODD):** Die ODD ist die Summe aller vom System selbstständig bewältigbaren Verkehrssituationen in den Automatisierungsstufen 3, 4 und 5. Davon abzugrenzen ist die IODD für Fahrzeuge der Automatisierungsstufen 0, 1 und 2.
- **Intended Operational Design Domain (IODD):** Die IODD geht auf die unsichere OEDR durch das System bei Fahrzeugen der Automatisierungsstufen 0, 1 und 2 ein. Hier kann nicht garantiert werden, dass das System alle Verkehrssituationen auch bewältigen kann, in denen es aktivierbar ist.
- **Take-over Request (TOR):** Als TOR wird die Übernahmeaufforderung des Systems an den Fahrer bezeichnet, damit dieser an der Systemgrenze den DDT übernehmen kann.
- **Risikominimaler Zustand:** Damit wird jener Zustand des Fahrzeugs bezeichnet, der das Risiko für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer minimiert. I. d. R. besteht er darin, das Fahrzeug auf dem Standstreifen oder am Straßenrand abzustellen.

1.3.2 Vernetztes Fahren

Besteht für das einzelne Fahrzeug momentan noch das Problem, dass Geschehnisse hinter Kuppen oder engen Kurven ggf. nicht im Blickfeld der Sensorik sind und eine Reaktion zu spät erfolgen kann, so können durch eine V2V-Vernetzung neben den Sensordaten des eigenen Fahrzeugs auch die Daten der umgebenden Fahrzeuge herangezogen werden, um eine vollständige Objekt- und Ereigniserkennung sowie Reaktionsfähigkeit (Object and Event Detection and Response, kurz OEDR) zu erreichen. Dadurch sind die Informationen, die dem ADAS zur Verfügung stehen, erstmals umfangreicher als die eines menschlichen

Fahrers. Auch wenn in bestimmten Verkehrssituationen (bspw. bei der Fahrt auf einer Autobahn bei mittlerer Verkehrsdichte) die Daten des eigenen Fahrzeugs ausreichen, um eine sichere Fahrzeugführung zu gewährleisten, so lässt sich durch die V2V-Vernetzung eine Plausibilisierung der Daten durchführen und ein kooperatives Verhalten zwischen den Fahrzeugen realisieren (vgl. Stiller, 2005, S. 16–17).

Zur V2I-Vernetzung zählt die Anbindung der Fahrzeuge an die Infrastruktur mittels WLAN, Mobilfunk oder GNSS-Netz, welches schon weit verbreitete Anwendungen wie eine dynamische Navigation mit Daten zur aktuellen Verkehrslage erlaubt. Die Vernetzung mit der Straßeninfrastruktur wie die Kommunikation mit Lichtsignalanlagen, Wechselverkehrszeichen oder Parkleitsystemen ist Bestandteil der V2I-Vernetzung, welches ein verbessertes Verkehrsmanagement oder Anwendungen wie einen kooperativen Kreuzungsassistenten ermöglichen (vgl. California PATH Program, 2011, S. 17). Die Vernetzung über WLAN, Mobilfunk und GNSS als Teilmenge der V2I-Vernetzung wird im Folgenden mit dem Begriff Vehicle to Network (V2N) abgekürzt. Für die Studienzwecke wird eine Einschränkung hinsichtlich der betrachteten Vernetzungsformen vorgenommen: es wird nur von einer V2V- und V2N-Vernetzung ausgegangen; eine Ausrüstung der übrigen öffentlichen Straßeninfrastruktur wird nicht vorausgesetzt (dies erfolgt in Anlehnung an Marinik et al., 2014, S. 38). Die Beschränkung hat mehrere Gründe:

- Aus Umfragen von Anderson et al. (2014, S. 75–76) unter einer Vielzahl von Stakeholdern ergab sich, dass ein Großteil der Befragten die Vernetzung über WLAN oder Mobilfunk als zwingend nötig erachtet, um Sicherheits- und Funktionsupdates auf die Fahrzeuge übertragen zu können.
- Ab der Automatisierungsstufe 3 kann sich der Nutzer in einigen Verkehrssituationen fahrfremden Tätigkeiten widmen, sodass die Nachfrage nach Infotainment-Diensten ansteigen wird.
- Eine Mobilfunk- und GNSS-Anbindung existiert bereits in vielen Neufahrzeugen, sodass der finanzielle Aufwand zur Erweiterung des Kommunikationsmoduls mit einer WLAN-Chip überschaubar ist. Dieser Chip kann auch zur V2V-Kommunikation genutzt werden (vgl. Zimmermann und Schmidgall, 2014, S. 484–485).
- Es existiert auf beinahe allen nichtüberbauten Straßen eine dauerhafte Verbindung zu GNSS-Netzen, zumindest mit eingeschränkter Positionsgenauigkeit.
- Die Bundesregierung hat bereits 2014 in der Digitalen Agenda den Ausbau von Hochleistungsnetzen beschlossen. Übergeordnetes Ziel ist superschnelles Internet in ganz Deutschland bis 2025. Mit der Versteigerung der 700 MHz-Frequenzen im Mobilfunknetz wurde zudem die Auflage erlassen, diese Versorgung auch im gesamten Bundesfernstraßennetz zu gewährleisten. Langfristig ist eine flächendeckende Ausrüstung mit dem 5G Mobilfunkstandard zu erwarten.
- Bisher existieren nur wenige Studien und exemplarische Feldversuche zu ITS-Anwendungen, die durch eine Vernetzung mit der Straßeninfrastruktur ermöglicht

werden, sodass die Wirkungen auf das Gesamtsystem schwer abzuschätzen sind.

³

- Eine Änderung oder Erweiterung der vorhandenen Straßeninfrastruktur mit Sensoren in Signalanlagen und Bauwerken kann nicht vorausgesetzt werden, da es einen langen Zeitraum zur Umsetzung bedarf. Außerdem ist die Umsetzung mit hohen Kosten verbunden, die größtenteils von der öffentlichen Hand zu leisten sind und nur mit erheblichem Aufwand den Nutzern angelastet werden können, sodass eine schnelle Umrüstung zum aktuellen Zeitpunkt nicht absehbar ist (vgl. Anderson et al., 2014, S. 23–25).

³ siehe Bansal et al., 2013, C-ITS Projekt (<http://c-its-korridor.de>) oder UR:BAN Projekt (<http://urban-online.org/de/urban.html>)

2 Technoökonomische Analyse

Das Ziel des zweiten Arbeitsschritts dieses Vorhabens ist die Erarbeitung der Grundlagen für die Abbildung möglicher Markthochlaufszszenarien der verschiedenen Stufen automatisierten Fahrens hin zum fahrerlosen Fahren auf der Straße. Dazu sollen mit einer technoökonomischen Analyse der Fachliteratur die Kostenentwicklungen der Einzelkomponenten des Systems automatisiertes und vernetztes Fahren zusammengetragen werden. Bis zum Start dieser Studie im Jahr 2016 war in ausgewählten Serienfahrzeugen (Pkw) maximal eine Ausstattung bis Stufe 2, dem teilautomatisierten Fahren möglich. Der von Tesla angebotene Autopilot rangierte beispielsweise nach der Definition der Stufen (siehe Abbildung 2) zwischen Stufe 2 und Stufe 3. In den betrachteten Publikationen und den Angaben der Hersteller existieren nur vereinzelt Abschätzungen zu zukünftigen zusätzlichen Kosten bzw. den möglichen Preisen von hochautomatisierten, vollautomatisierten oder fahrerlosen Fahrzeugen. Somit konnten die Herstellungskosten bzw. die zusätzlichen Preise für die Ausstattung von Fahrzeugen mit Automatisierungsstufen 3 bis 5 nur mittels einer Analyse der Fachliteratur ermittelt werden. Dazu wurden in einem ersten Arbeitsschritt die für die einzelnen Funktionen der Automatisierung benötigten ITS-Anwendungen bzw. Fahrerassistenztechnologien (in der Folge als Technologie bezeichnet) identifiziert. Im zweiten Schritt wurden die dafür benötigten Systemkomponenten im Bereich der Sensorik (z. B. Radare, Ultraschallsensoren oder Kameras), der Aktorik (z. B. Lenkunterstützung) und der Software bzw. den Steuergeräten ermittelt und den Fahrerassistenzsystemen in der benötigten Menge zugeordnet. Die Ermittlung der gesamten heutigen und zukünftigen Herstellungskosten für die Ausstattung eines Pkw, Lkw oder Busses mit Automatisierungssystemen für die Stufen 1 bis 5 basiert laut dieser Vorgehensweise auf den Kosten der benötigten Einzelkomponenten.

Für den in Kapitel 5 beschriebenen Ansatz zur Ermittlung des Markthochlaufs bilden die im Rahmen der technoökonomischen Analyse aus der Literatur entnommenen Kosten der Einzelkomponenten und deren Kostendegressionspotenziale die Grundlage. Potenziale zur Senkung von Herstellungskosten und damit auch Endkundenpreisen ergeben sich durch Skalen- oder Lerneffekte. In der Theorie können diese Kostenentwicklungen mittels Lernkurven dargestellt werden (siehe Kapitel 2.2). In Abhängigkeit einer technologiespezifischen Lernrate sinken die Herstellungskosten der Systemkomponenten mit den produzierten Stückzahlen. Dieser Kostendegressionseffekt wirkt sich jedoch nicht nur auf die zu einem gewissen Zeitpunkt in Fahrzeugen verbauten Automatisierungsstufen aus, sondern bereits vor der Markteinführung auf zukünftige höhere Automatisierungsstufen, da sich Stufe 1 bis Stufe 5 evolutorisch entwickeln. Einzelne Systemkomponenten wie beispielsweise Radare (Nah-, Mittel- oder Fernbereichsradare) oder Ultraschallsensoren werden bereits für Automatisierungsstufe 1 benötigt und dadurch auto-

matisch kostengünstiger. Die Berechnung der gesamten Kosten für die Ausstattung eines Fahrzeuges als Summe der benötigten Einzelkomponenten ermöglicht somit die Abbildung dieser Evolution und eine realitätsnahe Simulation der Kostendegression.

Die Studie berücksichtigt verschiedene technische Ebenen des automatisierten Fahrens. Hierdurch wird ein möglichst umfangreicher Zusammenhang aller Einflüsse und Entwicklungstendenzen für die Markthochrechnung erreicht. Das Modell ist so aufgebaut, dass die Systemkomponenten die kleinste Einheit des Automatisierten Fahrens darstellen. Eine Menge aus Systemkomponenten ergibt wiederum eine (Fahrerassistenz-) Technologie, die sich wiederum in verschiedenen Konstellationen zu der Ausstattung einer Automatisierungsstufe zusammensetzen (vergleiche Abbildung 3).



Abbildung 3: Zusammenhänge Komponenten, Technologien, Automatisierungsstufen

Vor der Darstellung der Kostenentwicklungen für die Automatisierungsstufen 1 bis 5 für die drei Verkehrsmittel wird im folgenden Kapitel zunächst die Auswahl der für die Studie relevanten Fahrerassistenztechnologien erläutert, die benötigt werden, um Fahrzeuge mit den Automatisierungsstufen 1 bis 5 auszustatten. Die aus der Fachliteratur ermittelte Zusammensetzung der einzelnen Technologien aus einzelnen Systemkomponenten folgt im Anschluss und bildet die Basis für die Ermittlung der Systemkosten differenziert nach den fünf Stufen der Automatisierung.

2.1 Technologien des automatisierten Fahrens

2.1.1 Auswahl relevanter Fahrerassistenztechnologien

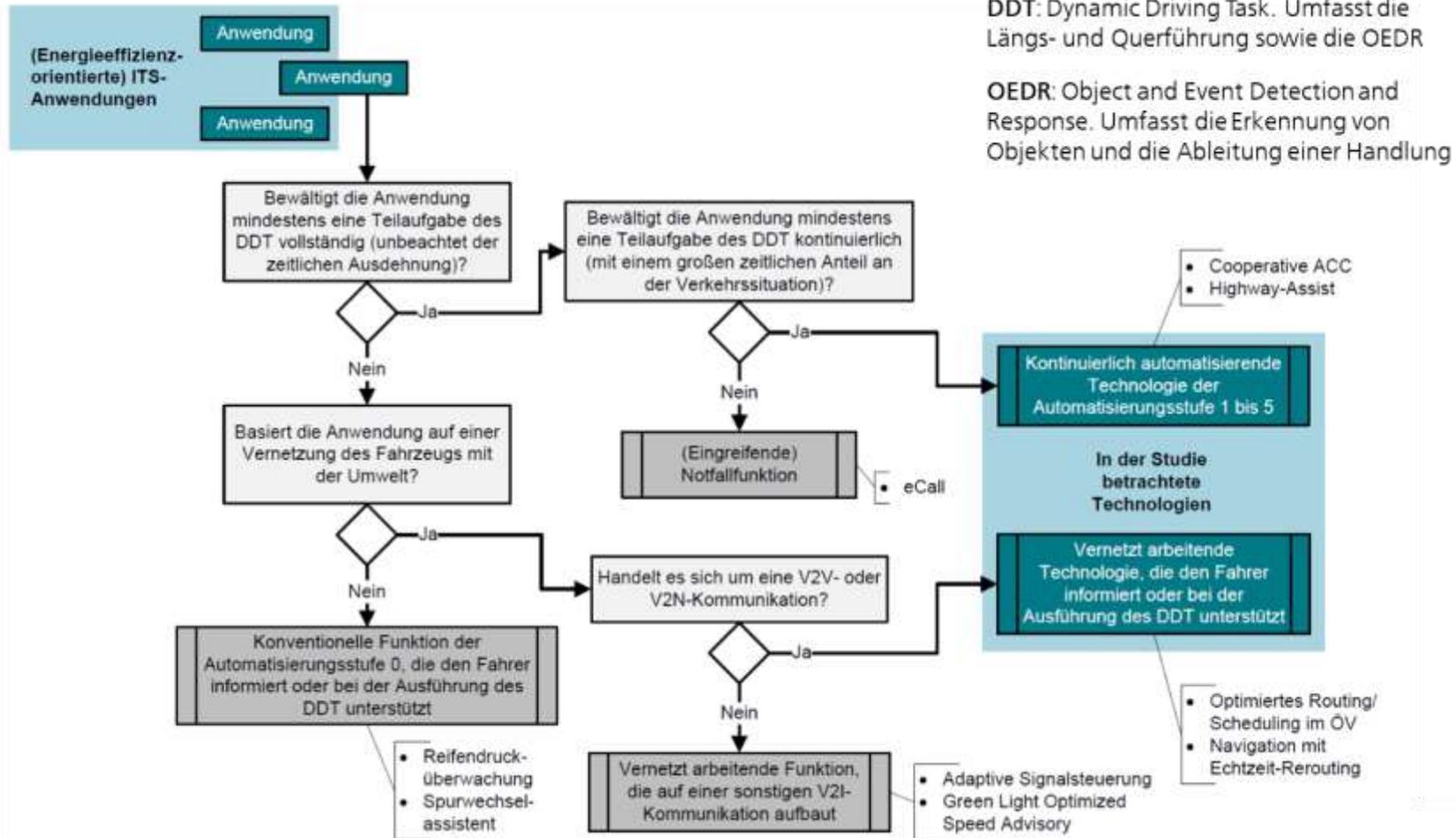
Im Rahmen der Literaturrecherche wurden zahlreiche ITS-Anwendungen identifiziert, welche teilweise bereits in Serienfahrzeugen oder regulär im Straßenraum eingesetzt werden, sich in der Erprobung bei Fahrzeugherstellern/-zulieferern befinden oder in einem frühen Entwicklungsstadium bei Forschungseinrichtungen existieren. Ein Teil der Anwendungen automatisiert Teile des Dynamic Driving Tasks (DDT) nur in speziellen Situationen oder setzt bestimmte Vernetzungskomponenten voraus. Der DDT umfasst alle in Echtzeit ablaufenden taktischen und operativen Handlungen, die für den Einsatz des Fahrzeugs im Straßenverkehr nötig sind. Diese lassen sich aufgliedern in

- die longitudinale Fahrzeugführung,
- die laterale Fahrzeugführung und
- die Erkennung aller Objekte (Fahrzeuge, Fußgänger, Fahrradfahrer, Gegenstände, etc.), die eine sichere Fahrzeugführung gefährden könnten und die Ableitung einer adäquaten Handlung.

Mithilfe der folgend erläuterten Systematik werden die in Tabelle 1 dargestellten ITS-Anwendungen auf ihre Relevanz für die Studie geprüft, wird ihnen die entsprechende Automatisierungsstufe zugeordnet und die Notwendigkeit einer V2V- und/oder V2N-Vernetzung ermittelt. Relevante ITS-Anwendungen werden im weiteren Verlauf der Studie als Technologien bezeichnet.

Die Relevanz der ITS-Anwendungen wird mithilfe des in Abbildung 4 dargestellten Entscheidungsbaums überprüft. Analog zu Gasser et al. (2015, S. 29) werden drei Arten von ITS-Anwendungen unterschieden: Informierende und warnende Funktionen, eingreifende Notfallfunktionen und kontinuierlich automatisierende Funktionen. Für die Bestimmung eines Reduktionspotenzials in Kapitel 3 sind nur jene ITS-Anwendungen relevant, die sich den Automatisierungsstufen 1 bis 5 zuordnen lassen und/oder den verschärften Anforderungen an das vernetzte Fahren genügen. Diese Beschränkung lässt sich aus der Problemstellung der Studie ableiten.

Die Funktionen aller Technologien (in Tabelle 1 als relevant gekennzeichnet) werden im Anhang (Kapitel 8.2) genauer beschrieben.



Quelle:

Fraunhofer ISI

Abbildung 4: Entscheidungsbaum zur Filterung relevanter Technologien

2.1.2 Zuordnung von Technologien zu Automatisierungsstufen

Die zuvor identifizierten Technologien werden nachfolgend festen Automatisierungsstufen zugeordnet. Die Zuordnung beruht auf dem Abgleich des Funktionsumfangs, über den die jeweilige Technologie verfügt und werden entsprechend der Definition der Automatisierungsstufen (siehe Kapitel 1.3.1) zugeordnet. Die Abstufung findet in diesem Fall stufenweise vom vollständigen Funktionsumfang des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) bis hin zum assistierten Fahren (Stufe 1) statt.

Bei konsequenter Einordnung der Technologien anhand der Definition ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Zuordnungen. Die meisten Technologien lassen sich dabei klar in eine einzelne Stufe zuordnen. Einige Technologien (Navigationssysteme sowie Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung) sind über alle Automatisierungsstufen einzuordnen. Unsicherheiten gibt es derzeit noch bei der Zuordnung des Baustellenassistenten und des Platoonings. Bei beiden Fällen wurde bei der Berechnung der Potenziale der Reduktion von THG-Emissionen und des EEV konservativ davon ausgegangen, dass diese Funktionen erst später verfügbar sein werden. Obwohl beispielsweise die Technologie des Platooning bereits heute nah an der Serienreife ist, bedarf es zur Nutzung noch der Änderung zahlreicher rechtlicher und organisatorischer Rahmenbedingungen. Daher wurde hier von einer Einführung erst ab Automatisierungsstufe 4 ausgegangen. Autonomes und vernetztes Fahren ist in spezifischen Anwendungsfällen, beispielweise bei ausreichend detailliertem, digitalem Kartenmaterial, bei guter Straßeninfrastruktur und bei guten Wetterbedingungen bereits ab Stufe 4 möglich. Da die Abgrenzung dieser spezifischen Anwendungsfälle und damit die Anteile an dieser Fahrsituationen an der gesamten Fahrleistung in Deutschland kaum möglich ist, wird in der Studie davon ausgegangen, dass die Technologie erst mit Einführung der Automatisierungsstufe 5 zur Verfügung steht.

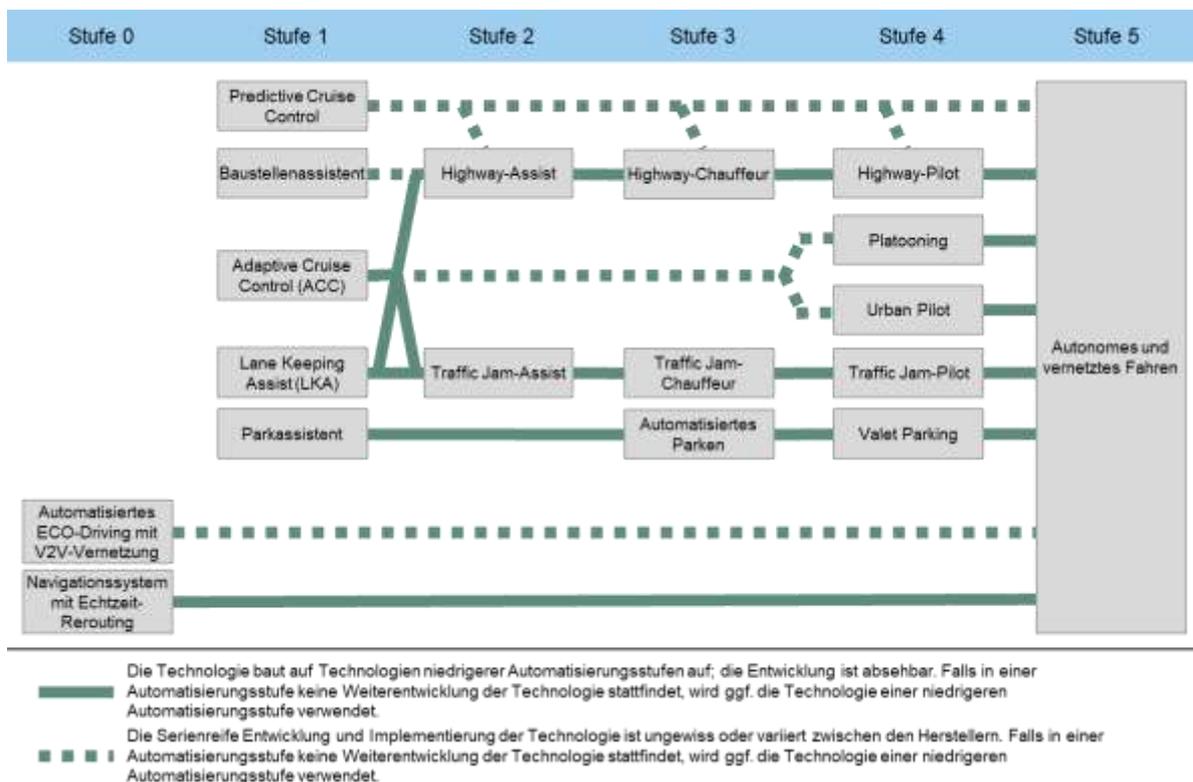
Tabelle 1: Zuordnung von relevanten Fahrerassistenztechnologien zu Automatisierungsstufen

Technologie-nummer	Technologienname	Relevant nach Abbildung 4
1	Adaptive Cruise Control (ACC)	1
2	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	0 bis 5
3	Pilotiertes Parken	3
4	Autonomes und vernetztes Fahren	4 und 5
5	Baustellenassistent	1 bis 2
6	Highway-Assist	2
7	Highway-Chauffeur	3
8	Highway-Pilot	4
9	Lane Keeping Assist (LKA)	1
10	Onboard-Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	0 bis 5

Technologie-nummer	Technologienname	Relevant nach Abbildung 4
11	Parklenkassistent	1
12	Platooning	2 bis 4
13	Portables Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	0 bis 3
14	Predictive Cruise Control (PCC)	1
15	Traffic Jam-Assist	2
16	Traffic Jam-Chauffeur	3
17	Traffic Jam-Pilot	4
18	Urban Pilot	4
19	Valet Parking	4
20	Antiblockiersystem (ABS)	nein
21	Antriebsschlupfregelung (ASR)	nein
22	Automatisiertes Eco-Driving ohne V2V-Vernetzung	nein
23	Bidirektionale Kommunikation mit Lichtsignalanlagen	nein
24	Cruise Control (CC)	nein
25	Curve Speed Warning (CSW)	nein
26	eCall	nein
27	Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)	nein
28	Forward Collision Warning (FCW)	nein
29	Highway-Pilot + Platooning	nein
30	Intelligent Speed Adaptation (ISA)	nein
31	Intelligentes Verkehrsmanagement-System	nein
32	Konventioneller Parkassistent	nein
33	Konventionelles Eco-Driving	nein
34	Konventionelles Navigationssystem	nein
35	Kreuzungsassistent	nein
36	Lane Change Assist (LCA)	nein
37	Lane Departure Warning (LDW)	nein
38	Notbremssystem	nein
39	Parkleitsystem	nein
40	Präventives Sicherheitssystem	nein
41	Speed Regulation System (SRS)	nein
42	Start-Stopp-Automatik	nein
43	Totwinkel-Assistent	nein
44	Visuelles Assistenzsystem	nein
45	Vernetzter Kreuzungsassistent	nein

Quelle: Fraunhofer ISI

Die Technologien verhalten sich nicht unabhängig voneinander. In der Regel existieren Anknüpfungspunkte untereinander oder die Technologien beruhen in ihrer Entwicklung auf einer Vorgängertechnologie einer anderen Automatisierungsstufe (siehe Abbildung 5). Insbesondere trifft dies auf die Highway- und Traffic-Jam-Technologien zu. Diese beschreiben einen Evolutionspfad eines Assistenzsystems (Stufe 2), über ein Chauffeursystem (Stufe 3) hin zu einem Pilotensystem. Der Funktionsumfang der Technologien entwickelt sich hierbei entsprechend der Stufen durch die technische Weiterentwicklung, sodass mehr und mehr Fahrsituationen durch das System selbst durchgeführt werden können und die Verantwortung des Fahrers abnimmt. Beim höchsten Grad der Automatisierung ergeben alle Technologien der Stufen 0 bis 4 das fahrerlose und vernetzte Fahren der Stufe 5, welches dementsprechend alle Einzelfunktionen bündelt. Zu berücksichtigen ist, dass bei einigen Technologien die Entwicklung und Implementierung herstellerübergreifend unterschiedlich bzw. zum heutigen Zeitpunkt nicht voraussehbar ist. Dies trifft beispielsweise auf Predictive Cruise Control (PCC) sowie Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung zu.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 5: Evolutionspfad der Technologien

2.1.3 Zuordnung von Technologiebündeln zu Fahrzeugsegmenten

Für die Abschätzung des Markthochlaufs von Pkw, Lkw und Bussen von Automatisierungsstufe 1 bis 5 bedarf es einer feineren Differenzierung der Fahrzeuge. Der Grund dafür liegt zum einen in den unterschiedlichen Anforderungen an die Automatisierung in diesen Fahrzeugen und zum anderen in den Mehrpreisbereitschaften der durchschnittlichen Kunden

eines bestimmten Fahrzeugsegments. Pkws werden daher, wie in Kapitel 5.2 genauer beschrieben, in Klein-/Kompaktwagen, Mittelklasse und Oberklasse unterteilt, Lkw in leichte Nutzfahrzeuge (LNF) kleiner 3,5 Tonnen Nutzlast und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) größer 3,5 Tonnen Nutzlast. Bei Bussen werden Stadtbusse, Reisebusse und Kleinbusse unterschieden. Durch die teilweise unterschiedlichen Anforderungen an die Automatisierung in den einzelnen Segmenten sowie die variierende Akzeptanz von höheren Preisen für die Ausstattung der Fahrzeuge mit Automatisierung ergeben sich teilweise unterschiedliche technologische Zusammensetzungen für die einzelnen Automatisierungsstufen. Die hinter der Zuordnung liegende Grundannahme besteht darin, dass Fahrzeugsegmente, die durchschnittlich durch höhere Anschaffungskosten und Jahreslaufleistungen geprägt sind mit mehr, bzw. umfangreicheren Technologien ausgestattet sind. Somit ist bei Fahrzeugtyp Pkw die Oberklasse mit mehr Technologien ausgestattet als die Segmente Mittelklasse bzw. Kleinwagen/Kompaktklasse.

Bei den bis zum Jahr 2017 verfügbaren Automatisierungsstufen gibt es zudem feine Unterschiede in der Ausstattung mit Technologiebündeln zwischen den Herstellern. Aus diesem Grund wurde auf Basis der Fachliteratur eine Zuordnung der Technologiebündel je Automatisierungsstufe und je Fahrzeugsegment vorgenommen. Die Zuordnung wurde im Rahmen des ersten Fachworkshops „Automatisiert und vernetzt: grün und günstig im Straßenverkehr der Zukunft?“ mit dem Fachpublikum aus Industrie und Wissenschaft im März 2017 diskutiert und präzisiert.

Im Güter- und öffentlichen Personenfernverkehr sind Assistenzsysteme bereits heute weit verbreitet und erfahren eine breite Akzeptanz bei den Fahrern und Nutzern. Daher werden die Fahrzeugsegmente schwere Nutzfahrzeuge sowie Reisebusse standardisiert mit einem hohen Grad an verfügbaren Technologien in den einzelnen Automatisierungsstufen ausgestattet. Die Ausstattung ist damit vergleichbar mit der Pkw-Oberklasse. Einzelne Differenzierungen zwischen Lkw und Öffentlichen Verkehr bestehen in der Ausstattung mit Systemen für Fahrsituationen des Parkens oder Platoonings, die auf die unterschiedlichen Nutzungsprofile und typischerweise genutzten Straßentypen resultieren.

Leichte Nutzfahrzeuge sind typischerweise mit weniger Technologien ausgestattet und verfügen somit über eine einfachere Konfiguration. Gleiches gilt für Stadtbusse, die auf wiederkehrenden Touren verkehren und für den Betrieb im urbanen Umfeld konfiguriert sind. Abbildung 6 zeigt die in die Berechnung des Markthochlaufs und der primären Treibhausgasreduktionspotenziale eingehende Konfiguration der verschiedenen Automatisierungsstufen für alle Fahrzeugsegmente beim Pkw. Die Zusammensetzung der Automatisierungsstufen für leichte und schwere Nutzfahrzeuge sowie Busse ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Zuordnungen sind dabei als Schwerpunkt der Verbreitung anhand der unterschiedlichen Nutzerbedürfnisse zu interpretieren.

Stufe	Technologie	Pkw		
		Klein/ Kompakt	Mittelklasse	Oberklasse
Stufe 1	Portables Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x		
	Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting		x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung		x	x
	Predictive Cruise Control (PCC)			x
	Adaptive Cruise Control (ACC)	x	x	x
	Baustellenassistent		x	x
	Lane Keeping Assist (LKA)		x	x
	Parklenkassistent		x	x
Stufe 2	Portables Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x		
	Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting		x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung		x	x
	Highway-Assist			x
	Traffic Jam-Assist	x	x	x
	Platooning		x	x
	Pilotiertes Parken		x	x
Stufe 3	On-board Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x	x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x
	Pilotiertes Parken		x	x
	Highway-Chauffeur			x
	Platooning		x	x
	Traffic Jam-Chauffeur	x	x	x
Stufe 4	Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x	x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x
	Highway-Pilot		x	x
	Traffic Jam-Pilot	x	x	x
	Valet Parking		x	x
	Urban Pilot	x	x	x
	Platooning		x	x
Stufe 5	Autonomes und vernetztes Fahren	x	x	x

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 6: Zugrundeliegende Technologieausstattung verschiedener Fahrzeugklassen bei Pkw

Stufe	Technologie	Lkw		Öffentlicher Verkehr		
		LNF	SNF	Stadtbusse	Reisebusse	Kleinbusse
Stufe 1	Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x	x		x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x	x	x
	Predictive Cruise Control (PCC)		x		x	x
	Adaptive Cruise Control (ACC)	x	x	x	x	x
	Baustellenassistent		x		x	
	Lane Keeping Assist (LKA)	x	x		x	
	Parklenkassistent		x			x
Stufe 2	Portables Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x				
	Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting		x		x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x	x	x
	Highway-Assist		x		x	x
	Traffic Jam-Assist	x	x		x	x
	Platooning	x	x		x	x
	Pilotiertes Parken		x			x
Stufe 3	On-board Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x	x		x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x	x	x
	Pilotiertes Parken		x		x	x
	Platooning	x	x		x	x
	Highway-Chauffeur	x	x		x	x
	Traffic Jam-Chauffeur	x	x		x	x
Stufe 4	Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x	x		x	x
	Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x	x	x
	Highway-Pilot	x	x		x	x
	Traffic Jam-Pilot	x	x		x	x
	Valet Parking		x		x	x
	Urban Pilot	x	x	x	x	x
	Platooning	x	x		x	x
Stufe 5	Fahrerloses und vernetztes Fahren	x	x	x	x	x

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 7: Zugrundeliegende Technologieausstattung verschiedener Fahrzeugklassen bei Lkw und Bussen

2.1.4 Komponenten des automatisierten Fahrens

Nach der Zuordnung der Fahrerassistenztechnologien zu Automatisierungsstufen bedarf es für die Abschätzung der Markthochläufe durch Quantifizierung von Technologiekosten noch die für die einzelnen Technologien benötigten Systemkomponenten. Ebenfalls spielt die Dimensionierung der einzelnen Komponenten für die entsprechenden Automatisierungsstufen eine wichtige Rolle. Während bis Automatisierungsstufe 3 noch der Fahrer als Backup einspringen kann und muss, bzw. bis Stufe 4 in bestimmten Anwendungsfällen, muss das System in Stufe 5 auf alle Eventualitäten bei allen Anwendungsfällen redundant funktionieren. Daher werden bei höheren Automatisierungsstufen aus Gründen der Sicherheit tendenziell mehr Komponenten verbaut werden müssen, als in niedrigeren Automatisierungsstufen.

Wie bereits bei der Ausstattung der Fahrzeuge mit bestimmten Fahrerassistenzsystemen gibt es bei der Ausstattung der Fahrzeuge mit Systemkomponenten Unterschiede zwischen verschiedenen Herstellern und Zulieferern. Beispielsweise werden bei manchen Herstellern Nahbereichs- mit Fernbereichsradaren miteinander kombiniert, während andere Hersteller Mittelbereichsradare oder LiDARs bevorzugen. Abbildung 8 zeigt die für die Berechnung des Markthochlaufs gewählte Zuordnung der zentralen Systemkomponenten zu den als relevant identifizierten Fahrerassistenztechnologien.

Technologie	Steuer- gerät	Sich ausschließende Komponenten			Weitere Komponenten																
	Steuergerät	Fernbereichsradar (LRR)	Mittelbereichsradar (MRR)	LiDAR (Laserscanner)	Nahbereichsradar (SRR)	Multifunktionskamera	Ultraschallsensor	Mobiler Internetzugang	Digitale Straßenkarte	GPS-Empfänger	DSRC-Modul	Fahrerzustandserkennung	Freihänderkennung	DAB+-fähiges Radio	Navigationsrechner	Infotainment-Display	Assistent Ad-hoc-Platoons	Parkhausdaten	Portables Navi	Infrarotkamera	
Adaptive Cruise Control (ACC)	●	●	●	●	●	●															
Predictive Cruise Control (PCC)	●	●			●				●	●											
Lane Keeping Assist (LKA)	●			●	●								●								
Automatisiertes Eco-Driving (V2V)	●										●										
Onboard Navi, Echtzeit-Rerouting	●								●	●				●	●	●					
Portables Navi, Echtzeit-Rerouting								●											●		
Parklenkassistent	●				●		●														
Pilotiertes Parken	●						●														
Valet Parking	●			●		●	●		●	●				●	●			●			
Platooning	●				●						●	●					●				
Highway-Assist	●	●	●	●		●			●	●			●								
Highway-Chauffeur	●	●	●	●		●			●	●		●									
Highway-Pilot	●	●	●	●		●			●	●											
Traffic Jam-Assist	●		●	●	●	●							●								
Traffic Jam-Chauffeur	●		●	●	●	●						●									
Traffic Jam-Pilot	●		●	●	●	●						●									
Autonomes Fahren	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●					●					●

●	Komponente ist für alle Konfigurationen notwendig
● ● ●	Komponente ist für farbig dargestellte Konfiguration notwendig

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 8: Zuordnung der Komponenten zu Technologien (Quelle: Eigene Darstellung)

2.1.5 Ableitung einer Roadmap

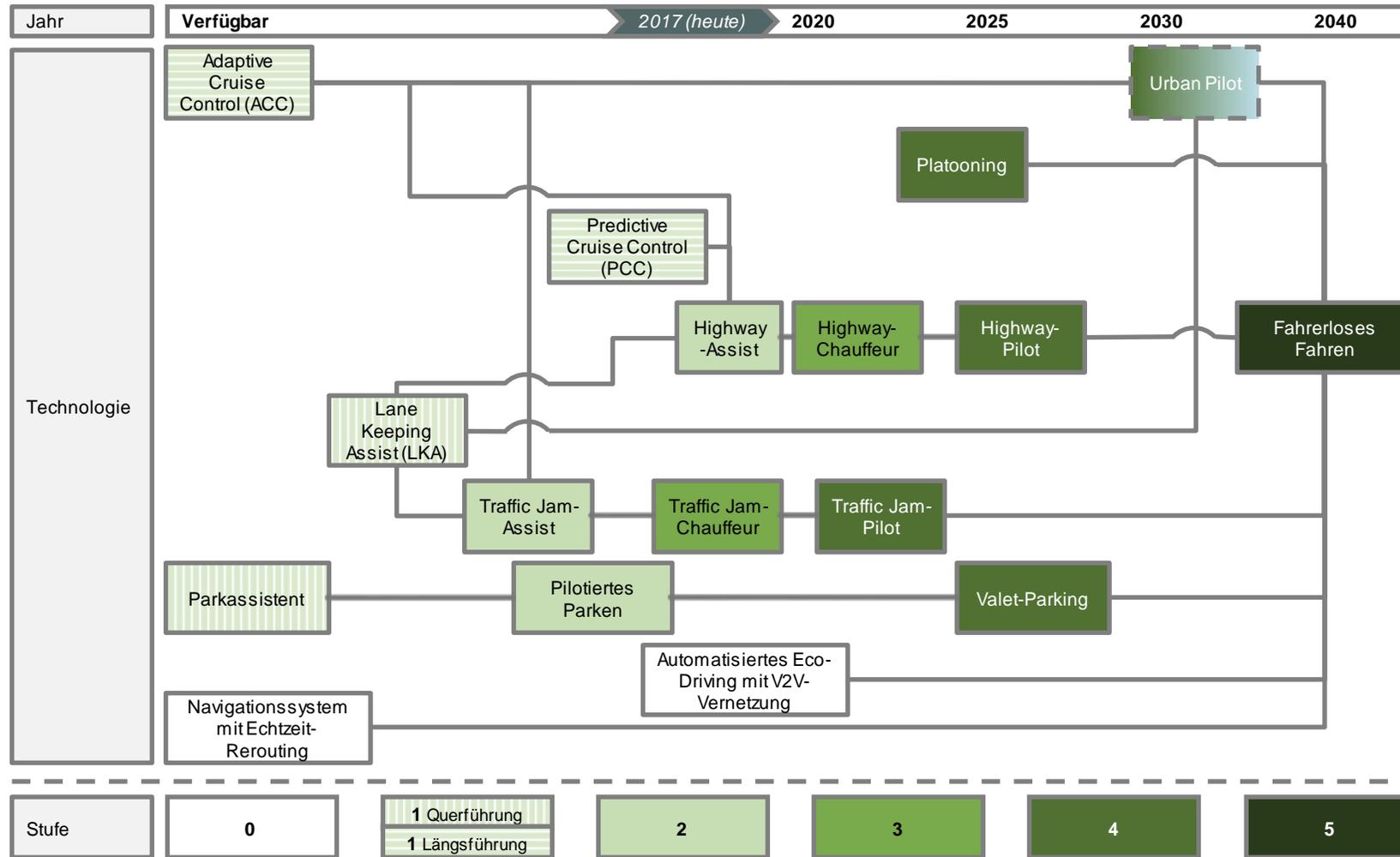
Neben den Kosten des automatisierten und vernetzten Fahrens spielt der voraussichtliche Zeitpunkt der Marktreife der einzelnen Fahrerassistenztechnologien und damit der fünf Automatisierungsstufen eine weitere wichtige Rolle bei der Einschätzung eines möglichen Markthochlaufs und letztlich auch bei der Bewertung der Wirkungen auf THG-Emissionen und den Endenergieverbrauch. In der vorliegenden Studie wurde dieser Aspekt innerhalb der technoökonomischen Analyse mit untersucht und mit existierenden Roadmaps zur Evolution der Automatisierung im Straßenverkehr (z. B. ERTRAC 2017) verglichen. Ergebnis

dieses Arbeitsschrittes ist die hier vorgestellte Roadmap. Die blauen Verbindungen zwischen Technologien stellen Entwicklungspfade dar, wobei Funktionen der Vorgängertechnologien in die Funktionsweise der nachfolgenden Technologie einfließen.

Die Roadmap gibt dabei Aufschluss auf die innerhalb der Studie angenommenen Zeitpunkte der Marktreife der Technologien. Im Vergleich zu den Einschätzungen der Mehrzahl der betrachteten Fachliteratur wird in der Roadmap von ERTRAC (2017) beispielsweise der Urban Pilot und damit Stufe 4 im Bereich der Stadt als marktreif angenommen. Die Einführung von Stufe 5 wird - ähnlich wie in der eigenen Roadmap - erst deutlich nach 2030 angenommen. Für die Abschätzung des Markthochlaufs wurden für Pkw im Bereich der Oberklasse, schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und Fernbusse die folgenden frühesten Markteintrittszeitpunkte verwendet:

- Teilautomatisiertes Fahren der Stufe 2 ab 2012,
- Hochautomatisiertes Fahren der Stufe 3 ab 2018,
- Vollautomatisiertes Fahren der Stufe 4 ab 2025,
- Fahrerloses Fahren der Stufe 5 ab 2035.

Für die Einführung der Automatisierungsstufen bei Pkw in der Mittelklasse wurde ein zeitlicher Verzug zum Markteintrittszeitpunkt in der Oberklasse von jeweils 4 Jahren angenommen, bei Klein- und Kompaktwagen ein zeitlicher Verzug von 10 Jahren.



Quelle: Fraunhofer ISI/M-Five

Abbildung 9: Roadmap Pkw für Fahrerassistenztechnologien und Automatisierungsstufen

2.2 Technologiekosten und Degressionspotenziale

Die Entwicklung der Herstellungskosten für die Ausstattung von Pkw, Lkw und Bussen mit Systemen der Automatisierungsstufen 1 bis 5 hängt zum einen von den dafür benötigten Technologien und letztlich von der Anzahl der benötigten Systemkomponenten ab. Diese Zuordnungen wurden in den vorigen Kapiteln erläutert. Je nach benötigter Technologie in der jeweiligen Automatisierungsstufe kommen spezifische Systemkomponenten zum Einsatz. In Abhängigkeit der verkauften Stückzahlen pro Komponente ergibt sich bereits vor der Einführung eine Kostendegression. Dies wird insbesondere bei der Herstellung durch Lernkurven begründet. Die Mengendegressions- und Lerneffekte sind hierbei über Lernkurven abbildbar. Die Entwicklung der Kosten einzelner Systemkomponenten des Automatisierten Fahrens wird mittels der folgenden Gleichung abgeschätzt.

$$C_i = C_{0,i} * \left(\sum_{t=0}^n X_i \right)^{-b}$$

mit: C_i = Produktionskosten pro Einheit der Komponente i

$C_{0,i}$ = Produktionskosten der ersten Einheit der Komponente i

X_i = kumulierte Menge der produzierten Einheiten der Komponente i

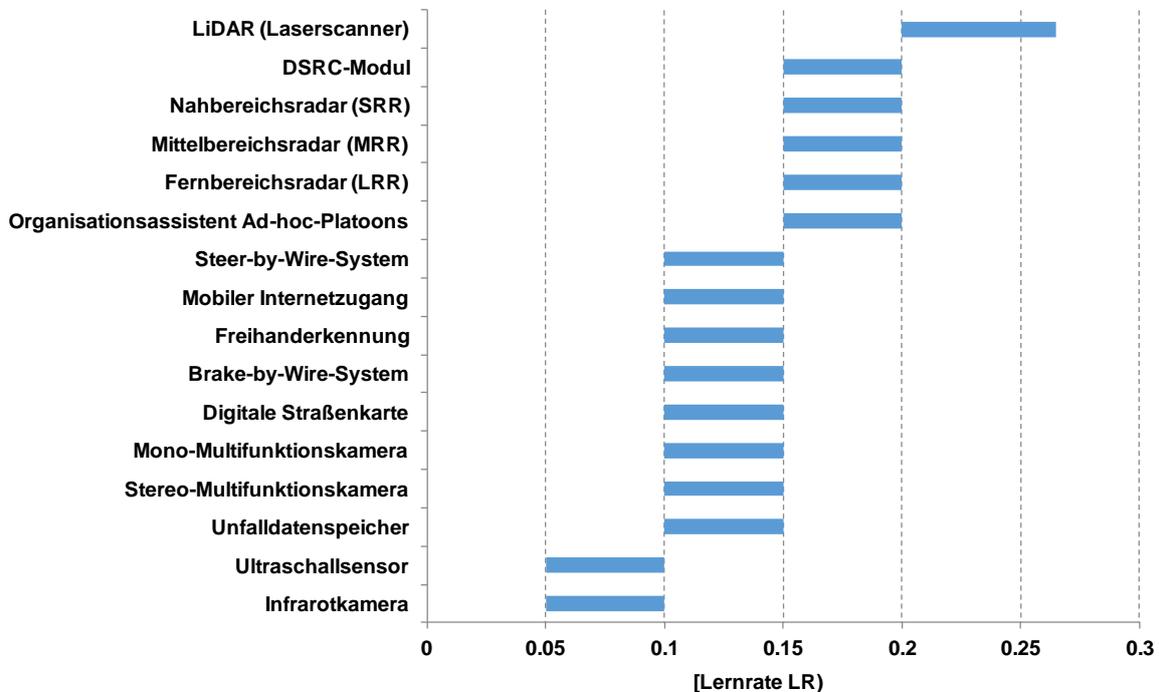
b = Lernparameter

Der Lernparameter errechnet sich aus der technologiespezifischen Lernrate $LR = 1-2^b$. Eine Lernrate gibt an, um wieviel Prozent sich die realen (inflationsbereinigten) Stückkosten bei jeder Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge eines Produktes reduzieren. Die Ableitung der Lernrate ist anhand von zwei unterschiedlichen Produktionskosten zu Stückzahlen-Paaren möglich. Lernraten für Sensoren wie LiDARe, (Fern-, Mittel-, Nah-) Bereichsradare, Ultraschallsensoren oder Unfalldatenspeichern konnten aus der betrachteten Fachliteratur⁴ bzw. aus Interviews mit Experten⁵ anhand der angegebenen Produktionskosten und Abschätzungen zu produzierten Stückzahlen berechnet werden. Die Kosten für die Entwicklung der Software bzw. der benötigten Steuergeräte wurde anhand von Angaben aus der Fachliteratur und aus Fachzeitschriften abgeschätzt. Lernraten für weitere Systemkomponenten wurden anhand von qualitativen Abschätzungen zu Kostenentwicklungen aus der Fachliteratur bzw. aus Angaben zur Komplexität der Produktion der

⁴ Fachliteratur: Fraunhofer IAO (2015), Frost and Sullivan (2016), Reif (2010), Goldman Sachs (2015), Bosch (2015)

⁵ Internetquellen: NTV (2015) - <http://www.n-tv.de/auto/Autonomes-Fahren-wird-fuer-Autobauer-teuer-article15487691.html>, Car IT (2015) - <http://www.car-it.com/kosten-fuer-autonomes-fahren-sinken-ab-2020/id-0042640>, Automobil Produktion (2016) - <https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/fahrzeugtechnik/volvo-autonomes-fahren-macht-autos-wesentlich-teurer-109.html>, Wired (2017) - <https://www.wired.de/collection/tech/googles-waymo-hat-eigene-hardware-fuer-autonome-fahrzeuge-entwickelt>

Komponenten quantifiziert. Beispielsweise wurde für die Systemkomponente Infrarotkamera eine geringere Lernrate im Bereich des Ultraschallsensors angenommen, weil Infrarotkameras eine vergleichsweise komplexe Bauweise aufweisen und das Kostendegressionspotenzial daher geringer als für weniger komplexe Bauteile eingeschätzt wird.

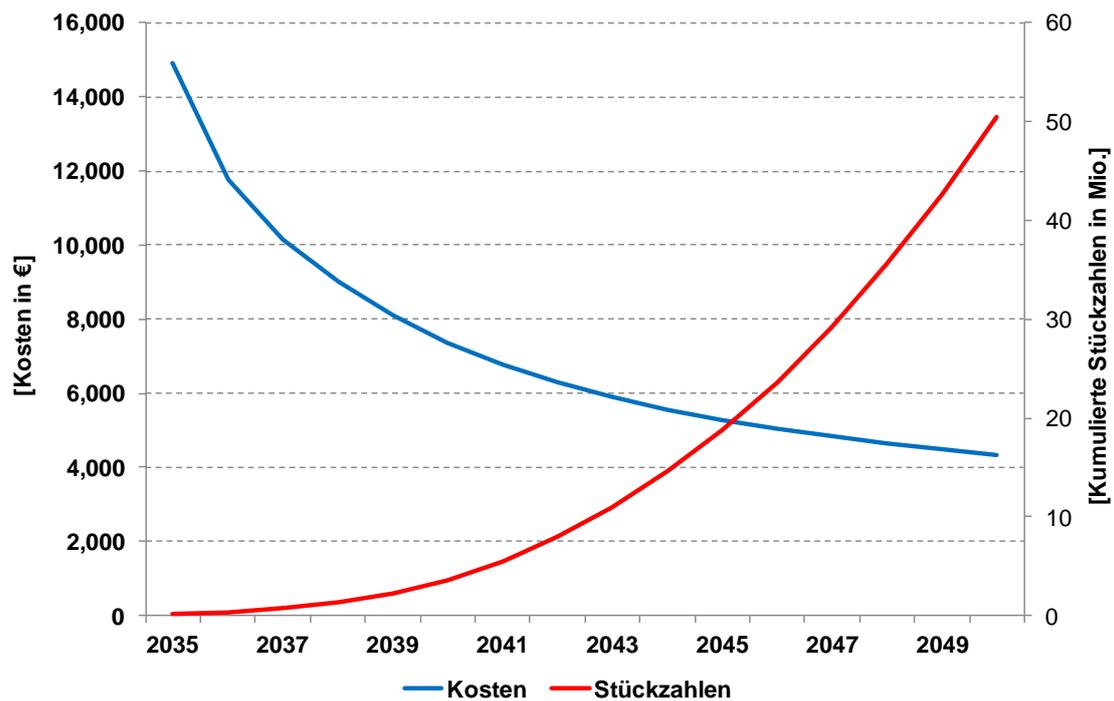


Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 10: Lernraten für relevante Komponenten

Abbildung 10 zeigt einen Überblick über die resultierenden Lernraten für die relevanten Systemkomponenten des Automatisierten Fahrens. Da die betrachteten Quellen teilweise unterschiedliche Produktionskosten pro Einheit bei gleicher Bauweise (Beispiel: LiDARe und RaDARe) angeben, bewegen sich die Kostendegressionspotenziale in einem Bereich zwischen einer minimalen und einer maximalen Lernrate. Für die Berechnung des Markthochlaufs in Kapitel 5 wurde eine mittlere Lernrate zwischen dem Minimal- und Maximalwert für die relevanten Komponenten angenommen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Kostendegression eines LiDAR bei einer vorsichtig gerechneten Prognose mit einer Lernrate von 0,2. Je größer die Lernrate, desto steiler sinkt die Produktionskostenkurve mit steigenden Absatzzahlen.



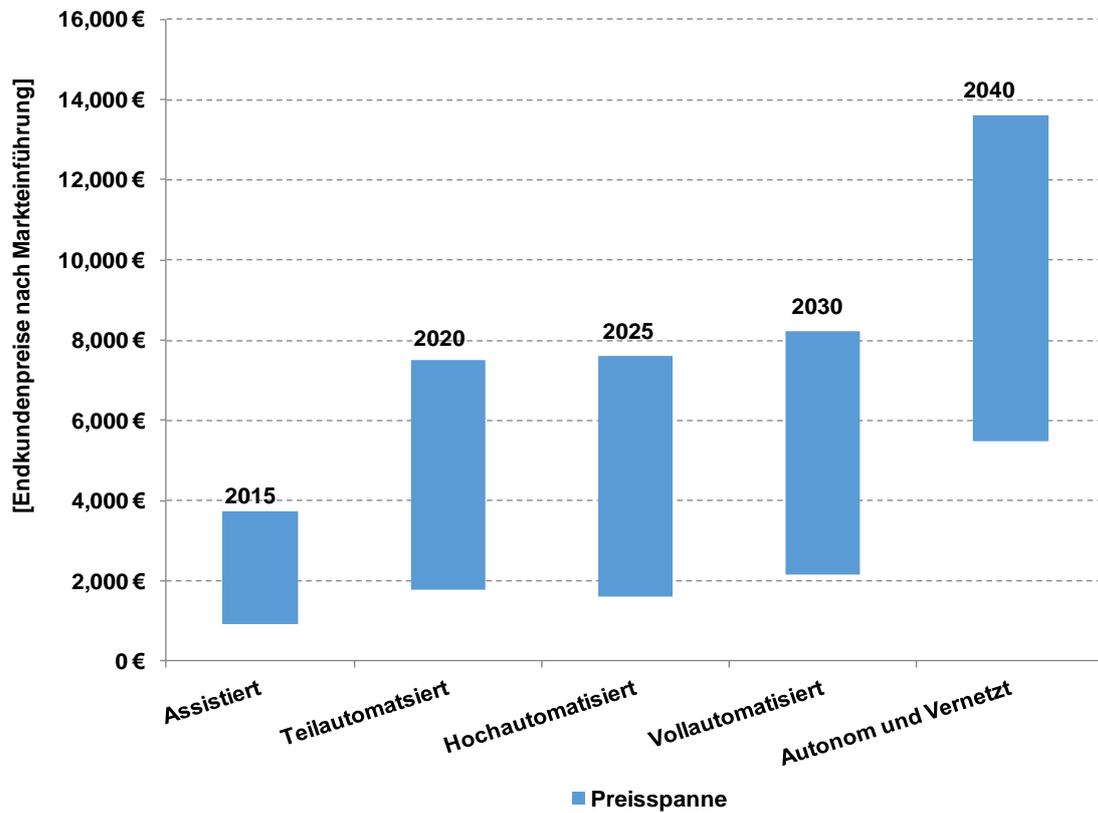
Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 11: Kostendegressionseffekte pro Stückzahl am Beispiel eines LiDAR

Das Beispiel des LiDAR zeigt, wie stark sich der Kostendegressionseffekt bei einem schnellen Markthochlauf auswirken kann. Da die Automobilbranche global aufgestellt ist und agiert, muss man bei einer Abschätzung des Mengendegressionseffektes die weltweiten Absatzzahlen an Fahrzeugen einbeziehen. Laut Deloitte wurden im Jahr 2017 weltweit mehr als 77 Millionen Pkw verkauft. Dies verdeutlicht, dass die für die einzelnen Automatisierungsstufen benötigten Komponenten schnell sehr hohe Stückzahlen erreichen können und die Kostendegression dadurch beschleunigt wird. Für die Berechnung des Markthochlaufs in dieser Studie wurden die weltweiten Neuzulassungen in den Märkten der EU, USA, Japan und Südkorea berücksichtigt, da dort die Automatisierung laut Einschätzung vieler Experten am schnellsten Fahrt aufnehmen wird.

Die finalen Endkundenpreise pro Fahrzeug und pro Automatisierungsstufe, mit denen der Markthochlauf in Kapitel 5 berechnet wurde, stammen somit aus der Aufrechnung der Produktionskosten der Einzelkomponenten versehen mit dem technologiespezifischen Lerneffekt. Für die Übertragung der Produktionskosten in Endkundenpreise wurde eine moderate durchschnittliche Gewinnmarge von 10 % für die Hersteller angenommen. Bereits vor der Berechnung des finalen Markthochlaufs für die Quantifizierung der THG- und EEV-Wirkungen wurden anhand eines fiktiven Markthochlaufs die Auswirkungen auf die zukünftigen Endkundenpreise je Automatisierungsstufe für Pkw berechnet und mit dem Fachpub-

likum diskutiert. Die aus den Spannweiten der Lernraten und den unterschiedlichen Angaben zu Produktionskosten der Komponenten resultierenden Preisspannen wurden von den Teilnehmern als realistisch angesehen (siehe Abbildung 12).



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 12: Preisspannen für die Ausstattung eines Pkw (Oberklasse) je Stufe

3 Akzeptanz des automatisierten Fahrens

Der Erfolg einer Innovation am Markt hängt nicht alleine von technoökonomischen Gesichtspunkten und damit von der angebotenen Technologie und den Kosten bzw. Preisen dieser ab. Wenn viele Kunden darin keinen Nutzen für sich sehen, kein Vertrauen in die Technologie oder gar Zweifel an der Sicherheit dieser haben, dann wird die Technologie zumindest vorläufig nicht erfolgreich sein.

Abschätzungen des Markthochlaufs von alternative Antrieben bei Fahrzeugen basieren beispielweise oftmals auf Vollkostenrechnungen (TCO - Total Cost of Ownership), bei denen die Wahl der Antriebsart bei Neuzulassungen anhand einer Optimierung der Vollkosten der Antriebsarten simuliert wird. Diese Modelle gehen davon aus, dass für bestimmte Jahreslaufleistungen von Fahrzeugen immer die kostenoptimalen Antriebsarten gewählt werden. Der Schwachpunkt bei diesen Modellen ist die Annahme, dass alle Kunden zum einen vollständig über die Folgekosten ihrer Wahl informiert sind und zum anderen sich immer wie ein Homo Oeconomicus verhalten. Die individuelle Wahrnehmung des Produkts, die Akzeptanz der Technologie, eventuell notwendige Änderungen des Verhaltens mit dem neuen Produkt sowie die Möglichkeit, dass die Kosten nicht der prioritäre Faktor bei der Wahl sind, werden dabei nicht berücksichtigt.

Im Falle des automatisierten und vernetzten Fahrens kommt eine Abschätzung des Markthochlaufs mittels TCO Modellen nicht nur aus den Gesichtspunkten der Unsicherheit aus Sicht des Kunden über die Kosten und Nutzen der Technologie nicht in Frage. Da es sich um eine neue Technologie handelt und die Kunden größtenteils noch keine persönlichen Erfahrungen damit sammeln konnten, spielen die Wahrnehmung und die Akzeptanz eine zentrale Rolle. Die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge schreitet voran und Prototypen werden bereits im Straßenverkehr getestet. Auch in der öffentlichen Diskussion ist das Thema angekommen und ruft hohes öffentliches Interesse hervor. So berichten Medien über neueste technische Entwicklungen und besonders Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen werden debattiert. Vor diesem Hintergrund wird es deshalb zunehmend wichtiger, sich mit der Wahrnehmung, insbesondere der Akzeptanz des automatisierten Fahrens aus Sicht der Gesellschaft zu beschäftigen. Dies umfasst Fragen nach der Wahrnehmung der Technologie durch potenzielle Nutzer, mögliche Bedenken und Ängste sowie der Absicht, diese zu nutzen oder zu kaufen, aber auch die soziopolitische Akzeptanz, d. h. die grundsätzliche Akzeptierbarkeit der Technologie, das gesellschaftliche Klima oder kulturelle Faktoren.

Akzeptanz wird hierbei verstanden als die Annahme einer neuen Technologie sowohl in passiver als auch aktiver Ausprägung. Dies beinhaltet Nutzungsabsichten und –Interesse. Diesen Themen wird in diesem Kapitel auf Basis einer systematischen Literaturanalyse nachgegangen, mit dem Ziel eine Grundlage für die Abschätzung eines potenziellen Markthochlaufs zu schaffen. Dafür werden neben der qualitativen Abschätzung der Akzeptanz

die Mehrpreisbereitschaften aus Befragungen von Kunden aus der betrachteten Fachliteratur für verschiedene Stufen der Automatisierung abgeleitet. Die Methodik für die Abschätzung des Markthochlaufs und die abgeleiteten Mehrpreisbereitschaften werden in Kapitel 5.1 detailliert beschrieben.

Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse der Akzeptanzanalyse beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei der Analyse inklusive der begrifflichen Abgrenzungen sowie die ausführliche Auswertung der verwendeten Literatur finden sich im Anhang dieser Studie (siehe Kapitel 8.3).

3.1 Zentrale Erkenntnisse der Analyse

In der Forschung wird zunehmend die Akzeptanz von automatisiertem Fahren analysiert. Der Schwerpunkt bisheriger Arbeiten liegt dabei auf dem motorisierten Individualverkehr (MIV) von Pkw im Privatbesitz, einzelne Studien betrachten auch andere Verkehre. Zudem werden bisher auch überwiegend hohe Automatisierungsstufen, d. h. vollautomatisiertes oder fahrerloses Fahren betrachtet.

Die für diese Studie durchgeführte Akzeptanzanalyse gliedert die betrachteten Studien im Bereich MIV nach soziopolitischer und Marktakzeptanz. Soziopolitische Akzeptanz umfasst dabei die Bekanntheit des automatisierten Fahrens, allgemeine Akzeptanz, unabhängig von einer tatsächlichen Nutzung oder Nutzungsabsicht, gesellschaftliche Leitbilder sowie wahrgenommene Vor- und Nachteile. Basis für die Mehrzahl der betrachteten Studien sind Befragungen unterschiedlicher Personengruppen und unterschiedlichen Umfangs.

Es zeigt sich, dass 55 bis 70 % der Befragten in den verschiedenen Studien bereits von der Technologie des automatisierten Fahrens gehört haben, d. h. die Mehrheit der Bevölkerung, wenn auch bei Weitem nicht alle Bürgerinnen und Bürger, haben bereits davon gehört. Dies impliziert allerdings nicht notwendigerweise ein vertieftes Verständnis z. B. bezüglich technischer Voraussetzungen. Was die allgemeine Bewertung automatisierten Fahrens angeht, finden sich in der betrachteten Literatur mehrheitlich positive Stimmen (50 % und mehr), z. B. dass es sich hierbei um eine nützliche technologische Weiterentwicklung handelt, wobei je nach Studie auch nennenswerte Anteile (20 bis 40 %) eher kritisch sind. Als besonders nützlich wird automatisiertes Fahren für monotone oder mühsame Fahrsituationen wie beispielsweise bei dichtem Verkehr oder der Parkplatzsuche betrachtet.

Viele Studien betrachten zudem die wahrgenommenen Vor- und Nachteile der Technologie. Als wichtigen Vorteil des automatisierten und vernetzten Fahrens sehen die Befragten eine höhere Sicherheit, indem durch die Nutzung der Systeme weniger Unfälle entstehen. Mit deutlichen Sicherheitseffekten wird jedoch erst dann gerechnet, wenn die Mehrzahl der Fahrzeuge automatisiert fährt. Häufig genannt werden auch Bequemlichkeit und Komfort. Weitere Vorteile der Technologie können aus Sicht der Befragten die Reduktion von Staus

sein, die Sicherstellung von Mobilität im Alter, ein besseres Zeitmanagement sowie soziale Aspekte, wie eine leichtere Kommunikation mit den Mitfahrern. Zudem sind nach Meinung der Befragten Umweltvorteile, etwa durch effizienteres Fahren, oder auch niedrigere Versicherungsprämien aufgrund geringerer Unfallzahlen vorstellbar.

Auf der Negativseite steht die Angst vor technischem Versagen bzw. der Zweifel an der technischen Zuverlässigkeit im Mittelpunkt. Weitere Bedenken bzw. wahrgenommene Nachteile der Technologie sind insbesondere der damit einhergehende Kontrollverlust und ein möglicher Verlust von Fahrspaß, insbesondere in dynamischen, eher abwechslungsreichen Fahrsituationen. Bis zu einem gewissen Grad geben die Befragten auch Bedenken hinsichtlich Datenschutzfragen oder IT-Sicherheit und in älteren Studien auch die zumindest vor der Gesetzesänderung 2017 noch nicht geklärte Haftungsfragen an. Vereinzelt wurden auch hohe Kosten der Technologie, ein vermuteter Verlust von Arbeitsplätzen im gewerblichen Verkehr und die Angst vor der Abhängigkeit von der Technologie genannt.

Hieran anschließend wurden Studien betrachtet, die die Marktakzeptanz automatisierten Fahrens thematisieren. Diese Studien evaluieren, inwiefern Interesse an der Nutzung und / oder dem Kauf automatisierter Fahrzeuge besteht. Die Studien ergeben, dass bei mindestens einem Drittel der Befragten eine Nutzungsbereitschaft von automatisierten Fahrzeugen gegeben ist. Jeweils bis zu einem weiteren Drittel der Befragten in diesen Studien können sich die Nutzung nicht vorstellen oder sind sich unsicher. Der Anteil der gegenüber der Automatisierung aufgeschlossenen Befragten ist tendenziell der Größte. Bei der Interpretation der Ergebnisse sowie Schlussfolgerungen bzgl. der weiteren Entwicklung der Akzeptanz besteht jedoch noch eine große Unsicherheit und vieles spricht dafür, dass auch die spezifische Formulierung der Fragestellung die genauen Antwortmuster beeinflusst. Wird die Kauf- und Nutzungsbereitschaft in Abhängigkeit von soziodemographischen Merkmalen betrachtet, so zeigen sich überwiegend bekannte Muster, wie dies auch von anderen innovativen Fahrzeugkonzepten bekannt sind (Plötz et al. 2014): Jüngere und Personen mittleren Alters sind aufgeschlossener als Ältere, Männer interessierter als Frauen, Gebildete, Personen mit höherem Einkommen, Bewohner von Städten und technophile Personen im Vergleich offener. In Abhängigkeit von den Automatisierungsstufen fällt eine Nutzungs- und Kaufbereitschaft für Stufen, die stärkeres Eingreifen zulassen und vor allem von Monotonie entlasten, leichter. Werden solche sozio-ökonomischen Variablen mit Variablen zur affektiven Bewertung, Systemvertrauen oder Nutzungsleichtigkeit kombiniert, so überlagern Letztere häufig die Effekte der sozio-ökonomischen Variablen. Welche dieser Variablen unter welchen Bedingungen und für welchen Anwendungsfall bedeutsam sind, ist aufgrund der noch begrenzten Zahl an Studien, die komplexere Forschungsdesigns umsetzen und tiefergehendere Analysen anwenden, schwer zu sagen.

Was bevorzugte Tätigkeiten während des Fahrens angeht, wenn die Steuerung in bestimmten Situationen oder insgesamt auf das Fahrzeug übergeht, so werden bisher häufig solche

betont, die auch aktuell mit dem Fahren vereinbar sind - aus dem Fenster sehen, mit Mitreisenden sprechen. Dies verdeutlicht, dass die durch die Automatisierung gewonnene Zeit nicht automatisch zu einer Steigerung der Effizienz führen muss. Es wird jedoch erkannt, dass die Fahrtzeit in automatisierten Fahrzeugen auch zur Entspannung, zum Schlafen, für das Schauen von Filmen, das Lesen von Büchern oder zum Arbeiten genutzt werden kann.

Tatsächliche Nutzungserfahrungen liegen bisher praktisch nicht vor, aber eine Reihe an Fahrsimulator-Studien ermöglicht eine Annäherung. Die Anzahl entsprechender publizierter Studien ist noch begrenzt und durchaus unterschiedlich in der Versuchsanordnung. Als gemeinsame Erkenntnis kann insofern insbesondere darauf verwiesen werden, dass Erfahrung (im Fahrsimulator) die Wahrnehmung und Einstellung zu automatisiertem und autonomen Fahren beeinflusst, wie Vorher-Nachher-Befragungen ergeben. Dabei spielen Fragen rund um Autonomie und Eingriffsmöglichkeiten eine wichtige Rolle.

Mehrpreisbereitschaften für automatisiertes Fahren wurden in einigen Studien ebenfalls abgefragt, wobei für höhere Automatisierungsstufen tendenziell höhere Preisbereitschaften bestehen. Im Mittel bzw. für größere Gruppen betragen diese in der Regel mehrere Tausend €, d. h. sind im Bereich für heute übliche Preise von Zusatzausstattung. Je nach Studie finden sich auch Teilgruppen, die keine oder vereinzelt auch sehr hohe Mehrpreisbereitschaften aufweisen. Die Studie von Detecon (2016) zeigt beispielweise, dass 24 % der Befragten Aufpreise von bis zu 5.000 € und 7 % Aufpreise bis zu 10.000 € akzeptieren würden. Etwas niedrigere Mehrpreisbereitschaften ermittelten Schoettle und Sivak. (2014) mittels repräsentativer Online-Stichproben in USA, UK und Australien (je ca. 500 Personen): Jeweils etwas mehr als die Hälfte der Befragten zeigt keine Mehrpreisbereitschaft für vollautomatisiertes und fahrerloses Fahren, ein Viertel gibt die Bereitschaft an, ca. 1.900 US \$ mehr zu zahlen (Schoettle und Sivak 2014). In den Untersuchungen von Kyriakidis et al. (2015) und Bansal et al. (2016) wurde herausgefunden, dass Befragte für die Technologie vollautomatisiertes Fahren mehr bezahlen würden als für teil- oder hochautomatisiertes Fahren: 22 % der Befragten weisen generell keine Mehrpreisbereitschaft für automatisierte Fahrzeugtechnologien auf; 5 % würden dagegen sogar über 30.000 US \$ für diese Technologie zahlen (Kyriakidis et al. 2015). Die Studie von Bansal et al. (2016) ergab auf Basis einer Befragung von 347 Einwohner von Austin (USA) Zahlungsbereitschaften von 7.253 US \$ für vollautomatisierte oder fahrerlose Fahrzeuge und von 3.300 US \$ für teil-automatisiertes Fahren. In der US-amerikanischen Studie der Boston Consulting Group gibt rund die Hälfte der Befragten an, eine Mehrpreisbereitschaft für einzelne Features teilautomatisierten Fahrens zu haben; die Preisbereitschaften liegen im Mittel bei ca. 2.300 € für automatisiertes Parken oder automatisiertes Autobahnfahren (The Boston Consulting Group (BCG) 2015a). Marberger et al. erfragen zu den untersuchten Szenarien urbaner Stauassistent bzw. -pilot und urbaner Assistent bzw. -pilot (s. o.) auch Preisbereitschaften. Akzeptable Preise bewegen sich im Bereich zwischen 400 und 800 € (Marberger et al. 2015). In der globalen Ausgabe der Studie des World Economic Forum zusammen mit BCG zeigt sich für Deutschland, dass 42 % der Befragten bereit sind, für autonomes Fahren mehr zu

bezahlen, von denen wiederum drei Viertel Aufpreise im Bereich von 3.000 bis 5.000 US \$ für akzeptabel halten (World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015). Neben diesen Studien hat Trommer (2017) die Ergebnisse einer deutschen Befragung im Rahmen des 2. Fachworkshops im Juli 2017 vorgestellt. In die Bewertung der Mehrpreisbereitschaften für diese Studie sind somit sowohl US-amerikanische als auch europäische und deutsche Befragungen eingegangen. Das Übertragen der Befragungsergebnisse aus der BCG Studie auf die deutschen Kunden wird als valide eingeschätzt, da die grundlegenden Mobilitätsbedürfnisse der Befragten in den USA nahezu identisch mit den in Deutschland sind. Kulturelle Unterschiede auch in Fragen der Mobilität und hinsichtlich von Innovationen sind sicherlich vorhanden, aber ob diese zu unterschiedlichen Angaben bei den Befragten geführt haben, lässt sich weder bestätigen noch widerlegen. Die Unterschiede der Ergebnisse auf diesen Märkten sind jedoch nicht so deutlich, dass man die Übertragbarkeit in Frage stellen muss.

Auch bei den Mehrpreisbereitschaften wurden Zusammenhänge mit soziodemographischen Merkmalen analysiert. Die Detecon-Studie zeigte, dass die Mehrpreisbereitschaft unter den unter 30-Jährigen höher ausgeprägt ist als in den anderen Altersgruppen (2016). Kyriakidis et al. haben keinen Zusammenhang mit dem Alter ermitteln können, aber sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Mehrpreisbereitschaft von Männern, von Personen mit hohem Einkommen sowie von Vielfahrern und Nutzern von Fahrassistenzsystemen höher als die der jeweils anderen Gruppe(n) ist (2015).

Studien zum zeitlichen Verlauf einer möglichen Marktdiffusion von automatisierten und autonomen Fahrzeugen zeigen insgesamt Einschätzungen, die im Einklang sind mit Experteneinschätzungen. So sind die möglichen Kundinnen und Kunden der Meinung, dass aktuell noch keine Marktreife besteht und eine Marktentwicklung über die nächsten Jahrzehnte zu erwarten ist.

Nur wenige Studien beschäftigen sich bisher mit der Akzeptanz für andere Verkehre wie eine Verbindung oder ein Einsatz von automatisierten und autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr (ÖV) oder im Fahrzeug- (Car) oder Fahrt- (Ride) Sharing. Hier zeigt sich, dass eine Automatisierung an sich aus Sicht der Bürgerinnen und Bürger keine Verbesserung darstellt, sondern nur dann überzeugt, wenn sie mit weiteren Vorteilen, z. B. mehr Komfort und Flexibilität bzw. Preisreduktionen einhergeht. Auf Skepsis stoßen Konzepte des Car- (Fraedrich et al. 2016) und Ride-Sharings (World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015). Dies ist nicht zwingend in dem Sinne zu interpretieren, dass solche Services nicht angenommen werden würden, aber dass diese außerhalb bestehender Routinen liegen und insofern zunächst auch schwer vorstellbar. Gleichzeitig gilt, dass diese nicht nur neuartig sein müssen, um sich durchzusetzen, sondern auch Vorteile bieten bzw. es Bedenken (z. B. bezüglich Sicherheit und Annehmlichkeit beim Ride-Sharing gemeinsam mit anderen, fremden Personen) ernst zu nehmen gilt.

4 Verkehrliche Wirkungen der Automatisierung

Eine zunehmende Automatisierung des Straßenverkehrs hat auf vielfältige Weise das Potenzial zur Änderung des Verkehrssystems, wie wir es heute kennen. Im folgenden Kapitel sollen die verkehrlichen Wirkungen der Automatisierung auf den Straßenverkehr qualitativ beschrieben werden. Zunächst werden die Ursachen einer möglichen Änderung des Verkehrssystems beschrieben und im Anschluss die verkehrlichen Wirkungen einzeln erläutert. Abschließend zeigt dieses Kapitel anhand der qualitativen Beschreibung zweier Zukunftsszenarien, welche Unterschiede sich im Falle eines Erfolges von automatisierten Sharingkonzepten (Mobility as a Service) zum heutigen Verkehrssystem ergeben können. Die hier vorgestellten Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" stellen die Grundlage für die quantitative Abschätzung des Markthochlaufs (siehe Kapitel 5) und der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr auf THG-Emissionen und den EEV dar (siehe Kapitel 6). Im Gegensatz zu anderen Studien beschreiben die beiden Szenarien keine "Entweder-Oder"-Fälle, sondern ein heterogenes Bild des Verkehrssystems der Zukunft. Im Falle der "Welt des Fahrzeugbesitzes" setzen sich neue Mobilitätskonzepte wie automatisiertes Car- oder Ridesharing aus Gründen der Privatsphäre nicht durch, wohingegen sich in der "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" die neuen Konzepte größerer Akzeptanz erfreuen und damit die Verfügbarkeit von Mobilität zunimmt.

4.1 Ursachen potenzieller Verhaltensänderungen

Vor dem Hintergrund der zu ermittelnden Auswirkungen von automatisiertem und vernetztem Fahren auf den Ausstoß von Treibhausgasen (THG) und den Endenergieverbrauch (EEV) ist eine Abschätzung der sich infolge dieses Digitalisierungsprozesses ergebenden Verhaltensänderung notwendig. Unter Verkehrsverhalten versteht man hierbei die Mobilitätsmuster im Personen- und Güterverkehr, die zu einer bestimmten Anzahl an Wegen mit bestimmten Zwecken, zurückgelegte Relationen, gewählte Verkehrsmittel und dafür benutzte Verkehrsinfrastruktur führen.

Das Verkehrsverhalten im Personenverkehr hängt von zahlreichen sozioökonomischen, räumlichen, kulturellen und politischen Einflussgrößen ab. Bühler und Kunert (2008) zeigen die zentralen Einflussgrößen gesammelt aus Mobilitätsstudien für Deutschland und die USA auf. Neben den Charakteristika der einzelnen Personen und den individuellen Mobilitätsbedürfnissen werden immer wieder folgende Faktoren als zentrale Einflussgrößen auf das Verkehrsverhalten genannt:

- Transport- bzw. Reisekosten,
- Transport- bzw. Reisezeiten,
- Besetzungsgrad bzw. Ladefaktor,
- Verfügbarkeit bzw. Erreichbarkeit,
- Zuverlässigkeit,

- Sicherheit und
- Komfort.

Mit Ausnahme der letzten Einflussgröße dieser Liste gelten diese auch für den Güterverkehr als entscheidende Parameter. Automatisiertes und vernetztes Fahren beeinflusst alle Einflussgrößen und erzeugt dadurch eine verkehrliche Wirkung. Diese Wirkung entsteht nicht erst mit der Stufe 5, dem fahrerlosen Fahren in Kombination mit V2V Vernetzung, sondern bereits durch die vorherigen Stufen der Automatisierung. Heutzutage beeinflussen die Verkehrsteilnehmer die entscheidenden Parameter zur Verkehrsmittelwahl über die Wahl des Wohn- und Arbeitsplatzstandortes. Sowohl die Kosten, die Reisezeit als auch der Wert der Zeit hängen von den Distanzen ab, die eine Person zurücklegt.

Wenn die Kosten und die Zeit für Mobilität durch die Automatisierung sinken, dann ist mit einer Erhöhung der Fahrleistungen zu rechnen. Die technoökonomische Analyse der Studien und die Abschätzung des Markthochlaufs haben gezeigt, dass automatisierte Fahrzeuge teurer in der Anschaffung sind. Allerdings zeigt sich angesichts der Energieeffizienzpotenziale (siehe Kapitel 6.1 - primäre Effekte), dass damit auch eine deutliche Einsparung der Betriebskosten möglich ist. Im Güterverkehr und im öffentlichen Verkehr ermöglichen automatisierte Fahrzeuge in gewissen Anwendungsfällen die Einsparung des Fahrers und damit in Kombination mit der verbesserten Effizienz der Fahrzeuge die Nutzung zu geringeren Transportkosten. Parkplatzsuchverkehre in urbanen Regionen können durch Valet-Parken bei automatisierten und vernetzten Fahrzeugen optimiert und damit Parkkosten reduziert und die Parkraumsuche vermieden werden.

Einige Studien gehen davon aus, dass mit zunehmender Automatisierung der Fahrzeuge die Kapazität der Infrastruktur steigt, also mehr Fahrzeuge pro Zeiteinheit ohne Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeit und damit einer sinkenden Reisezeit auf der Straße unterwegs sein können (vgl. Maurer et al., 2016). Simulationen mit Mikromodellen haben diese Wirkungen bestätigt, jedoch nur bei hohen Anteilen von fahrerlosen und vernetzten Fahrzeugen (vgl. Hartmann et al., 2017).

Eine weitere Verhaltensänderung kann durch die Möglichkeit der Ausübung fahrfremder Aktivitäten bereits ab Stufe 3 entstehen, wie sie ohne Automatisierung nur als Beifahrer oder im öffentlichen Verkehr möglich ist (vgl. Fraedrich et al. 2016). Dadurch kann sich eine Änderung der Bewertung der Reisezeit ergeben. Die Fahrtzeit wird unter Umständen als weniger störend und daher weniger entscheidend bei der Distanz- oder Verkehrsmittelwahl empfunden.

Automatisiertes Ridesharing kann zukünftig die Erreichbarkeit der Bevölkerung verbessern. Wenn dieses oder ähnliche Sharingkonzepte zukünftig zu attraktiven Kosten flächendeckend angeboten werden, kann die dadurch voraussichtlich steigende Nachfrage danach dazu führen, die durchschnittlich Besetzungsgrade im Straßenverkehr zu verbessern. Im Bereich des Güterverkehrs kann eine zunehmende Automatisierung ebenfalls zu

neuen Logistikkonzepten führen. Dadurch können unter anderem Leerfahrten vermieden werden. Der Beladungsfaktor selbst wird in Folge der bereits heute dominierenden Beschränkung durch das Ladevolumen und nicht die Nutzlast vermutlich nur marginal beeinflusst werden.

Neue Mobilitätsdienstleistungen mit automatisierten und vernetzten Fahrzeugen können die Erreichbarkeit und die Verfügbarkeit in Regionen ohne Anschluss an den öffentlichen Verkehr erhöhen, sofern es dafür zukünftig tragfähige Geschäftsmodelle gibt. Sie stellen damit einen Teil des als Mobility as a Service (MaaS) bekannten Konzepts dar, bei dem sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr zukünftig auf die Kunden maßgeschneiderte Mobilitätslösungen angeboten werden sollen. Dadurch ergeben sich neue Wahlmöglichkeiten bei der Verkehrsmittelwahl und auch neue Mobilitätsmuster.

Zahlreiche Studien sprechen zudem von einer Verbesserung der Verkehrssicherheit und einer Reduktion der Unfallwahrscheinlichkeit um 90 bis 100 % durch Automatisierung der Fahrzeuge (vgl. Anderson et al., 2016). Einige Studien (z.B. AdaptiVe-IP) haben dies in Feldtest bereits bestätigt. Sinkende Unfallzahlen bzw. das frühzeitige Erkennen von Unfallstellen mittels automatisierter und vernetzter Fahrzeuge führt zu einer Reduktion der Stauwahrscheinlichkeit durch die Eindämmung der Stauursache "Unfall".

Letztlich öffnen sich durch automatisierte und vernetzte Fahrzeuge auch für bisher vom MIV ausgeschlossene Personengruppen neue Optionen bei der Verkehrsmittelwahl. Sollte der Gesetzgeber bei Stufe 5 auch Personen ohne Fahrerlaubnis (z. B. Kinder) die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen erlauben, dann könnte auch dadurch eine Änderung der Fahrleistungen und des Verkehrsverhaltens entstehen.

Für die quantitative Abschätzung der Wirkungen auf das Verkehrsverhalten und damit auf die jährlichen Fahrleistungen pro Verkehrsmittel müssen die oben aufgeführten Ursachen berücksichtigt werden. Die daraus folgenden Wirkungen auf THG-Emissionen und den EEV werden in dieser Studie als sekundäre Effekte bezeichnet (siehe Kapitel 6.2). Die verkehrlichen Wirkungen und damit die sekundären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr werden in dieser Studie mit dem integrierten Verkehrs-, Ökonomie- und Umweltmodell ASTRA⁶, in der Version für Deutschland, berechnet. Sowohl die Fahrleistungen des Personen- als auch des Güterverkehrs werden innerhalb des ASTRA-Modells mittels eines 4-Stufen-Ansatzes berechnet. Um die Parametrisierung für die Abschätzung innerhalb des Modells zu ermöglichen, werden die möglichen Änderungen der zentralen Einflussvariablen im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

⁶ ASTRA = ASsessment of TRAnsport strategies, Quelle: www.astra-model.eu

4.2 Änderungen der Einflussgrößen auf das Verkehrsverhalten

4.2.1 Transport- bzw. Reisekosten

Für die Berücksichtigung der Veränderung der Transport- bzw. Reisekosten pro Fahrzeug und pro gefahrenem Kilometer muss beim MIV zwischen den verschiedenen Nutzungsformen unterschieden werden. Änderungen der Kosten bei Pkw in Privatbesitz bzw. Dienstwagen wirken sich anders auf die Verkehrsmittelwahl aus, als Änderungen bei Car- oder Ridesharing-Pkw (vgl. Ortúzar und Willumsen, 2011). Bei Fahrzeugen in Privatbesitz beeinflussen weniger die Vollkosten als vielmehr die sogenannten wahrgenommenen Kosten die Verkehrsmittelwahl. Diese beschränken sich laut der Fachliteratur auf die Kraftstoff- bzw. Energiekosten pro gefahrenem Kilometer. Zusätzliche Kosten bei der Beschaffung von Fahrzeugen mit einer bestimmten Automatisierungsstufe werden dadurch nicht in die Berechnung der Fahrleistungsänderung einbezogen. Für Pkw im Privatbesitz ergeben sich die Kostenänderungen damit aus den in Kapitel 6.1 beschriebenen primären Effekten. Im Falle der Nutzung von Pkw für Car- bzw. Ridesharing Fahrzeugen werden Vollkosten angesetzt, um die Wirkung von neuen Mobilitätskonzepten auf den Modal Split abzuschätzen.

Für die Berechnung der Auswirkungen der Automatisierung im Straßenverkehr auf den Modal Split wurden die Kosten aus einer Reihe von Studien gesammelt. Im Folgenden werden diese Studien kurz skizziert und die Kosten differenziert nach der Art der Mobilitätsdienstleistung (Car- bzw. Ridesharing) dargestellt.

Kosten des automatisierten Personenverkehrs

Burns et al. (2013) berechnen die Kosten je Fahrt für geteilte automatisierte Flotten in Klein- und Mittelstädten, den suburbanen wie auch den urbanen Raum. Die These der Studie ist, dass diese Systeme bessere Mobilität zu mitunter nur einem Zehntel derzeitiger Kosten bereitstellen können. Abhängig von der Fahrzeuggröße und der Größe der Stadt ergeben sich Kosten zwischen 0,15 US\$ und 0,46 US\$ je Meile (Bruns et al. 2013). Fagnant und Kockelmann erwarten bei einer zentral organisierten, geteilten und automatisierten Fahrzeugflotte Betriebskosten von 0,50 US\$ je Meile (Fagnant und Kockelmann 2015). Bei automatisierten und öffentlich geteilten Fahrzeugen werden Kosten von 0,34 US\$ je Meile prognostiziert. Diese variieren jedoch entsprechend der Jahresfahrleistung (Fagnant, Kockelmann 2014). Litman erwartet im Vergleich zu den zuvor genannten Autoren für geteilte fahrerlose Fahrzeuge mit 0,60 US\$ bis 1 US\$ pro Meile höhere Vollkosten (Litman 2016). Stephens und Gonder rechnen mit Vollkosten für automatisiertes Ridesharing in Höhe von 0,20 bis 0,30 US\$ pro Meile (Stephens, Gonder et al. 2016). Diese Höhe entspricht in etwa der angenommenen Kenngröße eines deutschen urbanen Ridesharingssystems mit mindestens 0,15 € je Kilometer. Die Vollkosten liegen ihrer Erwartung nach bei etwa 0,25 € je Kilometer. Sie gehen davon aus, dass die automatisierten Sharingsysteme teurer sind als der heutige ÖV (vgl. Friedrich und Hartl 2016). Auch das Institut für Mobilitätsforschung

(ifmo) prognostiziert Nutzerkosten von 0,30 bis 0,35 € je Kilometer, möglicherweise können diese in dicht besiedelten urbanen Gebieten sogar bis auf 0,10 € je Kilometer sinken (ifmo 2016, S. 49). Basierend auf niederländischen Kostenvergleichsdaten ermitteln Hazan und Lang Kostenkennwerte für das Carsharing (0,32 € je km) im Vergleich zu Preisen im Ride-sharing für zwei Personen (0,17 € je km), drei Personen (0,11 € je km) und vier Personen (0,9 € je km) (vgl. Hazan, Lang et al. 2016, S. 8).

Im Vergleich zu den oben genannten erwarteten Kosten für die Nutzung automatisierter Sharingangebote liegen die Nutzerpreise im Carsharing heute beispielsweise bei ausgewählten Deutschen Carsharingunternehmen, wie Cambio bei mindestens 2,50 € pro Stunde und zusätzlichen 22 Cent pro Kilometer und bei car2go bei 24 Cent pro Fahrminute und 19 Cent pro Parkminute. DriveNow nimmt 31 Cent pro Fahrminute und 15 Cent pro Parkminute. Flinkster hingegen rechnet ab 2,30 € pro Stunde und 18 Cent pro Kilometer. Stadtmobil nimmt einen Mitgliederbeitrag von 5 € im Monat und Fahrtkosten ab 1 € pro Stunde sowie ab 20 Cent pro Kilometer.

Eine ausführliche Kostenrechnung für autonome Mobilitätsangebote ermitteln Bösch, Becker et al. (2017) in ihrer Studie „Cost-based analysis of autonomous mobility services“ für die Schweiz. Als substantielle Einflussgrößen für die Investitions- und Betriebskosten werden die Elektrifizierung und die Automatisierung gesehen. Beide Entwicklungen werden die Kosten für die technische Ausstattung, die Versicherungs- und Energiekosten ebenso beeinflussen wie die wegfallenden Fahrerkosten im ÖV. Die nachstehende Abbildung zeigt die Kostenstrukturen eines privaten Mittelklasse-Fahrzeuges, eines nicht-gepoolten Taxis, Bussen und Zügen in urbanem Umfeld (in CHF).

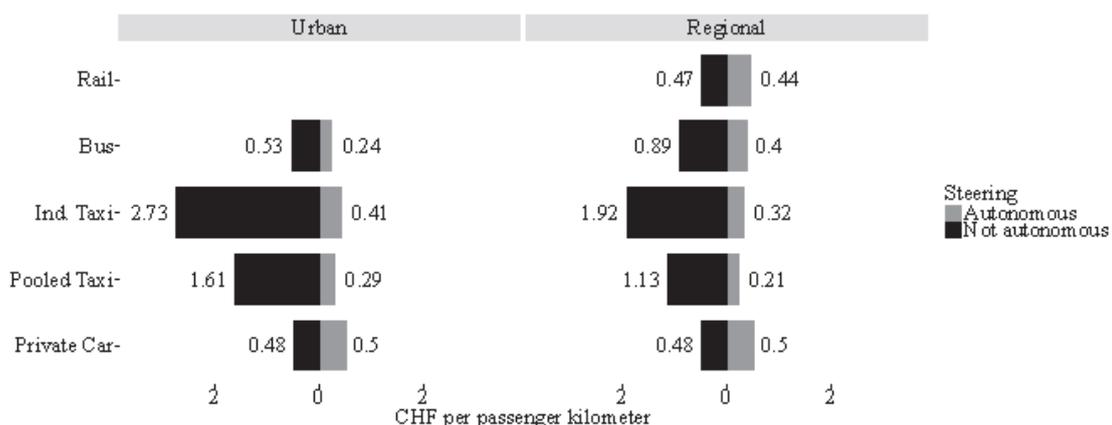


Fig. 2. Cost comparison of different modes with and without autonomous vehicle technology.

Quelle: Bösch, Becker, Becker et al. 2017, S. 7

Abbildung 13: Betriebskostenvergleich pro Mode mit und ohne Automatisierung

Im Vergleich zu den Studien von Burns et al. 2013, Stephens et al. 2016 oder Hazan et al. 2016 liegen die Kosten für geteilte Angebote bei Bösch, Becker et al. 2017 höher, da hier

Overhead-, Park-, Wartungs-, und Reinigungskosten berücksichtigt wurden. Insbesondere die Reinigungskosten von öffentlichen geteilten Fahrzeugen werden als wichtiger Kostentreiber und damit mitunter wettbewerbsentscheidend angesehen.

Tabelle 2: Kostenvergleich von Pkw-Mobilitätskonzepten mit und ohne AF

Verkehrsmittel	Kosten pro km		Quelle
	von	bis	
Carsharing AF	0.26 €	0.26 €	Fagnant und Kockelmann (2015)
	0.31 €	0.52 €	Litman (2016)
	0.32 €	0.32 €	Hazan, Lang et al. (2016)
	0.27 €	0.35 €	Bösch, Becker, Becker, Axhausen (2017)
Carsharing ohne AF	0.28 €	0.32 €	Cambio
	0.32 €	0.58 €	car2go
	0.41 €	0.74 €	DriveNow
	0.23 €	0.27 €	Flinkster
	0.27 €	0.30 €	Stadtmobil
Ridesharing AF	0.21 €	0.24 €	Bruns et al. (2013)
	0.18 €	0.18 €	Fagnant und Kockelmann (2015)
	0.10 €	0.16 €	Stephens, Gonder et al. (2016)
	0.15 €	0.25 €	Friedrich und Hartl (2016)
	0.30 €	0.35 €	ifmo (2016)
	0.09 €	0.17 €	Hazan, Lang et al. (2016)
	0.18 €	0.25 €	Bösch, Becker, Becker, Axhausen (2017)
Ridesharing ohne AF	0.97 €	1.38 €	Bösch, Becker, Becker, Axhausen (2017)

Quelle: Fraunhofer ISI

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die abgeschätzten Kosten mit wie ohne automatisierten Mobilitätsdienstleistungen (AF bzw. ohne AF). Während die Unterschiede bei Carsharing in den meisten Studien moderat ausfallen, wird besonders bei Ridesharing die Kostenreduktion für den Nutzer deutlich. Diese ist jedoch unter Umständen abhängig vom Besetzungsgrad und dem Fahrzeugtyp. Für die Berechnung der Wirkungen auf die Fahrleistungen im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" wurden Durchschnittswerte aus den betrachteten Studien berücksichtigt. Die Änderung der wahrgenommenen Kosten ergibt sich hier anhand der angenommenen Anteile der Fahrleistungen der drei Kategorien privater Pkw, Carsharing und Ridesharing und der Anteile der Fahrzeuge in der Flotte gemäß der Ergebnisse des Markthochlaufs (siehe Kapitel 5).

Kosten des automatisierten Güterverkehrs

Für den Straßengüterverkehr (und den öffentlichen Straßenverkehr) ergeben sich die Kostenänderungen durch die Automatisierung der Fahrzeuge mittels einer Vollkostenbetrachtung. Diese setzen sich beim Straßengüterverkehr zusammen aus:

- Anschaffungskosten,
- Fahrerkosten,
- Versicherung,
- Steuern und Verwaltungskosten,
- Kraftstoff-, Energie- und Schmierstoffkosten,
- Reifen,
- Wartung bzw. Reparatur und
- Straßennutzungsgebühren.

Die Wirkungen auf die Kosten der Automatisierung basieren in dieser Studie auf der detaillierten technoökonomischen Analyse und der Abschätzung des Markthochlaufs (siehe Kapitel 5). Die Kostenschätzungen dieser Methode sind vergleichbar mit den Schätzungen von Roland Berger (2016). Sie ermittelt bei der Markteinführung einen maximalen Anstieg der Anschaffungskosten um 23 %. Im Bereich der Fahrerkosten schätzen die betrachteten Studien eine Reduktion der Kosten von bis zu 90 % (vgl. Roland Berger, 2016; e-Mobil BW, 2015). Für die weitere Berechnung in dieser Studie wurde eine vorsichtige Annahme für die Reduktion der Fahrerkosten von 80 % angenommen. Im Bereich der Versicherungskosten gehen viele Studien ebenfalls von einem Rückgang der Prämien und damit der Kosten aus. Diese sinken laut Annahme um 8 % für jedes automatisierte Fahrzeug, jedoch erst ab Automatisierungsstufe 4. Die Effizienzpotenziale durch einen geringeren Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch, der sich aus der Analyse der primären Effekte (siehe Kapitel 6.1) ergibt, zeigt ebenfalls ein Kostenreduktionspotenzial von bis zu 17 % bei der Automatisierungsstufe 5. Dabei ist bereits der Trend hin zu steigenden Anteilen elektrifizierter Fahrzeuge berücksichtigt. Mehrkosten für automatisierte Fahrzeuge wurden durch zusätzlichen Wartungs- und Reparaturaufwand in Höhe von weiteren 5 % aus den betrachteten Studien abgeleitet. Die Gesamtwirkung auf die Vollkosten ergeben sich differenziert nach zwei Entfernungsklassen anhand der vorliegenden Tabelle. Anhand der Unterscheidung nach Entfernungsklassen lassen sich die Fahrzeugsegmente diesen beiden Kategorien zuordnen. SNF (hauptsächlich Sattelzugmaschinen) und Reisebusse sind prioritär im Fernverkehr in Verwendung, während LNF, Stadt- und Kleinbusse vorrangig kürzere Entfernungen bedienen. Die Anteile an den Gesamtkosten wurden anhand der Angaben des Bundesverbandes Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) abgeleitet⁷.

⁷ Quelle: http://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm

Tabelle 3: Anteile der Kostenarten an den Vollkosten bei Nutzfahrzeugen

Kostenart	Kostenstruktur Lkw + Bus 2016	
	Fernverkehr	Nahverkehr
Anschaffung	10%	13%
Fahrer	32%	45%
Versicherung	3%	3%
Steuern und Verwaltung	12%	17%
Kraft- und Schmierstoffe	26%	14%
Reifen	2%	1%
Wartung und Reparatur	5%	5%
Straßenbenutzungsgebühr	9%	1%

Quelle: BGL, Darstellung des Fraunhofer ISI

Bei der Nutzung von Fahrzeugen der Automatisierungsstufe 5 ergibt sich somit unter Anwendung der vorab beschriebenen Annahmen zu Kostenreduktionspotenzialen bezogen auf die dargestellte Kostenstruktur in Tabelle 3 eine Reduktion der Vollkosten in Höhe von 27 % für SNF und Fernbusse (siehe Fernverkehr) bzw. von 35 % für LNF, Stadt- und Kleinbusse (siehe Nahverkehr).

Kosten des automatisierten Schienenverkehrs

Die vorliegende Studie legt den Fokus auf den Straßenverkehr. Eine einseitige Bewertung des automatisierten und vernetzten Fahrens mit zumeist positiven Wirkungen auf die Einflussgrößen "Kosten" und den "Wert der Zeit" im Straßenverkehr würde jedoch ceteris paribus für die Schiene und die Wasserstraße zu einer Überschätzung der Änderung der Verkehrsmittelwahl hin zur Straße führen. Daher geht die Studie auch von einer zunehmenden Automatisierung im Bereich des Schienenverkehrs aus, mit entsprechenden Änderungen der Kosten. Die durch Automatisierung möglichen Änderungen wurden dabei aus der Studie "Multimodal Promotion"⁸ des Fraunhofer IML entnommen.

⁸ Quelle: <https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b3/verkehrslogistik/produkte/multimodalPromotion.html>.

Tabelle 4: Anteile der Kostenarten an den Vollkosten bei Schienenfahrzeugen

Kostenart	Anteile
Trasse	27,6%
Energie	9,2%
Lokomotive	17,0%
Wagen Miete	11,8%
Rangierleistung	7,6%
Wagentechnische Untersuchung	1,3%
Lokführer	6,4%
Overhead	11,0%
Unternehmerisches Risiko/ Gewinn	8,1%

Quelle: Fraunhofer IML

Es wird in dieser Studie angenommen, dass bei voller Automatisierung im Schienenpersonen- und -güterverkehr der Kostenfaktor des Lokführers und der Rangierleistung entfällt. In der Summe ergibt sich bei voller Automatisierung ein maximales Kostenreduktionspotenzial von 14 % des Schienenverkehrs. Dieses wird laut Annahmen in den Berechnungen bis zum Jahr 2050 erreicht. Da aus der betrachteten Literatur keine Kostenanteile für die Binnenschifffahrt entnommen werden konnten, wurde das gleiche Potenzial auch für Binnenschiffe angenommen.

4.2.2 Transportzeiten und Kapazität der Straßeninfrastruktur

Neben den Änderungen im Verkehrsverhalten entstehen durch eine zunehmende Automatisierung auch Auswirkungen auf die zur Verfügung stehende Kapazität. Dabei ist zwischen zwei unterschiedlichen Auswirkungen zu unterscheiden. Auf der einen Seite kann das automatisierte Fahren die Verfügbarkeit der Infrastruktur beeinflussen. In erster Linie entsteht dieser Effekt durch eine Erhöhung der Verkehrssicherheit und durch die Vermeidung von Unfällen. Auf der anderen Seite beeinflusst das automatisierte Fahren bei einer vollständigen Verfügbarkeit der Infrastruktur den möglichen Durchsatz an Fahrzeugen pro Zeiteinheit.

In der „Normalsituation“ der vollen Verfügbarkeit der Infrastruktur sind die Effekte der Automatisierung vielfältiger. In der Studie „Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur“ der TU München und des KIT (Hartmann et al. 2017) wurden durch Simulationen und Modellrechnungen die Auswirkungen verschiedener Automatisierungsstufen auf die Kapazität untersucht. Hierbei zeigen sich die folgenden Entwicklungen der Kapazität von Autobahnen bei einer angenommenen Flottendurchmischung:

- Im Jahr 2030 kommt es zu einem Rückgang der Kapazität um 1 %.

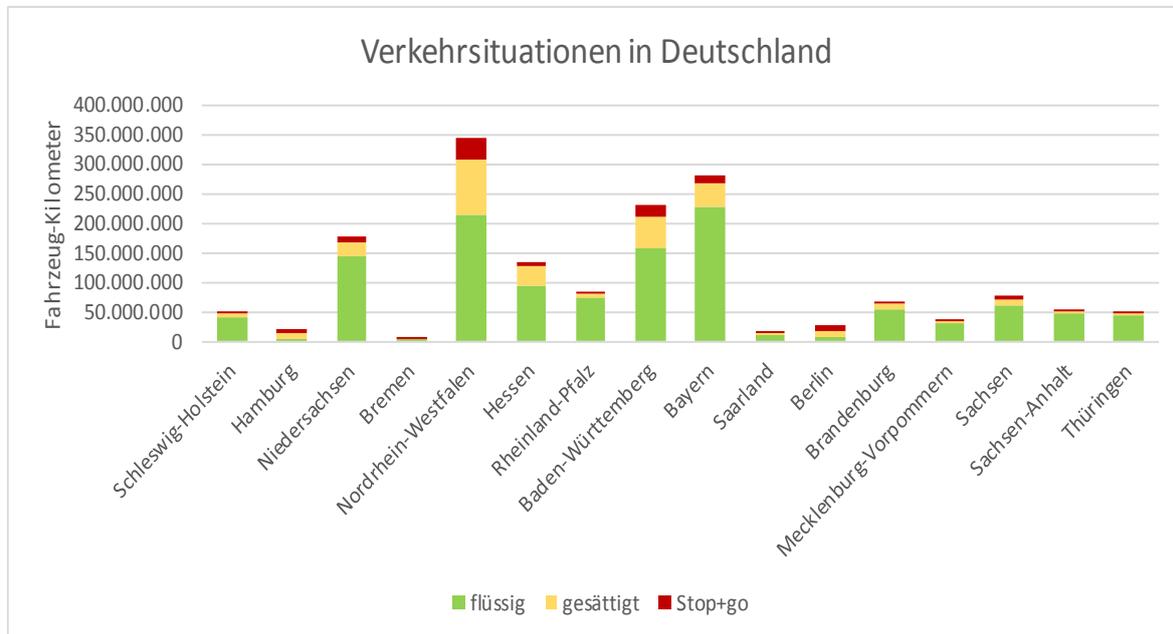
- Im Jahr 2040 kommt es zu einem Rückgang der Kapazität um 7 %.
- Im Jahr 2050 kommt es zu einem Rückgang der Kapazität um 9 %.
- Nach dem Jahr 2050 kommt es zu einer Kapazitätserhöhung um 30 % bis 43 % (Extremszenario).

Der positive kapazitative Effekt des automatisierten Fahrens entsteht durch Platooning, welches eine bessere Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur ermöglicht. Dieser Effekt tritt aber erst dann ein, wenn der Anteil der platooning-fähigen Fahrzeuge in der Flotte (Pkw und Lkw) hoch ist. Dieser Effekt wird erst nach dem Jahr 2050 erreicht. Bei einem geringen Anteil automatisierter und platooning-fähiger Fahrzeuge im Mischverkehr entsteht ein gegenteiliger Effekt, weil die automatisierten Fahrzeuge (StVO-konform) einen größeren Sicherheitsabstand zum nicht-automatisierten vorausfahrenden Fahrzeug einhalten müssen, als dies der menschliche Fahrer in der Regel macht. Somit kommt es bis zum Jahr 2050 zu einer leichten Reduktion der Kapazität im fließenden Verkehr. Eine deutlich kapazitätserweiternde Wirkung des automatisierten Fahrens auf Straßen wird durch Maurer et al. (2015) angegeben. Es werden hier Kapazitätserweiterungen bis zu 80 % auf BAB und 40 % in Städten ermittelt. Diese werden jedoch nur möglich, wenn die Annahmen der Studie erfüllt sind. Dazu zählen die Reduktion der maximalen Geschwindigkeit auf BAB auf 80 km/h und 20 km/h in der Stadt. Zusätzlich müssten die gesetzlichen Mindestabstände verdoppelt werden, um die kapazitätseinschränkenden Wechselwirkungen zwischen menschlich gesteuerten und automatisierten Fahrzeugen abzufedern. Da diese beiden Annahmen mit den heutigen Rahmenbedingungen nicht kombinierbar erscheinen und es durch die Reduktion der Geschwindigkeit generell zu einer Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeiten und damit einer Erhöhung der Reisezeiten kommt, wurden für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen in Kapitel 6.2 die Kapazitätswirkungen von Hartmann et al. (2017) gewählt.

Da laut den Ergebnissen des Markthochlaufs in Kapitel 6 sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr keine 100 % Diffusion automatisierter und vernetzter Fahrzeuge auf der Straße in Deutschland bis zum Jahr 2050 wahrscheinlich ist, wurden die Abschätzungen der gewählten Studie zu den Reisezeiten im Mischverkehr gewählt. Die resultierenden Auswirkungen auf die Entwicklung der Reise- und Transportzeiten zeigen damit eine leichte Erhöhung in Höhe von maximal 4 % im Vergleich zum Referenzszenario ohne Automatisierung.

Um im Rahmen der vorliegenden Studie die Herleitung der Auswirkungen auch auf die Emissionen besser abschätzen zu können, wurden unter Verwendung des Verkehrsmodells PTV Validate Modellrechnungen zur Zusammensetzung der Verkehrssituationen durchgeführt. Hierfür war eine Ermittlung von stundenfeinen und richtungsbezogenen Belastungszahlen von Bedeutung. Diese wurden mit Hilfe einer Dynamisierungsrechnung aus den Tagesbelastungswerten in Validate errechnet. Im Verhältnis zu den streckenspezifischen Kapazitäten wurde für alle Strecken in Deutschland eine Verteilung der Auslastung

über den Tag ermittelt. Daraus lässt sich eine Zuordnung von Verkehrssituationen ableiten. Die folgende Abbildung zeigt eine Darstellung der Verteilung der Verkehrssituationen in Deutschland.



Quelle: PTV Validate

Abbildung 14: Verteilung der Pkw-Verkehrssituation in Deutschland je Bundesland

Zu erkennen ist der hohe Anteil der Fahrleistung in den dicht besiedelten Flächenländern NRW, Bayern und Baden-Württemberg mit einem signifikanten Anteil an „Stop+go“-Verkehr im Tagesverlauf. In diesen drei Bundesländern zusammen wird etwas mehr als die Hälfte der Fahrleistung im deutschen Straßennetz abgewickelt. Prozentual ist der Anteil des flüssigen Verkehrs in den Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen am geringsten.

Differenziert nach den Straßenkategorien „Autobahn“, „Landstraße“ und „Stadtstraße“ zeigt sich das folgende Bild:

Tabelle 5: Anteile der Fahrleistungen nach Straßentyp

Fahrzeug	Segment	Autobahn	Innerortsstraße	Landstraße
Pkw	Oberklasse	39%	30%	30%
Pkw	Kleinwagen	24%	38%	38%
Pkw	Mittelklasse	33%	33%	33%
Lkw	LNF	33%	33%	33%
Lkw	SNF	55%	10%	35%
Bus	Kleinbus	33%	33%	33%
Bus	Reisebus	55%	10%	35%
Bus	Stadtbus	5%	50%	45%

Quelle: PTV Validate

Es zeigt sich, dass der Anteil der staubedingten Störungen auf Stadtstraßen erwartungsgemäß am größten und im Außerortsbereich auf Landstraßen am geringsten ist. Hier ist die Verkehrssituation ohne Baustellen oder unfallbedingte Störungen modelliert.

Unter Verwendung der deutschlandweiten Fahrleistungserhebung (Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung) (Bäumer et al. 2017) lassen sich die Verkehrssituationen mit Fahrzeuggrößenklassen kombinieren. Daraus ergibt sich eine Verteilung der Fahrleistung (FL) in Deutschland je Straßen- und je Fahrzeugkategorie auf die Verkehrssituationen. Für die Berechnung der THG-Emissionen und des EEV werden die Anteile der Fahrleistungen pro Fahrzeugsegment für die drei Straßentypen Autobahn, Innerortsstraße und Landstraße verwendet.

Tabelle 6: Verteilung der Verkehrssituationen auf Straßen- und Pkw-Segmente

Straßentyp	Verkehrsdichte	Kleinwagen	Mittelklasse	Oberklasse
Autobahn	flüssig	33%	22%	22%
Autobahn	Dicht	8%	5%	5%
Autobahn	Stop+go	2%	1%	1%
Landstraße	flüssig	45%	23%	24%
Landstraße	Dicht	3%	2%	2%
Landstraße	Stop+go	1%	0%	0%
Innerortsstraße	flüssig	25%	13%	13%
Innerortsstraße	Dicht	15%	8%	8%
Innerortsstraße	Stop+go	9%	5%	5%

Quelle: Bäumer et al. 2017, PTV Validate

4.2.3 Wahrnehmung des Zeitverlusts im Verkehr

Die Mobilität in selbstfahrenden Fahrzeugen kann den Nutzern zukünftig die Ausübung fahrfremder Aktivitäten ermöglichen, wie sie ohne Automatisierung nur im öffentlichen Verkehr oder als Mitfahrer im Pkw möglich sind. In der Fachliteratur gibt es diesbezüglich Diskussionen über die dadurch steigende Effizienz. In der Theorie sinkt damit der sogenannte Wert der Zeit, der benutzt wird, um die Reisezeit zu monetarisieren und damit sowohl Reise- und Transportkosten als auch Reise- und Transportzeiten in die Abschätzung der Distanz- und der Verkehrsmittelwahl einzubeziehen. Die Addition der mittels des Werts der Zeit gewichteten Reisezeit und den Reisekosten ergibt die sogenannten generalisierten Kosten. Je höher der Wert der Zeit, desto gewichtiger wird die Reisezeit bei der Entscheidung der Distanz- und Verkehrsmittelwahl (vgl. Ortúzar und Willumsen, 2011). In der Fachliteratur existieren zahlreiche Ansätze und damit auch Größenordnungen für die Bewertung der Reise- bzw. Transportzeit. Laut der Studie des Fraunhofer IAO (2016) ergibt sich anhand von Umfragen ein Wert der Zeit zwischen 23 € und 28 € pro Stunde. Umfragen haben jedoch gezeigt, dass nur ca. 50 % der befragten Personen die "gewonnene" Zeit in einem automatisierten Fahrzeug auch produktiv nutzen würden (vgl. Kapitel 8.3.3). Daher wurde für die Bewertung der Reisezeit eine Halbierung des Wertes der Zeit angenommen und in die Berechnung der Änderung des Modal Split einbezogen.

4.2.4 Neue Nutzergruppen

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Fahrleistung und die Fahrzeugzahl sind die mit jeder einzelnen Fahrt verbundenen Voraussetzungen zur Erfüllung von Fahrtwünschen. Im konventionellen Sinne sind dies maßgeblich Fahrzeugverfügbarkeit, Führerscheinbesitz und Ausführbarkeit der Fahrtätigkeit. Vor dem Hintergrund vernetzter Fahrzeuge mit Automatisierungsfunktionen der Stufe 4 und 5 ist es denkbar, dass Personen ohne Fahrerlaubnis oder mit körperlichen bzw. geistigen Einschränkungen Fahrzeuge eigenständig nutzen. Aus diesem Grunde wird derzeit diskutiert, ob und wenn ja, welche zusätzlichen Nutzergruppen im Straßenverkehr durch selbstfahrende Fahrzeuge hinzukommen könnten. Genannt werden immer wieder sowohl alte, kranke, behinderte Menschen, Personen, die im Autoverkehr unsicher sind wie auch Personen ohne Führerschein. Letztgenannte können Kinder und Jugendliche sein, aber auch Menschen, denen der Führerschein entzogen wurde. Es handelt sich demnach um Personen, die zum eigenständigen Fahren eines Pkw nicht gewillt oder in der Lage sind, wohl aber den Wunsch nach Mobilität haben und damit tendenziell zusätzliche Nachfrage nach Fahrten im automatisierten MIV erzeugen können. Heutzutage nutzt ein Teil dieser Gruppe die Dienste von Verwandten oder Bekannten sowie Taxen oder alternativer Verkehrsmittel. Andere haben wiederum nicht die Möglichkeit mangels Alternativen oder Kosten ihren Wohnort zu verlassen und sind an diesen gebunden. Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge böten eine komfortable und kostengünstige Möglichkeit zum MIV für diese Personenkreise.

In einigen Studien wird ein möglicher Einfluss auf die Mobilität und somit auch die MIV-Fahrleistung durch zusätzliche Nachfragegruppen genannt. Nur wenige Arbeiten machen dazu jedoch konkretere Angaben. Eine der ausführlichsten Ausführungen dazu macht die Studie „Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions“ von Harper, Hendrickson et al. (2016). Die Autoren gehen davon aus, dass sich die Fahrleistung durch die neuen Nutzergruppen autonomer Fahrzeuge (Kinder und Jugendliche werden dabei nicht berücksichtigt) bei einer vollständigen Durchdringung der US-Flotte mit fahrerlosen Fahrzeugen um bis zu 14 % erhöhen könnte. Vorausgesetzt wird in der Studie jedoch, dass Personen ohne Führerschein, mobilitätseingeschränkte, kranke und ältere Personen ein Mobilitätsverhalten ähnlich der heutigen mobilen, arbeitenden Bevölkerung zeigen. Der größte Zuwachs wird dabei in der Gruppe der Frauen und der Senioren ausgemacht. Harper und Hendrickson untergliedern die möglichen neuen Nutzergruppen in eine neun prozentige Steigerung der Fahrleistung durch die zusätzliche Mobilität derjenigen, die bislang nicht Auto gefahren sind, in die Gruppe der älteren Menschen (65+) mit einer Fahrleistungszunahme von 2,2 % und in die Gruppe der Menschen im Alter von 19 bis 64 Jahren mit gesundheitlichen Einschränkungen mit einem Zuwachs an Kilometern um 2,6 %. Alternative Studien erwarten einen Zuwachs an Fahrleistung durch bislang nicht eigenständig fahrende Personen von insgesamt 2 bis 11 % (siehe Sivak/Schoettle in Litman 2016: 8; Wadud et al. 2016; Fagnant/Kockelmann 2015). Unter der Annahme, dass die bislang mobilitätseingeschränkten Personen zwischen 16 und 85 Jahren das gleiche Fahrverhalten an den Tag legen wie die oberen 10 % der mobilen Bevölkerung, kommen Brown et al. zu der Aussage, dass die Fahrleistung der bislang in ihrer Automobilität unterversorgten Bevölkerung um bis zu 40 % steigen könnte (Brown et al. 2014).

Ogleich vor dem Hintergrund des demografischen Wandels mit einer deutlichen Zunahme der Alterskohorte 65+ auch in Deutschland zu rechnen ist, fließen keine zusätzlichen Fahrleistungssteigerungen durch hinzukommende Nutzergruppen in die vorliegende Studie mit ein. Erstens bestehen aufgrund fehlender Anwendungsmöglichkeiten noch große Unsicherheiten bezüglich der Nachfrage durch neue Nutzergruppen. Zweitens liegen die MIV Modalanteile der Gruppen 65+ bei mit gut einem Drittel (33,3 %) nur geringfügig unter den Anteilen der Altersgruppe der 18- bis 64-Jährigen (36,2 %) (Mobilität in Deutschland 2008). Die knapp drei Prozent Unterschied weisen evtl. auf körperliche Einschränkungen hin. Es ist jedoch davon auszugehen, dass etliche dieser Personen auf eine helfende Hand zum Ein- und Ausstieg bzw. zur Betreuung während der Fahrt angewiesen sind und daher auch künftig eher ein konventionelles Taxi als ein so genanntes Robot-Taxi bestellen. Die Gruppe der Kinder sind bereits heute mit etwa 44 % Modalanteil Mitfahrer im Pkw. Vorausgesetzt, die Kinder führen in selbstfahrenden Fahrzeugen ohne Eltern oder Bekannte, bliebe ein Effekt auf die Fahrzeugkilometer aus. Drittens würde die Fahrleistungswirkung neuer Nutzergruppen für die Untersuchung deutlich geschwächt, da der Markthochlauf in beiden Szenarien gezeigt hat, dass bis zum Jahr 2050 nur ein kleiner Teil der Fahrzeugflotten mit

Automatisierungsstufe 5 ausgestattet sein wird. Demnach wären oben genannte Dienstleistungen nicht überall, sondern nur in einigen räumlichen Teilbereichen verfügbar. Mit nach 2050 potenziell steigenden Anteilen an fahrerlosen Fahrzeugen kann es jedoch zu Steigerungen der Fahrleistungen durch neue Nutzergruppen kommen.

4.2.5 Neue Mobilitätskonzepte durch automatisiertes und vernetztes Fahren

Wo sich welches Mobilitätsangebot durchsetzt, hängt stark vom Preis, der Erreichbarkeit und Taktung sowie der gewünschten Nutzung ab. Ein verändertes Nutzerverhalten resultiert häufig in neu hinzukommenden Mobilitätsangeboten, ebenso können neu geschaffene Angebote das Verhalten beeinflussen.

Bereits in den vergangenen Jahren haben sich die Verkehrsangebote bezüglich der gemeinsamen Nutzung von Fahrzeugen weiter ausdifferenziert. So finden sich heute neben den klassischen Privatfahrzeugen von Haushalten und Unternehmen sowie dem klassischen, liniengebundenen ÖPNV mit schienengebundenen Fahrzeugen und Bussen zunehmend Pkw und Kleinbusse, die von verschiedenen Personen nacheinander (Carsharing) oder auch zur gleichen Zeit miteinander (Ridesharing) genutzt werden. Während die klassische Form, d. h. die Mitnahme von Nachbarkindern zur Schule oder von Arbeitskollegen zur Arbeitsstelle, als Ridesharing bezeichnet wird, ist unter dem Begriff Rideselling das Mitfahren in einem privaten Pkw zu verstehen, das vom Kunden einerseits bezahlt werden muss, beim dem der Fahrgast andererseits aber auch bestimmt, ob und mit welchem Ziel eine Fahrt unternommen wird.

Etlche Fachartikel weisen darauf hin, dass es zudem zu einem Verschwimmen von privater und öffentlicher Mobilität kommt. Neben dem klassischen stationsbasierten Carsharing und den flexiblen stationsunabhängigen Angebotsformen kommen vermehrt firmeninterne Carsharingflotten u. a. zur Privatnutzung in den Abendstunden und private Formen des so genannten Peer-to-Peer Carsharing⁹ zum Einsatz. Flexible Bedienungsformen im ÖPNV (Rufbus) sind bereits seit über zwanzig Jahren in unterschiedlichen Betriebsformen erprobt (Linien-, Sektor- oder Flächenbedienung). Aber erst in den letzten Jahren kommen sie in größerem Umfang zum Einsatz, vor allem in nachfrageschwachen Räumen und zu nachfrageschwachen Zeiten. Vermehrt wird die Bedienung von nachfrageschwachen Räumen auch mit Hilfe von ehrenamtlich fahrenden Bürgern in so genannten Bürgerbussen organisiert.

Die Digitalisierung erleichtert den Zugang, die Buchung und die Abrechnung dieser neuen Angebotsformen sowie die intermodale Verknüpfung neuer und alter Mobilitätsangebote durch (Online-)Plattformen und Apps zumindest für den technikaffinen Teil der Bevölke-

⁹ Peer-to-Peer Carsharing bezeichnet das Konzept des privaten, teils nachbarschaftlichen Teilens eines Fahrzeugs.

zung. Kommt die Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge hinzu, so steht einer weiteren Flexibilisierung des Öffentlichen Verkehrs entsprechend der Fahrt- und Transportwünsche der Kunden technisch nichts im Wege. Dementsprechend kann es zu vermehrter Tür-zu-Tür-Bedienung anstelle von an Fahrplan und Haltestellen gebundener Linienführung kommen. Für diesen Einsatz sind kleinere Gefäßgrößen als im innerstädtischen Linienverkehr gefragt. Die technische Ausstattung, die Möblierung im Fahrzeug und die angebotenen Serviceleistungen können sich verändern, wenn kein Fahrer mehr das Fahrzeug aber auch das Verhalten im Fahrzeug kontrolliert. Die öffentlich zugänglichen Fahrzeuge sollten stärker als bisher vandalismussicher und schnell zu reinigen sein. Eingesparte Kosten für das Fahrpersonal Fahrpersonalkosten könnten investiert werden in neue Dienstleistungen während der Fahrten, wie z.B. Betreuungspersonal, Dienstleistungen wie Frisör und ärztliche Versorgung, oder auch die Ausstattung der Fahrzeuge mit W-LAN oder die Bereitstellung von Bankinggeschäften. Auch in Privatfahrzeugen ist mit einer veränderten Ausstattung zu rechnen.

Im Folgenden werden mögliche Mobilitätskonzepte beschrieben, die infolge von Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen entstehen können. Die Beschreibungen beruhen auf eigenen Annahmen, werden aber durchaus von einer Vielzahl von Studien gestützt (vgl. u. a. VDV 2015, Lenz 2016, OECD/ITF 2015)¹⁰. Dabei werden drei übergeordnete Fahrzeugkategorien Personenkraftwagen, Busse und Nutzfahrzeuge, welche sich in Fahrzeugsegmente entsprechend ihrer Fahrzeuggröße, der Sitzplatzzahl bzw. Ladevolumen, unterteilen lassen, unterschieden. Diese lassen sich entsprechend ihrer Besitzverhältnisse den Kategorien Privatfahrzeug, öffentliches Fahrzeug und öffentlich zugängliche Privatfahrzeuge zuordnen (vgl. Tabelle 7).

Die Studie bewertet jedoch nicht die Wahrscheinlichkeit des Markterfolges der dargestellten Mobilitätskonzepte bei der Quantifizierung der Wirkungen auf THG-Emissionen und den EEV. Bei der Ermittlung der quantitativen Potenziale der einzelnen, neuen Mobilitätskonzepte besteht noch große Unsicherheit und damit Forschungsbedarf, weswegen die folgenden Ausführungen nur einen qualitativen Ausblick auf die Optionen geben, die die Automatisierung und Vernetzung des Straßenverkehrs erst ermöglichen. Es handelt sich somit eher um mögliche, alternative Zukunftsszenarien.

¹⁰ Annahmen Dritter zur Entwicklung von Angeboten im Bereich Nutzfahrzeuge liegen kaum vor.

Tabelle 7: Nutzungsformen entsprechend Fahrzeugkategorie und Besitzform

Fahrzeugkategorie	Privatfahrzeuge	Öffentlich zugängliche Privatfahrzeuge	Öffentlich zugängliche Fahrzeuge (kommerziell)
Pkw	Private Pkw (Klein-, Kompaktwagen Mittelklasse Oberklasse)	Peer-to-Peer-Ridesharing Peer-to-Peer-Carsharing	Pkw-Ridesharing Carsharing
Busse		Bürgerbus	ÖV (Kleinbus, Stadtbus, Fernbus)
Nutzfahrzeuge	Nutzfahrzeuge von Unternehmen (Leichte Nutzfahrzeuge Schwere Nutzfahrzeuge)	Nutzfahrzeug-Pooling	Nutzfahrzeug-Sharing

4.2.5.1 Fahrzeugkategorie Pkw

Pkw der Automatisierungsstufe 4 und 5 lassen neben dem Aus-dem-Fenster-Schauen oder Telefonieren weitere Aktivitäten, wie Arbeiten, einen Film sehen etc., zu. Daher ist es durchaus denkbar, dass neben der aus Klimasicht sinnvollen Anpassung der Fahrzeuggrößen entsprechend des Besetzungsgrades bzw. des Beladungsvolumens („Right-Sizing“) im Fahrzeugsegment Pkw ein größerer Anteil an Oberklassefahrzeugen in den Markt kommt, die mit Multimedia-Ausstattung, Schlaf- und/oder Arbeitsplatz ausgestattet sein werden.

Die zunehmende Digitalisierung kann zukünftig die Einführung von Tür-zu-Tür-Services öffentlich zugänglicher Fahrzeuge ermöglichen. Akzeptieren die Kunden diese Angebote, so kann man annehmen, dass die Auswahlmöglichkeiten von Fahrzeugsegmenten größer werden. Sollten sich diese Entwicklungen zukünftig zeigen, können weitere Kundenkreise mit Sharingangeboten erschlossen werden. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass künftig stationsbasierte Angebote komplett entfallen werden, da die Bündelung von Fahrtwünschen, das Wegfallen der Relokalisierung von Fahrzeugen und die Wartung und Reinigung der Fahrzeuge an diesen Stationen kostengünstigere Angebote ermöglicht. Der Bedarf an regelmäßiger Reinigung, an harten und widerstandsfähigem Material und wenig beweglichen Teilen sowie die Reparatur von (Vandalismus-)Schäden beziffert Litman auf etwa 200 - 1.700 US-Dollar je Woche bei angenommenen 200 Wegen (Litman 2016).

4.2.5.2 Fahrzeugkategorie Busse

Auch für den Verkehr mit Bussen sind vermehrt bedarfsangepasste, flexible Angebote zu erwarten, d. h. weg von der fahrplangebundenen Routenführung hin zu kundenorientierten Angeboten. Fahrerlose Kleinbusse könnten eine wirtschaftliche Lösung für nachfrage-schwache Regionen darstellen. Sie eröffnen zumindest die Möglichkeit einer weniger kostenintensiven Aufrechterhaltung der Mobilität in ländlichen Räumen als Teil der Daseins-

vorsorge. Durch den Wegfall der Personalkosten und eine flexiblere, bedarfsgerechte Bedienung können sie zukünftig eine attraktive und kostengünstige Mobilitätsoption für die Bewohner darstellen. Neben möglichen Tür-zu-Tür-Angeboten können Kleinbusse als Zubringer zu öffentlichen Linienverkehren sowohl auf der Schiene als auch auf der Straße dienen.

Auch bei Stadtbussen ist ein fahrerloser Einsatz auf nachfragestarken Achsen als Linienverkehr denkbar. Gegebenenfalls können nutzerorientierte, flexible Angebote hinzukommen, welche mit einer zeitlichen und räumlichen Auflösung von Linienverkehren einhergehen. Im Fernbusbereich ist vor allem ein Einsatz auf Bundesautobahnen für Strecken, welche durch den Schienenverkehr nicht abgedeckt werden, denkbar.

Durch Onlinebuchung und eine softwaregestützte Bündelung von Fahrt- wie Transportwünschen können auch Kombiverkehre, d. h. der gemeinsame Transport von Personen und Gütern, ermöglicht werden.

4.2.5.3 Fahrzeugkategorie Nutzfahrzeuge

Die Automatisierung und Vernetzung der Verkehrssysteme hat auch das Potenzial, den Güterverkehr zukünftig deutlich zu verändern. Zuverlässige und flexible Transporte können zu deutlich günstigeren Preisen angeboten werden. Intelligente Softwaresysteme bieten die Voraussetzung für Transportangebote, bei denen sich verschiedene Nutzer ein Fahrzeug teilen. Denkbar ist sowohl im urbanen bzw. regionalen Kontext als auch auf Bundesautobahnen die Buchung von Transportvolumen, welche flexibel in der Routenwahl oder als Shuttle auf definierten Relationen genutzt werden können. Kooperative Versorgungsnetze mit City-Hubs und mobilen Warendepots ermöglichen das Umladen der Waren in kleinere Fahrzeuge und die individuelle Zustellung oder Abholung.

Die Einsparung des Kostenfaktors Fahrpersonal könnte zur Folge haben, dass der Anteil an kleinen Zustellfahrzeugen im urbanen Raum wächst, um so die gewünschte schnelle und direkte Warenversorgung des Endkunden anbieten zu können. Supermärkte könnten in ländlichen Regionen fahrerlos beliefert oder der Lkw als „wandernder Supermarkt“ an verschiedenen Standorten genutzt werden. Die Möglichkeit des Platooning zumindest auf Bundesautobahnen ermöglicht neben der Reduktion der Fahrerkosten noch die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz des gesamten Platoons. Die Automatisierung des Straßengüterverkehrs birgt somit ein Kostenreduktionspotenzial, dass die Attraktivität der Straße steigern kann, wenn der Schienengüterverkehr nicht parallel ebenfalls die Potenziale der Automatisierung ausschöpfen kann.

4.2.6 Räumlicher Einsatz des automatisierten Fahrens

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass automatisierte und vernetzte Fahrzeuge dort zuerst eingesetzt werden, wo die Komplexität des Systems am geringsten und damit die

Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer am höchsten ist, d.h. wo die Konzepte als erstes funktionieren und sichtbar werden. Neben dem Einsatz fahrerloser Fahrzeuge auf halböffentlichem Gelände (bspw. Busse auf dem Universitätsgelände) lassen sich bereits teilautomatisierte und hochautomatisierte Fahrzeugen auf Autobahnen (geringe Komplexität, aber hohe Geschwindigkeit) bewegen. Auch erste Projekte in ländlichen Regionen wurden begonnen, da hier der wirtschaftliche Nutzen im ÖPNV am größten scheint. Sollte der Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen auf der Autobahn deutlich vor dem Einsatz auf dem Land erfolgen, so ist davon auszugehen, dass in diesem Zeitraum aus Gründen des Komforts und der Wirtschaftlichkeit die Attraktivität der Nutzung der Bundesautobahnen steigen wird, während Verkehre von den Landstraßen mittelfristig abgezogen werden.

Die Automatisierung des Straßenverkehrs hat ab Automatisierungsstufe 4 auch das Potenzial zur Verbesserung der Erreichbarkeit. Eine verbesserte Erreichbarkeit kann potenziell auch zu einer steigenden Verkehrsnachfrage führen. Dies setzt allerdings voraus, dass der öffentliche Verkehr nicht auch flexibler wird und sich an die Bedürfnisse der Kunden anpasst. Da die Erreichbarkeit in Städten bereits heute sehr groß ist, werden Erreichbarkeitsgewinne vermutlich vorrangig in ländlichen Regionen verzeichnet. In vielen Städten hingegen kann es möglicherweise durch die Attraktivitätssteigerung der Straße zu einer höheren Belastung der Straßen kommen, obschon die Vernetzung mit anderen Fahrzeugen und die vorausschauende Fahrweise der autonomen Fahrzeuge zu einem verbesserten Verkehrsfluss führen sollte. In der Summe bestehen auch hier noch viele Unsicherheiten, weswegen bei der Quantifizierung der Wirkungen der Automatisierung keine Veränderung der Erreichbarkeit berücksichtigt wird. Fragen der Erreichbarkeit lassen sich quantitativ nur durch den Einsatz von netzwerkbasierten Simulationsmodellen beantworten.

4.2.7 Wechselwirkungen von automatisiertem, vernetztem und elektrischem Fahren

Wenn die Kosten von Batterien weiterhin sinken, die Reichweite der Fahrzeuge weiter steigt, ein verstärkter Ausbau der öffentlich zugänglichen Langsam- und Schnelladennetze erfolgt und diese noch dazu mit erneuerbaren Energien gespeist werden, so ist davon auszugehen, dass bis zum Jahr 2050 ein stark wachsender Anteil an Straßenfahrzeugen elektrisch fährt. Insbesondere für Fahrzeuge mit hoher Jahresfahrleistung aber seltenen Einzelfahrten über 140 Kilometern, wird die aktuell noch limitierte Reichweite von Elektrofahrzeugen bedeutungslos sein und sich die Anschaffung sowohl monetär als auch ökologisch rechnen. So erwarten beispielsweise die Autoren von WSP/Parsons Brinckerhoff (2016) und Thompson (2016), dass bereits in der nächsten Dekade automatisierte Fahrzeuge elektrisch betrieben werden.

Nichtsdestotrotz handelt es sich bei der Automatisierung von Fahrzeugen sowie der Elektrifizierung der Antriebsstränge um zwei parallel stattfindende Entwicklungstrends im Straßenverkehr. Die Einführung der Technologien bedingen sich nicht gegenseitig. Um die reine

Wirkung der Automatisierung und der Vernetzung des Straßenverkehrs auf die THG-Emissionen und den EEV abzuschätzen zu können, werden daher für die Abschätzung der Wirkungen keine unterschiedlichen Entwicklungsszenarien für die Antriebsarten unterstellt. Der in den folgenden Kapiteln beschriebene Szenarioansatz geht somit für alle Szenarien von einer einheitlichen Entwicklung der zukünftigen Anteile der Antriebsarten im Bestand aus (siehe Kapitel 4.3). Diese unterstellt einen steigenden Anteil an elektrifizierten Fahrzeugen. Die Wechselwirkungen dieses steigenden Anteils an elektrifizierten Fahrzeugen mit der zunehmenden Automatisierung werden somit bei der Berechnung der Wirkung auf THG-Emissionen und den EEV einbezogen.

Da bei reinen batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) keine direkten THG-Emissionen (Tank-to-Wheel) entstehen, sinken damit die Einsparpotenziale (in absoluten Werten) an THG-Emissionen durch die Automatisierung mit steigendem Anteil der BEV im Bestand. Auch die Potenziale (in absoluten Werten) zur Verringerung des EEV sinken mit steigendem Anteil der BEV und PHEV. Dies ist der höheren Energieeffizienz der elektrifizierten Fahrzeuge geschuldet. Der absolute Beitrag der Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge fällt dadurch geringer aus.

In den ausgewerteten Quellen nehmen nur wenige Autoren zu den Wechselwirkungen zwischen Antriebsarten und automatisierten Fahrzeugen Stellung. Rein operativ ergeben sich jedoch ein paar Wechselwirkungen. Vorteilhaft scheint bei der Betrachtung der Wechselwirkung zwischen der Automatisierung und der Elektrifizierung, dass die automatisierten und elektrifizierten Fahrzeuge den nächsten Ladepunkt selbständig finden können. Dies gilt jedoch auch in gleichem Maße für alle anderen Antriebsarten. Durch Ladefahrten der Fahrzeuge kommt es möglicherweise, je nach Ausstattung des Ladenetzes im Vergleich zum Tankstellennetz, zu einem leichten Anstieg in der Fahrleistung. Da auch bis ins Jahr 2050 damit gerechnet werden kann, dass das Aufladen der Batterie länger dauert als ein Tankvorgang, sind für längere Strecken, die über die Batteriereichweite hinausgehen, zusätzliche Zeitbedarfe für die Fahrzeugnutzung einzurechnen. Die längeren Standzeiten während der Ladevorgänge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren führen laut der Lissabon Studie bei einer Komplettelektrifizierung einer Flotte von Sharingfahrzeugen zu einem größeren Fahrzeugbestand. Bei gleichbleibender Beförderungsnachfrage, einer unterstellten Aufladezeit von 30 Minuten und einer Reichweite von 175 Kilometern, müsste die Fahrzeugflotte marginal um 2 % erhöht werden (vgl. OECD 2015).

4.3 Mobilitätsszenarien

Vor dem Hintergrund der in diesem Kapitel skizzierten verkehrlichen Wirkungen von automatisiertem und vernetzten Fahren im Straßenverkehr sind im Rahmen der Studie zwei Szenarien bis zum Jahr 2050 entwickelt worden. Dabei handelt es sich nicht, wie in einigen Studien beschrieben, um extreme Ausprägungen von geteilten Fahrzeugkonzepten mit 50 % bzw. 100 % der Pkw-Flotte oder um eine 100 % Penetration der Fahrzeugsegmente mit Automatisierungsfunktionen der Automatisierungsstufe 5 (vgl. ITF/OECD 2015, Friedrich 2016, Fagnant und Kockelmann 2014, Bruns et al. 2013). Vielmehr soll eine Spannweite an möglichst realistischen Auswirkungen bis zum Jahr 2050 aufgezeigt werden. Dazu wurden die Szenarien so gewählt, dass sie einen Entwicklungspfad von heute bis ins Jahr 2050 aufzeigen. Dieser wird anhand der vorhandenen Fahrzeugsegmente im Bestand, der zu erwartenden technischen Reife der Automatisierungsfunktionen sowie der durchschnittlichen Lebensdauer der Fahrzeuge und der Zahlungsbereitschaft ermittelt.

Die beiden Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich des Mobilitätsverhaltens der Verkehrsteilnehmer und der Verkehrswirtschaft. Das Szenario „Welt der Mobilitätsdienstleistungen“ geht davon aus, dass die Nutzung multimodaler Wegeketten und verkehrsträgerübergreifende Transportmodelle sowie die geteilte Nutzung von Fahrzeugen im Personen- und Güterverkehr gefördert und daher auch gut von der Bevölkerung und den Unternehmen angenommen wird. Es kommt zu einem hohen Anteil von geteilten Fahrten bei gleichzeitig leistungsfähigem Öffentlichen Verkehr und sinkendem Anteil an Privatfahrzeugen und deren Nutzung. Insgesamt nimmt sowohl die Fahrzeuganzahl als auch die Fahrleistung ab. Im Gegensatz dazu gewinnt im Szenario „Welt des Fahrzeugbesitzes“ der Pkw- und Straßengüterverkehr deutlich an Attraktivität. Unterbleibt die politische Steuerung kommt es zu steigenden Anteilen des MIV und Lkw am Modal Split. Auf der Grundlage der hier beschriebenen Szenarien werden die Fahrleistungsänderungen für beide Szenarien abgeschätzt.

Für die Szenarienentwicklung wurden Literatur- und Internetquellen analysiert und mit Hilfe der Entwicklung der folgenden Parameter systematisch ausgewertet:

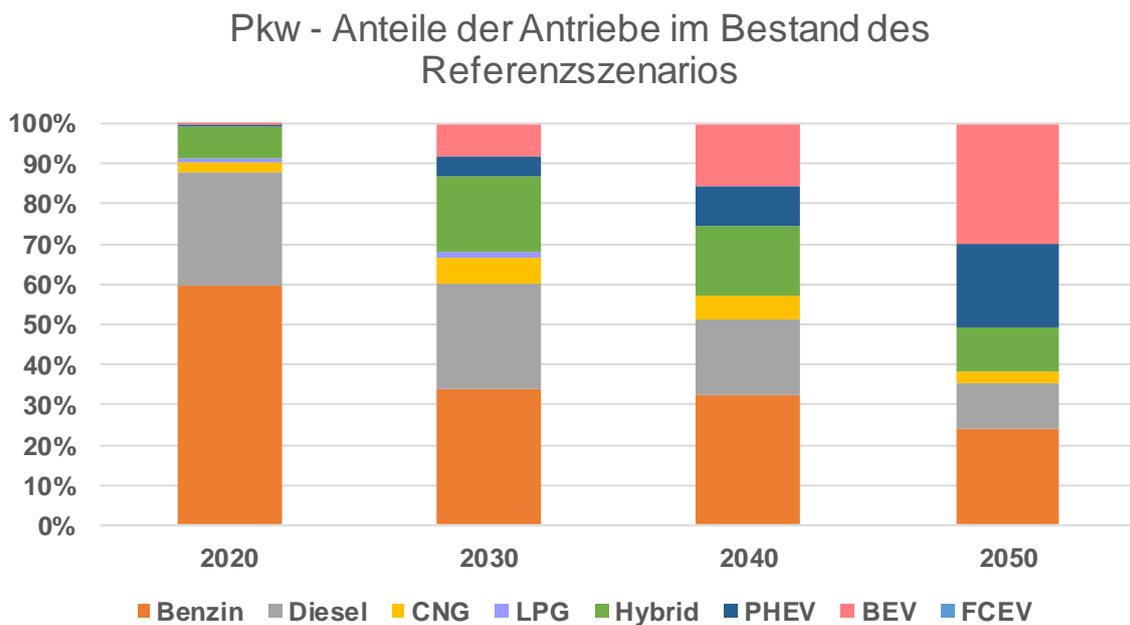
- Fahrzeugzahlen,
- Besetzungsgrade bzw. Ladefaktoren,
- Modal Split im MIV (zwischen privaten Pkw und Sharing Konzepten),
- Anzahl der Wege pro Tag,
- Wegezwecke,
- Fahrleistung bzw. Verkehrsleistung,
- Verkehrsdichte und Einsatzzeiten,
- Stellplatzzahl und der Stellplatzstandorte.

Auf dieser Grundlage konnten Kenngrößen als übernommene Werte oder darauf aufbauende Annahmen in die Berechnungen zur Diffusion und Fahrleistung der Fahrzeuge einfließen.

ßen. Die Szenarien orientieren sich im Hinblick auf ihre technologische Reife an der in Kapitel 2.1.5 erarbeiteten technischen Roadmap. So wird davon ausgegangen, dass frühestens ab dem Jahr 2025 Fahrzeuge der Automatisierungsstufe 4 und frühestens ab dem Jahr 2035 Fahrzeuge der Automatisierungsstufe 5 auf den Markt kommen.

Als Basisszenario dient das Referenzszenario der MKS-Strategie (Stand Dezember 2017). Das sogenannte MKS-Referenzszenario setzt auf der Verflechtungsprognose 2030 (VP2030) auf und wurde im Sinne eines Trendszenarios gezielt modifiziert. Darin werden automatisierte und vernetzte Fahrzeugen nicht berücksichtigt. Car- und Ridesharing ist in seinen heutigen Größenordnungen nur implizit enthalten, denn die Pkw-Segmente sind nicht weiter unterteilt nach ihren Besitzformen.

Da die Größenordnung der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr auf THG-Emissionen und den EEV bis ins Jahr 2050 auch von der Entwicklung der Anteile der alternativen Antriebe und damit der Zusammensetzung der Fahrzeugflotten abhängt, wird zunächst noch die in allen Szenarien gleichermaßen verwendete Verteilung der Antriebsarten beschrieben. Die Abschätzung der Änderung der Fahrzeugflotten beruht dabei auf der VP2030, die mittels einer Aktualisierung der sozioökonomischen Rahmenbedingungen bis ins Jahr 2050 verlängert wurde. Die resultierenden Auswirkungen auf die Fahrzeugflotten wurden mit dem Simulationsmodell ASTRA quantifiziert und sind in der folgenden Abbildung für den Pkw dargestellt. Batterieelektrische Pkw (BEV) erreichen in allen Szenarien einen Anteil von 8 % im Jahr 2030 und 30 % im Jahr 2050. Plug-in hybridelektrische Pkw (PHEV) sind in dieser Abschätzung mit 5 % im Jahr 2030 und 21 % im Jahr 2050 vertreten. Wasserstoff-Brennstoffzellen Pkw sind nur in sehr kleiner Zahl mit weit unter 1 % im Jahr 2050 im Bestand vertreten. Eine komplette Umstellung der Fahrzeugflotten bis zum Jahr 2050 ist damit nicht Bestandteil der Berechnung der Wirkungen der Automatisierung. Der Anteil der Pkw mit Verbrennungsmotor, vorrangig Diesel oder Benzin, sinkt in der Abschätzung auf etwas mehr als einem Drittel im Jahr 2050.



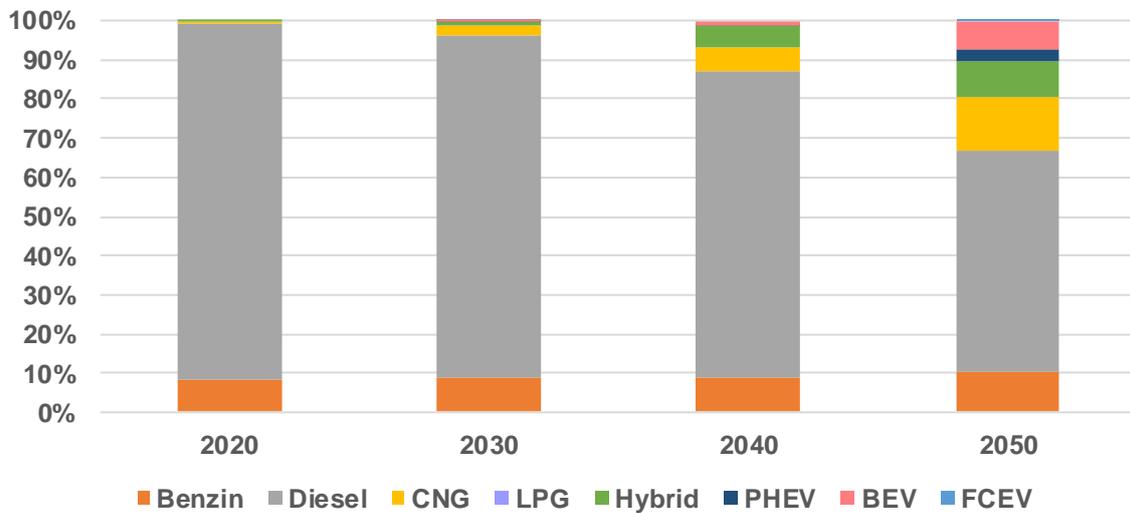
Quelle: Fraunhofer ISI/M-Five

Abbildung 15: Pkw - Anteile der Antriebsarten am Bestand bis 2050

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge (vorrangig Sattelzugmaschinen im Fernverkehr) geht das Modell in den Szenarien von keiner Umstellung vom klassischen Diesel-Lkw aus. Anders im Bereich der Busse und leichten Nutzfahrzeuge, hier zeigt sich eine Entwicklung bis zum Jahr 2050. Die Abbildung 16 zeigt die angenommene Entwicklung bei leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5 t zGG. Demnach zeigt sich in allen Szenarien ebenfalls ein Trend zu alternativen Antrieben, jedoch mit ca. 10 % im Jahr 2050 deutlich weniger stark als für Pkw. Bei den Bussen zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch hier dominiert noch der Dieselantrieb im REF und den beiden Mobilitätsszenarien (siehe Abbildung 17).

Ein weiterer zu berücksichtigender Effekt bei der Bewertung der Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf THG-Emissionen und den EEV stellt die angenommene Entwicklung der Kraftstoff- bzw. Energieeffizienz der Fahrzeuge ohne die Einwirkung der Automatisierung dar. Hierfür wurde in allen Szenarien angenommen, dass sich die Effizienz gemäß der von der EU-Kommission im November 2017 vorgeschlagenen Novellierung der CO₂-Verordnung bis zum Jahr 2030 entwickelt. Bei Pkw, leichten Nutzfahrzeugen (LNF) und Kleinbussen wird daher eine durchschnittliche Verbesserung der Effizienz der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor um jährlich 2,3 % bis 2030 angenommen. Bei schweren Nutzfahrzeugen (SNF), Stadt- und Reisebussen wurde eine geringere Verbesserung der Effizienz um 0,4 % jährlich bis zum Jahr 2030 angenommen.

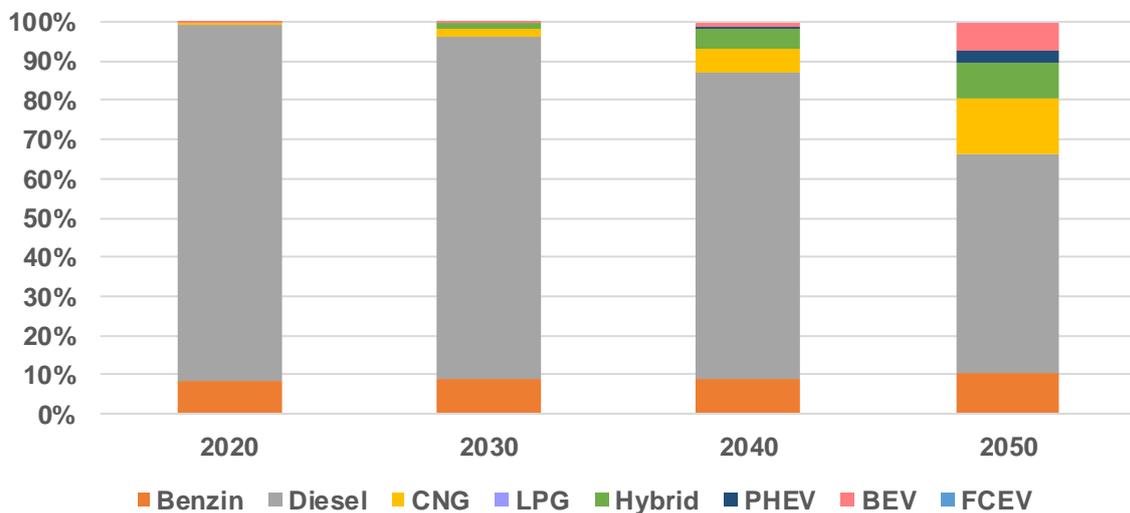
LNf - Anteile der Antriebe im Bestand des Referenzszenarios



Quelle: Fraunhofer ISI/M-Five

Abbildung 16: LNf - Anteile der Antriebsarten am Bestand bis 2050

Busse - Anteile der Antriebe im Bestand des Referenzszenarios



Quelle: Fraunhofer ISI/M-Five

Abbildung 17: Busse - Anteile der Antriebsarten am Bestand bis 2050

4.3.1 Szenario 1 - „Welt des Fahrzeugbesitzes“

Das Szenario „Welt des Fahrzeugbesitzes“ geht von spürbaren Verhaltensänderungen aus, jedoch im Sinne einer Intensivierung des individuellen Fahrzeugbesitzes und einer geringeren Nutzung des Öffentlichen Verkehrs und anderer alternativer Mobilitätsangebote.

Personenmobilität

Die Attraktivität von Fahrzeugen nimmt mit zunehmender Automatisierung der Fahrzeuge zu. Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge machen das Reisen effizienter und verkürzen nicht nur die Reisezeit je Kilometer, sondern verbessern auch die Bewertung der Reisezeit. Die positiven Wirkungen auf die Reisezeit hängen laut Lissabon Studie (ITF/OECD 2015) jedoch stark davon ab, inwieweit schienengebundene und hochkapazitative ÖPNV-Lösungen auch weiterhin eine große und tragende Rolle im urbanen Verkehr der Zukunft spielen. Dies ist für dieses Szenario vorausgesetzt.

Die Möglichkeit, während des Fahrens anderen Tätigkeiten wie Lesen, Kommunizieren, etc. nachzugehen, führt dazu, dass eine wachsende Anzahl an Wegen mit dem MIV zurückgelegt wird. Die zunehmend komfortable Ausstattung der Fahrzeuge mit Bildschirmen, Soundsystem, Liegefläche, einer Verbindung zum Internet u. ä. ist ein massiver Treiber der wachsenden Privatfahrzeugkäufe. Die höheren Anschaffungskosten von vernetzten und automatisierten Fahrzeugen können durch günstigere Betriebskosten infolge von niedrigeren Versicherungsbeiträgen, geringerer Abnutzung der Fahrzeuge und besserer Effizienz ausgeglichen werden (vgl. VDV 2015).

Die abnehmenden Reisezeiten und Betriebskosten führen jedoch zu Reboundeffekten bei den Fahrleistungen. Es werden mehr Wege und auch längere Distanzen im Pkw absolviert. Vor allem Automatisierungsstufen, in denen kein Fahrer benötigt wird, fördern die Zersiedelung. Längere Pendelstrecken werden durch die mit steigender Penetrationsrate von Automatisierung sinkenden Reisezeiten in Kauf genommen. Die sinkenden Reisezeiten lassen den Wunsch nach dem „Wohnen im Grünen“ und zu günstigeren Bodenpreisen in Vororten oder außerhalb der Städte steigen (vgl. Litmann 2016, Harper et al. 2016, Troppe 2014). Sinkende Betriebskosten bei gleichzeitig relativ hohen Anschaffungskosten von privaten Pkw sorgen dafür, dass zunehmend Hol- und Bringdienste durch automatisierte Fahrzeuge erledigt werden. Dadurch kommt es zu einer bedeutenden Zahl an Leerfahrten. Es werden zunehmend Personen mit dem Auto unterwegs sein, die zuvor mit dem Rad oder dem Bus unterwegs waren. Bereits die Automatisierungsstufe 3 kann dazu führen, dass Menschen, die nicht gerne oder nicht in bestimmten Situationen (Autobahn, nachts etc.) selbst fahren, durch die Nutzung von Fahrerassistenzsystemen mehr bzw. längere Fahrten zurücklegen. Sinkende Besetzungsgrade und eine steigende Anzahl mit dem MIV zurückgelegter Wege erhöhen die Fahrleistungen des einzelnen Fahrzeugs aber auch die gesamte Verkehrsleistung (Personenkilometer pro Jahr). Der MIV-Anteil am Modal Split steigt bis zum Jahr 2050 weiter an.

Die Vielfalt der Fahrzeuge erweitert sich sowohl zugunsten leichter Kleinfahrzeuge als auch der Luxus- und Oberklasse, wohingegen die Zunahme mittelgroßer Fahrzeuge moderater ausfällt, denn Pkw der Mittelklasse sind bereits in hohem Maße in der Fahrzeugflotte vorhanden. Die gestiegene jährliche Fahrleistung beschleunigt durch niedrigere Betriebskosten die Amortisierung der höheren Anschaffungskosten der Technologien. Neben den Automatisierungsfunktionen legen die Menschen Wert auf umweltfreundliche Antriebe, daher ist die Penetration von Elektrofahrzeugen seit dem Jahr 2020 stark steigend.

Der Anteil an Pkw-Fahrten im eigenen Wagen wächst und macht weiterhin den Großteil der Mobilität aus. Dieses Wachstum geht auf Kosten der Marktanteile des Umweltverbundes, insbesondere bei unattraktiven Umsteigeverbindungen. Kannibalisierender Wettbewerb innerhalb der Mobilitätsanbieter behindert die Verbreitung von verkehrsanbieter-übergreifenden Mobilitätsabonnements und erschwert die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln. Obgleich bis zum Jahr 2050 die Nutzerzahlen von Car- und Ridesharingangeboten steigen, wächst der Anteil am Modal Split nur in geringem Maße. Die Nutzung von automatisierten Flottenfahrzeugen hat aufgrund der hohen Anschaffungspreise und eines steigenden Bedarfs an Reinigungskosten und Reparaturen von Vandalismusschäden ein ähnliches Preisniveau wie heutzutage Taxifahrten. Obschon die erwarteten Kosten pro Personenkilometer fallen und neue Mobilitätsangebote auf den Markt kommen werden, sind autonome Sharingfahrzeuge nur für kurze Innenstadtfahrten preislich mit dem Privatfahrzeug konkurrenzfähig. Die Hoffnung, kostengünstige Sharingangebote auch in der Fläche anbieten zu können, ist durch oben genannte Fixkosten nicht möglich. Die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen mit fremden Personen (Ridesharing) kann sich aber insbesondere in kleinen Gefäßgrößen nicht durchsetzen, da sie weniger Komfort, Service und Privatsphäre als private Fahrzeuge bieten (vgl. Litman 2016). Die Nutzung von Carsharingfahrzeugen dient gerade in den Jahren der Markteinführung neuer Automatisierungsfunktionen als eine Art Probefahrt und Kennenlernen der neuen Technologie. Der klassische Öffentliche Verkehr im Bus oder mit der Bahn leidet unter hohen Kosten und geringen Fahrgelderlösen und zieht sich auf nachfragestarke Achsen zurück. Im ländlichen Raum wird der öffentliche Linienbus - mit Ausnahme der Schülerbeförderung - durch den Einsatz von Kleinbussen und von geteilten Pkw-Flottenfahrzeugen ersetzt.

Durch das automatisierte Fahren erhöht sich der Verkehrsfluss, da es jedoch zu einer höheren Anzahl an Neuzulassungen kommt und insgesamt mehr Fahrzeuge auf der Straße sind, bleiben die Kapazitäten auf der Straße und den Stellplätzen in etwa konstant. An Orten, an denen die Bodenpreise sehr hoch sind, werden Stellplätze in weniger zentrale Gegenden verlagert und schaffen so Raum für neue Nutzungen. Eine daraus resultierende Erhöhung der Gesamtfahrleistung gleicht sich durch vermiedene Parksuchverkehre wieder aus.

Tabelle 8: Entwicklungstendenzen des Personenverkehrs im Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes"

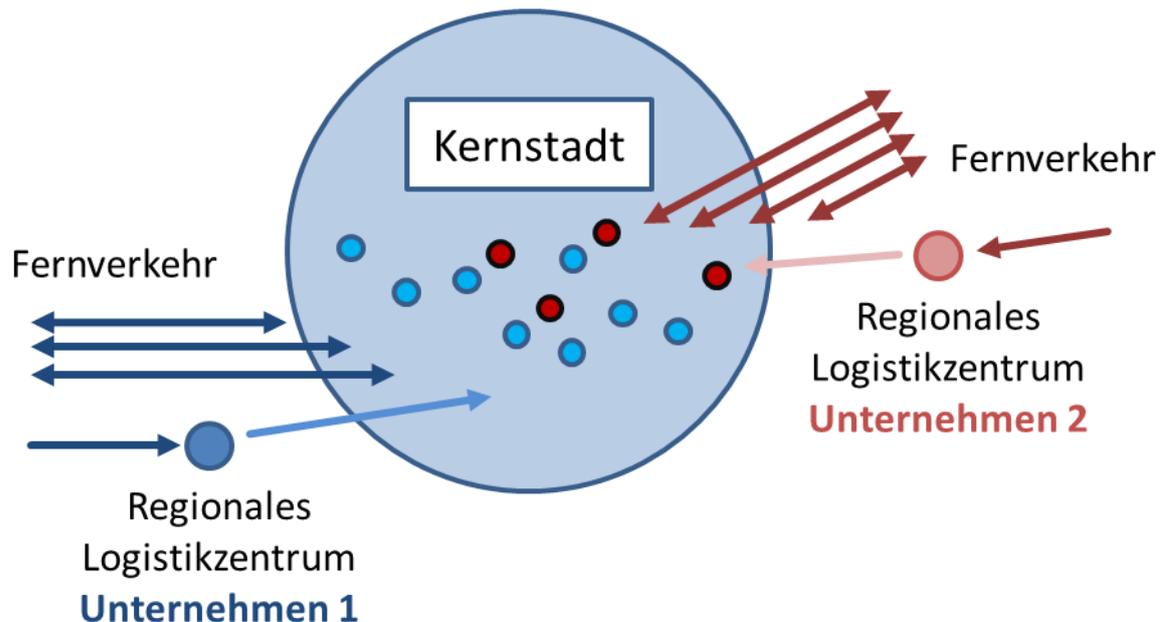
Kennzahlen Pkw	Entwicklungstendenz
Verkehrsaufkommen	Steigt deutlich
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	nimmt zu wegen höherer Anzahl an Wegen und weiteren Distanzen
Verkehrsleistung Personenkilometer pro Jahr	Steigt, da der Anteil Pkw am Modal Split wächst und neue Nutzergruppen hinzukommen
Anzahl der Wege	Steigt geringfügig wegen Hol- und Bringfahrten
Anzahl Stellplätze	Bleibt konstant durch eine bessere Auslastung und Platznutzung bei höherer Fahrzeugzahl
Harmonisierung Verkehrsfluss	Bleibt konstant durch eine bessere Auslastung bei höherer Fahrzeugzahl

Kennzahlen ÖPNV	Entwicklungstendenz
Verkehrsaufkommen	sinkt
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	Steigt aufgrund von Flexibilisierung (Tür-zu-Tür-Angeboten)
Verkehrsleistung Personenkilometer pro Jahr	Schwächt sich ab wegen geringerer Nachfrage
Relevanz Kleinbusse	Steigender Anteil an Kleinbussen
Relevanz Stadtbusse	Sinkender Anteil an Stadtbusen
Harmonisierung Verkehrsfluss	Bleibt etwa konstant

Straßengüterverkehr

In diesem Szenario ist die städtische Warenversorgung von Premium-Zustelldiensten großer Logistikdienstleister geprägt. Da Personalkosten aufgrund von Automatisierung zurückgehen und die betrieblichen Transportkosten geringer ausfallen, setzen große Logistikdienstleister verstärkt auf kleine, vollautomatisierte oder fahrerlose Zustellfahrzeuge („Waren-Taxis“), die eine schnelle und direkte Warenversorgung nach der Markteinführung dieser Automatisierungsstufen kostengünstig ermöglichen. Es entstehen neue Dienstleistungen (z. B. Zustellung von Waren auf „Knopfdruck“, wenn Empfänger dies wünscht), die durch Kunden stark nachgefragt werden. Konventionelle Zustellkonzepte und Speditionen können hinsichtlich Kosten für Personal und Fahrzeuge sowie Leistungsdruck nicht mithalten.

ten und verlieren an Relevanz. Infolge dessen steigt die Marktposition der großen Logistikdienstleister weiter an. „Waren-Taxis“ erhalten eine dominante Position in den Nahverkehrsflotten. Die städtische Warenversorgung erfolgt durch eine geringe Anzahl großer Logistikdienstleister (s. Abbildung 18), die Transporte direkt in die Kernstädte führen. Insgesamt nimmt das Verkehrsaufkommen zu. Viele kleine Transportfahrzeuge sind in den Nahverkehrsflotten der Logistikdienstleister zu finden und definieren einen Wettbewerbsvorteil.

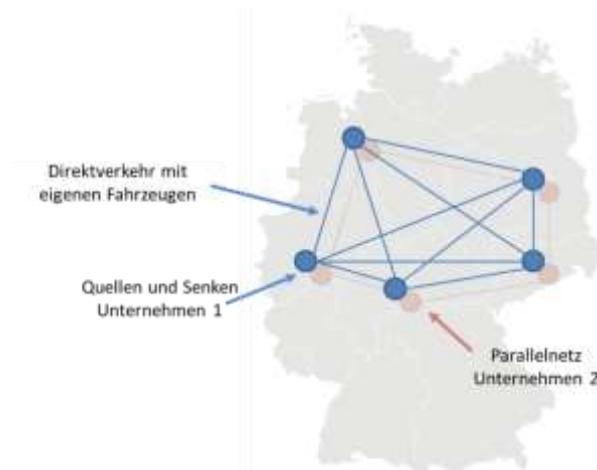


Quelle: Fraunhofer IML

Abbildung 18: Zusammenspiel der urbanen Logistik

Der Straßengüterfernverkehr erlebt einen nennenswerten Wandel. Es ist möglich, Fahrzeuge automatisiert und fahrerlos zwischen Quellen und Zielen (Logistik-Hubs, Produktionsstätten, Handelsunternehmen und Endkunden) verkehren zu lassen. Aufgrund fallender Transportpreise pro Einheit werden die Fahrzeuggrößen kleiner. Dabei handelt es sich zum Großteil um direkte Beziehungen. Der Umschlag von Wagenladungen (z.B. kombinierter Verkehr) ist zu einer Seltenheit geworden. Anhänger und Sattelaufleger gehören der Vergangenheit an, da sich die Transporte bereits bei kleineren Sendungsgrößen rechnen. Die Logistiker erzielen dadurch einen harmonisierten Güterstrom, wodurch das produzierende Gewerbe und der Handel von geringen Lagerbeständen profitieren kann. Um die Fahrzeuge bestmöglich für die eigenen Zwecke einzusetzen, werden die Fahrzeuge nicht mit anderen Güterverkehrsunternehmen geteilt, die Auslastung sinkt. Dadurch werden mehr Fahrzeuge vorgehalten als für den Transport notwendig sind und es etablieren sich parallele Netzstrukturen. Zwischen den regionalen Logistikzentren der Unternehmen nimmt der Werkverkehr als Direkttransport zu.

Verkehrstechnisch hat dies zur Folge, dass eine Vielzahl an Fahrzeugen in der Größe heutiger 12-18t zGG. Lkw unterwegs sind. Um die gleiche Menge Güter zu transportieren ist ein Vielfaches der notwendigen Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs, die jeweils mit den Komponenten und Technologien des vollautomatisierten oder fahrerlosen Fahrens ausgestattet sind und dadurch das Leergewicht in der Gesamtsumme am Straßenverkehr größer ausfällt.



Quelle: Fraunhofer IML

Abbildung 19: Zusammenspiel der Transporte im Straßengüterfernverkehr

Tabelle 9: Entwicklungstendenzen des Güterverkehrs im Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes"

Kennzahlen City-Logistik	Entwicklungstendenz*
Verkehrsaufkommen	steigt an (insgesamt fahren mehr Fahrzeuge im Stadtgebiet)
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	nimmt leicht zu (ein Fahrzeug steuert Ziele mehrmals an & hat mehrere Transportaufträge pro Tag)
Verkehrsleistung Tonnenkilometer pro Jahr	steigt an (als Kombination der oben genannten Effekte)
Relevanz kleinerer Nutzfahrzeuge	steigt an
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	geht zurück
Harmonisierung Verkehrsfluss	Negativer Beitrag (die autonomen City-Shuttle fahren nach Kundenbedarf, nicht koordiniert)

Kennzahlen Fernverkehr	Entwicklungstendenz*
Verkehrsaufkommen	ansteigend
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	Gleichbleibend, jedoch nimmt Anzahl der Fahrzeuge zu
Verkehrsleistung Tonnenkilometer pro Jahr	Insgesamt ansteigend
Relevanz kleinerer Nutzfahrzeuge	Stark wachsend. Typische Fahrzeuggröße ist mittelschwere Nfz (12-18t zGG)
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	Gleichbleibend
Modal Split Verschiebung	Bahn und Binnenschiff verlieren Anteile an Straße

* = Entwicklungstendenzen beschreiben den Einfluss vollautomatisierten und fahrerlosen Fahrens. Unabhängig davon wird für den Güterverkehr ein stark wachsendes Aufkommen erwartet, das Verkehrsaufkommen und -leistung beeinflusst.¹¹

4.3.2 Szenario 2 - „Welt der Mobilitätsdienstleistungen“

Dieses Szenario geht von deutlichen Verhaltensänderungen aus. Die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Neue Mobilitätsangebote werden sowohl über private Plattformen als auch über öffentliche Mobilitätsdienstleister betrieben. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Reduktion des individuellen Fahrzeugbesitzes.

Personenmobilität

In den kommenden Jahrzehnten setzt sich der Trend zur Urbanisierung fort. Kurze Wege und ein gut ausgebautes öffentliches Nahverkehrssystem in den Städten befördert den Entwicklungstrend hin zur Sharing-Economy. Die Bedeutung des Pkw im Privatbesitz nimmt infolge steigender Anschaffungskosten insbesondere von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen ab. Diese Entwicklungen können die öffentlichen Flottenbetreiber für sich nutzen, denn die höheren Laufleistungen von geteilten Fahrzeugen, zusätzlich noch hohe Besetzungsgrade, begünstigen die Amortisierung der verhältnismäßig hohen Anschaffungskosten. Der höhere Fahrzeugdurchsatz bei Flottenfahrzeugen unterstützt die Markteinführung und -durchdringung von modernen und umweltfreundlichen, vernetzten und automati-

¹¹Intraplan Consult GmbH (2014): Verflechtungsprognose 2030, München.

sierten Fahrzeugen. Durch die kürzeren Refinanzierungszeiten sind auch teurere Technologien besser finanzierbar (Troppe 2014). Jedoch rentieren sich diese so genannten Pay-on-Demand-Services v. a. in Gebieten mit ausreichender Dichte (vgl. Fagnant, Kockelmann 2014, WSP 2016). Die zunehmende Vernetzung der Verkehrsmittel via multimodaler Mobilitätsplattformen führt zu stets wachsenden Anteilen an inter- und multimodalen Wegeketten und zu einer durchgehend hohen Servicequalität. Umfassende Mobilitätsabonnements verbreiten sich sowohl im Geschäfts- wie auch im Privatverkehr. Car- und Ridesharing erreichen substanzielle Anteile, wohingegen fahrgestützte Dienste wie automatisierte Taxen und Ridesharingdienste deutlich abnehmen, aber bis zum Jahr 2050 noch auf niedrigerem Niveau erhalten bleiben. Durch das Ridesharing kann der Besetzungsgrad erhöht werden, allerdings kommt es durch die Bündelung von Fahrtwünschen auch zu einem geringen Anteil an Umwegen.

Der ÖPNV bildet wie bereits in Szenario 1 das Rückgrat der Mobilität sowohl in der Stadt als auch auf dem Land. Der klassische öffentliche Verkehr mit Linienbussen, Straßen- und U-Bahnen wird zunehmend automatisiert. Busse und Bahnen werden weiterhin für die nachfragestarken Achsen in den Stadtzentren und zwischen Städten eingesetzt. Der öffentliche Verkehr bedient aber zunehmend auch nachfrageschwache Verbindungen mit fahrerlosen Fahrzeugen. Dabei handelt es sich auch um Fahrzeuge kleinerer Gefäßgrößen. Denn insbesondere im ländlichen Raum bieten sich fahrerlose Pkw und Kleinbusse als ÖPNV-Zubringer für die ersten und letzten Kilometer und als Tür-zu-Tür-Angebote an. Klassische Linienverkehre entfallen hier weitestgehend. Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge führen im ländlichen Raum zu einem wirtschaftlichen Einsatz der Fahrzeuge und zur vermehrten sozialen Teilhabe der bislang wenig mobilen Bevölkerung (vgl. VDV 2015). Der öffentliche Verkehr geht zunehmend dazu über, auf die Kundenanforderungen hin optimierte flexiblere Routen- und Fahrzeitenplanung anzubieten (vgl. Lenz 2016). Insbesondere außerorts verlagern sich Verkehre mehr und mehr auf Kleinbusse. Auch längere Strecken (u. a. auf Autobahnen) werden zunehmend mit geteilten Fahrzeugen zurückgelegt. Zudem bieten öffentliche Verkehrsmittel zunehmend Betreuungs- und Transportdienste an. Diese Dienstleistungen sprechen insbesondere Menschen mit körperlichen Beschwerden sowie Eltern von allein reisenden Kindern an. Zunehmend kommt es wieder zu Kombiverkehren, d. h. eine Kombination aus Personen- und Güterverkehr. Das Fahrzeug zur öffentlichen Personenbeförderung kann in Schwachlastzeiten auch Pakete transportieren.

Die guten Angebote im öffentlichen Verkehr, die Änderungen der Einstellungen und die hohen Anschaffungskosten der Pkw führen zu rückgängigem Individualfahrzeugbesitz. Nichtsdestotrotz werden auch weiterhin Privatfahrzeuge gekauft, insbesondere von Personen, die zu den Vielfahrern oder Technikaffinen gehören. Denn nur durch hohe Laufleistung bei niedrigeren Betriebskosten, insbesondere durch bessere Kraftstoffeffizienz und geringere Abnutzung von Motor und Bremsen, amortisieren sich die hohen Investitionen (vgl.

Troppe 2014). Privat-Pkw werden zudem weiterhin von Personen gekauft, die auf den Status eines Fahrzeugbesitzes weiterhin Wert legen oder auf spezielle Ausstattung oder den regelmäßigen Transport von Gütern wie Werkzeugen o. ä. angewiesen sind.

Durch die höheren Besetzungsgrade und die größeren Einsatzzeiten der öffentlich zugänglichen Fahrzeuge kommt es zu steigender Fahrleistung dieser Fahrzeuge bei gleichzeitig sinkender Gesamtfahrzeuganzahl.¹² Im Individual- wie auch im öffentlichen Verkehr erhöht sich die Vielfalt der Fahrzeuge. Mit entsprechender politischer Steuerung erfährt vor allem der Anteil der leichten Kleinfahrzeuge sowie der mittelgroßen Fahrzeuge ein großes Wachstum. Denn je nach Verwendungszweck können die Fahrzeugtypen den Nutzerbedürfnissen angepasst werden. Dadurch kann es zum so genannten „Right-Sizing“ kommen, welches für Flottenbetreiber wie Nutzer kosteneffizient ist (vgl. Chao 2015). Es ist aber auch davon auszugehen, dass ein gewisser Anteil an Privatpersonen größere und damit schwerere Fahrzeuge kauft, welche neue Komfort- und Ausstattungsmerkmale (Drehitze, Liegen, digitale Mediensysteme, etc.) besitzen. Das vermehrt automatisierte Parken führt dazu, dass Stellplätze optimaler genutzt und damit für das Parken ein geringerer Flächenbedarf entsteht. Zudem werden Parksuchverkehre vermieden. Durch die insgesamt geringere Anzahl von Fahrzeugen können etliche Stellplätze im privaten sowie im öffentlich zugänglichen Raum eingespart und daher anderweitig genutzt werden.

Tabelle 10: Entwicklungstendenzen des Personenverkehrs im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen"

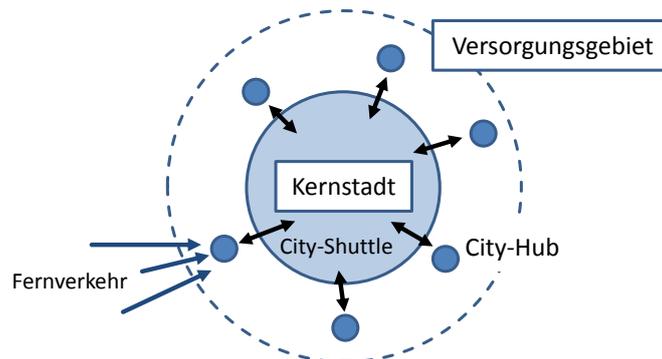
Kennzahlen Pkw	Entwicklungstendenz
Verkehrsaufkommen	geht zurück (insgesamt weniger Fahrzeuge durch gemeinsame Fahrzeugnutzung)
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	nimmt zu (v. a. wegen Ridesharing)
Verkehrsleistung Personenkilometer pro Jahr	geht zurück (durch deutliche Abnahme Privatbesitz, Wachstum Ridesharing)
Anzahl der Wege	Steigt geringfügig wegen Hol- und Bringfahrten
Anzahl Stellplätze	Sinkt durch optimiertes Parken
Harmonisierung Verkehrsfluss	Positiver Beitrag durch Sharing

¹² Herstellung von Fahrzeugzahlen verbleibt etwa auf bisherigem Niveau, da die Mehrfahrleistung zu einem schnelleren Verschleiß führt (Fagnant, Kockelmann 2014).

Kennzahlen ÖPNV	Entwicklungstendenz
Verkehrsaufkommen	Anteil an Kleinbussen steigt
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	Steigt aufgrund von Flexibilisierung (Tür-zu-Tür-Angebote)
Verkehrsleistung Personenkilometer pro Jahr	Steigt wegen höherer Nachfrage durch verbesserte flexible Angebote
Relevanz Kleinbusse	Steigender Anteil an Kleinbussen
Relevanz Stadtbusse	Bleibt etwa konstant, ggf. gleicht sich durch leichte Abnahme mit vermehrten Kleinbusersatz aus
Harmonisierung Verkehrsfluss	Positiver Beitrag durch Sharing

Straßengüterverkehr

In diesem Szenario erfolgt die Warenversorgung urbaner Ballungszentren (City-Logistik) zukünftig im Regelfall mittels kooperativer und konsolidierender Versorgungsnetze. Fahrerlose Fahrzeuge nehmen eine flexible Shuttle-Funktion zwischen den City-Hub-Knoten in Stadtrandlage und den Empfängern im Stadtkern wahr (s. Abbildung 20).



Quelle: Fraunhofer IML

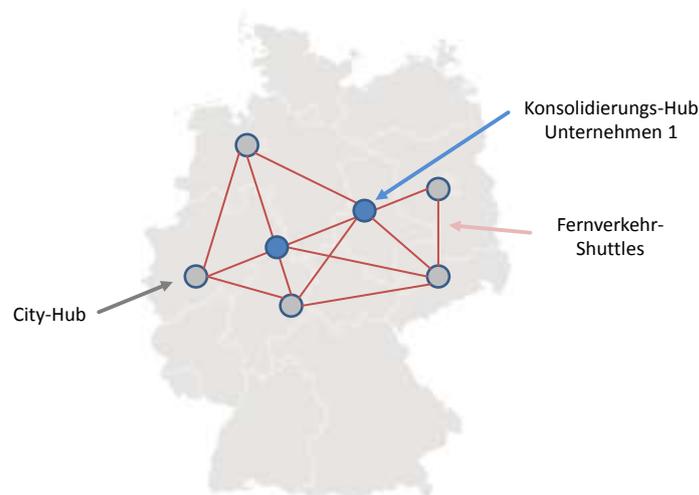
Abbildung 20: Hochautomatisierte City-Shuttle versorgen zukünftig den Ballungsraum

Die Shuttle-Fahrzeuge in der City-Logistik fahren zukünftig elektrisch, sind leise und können auch eine Warenversorgung in den frühen Morgenstunden (ab 5 Uhr) und späten Abendstunden (bis 24 Uhr) vornehmen. Dieses System wird durch Logistikdienstleister stark nachgefragt, da die Nutzungskosten des Systems gering sind und aufgrund von City-Maut deutlich unter den Kosten einer eigenständigen Versorgung liegen. Zudem entstehen neue Dienste, die eine hohe Nachfrage bei Kunden erfahren. Hierzu zählt im Business-to-Business (B2B)-Segment u. a. die Warenversorgung am Frühmorgen bzw. Spätabend, so dass in den Hauptgeschäftszeiten keine betrieblichen Störungen aufgrund von Anlieferungen entstehen. Zudem ermöglichen im Business-to-Customer (B2C)-Segment mobile Warendepots einen flexiblen Warenempfang. Ist ein Empfänger nicht verfügbar, „wartet“ die Sen-

dung im unmittelbaren Umfeld auf einen Empfang („Mobile Packstation 4.0“). In der Konsequenz geht der Einsatz eigener kleiner und mittlerer Lastkraftwagen zurück, weil sie im Nahverkehr nicht mehr benötigt werden. Insgesamt sinkt der städtische Lieferverkehr trotz steigendem Güteraufkommen, da Doppelfahrten vermieden werden.

Die Attraktivität des Straßengüterfernverkehrs gewinnt durch vollautomatisiertes und fahrerloses Fahren, da die Transporte kostengünstiger und zuverlässiger werden. Der Modal Split ist trotzdem gleichbleibend, da die Automatisierung auch im Schienenverkehr und in der Binnenschifffahrt Einzug hält. Das Schienengüter- und Wasserstraßensystem kann dadurch ebenso effizienter werden und auf den etablierten Relationen konkurrenzfähig bleiben. Es etablieren sich verkehrsträgerübergreifende Transportmodelle, in denen Straße, Schiene und Binnenschiff vernetzt und einander ergänzend eingesetzt werden (Synchronmodalität).

Die Eigentumsverhältnisse wandeln sich zu gemeinschaftlich genutzten Fahrzeugen, so dass Leerfahrten vermieden werden und die Fahrzeuge im besten Fall ständig in Bewegung sind. Kunden buchen nicht mehr das Fahrzeug an sich, sondern Laderaum bzw. Transportvolumen auf einer gewünschten Relation, mitunter auch in öffentlichen Verkehrsmitteln des Personenverkehrs. Der Spediteur bzw. das Logistikunternehmen nutzt die Nachfrage, um die Transporte dementsprechend optimal auszulasten und Sendungen von verschiedenen Verladern auf den gleichen Routen zu konsolidieren. Dabei unterstützen dynamische Preismodelle, die in Abhängigkeit von Nachfrage und Verfügbarkeit, von Konsolidierbarkeit und Nutzintegrationsmöglichkeit verschiedene Preise anbieten, wodurch die Verlader zunehmend Tagesrandzeiten nutzen.



Quelle: Fraunhofer IML

Abbildung 21: Zusammenspiel von City- und Konsolidierungs-Hubs der Unternehmen

Die einzelnen Sendungen durchlaufen Logistik-Hubs, in denen Ladungsträger und Ladeeinheiten umgeschlagen werden. Bevor die Sendungen ihr Servicegebiet erreichen, werden sie auf kleinere Fahrzeuge umgeschlagen, sodass die großen Lkw-Platoons nur auf gut ausgebauten Fernverkehrsrelationen verkehren. City-Hubs und Konsolidierungs-Hubs der Unternehmen sind mit gemeinschaftlich genutzten Fernverkehrsshuttles verbunden.

Tabelle 11: Entwicklungstendenzen des Güterverkehrs im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen"

Kennzahlen City-Logistik	Entwicklungstendenz*
Verkehrsaufkommen	Nimmt zu
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	nimmt leicht ab, da insgesamt weniger größere Fahrzeuge im Stadtgebiet fahren (Bündelung)
Verkehrsleistung Tonnenkilometer pro Jahr	geht zurück (als Kombination der oben genannten Effekte)
Relevanz kleinerer Nutzfahrzeuge	geht zurück
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	steigt an, da die autonomen City-Shuttles ein höheres Ladevolumen haben
Harmonisierung Verkehrsfluss	positiver Beitrag (die autonomen City-Shuttles fahren in den Spätabend/ Frühmorgen-Stunden)

Kennzahlen Fernverkehr	Entwicklungstendenz*
Verkehrsaufkommen	rückläufig (durch konsolidierte Verkehre)
Fahrleistung Kilometer je Fahrzeug pro Jahr	ansteigend, da Fahrzeuge rund um die Uhr und flexibel eingesetzt werden
Verkehrsleistung Tonnenkilometer pro Jahr	abnehmend
Relevanz kleinerer Nutzfahrzeuge	rückläufig
Relevanz schwerer Nutzfahrzeuge	leicht ansteigend
Modal Split Verschiebung	Gleichbleibend. Im besten Fall Verschiebung zu Bahn und Binnenschiff, da sich verkehrsträgerübergreifende Konzepte etablieren (Synchromodalität)

* = Entwicklungstendenzen beschreiben den Einfluss vollautomatisierten und fahrerlosen Fahrens. Unabhängig davon wird für den Güterverkehr ein stark wachsendes Aufkommen erwartet, das Verkehrsaufkommen und -leistung beeinflusst.¹³

¹³ Dr.-Ing. Markus Schubert, Intraplan Consult GmbH: Verflechtungsprognose 2030. 2014.

5 Diffusion automatisierter Fahrzeuge

Automatisiertes und vernetztes Fahren wird den Weg in den Markt finden, darüber herrscht ein Konsens unter den Experten. Die Analyse der Fachliteratur und die Akzeptanzanalyse innerhalb dieser Studie hat dies bestätigt. Es besteht bereits heute der Wunsch nach dieser Technologie bei einem großen Teil der Bevölkerung bzw. bei Unternehmen.

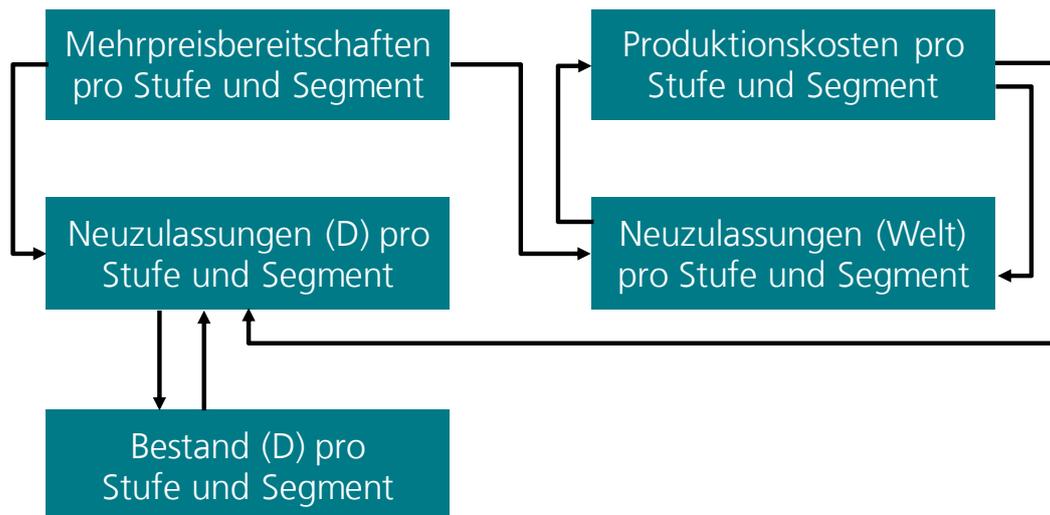
Auf Seiten der Anbieter ist ein Wettbewerb entstanden, den neue Player im ursprünglich von klassischen OEM und Zulieferern dominierten Bereich der Automobilindustrie zusätzlich anfachen. Schaffen es die Hersteller, den Kunden sichere und komfortable automatisierte Fahrzeuge zukünftig zu annehmbaren Zusatzkosten anzubieten, dann kann ein vergleichsweise schneller Markthochlauf gelingen.

Für die Berechnung potenzieller Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf THG-Emissionen und den EEV genügt jedoch keine qualitative Abschätzung des Markthochlaufs. Daher wird in diesem Kapitel zunächst der Ansatz zur Abschätzung des Markthochlaufs aller betrachteten Fahrzeuge und Fahrzeugsegmente mittels eines Diffusionsmodells erläutert. Im Anschluss geht dieses Kapitel auf die in die Berechnung eingehenden Daten und Projektionen zum Fahrzeugbestand und die Neuzulassungen ein. Abschließend werden die Ergebnisse der Markthochlaufsimulation beschrieben und ausgewertet. Um die Größe des Absatzmarktes in die Berechnung einfließen zu lassen, werden die Annahmen zur Entwicklung der deutschen sowie der weltweiten Neuzulassungen für alle Fahrzeugsegmente aus der qualitativen Beschreibung der beiden Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" (Szenario 1) und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" (Szenario 2) quantifiziert.

5.1 Vorgehensweise bei der Abschätzung der Diffusion

Zur quantitativen Abschätzung des zukünftigen Markthochlaufs automatisierter Fahrzeuge wurde ein Diffusionsmodell im Rahmen dieser Studie entwickelt. Das Modell unterscheidet dabei die im folgenden Kapitel vorgestellten Fahrzeugsegmente für Pkw, Lkw und Busse und jeweils die fünf Stufen der Automatisierung.

Das Grundprinzip des Diffusionsmodells (siehe Abbildung 22) besteht in einer Rückkopplung zwischen den für einzelne Fahrzeuge eines Segments notwendigen Zusatzkosten für die Ausstattung mit einer der fünf Automatisierungsstufen und den aus den Mehrpreisbereitschaften resultierenden Anteilen der Neuzulassungen der einzelnen Fahrzeugsegmente, die mit einer bestimmten Fahrzeugtechnologie ausgestattet sind. Das Modell geht davon aus, dass im Einführungsjahr t einer bestimmten Automatisierungsstufe die Zusatzausstattung nur in kleinen Mengen nachgefragt wird (0,1 % der Neuzulassungen des jeweiligen Segments).



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 22: Schematische Darstellung des Diffusionsmodells

Für die Neuberechnung der Aufpreise pro Automatisierungsstufe im Folgejahr $t + 1$ werden die anhand der Anteile der Neuzulassungen berechneten verkauften Einheiten der vorigen Jahre kumuliert. Die neuen Aufpreise für die Endkunden werden dabei Bottom-up auf Ebene der Systemkomponenten über die Ebene der Fahrerassistenztechnologien bis hin zur Ebene der Automatisierungsstufen über die Produktionskosten aggregiert. Die Aufpreise ergeben sich dabei aus den mit branchenüblichen Margen verrechneten Produktionskosten. Die neuen Anteile der Neuzulassungen der Fahrzeuge im Folgejahr $t + 1$, bei denen die Kunden eine bestimmte Stufe der Automatisierung auf Basis der Mehrpreisbereitschaften wählen, berechnen sich nach dem gleichen Muster: Die Aufpreise für die Ausstattung eines Fahrzeuges mit einer Automatisierungsstufe werden mit den Mehrpreisbereitschaften verglichen. Der Anteil der Kunden, die bereit sind, diese Preise für eine bestimmte Stufe der Automatisierung zu bezahlen, wird sich beim Neukauf für ein Fahrzeug mit dieser Ausstattung entscheiden. Sind zum gleichen Zeitpunkt im Rahmen seiner Mehrpreisbereitschaft eine oder mehrere höhere Automatisierungsstufen bereits auf dem Markt, dann entscheidet sich der Kunde im Modell für die höchste verfügbare Stufe der Automatisierung. Daraus ergeben sich für jedes Jahr bis 2050 und jedes Fahrzeugsegment jährlich die Anteile der Neuzulassungen, die mit einer bestimmten Automatisierungsstufe ausgestattet sind. Diese werden in jedem Zeitschritt mit den jährlichen Neuzulassungen auf den relevanten Weltmärkten verrechnet. Hierbei wurde der Fokus auf die Märkte gelegt, die zum einen bei der Abfrage der Mehrpreisbereitschaften berücksichtigt worden und zum anderen priorisierte Märkte für die Einführung dieser Technologie sind. Anhand dieser Kriterien werden im Modell die Absatzmärkte der EU, USA, Japan und Südkorea berücksichtigt.

Aus der Verrechnung der Marktanteile für automatisiertes und vernetztes Fahren und der Fortschreibung der Zulassungszahlen in den betrachteten Absatzmärkten ergibt sich die

jährliche Menge der verkauften Einheiten, die zur Berechnung der Kostendegression im Folgejahr $t + 1$ benötigt werden. Parallel dazu werden die Neuzulassungen von Fahrzeugen auf dem deutschen Markt und der Anteil der Fahrzeuge mit einer bestimmten Automatisierungsstufe am Bestand berechnet. Die Berechnung der Wirkung der Neuzulassungen auf den Bestand beruht auf den Prinzipien eines "Stock-Flow"-Modells. Dabei wird der Bestand durch Neuzulassungen zu jedem Zeitpunkt t erhöht. Gleichzeitig sinkt der Bestand durch den Export oder die Verschrottung von Fahrzeugen, die die durchschnittliche Lebensdauer eines Fahrzeuges überschritten haben.

5.2 Eingangsgroßen des Diffusionsmodells

Die in das Diffusionsmodell eingehenden Parameter werden im folgenden Kapitel skizziert. Für diesen Zweck wird zunächst beschrieben, wie sich die in dieser Studie verwendeten Fahrzeugsegmente zusammensetzen und wie die angenommenen Entwicklungen der Neuzulassungen und der Bestände für die beiden Markthochlaufszszenarien aussehen. Weiterhin werden die verwendeten Markteintrittszeitpunkte pro Automatisierungsstufe und pro Fahrzeugsegment aus der technoökonomischen Analyse gezeigt. Abschließend zeigt das Kapitel die verwendeten Mehrpreisbereitschaften von Käufern differenziert nach Segment und nach Automatisierungsstufe.

5.2.1 Definition der Fahrzeugsegmente

5.2.1.1 Personenkraftwagen

Personenkraftwagen (Pkw) sind mehrspurige motorisierte Fahrzeuge, die vorwiegend zur Beförderung von Personen benutzt werden. Für den Zweck der Studie werden die Pkw nach drei verschiedenen Segmenten differenziert. Die Klassifizierung orientiert sich dabei an den Fahrzeugsegmenten, die das Kraftfahrtbundesamt (KBA) unterscheidet. Um die Anzahl der Segmente zu minimieren, werden die folgenden drei Segmente aus den 13 Segmenten der KBA wie folgt zusammengefasst:

Kleinwagen und Kompaktwagenklasse

Zu diesem Pkw Segment zählen die in der KBA Statistik als "Minis", "Kleinwagen" und "Kompaktklasse" aufgeführten Fahrzeuge. Auf Grund des andauernden Trends zu steigenden Zulassungszahlen von "SUV" und "Geländewagen" werden einzelne Fahrzeuge dieser Klasse ebenfalls zu diesem Segment hinzugezählt (so genannte Kompakt-SUVs).

Mittelklasse

Dieses Segment umfasst die in der KBA unter den Segmentnamen "Mittelklasse" und "obere Mittelklasse" aufgeführten Pkw. Zusätzlich werden, vergleichbar mit der Kleinwagen-

und Kompaktklasse, bestimmte Teile des KBA-Segments "SUV" und "Geländewagen" diesem Segment zugeordnet. Ebenfalls zur Mittelklasse zählen in dieser Studie die Fahrzeuge der Segmente "Mini Van" und "Großraum Van".

Oberklasse

Die in der KBA unter den Segmenten "Oberklasse" und "Sportwagen" aufgeführten Fahrzeuge werden für den Zweck dieser Studie dem Pkw-Segment Oberklasse zugeordnet. Auch hierunter zählen darüber hinaus einzelne Fahrzeuge des "SUV" und "Geländewagen" Segments des KBA.

5.2.1.2 Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr

Im Rahmen dieses Projektes werden alle Fahrzeuge unter der Bezeichnung Nutzfahrzeuge zusammengefasst, die primär für den Transport von Gütern eingesetzt werden. Der Güterverkehr dient vorrangig dem Transport zwischen Produktion, Handel (Groß- und Einzelhandel) und Endverbraucher. Als Bestandteil des Produktionsprozesses finden innerbetriebliche Transporte als Werksverkehr statt.

Für die Differenzierung der Fahrzeugsegmente werden in Literatur und Statistiken verschiedene Systematiken verwendet. Häufig werden die Fahrzeuge hinsichtlich verschiedener Parameter unterschieden, zum Beispiel zulässiges Gesamtgewicht oder zulässige maximale Nutzlast. Darüber hinaus sind Unterscheidungen hinsichtlich Fahrzeugart (z. B. Sattelzugmaschine), Aufbauart (z. B. Pritsche) oder nach Emissionsklasse (z. B. EURO 6) üblich.

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei unterschiedliche Fahrzeugsegmente für Fahrzeuge des Güterverkehrs gewählt:

Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)

Unter dem Segment LNF werden sämtliche Fahrzeuge unter 3.5 t zulässigem Gesamtgewicht geführt, die primär für den Gütertransport eingesetzt werden. Darunter fallen bspw. Kleintransporter (z. B. Mercedes Sprinter). LNF werden häufig beim Ausliefern von Waren und Dienstleistungsfahrten eingesetzt. Das Fahren von LNF ist mit Führerscheinklasse B erlaubt.

Schwere Nutzfahrzeuge (SNF)

Unter dem Segment SNF werden im Rahmen dieser Studie sämtliche Fahrzeuge über 3.5 t zulässigem Gesamtgewicht geführt, wobei noch die Gewichtsklassen über 3.5 bis 12 t und über 12 t unterteilt werden können. Unter SNF über 3.5 bis 12 t fallen bspw. leichte und schwere Lkws, die für den Gütertransport im Nah- und Regionalverkehr eingesetzt werden. SNF über 12 t umfassen beispielsweise schwere Gliederzüge und Sattelzugmaschinen, die häufig für den Gütertransport im Fernverkehr und für Baustellenverkehr eingesetzt werden.

5.2.1.3 Fahrzeuge des öffentlichen Personenverkehrs und Einsatzprofile

Ausgehend von dem vorliegenden Projekt wurden die Anzahl und die durchschnittliche Laufleistung von Bussen untersucht. Die Busse wurden hierbei in Stadt-, Reise- und Kleinbusse gruppiert.

Stadtbusse

Unter Stadtbussen sind Linienbusse, die vorwiegend im Stadtverkehr verkehren, zu verstehen. Charakteristisch für Stadtbusse sind die auf kürzeren Distanzen verlaufenden Routen.

Reisebusse

Reisebusse umfassen sowohl die bei Langstreckenreisen eingesetzten Reisebusse als auch die von Stadt zu Stadt verkehrenden Regional- und Fernbusse. Charakteristisch für Reise- und Fernbusse sind ihre langen Routen. Der Fokus in diesem Projekt wird auf Strecken innerhalb Deutschlands gelegt.

Kleinbusse

Ein Kleinbus ist ein Kraftfahrzeug, das bis zu neun Personen transportieren darf. Ein Kleinbus gilt als PKW und darf somit mit dem Führerschein der Klasse B gefahren werden. Charakteristisch für Kleinbusse ist die Nutzung der Busse von Organisationen oder Vereinen.

5.2.2 Fahrzeugbestand und Neuzulassungen

Als Berechnungsgrundlage dienen für beide Szenarien Eingangsdaten in Form des Fahrzeugbestandes und der Fahrzeugneuzulassungen differenziert nach Segment. Das Diffusionsmodell benötigt dabei neben historischen Daten für den Markthochlauf auch Prognosen bis zum Jahr 2050. Historische Daten bis zum Jahr 2016 für Neuzulassungen und Bestände wurden für Deutschland aus den Datenbanken des Kraftfahrtbundesamtes, für die Märkte der EU, USA, Japan und Südkorea von ACEA¹⁴ entnommen. Die Projektionen der Zulassungen und des Bestandes bis 2030 und verlängert bis 2050 unterscheiden sich zwischen Referenzszenario (REF), Szenario 1 ("Welt des Fahrzeugbesitzes") und Szenario 2 ("Welt der Mobilitätsdienstleistungen"). Die Entwicklungen des Bestandes und der Neuzulassungen im Referenzszenario entsprechen den Entwicklungen in Szenario 1.

Das Referenzszenario der MKS (REF) orientiert sich bis ins Jahr 2030 an den Projektionen der Verflechtungsprognose 2030 (kurz VP2030, Schubert et al. 2014), allerdings mit aktualisierten sozioökonomischen Rahmenbedingungen. Sowohl der Bestand als auch die Zusammensetzung der Fahrzeugflotten nach Antriebsarten sind jedoch vergleichbar mit der VP2030 und stammen aus dem ASTRA-Modell. Mittels des ASTRA-Modells konnte die Entwicklung bis ins Jahr 2050 simuliert werden. Für die Entwicklung auf den betrachteten

¹⁴ ACEA = Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, Europäischer Verband der Fahrzeughersteller, www.acea.be.

Absatzmärkten der EU, der USA, Japans und Südkorea wurden vergleichbare Entwicklungen wie in Deutschland angenommen und somit die Entwicklung der Neuzulassungen pro Fahrzeugsegment abgeschätzt.

Für das Referenzszenario (REF) und Szenario 1 ("Welt des Fahrzeugbesitzes") ergeben sich somit die in Tabelle 12 dargestellten Entwicklungen der Neuzulassungen in allen Fahrzeugsegmenten. Für den Bereich der Busse wurde die Aufteilung in Stadt-, Reise- und Kleinbusse anhand von Daten einer Stichprobe von zehn größeren Nahverkehrsunternehmen und elf Fernbusunternehmen vorgenommen.

Tabelle 12: Entwicklung der deutschen Neuzulassungen in REF und in Szenario 1

Markt	Fahrzeug	Segment	2015	2020	2030	2040	2050
D	Pkw	Klein/Kompakt	1,681,954	1,701,798	1,676,141	1,650,485	1,624,828
		Mittelklasse	1,041,967	1,082,194	1,071,697	1,061,199	1,050,702
		Oberklasse	308,379	346,650	326,433	306,216	285,999
	Lkw	SNF	89,722	94,043	92,243	90,443	88,643
		LNF	396,040	422,906	410,424	397,943	385,461
	Bus	Stadtbus	2,967	3,004	2,932	2,860	2,789
		Reisebus	1,978	2,003	1,955	1,907	1,859
		Kleinbus	1,245	1,338	1,290	1,243	1,195

Quelle: KBA, VP2030 und Fraunhofer ISI/M-Five

In Szenario 2 ("Welt der Mobilitätsdienstleistungen") ergeben sich die in Tabelle 13 beschriebenen Entwicklungen der Neuzulassungen für Deutschland. Für den Pkw ergibt sich angesichts der Prämisse dieses Szenarios eine Reduktion der Neuzulassungen bei Kleinwagen/Kompaktwagen von 32 % bis zum Jahr 2050, für die Mittelklasse 43 % und die Oberklasse 58 % weniger Neuzulassungen im Vergleich zur REF und zu Szenario 1. Diese Entwicklungen ergeben sich aus einem deutlichen Anstieg von automatisierten und geteilten Mobilitätsdienstleistungen. Aus der qualitativen Beschreibung der Szenarien in Kapitel 4.3 wurde abgeleitet, dass die Motorisierung in Deutschland von 592 auf 450 Pkw pro tausend Einwohner im Vergleich zu REF und Szenario 1 sinkt.

Tabelle 13: Entwicklung der deutschen Neuzulassungen in Szenario 2

Markt	Fahrzeug	Segment	2015	2020	2030	2040	2050
D	Pkw	Klein/Kompakt	1,681,954	1,640,053	1,460,036	1,280,018	1,100,000
		Mittelklasse	1,041,967	1,029,170	886,114	743,057	600,000
		Oberklasse	308,379	327,121	258,081	189,040	120,000
	Lkw	SNF	89,722	91,958	84,943	77,929	70,914
		LNF	396,040	418,371	394,553	370,734	346,915
	Bus	Stadtbus	2,967	2,971	2,817	2,664	2,510
		Reisebus	1,978	2,068	2,185	2,301	2,417
		Kleinbus	1,245	1,619	2,275	2,930	3,586

Quelle: KBA, ACEA, VP2030 und Fraunhofer ISI/M-Five

Sowohl der Bereich des Carsharings als auch des Ridesharings vermag es, seine Fahrleistungen deutlich zu steigern. Bis 2050 werden in Szenario 2 durch diese Annahme ca. eine Million Carsharing und eine halbe Million Ridesharing Fahrzeuge im Bestand in Deutschland sein. Geht man davon aus, dass ein Carsharing-Pkw sechs private Pkws und ein Ridesharing-Pkw zwölf private Pkw ersetzen kann, dann ergibt sich letztlich das gleiche Mobilitätsangebot wie im REF und Szenario 1.

Im Bereich des öffentlichen Verkehrs führen die Annahmen im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" bei den Stadtbusen zu geringeren Neuzulassungszahlen in Höhe von - 10 %. Im Fernbusbereich sieht das Szenario eine Verlagerung auf Reisebusse vor, weswegen hier die Neuzulassungen im Vergleich zum REF um 30 % steigen. Die Flexibilisierung des Öffentlichen Verkehrs laut der Definition in Szenario 2 führt besonders bei den Stadtbusen eine Verlagerung zu kleineren Gefäßen, weswegen das Segment der Kleinbusse hier besonders stark bei Neuzulassungen und Bestand zunimmt.

Im Bereich des Straßengüterverkehrs sinken durch optimierte Logistikprozesse in Szenario 2 auch die Neuzulassungen bei LNF und SNF um 10 % bzw. 20 % im Vergleich zum REF und Szenario 1. Dieser Effekt ergibt sich beispielsweise durch die angenommene Reduktion der Leerfahrten.

Tabelle 14: Entwicklung der weltweiten¹⁵ Neuzulassungen im REF und Szenario 1

Markt	Fahrzeug	Segment	2015	2020	2030	2040	2050
EU, USA, Japan, Süd- Korea	Pkw	Klein/Kompakt	18.835.249	18.778.457	18.617.278	18.456.100	18.294.921
		Mittelklasse	11.668.393	11.942.354	11.906.147	11.869.940	11.833.734
		Oberklasse	3.453.358	3.823.284	3.620.904	3.418.525	3.216.145
	Lkw	SNF	1.189.186	1.217.381	1.114.498	1.011.614	908.730
		LNF	5.987.457	6.129.419	5.611.407	5.093.396	4.575.385
	Bus	Stadtbus	58.742	60.135	55.053	49.971	44.888
		Reisebus	39.161	40.090	36.702	33.314	29.926
		Kleinbus	30.453	31.175	28.541	25.906	23.271

Quelle: ACEA und Fraunhofer ISI

Für die Berechnung der Kostendegression werden die weltweiten Zulassungszahlen eingerechnet. Tabelle 14 zeigt die verwendete Entwicklung der Zulassungszahlen auf den vier fokussierten Weltmärkten für das REF und Szenario 1. Die Entwicklung der Neuzulassungen in Tabelle 15 spiegelt die angenommene Entwicklung in Szenario 2 wider.

Tabelle 15: Entwicklung der weltweiten Neuzulassungen in Szenario 2

Markt	Fahrzeug	Segment	2015	2020	2030	2040	2050
EU, USA, Japan, Süd- Korea	Pkw	Klein/Kompakt	18.835.249	18.716.712	18.401.172	18.085.632	17.770.093
		Mittelklasse	11.668.393	11.889.330	11.720.564	11.551.798	11.383.032
		Oberklasse	3.453.358	3.803.754	3.552.552	3.301.349	3.050.146
	Lkw	SNF	1.189.186	1.215.296	1.107.198	999.100	891.002
		LNF	5.987.457	6.124.884	5.595.535	5.066.187	4.536.839
	Bus	Stadtbus	58.742	60.102	54.938	49.774	44.610
		Reisebus	39.161	40.155	36.931	33.707	30.483
		Kleinbus	30.453	31.456	29.525	27.593	25.662

Quelle: ACEA und Fraunhofer ISI

Auf Grundlage der Ausgangswerte werden in den Szenarien die entsprechenden Durchdringungsraten und Anteile der Automatisierungsstufen an den Fahrzeugneuzulassungen prognostiziert. Eine detaillierte Analyse dieser Bestandsveränderungen wird in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben.

Für die nachfolgende Betrachtung der Marktdiffusion unterschiedlicher Automatisierungsstufen ist zu berücksichtigen, dass innerhalb des Modells unterschiedliche Zeitpunkte der Markteinführung für die Fahrzeugsegmente anhand der in Kapitel 2.1.5 gezeigten Roadmap

¹⁵ Absatzmärkte für den Markthochlauf: EU, USA, Japan und Südkorea.

angenommen werden. Im Grundsatz hängen die Einführungszeiträume mit den Investitionskosten für die Fahrzeuganschaffung zusammen, d. h. das beispielsweise Oberklassefahrzeuge vor Mittelklassefahrzeugen, die wiederum vor Fahrzeugen der Kompaktklasse mit Automatisierungstechnologien ausgestattet werden. Die in der Literatur gesammelten Einschätzungen zu möglichen Zeitpunkten der Marktreife bzw. der Markteinführung wurden dabei zunächst auf die hochpreisigen Fahrzeugsegmente, die als Technologieträger für die Hersteller fungieren, übertragen. Bei der Abschätzung der benötigten Zeitspanne für die Einführung im nächst kleineren Segment wurde anhand von früheren Technologieentwicklungen (z. B. ABS oder ESP) eine zeitliche Verzögerung von vier Jahren zwischen Ober- und Mittelklasse angenommen. Zwischen Mittel- und Klein- bzw. Kompaktwagenklasse werden weitere sechs Jahre Verzögerung abgeleitet. Ähnliche Zeitspannen wurden bei den Fahrzeugen des Straßengüterverkehrs zwischen schweren und leichten Nutzfahrzeugen angenommen bzw. beim öffentlichen Straßenverkehr zwischen Reise- und Stadt- bzw. Kleinbussen.

Nachfolgend (siehe Tabelle 16) sind die für die Abschätzung des Markthochlaufs angenommenen Zeitpunkte der Einführung für die Automatisierungsstufen je Fahrzeugsegment dargestellt. Dabei geht die Studie sowohl für Pkw, als auch für Lkw und Busse davon aus, dass die Hersteller der Fahrzeuge die Fahrzeuge entsprechend der Marktreife auch mit den einzelnen Automatisierungsstufen anbieten. Für die Segmente der Pkw, der Lkw und Reisebusse ist diese stufenweise, evolutionäre Einführung aus zahlreichen Gründen wahrscheinlich. Das schrittweise Heranführen an das fahrerlose Fahren ist aus Gesichtspunkten der Akzeptanz sinnvoll. Wirtschaftlich interessant kann bereits die Nutzung der Funktionen der Automatisierungsstufen 1 bis 3 sein, weil eine geringere Unfallwahrscheinlichkeit auch zu sinkenden Versicherungskosten oder Folgekosten führen kann. Allerdings gibt es im Bereich der Kleinbusse auch komplett neue Fahrzeugkonzepte, die rein für das fahrerlose Fahren und damit die Automatisierungsstufe 5 konzipiert sind. Für diese neuen Fahrzeugkonzepte wird es daher keine Ausstattung mit den Automatisierungsstufen 1 bis 4 geben.

Tabelle 16: Markteinführung der Automatisierungsstufen pro Fahrzeugsegment im Modell

Fahrzeug	Segment	AF Stufe	<'16	'18	'20	'22	'24	'26	'28	'30	'32	'34	'36	'38	'40	'42	'44	'46	'48	'50	
Pkw	Klein/ Kompakt	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
	Mittel- klasse	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
	Ober- klasse	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
Lkw	LNF	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
	SNF	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
Bus	Stadtbus	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
	Reisebus	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			
	Kleinbus	1																			
		2																			
		3																			
		4																			
		5																			

Quelle: Fraunhofer ISI

5.2.3 Mehrpreisbereitschaften

Im Rahmen der Akzeptanzanalyse (siehe Kapitel 3) wurden die betrachteten Studien¹⁶ nach Angaben zu Mehrpreisbereitschaften untersucht. Die Studien unterscheiden sich jedoch zum einen regional und zum anderen nach der Stufe der Automatisierung. Teilweise wurde auch nach der Akzeptanz und Mehrpreisbereitschaft für teil-, hoch- und vollautomatisiertes Fahren gefragt, größtenteils jedoch nur nach Stufe 5, dem fahrerlosen Fahren. Für die Berechnung des Markthochlaufs wurden vorrangig die Ergebnisse der Boston Consulting Group (2015) und von Trommer (2017) verwendet und für die Fahrzeugsegmente differenziert. Tabelle 17 zeigt eine Übersicht der resultierenden Mehrpreisbereitschaften für Pkw, welche in die Berechnung eingeflossen sind.

Tabelle 17: Mehrpreisbereitschaft bei Pkw pro Segment und Automatisierungsstufe in REF und Szenario 1

Max. Aufpreise	Anteil der Kunden					
	Stufe 1 bis 3			Stufe 4 bis 5		
	Klein/ Kompakt	Mittel- klasse	Ober- klasse	Klein/ Kompakt	Mittel- klasse	Ober- klasse
Kein Aufpreis	80%	50%	20%	44 %	12%	10%
1.000 €	10%	15%	30%	28%	13%	2%
2.000 €	6%	15%	15%	13%	20%	13%
3.000 €	3%	10%	15%	8%	28%	20%
4.000 €	1%	6%	10%	5%	13%	28%
5.000 €	0%	3%	6%	3%	8%	13%
10.000 €	0%	1%	3%	0%	5%	8%
25.000 €	0%	0%	1%	0%	3%	8%

Quelle: Fraunhofer ISI

Keine der untersuchten Akzeptanzstudien unterscheidet bei den Umfragen die Käufer nach dem vom Käufer anvisierten Fahrzeugsegment. Da jedoch Käufer von Fahrzeugen im Kleinwagensegment deutlich preissensibler sind als Käufer von Oberklassefahrzeugen, könnte die Übertragung der abgefragten Mehrpreisbereitschaften in gleichem Maße für alle drei Segmente zu einer Überschätzung führen. Daher wurde angenommen, dass die Mehrpreisbereitschaft im Vergleich zu den abgefragten Werten bei Kleinwagen/Kompaktwagen um 2.000 € geringer als im Durchschnitt und bei der Oberklasse 1.000 € höher als der Durchschnitt liegt.

¹⁶ Quellen: Detecon (2016), Schottle und Siwak (2014), Kyriadikis et al. (2015), Bansal et al. (2016), Boston Consulting Group (2015) und Trommer (2016).

Tabelle 18: Mehrpreisbereitschaft bei Pkw pro Segment und Automatisierungsstufe in Szenario 2

Max. Aufpreise	Anteil der Kunden					
	Stufe 1 bis 3			Stufe 4 bis 5		
	Klein/ Kompakt	Mittel- klasse	Ober- klasse	Klein/ Kompakt	Mittel- klasse	Ober- klasse
kein Aufpreis	80%	50%	20%	12%	12%	10%
1.000 €	10%	15%	30%	13%	13%	2%
2.000 €	6%	15%	15%	20%	20%	13%
3.000 €	3%	10%	15%	28%	28%	20%
4.000 €	1%	6%	10%	13%	13%	28%
5.000 €	0%	3%	6%	8%	8%	13%
10.000 €	0%	1%	3%	5%	5%	8%
25.000 €	0%	0%	1%	3%	3%	8%

Quelle: Fraunhofer ISI

Während sowohl im Referenzszenario als auch in Szenario 1 neue, geteilte Mobilitätsdienstleistungen keinen Durchbruch erfahren, spielen Sharingkonzepte mit automatisierten Fahrzeugen in Szenario 2 eine deutlich größere Rolle. Die Struktur des Fahrzeugbesitzes ändert sich, weswegen zum einen der Anteil von Fahrzeugen der Kleinwagen/Kompaktklasse am gesamten Bestand größer wird. Ein größerer Anteil von kommerziellen Sharinganbietern führt jedoch auch zu einer Änderung der im REF und Szenario 1 angenommenen Mehrpreisbereitschaften. Während im REF und in Szenario 1 viele Käufer nicht bereit sind, einen Mehrpreis für die Ausstattung des Pkw mit Automatisierungsstufe 4 oder 5 zu bezahlen, ist für die Anbieter automatisierter Sharing-Konzepte der Mehrpreis auch im Segment der Kleinwagen/Kompaktklasse notwendig, um das Geschäftsmodell zu realisieren. Im Vergleich zum REF und zu Szenario 1 ist der Anteil der Flottenbetreiber als Kunden in diesem Segment daher in Szenario 2 deutlich größer. Daher unterscheidet sich in Szenario 2 die Mehrpreisbereitschaft für Automatisierungsstufe 4 und 5 bei Klein- und Kompaktwagen nicht von der der Käufer der Mittelklasse Pkw. Tabelle 18 zeigt die in die Berechnung des Markthochlaufs in Szenario 2 eingehenden Mehrpreisbereitschaften für Pkw.

Während der beiden Fachworkshops „Automatisiert und vernetzt: grün und günstig im Straßenverkehr der Zukunft?“ vom März und Juli 2017 in Berlin hat sich in der Diskussion mit dem Fachpublikum gezeigt, dass die Nachfrage nach automatisierten Fahrzeugen im kommerziellen Bereich bereits heute besteht und schon deutlich stärker ist als im Personenverkehr. Die Transportbranche ist darauf bedacht, die Fahrzeugkosten nicht nur an den Anschaffungskosten, sondern an den Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) zu bemessen. Dies wurde im Kontext elektrisch angetriebener Nutzfahrzeuge durch Wiet-

schel (2014) und Vogel (2015) bestätigt. Automatisiertes Fahren ermöglicht in (Teil-) Prozessen den Verzicht auf kostenintensives Fahrpersonal. Voraussetzung ist ein sicherer und zuverlässiger Betrieb. Dieser Übergang wird sich zwischen den Automatisierungsstufen 3 und 4 vollziehen, da ab dieser Stufe in Teilprozessen ohne Zutun des Fahrers gefahren werden kann. Bis einschließlich Stufe 3 sind hauptsächlich ein Gewinn an Komfort und Sicherheit die Mehrpreismotivation, ab Stufe 4 rückt die Wirtschaftlichkeit in die Betrachtung ein. Der steigende Kostendruck im Logistik- und Transportgewerbe ist ebenso ein wesentlicher Treiber hinter dieser Entwicklung, sodass auch die Automatisierung von Teilprozessen sinnvoll erscheint. Die Fahrerkosten stellen gegenwärtig rund 32 % im Güterfernverkehr (BGL 2016), 45 % im Güternahverkehr (BGL 2016) und rund 40 % im gewerblichen Personenverkehr (Frank 2008) da. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass die vorhersehbaren zusätzlichen Investitionskosten für automatisierte Fahrzeuge (23.400 \$ nach Roland Berger 2016) bei (teilweiser) Verringerung der Personalkosten sich im Rahmen der Nutzungszeit amortisieren und daher die Automatisierung zügig voranschreitet. Nowak (2016) geht davon aus, dass das Kostenniveau von Lkw mit Automatisierungstechnologien im Jahr 2025 um 28 % geringer ausfällt als ein konventioneller Lkw 2016 und führt dies maßgeblich auf geringere Personalkosten zurück.

Aus diesem Grund wurden für die Berechnung des Markthochlaufs bei (schweren und leichten) Lkw sowie bei Bussen andere und tendenziell höhere Mehrpreisbereitschaften angenommen. Die Annahmen sind in der folgenden Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Mehrpreisbereitschaft bei Lkw und Bus pro Segment und Automatisierungsstufe in REF und Szenario 1

Max. Aufpreise	Anteil der Kunden			
	Stufe 1 bis 3		Stufe 4 bis 5	
	LNF, Kleinbus, Stadtbus	SNF, Reisebus	LNF, Kleinbus, Stadtbus	SNF, Reisebus
kein Aufpreis	12%	12%	5%	1%
1.000 €	13%	13%	1%	1%
2.000 €	20%	20%	5%	1%
3.000 €	28%	28%	10%	3%
4.000 €	13%	13%	15%	5%
5.000 €	8%	8%	15%	20%
10.000 €	5%	5%	20%	30%
25.000 €	3%	3%	30%	40%

Quelle: Fraunhofer IML

Für die Quantifizierung der Annahmen wurden die oben genannten Quellen der Akzeptanzanalyse in ihren Grundaussagen zu Grunde gelegt, unter anderem, dass bei Fahrzeu-

gen kleinerer Fahrzeugsegmente eine geringere Mehrpreisbereitschaft vorherrscht. Ergänzt durch oben genannte Quellen zu Kostenanteilen und -veränderungen im Gewerblichen Verkehr resultieren die dargestellten Mehrpreisbereitschaften.

Mit der gleichen Argumentation wie beim Pkw wurden bei Nutzfahrzeugen in Folge der sich ändernden Mobilitätslandschaft mit größerem Anteil von automatisierten Sharingkonzepten auch leicht höhere Mehrpreisbereitschaften der Logistikunternehmen bzw. Busunternehmen bei SNF bzw. bei Reisebussen angenommen (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Mehrpreisbereitschaft bei Lkw und Bus pro Segment und Automatisierungsstufe in Szenario 2

Max. Aufpreise	Anteil der Kunden			
	Stufe 1 bis 3		Stufe 4 bis 5	
	LNF, Kleinbus, Stadtbus	SNF, Reisebus	LNF, Kleinbus, Stadtbus	SNF, Reisebus
kein Aufpreis	12%	12%	5%	1%
1.000 €	13%	13%	1%	1%
2.000 €	20%	20%	5%	1%
3.000 €	28%	28%	10%	3%
4.000 €	13%	13%	15%	5%
5.000 €	8%	8%	15%	15%
10.000 €	5%	5%	20%	30%
25.000 €	3%	3%	30%	45%

Quelle: Fraunhofer IML

5.3 Diffusion automatisierter Fahrzeuge in beiden Szenarien

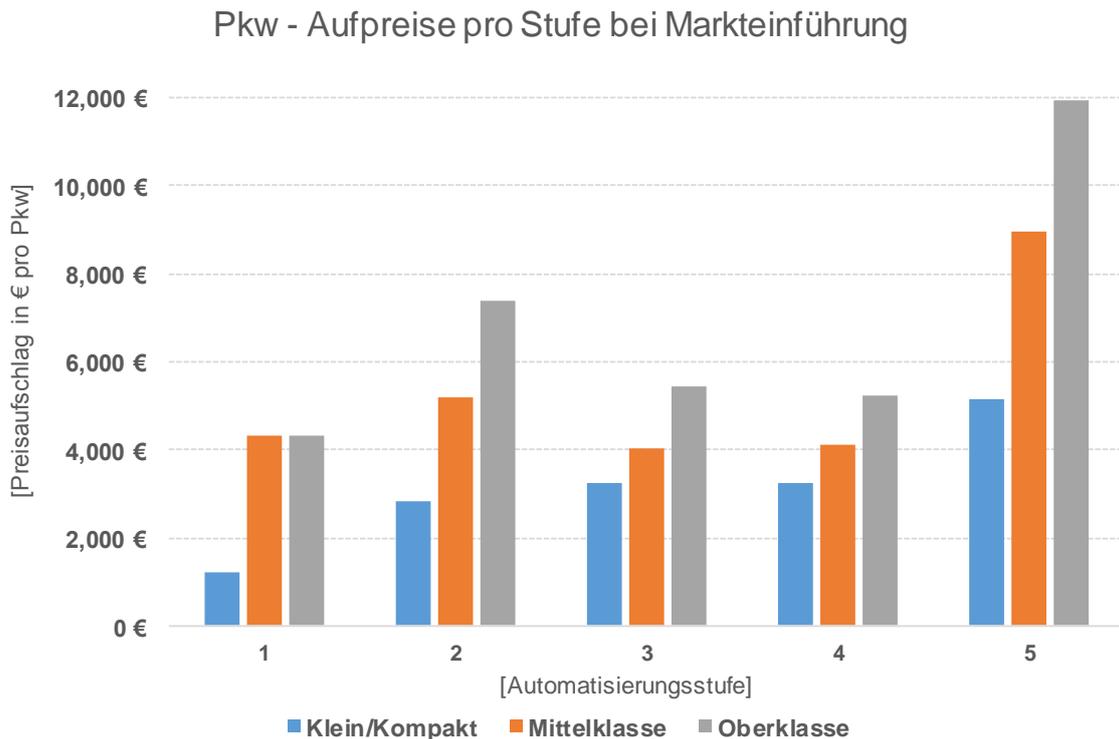
Dieses Unterkapitel beschreibt die prognostizierte Marktentwicklung für alle fünf Automatisierungsstufen und damit die Ergebnisse des Diffusionsmodells für REF und die beiden Szenarien, Szenario 1 "Welt des Fahrzeugbesitzes" und Szenario 2 "Welt der Mobilitätsdienstleistungen". Die Eingangsdaten der Szenarien entsprechen den in Kapitel 4.3 beschriebenen qualitativen Annahmen und den in den vorigen Kapiteln quantifizierten Ausprägungen. Auf dieser Grundlage beruht die Prognose und Berechnung des Fahrzeugbestandes und der Verbreitung von Automatisierungsstufen in den einzelnen Fahrzeugsegmenten.

5.3.1 Entwicklung der Kosten der Automatisierung

Das Diffusionsmodell berechnet für jedes Jahr bis 2050 die Entwicklung der Produktionskosten für die Ausstattung der Fahrzeuge mit einer bestimmten Automatisierungsstufe. Auf Basis der implementierten Lernkurven mit technologiespezifischen Lernraten (siehe Kapitel 2.2) sinken somit die Kosten pro Fahrzeugsegment und pro Automatisierungsstufe mit jedem verkauften Fahrzeug. Die resultierenden zusätzlichen Produktionskosten werden danach mit einer definierten durchschnittlichen Gewinnmarge in Endkundenpreise und einem Preisaufschlag pro Fahrzeug umgerechnet. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, hängen die Produktionskosten von bzw. die Preisaufschläge für höheren Automatisierungsstufen auch vom Erfolg voriger Automatisierungsstufen ab. Dies liegt daran, dass zumindest Teile der Sensorik, Aktorik und Algorithmen bereits in vorigen Automatisierungsstufen Verwendung finden und dadurch die Mengendegressionseffekte bereits vor der Einführung entstehen. Diese Effekte kann man zum Teil in Abbildung 23 erkennen. Die Abbildung zeigt die berechneten Preisaufläge für Pkw differenziert nach Segmenten und pro Automatisierungsstufe zum Zeitpunkt der Markteinführung. Da die Automatisierungsstufen zuerst für die Käufer von Oberklasse-Pkw angeboten werden, ist dort unter anderem auch der Preisauflage höher als für die Mittelklasse und die Kleinwagen/Kompaktklasse.

Entgegen dem erwarteten Anstieg der Preisaufläge mit jeder Automatisierungsstufe zeigt sich der Mengendegressionseffekt auch an den fallenden Kosten zur Markteinführung zwischen Stufe 2 und Stufe 3 sowie in der Stagnation der Preise zwischen Stufe 3 und 4. Dieser Effekt entsteht durch die zeitliche Sequenz der Markteinführungen und dadurch, dass viele Komponenten bereits in vorigen Automatisierungsstufen benötigt und verbaut werden (z.B. Radare oder Ultraschallsensoren). Die abgeschätzten Preise zur Markteinführung sind identisch in allen Szenarien.

Das Diffusionsmodell schätzt somit den Einstiegspreis im Segment der Oberklasse für Stufe 1 bei ca. 4.300 €, für Stufe 2 ca. 7.400 €, für Stufe 3 ca. 5.400 €, für Stufe 4 ca. 5.300 € und für Stufe 5 ca. 11.900 €.



Quelle: Fraunhofer ISI

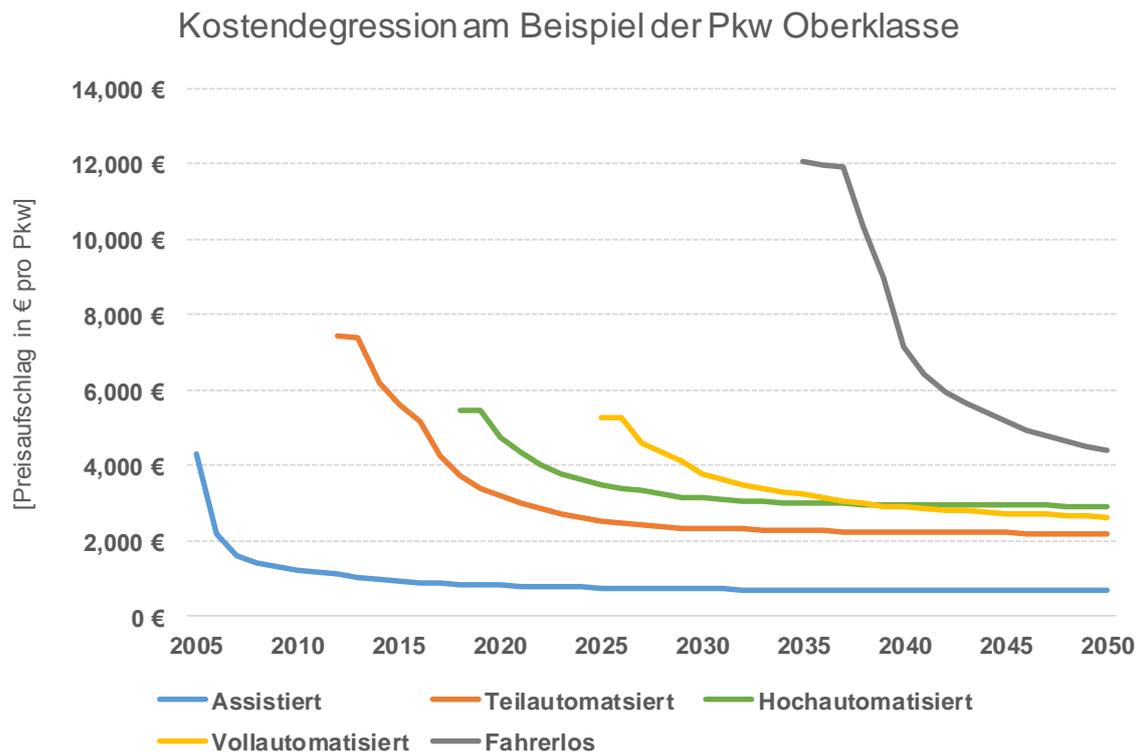
Abbildung 23: Berechneter Aufpreis pro Pkw für die Ausstattung mit Stufe 1 bis 5 bei Markteinführung

Der Verlauf der Kostendegression (sichtbar durch die Entwicklung der Aufpreise) ist beispielhaft für die Oberklasse in Abbildung 24 über den Zeitverlauf bis 2050 dargestellt. Während im ersten Jahr der Markteinführung einer bestimmten Automatisierungsstufe laut Definition des Diffusionsmodells nur ein vordefinierter Anteil an Neuzulassungen mit dieser Form der Automatisierung ausgestattet ist, nehmen die Kosten in den ersten Jahren nach der Einführung typisch für Lernkurven einen steileren Verlauf und nähern sich nach einiger Zeit einer unteren Grenze an.

Der mittels des Diffusionsmodells abgeschätzte Verlauf der Kostendegression zeigt, dass die Preisaufläge im Jahr 2050 für alle Stufen der Automatisierung unterhalb von 5.000 € liegen. Die Ergebnisse des Markthochlaufs im nächsten Kapitel zeigen jedoch, dass selbst dann nicht 100 % der Fahrzeuge mit Automatisierungstechnologien ausgestattet sein werden. Dieser Effekt resultiert aus den in den Mehrpreisbereitschaften verankerten Anteilen der Käufer, die nicht bereit sind, Preisaufläge beim Fahrzeugkauf für Automatisierung zu akzeptieren. Die im Vergleich zu SNF lange durchschnittliche Lebensdauer von Pkw mit knapp 15 Jahren trägt ebenfalls dazu bei, dass höhere Anteile am Bestand erst nach 2050 zu erwarten sind.

Der im Bereich der Fahrzeuge übliche Mechanismus, dass bestimmte Ausstattungen nach einer Übergangsphase von einer Zusatzausstattung in die Serie übergehen, wurde in dieser

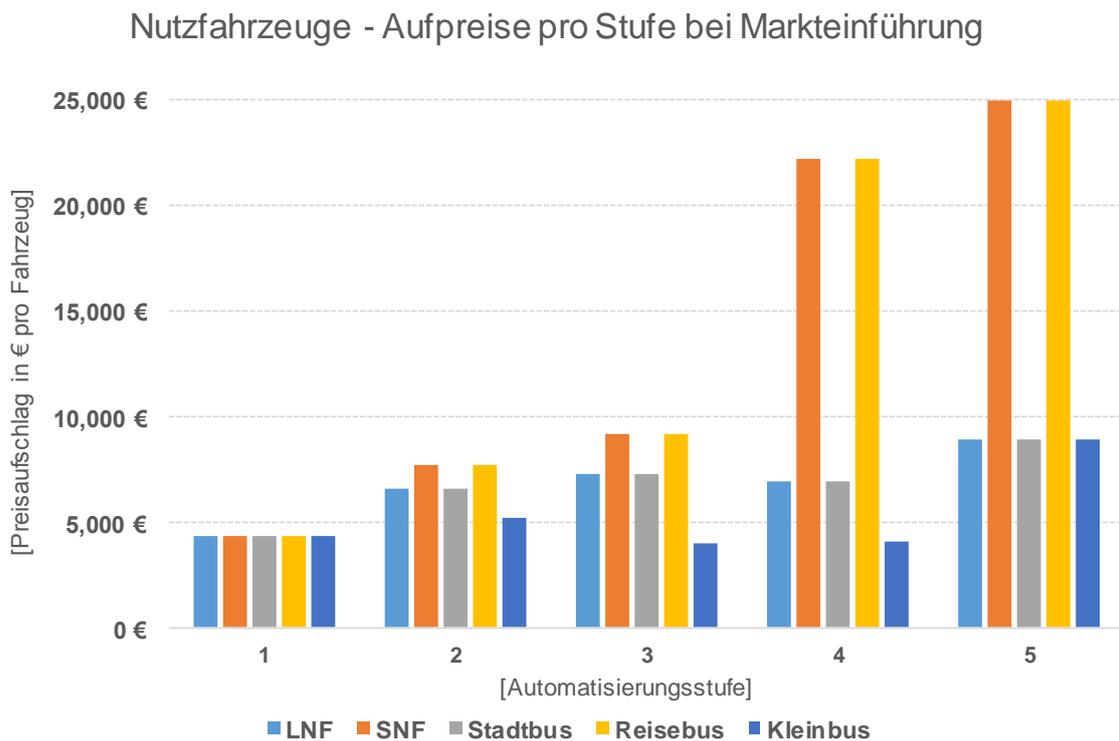
Studie nicht übernommen. Der Grund dafür liegt zum einen in der nicht prognostizierbaren Dauer dieser Phase und den unterschiedlichen Strategien der einzelnen Hersteller. Zum anderen wird in dieser Studie nicht antizipiert, dass die öffentliche Hand diese Form der Ausstattung bis zu einem bestimmten Zeitpunkt als Standard vorschreibt. Somit geht das Diffusionsmodell bis 2050 davon aus, dass Automatisierung durchgängig als Zusatzausstattung angeboten werden wird.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 24: Entwicklung des Aufpreises pro Pkw für die Ausstattung mit Stufe 1 bis 5 am Beispiel der Pkw-Oberklasse

Die Preisaufläge für Nutzfahrzeuge pro Segment und nach Automatisierungsstufe zu den jeweiligen Markteinführungszeitpunkten sind in Abbildung 25 dargestellt. Auch hier zeigt sich der Effekt, dass beispielsweise bei schweren Nutzfahrzeugen (SNF) und Reisebussen wegen der angenommenen früheren Markteinführung der Automatisierungsstufen ein höherer Einstiegspreis im Vergleich zu leichten Nutzfahrzeugen (LNF), Stadt- und Kleinbussen entsteht. Unterschiede bei den Preisen im Vergleich zum Pkw ergeben sich darüber hinaus aus den variierenden Konfigurationen der Automatisierungsstufen mit Fahrerassistenzsystemen (siehe Kapitel 2.1.3). Dementsprechend sind die Einstiegspreise besonders bei Stufe 4 und Stufe 5 deutlich höher als bei Pkw.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 25: Berechneter Aufpreis pro Nutzfahrzeug für die Ausstattung mit Stufe 1 bis 5 bei Markteinführung

Da die Zeitpunkte der Markteinführung in Szenario 1 und Szenario 2 identisch sind, ergibt sich ein Unterschied beim Verlauf der Kosten nur aus den unterschiedlichen Verläufen der Neuzulassungen. Da der Verlauf der Preisauflschläge (siehe Beispiel Pkw-Oberklasse in Abbildung 24) jedoch durch die großen Stückzahlen bereits in vielen Fällen bereits vor 2050 sehr flach verläuft, ergeben sich durch die angenommenen Änderungen im Szenario 2 "Welt der Mobilitätsdienstleistung" nur geringfügig unterschiedliche Kostenentwicklungen bis 2050 in Höhe von 1 % bis 2 % höheren Preisauflschlägen. Die abnehmenden Zulassungszahlen in Szenario 2 werden dabei zum Teil von den höheren Mehrpreisbereitschaften bei den kommerziellen Anbietern von automatisierten und geteilten Mobilitätsdienstleistungen kompensiert.

5.3.2 Szenario 1 - Welt des Fahrzeugbesitzes

Die folgende Tabelle 21 stellt die absoluten Fahrzeugbestände in Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw, Bus) und relative Anteile der Segmente für die Jahre 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050 im REF und Szenario 1 dar. Pkws werden in Klein-/Kompakt-, Mittel- und Oberklasse segmentiert, Lkws in schwere (SNF) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) und Busse in Stadt-, Reise- und Kleinbus. Bis 2030 ist für alle drei Fahrzeugtypen ein starkes Wachstum

der Bestände zu verzeichnen. Insbesondere für die Nutzfahrzeuge ist über beide Fahrzeugsegmente ein starkes Wachstum zu beobachten. Nach dem Jahr 2030 sinken die Bestände wieder leicht bis zum Jahr 2050. Im Vergleich des Jahres 2010 gegenüber 2050 ist ein eher moderates Wachstum bei allen Fahrzeugtypen ersichtlich. In Anbetracht der relativen Anteile der Segmente ist zu sagen, dass bei Bussen keine nennenswerten Veränderungen auftreten. Bei den Nutzfahrzeugen nehmen die Anteile von leichten Nutzfahrzeugen von 2010 bis 2020 um 3 % zu und bleiben dann konstant. Bei Pkws nehmen von 2010 auf 2050 die relativen Anteile der Kompakt- und Oberklasse um 2 % und 3 % ab, und die Oberklasse nimmt um 5 % zu.

Tabelle 21: Fahrzeugbestand und Anteile der Segmente für REF und Szenario 1

Fahrzeugtypen und -segment		2010	2020	2030	2040	2050
Pkw Gesamt		39.342.784	42.470.250	43.189.339	42.456.515	41.723.691
davon	Klein/Kompakt	59%	58%	57%	57%	57%
	Mittelklasse	37%	34%	33%	34%	34%
	Oberklasse	4%	8%	10%	10%	9%
Lkw Gesamt		4.096.765	5.216.030	5.359.080	5.223.462	5.087.843
davon	SNF	13%	10%	10%	10%	10%
	LNF	87%	90%	90%	90%	90%
Busse Gesamt		76.463	80.694	84.611	82.749	80.886
davon	Stadtbus	49%	48%	48%	48%	48%
	Reisebus	23%	24%	23%	23%	23%
	Kleinbus	28%	28%	29%	29%	29%

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Automatisierungsgrade in Fahrzeugsegmenten

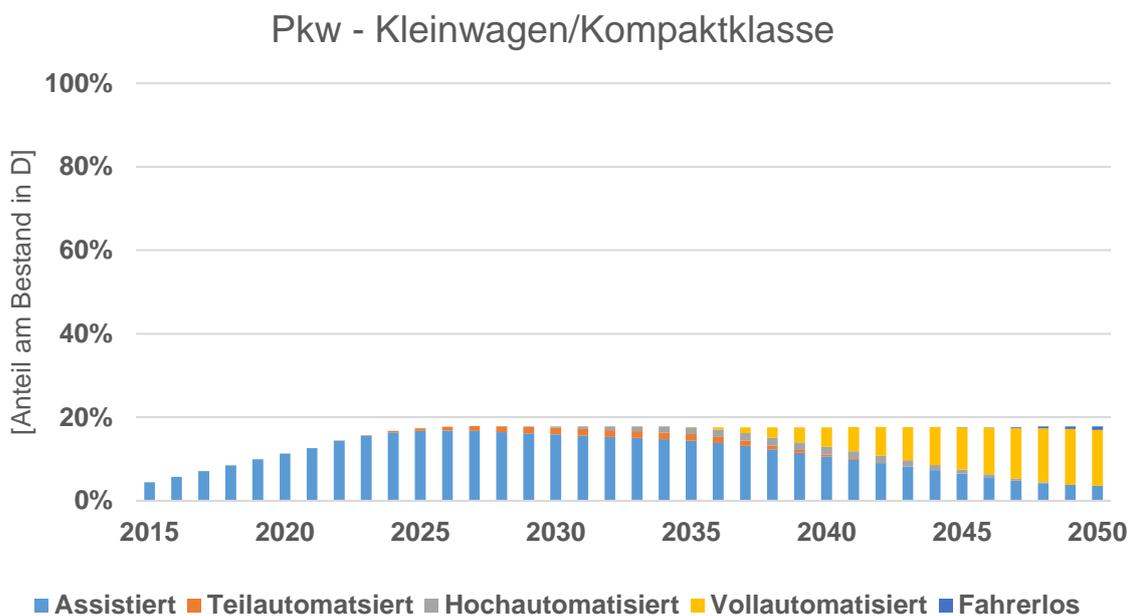
Nachfolgend werden die Ergebnisse der Simulation von Szenario 1 mit dem Diffusionsmodell, die Marktdurchdringung von Automatisierungsstufen nach verschiedenen Fahrzeugtypen und den dazugehörigen Fahrzeugsegmenten beschrieben.

Pkw

In den folgenden drei Abbildungen sind die prozentualen Anteile, bezogen auf die verschiedenen Automatisierungsstufen (assistiert, teil-, hoch-, vollautomatisiert, fahrerlos), für die Pkw-Segmente Kleinwagen/Kompakt-, Mittel- und Oberklasse von 2015 bis 2050 für Szenario 1 – Welt des Fahrzeugbesitzes dargestellt.

Der prozentuale Anteil der mit den Automatisierungsstufen 1 bis 5 ausgestatteten Pkw Kleinwagen/Kompaktklasse am Bestand dieses Segments steigt bis 2025 von ca. 6 % auf ca. 18 % an, stagniert jedoch auf diesem Niveau bis 2050. Allgemein ist ein relativ hoher

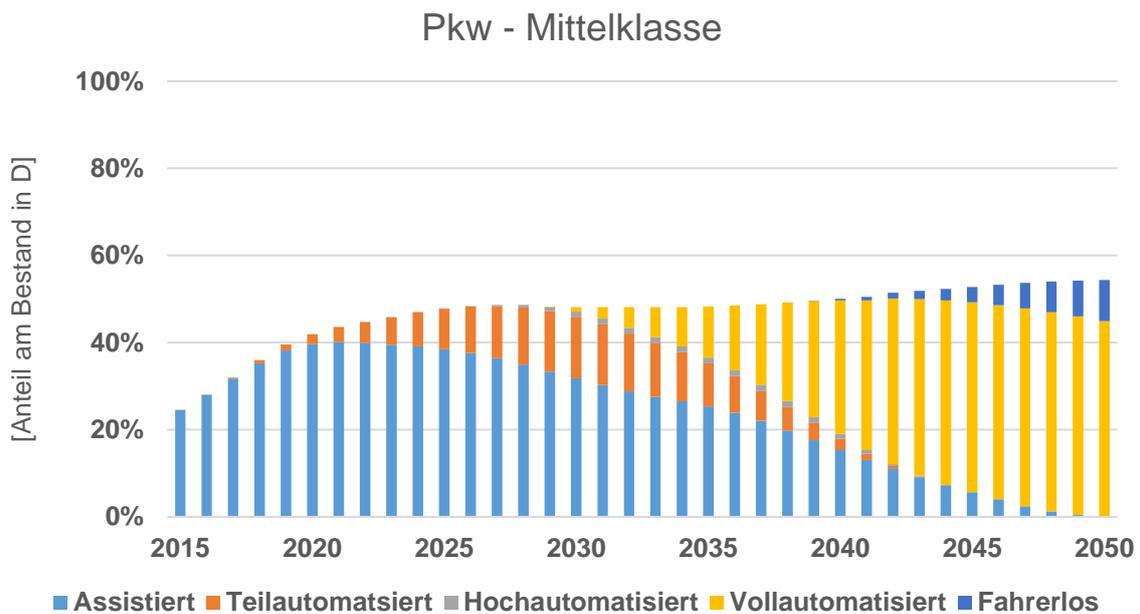
Anteil an assistierten Fahrzeugen zu verzeichnen. Teil- und hochautomatisierte sowie fahrerlose Kleinwagen/Kompaktfahrzeuge sind nur zu geringen Anteilen vertreten. Bis 2022 sind nur assistierte Pkws vorhanden. Mit der Zeit sinkt aber dessen Anteil und beträgt in 2050 noch ca. 4 %. Ab 2022 treten schrittweise teilautomatisierte Pkws im Bestand ein. Dessen Anteil bleibt jedoch relativ gering und ist in 2042 nicht mehr vorhanden. Mit einem ähnlichen geringen Anteil entwickeln sich hochautomatisierte Pkws von 2032 bis 2046. Ab 2035 sind vollautomatisierte Pkws zu verzeichnen. Dessen Anteil beträgt in 2050 ca. 13 % an den Gesamtfahrzeugen. Ab 2045 ist ein sehr kleiner Anteil an fahrerlosen Kleinwagen/Kompaktfahrzeugen zu beobachten, der leicht wächst.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 26: Pkw Kleinwagen/Kompaktklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1

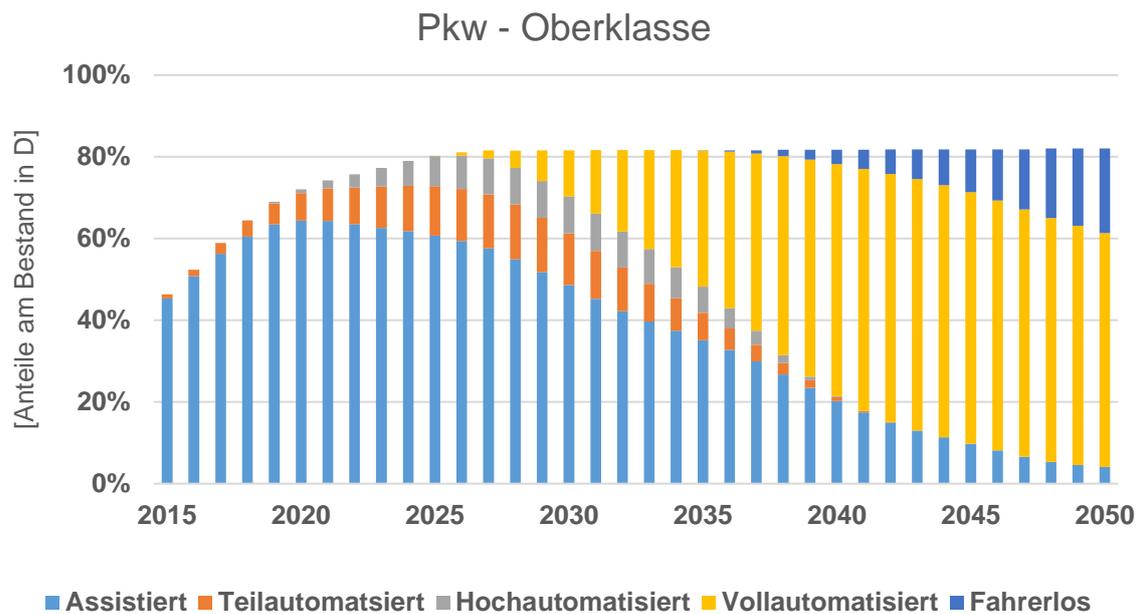
Der gesamte prozentuale Anteil an Mittelklassefahrzeugen die mit Automatisierungstechnologien ausgestattet sind am Bestand, steigt bis 2025 auf ca. 48 % und wächst dann leicht bis 2050. Im Allgemeinen ist zunächst ein relativ hoher Anteil an assistierten und vollautomatisierten Mittelklassefahrzeugen, ein mittlerer Anteil an teilautomatisierten, geringer Anteil an fahrerlosen und sehr geringer Anteil an hochautomatisierten Fahrzeugen zu verzeichnen. Der Anteil assistierter Pkws hat ein Maximum von 40 % in 2021 und sinkt dann bis auf 0 % in 2049 ab. Ab 2021 werden assistierte Pkws der Mittelklasse langsam von teilautomatisierten Pkws abgelöst, wobei diese ab 2031 wiederum allmählich von vollautomatisierten Pkws abgelöst werden. Ab 2039 treten fahrerlose Pkws in den Markt. In 2050 beträgt der Anteil an vollautomatisierten Pkws ca. 45 % und der Anteil an fahrerlosen Pkws ca. 9 %.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 27: Pkw Mittelklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1

Der gesamte prozentuale Anteil an Pkw-Oberklasse mit Automatisierungstechnologien steigt bis 2025 auf 80 % an und wächst von da an leicht bis 82 % in 2050. Allgemein ist ein relativ hoher Anteil an assistierten und vollautomatisierten Pkws und geringer Anteil an teil- und hochautomatisierten sowie fahrerlosen Fahrzeugen zu verzeichnen. Der Anteil assistierter Pkws steigt bis 2020 auf 64 % an und sinkt dann allmählich auf 4 % bis zum Jahr 2050 ab. Bereits seit 2015 ist ein sehr geringer Anteil von ca. 1 % an teilautomatisierten Pkws vorhanden, welcher bis 2026 auf 13 % ansteigt und dann auf 0 % in 2041 sinkt. In 2020 ist ein relativ kleiner Anteil an hochautomatisierten Pkws zu verzeichnen, welcher dann bis 2027 auf 9 % steigt und dann in 2040 auf 0 % sinkt. Vollautomatisierte Oberklasse-Pkws sind erstmals in 2026 vertreten und steigen dann relativ schnell auf einen Maximalwert von 42 % in 2044 an. Anfänglich mit einem sehr geringen Anteil wachsen fahrerlose Pkws ab 2035 bis 2050 stetig auf einen Wert von 21 % an.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 28: Pkw-Oberklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1

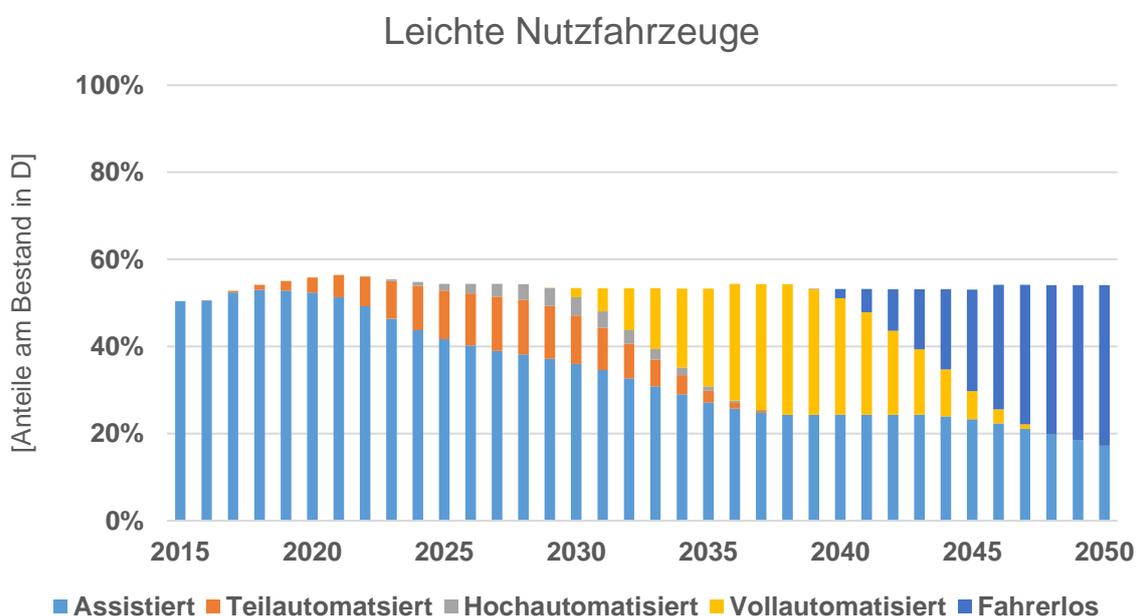
Vergleich der Pkw-Segmente

Im Vergleich der Pkw-Segmente Kleinwagen/Kompakt-, Mittel- und Oberklasse untereinander ist zu schlussfolgern, dass bei der Pkw-Kompaktklasse hauptsächlich assistierte Pkws dominieren. Teil- und hochautomatisierte sowie fahrerlose Pkws spielen eine weniger signifikante Rolle. Assistierte Pkws werden dann Ende der 2030er allmählich von vollautomatisierten Pkws abgelöst. Bei der Pkw-Mittelklasse sind bereits heute zahlreiche Fahrzeuge mit Assistenzsystemen ausgestattet. Diese werden Anfang der 2020er Jahre von teilautomatisierten Pkws und ab Anfang der 2030er von vollautomatisierten Pkws abgelöst. Im Vergleich zur Kleinwagen/Kompaktklasse sind bei der Mittelklasse in 2050 keine assistierten Pkws vorhanden, sondern mehrheitlich vollautomatisierte, und auch fahrerlose Pkws. Bei der Pkw-Oberklasse entwickeln sich die prozentualen Anteile ähnlich der Mittelklasse, mit dem Unterschied, dass die verschiedenen Stufen der Automatisierung früher erreicht werden. So dominieren zwar auch anfänglich assistierte Pkws, aber in 2015 sind bereits teilautomatisierte Pkws zu verzeichnen. Ab den 2020er Jahren kommen hochautomatisierte Pkws zum Vorschein und gegen Ende der 2020er Jahre bereits vollautomatisierte Pkws – ca. zwei Jahre früher als bei der Mittelklasse und ca. 10 Jahre früher als bei der Kompaktklasse. Auch sind schon ab 2035 fahrerlose Pkws zu verzeichnen – ca. 4 Jahre früher als bei der Mittelklasse und ca. 10 Jahre früher als bei der Kompaktklasse. Dies ist vor allem auf die höhere Mehrpreisbereitschaft in gehobenen Fahrzeugsegmenten zurück zu führen.

Nutzfahrzeuge

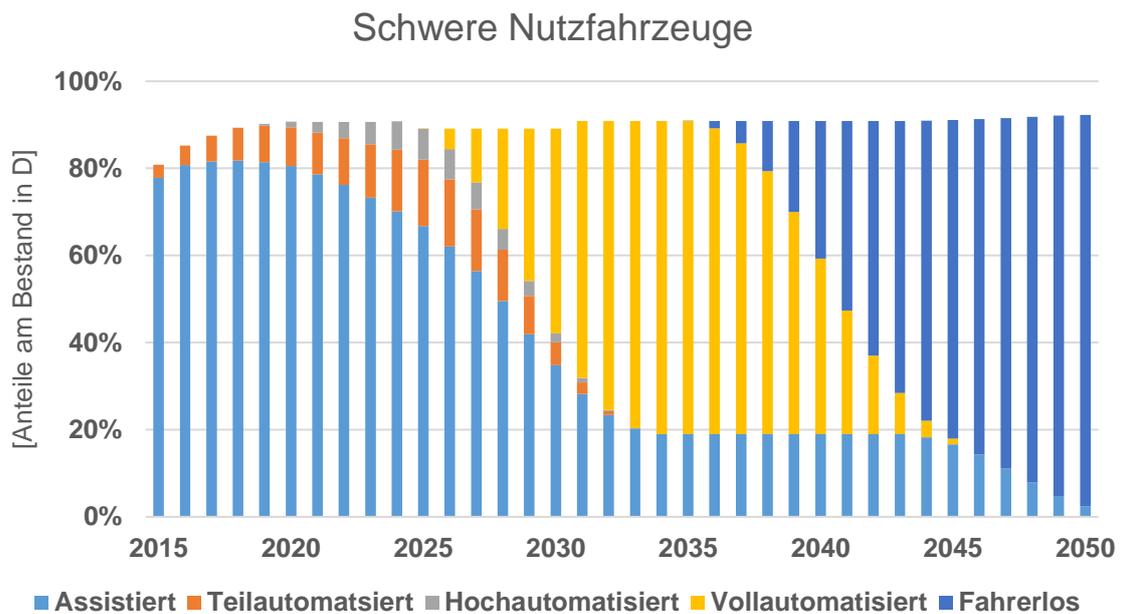
In den folgenden zwei Abbildungen sind die prozentualen Anteile, bezogen auf die verschiedenen Automatisierungsstufen (assistiert, teil-, hoch-, vollautomatisiert, fahrerlos) für die Lkw-Nutzfahrzeugsegmente leichte und schwere Nutzfahrzeuge von 2015 bis 2050 dargestellt.

Der gesamte prozentuale Anteil an Nutzfahrzeugen mit Automatisierungstechnologien steigt in beiden Segmenten zunächst leicht an und bleibt dann relativ konstant. Der konstante Anteil beträgt bei leichten Nutzfahrzeugen (LNF) ca. 54 % und bei schweren Nutzfahrzeugen (SNF) ca. 91 %. Bei anfänglich 50 % wächst der Anteil assistierter LNF zunächst leicht und sinkt dann allmählich auf 17 % in 2050. Bei assistierten SNF steigt der relative Anteil zunächst auf 82 %, sinkt dann von 2018 bis 2034 in konkaver Kurvenform auf 19 %, stagniert bis 2045 und sinkt dann auf ca. 2 % in 2050. Bei SNF setzen sich die Anteile an teil-, hoch- und vollautomatisierter sowie fahrerloser Nutzfahrzeuge ca. 4 Jahre früher am Markt durch als bei LNF. Auch nehmen die letzteren zwei Stufen anteilsmäßig eine signifikant größere Rolle bei SNF ein. Während bei LNF ab 2037 noch ungefähr die Hälfte assistierte Fahrzeuge und die andere Hälfte vollautomatisierte oder fahrerlose Fahrzeuge sind, sind bei SNF schon weniger als ein Drittel assistierte Fahrzeuge vorhanden. Der Anteil fahrerloser SNF beträgt in 2050 ca. 89 %.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 29: Leichte Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1



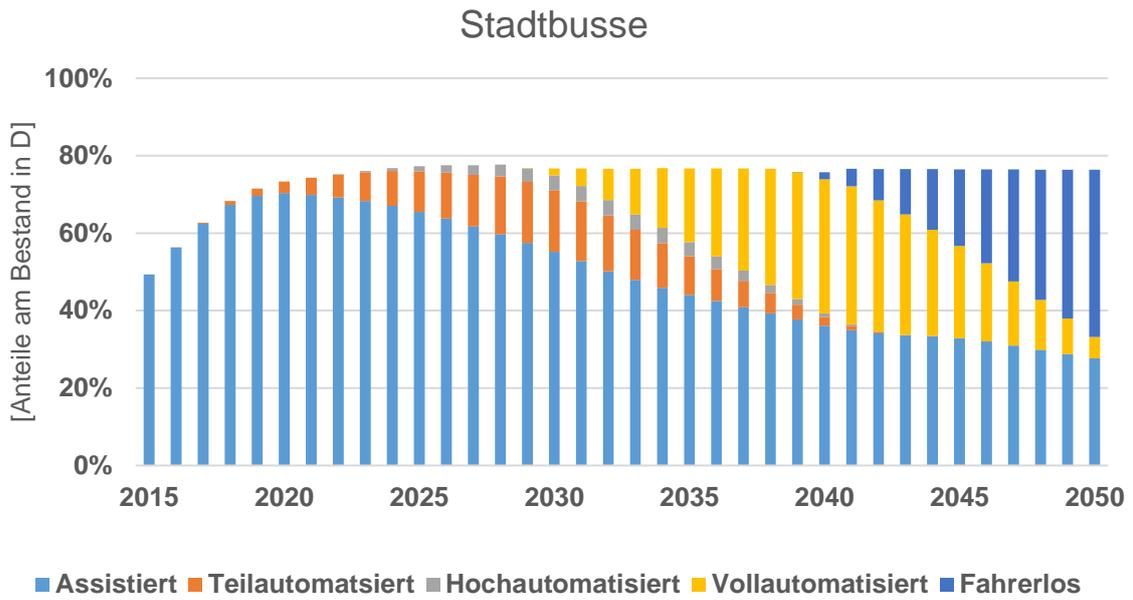
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 30: Schwere Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1

Busse

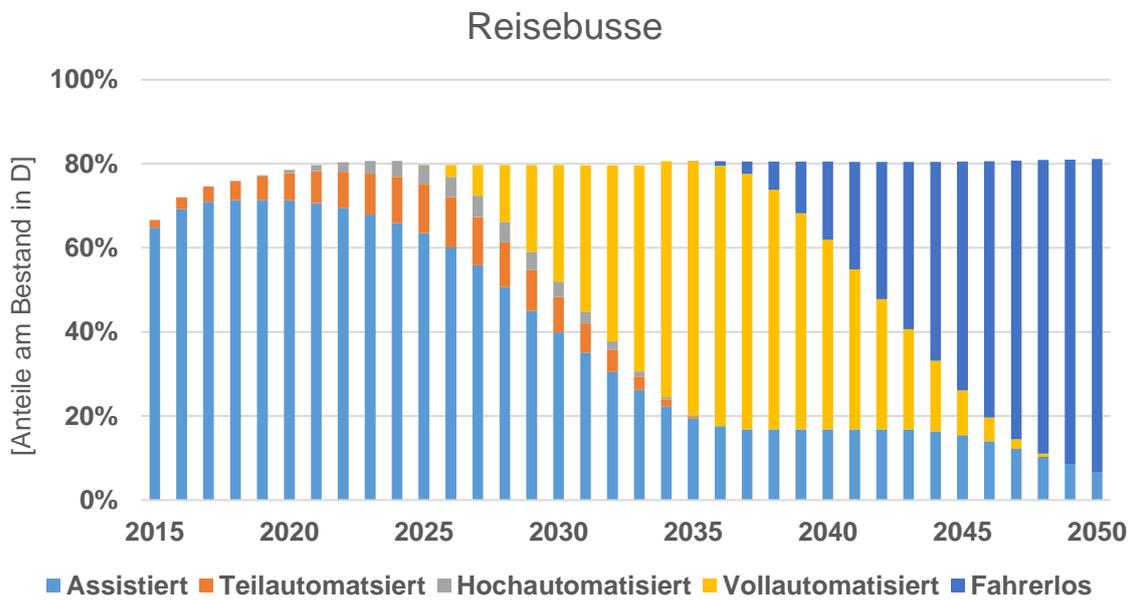
In den folgenden drei Abbildungen sind die prozentualen Anteile, bezogen auf die verschiedenen Automatisierungsstufen (assiiert, teil-, hoch-, vollautomatisiert, fahrerlos) für die Bussegmente Stadt-, Reise- und Kleinbus, von 2015 bis 2050 dargestellt.

Der gesamte prozentuale Anteil an Bussen mit Automatisierungstechnologien steigt in allen drei Segmenten zunächst an und stagniert dann mit ca. 77 % bei Stadtbussen, ca. 80 % bei Reisebussen und ca. 60 % bei Kleinbussen. In allen drei Segmenten sind assiierte Busse zunächst dominierend, wobei dies bei Kleinbussen relativ schnell abflacht und 2040 bereits 0 % beträgt. Ab 2040 dominieren hier vor allem vollautomatisierte Busse und zunehmend auch fahrerlose Busse. Im Vergleich zu Stadtbussen treten bei Reise- und Kleinbussen die Automatisierungstechnologien ca. 4 Jahre eher in den Markt ein. In 2050 beträgt der Anteil fahrerloser Reisebusse bereits 74 %.



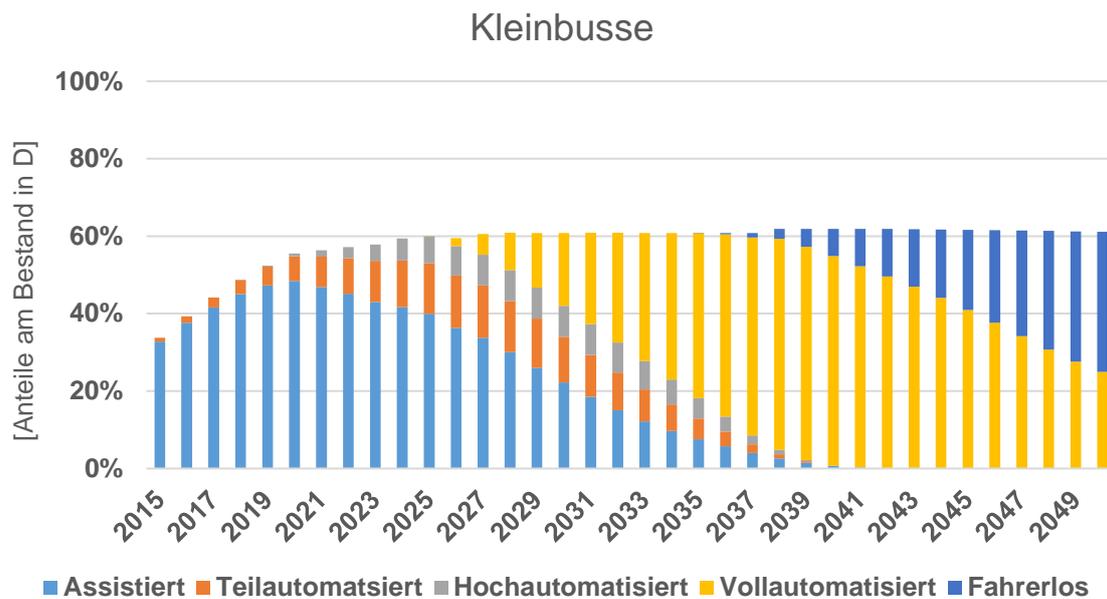
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 31: Stadtbusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 32: Reisebusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 1



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 33: Kleinbusse - Anteile der Automatisierungsstufen bis 2050

In der folgenden Tabelle 22 sind die Anteile der Fahrzeuge mit Automatisierung nach Automatisierungsstufe am Bestand für Pkw, Lkw und Bus dargestellt. Der große Anteil von Kleinwagen/Kompaktklasse am Bestand der Pkw in Deutschland zeigt sich besonders stark im vergleichbar geringen Anteil automatisierter Pkw bis 2050. Laut Diffusionsmodell sind in Szenario 1 nur ca. 36 % des Pkw-Bestandes in Deutschland mit Automatisierung ausgestattet. Die fehlende Mehrpreisbereitschaft bei vielen Kunden im Kleinwagen, aber auch im Segment der Mittelklasse ist dafür verantwortlich. Nur 6 % des Pkw-Bestandes wäre angesichts dieses Szenarios mit Stufe 5 und damit fahrerlos und vernetzt im Jahr 2050. Diese Entwicklung ist angesichts der angenommenen Markteinführung von Stufe 5 jedoch wenig überraschend. Es ist zu erwarten, dass die Diffusionskurve nach 2050 für fahrerlose Pkw steil nach oben geht, weil die Kosten bereits 2050 ein für einige Kunden vertretbares Niveau erreicht haben und eine weitere Kostendegression absehbar ist.

Der Markthochlauf bei Lkw sieht dagegen deutlich steiler aus als bei den Pkw. Die höhere Mehrpreisbereitschaft im Straßengüterverkehr und besonders bei schweren Nutzfahrzeugen spiegelt sich in den beschriebenen Zahlen in der folgenden Tabelle wider. Für Szenario 1 ergibt sich ein Anteil am Bestand für Stufe 5 in Höhe von 42 % im Jahr 2050. Bei Bussen, insbesondere bei Fernbussen, ist eine ähnlich steil verlaufende Markthochlaufkurve erkennbar. Im Jahr 2050 ergeben sich anhand der Simulation des Diffusionsmodells ca. 48 % Anteil an Bussen mit Funktionen der Automatisierungsstufe 5 am gesamten Busbestand in Deutschland.

Tabelle 22: Anteil automatisierter Fahrzeuge am Bestand in Szenario 1

Fahrzeug	AF Stufe	2020	2030	2040	2050
Pkw (Gesamt)	1	25%	24%	13%	2%
	2	1%	7%	1%	0%
	3	0%	1%	1%	0%
	4	0%	1%	18%	28%
	5	0%	0%	0%	6%
	Gesamt		27%	34%	35%
Lkw (Gesamt)	1	55%	36%	24%	16%
	2	4%	11%	0%	0%
	3	0%	4%	0%	0%
	4	0%	7%	28%	0%
	5	0%	0%	5%	42%
	Gesamt		59%	57%	57%
Busse (Ge- samt)	1	64%	43%	23%	15%
	2	5%	13%	1%	0%
	3	0%	5%	0%	0%
	4	0%	11%	41%	10%
	5	0%	0%	7%	48%
	Gesamt		70%	73%	73%

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

5.3.3 Szenario 2 - Welt der Mobilitätsdienstleistungen

Die folgende Tabelle 23 stellt die absoluten Fahrzeugbestände in Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw, Bus) und relative Anteile der Segmente für die Jahre 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050 dar. Pkws werden in Kleinwagen/Kompakt-, Mittel- und Oberklasse segmentiert, Lkws in schwere (SNF) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF), und Busse in Stadt-, Reise- und Kleinbus.

Pkw verzeichnen bis 2020 ein Wachstum von rund 3 Mio. Fahrzeugen auf rund 42 Mio. Fahrzeugen. Darauf folgt eine Abnahme der Bestände bis 2050 auf rund 31 Mio. Fahrzeuge durch die Zunahme an Car- und Ridesharingangeboten. Die Verteilung der Pkw-Fahrzeugsegmente ist unterschiedlich ausgeprägt. Die Kompaktklasse ist nahezu konstant, Mittelklassefahrzeuge verlieren leicht von 37 % auf 32 % in 2050. Vergleichsweise starke Ausschläge sind beim Anteil der Oberklassefahrzeuge zu verzeichnen, die von 4 % auf 10 % im Jahr 2030 steigen und anschließend bis 2050 auf 6 % fallen.

Bei dem Fahrzeugtyp Lkw entwickeln sich die Bestände insgesamt stark steigend zwischen 2010 und 2030 auf rund 5,2 Mio. Fahrzeuge (+27 %), wobei der Anteil LNF leicht zunimmt. Bis 2050 sinken die Bestände wiederum um rund 11 % gegenüber dem Höchststand.

Nennenswerte Veränderungen gibt es bei Bussen. Die Gesamtbestände steigen bis 2050 ggü. 2010 um rund 39 % auf ca. 107 Mio. Fahrzeuge. Bei diesem Fahrzeugtyp ist kein Rückgang nach 2030 zu verzeichnen wie bei Pkw und Lkw. Bezüglich der Verteilung der Segmente gibt es eine Verschiebung von Stadt- zu Kleinbussen, die von 49 % auf 34 % fallen bzw. von 28 % auf 45 % steigen von dem Anteil der Gesamtmenge Busse.

Tabelle 23: Absolute Fahrzeugbestände in Fahrzeugtypen und relative Anteile der Segmente in Szenario 2

Fahrzeugtypen und -segment		2010	2020	2030	2040	2050
Pkw Gesamt		39.342.784	42.134.507	39.666.112	35.408.611	31.280.340
davon	Klein/Kompakt	59%	58%	58%	59%	61%
	Mittelklasse	37%	34%	33%	33%	32%
	Oberklasse	4%	8%	10%	8%	6%
Lkw Gesamt		4.096.765	5.199.479	5.215.399	4.935.124	4.654.849
davon	SNF	13%	10%	10%	9%	9%
	LNF	87%	90%	90%	91%	91%
Busse Gesamt		76.463	81.479	92.423	99.491	106.558
davon	Stadtbus	49%	48%	43%	38%	34%
	Reisebus	23%	24%	23%	22%	22%
	Kleinbus	28%	29%	34%	40%	45%

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

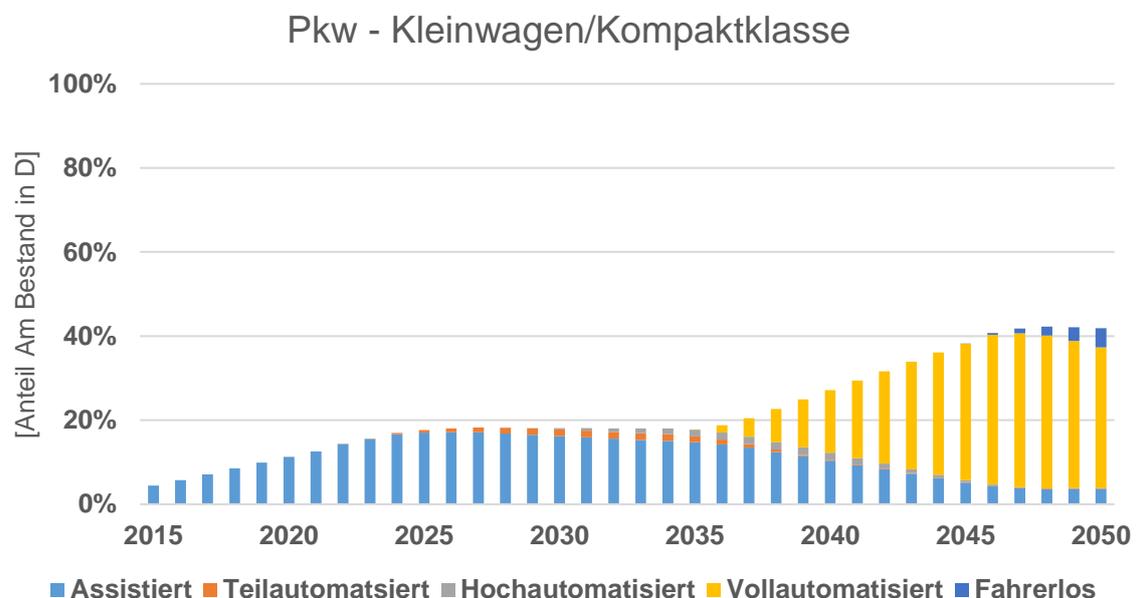
Automatisierungsgrade in Fahrzeugklassen

Nachfolgend wird die Marktdurchdringung von Automatisierungsstufen in verschiedenen Fahrzeugtypen und den dazugehörigen Fahrzeugsegmenten dargestellt und beschrieben.

Pkw

In den folgenden drei Abbildungen sind die prozentualen Anteile, bezogen auf die verschiedenen Automatisierungsstufen (assistiert, teil-, hoch-, vollautomatisiert, fahrerlos) für die Pkw-Segmente Kleinwagen/Kompakt-, Mittel- und Oberklasse, von 2015 bis 2050 für Szenario 2 – Welt der Mobilitätsdienstleistungen dargestellt. Die Anteile geben den Automatisierungsgrad am Gesamtbestand des jeweiligen Fahrzeugsegments wieder.

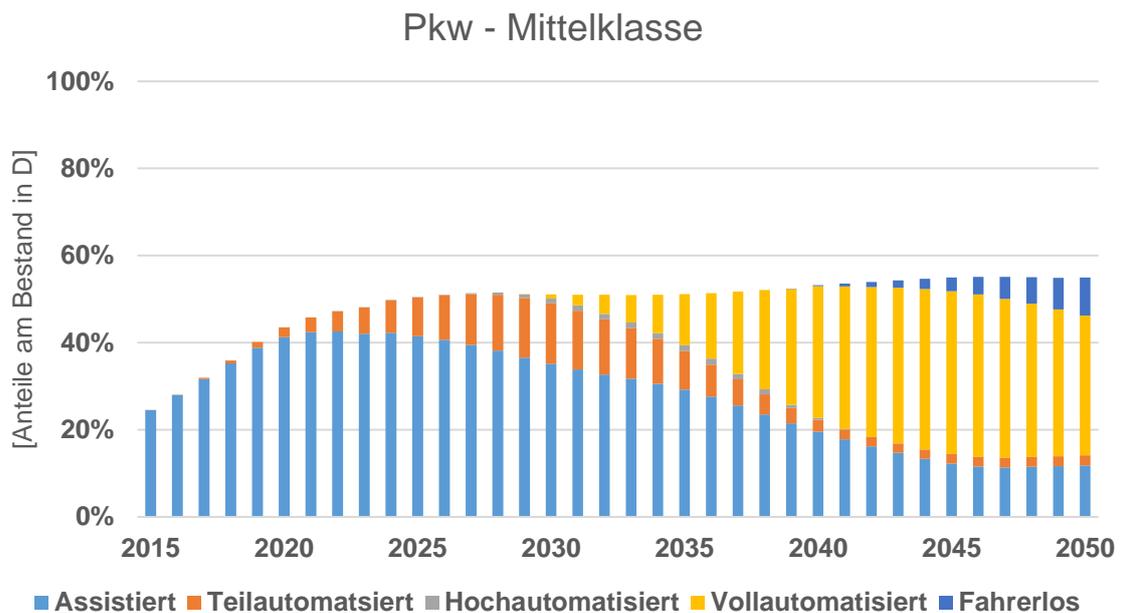
In der Pkw-Kompaktklasse ist der Grad der Automatisierung insgesamt weniger ausgeprägt als in anderen Pkw-Segmenten. Bis 2027 nimmt der Anteil mit einem leichten, aber stetigen Wachstum zu, insbesondere durch Zunahme von assistierten (Stufe 1) Fahrzeugen. Das Niveau stagniert bis 2035 mit leichten Gewinnen von Fahrzeugen, die dem Level teilautomatisiert und hochautomatisiert zuzurechnen sind. Beide Automatisierungsstufen (Stufe 2 und 3) erfahren jedoch bis 2050 keine nennenswerten Anteile. Mit Markteintritt vollautomatisierter Fahrzeuge (Stufe 4) 2035 gewinnen diese innerhalb von 10 Jahren einen Anteil von rund 37 % und haben damit einen hohen Anteil der Gesamtautomatisierung des Fahrzeugsegments der Kompaktklasse. Fahrerlose Fahrzeuge (Marktreife 2045) setzen sich bis zum Jahr 2050 nur leicht durch.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 34: Pkw-Kleinwagen/Kompaktklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

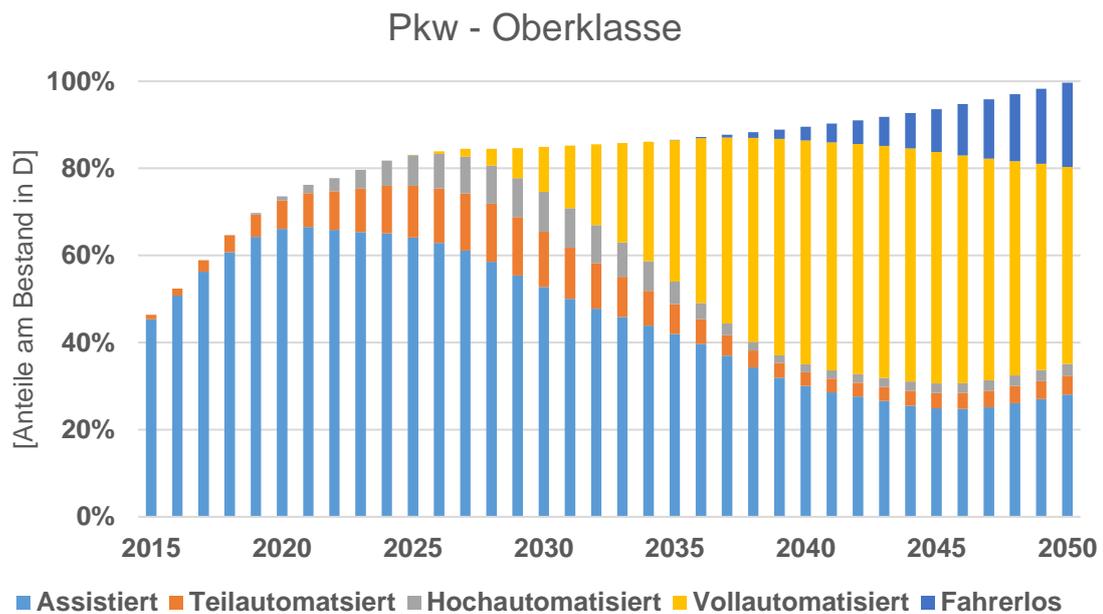
Im Fahrzeugsegment Pkw-Mittelklasse wird eine stärkere Marktdurchdringung prognostiziert als bei Kompaktfahrzeugen, indem alle Automatisierungsstufen deutlicher vertreten sind. Der Anteil aller Level wächst bis 2027 deutlich und stagniert bis 2050 auf einem Niveau um 50 % Gesamtanteil. Es wird prognostiziert, dass sich die Automatisierungslevel gegenseitig ablösen und damit eine Substitution vorangegangener Level stattfindet. Auffällig ist, dass hochautomatisierte Fahrzeuge (Stufe 3) keine nennenswerten Anteile erzielen. Dies liegt an den zum Zeitpunkt der Markteinführung noch verhältnismäßig hohen, prognostizierten Aufpreisen.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 35: Pkw-Mittelklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

Bei Oberklassefahrzeugen ist die Marktdurchdringung der verschiedenen Automatisierungslevel am Gesamtbestand über alle Fahrzeugsegmente am weitesten ausgeprägt. Die Automatisierung erreicht bis 2050 100 %, wobei assistierte Fahrzeuge (Stufe 1) einen großen Anteil am Wachstum bis 2022 haben und auch bis 2050 mit rund 28 % am Bestand vertreten sind. Die höheren Stufen 2-5 erreichen eine deutlichere Ausprägung als in anderen Pkw-Segmenten. Vollautomatisierte Fahrzeuge (Stufe 4) setzen sich aber auch hier nach Markteinführung 2025 stark durch.

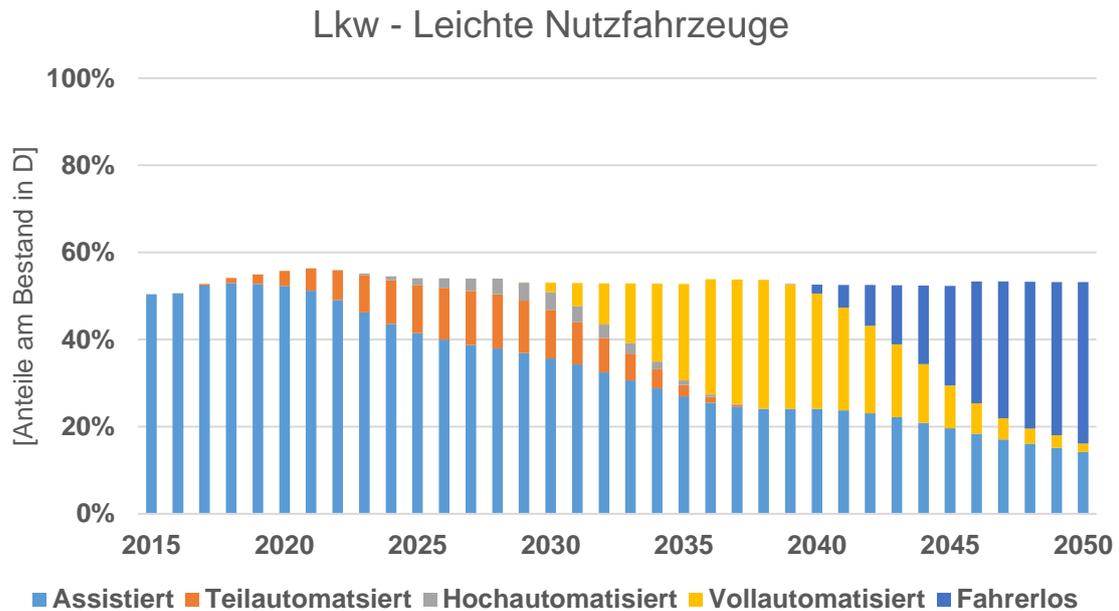


Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 36: Pkw-Oberklasse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

Lkw

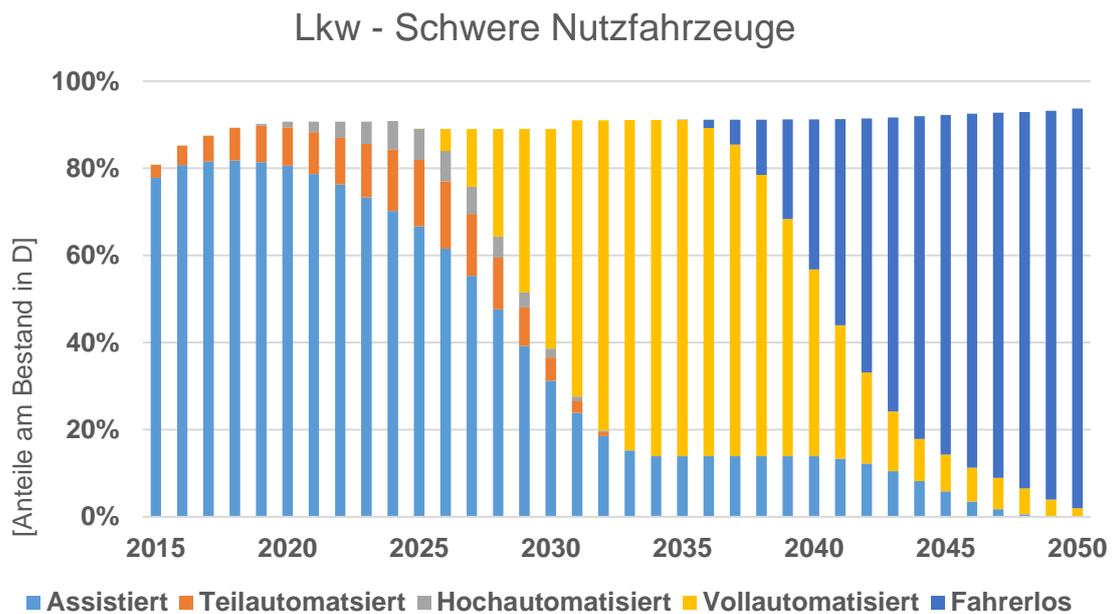
Bei den leichten Nutzfahrzeugen besteht bereits zu Beginn des Modellierungszeitraums eine hohe Marktdurchdringung von rund 50 % mit Assistenzsystemen am Gesamtbestand. Die Gesamtdurchdringung von automatisierten Fahrzeugen stagniert bis 2050 auf diesem Niveau, wobei nachfolgende Level sich nacheinander substituieren. Dies ist bestärkt durch kürzere Haltedauern des Fahrzeugbesitzes. Besonders ist, dass fahrerlose Fahrzeuge (Stufe 5) bereits kurz nach Einführung 2039 einen raschen Zugewinn verzeichnen und damit die vollautomatisierten Fahrzeuge (Stufe 4) ersetzen.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 37: Leichte Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

Schwere Nutzfahrzeuge sind bereits heute häufig mit Assistenzsystemen ausgestattet. Moderne Lkw verfügen beispielsweise über Spurhalteassistenten und Abstandswarner sowie automatische Bremssysteme. In der Prognose wird diese Tendenz beibehalten und verstärkt sich leicht bis auf 94 % im Jahr 2050. Wie auch bei Pkw setzen sich die Automatisierungsstufen 2 und 3 jedoch nie nennenswert durch, es ist jedoch eine wellenartige Substitution durch die Automatisierungsstufen vollautomatisiert und fahrerlos festzustellen. Dies ist insbesondere befördert durch die kurzen durchschnittlichen Fahrzeughaltedauern, die bei Nutzfahrzeugen bei rund 6 Jahren liegen. Dazu kommen die hohen Mehrpreisbereitschaften, welche die Durchdringung von hochtechnisierten Fahrzeugen fördern.



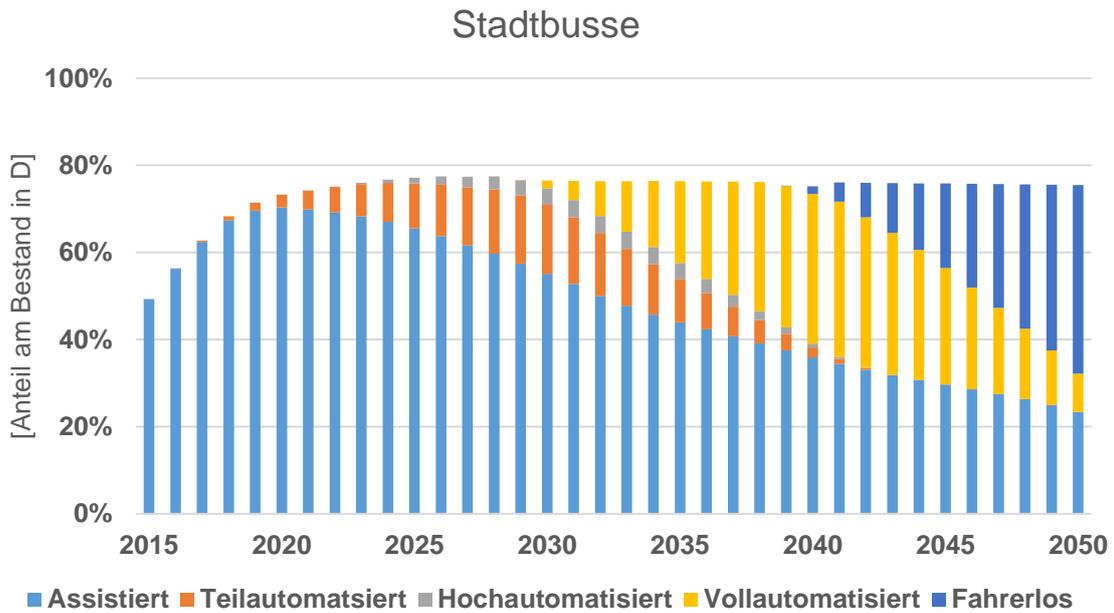
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 38: Schwere Nutzfahrzeuge - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

Busse

In den folgenden drei Abbildungen sind die prozentualen Anteile, bezogen auf die verschiedenen Automatisierungsstufen (assiiert, teil-, hoch-, vollautomatisiert, fahrerlos) für die Bussegmente Stadt-, Reise- und Kleinbus, von 2015 bis 2050 dargestellt. Bei den Segmenten der Busse ist eine sehr unterschiedliche Entwicklung der Durchdringungen von Automatisierungsstufen prognostiziert.

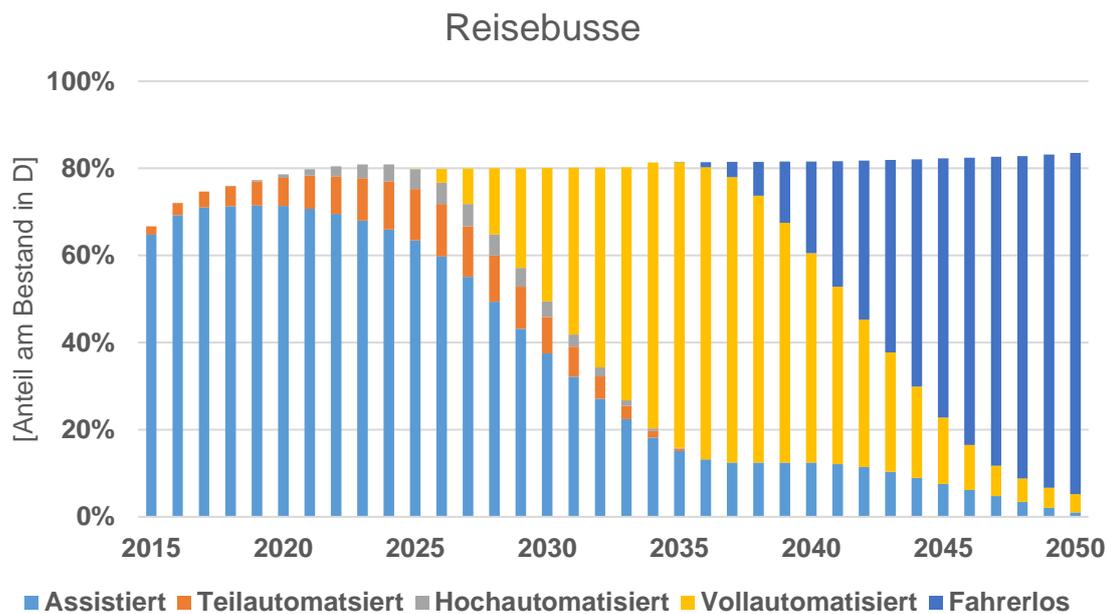
Bei Stadtbussen steigt die Durchdringung der Automatisierung bis ca. zum Jahr 2022 und stagniert von da an auf konstantem Niveau bei knapp unter 80 %. Ebenso wie bei Pkw und Lkw erreichen die Stufen 2 und 3 nur einen vergleichsweise kleinen Anteil, der dann ab 2029 von vollautomatisierten bzw. ab 2039 von fahrerlosen Fahrzeugen substituiert wird. Auffallend ist, dass mit rund 22 % im Jahr 2050 weiterhin ein vergleichsweise hoher Anteil assistierter Fahrzeuge im Bestand zu finden ist und wiederum mehr als 20 % gänzlich ohne Automatisierungstechnologien auskommt.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 39: Stadtbusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

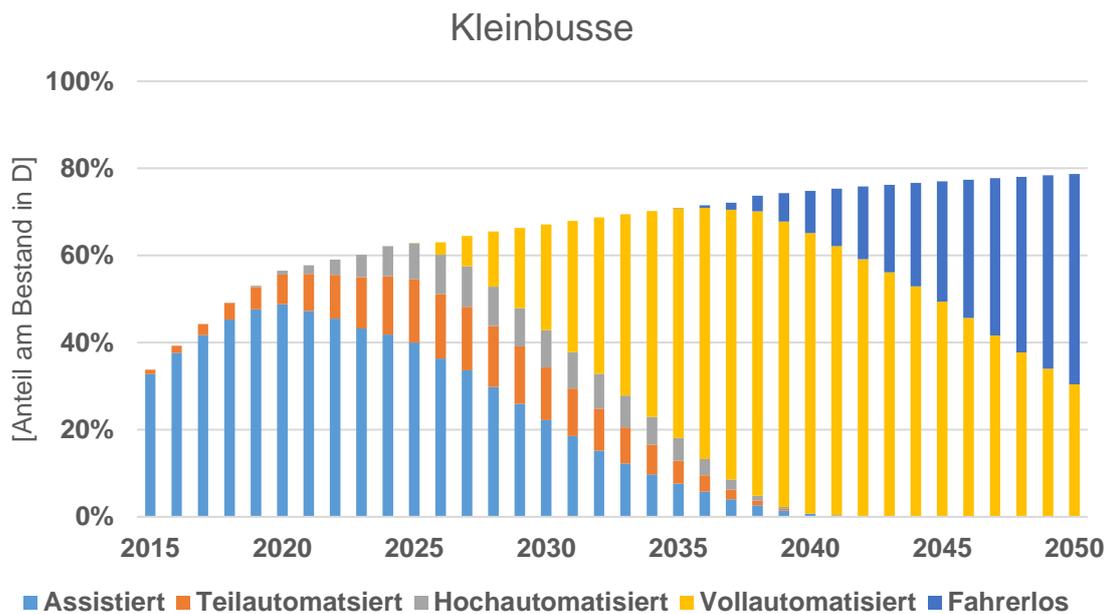
Bei Reisebussen erreicht die Marktdurchdringung aller Stufen ca. 2023 ein hohes Niveau und wächst von da an nur noch marginal. Deutlich ausgeprägter als bei Stadtbusen ist die Substitution höherer Automatisierungsstufen, insbesondere Stufe 4 und 5, die rasch einen hohen Marktanteil erlangen.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 40: Reisebusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

Bei Kleinbussen liegt der Anteil automatisierter Fahrzeuge gegenwärtig mit rund 35 % auf geringerem Niveau als bei Stadt- und Reisebussen. Die Prognose skizziert für die kommenden Jahre eine vergleichbare Durchdringung höherer Automatisierungsstufen wie bei den anderen Bussegmenten. Allerdings erreicht die Vollautomatisierung bereits sehr früh im Jahr 2040 einen hohen Anteil aller automatisierten Fahrzeuge, die in den darauffolgenden Jahren von Fahrzeugen der Stufe 5 abgelöst werden.



Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Abbildung 41: Kleinbusse - Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand bis 2050 in Szenario 2

Nachfolgend werden in Tabelle 24 die Anteile automatisierter Fahrzeugbestände am Bestand nach Fahrzeugen dargestellt. Im Vergleich zu Szenario 1 ergeben sich durch die zunehmenden Angebote von automatisiertem Car- und Ridesharing größere Anteile der Automatisierung bei Pkw. Bei Pkw steigt der Anteil der Automatisierung nun auf 50 % bis 2050. Mehr als 40 % aller Pkw in Deutschland wären nach diesem Szenario mindestens mit Stufe 4 und Stufe 5 im Jahr 2050 ausgestattet. Die Wirkungen bei Nutzfahrzeugen sind dagegen kleiner als bei den Pkws. Hier sind im Vergleich zu Szenario 1 2 % mehr Fahrzeuge mit Stufe 4 und 5 bis 2050 ausgestattet. Bei Bussen ist die Wirkung etwas deutlicher. Ca. 70 % aller Busse wären in diesem Szenario bis 2050 mindestens mit Stufe 4 ausgestattet.

Tabelle 24: Anteil automatisierter Fahrzeuge am Bestand in Szenario 2

Fahrzeug	AF Stufe	2020	2030	2040	2050
Pkw (Gesamt)	1	26%	26%	15%	8%
	2	1%	7%	1%	1%
	3	0%	1%	1%	0%
	4	0%	1%	23%	34%
	5	0%	0%	0%	7%
	Gesamt		27%	35%	41%
Lkw (Gesamt)	1	55%	35%	23%	13%
	2	4%	11%	0%	0%
	3	0%	4%	0%	0%
	4	0%	7%	28%	2%
	5	0%	0%	5%	42%
	Gesamt		59%	57%	56%
Busse (Gesamt)	1	64%	40%	17%	8%
	2	5%	13%	1%	0%
	3	0%	5%	0%	0%
	4	0%	16%	49%	17%
	5	0%	0%	9%	53%
	Gesamt		70%	74%	76%

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

5.3.4 Vergleich der Szenarien

Nachfolgend wird ein Vergleich der Szenarien „Welt des Fahrzeugbesitzes“ (Szenario 1) und „Welt der Mobilitätsdienstleistungen“ (Szenario 2) miteinander vorgenommen.

Hierbei werden die Veränderungen der Bestände und Neuzulassungen, sowie der Grad der Automatisierung in den verschiedenen Fahrzeugtypen und -segmenten miteinander verglichen.

Bestände

Bezogen auf die Gesamtfahrzeugbestände ist in beiden Szenarien bis zum Jahr 2030 ein anhaltendes Wachstum prognostiziert. Die Veränderung der Fahrzeugbestände nach Fahrzeugtypen in Szenarien ist in Tabelle 25 dargestellt. Das Wachstum im Szenario 1 ist mit 12 % auf rund 49 Mio. Fahrzeuge größer ausgeprägt als im Szenario 2 auf rund 45 Mio. Fahrzeuge. Hierbei spielt vor allem der Zuwachs bei Pkw eine entscheidende Rolle, der mit 10 % im Szenario 1 wesentlich höher ausfällt als in Szenario 2. Es ist jedoch zu beachten, dass bis 2020 die Entwicklung in beiden Szenarien nahezu gleich verläuft und bis zu diesem Zeitraum auch die Anzahl der Pkw stark ansteigt.

Der Gesamtfahrzeugbestand verändert sich in beiden Szenarien bis 2050 erheblich, wobei im Szenario 1 mit rund 8 % gegenüber 2010 ein Wachstum und im Szenario 2 mit einer Verringerung von rund 17 % eine starke Abnahme zu verzeichnen ist. Die Lkw-Bestände steigen in beiden Szenarien bis 2050 gegenüber 2010, wobei dieser im Szenario 2 mit 14 % weniger stark ausfällt als im Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes". Wesentliche Unterschiede gibt es bei den Szenarien bezüglich der Busbestände. Hier ist im Szenario 2 mit 39 % eine deutliche Zunahme der Bestände zu verzeichnen.

Tabelle 25: Veränderung der Fahrzeugbestände nach Fahrzeugtypen in Szenarien

	Fahrzeugtyp	2010	2020	2030	2040	2050
Szenario 1 (Fahrzeugbesitz)	Pkw	39.342.784	42.470.250	43.189.339	42.456.515	41.723.691
	% ggü. 2010	0%	8%	10%	8%	6%
	Lkw	4.096.765	5.216.030	5.359.080	5.223.462	5.087.843
	% ggü. 2010	0%	27%	31%	28%	24%
	Bus	76.463	80.694	84.611	82.749	80.886
	% ggü. 2010	0%	6%	11%	8%	6%
	Gesamt	43.516.012	47.766.975	48.633.030	47.762.725	46.892.420
	% ggü. 2010	0%	10%	12%	10%	8%
Szenario 2 (Mobilitätsdienstleistungen)	Pkw	39.342.784	42.134.507	39.666.112	35.408.611	31.280.340
	% ggü. 2010	0%	7%	1%	-10%	-20%
	Lkw	4.096.765	5.199.479	5.215.399	4.935.124	4.654.849
	% ggü. 2010	0%	27%	27%	20%	14%
	Bus	76.463	81.479	92.423	99.491	106.558
	% ggü. 2010	0%	7%	21%	30%	39%
	Gesamt	43.516.012	47.415.465	44.973.934	40.443.225	36.041.746
	% ggü. 2010	0%	9%	3%	-7%	-17%

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Bezüglich des Grads der Automatisierung in den Fahrzeugtypen und Fahrzeugsegmenten sind die Veränderungen in den Szenarien weniger stark ausgeprägt als in den Fahrzeugbeständen. In Tabelle 26 sind diese in Szenarien dargestellt. Hierunter fallen Fahrzeuge, die einer der Automatisierungsstufen 1 bis 5 zuzuordnen sind.

Vernetzte und automatisierte Fahrzeuge sind im Allgemeinen im Szenario 2 weiterverbreitet als im ersten. Der Grad liegt bei 38 % im Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes" bzw. bei 45 % im Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" in 2050.

Dass die Durchdringung der Automatisierung nicht höher liegt, ist auf die Annahme zurückzuführen, dass es in allen Fahrzeugsegmenten Käufergruppen gibt, die keine Mehrpreisbereitschaft für zusätzliche Technologien aufweisen. Dieser Effekt ist insbesondere in niedrigpreisigen Fahrzeugsegmenten (z. B. Pkw-Kompaktklasse) ausgeprägt, die wiederum einen hohen Anteil am Gesamtfahrzeugbestand haben. Höherpreisige Fahrzeugsegmente (z. B.

Pkw-Oberklasse), in denen der Automatisierungsgrad bis 2050 sehr hoch ist, haben jedoch nur einen kleinen Anteil am Gesamtfahrzeugbestand (vgl. Tabelle 21 und Tabelle 23).

Auffällig ist, dass der Automatisierungsgrad bei Lkw in beiden Szenarien nahezu stagniert bzw. sogar ein leichter Rückgang zu verzeichnen ist. Dies liegt jedoch hauptsächlich am Übergang in höhere Automatisierungsstufen und daran, dass LNF deutlich höhere Bestandszahlen haben, als SNF. Die Mehrpreisbereitschaften sind jedoch bei LNF deutlich geringer als bei SNF. Dies ist auch bei Bussen im Szenario 1 zu verzeichnen, während im Szenario 2 die Automatisierung leicht zunimmt. Beim Fahrzeugtyp Pkw sind im Szenarienvergleich die größten Unterschiede zu verzeichnen, wobei zu berücksichtigen ist, dass im Szenario 2 der Pkw-Bestand stark rückläufig ist.

Tabelle 26: Anteil der Automatisierung nach Fahrzeugtyp pro Szenario

Fahrzeugtyp		2020	2030	2040	2050
Szenario 1 (Fahrzeugbesitz)	Pkw	27%	34%	35%	36%
	Lkw	59%	57%	57%	58%
	Bus	70%	73%	73%	73%
	Gesamt	30%	37%	37%	38%
Szenario 2 (Mobilitätsd.)	Pkw	27%	35%	41%	50%
	Lkw	59%	57%	56%	57%
	Bus	70%	74%	76%	79%
	Gesamt	33%	36%	38%	45%

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

Nachfolgend sind in Tabelle 27 die Fahrzeugbestände mit Automatisierungstechnologien nach Fahrzeugtypen und Automatisierungsstufen in Szenarien dargestellt. Hier ist für alle Fahrzeugtypen in beiden Szenarien ein Wandel von den Stufen 1-3 zu den Stufen 4-5 prognostiziert. Dieser Wandel ist bei Lkw und Bussen stärker ausgeprägt als bei Pkw.

Tabelle 27: Fahrzeugbestände mit Automatisierungstechnologien nach Fahrzeugtypen und Automatisierungsstufen pro Szenario

	Fahrzeugtypen		2020	2030	2040	2050
Szenario 1 (Fahrzeugbesitz)	Pkw	Stufe 1-3	11.279.555	14.169.332	6.708.758	1.007.943
		Stufe 4-5	0	636.559	7.972.107	14.018.751
	Lkw	Stufe 1-3	3.103.183	2.698.575	1.241.914	799.360
		Stufe 4-5	0	357.133	1.737.771	2.150.339
	Bus	Stufe 1-3	56.114	50.849	18.971	11.976
		Stufe 4-5	0	10.740	41.288	47.135
Szenario 2 (Mobilitätsd.)	Pkw	Stufe 1-3	11.430.716	13.502.157	6.214.104	2.872.553
		Stufe 4-5	0	518.785	8.225.846	12.711.317
	Lkw	Stufe 1-3	3.088.543	2.594.129	1.141.403	601.787
		Stufe 4-5	0	353.686	1.634.522	2.045.168
	Bus	Stufe 1-3	56.808	53.683	17.831	8.664
		Stufe 4-5	0	14.810	58.255	75.173

Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML

6 Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Treibhausgase und den Endenergieverbrauch

Der Sektor Verkehr trägt zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele bis 2050 eine große Verantwortung. Laut Kabinettsbeschluss zum Klimaschutzplan 2050 vom November 2016 soll das "Verkehrssystem in Deutschland"..."im Jahr 2050 nahezu unabhängig von Kraftstoffen mit fossilem Kohlenstoff („dekarbonisiert“) und somit weitgehend treibhausgasneutral sein" (BMUB, 2016). Die dafür formulierten Zwischenziele bis zum Jahr 2030 sind ebenfalls ambitioniert. Das Ziel der Reduktion der THG-Emissionen des Verkehrssektors um - 40 % bis - 42 % bis zum Jahr 2030 bedeutet eine Verringerung der THG-Emissionen um 66 bis 69 Mt. CO_{2äq.} von 2015 bis 2030. Im folgenden Kapitel soll gezeigt werden, ob und wie groß ein möglicher Beitrag des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr zur Erreichung dieser Ziele sein kann.

Die Berechnung der Gesamtwirkungen basiert dabei auf den in dieser Studie bis Kapitel 5 beschriebenen Vorarbeiten. Da der Fokus der Studie auf der Technikfolgenabschätzung des Systems "automatisiertes und vernetztes Fahren" liegt und keine Potenzialanalyse von zukünftigen, automatisierten und geteilten Mobilitätskonzepten innerhalb dieser Studie gemacht wurde, wurden zwei Szenarien definiert, um die Auswirkungen dieses Systemwandels auf die Ergebnisse aufzuzeigen. Dazu wurden die beiden Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" (Szenario 1) und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" (Szenario 2) in Kapitel 4 qualitativ formuliert und beschrieben. Die qualitativen Annahmen aus den beiden Szenarien flossen dabei bereits in die quantitative Abschätzung des Markthochlaufs für automatisierte Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 ein (siehe Kapitel 5). Daraus resultierend ergab sich jeweils ein Markthochlauf pro Szenario. Anhand der Anteile der Fahrzeuge mit bestimmten Automatisierungsstufen am gesamten Bestand kann nun die Auswirkung auf THG-Emissionen, gemessen in CO_{2äq.}, und den EEV berechnet werden.

Zu Beginn der Studie wurde der Potenzialbegriff im Hinblick auf den EEV und die THG-Emissionen eingeführt. Für dieses Kapitel ist eine Präzisierung des Begriffs nötig, um Effekte, die unmittelbar durch die Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen entstehen, von den mittelbaren Effekten zu trennen.

Das **primäre Potenzial bzw. primäre Effekte** entstehen unter der Ceteris-paribus-Klausel: es wird die Wirkung der Technologie auf Fahrzeugebene untersucht, wenn diese in einem Teil der Fahrzeugflotte verbaut und eingesetzt wird. Übrige Rahmenbedingungen (siehe sekundäres Potenzial) bleiben konstant. Beispiele für Effekte, die zu einem primären Potenzial führen, sind:

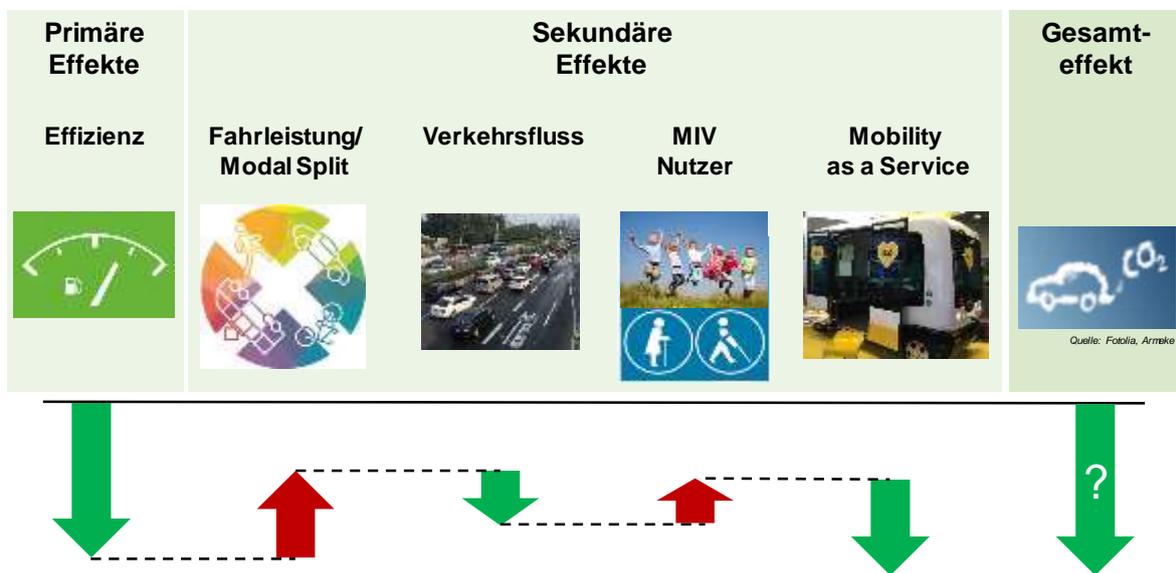
- Harmonisierte Geschwindigkeitsprofile,
- Optimierte Motoransteuerung,
- Reduzierter Luftwiderstand,
- Berücksichtigung der Topografie.

Das **sekundäre Potenzial bzw. sekundäre Effekte** entstehen, wenn keine Ceteris-pari-bus-Klausel vorausgesetzt wird: alle Rahmenbedingungen, die einen Einfluss auf die Wirkung der Technologie auf Netzwerkebene haben, sind veränderlich. Beispiele für Effekte, die zu einem sekundären Potenzial führen, sind:

- Veränderungen der Fahrleistungen des Verkehrsmittels und damit dem Modal Split,
- Veränderungen in den Anteilen der Verkehrsdichten bzw. des Verkehrsflusses,
- Veränderungen der Fahrleistungen durch neue Nutzergruppen und
- Veränderungen durch neue, automatisierte und geteilte Mobilitätskonzepte.

In der Politikanalyse werden die sekundären Effekte auch als Rebound-Effekte bezeichnet, die den ursprünglichen Zielsetzungen einer Maßnahme zuwiderlaufen und damit oft die mit der Maßnahme verbundenen Wirkungen reduzieren (vgl. de Haan et al., 2015, S. 18).

Die Zusammensetzung der Gesamtwirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens ist in Abbildung 42 dargestellt. Um für das automatisierte und vernetzte Fahren im Straßenverkehr die Gesamtwirkung zu berechnen, wurde diese Vorgehensweise gewählt: zuerst werden in einer isolierten Betrachtung für jede Automatisierungsstufe in Abhängigkeit von relevanten Parametern relative primäre Potenziale ermittelt. Die Ergebnisse dieser Abschätzung zeigen die isolierte Wirkung der verbesserten Energieeffizienz automatisierter Fahrzeuge. In Kombination mit dem szenariospezifischen Markthochlauf ergibt sich ein isoliertes, absolutes, primäres Potenzial.



Quelle: Fraunhofer ISI, Bilder: Fotolia, eigene Bilder

Abbildung 42: Dekomposition der THG-Wirkung nach primären und sekundären Effekten

Im nächsten Schritt werden die verkehrlichen Wirkungen und damit die sekundären Potenziale modellbasiert berechnet. Die ermittelten primären Potenziale dienen dafür als Einflussvariable, da die verbesserte Energieeffizienz automatisierter Fahrzeuge zusammen mit

den in Kapitel 4.2 beschriebenen verkehrlichen Wirkungen das Verkehrssystem beeinflussen.

Abschließend werden die Gesamtwirkungen auf THG-Emissionen und den EEV für die beiden Szenarien beschrieben. Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen werden dabei mit dem Referenzszenario (REF) verglichen und jeweils das Delta im Vergleich zur REF zum jeweiligen Zeitpunkt angegeben.

6.1 Primäre Potenziale - Energieeffizienz automatisierter und vernetzter Fahrzeuge

Der erste Schritt für die Bottom-up-Analyse ist die Ermittlung der primären Potenziale pro (Fahrerassistenz-) Technologie. Dieser Ansatz wurde gewählt, weil es in der Fachliteratur nur in einzelnen Forschungsprojekten wie Adaptive reale Feldtests für Fahrzeuge bis maximale Automatisierungsstufe 3 gibt. Die Auswertungen dieser Feldtests wurden bei der Abschätzung der primären Potenziale berücksichtigt, liefern jedoch keine ausreichenden quantitativen Abschätzungen der primären Potenziale von Fahrzeugen mit höheren Automatisierungsstufen. Die Analyse der Fachliteratur hat jedoch gezeigt, dass die Abschätzung der Potenziale auf Ebene der Technologien möglich ist. Anhand der in Kapitel 2.1 beschriebenen Zuordnung der Technologien zu den Automatisierungsstufen werden diese dann auf das Aggregationslevel der Automatisierungsstufen gebracht.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst untersucht, nach welchen Merkmalen das Potenzial differenziert werden muss, bevor dieses in den folgenden Abschnitten für jede Technologie ermittelt wird.

6.1.1 Abhängigkeit der Potenziale von Verkehrssituationen

Ein Kriterium für die Zuordnung einer Technologie zu einer Automatisierungsstufe ist der Umfang der so genannten (Intended) "Operational Design Domain" (IODD bzw. ODD) der Technologie. Dabei bestehen Unterschiede zwischen den meisten IODD und ODD: teilweise sind die Technologien universell einsetzbar, oft aber auf bestimmte Straßentypen und Verkehrsdichten beschränkt. Für eine Bottom-up-Ermittlung der primären Potenziale ist eine systematische Differenzierung der Verkehrssituationen nötig, die als Gesamtheit die IODD bzw. ODD (siehe 1.3.1) für eine Technologie ergeben. Folgende Anforderungen werden an die zu unterscheidenden Verkehrssituationen gestellt:

- Für jede Technologie kann klar abgegrenzt werden, ob sie in dieser Verkehrssituation einsetzbar ist.
- Die Potenziale einer Technologie unterscheiden sich signifikant zwischen den Verkehrssituationen, in denen sie einsetzbar ist.
- Für alle Verkehrssituationen lassen sich aus HBEFA 3.3 die Kraftstoffverbrauchsfaktoren ermitteln, um die Wirkungen auf den EEV zu quantifizieren.

- Für die in Kapitel 6.1.3 stattfindende Aggregation der Potenziale ist der Anteil der Verkehrssituation, gemessen an der Fahrleistung, für alle Fahrzeugsegmente aus Kapitel 4 bekannt.
- Die ermittelten Potenziale lassen sich mit einem Flottendiffusionsmodell verknüpfen, welches die Durchdringung der Fahrzeugflotte mit einer Automatisierungsstufe (bzw. Technologie) zu bestimmten Zeitpunkten erfasst (Penetrationsrate der Technologie).
- Da der Pkw-, Bus- und Lkw-Verkehr betrachtet wird, muss zwischen diesen Fahrzeugtypen unterschieden werden.

Der Abgleich zwischen den möglichen Merkmalen gemäß SAE International (2016, S. 12), Marinik et al. (2014, S. 27–28) und der National Highway Traffic Safety Administration (2016, S. 27) und den festgelegten Kriterien ergibt, dass die Potenziale der Technologien nach den folgenden Merkmalen differenziert werden müssen:

- Fahrzeugtyp: Pkw, Lkw und Bus,
- Straßenkategorie: Bundesautobahn, Landstraße, Innerortsstraße
- Verkehrsdichte: Flüssig (frei und stetig fließender Verkehr mit konstanter, eher hoher Geschwindigkeit; 90 bis > 130 km/h auf Autobahnen, 45 – 60 km/h auf Straßen mit Tempolimit von 50 km/h), Dicht/Gesättigt (unstetiger bis gesättigter Verkehrsfluss mit starken Geschwindigkeitsschwankungen, Zwischenstopps sind möglich; 30 – 90 km/h auf Autobahnen, 15 – 45 km/h auf Straßen mit Tempolimit von 50 km/h) und Stop+Go (starke Stauerscheinungen bis zum Verkehrszusammenbruch, Geschwindigkeitsschwankungen bei allgemein niedriger Geschwindigkeit; 5 – 30 km/h auf Autobahnen, 5 – 15 km/h auf Straßen mit Tempolimit von 50 km/h),
- Penetrationsrate: Low (Fahrzeugflottenanteil, der mit dieser Technologie ausgestattet ist, liegt zwischen 0 % und 33 %), Medium (Fahrzeugflottenanteil, der mit dieser Technologie ausgestattet ist, liegt zwischen 34 % und 66 %) und High (Fahrzeugflottenanteil, der mit dieser Technologie ausgestattet ist, liegt zwischen 67 % und 100 %).

Die Definitionen zur Verkehrsdichte orientieren sich an HBEFA 3.2 (vgl. Keller und Würthrich, 2014, S. 12), wobei die beiden mittleren Verkehrsdichten *Dicht* und *Gesättigt* zusammengefasst wurden. Zur Vereinfachung wird keine stetige Abhängigkeit des Reduktionspotenzials von der Penetrationsrate unterstellt, sondern eine Differenzierung des Potenzials für drei Intervalle (Low, Medium, High) vorgenommen.

Ferner wird für die Ermittlung der primären Potenziale davon ausgegangen, dass eine Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Technologie gleichbedeutend mit der Nutzung der Technologie ist, also keine Nutzungsrate definiert werden muss. Eine Differenzierung der Verkehrssituationen nach weiteren Merkmalen wie einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf Streckenabschnitten wird nicht vollzogen, da hierfür aus den analysierten Studien keine differenzierten Potenziale entnommen werden können, sodass Expertenschätzungen im

Projektkonsortium nötig wären. Der Einfluss von nicht sichtbaren Fahrstreifenmarkierungen und des Wetters auf die Einsetzbarkeit der Technologie kann nicht abgebildet werden, da hierfür weder aus HBEFA 3.3 noch anderen Verkehrsmodellen (bspw. PTV Validate) Fahrleistungsanteile entnommen werden können. Es wird zudem aufgrund absehbarer Soft- und Hardwareverbesserungen erwartet, dass deren Einfluss auf die Einsetzbarkeit der Technologien zurückgeht. Damit müssen für drei Fahrzeugtypen jeweils die Potenziale von 19 Technologien in neun Verkehrssituationen in Abhängigkeit von drei Penetrationsraten ermittelt werden. Dies geschieht im folgenden Abschnitt.

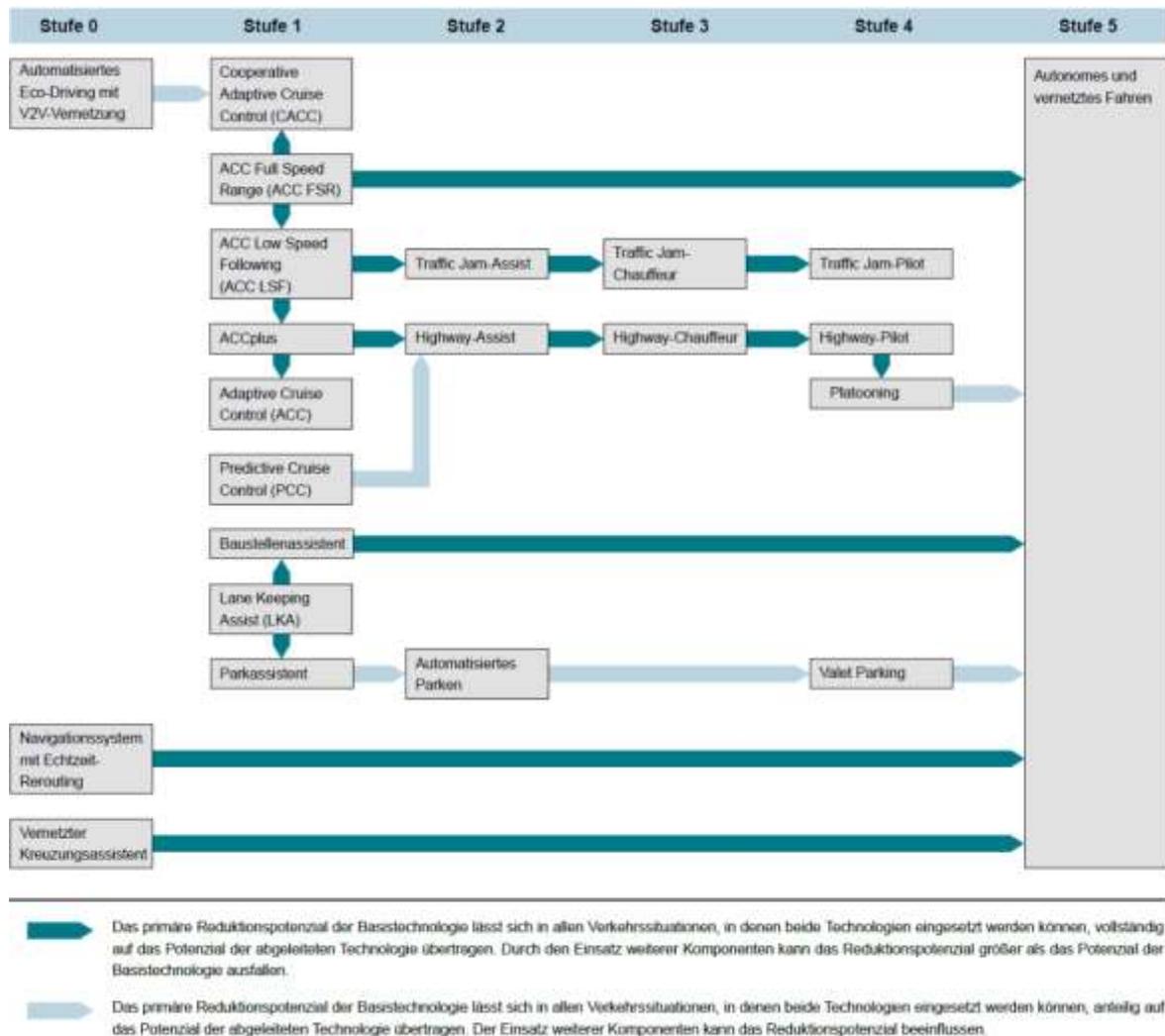
6.1.2 Primäre Potenziale pro Technologie

Für die in Abschnitt 2.1.1 identifizierten (Fahrerassistenz-) Technologien werden in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp, den Verkehrssituationen und Penetrationsraten primäre Potenziale ermittelt. Für die Technologie der Automatisierungsstufe 5 – das fahrerlose und vernetzte Fahren – wird in diesem Abschnitt kein Potenzial angegeben, da in der analysierten Literatur nur Abschätzungen existieren und es im Rahmen dieser Studie erstmals Bottom-up ermittelt wird.

Vererbung primärer Potenziale

Ähnlich zur evolutionären Weiterentwicklung der Technologien verhält sich die Vererbung der primären Reduktionspotenziale. Bei einer direkten Vererbung lässt sich das primäre Reduktionspotenzial der Basistechnologie in allen Verkehrssituationen, in denen beide Technologien eingesetzt werden können, vollständig auf das Potenzial der abgeleiteten Technologie übertragen. Durch den Einsatz weiterer Komponenten kann das Reduktionspotenzial größer als das der Basistechnologie ausfallen. Bei einer indirekten Vererbung kann das Reduktionspotenzial der Basistechnologie anteilig auf das Potenzial der abgeleiteten Technologie übertragen. Der Einsatz weiterer Komponenten kann das Reduktionspotenzial beeinflussen. Nachfolgende Abbildung 43 stellt die in dieser Studie berücksichtigende Vererbung der Technologien schematisch dar.

An dieser Stelle soll am Beispiel der Technologie Adaptive Cruise Control (ACC) gezeigt werden, wie im ersten Schritt die primären Potenziale für die 19 identifizierten Technologien ermittelt wurden. Die Beschreibung der primären Potenziale der restlichen relevanten Technologien befinden sich im Anhang in Kapitel 8.3.



Quelle: Fraunhofer ISI/Fraunhofer IML

Abbildung 43: Vererbung der Reduktionspotenziale

Primäre Potenziale des Adaptive Cruise Control (ACC)

Zur Ermittlung der Reduktionspotenziale des ACC kann auf die Ergebnisse des EU-geförderten Feldversuchs euroFOT (siehe Alessandretti et al., 2012) zurückgegriffen werden, in welchem knapp 1.000 Pkw und Lkw mit ADAS ausgerüstet wurden und auf etwa 32 Mio. km Daten u. a. zum EEV sammelten (siehe Benmimoun et al., 2012, S. 55–56 und S. 60). Die aus den folgenden Tabellen zu erkennende Tendenz des degressiv zunehmenden Reduktionspotenzials bei steigender Penetrationsrate wurde per Simulation von Ioannou (2003, S. 17–18) bestimmt und von Benmimoun et al. (2012, S. 31–32) bestätigt. Da die Ergebnisse von Ioannou allerdings schon bei geringer Penetration deutlich größer als die des Feldversuchs ausfallen, wird das angegebene Potenzial bei geringer Penetration auf den entsprechenden Wert des euroFOT-Feldversuchs normiert.

Da aus keiner der beiden Quellen Reduktionspotenziale bei Stop+Go-Verkehr hervorgehen, wurde unter Berücksichtigung der Studie von Baum und Grawenhoff (2006, S. 61) sowie der bekannten Werte die Parameter einer Exponentialfunktion geschätzt und während des MKS-Fachworkshops mit dem euroFOT-Projektleiter validiert. Insgesamt beeinflussen die Potenziale im Stop+Go-Verkehr das Potenzial der Technologie nur geringfügig, da der Fahrleistungsanteil für Pkw und Lkw im Stop+Go-Verkehr klein ausfällt.

Der ACC bildet gemäß Abbildung 43 eine zentrale Technologie, aus der für viele der anderen Technologien die Reduktionspotenziale abgeleitet werden. In den folgenden Tabellen ist für den Pkw (siehe Tabelle 28) und Lkw bzw. Bussen (siehe Tabelle 29) zu erkennen, dass das Reduktionspotenzial auf allen Straßentypen mit der Verkehrsdichte zunimmt und im Innerortsbereich am größten ausfällt – schon bei geringer Penetration ist hier eine EEV-Reduktion von über 20 % möglich. Der ACC sorgt insbesondere bei hoher Verkehrsdichte für eine Verbesserung des Verkehrsflusses, indem das Fahrprofil des eigenen Fahrzeugs an das der vorausfahrenden Fahrzeuge angepasst wird. Dadurch werden unnötige Beschleunigungs- und Verzögerungszyklen vermieden und der Motor in einem Betriebspunkt mit besserem Kraftstoffverbrauchsfaktor betrieben. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Penetrationsrate noch, da weniger manuell längsgeführte Fahrzeuge in dem Streckenabschnitt verbleiben und damit weniger Fahrzeuge ineffizient fahren.

Tabelle 28: Primäre Potenziale des ACC für Pkw

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw	Autobahn	Flüssig	2%	3%	3%
		Dicht/Gesättigt	3%	5%	5%
		Stop+Go	6%	10%	10%
	Landstraße	Flüssig	2%	3%	3%
		Dicht/Gesättigt	3%	4%	5%
		Stop+Go	6%	9%	11%
	Innerortsstraße	Flüssig	7%	10%	12%
		Dicht/Gesättigt	9%	15%	17%
		Stop+Go	21%	34%	38%

Quelle: Fraunhofer ISI/Fraunhofer IML

Auch bei einer geringen Verkehrsdichte ist auf allen Straßentypen ein Reduktionspotenzial zwischen 2 % und 12 % feststellbar, da der ACC analog zur Stausituation für eine Harmonisierung der Geschwindigkeitsprofile sorgt und laut den Ergebnissen des Feldversuchs von Benmimoun et al. (2012, S. 31–32) zu einer Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit beiträgt.

Tabelle 29: Primäre Potenziale des ACC für Lkw und Busse

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Lkw, Busse	Autobahn	Flüssig	1%	2%	2%
		Dicht/Gesättigt	2%	3%	3%
		Stop+Go	4%	7%	7%
	Landstraße	Flüssig	1%	2%	2%
		Dicht/Gesättigt	2%	3%	3%
		Stop+Go	4%	6%	8%
	Innerortsstraße	Flüssig	4%	7%	8%
		Dicht/Gesättigt	6%	10%	11%
		Stop+Go	14%	23%	25%

Quelle: Fraunhofer ISI/Fraunhofer IML

6.1.3 Berechnung primärer Potenziale pro Automatisierungsstufe

Im vorigen Kapitel wurde am Beispiel der Technologie Adaptive Cruise Control (ACC) gezeigt, wie die primären Potenziale auf Basis der Technologien ermittelt wurden. Kapitel 8.3 im Anhang dieser Studie zeigt die vollständige Evaluation der primären Potenziale aller relevanter Technologien. Der nächste Schritt bei der Berechnung der Wirkungen der gesamten primären Effekte besteht in der Aggregation der einzelnen primären Potenziale pro Fahrzeugtyp auf die Ebene der fünf Automatisierungsstufen. Die Zuordnung der Technologien zu Automatisierungsstufen zeigt Kapitel 2.1. Anhand der dort festgelegten Zuordnung wird nun das kombinierte primäre Potenzial POT_i pro Fahrzeugtyp, Straßentyp, Verkehrsdichte, Penetrationsrate und Automatisierungsstufe berechnet. Dazu gilt es, potenzielle Wechselwirkungen zwischen den Wirkungen zu identifizieren und zu bewerten. Zum jetzigen Zeitpunkt existieren keine Erkenntnisse aus Feldversuchen oder Simulationen bzw. anderweitige Expertenabschätzungen zu den Wechselwirkungen (vgl. Barth et al., 2014, S. 110), sodass eigene Abschätzungen angestellt werden müssen. Zu diesem Zweck werden Verstärkungs- oder Abschwächungsfaktoren (im weiteren Verlauf allgemein als Kombinationsfaktoren β bezeichnet) definiert. Es wird für die Berechnung des kombinierten Potenzials folgende Formel genutzt:

$$POT(i) = 1 - \left(\prod_{j=1}^n 1 - (\beta_i * POT_j(i)) \right)$$

- mit:
- $POT(i)$ = kombiniertes primäres Potenzial eines Technologiebündels i
 - POT_j = primäres Potenzial einer einzelnen Technologie
 - j = Technologie
 - β = Kombinationsfaktor eines Technologiebündels i

Es sind zwei Technologien $j = \{a, b\}$ in einem Technologiebündel i gegeben. Für die zugehörigen Kombinationsfaktoren β_a und β_b können vier Fälle unterschieden werden:

(i) Die Technologien schließen sich gegenseitig aus: Nur Technologie a oder b ist einsetzbar, eine Kombination ist ausgeschlossen. Wähle $\beta_a = 1$ und $\beta_b = 0$ und, falls Technologie a eingesetzt wird.

(ii) Die Technologien beeinflussen sich nicht: Technologie a und b sind gleichzeitig einsetzbar, ohne dass eine Wechselwirkung beobachtet werden kann. Wähle $\beta_a = 1$ und $\beta_b = 1$.

(iii) Die Technologien haben einen abschwächenden Effekt aufeinander: Die Technologien sind gleichzeitig einsetzbar, mindestens eine der Technologien wird durch die Kombination abgeschwächt. Wähle $\beta_a = 1$ und $\beta_b < 1$, falls ausschließlich Technologie b abgeschwächt wird.

(iv) Die Technologien haben einen verstärkenden Effekt aufeinander: Die Technologien sind gleichzeitig einsetzbar, mindestens eine der Technologien wird durch die Kombination verstärkt. Wähle $\beta_a = 1$ und $\beta_b > 1$, falls ausschließlich Technologie b verstärkt wird.

Die Kombinationsfaktoren sind im Rahmen eines internen Expertenworkshops abgeschätzt worden und im Rahmen des ersten Fachworkshops im März 2017 in Berlin mit dem Fachpublikum diskutiert und validiert worden. Dabei sind die folgenden Überlegungen in die Evaluation eingeflossen:

- Beim Fachworkshop äußerten die Experten, dass Algorithmen in Technologien, die mindestens eine automatisierte Längsführung übernehmen (ACC, Highway-/Traffic Jam-Technologien oder der Urban Pilot) bereits auf Energieeffizienz optimiert seien, sodass durch eine Kombination mit dem Automatisierten Eco-Driving mit Vernetzung keine deutliche Steigerung des Potenzials zu erwarten sei. Dies schlägt sich im Kombinationsfaktor $\beta = 0,1$ für das Automatisierte Eco-Driving nieder.
- Experten stellten während des ersten Fachworkshops die Vermutung an, dass beim Platooning der Fahrer des Führungsfahrzeugs auch auf eine energieeffiziente Fahrweise hin geschult werden wird. Durch den Ersatz der manuellen Steuerung des Führungsfahrzeugs bei einer Kombination des Platoonings mit einem Highway-Chauffeur oder -Pilot ist daher nicht von großen Effizienzgewinnen ausgegangen worden; es wird jeweils der Kombinationsfaktor $\beta = 0,2$ angesetzt.
- In der Kombination von PCC und dem ACC trägt der PCC nur die fahrzeug- und topografiespezifischen Informationen bei, die Längsführung übernimmt der ACC. Es wird angenommen, dass dadurch etwa 50 % des PCC-Potenzials realisiert werden können ($\beta = 0,5$).
- Da das Automatisierte Eco-Driving mit Vernetzung auch aktuelle Fahrzeugdaten berücksichtigt, wird erwartet, dass der Anteil des PCC etwas geringer als in der Kombination mit dem ACC ausfällt: der Kombinationsfaktor $\beta = 0,4$ wird gewählt.

- Wenn Daten vom Onboard-Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting an das PCC weitergegeben werden, wird eine größere Vorausschau und damit eine höhere Effizienz des PCC erreicht – es lässt sich ein verstärkender Effekt mit dem Kombinationsfaktor $\beta = 1,2$ feststellen.

Besteht ein Technologiebündel i aus mehr als zwei Technologien $j = \{a, b, \dots, n\}$, wobei mindestens drei Technologien ein Potenzial ungleich Null haben, so sind für diese keine Kombinationsfaktoren definiert. Um dennoch ein kombiniertes Potenzial angeben zu können, wird folgende (konservative) Abschätzung getroffen: für eine Technologie b wird der minimale Kombinationsfaktor gewählt, den die übrigen Technologien $j \setminus \{b\}$ angeben. Dies bedeutet, dass in einer Kombination von mehr als zwei Technologien diejenige Technologie den Kombinationsfaktor einer anderen Technologie bestimmt, die die größten Wechselwirkungen mit der Technologie aufweist.

Aus der oben beschriebenen Vorgehensweise resultieren für jedes Fahrzeugsegment und jede Automatisierungsstufe die primären Reduktionspotenziale differenziert nach Straßentyp, Verkehrsdichte und Penetrationsrate. Die resultierenden Tabellen mit den primären Potenzialen sind am Beispiel der Pkw-Mittelklasse für Automatisierungsstufe 5 in der folgenden Tabelle 30 skizziert.

Tabelle 30: Primäre Potenziale im Segment Pkw-Mittelklasse für Stufe 5

Automatisierungsstufe		5	Reduktionspotenzial in Abhängigkeit von der Penetrationsrate		
Fahrzeugklasse		Mittelklasse			
Verkehrsmittel		Pkw	low	medium	high
Straßentyp und Verkehrsdichte	Autobahn	Flüssig	3%	7%	12%
		Dicht/Gesättigt	1%	3%	3%
		Stop+Go	7%	12%	13%
	Landstraße	Flüssig	7%	11%	16%
		Dicht/Gesättigt	5%	6%	8%
		Stop+Go	10%	14%	16%
	Innerortsstraße	Flüssig	11%	15%	16%
		Dicht/Gesättigt	14%	19%	21%
		Stop+Go	26%	38%	42%

Quelle: Fraunhofer ISI

Im darauffolgenden Schritt werden die primären Potenziale pro Fahrzeugsegment und Automatisierungsstufe zunächst mit den Anteilen der gesamten jährlichen Fahrleistungen pro Straßentyp und Verkehrsdichte multipliziert. Die verwendeten Anteile sind in 4.2.2 beschrieben (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6). Die Auswertung der primären Potenziale nach Straßentyp und Verkehrsdichte für die einzelnen Fahrzeugsegmente und Automatisierungsstufen (siehe Beispiel Tabelle 30) hat gezeigt, dass die THG- und EEV-Reduktionspotenziale aus den primären Effekten innerorts und bei stop&go besonders hoch sind. Effekte des

Platooning zeigen sich im Gegensatz dazu besonders stark bei flüssigem Verkehr und hohen Geschwindigkeiten auf Autobahnen. Dieser Effekt zeigt sich bei schweren Nutzfahrzeugen und Reisebussen insbesondere. Der Effekt steigender primärer THG-Emissions- und EEV-Reduktionspotenziale mit zunehmender Durchdringung mit automatisierten Fahrzeugen zeigt sich ebenfalls erwartungsgemäß deutlich.

Tabelle 31: Primäre Potenziale im Segment Pkw-Mittelklasse und SNF

Automatisierungsstufe	Penetrationsrate					
	Pkw-Mittelklasse			SNF		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High
1	2.9%	3.2%	3.4%	3.4%	4.3%	4.7%
2	3.9%	4.8%	5.2%	3.9%	5.2%	6.0%
3	4.5%	6.7%	9.7%	5.1%	9.3%	13.9%
4	7.7%	11.9%	15.5%	5.1%	9.3%	13.9%
5	7.7%	11.9%	15.5%	6.8%	12.0%	17.0%

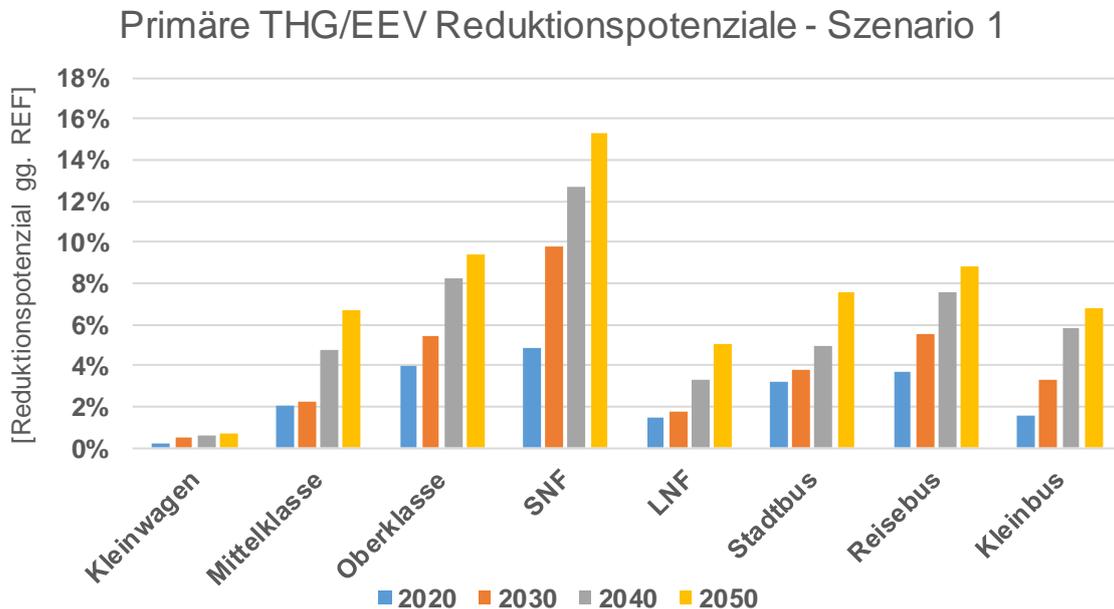
Quelle: Fraunhofer ISI

Die Reduktionspotenziale steigen auch mit zunehmender Automatisierungsstufe deutlich an. Tabelle 31 zeigt diesen Effekt beispielhaft für das Segment Pkw-Mittelklasse und schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Das Beispiel zeigt den letzten Zwischenschritt vor der Verrechnung der primären Potenziale pro Fahrzeugsegment und Penetrationsrate mit dem Szenario-spezifischen Markthochlauf. Durch die Einführung des Urban Pilot mit Automatisierungsstufe 4 steigt das primäre THG- und EEV-Reduktionspotenzial beim Pkw deutlich an und ändert sich auch mit Erreichen der Automatisierungsstufe 5 nicht. Da sich bei SNF die Verteilung der Fahrsituationen (Straßentyp und Verkehrsdichte) deutlich stärker auf Autobahnen und Landstraßen konzentriert, bewirkt hier die Einführung des Platooning mit Stufe 3 (Annahme der Studie) einen großen zusätzlichen THG- und EEV-Reduktionseffekt. Da bei den SNF die Einführung des Urban Pilot erst mit Automatisierungsstufe 5 erwartet wird, ergibt sich hier ein leicht höheres Potenzial im Vergleich zu Stufe 4.

6.1.4 Primäre Potenziale pro Szenario

Der finale Schritt bei der Berechnung der gesamten primären THG- und EEV-Reduktionspotenziale ist die Multiplikation der aus dem vorausgegangenen Schritt ermittelten primären Potenziale pro Automatisierungsstufe und Fahrzeugsegment mit den Anteilen der Automatisierungsstufen am Fahrzeugbestand pro Fahrzeugsegment aus dem Markthochlauf für die betrachteten Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. Anhand der Anteile der Automatisierungsstufen am Bestand für die einzelnen Fahrzeugsegmente ergibt sich das finale genutzte primäre THG-Emissions- und EEV-Reduktionspotenzial aus der jeweiligen Penetrationsrate. Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen die relativen primären THG-

Emissions- und EEV-Reduktionspotenziale pro Fahrzeugsegment für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 im Vergleich zu REF.

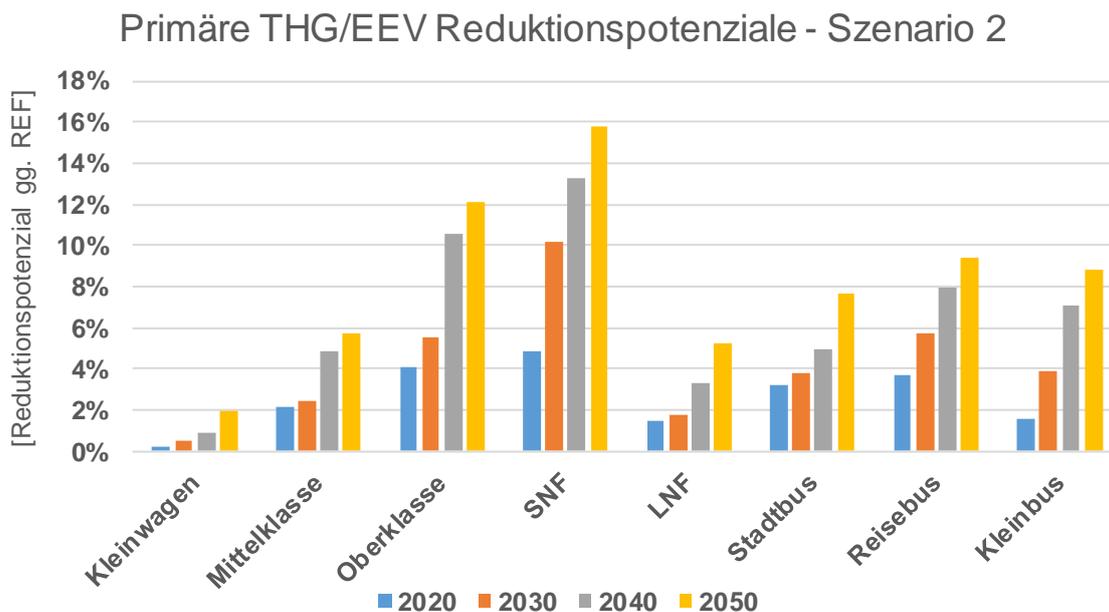


Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 44: THG- und EEV-Reduktionspotenziale aus primären Effekten in Szenario 1

Da der Markthochlauf zwischen den einzelnen Fahrzeugsegmenten unterschiedlich stark bzw. schnell verläuft, ergeben sich aus der Verrechnung dieser Entwicklungen auch große Unterschiede bei den primären THG- und EEV-Reduktionspotenzialen der betrachteten Fahrzeugsegmente. Unterschiede innerhalb der Fahrzeugsegmente zwischen den beiden Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" (Szenario 1) und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" zeigen sich in Folge der unterschiedlichen Penetrationsraten. Diese unterscheiden sich hier besonders bei den Fahrzeugsegmenten Pkw Kleinwagen/Kompaktklasse und den Kleinbussen. Hier unterscheidet sich auch der Markthochlauf zwischen den beiden Szenarien deutlich. In Folge der zunehmenden Nachfrage nach automatisierten Sharing-Dienstleistungen und einem flexibleren ÖV steigt insbesondere hier das primäre Reduktionspotenzial deutlich gegenüber Szenario 1 an.

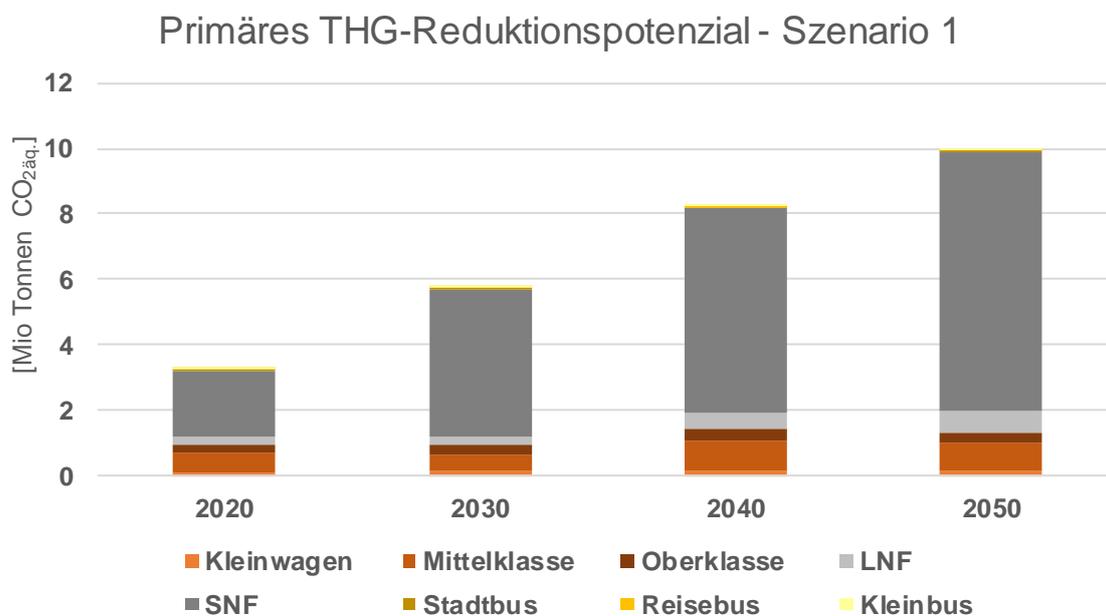
Die größten primären THG- und EEV-Reduktionspotenziale bis zum Jahr 2050 ergeben sich in der Analyse für das Segment der SNF. In Szenario 1 ergibt sich bis ins Jahr 2050 für SNF ein primäres THG- und EEV-Reduktionspotenzial in Höhe von 15,3 % bzw. 15,8 % in Szenario 2. Die primären Potenziale unterscheiden sich somit hier nur marginal. Auch im Segment der Pkw-Oberklasse zeigt sich der starke Markthochlauf in Form von hohen primären THG- und EEV-Reduktionspotenzialen in Höhe von 9,4 % in Szenario 1 im Jahr 2050 bzw. 12,2 % in Szenario 2 im Jahr 2050.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 45: THG- und EEV-Reduktionspotenziale aus primären Effekten in Szenario 2

Betrachtet man die aus den relativen primären Reduktionspotenzialen ermittelten absoluten Einsparungen an $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ -Emissionen und am Endenergieverbrauch (EEV), dann zeigt sich das folgende Bild (siehe Abbildung 46 und Abbildung 47). Dabei werden die primären Effekte von den sekundären Effekten isoliert betrachtet.

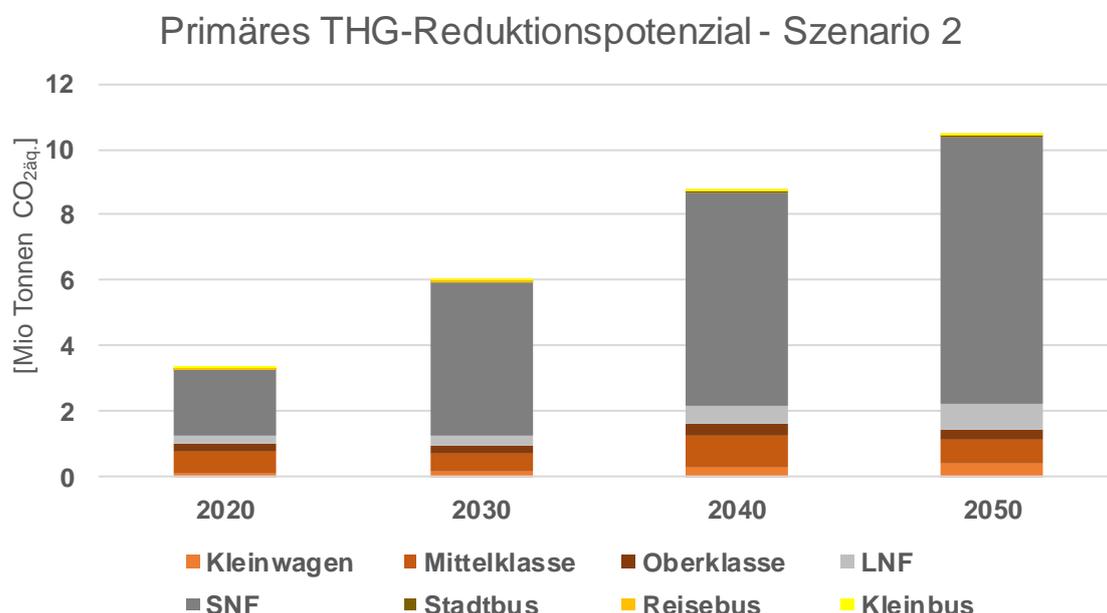


Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 46: THG-Einsparungen aus primären Effekten pro Segment in Szenario 1

In der Summe können die primären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr in Szenario 1 zu einer Einsparung der THG-Emissionen in Höhe von ca. 10 Mt. CO_{2äq.} in Deutschland im Jahr 2050 führen. Im Jahr 2030 sind die primären Effekte mit einer Reduktion der CO_{2äq.}-Emissionen in Deutschland in Höhe von ca. 5,8 Mt. bereits beachtlich (siehe Abbildung 46). Der Anteil des Straßengüterverkehrs an den gesamten THG-Emissionen des Verkehrs in Deutschland bis 2050 steigt im Referenzszenario in Folge wachsender Fahrleistungen und geringerer Effizienzpotenziale als im Personenverkehr deutlich an. Daraus ergibt sich durch die hohen relativen, primären THG-Reduktionspotenziale auch für die SNF und LNF ein großes absolutes, primäres Einsparpotenzial durch automatisiertes und vernetztes Fahren. Die primären Effekte der Automatisierung sorgen bei den SNF für eine Reduktion der CO_{2äq.}-Emissionen in Deutschland in Höhe von ca. 7,8 Mt. im Jahr 2050 in Szenario 1.

Das marginal höhere relative, primäre THG-Emissions- und EEV-Reduktionspotenzial in Szenario 2 zeigt sich auch in den absoluten, primären Einsparungen an CO_{2äq.}-Emissionen in Deutschland (siehe Abbildung 47). Diese liegen in der Summe in Szenario 2 im Jahr 2050 mit ca. 10,4 Mt. CO_{2äq.} nur marginal höher als in Szenario 1. Auch hier dominieren die Einsparpotenziale durch die SNF, jedoch zeigen sich im Bereich der Kleinwagen/Kompaktwagen und der Kleinbusse die auch bereits in den relativen, primären Potenzialen sichtbaren Verbesserungen.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 47: THG-Einsparungen aus primären Effekten pro Segment in Szenario 2

Wie in Kapitel 4 erläutert, führt die Einführung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge nicht nur durch mögliche Rebound-Effekte aus den primären THG-Emissions- und EEV-

Reduktionspotenzialen, sondern auch durch die zahlreichen anderen verkehrlichen Wirkungen, zu einer Änderung der Fahrleistungen. Im folgenden Kapitel wird dieser Aspekt berücksichtigt.

6.2 Sekundäre Effekte - Wirkungen durch Änderungen des Mobilitätsverhaltens

Für die quantitative Abschätzung der Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr in Deutschland auf die THG-Emissionen und den EEV wurden die Wirkungen in primäre und sekundäre Effekte und daraus resultierende Potenziale aufgeteilt. Im folgenden Kapitel wird zunächst die Methodik der Abschätzung der Auswirkungen der sekundären Effekte beschrieben und anschließend die Ergebnisse dieser Abschätzung quantifiziert. Dazu folgt die Auswertung dem in Abbildung 42 dargestellten Schema. Danach werden für die Zwecke der Auswertung die sekundären Effekte in vier Teilbereiche unterteilt:

- Veränderungen der Verkehrsmittelwahl,
- Veränderungen des Verkehrsflusses,
- Veränderung durch neue Nutzergruppen und
- Veränderungen durch neue, automatisierte Mobilitätskonzepte.

Sowohl Änderungen des Verkehrsflusses, als auch neue Nutzergruppen und letztlich auch neue Mobilitätsdienstleistungen wirken sich auf die Verkehrsmittelwahl aus. Die Wirkungen auf den Verkehrsfluss durch Verbesserung der Verkehrssicherheit und Reduktion der Unfallwahrscheinlichkeit bei automatisierten und vernetzten Fahrzeugen kann jedoch nur mit Hilfe von sehr detaillierten Netzwerkmodellen¹⁷ simuliert werden. Daher wurde diese Wirkung getrennt gerechnet und ausgewiesen. Die generelle (und nicht nur unfallbedingte) Wirkung der Veränderung der Kapazitäten durch die neue Technologie wurde bei der Simulation der Änderung des Modal Split auf Basis der Literaturlauswertungen (siehe Kapitel 4.2.2) dahingegen berücksichtigt.

Neue und bisher im MIV nur als Mitfahrer berücksichtigte Nutzer werden auf Basis der Ausführungen in Kapitel 4.2.4 nicht bei der Wirkungsanalyse berücksichtigt. Dies schließt jedoch nur Kinder und mobilitätseingeschränkte Personen mit ein. Personen ohne eigenes Fahrzeug dagegen werden bei der Berechnung der Wirkungen auf die Verkehrsmittelwahl zumindest im Szenario 2 ("Welt der Mobilitätsdienstleistungen") als potenzielle neue Nutzer berücksichtigt. Dies stellt auch den Brückenschlag zur letzten Kategorie der neuen, automatisierten Mobilitätskonzepte dar. Da in dieser Studie keine Potenzialanalyse für diese

¹⁷ Netzwerkmodelle sind in der Lage, die Wirkungen von Änderungen im Verkehrssystem auf der Ebene der Verkehrsinfrastruktur (Straßen, Schiene, Wasser- und Luftfahrtswege) abzuschätzen.

Konzepte und Dienstleistungen durchgeführt wurde, wird die Wirkung dieser bei der Quantifizierung mit Hilfe der beiden Szenarien in die Berechnung der Änderung des Modal Split integriert.

Die Ursachen einer möglichen Änderung des Verkehrsverhaltens und damit des gesamten Verkehrssystems durch die Einführung des automatisierten und vernetzten Fahrens sind vielschichtig. Die zentralen Einflussgrößen auf das Verkehrsverhalten im Personen- und im Güterverkehr, die in Folge der Einführung des automatisierten Fahrens verändert werden, sind in Kapitel 4 beschrieben und quantifiziert. Für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen der in Kapitel 5 ermittelten Markthochlaufszszenarien wird die deutsche Version des integrierten Verkehrs-, Makroökonomie- und Umweltmodells ASTRA verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des gesamten Modells findet sich auf der ASTRA Homepage (www.astra-model.eu).

Im Modell wird die Entwicklung der Verkehrsleistung mittels der Methodik der 4-Stufen-Modellierung simuliert. In der ersten Stufe, der Verkehrserzeugung, berechnet das Modell auf Basis einer Einteilung der Gesamtbevölkerung in verhaltenshomogene Gruppen nach den Attributen Alter, Einkommensgruppe und Wohnort (Regierungsbezirke) die jährlichen Wege pro Person differenziert nach 3 Wegezwecken (Berufspendeln, Dienstfahrten und private Fahrten). Die Entscheidung nach dem Fahrtziel wird in der folgenden Stufe, der Verkehrsverteilung, simuliert. Dabei werden alle von einer Zone (Regierungsbezirke) ausgehenden Fahrten aus dem Wegevektor auf alle möglichen Zielzonen gemäß der über alle verfügbaren Verkehrsmittel gemittelten Distanzen, Kosten und Zeiten verteilt.

In der dritten Stufe werden die jährlichen Quell-Ziel-Verkehre aus der Verkehrsverteilung den verfügbaren Verkehrsmitteln im sogenannten Modal Split zugeordnet. Ähnlich wie bei der Verkehrsverteilung basiert die Verteilung auf die Verkehrsmittel auf spezifischen Kosten und Zeiten für die Quell-Ziel-Relationen. In der letzten Stufe wird laut Theorie die entstandene Quell-Ziel-Matrix auf die Verkehrsinfrastruktur verteilt. Für diese Berechnung benötigt man jedoch ein räumlich stark differenziertes Netzwerkmodell. Innerhalb eines strategisch ausgelegten systemdynamischen Simulationsmodells wie ASTRA ist dieser Schritt nur stark vereinfacht darstellbar.

Die zentralen Treiber für Veränderungen im Personenverkehr sind demographische Entwicklung sowie die Veränderung von Kosten und Zeiten für die Wege, dem Wert der Zeit und die Besetzungsgrade pro Verkehrsmittel. ASTRA verwendet Kosten- und Zeiten-Elastizitäten zur Simulation der Verkehrsverteilung und des Modal Split. Kosten und Zeiten fließen in der Aggregation der sogenannten generalisierten Kosten in die Berechnung mit ein. Dabei wird der Zeit pro Fahrt ein Wert zugeordnet, der Wert der Zeit. Bei den Kosten verwenden sowohl die Verkehrsverteilung als auch der Modal Split die wahrgenommenen Kosten, nicht die gesamten entstehenden Kosten. Das bedeutet im Falle des eigenen Pkw, dass nur die Kosten durch Kraftstoffverbrauch psychologisch in die Entscheidung für ein

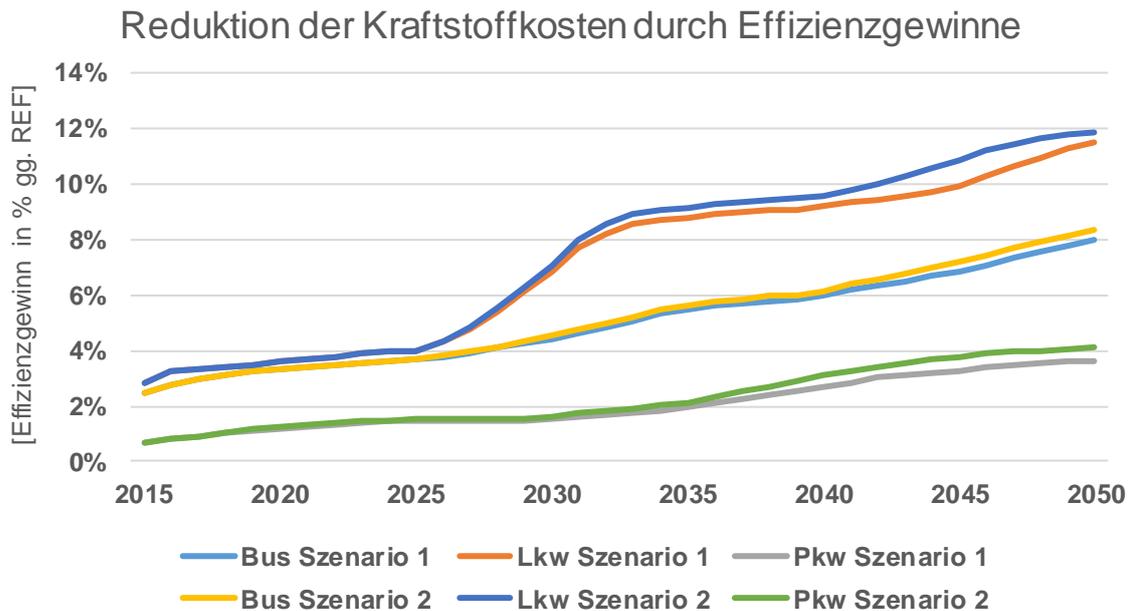
bestimmtes Verkehrsmittel mit einfließen. Kosten für Car- und Ridesharing beruhen dagegen auf dem Vollkostenprinzip. Da ASTRA bei der Berechnung des Modal Split nicht zwischen privaten Pkw, Carsharing- oder Ridesharing-Pkw unterscheidet, gehen für die Berechnung der Wirkungen eine Mischung aus reinen Kraftstoffkosten für private Pkw und den Vollkosten für Sharing-Pkw als Einflussvariable ein. Die verwendeten "wahrgenommenen Kosten" werden auf Basis der Anteile der drei Pkw Kategorien an den gesamten Fahrleistungen ermittelt.

Die Elastizitäten für die Verkehrsverteilung und den Modal Split in ASTRA basieren auf den Erkenntnissen der für Verkehrsmodelle häufig verwendeten Standardwerke (Litman, 2014; Oum et al., 1990; de Jong et al., 2010).

Entsprechend der technischen Möglichkeiten und der Struktur des Modells fließen somit Änderungen der folgenden Einflussvariablen in die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen der beiden Mobilitätsszenarien mit ein:

- Änderungen der Transport- bzw. Reisekosten,
- Änderungen der Transport- bzw. Reisezeiten,
- Änderungen der Bewertung der Zeit und
- Änderungen der Beladungsfaktoren bzw. der Besetzungsgrade.

Die Transport- bzw. Reisekosten im Straßenverkehr ändern sich gegenüber REF zum einen durch die Effizienzpotenziale (primäre Potenziale) des automatisierten und vernetzten Fahrens anhand des prognostizierten Markthochlaufs der beiden Szenarien. Abbildung 48 zeigt die für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen verwendete Reduktion der Kraftstoffkosten für Pkw, Lkw und Busse differenziert nach Szenario 1 und Szenario 2. Die Effizienzgewinne beinhalten dabei nur die durch die Automatisierung entstehenden primären Potenziale. Effizienzgewinne durch optimierte Motoren, Leichtbau, zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge oder andere Effizienztechnologien sind dabei in allen Szenarien einschließlich dem REF identisch. Für alle anderen Verkehrsträger (Schiene und Binnenschiff) neben der Straße wurden ebenfalls identische Effizienzpotenziale bis zum Jahr 2050 angenommen.

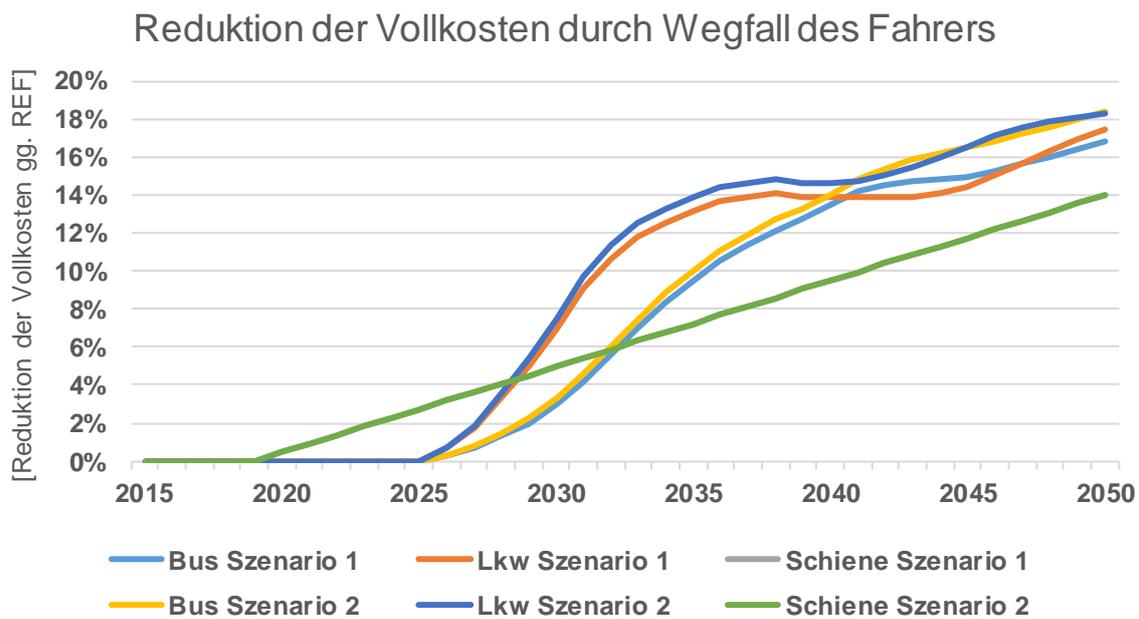


Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 48: Reduktion der Kraftstoffkosten durch primäre Effekte in beiden Szenarien gegenüber REF

Durch den steigenden Anteil von Sharingdiensten an den gesamten Fahrleistungen ändern sich für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen die wahrgenommenen Kosten für den Pkw. Dieser Effekt bewirkt im Szenario 2 einen Anstieg der wahrgenommenen (Kraftstoff-) Kosten um 3,6 Cent im Jahr 2050. Dieser berechnet sich aus den angenommenen durchschnittlichen Vollkosten für die Nutzung eines automatisierten Car- oder Ridesharing Fahrzeugs (siehe Kapitel 4.2.1). Für das automatisierte Carsharing wurde ein durchschnittlicher Preis pro gefahrenem Kilometer in Höhe von 32 Cent, für das automatisierte Ridesharing 20 Cent als Mittelwert der betrachteten Literaturquellen berücksichtigt. Mit den für das Szenario 2 festgelegten, linear steigenden Anteilen des automatisierten Carsharing an den gesamten Fahrleistungen des MIV in Höhe von 8 % und des automatisierten Ridesharing in Höhe von 4 % steigen die wahrgenommenen Kosten des Pkw in Szenario 2 um 3,6 Cent bis zum Jahr 2050.

Durch den Rückgang der Fahrerkosten für Busse und Lkw ab der Automatisierungsstufe 4 sinken die Vollkosten dieser beiden Verkehrsmittel zusätzlich. Die resultierende prozentuale Abnahme der Vollkosten für beide Szenarien ist in Abbildung 49 dargestellt. Hier wird bei der Berechnung der verkehrlichen Wirkung ein Rückgang der Vollkosten auf der Schiene in gleicher Höhe für beide Szenarien im Vergleich zum REF ebenfalls durch eine zunehmende Automatisierung angenommen (siehe Kapitel 4.2.1).



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 49: Reduktion der Vollkosten durch Rückgang der Fahrerkosten in beiden Szenarien gegenüber REF

Die Änderung der Transport- bzw. Reisezeiten werden anhand der Ausführung in Kapitel 4.2.2 in den Modellrechnungen der beiden Szenarien berücksichtigt. Die durchschnittlichen Änderungen der Transport- bzw. Reisezeiten durch die zunehmende Automatisierung unterscheidet sich nicht zwischen Szenario 1 und Szenario 2. Durch den Effekt des Mischverkehrs aus nicht-automatisierten und automatisierten Pkw, Lkw und Bussen resultiert in der betrachteten Literaturquelle eine leichte Steigerung der durchschnittlichen Transport- bzw. Reisezeiten bis maximal 4 % im Jahr 2050. Die Entwicklung der Transport- bzw. Reisezeiten wurde dabei linear zunehmend zwischen 2020 und 2050 angenommen.

In der Literatur werden zum Teil die verkehrlichen Wirkungen ab Automatisierungsstufe 4 im urbanen Raum kontrovers diskutiert. Die Funktion des Valet Parkings wird in einigen Studien als Ursache für steigende Fahrleistungen, in Form von Leerfahrten automatisierter Pkw gesehen. Manche Studien gehen davon aus, dass die Parkräume komplett aus den Städten an den Stadtrand wandern und damit die Distanzen für Leerfahrten durch das Valet Parking größer werden. Da jedoch der Anteil der Pkw mit Automatisierungsstufe 5 in beiden Szenarien noch deutlich unterhalb von 10% liegt, wird in der Berechnung der verkehrlichen Wirkungen davon ausgegangen, dass Parkräume nur zum Teil verlagert werden. Die positiven Wirkungen der Reduktion der Parksuchverkehre in urbanen Räumen durch die Automatisierung und Vernetzung der Pkw kompensiert aller Wahrscheinlichkeit nach die Wirkungen einer zum Teil stattfindende Verlagerung der Parkräume. Laut einer Studie von

INRIX¹⁸ verbringen die Autofahrer in Deutschland in Städten durchschnittlich 41 Stunden pro Jahr für die Parkraumsuche. Diese Zeit und damit verbundene Umwege lassen sich durch die Automatisierung zukünftig optimieren.

Der Bewertung des Zeitverlusts durch die aktive Fahrtätigkeit ändert sich mit zunehmender Automatisierung beim Pkw anhand der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Methodik. Hier wird eine Halbierung des Werts der Zeit für Pkw ab Automatisierungsstufe 4 angenommen. Durch Multiplikation mit dem Anteil der Pkw ab Stufe 4 am gesamten Pkw Bestand ergibt sich dadurch eine maximale Reduktion des Werts der Zeit um 16 % in Szenario 1. Die höheren Anteile an Pkw mit Automatisierungsstufe 4 und 5 am gesamten Pkw Bestand in Szenario 2 bewirkt eine stärkere Abnahme des Werts der Zeit in Szenario um 20% im Jahr 2050. Durch den abnehmenden Wert der Zeit wird automatisch auch die Wirkung der Steigerung der Transport- und Reisezeiten kompensiert.

Während in Szenario 1, der "Welt des Fahrzeugbesitzes", keine Veränderung der durchschnittlichen Besetzungsgrade bei Pkw und Bussen im Vergleich zum REF angenommen wird, bewirkt der steigende Anteil von Car- und Ridesharing in Szenario 2, der "Welt der Mobilitätsdienstleistungen", eine Zunahme des durchschnittlichen Besetzungsgrades bei Pkw um ca. 7 % im Jahr 2050. Dieser Wert errechnet sich aus den angenommen Anteilen der beiden Sharingkonzepte an den gesamten Fahrleistungen des Pkw in Szenario 2 und durchschnittlichen Besetzungsgraden bei automatisierten Carsharing Pkw in Höhe von 1,8 Personen und bei Ridesharing Pkw von 2,5 Personen. Bei einer Änderung der bis heute gängigen Fahrzeugkonzepte hin zu größeren Gefäßen sind auch höhere Besetzungsgrade zukünftig denkbar.

Der Effekt zunehmender Automatisierung in Kombination mit den damit einhergehenden neuen Logistikkonzepten (siehe Kapitel 4.3.2) im Straßengüterverkehr auf die Beladungsfaktoren der schweren und leichten Nutzfahrzeuge wird bei der Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen ebenfalls berücksichtigt. Da im Straßengüterverkehr bei einem Großteil der Transporte jedoch nicht die zulässige Nutzlast der beschränkende Faktor ist, sondern das Transportvolumen ergibt sich hieraus bei Szenario 2 keine Änderung gegenüber der REF und Szenario 1. Der Effekt der neuen Logistikkonzepte zeigt sich in Szenario 2 nur durch die Optimierung und damit der Reduktion der Leerfahrten. Hierbei wird für Szenario 2 angenommen, dass die Leerfahrten um 10% bis zum Jahr 2050 reduziert werden können. Da Leerfahrten aber auch in der Logik der Verkehrsmodelle den durchschnittlichen Beladungsfaktor (negativ) beeinflussen und verkleinern, wird hier eine resultierende Steigerung des Beladungsfaktors bei SNF und LNF bis maximal 2,5% im Jahr 2050 berücksichtigt.

Anhand der Änderungen der beschriebenen Einflussvariablen für die beiden Szenarien ergeben sich die folgenden verkehrlichen Änderungen durch die Simulation mit dem ASTRA

¹⁸ <http://inrix.com/press-releases/parking-pain-de/>

Modell. Tabelle 32 und Tabelle 33 beschreiben die relativen Änderungen der Fahrleistungen im Personen- und Güterverkehr für beide Szenarien. Es werden dabei die relativen Änderungen der Fahrleistungen in Fahrzeugkilometer pro Jahr gegenüber dem REF zum gleichen Zeitpunkt dargestellt.

Die primären Potenziale des Pkw durch zunehmende Automatisierung und die zurückgehende Wahrnehmung der Fahrtzeit als ineffektive Zeit und damit als Zeitverlust führt bei konstanten Besetzungsgraden und ohne Zutun von automatisierten, geteilten Mobilitätskonzepten zu einer Steigerung der Fahrleistungen um ca. 4% bis zum Jahr 2050 in Szenario 1. In absoluten Zahlen bedeutet diese eine Zunahme der Fahrleistung des MIV um 27 Mrd. Fahrzeugkilometer im Jahr 2050. Der Modal Split verschiebt sich wie erwartet deutlich zu Gunsten des MIV in Szenario 1, da die Fahrleistungen im Öffentlichen Verkehr um -11 % bei Bussen und -19 % auf der Schiene im Jahr 2050 zurückgehen. Die zeitliche Verteilung der Wirkungen auf den Modal Split im Personenverkehr zeigt dabei die Bedeutung der Einführung der Automatisierungsstufen 4 und 5. Hierdurch entsteht sowohl durch die primären Potenziale bei den Fahrzeugen, als auch durch die Möglichkeit der effizienten Nutzung der Fahrtzeit im Pkw die stärkste Wirkung auf den Personenverkehr. Der Rückgang der durchschnittlichen Ticketpreise im Öffentlichen Verkehr durch sinkende Vollkosten kann den Wandel im Modal Split nur teilweise kompensieren.

Tabelle 32: Änderung der Fahrleistungen im Personenverkehr gegenüber REF

Szenario	Verkehrsmittel	2020	2030	2040	2050
Szenario 1	Pkw	0%	0%	2%	4%
	Bus	0%	0%	-3%	-11%
	Schiene	0%	2%	-10%	-19%
Szenario 2	Pkw	-1%	-3%	-2%	-2%
	Bus	0%	0%	-5%	-13%
	Schiene	0%	1%	-14%	-27%

Quelle: Fraunhofer ISI

Ein etwas anderes Bild bei den Fahrleistungen im Personenverkehr zeigt sich für Szenario 2, der "Welt der Mobilitätsdienstleistungen". Durch die Zunahme des Angebots automatisierter und vernetzter Sharingkonzepte im MIV und die daraus resultierende Verbesserung des Besetzungsgrades im MIV ergibt sich eine leicht sinkende Fahrleistung für den Pkw gegenüber dem REF in Höhe von -2 % im Jahr 2050. Im Vergleich zu Szenario 1 ist besonders bei den Pkw eine Zunahme des Anteils der Automatisierung (besonders bei Stufe 4 und 5) im Markthochlauf zu beobachten. Dieser resultiert in höheren primären Potenzialen, wodurch die Verkehrsmittelwahl in Szenario 2 beeinflusst wird. Die Fahrleistungen des Busses und auf der Schiene sinken im Szenario 2 gegenüber Szenario 1 durch diesen Effekt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich im Straßengüterverkehr (siehe Tabelle 33). Durch die hohen primären Potenziale, besonders beim SNF, und der Reduktion der Fahrerkosten durch Automatisierung der Flotten steigen im Szenario 1 die Fahrleistungen um 2 % gegenüber dem REF. Im Bereich der Schiene zeigt sich eine Steigerung der Fahrleistungen, die aus der angenommenen schnelleren Automatisierung im Vergleich zum Binnenschiff resultiert. Entsprechend steigt die Fahrleistung im Schienengüterverkehr in beiden Szenarien bis 2050 an und sinkt entsprechend beim Binnenschiff bis 2050 ab.

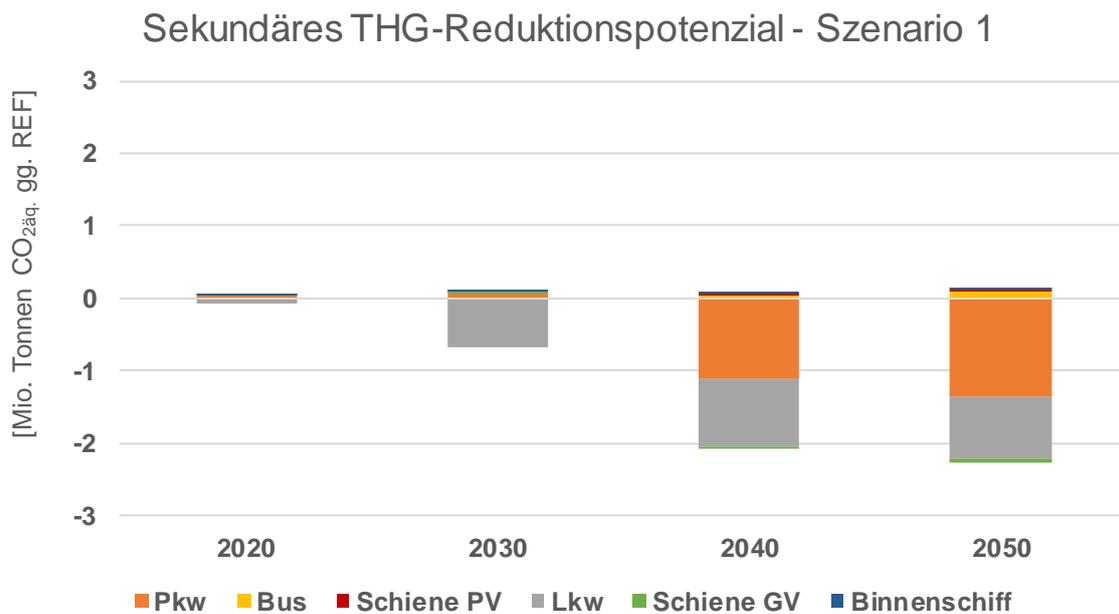
Tabelle 33: Änderung der Fahrleistungen im Güterverkehr gegenüber REF

Szenario	Verkehrsmittel	2020	2030	2040	2050
Szenario 1	Lkw	0%	1%	2%	2%
	Schiene	-1%	-3%	2%	8%
	Binnenschiff	-1%	-3%	-3%	-1%
Szenario 2	Lkw	0%	1%	1%	0%
	Schiene	-2%	-5%	-1%	4%
	Binnenschiff	-1%	-4%	-5%	-3%

Quelle: Fraunhofer ISI

Für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens durch sekundäre Effekte werden die primären Effekte wie oben beschrieben berücksichtigt. Um die Wirkungen der beiden Effekte und damit die primären von den sekundären THG- und EEV-Reduktionspotenzialen zu trennen, wurden bei der folgenden Darstellung der Ergebnisse die primären Potenziale herausgerechnet. Die Darstellung der sekundären THG-Reduktionspotenziale beinhaltet damit nur die durch die Änderung der Fahrleistungen entstehenden Änderungen der THG Emissionen und des EEV.

Durch die Veränderungen im Modal Split im Personenverkehr und im Güterverkehr entsteht für Szenario 1 ein negatives sekundäres THG-Reduktionspotenzial (siehe Abbildung 50). Die $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ -Emissionen steigen damit in Szenario 1 rein durch die sekundären Effekte der Änderung der Verkehrsmittelwahl verglichen mit dem REF bis ins Jahr 2050. Die Simulation der verkehrlichen Wirkungen in Szenario 1 resultiert in einer Zunahme der THG-Emissionen in Höhe von 0,57 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2030, 1,97 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2040 und 2,2 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2050 im Vergleich zum REF. Am stärksten steigen hierbei die $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ Emissionen des MIV (1,36 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2050) gefolgt vom Lkw (0,86 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2050). Durch die Verlagerungswirkungen von der Schiene auf die Straße im Personenverkehr, sinken die $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ Emissionen des Schienenverkehrs leicht (0,03 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2050), die des Öffentlichen Verkehrs auf der Straße ebenso moderat (0,09 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2050).



Quelle: Fraunhofer ISI

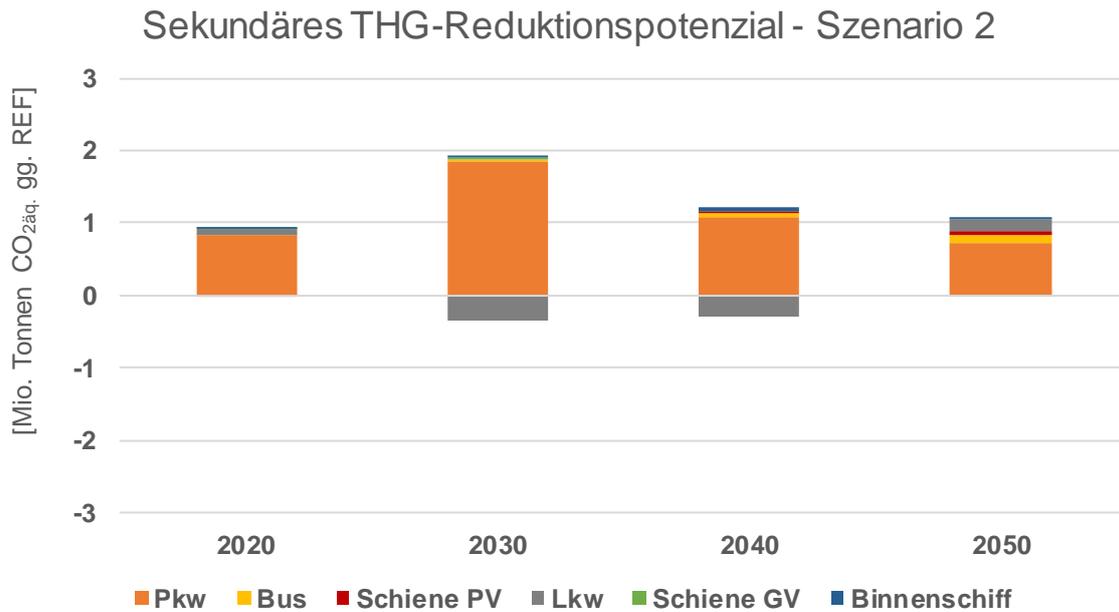
Abbildung 50: THG-Einsparungen durch Änderungen des Modal Split in Szenario 1

Ein anderes Bild zeigt sich in Szenario 2, "Welt der Mobilitätsdienstleistungen". Hier zeigen die Abschätzungen durch die Zunahme des Angebots und der Nutzung neuer, automatisierter Sharingkonzepte eine positive Wirkung auf die THG-Emissionen bis 2050 (siehe Abbildung 51). Insgesamt summiert sich das sekundäre THG-Reduktionspotenzial durch das automatisierte und vernetzte Fahren im Jahr 2030 auf -1,6 Mt. CO_{2äq.} Nach dem Jahr 2030 sinken die Einsparungen der CO_{2äq.} Emissionen durch die einsetzenden stärkeren verkehrlichen Wirkungen der Einführung von Automatisierungsstufe 4 und 5 etwas ab. Die Berechnungen mit ASTRA zeigen für das Jahr 2040 eine Einsparung der THG-Emissionen in Höhe von 0,9 Mt. CO_{2äq.}, im Jahr 2050 sind es ca. 1 Mt. CO_{2äq.} Der größte, in Szenario 2 positive Beitrag zur Einsparung von CO_{2äq.}-Emissionen durch das automatisierte und vernetzte Fahren entsteht durch den Rückgang der Fahrleistung gegenüber dem REF beim MIV (1,8 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2030 und 0,7 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2050).

Neben den oben beschriebenen sekundären THG-Reduktionspotenzialen des automatisierten und vernetzten Fahrens durch Änderungen der Fahrleistungen im Straßenverkehr, wird in der Literatur noch der Effekt der Stauvermeidung durch die Verbesserung der Verkehrssicherheit behandelt. Neben vielen qualitativen Abschätzungen zur Wirkungen auf die Verkehrssicherheit in der Fachliteratur haben Fahrenkrog et al. (2017) die Reduktion der Unfallhäufigkeit durch automatisierte und vernetzte Fahrzeuge sowohl im Feldversuch für Fahrzeuge bis Automatisierungsstufe 3 als auch per Simulation untersucht. Demnach können durch Automatisierung ca. 93 % der Unfälle verglichen mit menschlich gesteuerten Pkw vermieden werden. Laut ADAC¹⁹ gab es auf deutschen Autobahnen im Jahr 2016 ca. 419

¹⁹ ADAC (2016): Staubilanz 2016.

Tausend Staustunden. Unter der Annahme, dass ca. 20 % der Staus durch Unfälle (es existieren hierzu keine validen Statistiken) entstehen, dann ließen sich auf BAB durch die in Szenario 1 und 2 errechneten Markthochläufe bei 93 % Reduktion der Unfallwahrscheinlichkeit und ca. 1 Liter Mehrverbrauch pro Staustunde maximal 0,021 (Szenario 1) bis 0,029 (Szenario 2) Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2050 durch Automatisierung auf BAB einsparen. Selbst bei einem höheren Anteil des Faktors Unfall als Stauursache ergibt sich kein deutlich besseres Reduktionspotenzial an THG-Emissionen.



Quelle: Fraunhofer ISI

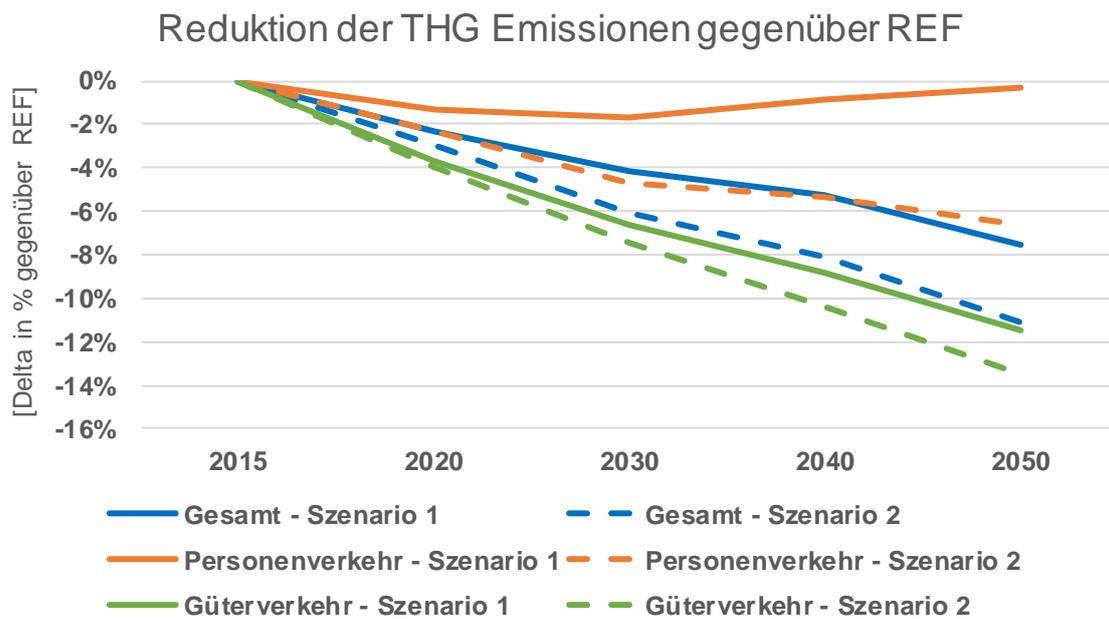
Abbildung 51: THG-Einsparungen durch Änderungen des Modal Split in Szenario 2

6.3 Gesamtwirkungen auf Treibhausgase und den Endenergieverbrauch

In den beiden vorigen Kapiteln wurden die primären und sekundären Effekte des Markthochlaufs automatisierter und vernetzter Fahrzeuge im Straßenverkehr in Deutschland separat voneinander für die beiden Szenarien, "Welt des Fahrzeugbesitzes" (Szenario 1) und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" (Szenario 2) quantifiziert. Dabei haben sich besonders bei den sekundären Effekten unterschiedliche Wirkungen der beiden Szenarien gezeigt. Diese Unterschiede lassen sich auch bei den Gesamtwirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens erkennen. Abbildung 52 zeigt die relative Veränderung der gesamten THG Emissionen (in CO_{2äq.}) in Deutschland im Vergleich zum Referenzszenario (REF) bis 2050 für beide Szenarien. Dabei werden die relativen Änderungen der Emissionen für den Personen- und Güterverkehr getrennt aufgezeigt. Die Berechnungen zeigen dabei die THG Reduktionspotenziale der Technologie unter der Annahme, dass die Funktion der Automatisierung auch in jedem damit ausgestatteten Fahrzeug bei allen möglichen Fahrsituationen genutzt wird. Spätestens ab Automatisierungsstufe 5 ist dies der Normalfall.

Der ermittelte Markthochlauf automatisierter und vernetzter Fahrzeuge führt in beiden Szenarien zu einem Rückgang der THG-Emissionen im Verkehr in Deutschland bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum REF. In Szenario 1 gehen die THG-Emissionen in den Berechnungen um 4,2 % im Jahr 2030 und 7,6 % im Jahr 2050 zurück. Die hohen primären Potenziale des Straßengüterverkehrs sind für den Rückgang der Emissionen hauptsächlich verantwortlich. Die THG-Emissionen des Güterverkehrs sinken um 6,6 % im Jahr 2030 und um 11,5 % im Jahr 2050. Steigende Fahrleistungen im MIV sorgen dafür, dass in Szenario 1 die THG-Emissionen im Personenverkehr nur moderat gegenüber dem REF um -1,7 % im Jahr 2030 und 0,3 % im Jahr 2050 sinken. Nichtsdestotrotz überwiegen auch im Personenverkehr die Effizienzgewinne aus den primären Potenzialen im Vergleich zu den zusätzlichen THG Emissionen, verursacht durch steigende Fahrleistungen im MIV.

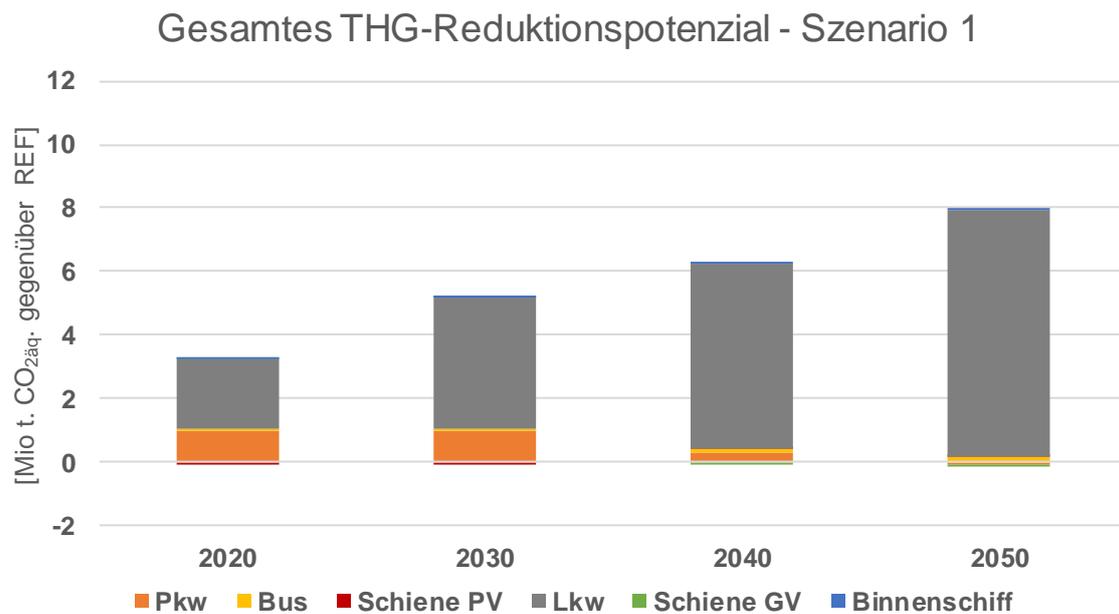
Der höhere Anteil automatisierter und vernetzter Fahrzeuge in Szenario 2 sowie die Zunahme der Nutzung automatisierter Sharingkonzepte und einem flexibleren Öffentlichen Verkehr führen zu höheren gesamten THG-Reduktionspotenzialen als in Szenario 1. Insgesamt sinken die THG-Emissionen gegenüber REF um 6,1 % im Jahr 2030 und 11,1 % im Jahr 2050. Auch in Szenario 2 zeigt sich für den Güterverkehr das größte THG-Reduktionspotenzial in Höhe von 7,4 % im Jahr 2030 und 13,5 % im Jahr 2050. Die in Szenario 2 angenommene Steigerung der Nutzung von automatisierten Sharingkonzepten wirken sich positiv auf die THG-Emissionen im Personenverkehr aus. Die Abschätzungen zeigen hier ein maximales Reduktionspotenzial von 4,7 % im Jahr 2030 und 6,6 % im Jahr 2050 gegenüber REF.



Quelle: Fraunhofer ISI

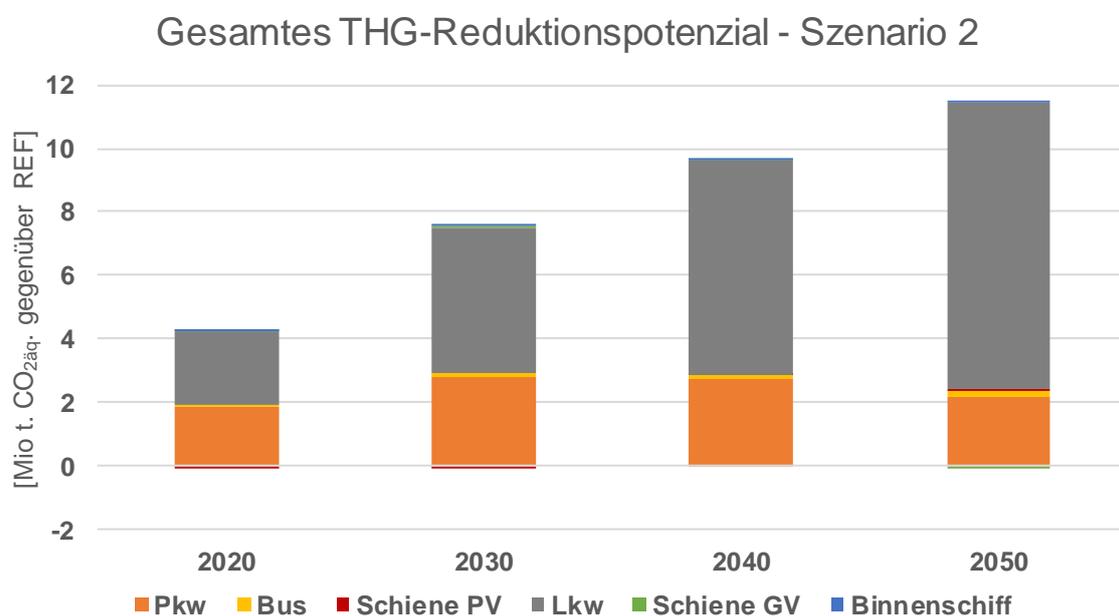
Abbildung 52: Gesamtwirkung des Automatisierten und Vernetzten Fahrens pro Szenario auf die THG-Emissionen

Abbildung 53 und Abbildung 54 (sowie Tabelle 34) zeigen die gesamten THG-Reduktionspotenziale für die beiden Szenarien in eingesparten Millionen Tonnen $\text{CO}_{2\text{äq.}}$. Die Reduktionspotenziale sind dabei differenziert nach Verkehrsmitteln dargestellt. In absoluten Mengen führt das automatisierte und vernetzte Fahren in Szenario 1 zu einer Minderung der THG-Emissionen in Höhe von 5,2 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2030, 6,3 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2040 und 7,8 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2050 verglichen mit dem REF. Da die verkehrlichen Effekte in Szenario 1 für den MIV eine Steigerung der Fahrleistungen bewirken und die dadurch entstehenden zusätzlichen THG-Emissionen nicht durch die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge kompensiert werden, kann man in den Ergebnissen einen marginal negativen Einsparungswert für den Pkw, also eine Zunahme der $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ -Emissionen im Jahr 2050 in Höhe von 0,07 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ erkennen (vgl. Tabelle 34). Vor 2040 führen die primären Potenziale jedoch auch beim Pkw zu einer gesamten Einsparung an THG Emissionen von knapp 1 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2030. Die Veränderung nach dem Jahr 2030 entsteht durch die verkehrlichen Wirkungen ab Automatisierungsstufe 4. Erst das vollautomatisierte Fahren ermöglicht es dem Fahrer, fahrfremde Aktivitäten während der Fahrt zu übernehmen. Erst dadurch sinkt der gefühlte Zeitverlust und damit der Wert der Zeit, welcher die Änderung der Fahrleistungen forciert. Die primären und sekundären Potenziale bei den schweren Nutzfahrzeugen (SNF) haben dabei mit 4,1 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ im Jahr 2030 und besonders mit 7,7 Mt. $\text{CO}_{2\text{äq.}}$ den deutlich größten Anteil an den Einsparpotenzialen.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 53: Gesamte THG-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 1



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 54: Gesamte THG-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 2

Die THG-Einsparungen in Szenario 2 liegen in Folge höherer primärer und auch sekundärer THG-Reduktionspotenziale über den ermittelten THG-Minderungen Szenario 1. Verglichen mit dem REF ergibt sich für Szenario 2 ein Rückgang der THG-Emissionen des Verkehrs

um 7,6 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2030, 9,6 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2040 und 11,5 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2050.

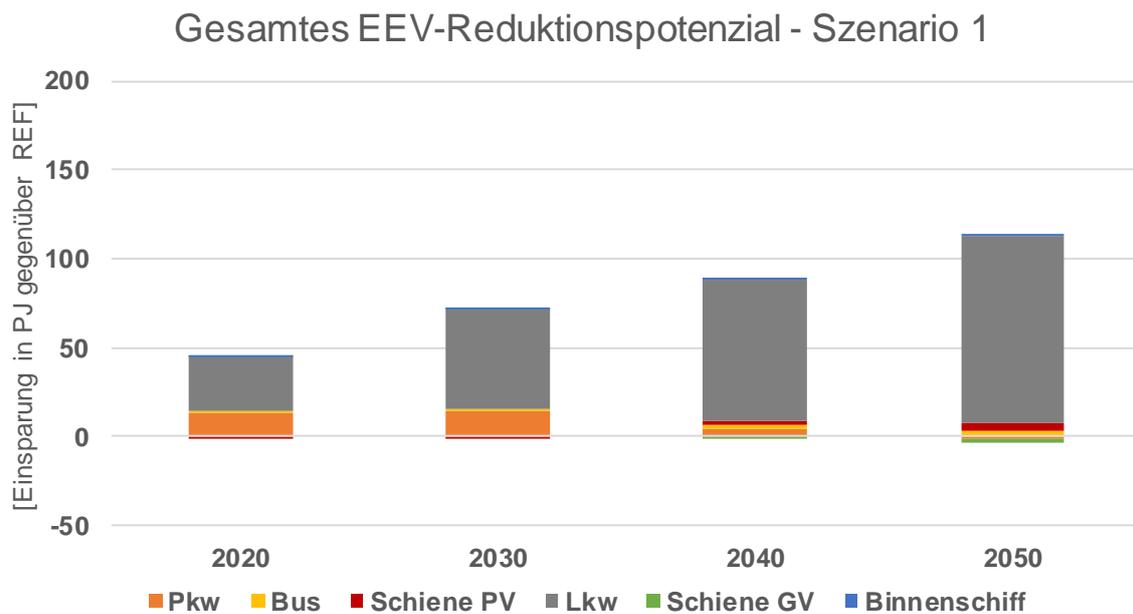
Dabei gehen die THG-Emissionen der SNF mit 4,6 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2030 und 9,1 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2050 am stärksten zurück. Der MIV trägt jedoch in Szenario 2 mit einer Einsparung in Höhe von 2,8 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2030 und 2,2 Mt. CO_{2äq.} im Jahr 2050 zu einer deutlich höheren gesamten Einsparung an THG-Emissionen bei. Die positiven Wirkungen steigender Besetzungsgrade durch eine vermehrte Nutzung von automatisierten Sharingangeboten wirkt beim MIV den steigenden Fahrleistungen der Pkw im Privatbesitz entgegen.

Tabelle 34: Gesamte Einsparungen an THG-Emissionen durch die Automatisierung

Szenario	Verkehrsmittel	2020	2030	2040	2050	Einheit
Szenario 1	Pkw	998	982	316	-71	1000 t CO _{2äq.}
	Bus	66	67	104	160	
	Schiene PV	-1	-4	20	28	
	Lkw	2,186	4,114	5,794	7,750	
	Schiene GV	7	16	-10	-44	
	Binnenschiff	5	23	22	7	
	Summe	3,261	5,198	6,246	7,830	
Szenario 2	Pkw	1,829	2,826	2,726	2,199	
	Bus	68	68	122	181	
	Schiene PV	-1	-4	30	39	
	Lkw	2,330	4,609	6,728	9,052	
	Schiene GV	11	28	6	-24	
	Binnenschiff	7	31	34	22	
	Summe	4,244	7,558	9,646	11,469	

Quelle: Fraunhofer ISI

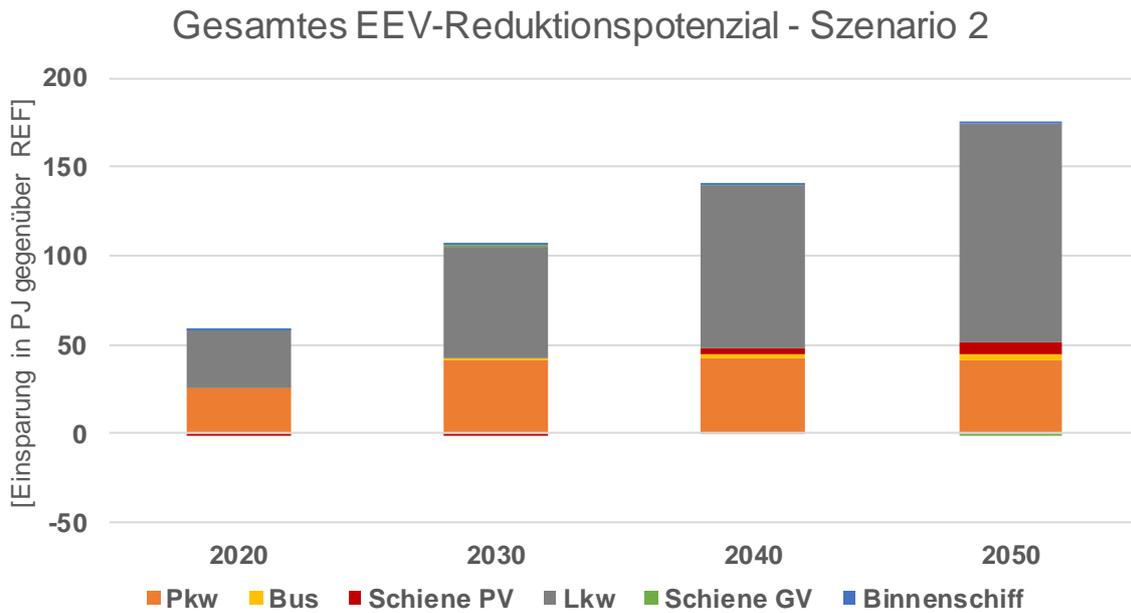
Für die gesamten Potenziale wurden auch die resultierenden Potenziale zur Senkung des Endenergieverbrauchs (EEV), gemessen in Petajoule (PJ) berechnet. Der Endenergieverbrauch pro Verkehrsmittel wird dazu zunächst anhand der Fahrleistungen und der Verbrauchsfaktoren nach dem im allen Szenarien identischen Anteil der Antriebsarten und damit der Energieträger ermittelt. Abbildung 55 zeigt die in Szenario 1 möglichen Einsparungen des EEV, differenziert nach Verkehrsmitteln, Abbildung 56 die Ergebnisse der Potenzialanalyse von Szenario 2.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 55: Gesamte EEV-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 1

Der gesamte EEV des Verkehrs sinkt in Szenario 1 um 72 PJ im Jahr 2030, um 88 PJ im Jahr 2040 und 110 PJ im Jahr 2050. Simultan zu den THG-Reduktionspotenzialen trägt auch hier der SNF am stärksten zur Reduktion des EEV bis 2050 bei. In Szenario 2 ergibt sich eine Reduktion des EEV im Verkehr um 106 PJ im Jahr 2030, um 140 PJ im Jahr 2040 und um 174 PJ im Jahr 2050.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 56: Gesamte EEV-Einsparungen durch die Automatisierung in Szenario 2

Tabelle 35: Gesamte Einsparungen am EEV durch die Automatisierung

Szenario	Verkehrsmittel	2020	2030	2040	2050	Einheit
Szenario 1	Pkw	14	14	5	-1	PJ
	Bus	1	1	2	3	
	Schiene PV	0	0	2	4	
	Lkw	30	56	79	106	
	Schiene GV	0	1	0	-2	
	Binnenschiff	0	0	0	0	
	Summe	45	72	88	110	
Szenario 2	Pkw	25	41	42	41	
	Bus	1	1	2	4	
	Schiene PV	0	0	3	6	
	Lkw	32	62	91	124	
	Schiene GV	0	1	0	-1	
	Binnenschiff	0	0	0	0	
	Summe	58	105	138	174	

Quelle: Fraunhofer ISI

7 Schlussfolgerungen

Die im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der MKS entstandene Studie wurde konzipiert, um die Potenziale des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (gemessen in CO_{2äq.}) und des Endenergieverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2050 zu quantifizieren. Um diese Erkenntnisse in den Prozess der Weiterentwicklung der MKS einfließen lassen zu können, wurden die Potenziale unter Berücksichtigung der aus heutiger Sicht machbaren technischen Entwicklungen, den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und der zu erwartenden gesellschaftlichen Akzeptanz der Technologie der Automatisierung abgeschätzt. Daher wurde als Nebenziel die Ermittlung realistischer Markthochlaufszzenarien für die Automatisierungsstufen 1 bis 5 im Bestand bei Pkw, Lkw und Bussen in Deutschland bis zum Jahr 2050 definiert. Die Basis für die Markthochläufe bilden die Erkenntnisse über wahrscheinliche Markteinführungszeitpunkte und Kosten der Technologie aus einer fundierten technoökonomischen Analyse in Kombination mit Präferenzen und Mehrpreisbereitschaften aus der Auswertung von Akzeptanzstudien. Die Studie widmete sich dabei nicht den notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen. Vielmehr wurde bei der Ermittlung der Potenziale davon ausgegangen, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen zumindest in Deutschland zukünftig so gesetzt werden, dass diese weder die technisch mögliche Einführung der Technologie verzögern noch die Nutzung aller möglichen Funktionen des automatisierten und vernetzten Fahrens zukünftig einschränken.

Da die Evaluation der Potenziale bzw. der möglichen zukünftigen Marktanteile neuer Mobilitätskonzepte (z.B. automatisiertes Ridesharing oder Robo-Taxis) nicht Bestandteil dieser Studie waren, wurden in der Studie die beiden fiktiven Szenarien "Welt des Fahrzeugbesitzes" und "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" entworfen. Die für die "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" gewählten Änderungen beim Mobilitätsverhalten und der zukünftige Anteil neuer Mobilitätskonzepte an den gesamten Fahrleistungen und die daraus resultierenden geänderten Besetzungsgrade sind anhand von Expertenabschätzungen quantifiziert worden. Der Vergleich der beiden Szenarien soll exemplarisch die Wechselwirkungen zwischen der Automatisierung und Vernetzung des Straßenverkehrs und der dadurch erst möglichen Einführung neuer, automatisierter und geteilter Mobilitätskonzepte veranschaulichen.

Die Gesamtwirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf Treibhausgasemissionen und den Endenergieverbrauch ergeben sich aus vielen einzelnen Änderungen innerhalb des Verkehrssystems durch die Einführung der Technologie. Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge sind effizienter und verbrauchsärmer, weil durch die Automatisierung Brems- und Beschleunigungsvorgänge reduziert werden können, das Fahrzeug frühzeitig auf die Topographie und auch den Verkehrsfluss reagieren kann. Diese Effizienzvorteile sind für Fahrzeuge bis Stufe 3 (hochautomatisiertes Fahren) bereits durch Feldstudien nachgewiesen worden und werden in dieser Studie als "primäre Wirkungen" bezeichnet,

weil sie direkt am Fahrzeug entstehen. Die "sekundäre Wirkungen" des automatisierten und vernetzten Fahrens entstehen durch verkehrliche Änderungen in Folge zunehmender Automatisierung. Dies umfasst beispielsweise die Änderung der Verkehrsmittelwahl und der Verkehrsverteilung bzw. der Distanzen durch sich ändernde Kosten, Fahrzeiten und der Wahrnehmung der Fahrzeit. Darüber hinaus kann sich ab einer hohen Marktdurchdringung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge im Straßenverkehr die Kapazität der Straßen und damit auch der Verkehrsfluss ändern. Stausituationen durch Unfälle können reduziert werden, weil durch die Automatisierung das Unfallrisiko signifikant reduziert werden kann. Letztlich können auch neue Nutzungsmodelle im Straßenverkehr eine verkehrliche und damit auch eine Wirkung auf THG-Emissionen und den Endenergieverbrauch bedeuten. Dies umfasst zum einen neue Nutzergruppen im MIV wie beispielsweise Kinder oder mobilitätseingeschränkte Personen durch neue Mobilitätsdienstleistungen mit fahrerlosen Fahrzeugen oder sich ändernde Mobilitätsmuster durch ein steigendes Angebot an diesen Mobilitätsdienstleistungen. Obwohl der Fokus der Studie auf den Auswirkungen der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr liegen, wurde bei der Abschätzung auch die Entwicklung bei den anderen Verkehrsträgern bei der Analyse der verkehrlichen Wirkungen berücksichtigt.

Die technoökonomische Analyse in dieser Studie basiert auf einer umfangreichen Auswertung der als relevant betrachteten deutschen und englischsprachigen Fachliteratur zum Thema automatisiertes und vernetztes Fahren. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse mit Experten aus der Industrie und Wissenschaft im Zuge von zwei Fachworkshops diskutiert und validiert. Die Erkenntnisse dieses Prozesses flossen dabei zunächst in die Darstellung der evolutionären Entwicklung der Automatisierung über die fünf Stufen der Automatisierung und die dafür benötigten Fahrerassistenzsysteme mittels einer Roadmap bis zum Jahr 2050. Für die Abschätzung des Markthochlaufs wurde der Markteintritt des vollautomatisierten Fahrens (Stufe 4) in der Pkw-Oberklasse, bei den schweren Nutzfahrzeugen und Reisebussen ab dem Jahr 2025, für das fahrerlose und vernetzte Fahren (Stufe 5) ab dem Jahr 2035 angenommen, bei allen anderen Fahrzeugsegmenten mit einer zeitlichen Verzögerung von 4 bzw. 10 Jahren. Die technoökonomische Analyse lieferte detaillierte Erkenntnisse über die heutigen und zukünftig zu erwartenden Produktionskosten bzw. Endkundenpreise für die Ausstattung der Fahrzeuge mit einer bestimmten Automatisierungsstufe. Unter der Annahme realistischer Lernraten ergeben sich in Kombination mit den aus der Akzeptanzanalyse extrahierten Mehrpreisbereitschaften unterschiedliche Markthochlaufkurven für die betrachteten Fahrzeugsegmente in Deutschland. Die im Bereich der Kleinwagen/Kompaktklasse bei Pkw vorherrschende hohe Preissensibilität und der spätere Markteintritt im Vergleich zur Oberklasse verhindert eine schnelle Diffusion der Automatisierungsstufen. Trotz deutlicher Kostendegression unter der Annahme einer mittleren Lernrate ergab die Analyse für die Automatisierungsstufe 5 Aufpreise in Höhe von ca. 5.000 € pro Pkw im Jahr 2050. Zum Zeitpunkt des Markteintritts bei Pkw sind diese mit ca. 11.000 € nur im Bereich der Pkw Oberklasse und für die Nutzfahrzeuge für eine größere Käufergruppe interessant. Daraus resultierend ist die Durchdringung der Flotten im Straßenverkehr mit

den Automatisierungsstufen 4 und 5 mit 34 % bis 41 % des Bestandes für den Pkw, mit 42 % bis 44 % für den Lkw und 48 % bis 67 % für den Bus bis zum Jahr 2050 noch moderat. Nur maximal 7 % des Pkw-Bestandes sind anhand der Abschätzungen bis 2050 fahrerlos und damit mit Stufe 5 ausgestattet. Dieses bis zum Jahr 2050 noch eingeschränkte Marktpotenzial wirkt sich auch auf die THG-Emissionen und den EEV des Straßenverkehrs aus.

In ersten Feldtests hat sich gezeigt, dass bereits Fahrzeuge mit Automatisierung bis Stufe 3 deutlich effizienter sein können als nicht automatisierte Fahrzeuge. Die Ergebnisse der Bottom-up Analyse der Effizienzpotenziale in dieser Studie haben dies bestätigt und gezeigt, dass die Ausstattung und die Nutzung der Automatisierungsfunktionen die Effizienz aller Straßenfahrzeuge schon mit Einführung der Stufe 1 deutlich verbessert. Abhängig von der Verkehrsdichte, des befahrenen Straßentyps und des Fahrzeugsegments ergeben sich Potenziale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von maximal bis zu 42 %. Gemittelt über die Anteile der Fahrten auf den Straßentypen und den Verkehrsdichten kann die Automatisierung und Vernetzung den Kraftstoffverbrauch am einzelnen Fahrzeug immerhin noch um bis zu 17 % (für schwere Nutzfahrzeuge) bei Automatisierungsstufe 5 reduzieren. Die ermittelten primären Potenziale pro Automatisierungsstufe sind jedoch als Effizienzpotenzial zu verstehen, welches sich dann realisieren lässt, wenn die Nutzer der Fahrzeuge die Automatisierungsfunktionen auch in allen möglichen, spezifischen Anwendungsfällen benutzen. Übertragen auf die Anteile der Fahrzeuge mit Automatisierung aus dem Markthochlauf ergeben sich durch die primären Potenziale Einsparungen der THG-Emissionen bis 2050 um ca. 10 bis 10,4 Mt. CO_{2äq.}

Die Abschätzungen der Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr auf das gesamte Verkehrssystem (sekundäre Effekte) haben gezeigt, dass sich der Modal Split durch Kostenvorteile, Effizienzverbesserungen und Komfortgewinne zu Gunsten des Straßenverkehrs ändern kann, selbst wenn die Automatisierung für alle anderen Verkehrsmittel parallel in gleichem Umfang stattfindet. Die simulierte Entwicklung ist wahrscheinlich, wenn die Intensität der Nutzung und das Angebot an Sharingdienstleistungen für Pkw nicht deutlich steigt. Das für diese Studie entwickelte Szenario "Welt des Fahrzeugbesitzes" (Szenario 1) folgt dieser Annahme. Aus verkehrlichen Gesichtspunkten, vielmehr jedoch aus dem Blickwinkel der Umwelt- und Klimawirkung und des Flächenverbrauchs ist dieses Szenario weit von einem anzustrebenden ressourcenschonenden Zustand entfernt. An diesem Zustand vermag auch die Einführung der beiden Technologien der Automatisierung und der Vernetzung im Straßenverkehr wenig ändern. Die ohnehin schon hohen Anteile des MIV an den gesamten Fahrleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2050 erfahren in Szenario 1 noch eine Steigerung. Der Verlagerungseffekt fällt in Folge des nach oben begrenzten Markthochlaufs für die Automatisierungsstufen 1 bis 5 jedoch moderat aus. Zusätzlich wird die negative Wirkung durch die angenommene Automatisierung im Öffentlichen Verkehr und auf der Schiene zumindest leicht abgefedert. Zur Verdeutlichung der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr in Kombination mit deutlich zunehmenden Anteilen von Car- und Ridesharing im MIV, einer Optimierung der

Logistik im Straßengüterverkehr und einem flexibleren Öffentlichen Verkehr wurde das Szenario "Welt der Mobilitätsdienstleistungen" (Szenario 2) entwickelt.

Die Studie hat sich im Rahmen der sekundären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens auch mit Auswirkungen durch die Einführung neuer Nutzergruppen mit der Einführung des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) beschäftigt. Angesichts der bis zum Jahr 2050 noch geringen Marktanteile für die Stufe 5 wurde jedoch nicht von einer Steigerung der Fahrleistungen durch die Gruppe der Kinder und mobilitätseingeschränkter Personen ausgegangen. Die Steigerung der Verfügbarkeit des Pkw für Menschen ohne Zugang zu einem privaten Pkw wurde in Szenario 2 berücksichtigt. Die Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf die Vermeidung von Staus durch die Verbesserung der Verkehrssicherheit und der Reduktion der unfallbedingten Staus haben nur marginale Reduktionen der THG-Emissionen zur Folge.

Die Abschätzung der Gesamtwirkungen ergibt sowohl für Szenario 1 ("Welt des Fahrzeugbesitzes") als auch für Szenario 2 ("Welt der Mobilitätsdienstleistungen") substantielle Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen und des EEV im Vergleich zum Referenzszenario (REF). Während in Szenario 1 die Verlagerungseffekte von der Schiene auf die Straße die Wirkungen der primären Potenziale zumindest leicht abschwächen, verstärken sich die Wirkungen der primären Potenziale in Szenario 2 durch die Verknüpfung der Automatisierung und Vernetzung mit neuen, automatisierten und geteilten Mobilitätsdienstleistungen. Die gesamten THG-Emissionen sinken durch die Automatisierung und Vernetzung gegenüber REF um 7,6 % im Jahr 2050 ohne Berücksichtigung neuer Mobilitätskonzepte und um 11,1 % gegenüber REF im Jahr 2050 mit zunehmender Nutzung von und Angebot an automatisierten Sharingkonzepten. In absoluten Mengen bedeutet dies eine Reduktion der THG-Emissionen um 7,8 Mt. CO_{2äq.} gegenüber REF im Jahr 2050 in Szenario 1. Durch steigende Anteile des Car- und Ridesharing in Szenario 2 lassen sich die THG-Emissionen um 11,5 Mt. CO_{2äq.} gegenüber REF im Jahr 2050 verringern. Der EEV sinkt dadurch um 110 PJ im Jahr 2050 in Szenario 1 und um 174 PJ im Jahr 2050 in Szenario 2. Bereits im Jahr 2030 und damit vor der Einführung des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) im Straßenverkehr für beide Szenarien ergibt sich anhand der Berechnungen in dieser Studie für beide Szenarien ein Minderungspotenzial für THG-Emissionen in Höhe von 5,2 bis maximal 7,6 Mt. CO_{2äq.}

Die berechneten Effekte der Automatisierung und Vernetzung auf die THG-Emissionen und den EEV ergeben sich in beiden Szenarien nur durch Marktmechanismen unter der Annahme der Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Nutzung der Funktionen der Automatisierung. Mögliche Regularien wie beispielweise das Setzen von Standards für die Ausstattung von Straßenfahrzeugen mit bestimmten Automatisierungsfunktionen wurden nicht berücksichtigt, können das Ergebnis jedoch positiv beeinflussen. Je höher der Anteil der Fahrzeuge mit Automatisierungsstufen 4 und 5 in der gesamten Flotte, desto

größer die primären Potenziale. Die Einführung eines gesetzlichen Automatisierungsmindeststandards in Form einer ITS Direktive könnte diese Wirkung verstärken.

Gleichzeitig muss man jedoch angesichts der bekannten sekundären Effekte der Automatisierung von Straßenfahrzeugen darauf achten, dass eine Verlagerung vom öffentlichen Verkehr hin zum MIV im Personenverkehr und von der Schiene auf die Straße im Güterverkehr die positive Wirkung der primären Effekte nicht überlagert. Dafür bedarf es verschiedenster Steuerungsmechanismen, um geeignete Mobilitätskonzepte unterstützen. Dazu gehört Integration von automatisierten Fahrzeugen in eine nachhaltige Stadt- und Verkehrsplanung, der Aufbau von Kooperationen und Know-how bei Verwaltung und Entscheidungsträgern sowie die Anpassung eines rechtlichen und finanziellen Rahmens.

Eine fortschreitende Urbanisierung und Innenverdichtung, u. a. durch die gezielte Umnutzung von Stellplatzflächen bei gleichzeitiger dezentraler Konzentration von Siedlungsflächen entlang von Schienenstrecken kann die individuelle Verkehrsintensität deutlich reduzieren. Ein solches Szenario erfordert insbesondere eine zielgerichtete nachhaltige und integrierte Stadt- und Verkehrsplanung. Sowohl Automatisierung und Vernetzung als auch neuartige Mobilitätskonzepte sollten frühzeitig in die integrierte Stadt- und Verkehrsplanung eingebunden werden.

Eine entscheidende Hebelwirkung kann auch durch Anpassungen des Rechtsrahmens entstehen. So wird die Anpassung des Personenbeförderungsgesetzes als zentral für die Förderung neuer, automatisierter und geteilter Mobilitätskonzepte angesehen. Weiterhin kann die Vergabe von Konzessionen durch Kommunen eine strukturierte Einführung automatisierter Sharingkonzepte unterstützen. Die Einführung von Null-Emissions-Zonen oder von verstärkten Auflagen für die Umweltzonen kann die Nutzung moderner, umweltverträglicher Fahrzeuge fördern.

Die Bevorteilung von geteilten Flottenfahrzeugen im Parkraummanagement und in der Verkehrslenkung, beispielsweise durch gesonderte Autobahnspuren und der Umwidmung von Park- und Halteflächen für geteilte Fahrzeuge, kann die Nachfrage nach geteilten, automatisierten Mobilitätsangeboten verstärken. Damit die Vorteile des Ridesharings einen Einfluss auf das Mobilitätsverhalten haben, bedarf es darüber hinaus Kampagnen und Kommunikationsarbeit, welche die Vorteile dieser Mobilität in den Vordergrund stellen. Darüber hinaus sollten Kommunen die Rad- und Fußgängerinfrastrukturen vor dem Hintergrund einer gewünschten Intermodalität der Bevölkerung verbessern. Dies kann mitunter durch eine sukzessive Umverteilung des Straßenraumes zugunsten des Fuß- und Radverkehrs erfolgen. Auch eine zentrale diskriminierungsfreie Mobilitätsplattform kann die Intermodalität fördern. Hier wäre es sinnvoll, dass Wege nach Nutzerpräferenz (kurze Wege, Preis, Emissionen) ausgewählt werden können. Die Verknüpfung von Personen- und Güterverkehr bietet Chancen zur Optimierung von Verkehrsflüssen. Das Teilen von Fahrzeugen zum Personen- wie auch Gütertransport ist insbesondere in Räumen oder zu Zeiten mit geringer Nachfrage

nach Transportleistungen sinnvoll. Durch verbesserte Besetzungsgrade im MIV und Beladungsfaktoren im Straßengüterverkehr können die Fahrleistungen zusätzlich reduziert werden und die Wirkung auf THG-Emissionen und den EEV verstärkt werden.

Der ÖPNV steht angesichts der Effekte der Automatisierung auf der Straße vor einer großen Herausforderung. Werden die Chancen der Automatisierung im Öffentlichen Verkehr frühzeitig erkannt, dann kann der Öffentliche Verkehr auch zukünftig als Rückgrat eines leistungsfähigen Verkehrssystems bestehen bleiben. Der Ausbau eines flexiblen und leistungsfähigen Öffentlichen Verkehrs ist daher ein zentraler Baustein zur Vermeidung des durch die Automatisierung im Straßenverkehr entstehenden Verlagerungseffekts. Dies betrifft zum einen den klassischen Linienbetrieb, bei dem die Gefäßgrößen an die Nachfrage angepasst und somit ein kosteneffizienter Öffentlicher Verkehr entstehen kann. Im Bereich des Busverkehrs ist diese Anpassung durch den Einsatz von Kleinbussen bereits heute einfacher als im schienengebundenen ÖPNV. Zum anderen ermöglicht die Automatisierung des Öffentlichen Verkehrs auch neben dem klassischen Linienbetrieb die Einführung kosteneffizienter, flexiblerer Konzepte, die besonders in weniger dicht besiedelten Gebieten das Aufrechterhalten des ÖPNV ermöglichen. Bedarfsgerechte Zubringerverkehre können neben Vorrangschaltungen den ÖPNV beschleunigen und durch sinkende Fahrtzeiten den Modal Anteil des ÖPNV steigern. Darüber hinaus können Verbesserungen des Komforts, der Zuverlässigkeit und der Nutzerfreundlichkeit der Fahrzeuge die Attraktivität des ÖPNV verstärken. Die Vereinfachung von Bezahl- und Abrechnungsvorgängen könnte die Attraktivität zusätzlich steigern und für eine vermehrte Nutzung der Angebote sorgen. Kommunen und Verkehrsbetriebe sorgen bereits frühzeitig für eine Integration weiterer Flottenanbieter in ihr ÖPNV-Angebot.²⁰ So können sie weiterhin über den Datenzugang den Verkehr bedarfsgerecht und zielgerichtet steuern. Die Verkehrslenkung des Öffentlichen Verkehrs würde damit in einer Hand bleiben.

Im Bereich des Güterverkehrs gilt es aus Gesichtspunkten der Energieeffizienz und der THG-Emissionen ebenfalls eine zu starke Verlagerung von der Schiene auf die Straße durch die Effekte der Automatisierung zu vermeiden. Grundvoraussetzung für einen auch zukünftig wettbewerbsfähigen Schienengüterverkehr ist ein technischer Wandel auch auf der Schiene hin zur Digitalisierung und Automatisierung. Dazu zählt nicht nur die Umstellung auf einen fahrerlosen Betrieb des rollenden Materials, sondern auch die Einführung automatisierter multimodaler Umschlagsterminals, die idealerweise für jegliche Art von Transporten kompatibel sind.

²⁰ Positive Erfahrungen wurden mit der Regulierung der Mobilitäts-Anbieter-Kooperation gemacht, wie das Beispiel switchHH zeigt.

8 Anhang

8.1 Abkürzungen

ACC	Adaptive Cruise Control
ACEA	Verband der Europäischen Automobilhersteller
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CO _{2äq.}	CO ₂ äquivalente Emissionen
DDT	Dynamic Driving Task
EEV	Endenergieverbrauch
FAS	Fahrerassistenzsystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
HBEFA	Handbuch der Emissionsfaktoren
IML	Fraunhofer-Institut für Materialforschung und Logistik
IODD	Intended Operational Design Domain
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
ITS	Intelligent Transport Systems
KBA	Kraftfahrtbundesamt
LiDAR	Light Detection and Ranging
LKA	Lane Keeping Assist
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge unter 3,5 t. zGG.
MaaS	Mobility as a Service

Mt	Millionen Tonnen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
ODD	Operational Design Domain
OEDR	Object and Event Detection and Response
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PCC	Predictive Cruise Control
PHEV	Plug-in hybridelektrisches Fahrzeug
PJ	Petajoule
RaDAR	Radio Detection and Ranging
REF	Referenzszenario
SAE	Society of Automotive Engineers
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge über 3,5 t. zGG.
StVG	Straßenverkehrsgesetz
SUV	Sports Utility Vehicle
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
TOR	Take Over Request
V2I	Vehicle-to-Infrastructure Kommunikation
V2V	Vehicle-to-Vehicle Kommunikation

VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VP2030	Verkehrs-Verflechtungsprognose 2030
WÜ	Wiener Übereinkommen
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

8.2 Glossar zu relevanten Technologien

Zwecks Einordnung der Fahrerassistenztechnologien (FAS) und Übersicht der darin enthaltenen Funktion werden nachfolgend die in der Studie berücksichtigten FAS-Technologien jeweils kurz in alphabetischer Reihenfolge erläutert. Teilweise benutzen die Hersteller unterschiedliche Terminologien für identische FAS-Technologien. In solchen Fällen wurden die in der Fachliteratur benutzten Terminologien verwendet. Die Beschreibungen beruhen auf einer Literaturrecherche und geben den Konsens derer wieder.

Adaptive Cruise Control (ACC)

LEVEL 1. Adaptive Cruise Control (ACC) ist eine Weiterentwicklung der klassischen Geschwindigkeitsregelanlage (Cruise Control). Das ACC-System überwacht den Bereich vor dem Fahrzeug und passt eine vom Fahrer gesetzte Sollgeschwindigkeit (zwischen 30 und 200 km/h) an langsamer vorausfahrende oder einscherende Fahrzeuge an, sodass ein Mindestabstand eingehalten wird (Reif 2010, S. 167–169, S. 172; Bartels et al. 2015a, S. 50).

Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung

LEVEL 0. Fahrzeuge in Funkreichweite schließen sich zu einem Ad-hoc-Netz zusammen und tauschen Daten zu ihrer Position, zur aktuellen Geschwindigkeit und andere Sensorinformationen aus (Zimmermann und Schmidgall 2014, S. 484–485). Durch automatisiert ausgegebene, spurgenaue Geschwindigkeitsempfehlungen abhängig von der vorausliegenden Verkehrssituation wird eine Harmonisierung der Fahrprofile und geringere Motor-drehzahlen infolge einer optimierten Gangwahl erreicht (Beiker und Meyer 2014, S. 108–110; Bansal et al. 2013, S. 42; Orfila 2011, S. 3).

Automatisiertes Parken

LEVEL 2. Das System übernimmt die Längs- und Querführung während des Parkvorgangs, solange der Fahrer den Parkvorgang innerhalb oder außerhalb des Fahrzeugs aktiv überwacht; dies wird bspw. über Drücken eines Schalters am Autoschlüssel oder Berühren einer Schaltfläche in einer speziellen Smartphone-Anwendung überprüft (Hakuli et al. 2015, S. 849; ERTRAC 2015, S. 11).

Autonomes und vernetztes Fahren

LEVEL 5. Autonome Fahrzeuge erbringen eine Transportaufgabe zwischen einem festgelegten Start und Ziel komplett selbstständig; die Menge der möglichen Start- und Zielpunkte auf einem Straßennetz kann dabei auf ein gewisses Gebiet beschränkt sein (Bartels et al. 2015a, S. 54–55). Für die Optimierung des Verkehrsverhaltens ist die Kooperation mit motorisierten und nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern genauso nötig wie die Vernetzung

mit anderen Fahrzeugen zur Ergänzung der bordeigenen Sensorik (Matthaei et al. 2015, S. 1142).

Baustellenassistent

LEVEL 1. Der Baustellenassistent unterstützt den Fahrer im Baustellenbereich bei der Querführung, indem es ein korrigierendes Lenkmoment zur Spurhaltung aufbringt und vor einem zu geringen Abstand zu seitlich versetzten Fahrzeugen warnt (Bartels et al. 2015a, S. 51).

Highway-Assist

LEVEL 2. Der Highway-Assist ist eine Kombination aus einem ACC (die Entwicklungsstufe des eingesetzten ACC ist herstellerabhängig) und einem LKA Typ III, wobei der Einsatzbereich auf Autobahnen und gut ausgebaute Landstraßen beschränkt ist (Bartels et al. 2015a, S. 52). Analog zur Veröffentlichung der Bundesanstalt für Straßenwesen (2012, S. 9) wird für die Studie von einem Geschwindigkeitsband zwischen 60 km/h und 130 km/h ausgegangen, in dem die Technologie eingesetzt werden kann.

Highway-Chauffeur

LEVEL 3. Der Highway-Chauffeur stellt die Weiterentwicklung des Highway-Assists dar und umfasst neben der Bewältigung von Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen auch die Auf-/Abfahrten und Autobahnkreuze (Bartels et al. 2015a, S. 53; ERTRAC 2015, S. 11). Im Rahmen der Studie werden (wie durch den Highway-Assist auch) Geschwindigkeiten unter 60 km/h nicht abgedeckt.

Highway-Pilot

LEVEL 4. Der Highway-Pilot bildet die höchste Entwicklungsstufe der Highway-Technologien ab, bei dem zum Funktionsumfang des Highway-Chauffeurs der automatische Spurwechsel hinzukommt (Bartels et al. 2015a, S. 54). Die Technologie ist mit dem Platooning kombinierbar, wobei nur das Führungsfahrzeug den Highway-Pilot nutzt (ERTRAC 2015, S. 11). Die Beschränkung auf Geschwindigkeiten oberhalb von 60 km/h bleibt bestehen.

Lane Keeping Assist (LKA)

LEVEL 1. Der Lane Keeping Assist (LKA) steht üblicherweise erst bei Geschwindigkeiten über 60 km/h zur Verfügung, wodurch komplexe Markierungssituationen im innerstädtischen Bereich vermieden werden.

LKA des Typs II unterstützen den Fahrer ständig bei der Querführung, ggf. ist aber ein verstärkendes Lenkmoment durch den Fahrer nötig, um das Fahrzeug in der Fahrstreifenmitte zu halten (Bartels et al. 2015b, S. 955). Der LKA Typ III kann das Fahrzeug selbstständig in der Spur halten, ist aber aktuell noch nicht verbreitet (Bartels et al. 2015a, S. 50).

Onboard-Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting

LEVEL 0. Ein fest installiertes Navigationssystem übernimmt die Ortung des Fahrzeugs und bestimmt unter Optimierungskriterien wie einer kurzen Fahrzeit oder Fahrstrecke eine Route. Sowohl beim Initialrouting als auch während der Zielführung werden Echtzeitinformationen zur Verkehrslage (Verkehrsdichte, Verkehrsbehinderungen, Wetterlage) berücksichtigt und die Route ggf. angepasst (Behrens et al. 2015, 1053–1054; 1057-1059).

Parkassistent

LEVEL 1. Der Fahrer bedient während des Einparkvorgangs in Längs- und Querparklücken die Kupplung sowie das Gas- und Bremspedal, während der Parkassistent die Querführung übernimmt (Hakuli et al. 2015, S. 847–848; Bartels et al. 2015a, S. 52).

Predictive Cruise Control (PCC)

LEVEL 1. Die klassische Geschwindigkeitsregelanlage (Cruise Control) wird um Echtzeit-Fahrzeug- und Navigationsdaten ergänzt (Behrens et al. 2015, S. 1064). Unter Berücksichtigung der Topografie und weiterer Streckendaten wie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf der vorausliegenden Strecke werden die Geschwindigkeit und die Schaltzeitpunkte optimiert. Einige Hersteller kombinieren die Streckeninformationen mit den Umfeldinformationen des ACC (Lederer et al. 2014, S. 851–852).

Platooning

LEVEL 4. Mehrere Fahrzeuge (Pkws und/oder Lkws) folgen einander in geringem Abstand (üblicherweise zwischen 5 und 10 m) und sind in diesem Konvoi über eine sog. elektronische Deichsel miteinander gekoppelt. Der Fahrer des Führungsfahrzeugs übernimmt die Längs- und Querführung (oder nutzt den Highway-Pilot), die Systeme der Folgefahrzeuge kommunizieren mit dem System des Führungsfahrzeugs sowie untereinander und übertragen die Regelung des Führungsfahrzeugs zeitverzögert auf sich selbst (Beiker und Meyer 2014, S. 108; Bartels et al. 2015a, S. 53).

Portables Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting

LEVEL 0. Die Navigation erfolgt entweder über ein nicht fest im Fahrzeug verbautes Gerät, welches analog zum Onboard-Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting arbeitet, oder über ein Smartphone, auf dem eine Navigationsanwendung installiert ist. Diese Anwendung gliedert die dynamische Routensuche auf einen externen Server aus und übernimmt nur die Ortung, Kartendarstellung und Zielführung (Behrens et al. 2015, S. 1061).

Traffic Jam-Assist

LEVEL 2. Der Traffic Jam-Assist baut auf einem ACC LSF und einem LKA Typ III auf und bewältigt die Längs- und Querführung auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstraßen bei Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h in Stausituationen (Fochler et al. 2015, 999; Bartels et al. 2015a, S. 51).

Traffic Jam-Chauffeur

LEVEL 3. Als nächste Entwicklungsstufe des Traffic Jam-Assists kann der Traffic Jam-Chauffeur herstellerabhängig auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstraßen in Stausituationen auch Spurwechsel durchführen (Fochler et al. 2015, S. 1002–1003; Bartels et al. 2015a, S. 52–53).

Traffic Jam-Pilot

LEVEL 4. Der Traffic Jam-Pilot stellt die höchste Entwicklungsstufe der Traffic Jam-Technologien dar. Die Beschränkung auf Geschwindigkeiten unterhalb von 60 km/h in Stausituationen bleibt bestehen (Bartels et al. 2015a, S. 54).

Urban Pilot

LEVEL 4. Als Ergänzung zum Traffic Jam- und Highway-Pilot übernimmt die Technologie die Längs- und Querführung im Innenstadtbereich. Der genaue Funktionsumfang hinsichtlich der bewältigbaren Verkehrsdichten ist unbekannt. Aufgrund der Komplexität und Dynamik des Stadtverkehrs und den daraus resultierenden hohen Anforderungen an die Überwachung durch den Fahrer wird nicht davon ausgegangen, dass Vorgängertechnologien der Automatisierungsstufen 2 und 3 (Urban Assist oder Urban Chauffeur) existieren werden. Es sind gegenwärtig keine Feldversuche oder Absichten der Fahrzeughersteller/–zulieferer bekannt, diese Technologie in Serienfahrzeugen anzubieten.

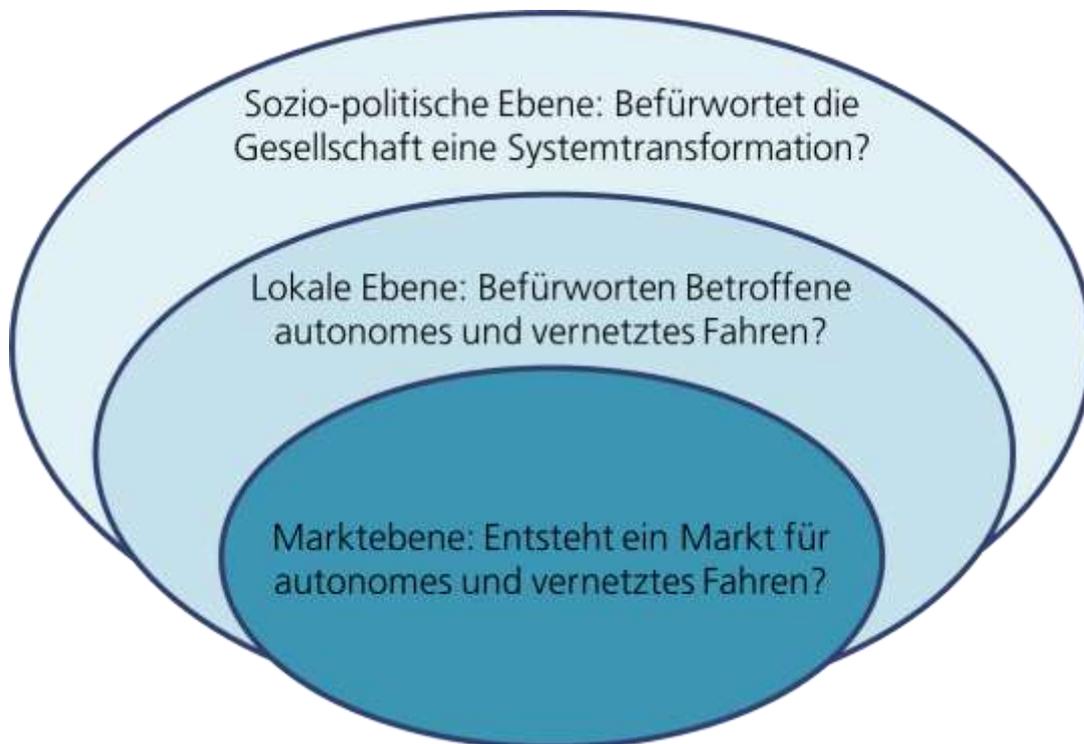
Valet Parking

LEVEL 4. An einer definierten Übergabestelle initiiert der Nutzer von außerhalb des Fahrzeugs die Fahrt zum Parkplatz und den Parkvorgang, wobei er diese nicht überwachen muss. Bei Anforderung durch den Nutzer parkt das Fahrzeug selbstständig aus und fährt an die Übergabestelle; ab hier übernimmt der Nutzer die Fahrzeugsteuerung (Auer et al. 2015, S. 849; Bartels et al. 2015a, S. 53).

8.3 Akzeptanzanalyse

8.3.1 Der Akzeptanzbegriff

Für den Zweck der Analyse wird der Akzeptanzbegriff weiter differenziert und aufbauend auf Wüstenhagen et al. (2017) wird zwischen drei Ebenen der Akzeptanz unterschieden: sozio-politische, lokale und Marktakzeptanz (siehe nachfolgende Abbildung). Die sozio-politische Ebene spiegelt das allgemeine Klima in der Gesellschaft gegenüber einer Innovation oder Technologie, hier dem automatisierten Fahren, wieder, d. h. typische Meinungen, die vertreten werden, oder die Färbung der Mediendiskussion. Dies spiegelt sich in Einstellungen und Äußerungen auch von Bürgerinnen und Bürgern z. B. in Bevölkerungsbefragungen; es spielen hier aber insbesondere gesellschaftliche Akteure und Meinungsführer eine wichtige Rolle. Hier geht es jedoch noch nicht um persönliche Betroffenheit, welche erst auf den weiteren Ebenen relevant wird. Lokale Akzeptanz spiegelt wider, inwieweit bspw. andere Verkehrsteilnehmer automatisierte Fahrzeuge positiv oder negativ gegenüberstehen und diese als Teil des Verkehrssystems bereit sind hinzunehmen oder zu begrüßen. Marktakzeptanz ist eng verbunden mit der tatsächlichen Technologiediffusion und umfasst auf Akteursseite zum einen den Nutzer bzw. Kunden, der ein automatisiertes Fahrzeug anschafft oder entsprechende Services wie Ride-Sharing nutzt. Marktakzeptanz bezieht sich aber auch auf die Angebotsseite, d. h. inwieweit Hersteller und Händler entsprechende Produkte auf den Markt bringen.



Quelle: Eigene Abbildung basierend auf (Wüstenhagen et al. 2007)

Abbildung 57: Betrachtungsebenen der Akzeptanz

8.3.2 Vorgehensweise

In den vergangenen Jahren wurden in Deutschland, aber auch im internationalen Raum sehr viele Arbeiten zum Thema Akzeptanz von automatisierten Fahrzeugen veröffentlicht. Diese stammen zum einen aus der Wissenschaft; zum anderen haben aber auch bereits viele Verbände oder Vereine sowie Unternehmen aus dem Automobilbereich oder Beratungs- und Marktforschungsinstitute eine Reihe von Akzeptanzuntersuchungen durchgeführt.

Häufig ist hier jedoch eine unscharfe Begriffsverwendung festzustellen; so werden in vielen Fällen nicht die konkreten Automatisierungsstufen benannt, die untersucht wurden. Zudem fehlt bisher eine systematische Zusammenstellung der wichtigsten Erkenntnisse der Studien. In diesem Bericht soll daher ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zur individuellen und gesellschaftlichen Akzeptanz automatisierten Fahrens erfolgen und die wichtigsten Akzeptanzfaktoren herausgearbeitet werden. Ausgangspunkt bildet dabei Deutschland, es werden jedoch auch internationale englischsprachige Publikationen ergänzend herangezogen.

Dafür wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst erfolgte eine systematische Literaturrecherche (Zeitraum: Januar bis März 2017) im deutschen und internationalen Raum zu individueller bzw. Nutzerakzeptanz (Sicht potenzieller Nutzer auf die Technologie)²¹ und gesellschaftlicher Akzeptanz des automatisierten Fahrens. Der Fokus liegt auf dem Personenverkehr und innerhalb diesem werden sowohl Studien im Bereich Individual- als auch Kollektivverkehr (öffentlicher Verkehr, einschließlich Sharing-Konzepte) betrachtet. Es wurden nur Akzeptanzstudien zu den Stufen 2-5 (Definition des BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015) berücksichtigt, d. h. teil-/hoch- und vollautomatisiertes und fahrerloses Fahren. Studien zu automated driver assistance systems (ADAS) sind damit nicht Gegenstand der Analyse. Bei der Recherche wurden vorwiegend Studien aus Deutschland gesucht, zusätzlich wurde internationale wissenschaftliche Literatur betrachtet. Da sich die Technologie schnell weiterentwickelt, erfolgte eine Beschränkung auf Studien aus den vergangenen fünf Jahren (2012 bis Anfang 2017).

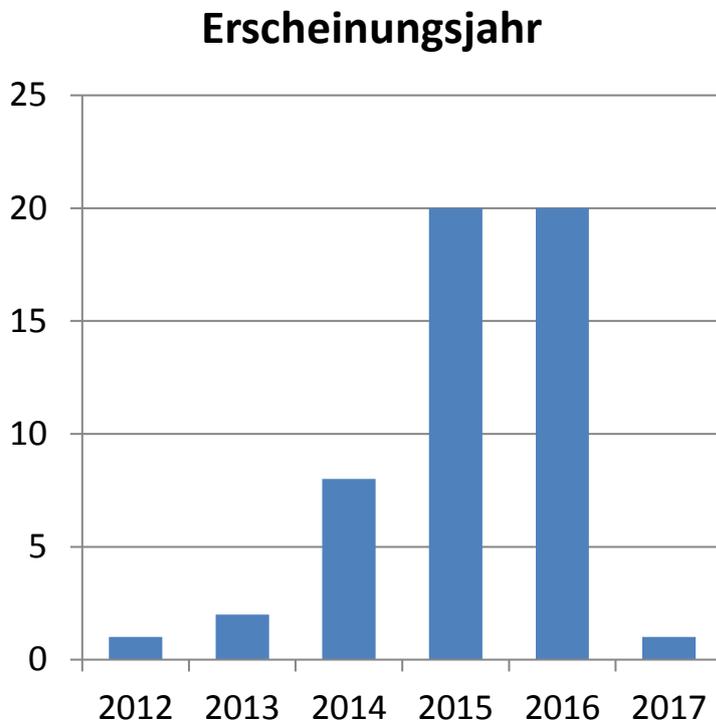
8.3.3 Stand der Forschung zur Akzeptanz des automatisierten Fahrens

8.3.3.1 Überblick über die vorliegende Literatur

Insgesamt wurden 52 Arbeiten, davon 49 Studien, als relevant entsprechend der obigen Ausführungen identifiziert. Der überwiegende Teil sind englische (34 Stück, 67 %) Publikationen, 18 Arbeiten sind auf Deutsch (33 %). Von den Studien verwenden 21 (40 %) Daten

²¹ Studien, die die Mensch-Maschine-Interaktion untersuchen, wurden außen vor gelassen.

aus Deutschland; bei den verbleibenden handelt es sich um internationale, auch ländervergleichende Arbeiten überwiegend aus der EU und den USA, aber auch aus Asien oder Australien.

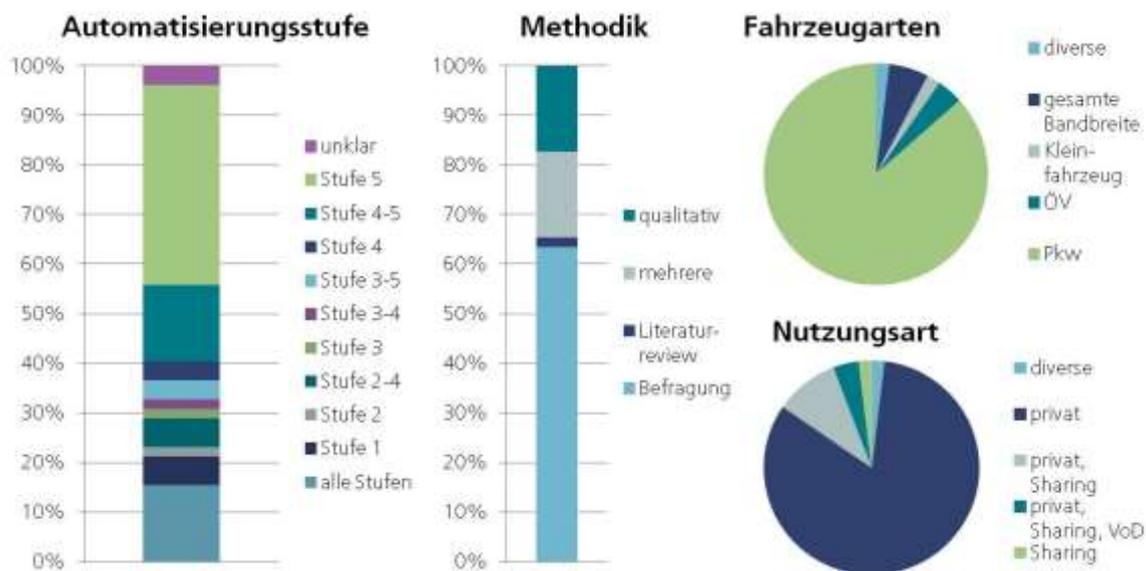


Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 58: Erscheinungsjahre der betrachteten Arbeiten

Eine Auswertung über die Erscheinungsjahre der Arbeiten verweist auf eine zunehmende Anzahl in den jüngeren Jahren (siehe Abbildung 58). Es ist zu beachten, dass die Recherche in den ersten Monaten 2017 abgeschlossen wurde und insofern den Publikationsstand dieses Jahres nicht vollständig abbildet. Bei den betrachteten Arbeiten handelt es sich zu gleichen Teilen (je 42 %) um sog. graue Literatur, also Projektberichte, Broschüren usw., bzw. um wissenschaftliche Zeitschriften-Publikationen, die einem Review-Prozess durch andere Wissenschaftler durchlaufen haben. In geringerem Umfang (12 %) konnten auch relevante Beiträge in Herausgeberbänden identifiziert werden.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick zu den Schwerpunkten der betrachteten Arbeiten.



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 59: Struktur der identifizierten Arbeiten

Mit Blick auf die Automatisierungsstufe zeigt sich, dass viele Arbeiten entweder mehrere Automatisierungsstufen berücksichtigen oder diese unscharf beschreiben, so dass sich diese allenfalls eingrenzen lassen, aber nicht präzise bestimmen. Insgesamt beschäftigt sich die Akzeptanzforschung jedoch stärker mit hohen Ausbaustufen, insbesondere fahrerlosem Fahren (75 % fokussieren oder umfassen Stufe 5). Typischerweise wird als Erhebungsmethodik eine Fragebogen-Befragung durchgeführt (> 60 %), es kommen jedoch auch qualitative Verfahren wie Interviews und Fokusgruppen zum Einsatz. Mit Blick auf die Fahrzeugarten, steht der Pkw im Mittelpunkt, nur sehr wenige (< 25 %) betrachten andere Fahrzeugarten wie Kleinfahrzeuge oder ÖV. Dementsprechend überwiegt auch das Szenario der Privatnutzung im MIV (> 85 %).

8.3.3.2 Motorisierter Individualverkehr

Im Folgenden wird nun zunächst die Literatur, diejenigen Akzeptanzstudien betrachtet, die die Wahrnehmung, Einstellungen und Nutzungsabsichten zu automatisierten Pkw untersuchen. Dabei wird von einer alleinigen Nutzung bzw. dem Besitz des Pkw ausgegangen, was zum Teil in den Studien jedoch nicht explizit erwähnt wird, aber impliziert wird. Anschließend erfolgt eine Aufarbeitung der Studien zu anderen Verkehren.

Die vorliegenden Befunde wurden danach unterteilt, inwiefern sie sich implizit oder explizit eher auf die sozio-politische Akzeptanz beziehen, d. h. nutzungs-unspezifische Meinungen, Wahrnehmungen und Einschätzungen betrachten, oder eher auf Marktakzeptanz, d. h. beabsichtigte Nutzung oder Kaufabsichten bzw. Variablen, die diese Absichten erklären. Die dritte, oben identifizierte Akzeptanzebene der lokalen Akzeptanz wird in Studien in dieser

Form nur in wenigen einzelnen Fällen am Rande aufgegriffen. Insofern werden diesbezügliche Fragen erst im Diskussionskapitel nochmals aufgegriffen.

Sozio-politische Akzeptanz für automatisiertes Fahren

In diesem Abschnitt wird zunächst auf Bekanntheit und dann auf allgemeine Akzeptanz, unabhängig von einer tatsächlichen Nutzung, eingegangen. Dann folgt der Bezug zu Studien, die gesellschaftliche Leitbilder einbeziehen und abschließend wahrgenommene Vor- und Nachteile.

Eine Voraussetzung für die Akzeptanz einer neuen Technologie stellt die **Bekanntheit** dar. Diese haben mehrere Studien in der Allgemeinbevölkerung untersucht. Die repräsentative Continental Mobilitätsstudie 2013 ergab, dass 67 % der befragten Deutschen (n=1.000) bereits einmal vom *automatisierten Fahren* gehört haben (Continental AG 2013). Ähnliche Ergebnisse erzielten Fraedrich et al. (2016) und Fraedrich und Lenz (2016b) mittels einer Befragung einer repräsentativen Stichprobe von 1.000 Personen in Deutschland. 57 % geben an, sich für automatisiertes Fahren zu interessieren, wobei 44 % aussagen, keinerlei Kenntnisse über das Thema zu haben, und nur fünf % bezeichnen sich selbst als Experten. In englischsprachigen Ländern ist die Bekanntheit der Technologie ähnlich hoch: Schoettle und Sivak (2014) erheben repräsentative Online-Stichproben in USA, UK und Australien (je ca. 500 Personen). 60-70 % der Befragten geben an, schon von automatisiertem Fahren gehört zu haben.

Eine Reihe von Studien befasst sich mit der **allgemeinen Akzeptanz** der Technologie, d. h. ob bzw. inwieweit diese grundsätzlich als nützlich oder begrüßenswert bewertet wird. In der Studie von Bazilinskyy et al. (2015) wurden freie Kommentare innerhalb von drei Befragungen mit großen internationalen Gelegenheitsstichproben ausgewertet. Die größten Untergruppen bilden grundsätzliche positive bzw. negative Kommentare vor spezifischeren Einzelaspekten, wobei deutlich mehr Kommentare positiv ausfallen. Befragte aus wohlhabenderen Ländern sind dabei kritischer. Auch die Arbeit von Schoettle und Sivak (2014) ergab höhere Zustimmungs- als Ablehnungsraten: 50-60 % stehen der Innovation positiv gegenüber, nur kleine Gruppen von rund 15 % sehen sie negativ. Und auch in der Continental Mobilitätsstudie 2013 halten über die Hälfte, 53 %, der Befragten *automatisiertes Fahren* für einen „nützlichen Fortschritt“ (Continental AG 2013). 52 % macht diese Entwicklung dagegen eher Angst (im Jahr 2015 (n = 1.800) sind dies nur noch 43 %). Kyriakidis et al. ermittelten mit einer Befragung zur Akzeptanz unterschiedlicher Automatisierungsstufen mit 4.886 Teilnehmern aus 109 Ländern die wahrgenommene Einfachheit der Nutzung der Technologie: Automatisiertes Fahren wird als leichter bewertet als nicht automatisiertes Fahren, d. h. das vollständige Steuern des Fahrzeugs durch den Fahrer. Gleichzeitig werden aber das teil- und hochautomatisierte Fahren als schwieriger als das manuelle Fahren bewertet. Eine Studie des World Economic Forum in Zusammenarbeit mit der Boston Consulting Group (2015) hat auf Basis von internationalen Befragungsdaten die Erwartung an

die Ausgestaltung der Technologie untersucht: Bürgerinnen und Bürger erwarten, dass selbstfahrende Autos alternative Antriebe (Hybrid, Strom) haben werden.

Die allgemeine Akzeptanz kann in Abhängigkeit unterschiedlicher Personenmerkmale unterschiedlich ausfallen: Simon et al. (2015) fanden mit einer Online-Befragung von 78 deutschen Autofahrern heraus, dass ältere Fahrer, Personen, die lange den Führerschein besitzen und Personen mit hohen Jahresfahrleistungen negativere Einstellungen (Gesamtscore aus mehreren Items, wie bspw. „nützlich“ oder „einschläfernd“) gegenüber vollautomatisiertem Fahren haben als die jeweiligen Gegengruppen. Eine repräsentative Detecon-Befragung (n = 643) ergab, dass Personen ohne eigenen Pkw *autonomes Fahren* als nützlicher als solche mit Pkw im Haushalt bewerten (Detecon Consulting 2016).

Einige Studien haben die allgemeine Akzeptanz in Abhängigkeit unterschiedlicher Einsatzszenarien der Technologie analysiert. Als besonders nützlich sehen die Befragten autonomes Fahren auf der Autobahn und beim Parken (rund 50 %), 19 % sehen keinerlei Nützlichkeit (ACV Automobil-Club Verkehr 2015). Ähnliche Ergebnisse erzielt die Continental-Studie: Hinsichtlich der Bewertung der Nützlichkeit, des Komforts, der Zuverlässigkeit und der technischen Reife *automatisierter Fahrzeuge* sind die deutschen Befragten in Bezug auf das Fahren auf Autobahnen skeptisch oder unentschieden, bei dem Durchfahren von Autobahnbaustellen werden diese Aspekte dagegen positiver beurteilt (Continental AG 2013). Es wird auch die Frage untersucht, ob fahrerlose Fahrzeuge getrennt vom regulären Verkehr geführt werden sollten, was 38 % befürworten, aber 46 % nicht für notwendig halten (Howard und Dai 2014). Die Akzeptanz des Einsatzes in gemischten Verkehren wird auch in der Studie von London School of Economics und Goodyear untersucht (2016): Ein Drittel der Befragten sind kritisch, was gemischte Verkehre aus automatisierten und menschlich gesteuerten Fahrzeugen angeht und 60 % stimmen zu, dass Maschinen der gesunde Menschenverstand fehlt+, um mit Menschen zu interagieren.

Einige Arbeiten beschäftigen sich mit **gesellschaftlichen Leitbildern und der Einordnung der Technologie in die Gesellschaft**. Berscheid (2014) beschreibt ausgehend von einer Medienanalyse, dass automatisiertes Fahren in einem Spannungsfeld mit dem heute dominanten gesellschaftlichen Bild von Autofahren steht, indem sich das bisherige Verhältnis von Fahrer und Fahrzeug umkehrt und das Fahrzeug den aktiven handelnden Part übernimmt. Hieraus ergeben sich offene Fragen bezüglich der Akzeptanz und Hinweise, dass eine Verbreitung des automatisierten Fahrens mit einem veränderten Bild des Automobils eingehen würde. Ähnlich zeigen dies auch Fraedrich und Lenz auf, die auf Basis von Kommentaren zu Medienartikeln das Spannungsfeld zwischen (selbstgesteuertem) Fahrspaß und bequemen Transportkomfort herausarbeiten, wobei ersteres in den Kommentaren präferiert wurde (Fraedrich und Lenz 2014b, 2016a, 2014a).

Viele Studien betrachten die **wahrgenommenen Vor- und Nachteile** der Technologie. Als wichtiger Vorteil des automatisierten Fahrens wird eine höhere Sicherheit identifiziert, indem durch die Nutzung der Systeme weniger Unfälle entstehen (Schoettle und Sivak 2014).

In der Studie des Automobil-Club Verkehr auf Basis einer Befragung von > 1.000 Personen aus Deutschland (bevölkerungsrepräsentativ nach Alter, Geschlecht und Region) (ACV Automobil-Club Verkehr 2015) glauben 34 %, dass automatisierte Fahrzeuge sicherer fahren als herkömmliche, 39 % bezweifeln dies, 28 % antworten mit ‚weiß nicht‘. Frauen antworten in dieser Studie dabei skeptischer als Männer. Auch die Arbeiten von Fraedrich und Lenz auf Basis von Online-Kommentaren zu Medienberichten in Deutschland und den USA über die Straßenzulassung von automatisierten Fahrzeugen in Kalifornien (Fraedrich und Lenz 2014b, 2016a, 2014a) haben ergeben, dass die Technologie aus Sicht der Befragten für sicher gehalten wird (vgl. auch Bansal et al. 2016, die 347 Einwohner von Austin (Texas) befragt haben). Auch in der ADAC-Befragung wird als häufigstes Pro-Argument eine erhöhte Sicherheit genannt (ADAC 2016). Die DEKRA- und Continental-Studien, die länderübergreifend die Akzeptanz der Technologie betrachtet haben (Deutschland, USA, Neuseeland, Frankreich), ermittelten ebenfalls erhöhte Sicherheit als wichtigen Vorteil der Technologie (DEKRA e.V. 2015; Continental AG 2015). Mit deutlichen Sicherheitseffekten wird jedoch erst dann gerechnet, wenn die Mehrzahl der Fahrzeuge automatisiert fährt (ADAC 2016). Ähnliche Ergebnisse erzielte die Studie von Trommer et al. (2016): Mittels jeweils drei Fokusgruppen in den Städten Berlin, San Francisco und Shanghai mit drei Nutzergruppen wurden die erwarteten Eigenschaften und die Nutzungsabsichten für fahrerlose und vollautomatisierte Fahrzeuge erhoben (vgl. auch Howard und Dai 2014; Pettersson und Karlsson 2015 für Kalifornien bzw. Dänemark).

Ein weiterer, sehr häufig genannter Vorteil der Technologie ist Bequemlichkeit und Komfort sowie die Reduktion von Stress beim Autofahren (ACV Automobil-Club Verkehr 2015; Fraedrich und Lenz 2014a, 2014b, 2016a; Howard und Dai 2014). In der Studie von Trommer et al. stellt Stressreduktion ein wichtiger Vorteil aus Sicht der deutschen und amerikanischen Teilnehmer dar (Trommer et al. 2016), und auch die Mehrheit der Befragten der Continental-Studie versprechen sich durch die Technologie Entlastung in monotonen oder stressigen Fahrsituationen (Continental AG 2015). Eine länderübergreifende Studie vom World Economic Forum ermittelte, dass der Hauptvorteil länderübergreifend im selbstständigen Parkplatzen gesehen wird. Erst danach kommt die Möglichkeit, Nebentätigkeiten auszuführen (World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015).

Weitere Vorteile der Technologie können aus Sicht der Befragten die Reduktion von Staus sein (DEKRA e. V. 2015), die Sicherstellung von Mobilität im Alter (ACV Automobil-Club Verkehr 2015), ein besseres Zeitmanagement sowie soziale Aspekte, wie eine bessere Kommunikation mit den Mitfahrern (Pettersson und Karlsson 2015). Zudem sind aus Sicht der Befragten Umweltvorteile, etwa durch effizienteres Fahren, vorstellbar oder auch niedrigere Versicherungsprämien (Schoettle und Sivak 2014).

Neben den genannten Vorteilen und erwarteten positiven Eigenschaften ermittelten die Studien jedoch auch eine Reihe von negativen Aspekten und Bedenken, die mit der Techno-

logie in Zusammenhang gebracht wurden. Häufig genannt wurde die Angst vor technischem Versagen bzw. der Zweifel an der technischen Zuverlässigkeit (ACV Automobil-Club Verkehr 2015; ADAC 2016). So sind knapp 50 % skeptisch gegenüber der Zuverlässigkeit der Technologie des automatisierten Fahrens (Continental AG 2013, 2015) und 66 % sehen im Moment noch ein zu hohes technisches Risiko beim Fahren automatisierter Fahrzeuge. Ähnliche Ergebnisse erzielten die Studien von Bansal et al. (2016), Petterson und Karlsson (2015), Trommer et al. (2016) und Boston Consulting Group (2015a). Folglich bestehen Bedenken hinsichtlich der Sicherheit vollautomatisierter Fahrzeuge (Simon et al. 2015), und einige Studien ermittelten, dass der Mensch im Vergleich zur Technologie für den besseren Fahrer gehalten wird (Eimler und Geisler 2015; Schoettle und Sivak 2014).

Weitere Bedenken bzw. wahrgenommene Nachteile der Technologie ist möglicher Kontrollverlust (ACV Automobil-Club Verkehr 2015; Simon et al. 2015). Bis zu einem gewissen Grad gibt es auch Bedenken hinsichtlich Datenschutzfragen (ACV Automobil-Club Verkehr 2015; Schoettle und Sivak 2014) oder IT-Sicherheit (The Boston Consulting Group (BCG) 2015a). Die Detecon-Studie ergab bspw., dass die Cyber-Sicherheit für rund 60 % bei der Nutzung automatisierter Fahrzeuge noch nicht gegeben ist (Detecon Consulting 2016). Ähnliche Ergebnisse erzielten (Simon et al. 2015) mittels einer Analyse von Onlineforen. Kyriakidis et al. (2015) fanden in Bezug auf automatisiertes Fahren heraus, dass die Befragten sich keine großen Sorgen hinsichtlich der Übermittlung von Daten machen – dies trifft insbesondere für Nutzer von Fahrassistenzsystemen und für Personen mit hohen Werten bei der Persönlichkeitseigenschaft Verträglichkeit zu – Personen mit hohen Neurotizismus-Werten sowie Befragte aus eher reicheren Ländern sind hier hingegen kritischer eingestellt (ebd.). Auch noch mutmaßlich ungeklärte Haftungsfragen werden teilweise kritisch gesehen (Ernst & Young GmbH 2013; Fraedrich und Lenz 2014a, 2014b, 2016a; Howard und Dai 2014). Vereinzelt wurden auch hohe Kosten (Howard und Dai 2014; Trommer et al. 2016), ein vermuteter Verlust von Arbeitsplätzen (Fraedrich und Lenz 2014b, 2016a, 2014a) und Angst vor der Abhängigkeit von der Technologie (ADAC 2016) genannt.

Der erwartete oder wahrgenommene **Fahrspaß** im Zusammenhang mit automatisiertem Fahren stellt ein ambivalentes Thema dar, das sowohl auf Vorteilsseite als Entlastung (Continental AG 2015) als auch Nachteilsseite als Reduktion des Fahrspaßes (ACV Automobil-Club Verkehr 2015; Ernst & Young GmbH 2013) auftaucht. Kyriakidis et al. (2015) ermittelten, dass nicht automatisiertes Fahren den meisten Fahrspaß bietet, während automatisiertes Fahren am wenigsten mit Fahrspaß assoziiert wird. Auch die Befragung von Ernst & Young sowie die Fokusgruppenstudie von Trommer et al. ergaben, dass mangelnder Fahrspaß als Nachteil fahrerloser oder vollautomatisierter Fahrzeuge wahrgenommen wird (Ernst & Young GmbH 2013; Trommer et al. 2016). Nichtsdestotrotz wird automatisiertes Fahren von der Mehrheit als faszinierend bewertet (Kyriakidis et al. 2015). Simon et al. 2015 ermittelten mit einer Online-Befragung von 83 deutschen Autofahrern, dass der wahrgenommene Fahrspaß einen wichtigen Einfluss auf die Einstellungen zu vollautomatisiertem

Fahren hat. So ist die Ablehnung des Fahrens mit vollautomatisierten Fahrzeugen in dynamischen, spaßfördernden Fahrsituationen besonders groß. Das vollautomatisierte Fahren wird demgegenüber vor allem in Situationen, die als unsicher und unkomfortabel empfunden werden und wenig Fahrspaß bieten, bevorzugt (Simon et al. 2015).

Marktakzeptanz für automatisiertes und autonomes Fahren

Der folgende Abschnitt geht auf die Marktakzeptanz automatisierten und autonomen Fahrens ein, d. h. er extrahiert aus den betrachteten Studien, inwiefern Interesse an Nutzung und / oder Kauf entsprechender Fahrzeuge besteht. Dabei wird zunächst auf die Nutzungsbereitschaft eingegangen, anschließend auf Kaufbereitschaften. Die Trennung zwischen den beiden Konzepten ist innerhalb der betrachteten Studien nicht immer vollkommen trennscharf, manchmal werden die Begriffe auch synonym verwendet. Hieran anschließend werden weitere nutzungsrelevante Themen betrachtet, wie Zeitnutzungsüberlegungen bei autonomem Fahren, Ergebnisse aus Fahrsimulatorens- und Feldteststudien, erhobene Diffusionspotenziale und schließlich Mehrpreisbereitschaften.

Mehrere Studien haben sich mit der **allgemeinen Nutzungsbereitschaft für die Technologie** beschäftigt. Viele Studien ermitteln, dass bei ca. einem Drittel der Befragten Nutzungsbereitschaften gegeben sind: Bitkom (2017) ermittelte mit einer repräsentativen Umfrage von 1.011 Personen ab 14 Jahren, dass sich 34 % eine Nutzung von autonomen Autos vorstellen können. Zmud et al. (2016) haben 556 Personen in der Metropolregion Austin, Texas, zu ihren Nutzungsabsichten für selbstfahrende / vollautomatisierte Fahrzeuge befragt. 14 % sagten aus, eine alltägliche Nutzung ist sehr wahrscheinlich, wenn die Systeme auf dem Markt wären; 36 % gaben an, diese ist „eher wahrscheinlich“. Der Rest würde das System eher nicht nutzen; Gründe dagegen sind ein Mangel an Vertrauen in die Technologie, Sicherheitsbedenken oder Kosten. Und auch laut dem Automobil-Club Verkehr (ACV) (2015), der mehr als 1.000 Personen aus Deutschland (bevölkerungsrepräsentativ nach Alter, Geschlecht und Region) befragt hat, wären 35 % der Befragten bereit, mit einem automatisierten Fahrzeug zu fahren, 38 % verneinen, 23 % antworten mit ‚weiß nicht‘. Frauen antworten in dieser Studie dabei skeptischer als Männer. Höhere Nutzungsbereitschaften ergab dagegen die repräsentative Befragung von Detecon Consulting: 51 % können sich die Nutzung eines automatisierten Fahrzeugs vorstellen; 33 % können sich dies demgegenüber nicht vorstellen (Detecon Consulting 2016). Die Aral-Studie „Trends beim Autokauf“ (repräsentative Befragung von 1.049 deutschen Autofahrern) ermittelte eine Nutzungsbereitschaft von 34 % – knapp die Hälfte kann sich eine Nutzung dagegen nicht vorstellen (Aral Aktiengesellschaft 2015). Ähnliche Ergebnisse erzielte die Studie des ADAC unter mehr als 1.000 Mitgliedern: Hier zeigt sich eine Gleichverteilung: ein Drittel geht davon aus, einmal selbst autonom zu fahren, ein Drittel ist unentschlossen, ein Drittel kann es sich nicht vorstellen (ADAC 2016). Die Studie „Autonomes Fahren – die Zukunft des Pkw-Marktes?“ von Ernst & Young (n=1.000 Führerscheinbesitzer) ergab, dass sich 42 % vorstellen können, in einem automatisierten Fahrzeug unterwegs zu sein, das ohne

menschliches Eingreifen gesteuert wird. 54 % können sich dies dagegen nicht vorstellen. Sofern das Eingreifen in Notfällen möglich ist, können sich 66 % die Nutzung vorstellen. Insbesondere Personen unter 45 Jahre, Männer und Vielfahrer zeigen hohe Zustimmungsraten (Ernst & Young GmbH 2013).

Einige Studien haben auch **Ländervergleiche** vorgenommen. Die Studie von Autoscout24 (repräsentative Befragung von 8.800 Europäern²² zwischen 18 und 65 Jahren) differenzierte zwischen der Häufigkeit der Nutzung autonomer Systeme und ergab ähnliche Ergebnisse: 36 % können sich einen situationsabhängigen Einsatz eines Autopiloten vorstellen und knapp 30 % geben an, diesen immer einschalten zu wollen. In Österreich und Spanien sind die Befragten besonders offen für diese Technologie, während französische Befragte reservierter sind. Die Befragung wurde im folgenden Jahr mit ähnlichen Stichproben in den gleichen Ländern erneut durchgeführt (Autoscout24 GmbH 2015). 21 % können sich die Nutzung eines Autopiloten grundsätzlich oder sofern dies günstiger ist, vorstellen; 45 % können sich die gelegentliche Aktivierung des Systems vorstellen – in Deutschland liegt dieser Anteil bei 51 %. Europaweit lässt sich eine zunehmende Offenheit gegenüber den Systemen im Zeitverlauf feststellen. Lease Plan (2016) fragten in einer Befragung von 4.000 Vielfahrern aus 17 Ländern (darunter 500 deutsche) nach der Bereitschaft, eine Testfahrt mit autonomen Fahrzeugen zu absolvieren. Zwei Drittel sagten aus, sie könnten sich vorstellen, ein automatisiertes Fahrzeug versuchsweise zu nutzen, aber mit Vorbehalten. Ohne Wenn und Aber können sich dies 15 % vorstellen – ähnlich hoch ist die eindeutige Ablehnung. Frauen stimmten weniger oft einer Versuchsfahrt zu, vor allem in mittleren Altersgruppen (Lease Plan 2016). Eine weitere ländervergleichende Studie zeigt, dass deutsche Befragte tendenziell zu den eher Zurückhaltenderen gehören: 44 % können sich vorstellen, in einem selbstfahrenden Fahrzeug mitzufahren (größte Zurückhaltung in Japan mit 36 % und größte Offenheit in China mit 75 %) (World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015). In einer Studie der London School of Economics and Political Science Consulting (2016) wurden fast 12.000 Bürgerinnen und Bürger aus europäischen Ländern befragt. Die größte Gruppe (41 % bzw. 44 %) ist zurückhaltend, wenn es darum geht, die Straße mit automatisierten Fahrzeugen zu teilen bzw. eines zu fahren. Im Laufe des Fragebogens ändert sich diese Einstellung jedoch teilweise – und am Ende antworten nur 31 %, ungern mit automatisierten Fahrzeugen im Straßenraum sein zu wollen und 39 %, ungern eines fahren zu wollen. In den Daten deutet sich zudem an, dass diejenigen, die positiver zur Technologie eingestellt sind und Autofahren mehr als Auseinandersetzung mit anderen Fahrern sehen, positiver zu automatisierten Fahrzeugen eingestellt sind als diejenigen, für die Autofahren eher ein soziales Erlebnis, ein Miteinander im öffentlichen Straßenraum ist.

²² Einbezogene Länder: Belgien, Deutschland, Frankreich, Italien, Niederlande, Österreich, Spanien.

Die Nutzungsbereitschaft in Abhängigkeit von **soziodemographischen Merkmalen** haben mehrere Studien untersucht. Einige Studien ergaben, dass Männer höhere Nutzungsabsichten zeigen als Frauen (Autoscout24 GmbH 2015, 2015; Zmud et al. 2016; Aral Aktiengesellschaft 2015), aber auch gegenteilige Ergebnisse liegen vor (bitkom Research 2017). Während die Studie von Zmud et al. (2016) keine Unterschiede in der Nutzungsbereitschaft in Abhängigkeit von Alter, Einkommen oder Bildung ermittelte, ergaben die Studien von Detecon-Consulting und Bitkom Research, dass die Jüngeren aufgeschlossener als die Älteren sind (bitkom Research 2017; Detecon Consulting 2016), und die Studie von Autoscout24 ermittelte eine höhere Aufgeschlossenheit in mittleren Altersgruppen. In dieser Arbeit wurden zudem auch Einwohner von Großstädten, Befragte mit Hochschulabschluss, Internetnutzer und Personen mit höherem Einkommen als offener gegenüber der Technologie ermittelt. Gründe für die Ablehnung sind Misstrauen gegenüber der Technik (insbesondere bei Frauen) oder eine Präferenz für das Selbst-Fahren (eher bei Männern) (Autoscout24 GmbH 2015).

Auch in Abhängigkeit von **Einsatzszenarien und Automatisierungsstufen** wurden die Nutzungsintention für automatisiertes Fahren untersucht. Die Continental Mobilitätsstudie 2013 ergab, dass die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen vor allem bei Autobahnbaustellen oder -staus vorstellbar ist und begrüßt wird (Continental AG 2013). Ähnliche Ergebnisse erzielten Payre et al. (2014) und Autoscout24 (2014). In der letztgenannten Studie sind die Zustimmungsraten zur Technologie höher, sofern den Befragten unterschiedliche Nutzungsszenarien für automatisiertes Fahren vorgelegt werden: Um Sprit zu sparen, wenn die Sicherheit des Autofahrens steigt oder bei Müdigkeit oder Krankheit (je knapp 90 % würden das System immer oder gelegentlich nutzen). Auch in unbekanntem Städten oder bei Staus würden viele das System nutzen oder wenn sich dadurch Versicherungskosten einsparen lassen. Beim Thema Sicherheit oder in Stausituationen und fremden Städten zeigt sich eine besondere Aufgeschlossenheit für das System bei den älteren Befragten (Autoscout24 GmbH 2014). In der qualitativen Studie von Trommer et al. (2016) waren häufig genannte Nutzungsszenarien für vollautomatisierte und fahrerlose Fahrzeuge Langstreckenfahrten und Pendelwege, was auch für amerikanische Teilnehmer zutrifft. Chinesische Teilnehmer können sich die Nutzung auch für Kurzstrecken vorstellen (ebd.). Auch in Abhängigkeit des Nutzungskontexts können die Zustimmungsraten variieren: Die Detecon-Studie zeigte, dass eine private Nutzung automatisierter Fahrzeuge eher vorstellbar ist (51 %) als eine berufliche (42 %) (Detecon Consulting 2016). Bei (Kauer et al. 2012), die mit einer Fokusgruppe *teilautomatisierte Fahrzeuge* mit manöverbasierter Fahrzeugführung (Conduct-by-Wire) untersuchen, ergab sich, dass für die Teilnehmer die Nutzungsabsicht unabhängig von der Art der Straße, der Anzahl der Mitfahrer und der Tageszeit war und insbesondere Interesse bestand für alltägliche Fahraufgaben, wie das Pendeln, oder in Situationen von Müdigkeit oder bei Ablenkung. Rund die Hälfte der Teilnehmer würden das System jedoch gar nicht nutzen.

Was die Nutzungsbereitschaft in Abhängigkeit unterschiedlicher Automatisierungsstufen anbelangt, so zeigt die Studie von Schoettle und Sivak, die Befragungsdaten von rund 600 Befragten aus den USA aus 2015 und 2016 vergleichen, die höchsten Zustimmungsraten für keine Automatisierung (44 bzw. 46 %). Weitere 41 bzw. 39 % bevorzugen eine teilweise Automatisierung und knapp 16 % in beiden Jahren präferieren eine vollständige Automatisierung. Ein Drittel wäre bei vollständiger Automatisierung stark besorgt und bei teilweiser Automatisierung etwas besorgt. Mehr als 90 % der Befragten wollen auch in automatisierten Fahrzeugen Steuerungsmöglichkeiten wie Lenkrad und Gas/Bremse zur Verfügung haben. Bei Fraedrich et al. (2016) bevorzugt es die Mehrheit der 1.000 Befragten (62 %), nicht die vollständige Kontrolle an das Fahrzeug abzugeben. In dieser Studie war die Offenheit für assistierende Systeme (Parkassistent, Fußgängererkennung) größer als für weitergehende (Selbststeuerung auf Wunsch, Vehicle on Demand) (ebd.).

Einige Arbeiten haben mittels statistischer Verfahren die **Einflussfaktoren auf die Nutzungsintention** für automatisierte Fahrzeuge ermittelt und auf Basis statistischer Verfahren geprüft. (Hohenberger et al. 2016) untersuchten den Einfluss des Geschlechts auf die Nutzungsabsicht für automatisierte Fahrzeuge. Dafür wurde eine Befragung von 1.603 Deutschen (repräsentativ für Alter, Geschlecht und Bildung) durchgeführt. Männer zeigen höhere Nutzungsabsichten als Frauen (indirekter Effekt), was zum Teil durch affektive Reaktionen erklärt wird. So erwarten Männer eher Spaß und weniger häufig Angst als Frauen, bei denen diese Wahrnehmungen genau umgekehrt sind. Spaß in Kombination mit gering ausgeprägter Angst waren für beide Geschlechter mit einer höheren Nutzungsabsicht assoziiert. Auch die Studie von Bansal et al. ermittelte bei Männern eine höhere Nutzungsintention in Bezug auf die Technologie (2016). In ihrer Studie befragten sie 347 Einwohner von Austin (USA) zu automatisierten Fahrzeugen. Es zeigt sich, dass technologiebegeisterte Männer mit höheren Einkommen aus dem urbanen Raum sowie diejenigen, die schon häufiger Unfälle hatten, ein größeres Interesse und eine höhere Zahlungsbereitschaft für automatisiertes Fahren in verschiedenen Stufen aufweisen und in ihrer Meinung unabhängiger von den Adoptionsraten anderer sind. (Zmud et al. 2016) fanden mithilfe von einer ordinalen Regression heraus, dass körperliche Einschränkungen, der Glaube an eine geringere Unfallhäufigkeit, die Nutzung von Smartphones, social media und Apps, das Fahren mit den Fahrzeugen bringt Spaß sowie soziale Normen die Nutzungsintention positiv beeinflussen.

Payre et al. (2014) befragten ca. 400 französische Autofahrer zu ihren Nutzungsintentionen in Bezug auf vollautomatisierte Fahrzeuge und ermittelten mithilfe hierarchischer Regressionen Einflussfaktoren auf die Nutzungsabsicht. Die Einstellungen gegenüber automatisiertem Fahren (wahrgenommene Freude, Nützlichkeit, Risiko), kontextbezogene Akzeptabilität (Wunsch bzgl. Kontrolle über das Fahrzeug, wahrgenommene Sicherheit, Bewertung von automatisiertem Fahren in langweiligen Fahrsituationen oder mit Passagieren) und sensation seeking (je höher diese Charaktereigenschaft ausgeprägt ist, desto höher die

Nutzungsintention) erwiesen sich als einflussreich auf die abhängige Variable, die Nutzungsabsicht. Das Interesse an autonomem Fahren in Situationen mit eingeschränkter Fahrfähigkeit, Geschlecht und Alter erwiesen sich im letzten Schritt der Regression als nicht signifikant (Payre et al. 2014).

Auch Kauer et al. (2012) haben Einflussfaktoren auf die Nutzungsabsicht mit einer Befragung ermittelt. Dafür nutzten sie das Technology Acceptance Model, wobei die abhängige Variable die Akzeptanz darstellt (Nutzungsintention und Einstellung gegenüber dem System). Mehrere unabhängige Variablen zeigen einen Einfluss auf die abhängige Variable: Wahrgenommene Nützlichkeit, Vergnügen, Identifikation und Kooperation. Geeignete Nutzungsszenarien für das System sind aus Sicht der Befragten Dienstfahrten, Urlaubsfahrten oder nächtliche Fahrten (Kauer et al. 2012).

Choi und Ji (2015) haben 552 südkoreanische Autofahrer befragt, um die Nutzungsabsichten und das Vertrauen in automatisierte Fahrzeuge zu untersuchen. Die Regressionsanalysen ergaben, dass wahrgenommene Nützlichkeit und Vertrauen die wichtigsten Prädiktoren für die Nutzungsabsicht darstellen – die Einfachheit der Nutzung ist dagegen nicht von Bedeutung. Das Vertrauen wiederum wird positiv beeinflusst von der Transparenz des Systems (konsistentes und nachvollziehbares Verhalten der Fahrzeuge), technischer Kompetenz (Zuverlässigkeit des Systems) und situation management (Möglichkeit der Übernahme). Vertrauen hat einen negativen Einfluss auf das wahrgenommene Risiko. Was fahrbezogene Persönlichkeitseigenschaften anbelangt, so zeigt sich, dass Kontrollüberzeugungen einen Einfluss auf die Nutzungsabsicht haben; sensation seeking hingegen nicht (Choi und Ji 2015).

Mehrere Studien haben die **Kaufabsichten** hinsichtlich automatisierter Fahrzeuge untersucht. Die Detecon-Studie ermittelte, dass sich ca. ein Drittel der Befragten den Kauf und ein Viertel das Leasen eines automatisierten Fahrzeugs vorstellen können (2016). Eine US-amerikanische Studie der Boston Consulting Group (The Boston Consulting Group (BCG) 2015a, 2015b) berichtet aus einer Befragung mit 1.510 Autokäufern, dass 55 % dem Kauf eines teilweise automatisierten Fahrzeugs positiv gegenüberstehen und 44 % den Kauf eines vollautomatisierten Fahrzeugs für wahrscheinlich halten. Der Zeitpunkt eines solchen Kaufes war jedoch in der Frage nicht näher spezifiziert. Die Autoren verweisen darauf, dass das Interesse an Elektrofahrzeugen vor ihrer Einführung geringer gewesen sei (The Boston Consulting Group (BCG) 2015a). Als Gründe für einen möglichen Kauf werden niedrigere Versicherungsprämien und erhöhte Sicherheit am häufigsten genannt, bei teilautonomen Fahrzeugen zusätzlich noch freihändiges Autobahnfahren und für vollautomatisierte Fahrzeuge die Möglichkeit, sich während des Fahrens mit anderen Dingen zu beschäftigen (ebd.). Ähnliche Ergebnisse zur Kaufbereitschaft erzielte die Studie von Howard und Dai (Befragung von 107 Besucher eines Wissenschaftsmuseums in Kalifornien): 42 % der Befragten geben an, sich als nächstes ein automatisiertes Fahrzeug kaufen zu wollen, 44 % antworten mit vielleicht (Howard und Dai 2014). Marberger et al. (2015) befragen 6.000

Deutsche und stellen jeweils einem Viertel eines von vier Szenarien automatisierten Fahrens vor. Diese Szenarien reichen über urbaner Stauassistent bzw. urbaner Assistent (beide Stufe 2) zu urbaner Staupilot und urbaner Pilot (beide Stufe 4). 40-55 % der Befragten äußern Besitzwunsch, 25-35 % Kaufwunsch, wobei der urbane Staupilot am meisten favorisiert wird.

Einige Studien haben den Zusammenhang zwischen **soziodemographischen Merkmalen** und der Kaufabsicht untersucht. Jüngere unter 30 Jahre zeigen in der Detecon-Studie eine größere Offenheit als Ältere (Detecon Consulting 2016). Payre et al. (2014) fanden heraus, dass Männer höhere Kauf- (und Nutzungs-)absichten zeigen als Frauen. Die Ergebnisse sind somit ähnlich zu denen zur Nutzungsabsicht.

Woisetschläger (2016) untersuchte mit Experimenten und Befragungen von insgesamt 545 deutschen Autofahrern **Einflussfaktoren** auf die Kaufabsicht. Die Studie besteht aus drei Teilstudien, in denen den Teilnehmern unterschiedliche Nutzungsszenarien für automatisiertes Fahren präsentiert wurden. Für die unterschiedlichen Nutzungsszenarien ergibt sich die höchste Akzeptanz für einen automatisierten Parkassistenten (valet parking) sowie einen Autobahnpiiloten, während ein fahrerloses Konzept weniger positiv gesehen wird. Für den Autobahnpiiloten und fahrerloses Fahren ist Vertrauen in das System zentraler Prädiktor, Bequemlichkeit spielt für den Autobahnpiiloten und den automatisierten Parkassistenten eine große Rolle. Symbolische Werte sind für automatisiertes Fahren zusätzlich bedeutsam.

Die Boston Consulting Group hat sich ebenfalls mit der Marke als Einflussfaktor auf die Akzeptanz beschäftigt. Fahrer von Premiummodellen berichten in ihrer Befragung größeres Interesse und Zahlungsbereitschaften, möglicherweise, da in diesem Marktsegment auch zuerst eine Automatisierung stattfinden wird, die dann aber – aufgrund ebenfalls großen Interesses – sich im Massensegment fortsetzen wird (The Boston Consulting Group (BCG) 2015a). In (World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015) wird aus den Daten abgeleitet, dass die länderübergreifend befragten Personen erwarten, dass am ehesten die etablierten OEMs – in Zusammenarbeit mit Technologieanbietern – ideale Akteure wären, selbstfahrende Autos auf die Straße zu bringen.

Mehrere Studien analysieren die aus Sicht der Befragten **bevorzugten Tätigkeiten während des Fahrens** ('Time use') von automatisierten/autonomen Fahrzeugen. Die Continental Mobilitätsstudie ergab, dass die meisten beim vollautomatisierten Fahren am liebsten Musik hören oder sich mit den Mitfahrenden unterhalten möchten; einige gaben an, telefonieren zu wollen (Continental AG 2013). Ähnliche Ergebnisse erzielten Fraedrich et al. (2016), Marberger et al. (2015) und Schoettle und Sivak (2014): Die Tätigkeiten, die sich die Befragten am ehesten vorstellen können, entsprechen im Wesentlichen denen, die schon heute möglich sind: In der Studie von Fraedrich et al. (1000 Personen) sind dies Ausdem-Fenster-Schauen, die Unterhaltung mit anderen Personen im Fahrzeug und Entspannen. Auch bei Marberger et al. (2015) zeigen sich tendenziell Korrelationen – Tätigkeiten,

die schon jetzt häufiger während dem Fahren ausgeführt werden, geben die Befragten an, auch parallel zum teil-/automatisierten Fahren häufiger ausüben zu wollen, wobei die Häufigkeiten mit zunehmender Automatisierung ebenfalls zunehmen. Am meisten favorisiert werden Musik hören, Gespräche führen und die Umgebung anschauen. Auf den letzten Plätzen rangieren Kleidung wechseln, Buch lesen, Videotelefonie und Filme. Bei Schoettle und Sivak (2014) (repräsentative Online-Stichproben in USA, UK und Australien, je ca. 500 Personen) geben über 40 % der Befragten an, auch in einem selbstfahrenden Fahrzeug die Straße beobachten zu wollen, nur geringe Anteile (knapp 10 %) wollen die Zeit zum Lesen und der Kommunikation nutzen. Anders bei Bansal et al. (2016), wo drei Viertel der 347 Befragten die Zeit für Kommunikation nutzen wollen oder um aus dem Fenster zu sehen und die Hälfte, um zu arbeiten oder zu lesen. Auch in der Studie der London School of Economics (2016), die fast 12.000 Personen befragt haben, spielt Kommunikation als Nebentätigkeit eine wichtige Rolle: 42 % würden Textnachrichten schreiben oder telefonieren, 37 % im Internet surfen, 28 % lesen, 27 % sich mit E-Mails beschäftigen, 19 % schlafen und 18 % einen Film schauen. Allerdings geben auch 82 % an, noch immer Aufmerksamkeit dem Verkehrsgeschehen zuwenden zu wollen.

Kyriakidis et al. (2015) differenzierten nach Automatisierungsstufen und ermittelten – wenig überraschend – dass insbesondere bei den Tätigkeiten des Schlafens, Filme Ansehens oder Lesens die Bereitschaft für diese mit jeder Automatisierungsstufe substantiell ansteigt. Für andere, weniger ablenkende Tätigkeiten, steigt diese Bereitschaft mit den Stufen nicht so sehr an (ebd.). Die Detecon-Studie (Detecon Consulting 2016) differenziert zwischen beruflichen und privaten Tätigkeiten während der Fahrt mit automatisierten Fahrzeugen. Insgesamt ist die Offenheit gegenüber einer privaten Nutzung der Fahrtzeit höher als gegenüber der beruflichen Nutzung. Über die Hälfte der Befragten kann sich das Nutzen von E-Mail oder Telefon im beruflichen Kontext vorstellen. Bei den privaten Aktivitäten können sich 50 % vorstellen, während der Fahrt im Internet zu surfen. Hier ist die Zustimmung bei den Jüngeren höher als bei den älteren Altersgruppen (Detecon Consulting 2016). Hohe Zustimmung erreicht auch die Kommunikation mit E-Mail oder Telefon sowie die Nutzung des Internets; das Filme-Schauen oder Schlafen können sich demgegenüber nur wenige als geeignete Beschäftigung während der Fahrt vorstellen, möglicherweise, weil hier in Gefahrensituationen nicht schnell genug eingegriffen werden kann (ebd.).

Einige Studien haben **Experimente mit Fahrsimulatoren zur Wahrnehmung fahrerloser Systeme** durchgeführt. Lee et al. (2015) untersuchten mit einem Experiment (n = 89), welches drei fahrerlose Fahrszenarien beinhaltete, die Wahrnehmungen der fahrerlosen Systeme. Darin sollten die Probanden mit einem artifiziellen Agenten interagieren, welcher je nach Szenario mehr oder weniger anthropomorph gestaltet war und einen unterschiedlich hohen Grad an Autonomie aufwies. Es zeigte sich, dass eine menschliche Gestaltung und eine hohe Autonomie positivere Wahrnehmungen des Agenten nach sich zogen. Eine solche Ausgestaltung rief zudem Gefühle von sozialer Präsenz hervor, welche wiederum die

wahrgenommene Intelligenz und Sicherheit des Agenten sowie das Vertrauen in den Agenten positiv beeinflussten (ebd.).

Gold et al. (2015) führten ein vergleichendes Experiment ($n = 72$) im Fahrsimulator mit einer Gruppe älterer und jüngerer Fahrer durch. Die Teilnehmer absolvieren eine Testfahrt mit einem hoch-automatisierten System, welches sie in drei Situationen auffordert, wieder die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Die Fahrerfahrung verbessert das Vertrauen in das Automatisierungssystem; die Erwartungen, dass solche Systeme die Sicherheit erhöhen werden, werden jedoch abgeschwächt. Die älteren Fahrer sind dabei insgesamt positiver bezüglich der Automatisierung als die jüngeren.

Altendorf et al. (2016) untersuchten die Faktoren, die die Nutzungsabsicht für teil- und hoch-automatisierte Fahrzeuge bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen beeinflussen, mittels einer Fahrsimulator-Studie mit 20 Probanden. Grundsätzlich wiesen die Fahrer eine höhere Akzeptanz auf, wenn sie mehr Kontrolle bzw. Autorität behielten. In Situationen mit höherer Beanspruchung zeigte sich jedoch eine wachsende Bereitschaft zur Kontrollübertragung.

Kauer et al. (2012) untersuchten die Nutzungsabsichten für teilautomatisierte Fahrzeuge mit manöverbasierter Fahrzeugführung (Conduct-by-Wire). Im ersten Teil der Studie wurde ein Fahrsimulator ($n = 56$) in Kombination mit einer Kurzbefragung eingesetzt. Im Anschluss wurde eine Fokusgruppe mit 20 Teilnehmern durchgeführt, gefolgt von einer Online-Befragung ($n = 118$). Die Nutzergruppen sind jeweils unterschiedlich. Die Fahrsimulator-Studie ergab eine positive Bewertung der Einfachheit der Nutzung sowie der Neuheit der Technologie bei jedoch begrenzten Nutzungsabsichten.

Auch **Mehrpreisbereitschaften für automatisierte/autonome Fahrzeuge** wurden untersucht. Die Detecon-Studie zeigte, dass 24 % Aufpreise von 5.000 € und 7 % Aufpreise von 10.000 akzeptieren würden (Detecon Consulting 2016). Etwas niedrigere Aufpreisbereitschaften ermittelten Schottle und Sivak. (2014) mittels repräsentativer Online-Stichproben in USA, UK und Australien (je ca. 500 Personen): Jeweils etwas mehr als die Hälfte der Befragten zeigt keine Aufpreisbereitschaft für autonomes Fahren, ein Viertel gibt die Bereitschaft an, ca. 1.900 \$ mehr zu zahlen (Schoettle und Sivak 2014). In den Untersuchungen von Kyriakidis et al. (2015) und Bansal et al. (2016) wurde herausgefunden, dass Befragte für die Technologie vollautomatisiertes oder fahrerloses Fahren mehr bezahlen würden als für teil- oder hochautomatisiertes Fahren: 22 % weisen keine Mehrpreisbereitschaft für autonome Fahrzeugtechnologien auf; 5 % würden dagegen über 30.000 \$ für diese Technologie zahlen (Kyriakidis et al. 2015). Die Studie von Bansal et al. (2016) ergab auf Basis einer Befragung von 347 Einwohner von Austin (USA) Zahlungsbereitschaften von 7.253 \$ für vollautomatisierte und fahrerlose Fahrzeuge und von 3.300 \$ für teilweise automatisiertes Fahren. In der US-amerikanischen Studie der Boston Consulting Group gibt rund die Hälfte der Befragten an, eine Mehrpreisbereitschaft für einzelne Features teil-automatisierten Fahrens zu haben; die Preisbereitschaften liegen im Mittel bei grob 2.300 €

für automatische Parkplatzsuche und Einparken oder automatisiertes Autobahnfahren (The Boston Consulting Group (BCG) 2015a). Marberger et al. erfragen zu den untersuchten Szenarien urbaner Stauassistent bzw. –pilot und urbaner Assistent bzw. –pilot (s. o.) auch Preisbereitschaften. Akzeptable Preise bewegen sich im Bereich zwischen 400 und 800 € (Marberger et al. 2015). In der globalen Ausgabe der Studie des World Economic Forum zusammen mit BCG zeigt sich für Deutschland, dass 42 % der Befragten bereit sind, für automatisiertes Fahren mehr zu bezahlen, von denen wiederum drei Viertel Aufpreise im Bereich von 3-5.000 \$ für akzeptabel halten (World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015).

Auch bei den Mehrpreisbereitschaften wurden Zusammenhänge mit soziodemographischen Merkmalen analysiert. Die Detecon-Studie zeigte, dass die Mehrpreisbereitschaft unter den unter 30-Jährigen höher ausgeprägt ist als in den anderen Altersgruppen (2016). Kyriakidis et al. haben keinen Zusammenhang mit dem Alter ermitteln können, aber sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Mehrpreisbereitschaft von Männern, von Personen mit hohem Einkommen sowie von Vielfahrern und Nutzern von Fahrassistenzsystemen höher als die der jeweils anderen Gruppe(n) ist (2015).

Auch **Mehrpreisbereitschaften für die frei gewordene Zeit** in automatisierten Fahrzeugen wurden erhoben. Das Fraunhofer IAO und Horváth & Partners (2016) haben eine Studie zu bevorzugten Tätigkeiten während des hochautomatisierten (Szenario A) und autonomen Fahrens (Szenario B) mittels einer repräsentativen Befragung in Deutschland, USA und Japan durchgeführt (pro Land jeweils 500 Befragte). Die Studie zeigt, dass 75 % der Befragten über alle Länder hinweg eine Mehrpreisbereitschaft für die freiwerdende Zeit beim automatisierten Fahren zeigen. Für Szenario A beträgt die monatliche Mehrpreisbereitschaft im Mittel ca. 150 €, für Szenario B ca. 190 €. Höhere Mehrpreisbereitschaften zeigen Jüngere unter 40 Jahren, Männer, Befragte aus Kalifornien, Personen mit hohem Einkommen und Vielfahrer, auch bei längeren täglichen Fahrtzeiten steigt die Bereitschaft für Aufpreise (Fraunhofer IAO, Horváth & Partners 2016). Die deutschen Befragten weisen im Vergleich die geringsten, die amerikanischen Teilnehmer die höchsten Mehrpreisbereitschaften auf. Aus Sicht der Autoren könnte dies u. a. mit der längeren Zeit zusammenhängen, die Amerikaner täglich im Auto verbringen (ebd.).

Auch die **Diffusionspotenziale** der Technologie wurden untersucht. 50 % der Befragten aus der Continental Mobilitätsstudie 2013 glauben, dass automatisiertes Fahren in zehn bis 15 Jahren zum Verkehrsalltag gehören wird und dass in ca. 15 Jahren die ersten Fahrzeuge auf dem Markt sein werden. Dabei werden insbesondere lange Autobahnfahrten als geeignete Szenarien für automatisiertes Fahren bewertet (76 % der Befragten) (Continental AG 2013). In der Aral-Studie sind viele Befragte unsicher, wann automatisierte Fahrzeuge serienreif sein werden; die, die antworteten, erwarteten eine Marktreife in durchschnittlich ca. zehn Jahren (Aral Aktiengesellschaft 2015). Die Ernst & Young-Studie ergab, dass knapp 70 % glauben, dass automatisierte Autos bis 2030 in Deutschland in großen Zahlen auf

dem Markt verfügbar sein werden; 17 % denken, dass dies schon 2020 der Fall sein wird (Ernst & Young GmbH 2013). Ähnliche Ergebnisse erzielte die Studie von Kyriakidis (2015): Die Befragten erwarten, dass um das Jahr 2030 die meisten Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen fahrerlos unterwegs sein werden. Mehr als die Hälfte glauben, dass in 30 Jahren das eigenständige Fahren nicht mehr erlaubt sein wird. Dennoch fühlen sich einige momentan unwohl bei dem Gedanken, dass es kein Lenkrad mehr geben wird, was für Nutzer von Fahrassistenzsystemen weniger zutrifft als für Personen, die noch keinerlei Erfahrungen mit diesen Technologien gemacht haben (ebd.). Von längeren Zeiträumen gehen die Befragten in der Studie im Auftrag von (DEKRA e.V. 2015) aus. Diese ermittelte, dass 8 % der deutschen Befragten der Überzeugung sind, dass sich fahrerlose Autos in den kommenden zehn Jahren durchsetzen werden. Ein Drittel glaubt hingegen, dass dies mehr als 20 Jahre dauern wird und ähnlich viele denken, dass sich diese Technologie nicht durchsetzen wird. In anderen Ländern wie Frankreich, Neuseeland oder den USA ist der Glaube an das Zukunftspotenzial der Technologie höher ausgeprägt (ebd.). Die nachfolgende Abbildung fasst die Einschätzungen zur Marktentwicklung aus Sicht von befragten Bürgerinnen und Bürgern über die betrachteten Studien zusammen.

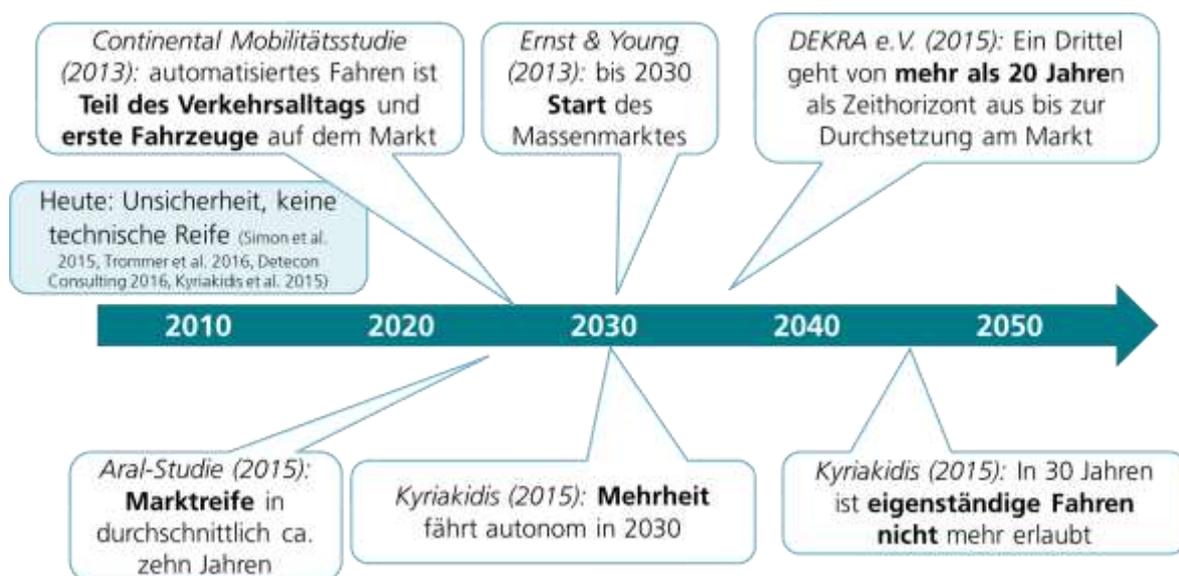


Abbildung 60: Einschätzung zur zeitlichen Entwicklung automatisierten und autonomen Fahrens

8.3.3.3 Andere Verkehre

Die Zahl der Studien, die sich mit kollektiven Verkehren, öffentlicher Personenverkehr (ÖV) oder Sharing, beschäftigen, ist deutlich niedriger als im Bereich MIV. Insofern wird in der Darstellung keine Trennung nach Akzeptanzebenen vorgenommen, sondern nach Verkehrsbereichen.

Öffentlicher Verkehr

Insgesamt zwei Studien, die Angebote in diesem Bereich untersuchen, konnten identifiziert werden. Beide stammen aus dem gleichen Projekt: So beschäftigen sich (Madigan et al. 2016) mit **Nutzungsintentionen** in Bezug auf automatisierte Transportsysteme (automated road transport systems: ARTS). ARTS stellen hochautomatisierte, fahrerlose Systeme dar (SAE-Stufe 4) und sollen in Gegenden mit geringer Dichte den öffentlichen Verkehr ergänzen können. Eine Befragung von 349 Personen (Madigan et al. 2016) zeigte, dass den stärksten Einfluss auf die Nutzungsintention des Systems die Erwartung in Bezug auf die Performanz des Systems (zukünftiger Bestandteil des öffentlichen Verkehrssystems, Komfort der Nutzung, Effizienz des Systems) hat. Weiterhin stellten sich auch die Erwartung in Bezug auf den Aufwand (leicht zu erlernen) sowie der soziale Einfluss als relevante Prädiktoren der Nutzungsabsicht heraus.

Im Rahmen des gleichen Projekts untersuchten (Alessandrini et al. 2014) **Einstellungen** gegenüber ARTS, indem sie Befragungen und Interviews in zwölf europäischen Städten durchführten. Vier Anwendungsfälle für ARTS wurden unterschieden: Innerhalb des Stadtzentrums, innerhalb einer großen Einrichtung, als Verbindung zwischen öffentlichem Verkehr und einer großen Einrichtung sowie als Verbindung zwischen öffentlichem Verkehr und einem Wohngebiet. Das System sollte mit einem herkömmlichen Kleinbus mit den gleichen Eigenschaften (mit Ausnahme der Fahrerlosigkeit) verglichen werden. Information und Erfahrung stellen zusammen mit Emotionen die wichtigsten Prädiktoren für die Präferenz für ARTS dar. Eine Automatisierung wird nicht generell als nützlich wahrgenommen, sofern sich Reisezeit und -kosten nicht von denen konventioneller Busse unterscheiden. ARTS werden im Anwendungsfall innerhalb einer großen Einrichtung bevorzugt.

Car- und Ridesharing

Die Akzeptanz automatisierter Fahrzeuge im Rahmen von Carsharing-Angeboten haben mehrere Studien untersucht. Eine deutsche Befragung von Detecon untersuchte die **Nutzungsabsichten** und ermittelte, dass sich 68 % eine testweise Nutzung automatisierter Fahrzeuge im Rahmen von Carsharing vorstellen können, um die Technologie auf Alltagstauglichkeit zu testen. Dies trifft vor allem für jüngere Personen zu (Detecon Consulting 2016).

Krueger et al. 2016 untersuchten **Nutzungsabsichten** als Willingness to pay einer Stichprobe von 435 Einwohner urbaner Regionen Australiens für *shared autonomous vehicles* (SAV), welche als fahrerlose Taxis verstanden werden, mittels einer stated choice-Befragung. Auch die Akzeptanz für die zusätzliche Option des Dynamic Ride Sharing (DRS) wurde analysiert. Insbesondere Service-Attribute, wie Reisekosten, Reisezeiten und Wartezeiten haben einen Einfluss auf die Nutzungsabsicht für SAVs und die Akzeptanz von

DRS. Jüngere sowie multimodale Personen wählen häufiger SAV mit DRS aus; auch Car-sharing-Nutzer zeigen für dieses Szenario höhere Nutzungsabsichten bzw. Zahlungsbereitschaften.

(World Economic Forum/Boston Consulting Group 2015) fragen auch nach der Nutzungsbereitschaft für selbstfahrende ‚shared taxis‘. 37 % der weltweit Befragten könnten sich dies vorstellen (26 % in Deutschland), genauso viele lehnen dies eher ab (49 % in Deutschland). Vorbehalte beziehen sich dabei am meisten auf Sicherheit im Kontakt mit den (fremden) Mitfahrern bzw. Sauberkeit. Umso günstiger das selbstfahrende Taxi im Vergleich zum regulären wäre, desto offener zeigen sich die Befragten.

Bei (Fraedrich et al. 2016) erscheint das Konzept des vehicle on demand, welches möglicherweise als Transportsystem und außerhalb individuellen Besitzes Mobilitätsleistungen anbietet als eines von vier Nutzungsszenarien. Dieses erhielt die geringsten Zustimmungswerte im Vergleich zu Autobahn- und Parkpiloten oder voller Automatisierung auf Wunsch. Machtlosigkeit bzw. die Kontrollabgabe waren hier die zentrale Herausforderung. Welche Rolle die Aufgabe des Besitzes dabei spielt, wurde in der Studie nicht vertieft.

Auch (Yap et al. 2016) untersuchten die Einstellungen zu automatisierten Fahrzeugen (SEA-Stufe 5) als Transport auf der letzten Meile und fokussieren damit auf eine Kombination aus ÖV und Angebote im Bereich Car- und Ride-Sharing. Dafür wurde eine repräsentative Befragung in Form eines stated preference Experiments von 761 Niederländern ab 18 Jahren durchgeführt, die regelmäßig reisen. Den Befragten wurden neun Alternativen für einen Weg vorgelegt, bei dem das Hauptverkehrsmittel der Zug (erste vs. zweite Klasse) oder der private Pkw darstellen. Für den Weg mit dem Zug wurden mehrere Alternativen für die letzte Meile angeboten: Öffentlicher Verkehr, Fahrrad, automatisiertes Fahrzeug im Carsharing (Fahrer fährt sich damit nach Hause, im Anschluss entfernt sich das Fahrzeug eigenständig) und autonomes Fahrzeug, welches komplett eigenständig fährt. Reisende der ersten Klasse bevorzugten automatisierte Fahrzeuge gegenüber den Alternativen – in dieser Zielgruppe liegt also ein Potenzial für autonome Fahrzeuge. Die Zeit im automatisierten Fahrzeug wird negativer wahrgenommen als die in Fahrzeugen, die selbst gesteuert werden. Dies deutet darauf hin, dass den Befragten die frei gewordene Zeit als Möglichkeit, währenddessen andere Dinge zu tun, noch nicht als Vorteil bewusst ist. Für die Attraktivität von automatisierten Fahrzeugen spielen neben klassischen instrumentellen Faktoren, wie Reisezeit und –kosten, auch psychologische Variablen, wie die Wahrnehmungen in Bezug auf das Vertrauen in die Systeme sowie deren wahrgenommene Nachhaltigkeit, eine wichtige Rolle.

8.4 Primäre Potenziale einzelner Technologien

Anschließend an Kapitel 6.1.2 sind im folgenden Abschnitt die primären Potenziale der restlichen relevanten Technologien aufgeführt und beschrieben.

8.4.1 Automatisiertes Eco-Driving mit Vernetzung

In der analysierten Literatur wurden zahlreiche Abschätzungen und Simulationen angestellt (bspw. von Alessandrini et al. 2015, S. 158, Barth und Boriboonsomsin 2009, S. 404–407 oder Bideaux et al. 2013, S. 59–60), allerdings lassen diese keine Rückschlüsse auf das Potenzial in einzelnen Verkehrssituationen zu. Daher wird auf die differenzierten Ergebnisse von Bhavsar et al. (2012, S. 205–206) und Orfila (2011, S. 9–12) zurückgegriffen, wobei die von den Autoren angegebenen Reduktionspotenziale weit auseinanderliegen.

Daher wurde folgendes Vorgehen gewählt: die übrigen und weniger differenzierenden Quellen wurden derjenigen Studie zugeordnet, deren Werte sie besser unterstützen, sodass mithilfe der jeweiligen Anzahl ein gewichteter Mittelwert der gegebenen Potenziale gebildet werden konnte. Dabei wurde darauf geachtet, dass nur Quellen, welche nicht Bhavsar et al. oder Orfila zitieren, berücksichtigt werden.

Das Resultat des Abgleiches ist eine deutlich stärkere Gewichtung der Potenziale von Orfila, sodass die Werte von Bhavsar et al. nur für eine geringe Änderung sorgen. Da die analysierten Quellen nur Potenziale für den Pkw angeben, wird im Projektkonsortium in Absprache mit den Experten des ersten Fachworkshops das identische Potenzial auch für den Lkw angesetzt. Die folgende Tabelle zeigt die stark ansteigenden Potenziale mit zunehmender Verkehrsdichte deutlich. Ähnlich wie beim ACC führt die Verbesserung des Verkehrsflusses zu einer erhöhten Durchschnittsgeschwindigkeit bei (siehe Orfila, 2011, S. 12); durch koordinierte Brems- und Beschleunigungsvorgänge mit den umgebenden Fahrzeugen fällt das Potenzial größer aus als beim ACC FSR (bis zu 37, 5 % sind möglich).

Der Potenzialanstieg zwischen geringer und mittlerer Penetration fällt größer aus als der zwischen mittlerer und hoher Penetration: dies belegt sowohl die Simulation von Bhavsar et al. als auch von Orfila. Grund dafür sei die abnehmende Durchschnittsgeschwindigkeit, sodass ein ungünstigerer Kraftstoffverbrauchsfaktor vorliege (Orfila, 2011, S. 10). In speziellen Verkehrssituationen (wie auf der Autobahn bei mittlerer Verkehrsdichte) sinkt das Potenzial mit zunehmender Penetration wieder ab: können bei geringer Durchdringung noch 10 % erreicht werden, so sinkt dies bei hoher Penetration um etwa vier Prozentpunkte ab.

Tabelle 36: Primäre Potenziale des Automatisierten Eco-Driving mit Vernetzung

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw, Lkw, Busse	Autobahn	Flüssig	7%	11%	13%
		Dicht/Gesättigt	9%	11%	6%
		Stop+Go	16%	30%	38%
	Landstraße	Flüssig	6%	9%	11%
		Dicht/Gesättigt	7%	8%	8%
		Stop+Go	13%	25%	31%
	Innerortsstraße	Flüssig	6%	8%	10%
		Dicht/Gesättigt	4%	6%	10%
		Stop+Go	10%	19%	25%

Quelle: Fraunhofer ISI

8.4.2 Park-Technologien

Das Automatisierte Parken, der Parkassistent und das Valet Parking werden aufgrund gleicher Ergebnisse bei der Ermittlung des EEV-Potenzials zusammengefasst. Trotz einer umfangreichen Literaturrecherche hat keine der gesichteten Quellen eine quantifizierte Angabe zum Potenzial der Technologien gemacht, sodass Abschätzungen im Projektkonsortium nötig wurden. Es wurde der Technologie somit kein primäres Potenzial zugeordnet. Folgende Überlegungen stecken hinter dieser Potenzialermittlung:

- Da Parksituationen überwiegend im Innerortsbereich vorkommen, werden Verkehrssituationen auf Autobahnen und Landstraßen ausgeschlossen.
- Der Parkassistent übernimmt gemäß der Definition nur die Querführung. Daher folgt, dass aus einer automatisierten Querführung kein Reduktionspotenzial resultiert. Daher wird dem Parkassistenten in den verbleibenden Verkehrssituationen ein Potenzial von 0 % zugeordnet.
- Die zusätzlich zum Parkassistenten automatisierte Längsführung beim Automatisierten Parken führt im Zusammenspiel mit der automatisierten Querführung zu einem effizienteren Parkvorgang (tendenziell werden weniger Korrekturzüge benötigt); dieser Effekt lässt sich ohne Feldversuche allerdings nicht quantifizieren, sodass im Sinne einer konservativen Abschätzung ein Potenzial von 0 % angesetzt wird.
- Beim Valet Parking werden zwei gegenläufige Effekte erwartet: zum einen kann es zu einem verringerten Verkehrsaufkommen aufgrund von entfallenden Parksuchverkehren kommen, zum anderen ist vor allem im Innerortsbereich eine Erhöhung der durchschnittlichen Fahrstrecke bis zum Parkplatz denkbar, wenn geringere Parkkosten die zusätzlichen Fahrtkosten überkompensieren. Unter Experten ist umstritten, welcher Effekt überwiegt (siehe Brown et al. 2013, S. 1, Fraedrich und Lenz

2015, S. 185–186 sowie Litman 2016, S. 5), sodass das primäre Potenzial konservativ auf 0 % gesetzt wird.

8.4.3 Baustellenassistent und Lane Keeping Assist

Während der Lane Keeping Assist (LKA) gut sichtbare Fahrstreifenmarkierungen voraussetzt, ist der Baustellenassistent für Situationen entwickelt worden, in denen Fahrstreifenmarkierungen fehlen oder durch Leitwände und Baken ersetzt sind. Die Funktionsweisen der Technologien sind bis auf den unterschiedlichen Einsatzbereich aber identisch: sie sorgen auf Autobahnen und Landstraßen bei niedriger und mittlerer Verkehrsdichte für eine automatisierte Querführung.

Die Auswirkungen auf den EEV sind nur wenig erforscht: Baum und Grawenhoff (2006, S. 161) geben an, dass die Technologien keinen direkten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hätten und nur die Wirkungen auf das Unfallgeschehen untersucht werden müssten. Da dies den sekundären Effekten zuzuordnen ist, wird für die Technologien ein primäres Potenzial von 0 % angesetzt.

8.4.4 Highway-Technologien

Bei der Analyse des EEV-Reduktionspotenzials lassen sich der Highway-Assist, -Chauffeur und -Pilot gemeinsam betrachten: wie auch beim ersten Fachworkshop validiert, ist innerhalb einer Technologiefamilie nicht mit einem steigenden oder fallenden durchschnittlichen primären Reduktionspotenzial zu rechnen, wenn Technologien eine höhere Automatisierungsstufe erreichen. Der Effekt der wegfallenden manuellen Steuerungszeiten auf den EEV in der Automatisierungsstufe 4 ist vernachlässigbar gering.

Der funktionalen Beschreibung entsprechend setzen sich die Highway-Technologien aus einem ACC, einem PCC und einem LKA Typ III zusammen, wobei die Längsführung durch den ACC erfolgt und der PCC die Sensordaten mit strecken- und fahrzeugbezogenen Daten anreichert (vgl. Lederer et al., 2014, S. 851–852). Durch eine Addition der Potenziale des ACC, des PCC und des LKA würde das Potenzial der Highway-Technologien überschätzt (in diesem Fall würden sowohl der ACC als auch PCC die mit ihren Daten jeweils optimale Längsführung ausführen). Dies kann korrigiert werden, indem das Potenzial des PCC vor der Addition mit einem Faktor < 1 gewichtet wird. In Absprache mit den Experten des ersten Fachworkshops wurde der Faktor 0,5 gewählt. Nach der Bundesanstalt für Straßenwesen (2012, S. 9) beschränkt sich der Einsatzbereich der Highway-Technologien auf eine niedrige und mittlere Verkehrsdichte auf Autobahnen und Landstraßen, wobei entsprechend der folgenden Tabellen ein Reduktionspotenzial von maximal 9,4 % (Pkw) bzw. 8,2 % (Lkw und Busse) feststellbar ist.

Auf Autobahnen liegt das Potenzial deutlich niedriger, was in den Funktionsweisen des zugrundeliegenden ACC und PCC begründet liegt.

Tabelle 37: Primäre Potenziale der Highway-Technologien für Pkw

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw	Autobahn	Flüssig	3%	4%	4%
		Dicht/Gesättigt	3%	5%	5%
		Stop+Go	-	-	-
	Landstraße	Flüssig	4%	7%	9%
		Dicht/Gesättigt	4%	7%	9%
		Stop+Go	-	-	-
	Innerortsstraße	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	-	-	-
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

Tabelle 38: Primäre Potenziale der Highway-Technologien für Lkw und Busse

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Lkw, Busse	Autobahn	Flüssig	2%	3%	3%
		Dicht/Gesättigt	2%	4%	4%
		Stop+Go	-	-	-
	Landstraße	Flüssig	4%	6%	8%
		Dicht/Gesättigt	3%	5%	7%
		Stop+Go	-	-	-
	Innerortsstraße	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	-	-	-
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

8.4.5 Onboard-Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting

Im euroFOT-Feldtest (siehe Alessandretti et al. 2012, S. 102–103 und Benmimoun et al. 2012, S. 16 und S. 28) wurde festgestellt, dass Onboard- und portable Navigationssysteme mit Echtzeit-Rerouting hinsichtlich ihrer Wirkung auf den EEV unterschieden werden müssen. Ursächlich dafür sind die verwendeten Algorithmen: Onboard-Systeme ziehen Autobahnen mit höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten den Land- und Innerortsstraßen vor, während portable Geräte häufiger die letztgenannten Straßenkategorien empfehlen.

Wie einleitend zu Kapitel 3 beschrieben wurde, werden in dieser Arbeit nur die primären Effekte auf den EEV betrachtet. Die Navigationssysteme machen eine isolierte Betrachtung allerdings schwierig: spätestens ab einer mittleren Penetration ist die Veränderung der Fahrleistungen und der Verkehrsdichtenanteile nicht mehr zu vernachlässigen (vgl. Klunder

et al., 2014, S. 61–62). Da keine analysierte Literatur die gedankliche Trennung zwischen primären und sekundären Effekten durchführt und gleichzeitig die Effekte quantifiziert, muss für die Navigationssysteme auf eine Unterscheidung verzichtet werden.

Da Alessandretti et al. und Benmimoun et al. nur Angaben zum Pkw-Reduktionspotenzial auf der Ebene der Straßenkategorien machen, wurde die Differenzierung nach Verkehrsdichten vom Projektkonsortium mit drei zentralen Annahmen vorgenommen:

- Das Reduktionspotenzial korreliert negativ mit der Penetrationsrate. Wird ein kritischer Anteil an Fahrzeugen umgeleitet, so steigt die Verkehrsdichte auf der Umleitungsstrecke an, sodass tendenziell auch der EEV ansteigt.
- Das Reduktionspotenzial korreliert positiv mit der Verkehrsdichte. Bei geringer Verkehrsdichte fällt die Möglichkeit zur Verbesserung durch ein Rerouting im Vergleich zum Initialrouting geringer aus.
- Das Reduktionspotenzial ist für den Pkw größer. Der Pkw besitzt eine größere Flexibilität hinsichtlich der befahrbaren Routen als der Lkw.

Wie in der folgenden Tabelle zu erkennen ist, führt der Einsatz der Technologie im Pkw zu einer Ausweitung des EEV auf Autobahnen. Dies entsteht durch die Berücksichtigung der Fahrleistungen, sodass aufgrund der Algorithmencharakteristik gleichzeitig der EEV auf Land- und Innerortsstraßen zurückgeht.

Tabelle 39: Primäre Potenziale des Onboard-Navigationssystems mit Echtzeit-Rerouting für Pkw

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw	Autobahn	Flüssig	-1%	-1%	-1%
		Dicht/Gesättigt	-1%	-1%	-1%
		Stop+Go	-1%	-1%	-1%
	Landstraße	Flüssig	3%	3%	2%
		Dicht/Gesättigt	3%	3%	3%
		Stop+Go	3%	3%	3%
	Innerortsstraße	Flüssig	4%	4%	4%
		Dicht/Gesättigt	4%	4%	4%
		Stop+Go	5%	4%	4%

Quelle: Fraunhofer ISI

Aus der folgenden Tabelle geht hervor, dass ein Onboard-Navigationssystem in Lkw zu einer geringfügigen Reduktion des EEV führt; eine Ausweitung des Fahrleistungsanteils auf Autobahnen ist nicht ersichtlich. Für Stadtbusse ergibt sich kein primäres Potenzial, für Reisebusse entsprechend der Potenziale der Lkw.

Tabelle 40: Primäre Potenziale des Onboard-Navigationssystems mit Echtzeit-Rerouting für Lkw

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Lkw	Autobahn	Flüssig	0%	0%	0%
		Dicht/Gesättigt	0%	0%	0%
		Stop+Go	0%	0%	0%
	Landstraße	Flüssig	1%	1%	1%
		Dicht/Gesättigt	1%	1%	1%
		Stop+Go	2%	1%	1%
	Innerortsstraße	Flüssig	3%	3%	2%
		Dicht/Gesättigt	3%	3%	3%
		Stop+Go	3%	3%	3%

Quelle: Fraunhofer ISI

8.4.6 Predictive Cruise Control (PCC)

Das Potenzial des PCC für Pkw konnte durch Feldversuche von Rumbolz (2013, S. 87) und Lederer et al. (2014, S. 854) detailliert für die verschiedenen Verkehrssituationen ermittelt werden. Da bei der Technologiedefinition nicht von einer zwangsweisen Kombination mit einem ACC ausgegangen wird, sinkt das Potenzial mit steigender Verkehrsdichte ab (der Fahrer muss häufiger in die Bremssteuerung eingreifen, um Auffahrunfälle zu verhindern). Bei hoher Verkehrsdichte ist die Technologie laut Römer (2015, S. 1) nur auf Autobahnen einsetzbar.

Die vergleichsweise geringen Geschwindigkeiten und die häufig zu gewährende Vorfahrt im Innerortsbereich führt dazu, dass unabhängig von der Verkehrsdichte kein signifikantes Potenzial feststellbar ist (Rumbolz, 2013, S. 87). Das Potenzial auf Landstraßen fällt am größten aus, da hier hohe Geschwindigkeiten bei recht anspruchsvoller Topografie gefahren werden (vgl. Baker et al., 2009, S. 48 und Rumbolz, 2013, S. 87).

Das Reduktionspotenzial bei hoher Penetrationsrate wurde konservativ abgeschätzt, da keine Feldtests oder Simulationen vorliegen. Es wurde angenommen, dass das Potenzial ähnlich ausfällt wie in einer Situation, in der PCC und ACC kombiniert werden (hierfür gibt Lederer et al. (2014, S. 854) Ergebnisse von Fahrversuchen an), da durch den kombinierten Einsatz eine harmonisierte Fahrweise erzeugt wird, die beim alleinigen Einsatz des PCC erst bei hoher Penetration entsteht.

Aufgrund der großen Ähnlichkeit der ermittelten Potenziale für Pkw und der Potenziale von Lkw-Feldversuchen von Mercedes-Benz (siehe Römer, 2015, S. 1) und DAF (2017, S. 1) wurde angenommen, dass die Potenziale des Pkw auf den Lkw übertragbar sind. Dies wurde durch die Experten während des Fachworkshops bestätigt.

Durch die Berücksichtigung von Topografie- und Fahrzeuginformationen sowie durch Kenntnis der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf der vorausliegenden Strecke wird eine vorausschauende Fahrweise möglich, von der bei geringer Verkehrsdichte auch nur selten durch einen Fahrereingriff abgewichen werden muss. Passt ein Großteil der Fahrzeuge die Beschleunigungs- und Schaltvorgänge an diese Informationen an, so ist ein Reduktionspotenzial von bis zu 4 % möglich (siehe folgende Tabelle). Auf der Autobahn fällt das erreichbare Potenzial geringfügig ab, im Innerortsbereich ist keine Effizienzsteigerung feststellbar.

Tabelle 41: Primäre Potenziale des PCC für Pkw, Lkw und Busse

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw, Lkw, Busse	Autobahn	Flüssig	2%	3%	3%
		Dicht/Gesättigt	1%	1%	2%
		Stop+Go	0%	0%	-
	Landstraße	Flüssig	3%	3%	4%
		Dicht/Gesättigt	1%	2%	2%
		Stop+Go	-	-	-
	Innerortsstraße	Flüssig	0%	0%	0%
		Dicht/Gesättigt	0%	0%	0%
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

8.4.7 Platooning

Aufgrund des im Verhältnis zu Pkw größeren Strömungswiderstandsbeiwerts c_W und der deutlich größeren Stirnfläche ist die Reduzierung des Luftwiderstands bei SNF eine bedeutende Stellgröße zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs. Platooning erreicht dies, indem der Abstand zwischen Fahrzeugen im Vergleich zum vorgeschriebenen Mindestabstand der StVO deutlich unterschritten wird und die Fahrzeuge über eine sog. elektronische Deichsel miteinander gekoppelt sind. Feldtests (insbesondere das deutsche Projekt KONVOI und das EU-Projekt SARTRE) sowie Simulationen konzentrieren sich aufgrund der größeren Potenziale und der höheren Akzeptanz (so die Aussage eines Experten beim Fachworkshop) auf Platooning bei SNF, sodass die hier ermittelten Potenziale über einen Vergleich der c_W -Werte, der Stirnflächen und der Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Pkw übertragen werden.

Da das Potenzial des Führungsfahrzeugs geringer ausfällt als das der Folgefahrzeuge, wird das in den folgenden Tabellen dargestellte Potenzial (ausgehend von einer durchschnittlichen Platoongröße von 3 Fahrzeugen – dies wurde während des Fachworkshops validiert) über alle teilnehmenden Fahrzeuge gemittelt.

ERTRAC (2015, S. 13), Fagant und Kockelman (2013, S. 7), Gurzu (2016) und MacKenzie et al. (2016, S. 1) geben Potenziale an, die bei einer maximal zulässigen Geschwindigkeit auf Autobahnen erreicht werden können, wenn Konvoifahrzeuge zur Verfügung stehen. Es wird im Projektkonsortium angenommen, dass bei niedriger Penetration nur für einen Teil der Fahrstrecken geeignete Partnerfahrzeuge zur Verfügung stehen, sodass das durchschnittliche Potenzial reduziert werden muss (vgl. Frost & Sullivan, 2015, S. 44).

Dem liegt die während des Fachworkshops validierte Annahme zugrunde, dass überwiegend eine Ad-hoc-Platoonbildung stattfindet. Für die übrigen – nicht durch die Angaben der Daimler AG (2016, S. 18) und von Wadud et al. (2016, S. 6) ausgeschlossenen Verkehrssituationen – werden Abschätzungen getroffen, wie sich die durchschnittliche Geschwindigkeit in den Situationen auf den Luftwiderstand und damit den EEV auswirkt.

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Kraftstoffersparnis ist deutlich: sind auf der Autobahn bei geringer Verkehrsdichte 18 % für Lkw feststellbar, so sinkt dies bei mittlerer Verkehrsdichte schon auf 4, 5 % ab. Aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten von Lkw auf Landstraßen ist hier auch ein kleineres Potenzial feststellbar.

Tabelle 42: Primäre Potenziale des Platooning für Pkw

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw	Autobahn	Flüssig	3%	6%	11%
		Dicht/Gesättigt	1%	2%	3%
		Stop+Go	0%	0%	0%
	Landstraße	Flüssig	3%	6%	11%
		Dicht/Gesättigt	1%	2%	3%
		Stop+Go	-	-	-
	Innerortsstraße	Flüssig	1%	2%	3%
		Dicht/Gesättigt	-	-	-
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

Für Pkw fällt das Potenzial trotz höherer Geschwindigkeiten aufgrund des kleineren cW-Werts und der kleineren Stirnfläche geringer aus, hier sind maximal 10,8 % erreichbar. Falls die Technologie im Innerortsbereich eingesetzt wird, so liegt das Potenzial im niedrigen einstelligen Bereich.

Tabelle 43: Primäre Potenziale des Platooning für Lkw und Reisebusse

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Lkw, Busse	Autobahn	Flüssig	5%	10%	18%
		Dicht/Gesättigt	1%	3%	5%
		Stop+Go	0%	0%	0%
	Landstraße	Flüssig	4%	10%	15%
		Dicht/Gesättigt	1%	3%	4%
		Stop+Go	-	-	-
	Innerortsstraße	Flüssig	1%	3%	5%
		Dicht/Gesättigt	-	-	-
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

8.4.8 Traffic Jam-Technologien

Hinsichtlich des EEV-Reduktionspotenzials lassen sich der Traffic Jam-Assist, der -Chauffeur und der -Pilot gemeinsam betrachten. Die Reduktionspotenziale der Technologien unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Automatisierungsstufen nicht signifikant. Gemäß ERTRAC (2015, S. 11) sind die Traffic Jam-Technologien nicht bei Geschwindigkeiten über 60 km/h einsetzbar, Baum und Grawenhoff (2006, S. 9) erweitern dies für auf den gesamten Innerortsbereich. Die Einsatzbeschränkung auf bestimmte Verkehrssituationen besteht noch immer, da die Traffic Jam-Technologien auf einem ACC und einem LKA Typ III aufsetzen.

Eine automatisierte Querführung des Fahrzeugs besitzt kein primäres Reduktionspotenzial, sodass bei den Traffic Jam-Technologien nur die Längsführung des Fahrzeugs zu einer EEV-Veränderung beiträgt. Diese Veränderung entspricht in den vergleichbaren Verkehrssituationen dem des ACC (vgl. Oonk und Svensson, 2013, S. 24).

Tabelle 44: Primäre Potenziale der Traffic Jam-Technologien

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Pkw	Autobahn	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	3%	5%	5%
		Stop+Go	6%	10%	10%
	Landstraße	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	3%	4%	5%
		Stop+Go	6%	9%	11%
	Innerortsstraße	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	-	-	-
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

Tabelle 45: Primäre Potenziale der Traffic Jam-Technologien für Lkw und Busse

Verkehrsmittel	Straßentyp	Verkehrsdichte	Penetrationsrate		
			Low	Medium	High
Lkw, Busse	Autobahn	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	2%	3%	3%
		Stop+Go	4%	7%	7%
	Landstraße	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	2%	3%	3%
		Stop+Go	4%	6%	8%
	Innerortsstraße	Flüssig	-	-	-
		Dicht/Gesättigt	-	-	-
		Stop+Go	-	-	-

Quelle: Fraunhofer ISI

8.4.9 Urban Pilot

Der Urban Pilot baut gemäß den Aussagen während des Fachworkshops auf einem ACC FSR und einem LKA Typ III auf, wobei der Einsatz auf den Innenstadtbereich beschränkt ist. Analog zu den Traffic Jam-Technologien trägt nur die automatisierte Längsführung zu einem EEV-Potenzial bei. Damit können die Potenziale des ACC in den vergleichbaren Verkehrssituationen auf den Urban Pilot übertragen werden.

Literaturverzeichnis

- ACV Automobil-Club Verkehr (2015): ACV Akzeptanzstudie: Autonomes Fahren. Hg. v. ACV Automobil-Club Verkehr. Köln. Online verfügbar unter <https://www.acv.de/uploads/2015/02/acv-akzeptanzstudie-autonomes-fahren.pdf>.
- ADAC (2016): ADAC-Umfrage „Autonomes Fahren“. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/Umfrage%20Autonomes%20Fahren%20Nov%202016%20adac.de_281295.pdf.
- Alessandretti, G; Benmimoun, M; Brouwer, R; Cserpinszky, A; Etemad, A; Hagleitner, W; Heinig, K und Kessler, C (2012): euroFOT Deliverable D11.3: Final Report.
- Alessandrini, A; Alfonsi, R; Site, P D; Stam, D (2014): Users' Preferences towards Automated Road Public Transport. Results from European Surveys. In: Transportation Research Procedia 3, S. 139–144. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.099.
- Alessandrini, A; Campagna, A; Site, P D; Filippi, F und Persia, L (2015): Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities, Transportation Research Procedia 5, 145–160.
- Altendorf, E; Borowski, D; Ramaekers, J; Flemisch, F (2016): Assistenz versus Kontrolle beim hochautomatisierten Fahren - eine Akzeptanzanalyse. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hg.): Arbeit in komplexen Systemen - Digital, vernetzt, human?! 62. GfA-Frühjahrskongress. Aachen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Eugen_Altendorf/publication/308373384_Assistenz_versus_Kontrolle_beim_hochautomatisierten_Fahren_-_eine_Akzeptanzanalyse/links/57e2565d08aed96fbbb2423e.pdf.
- Anderson, J M; Kalra, N; Stanley, K D; Sorensen, P; Samaras, C und Oluwatola, O A (2014): Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers, Band RR-443-1-RC von RAND Corporation research report series.
- 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.
- Aral Aktiengesellschaft (2015): Aral Studie. Trends beim Autokauf 2015.
- Auer, R; Brosig, S; Eckert, G; Katzwinkel, R; Rohlf, M; Schroven, F; Schwitters, F und Wuttke, U (2015): Einparkassistent, in Hakuli, Stephan; Lotz, Felix und Winner, Hermann (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden, S. 841–850.
- Autoscout24 GmbH (2014): Unser Auto von morgen 2013/14. Was wünschen sich die Europäer vom Auto von morgen? München. Online verfügbar unter http://about.autoscout24.com/de-de/au-press/2013_as24_studie_auto_v_morgen.pdf.
- Autoscout24 GmbH (2015): Unser Auto von morgen 2015. Einschätzungen, Wünsche, Visionen. München. Online verfügbar unter http://ww2.autoscout24.de/de_autoscout24_-_the_cars_we_want_tomorrow.pdf.
- Baker, H; Cornwell, R; Koehler, E und Patterson, J (2009): Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles.
- Bäumer, M; Hautzinger, H; Pfeiffer, M; Stock, W; Lenz, B; Kuhnimhof, T; Köhler, K; (2017): Fahrleistungserhebung 2014 - Inländerfahrleistung. BASt-Bericht V 290. Bonn.

- Bansal, P; Erdem, B; Eschke, S; Geistefeld, J; Gizzi, F; Gläser, S; Grigutsch, R; Jäkel, K; Kühnel, C; Schmidt, J und Stahnke, G (2013): simTD Abschlussbericht: Ökonomische Analyse.
- Bansal, P; Kockelman, K M; Singh, A (2016): Assessing public opinions of and interest in new vehicle technologies: An Austin perspective. In: *Transportation Research Part C-Emerging Technologies* 67, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.trc.2016.01.019.
- Bartels, A; Eberle, U und Knapp, A (2015): System Classification and Glossary: Adaptive Project, Deliverable D2.1.
- Bartels, A; Hamel, S; Klauske, L K; Rohlfs, M und Saust, F (2015): Querführungsassistenz, in Hakuli, Stephan; Lotz, Felix und Winner, Hermann (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZFachbuch*, Springer, Wiesbaden, S. 937–958.
- Barth, M und Boriboonsomsin, K (2008): Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* S. 163–171.
- Barth, M und Boriboonsomsin, K (2009): Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14(6), 400–410.
- Barth, M ; Boriboonsomsin, K und Wu, G (2014): Vehicle Automation and Its Potential Impacts on Energy and Emissions, in Beiker, Sven und Meyer, Gereon (Hrsg.), *Road Vehicle Automation, Lecture Notes in Mobility*, Springer, Heidelberg, S. 103–112.
- Baum, H und Grawenhoff, S (2006): Forschungsinitiative INVENT (Projekt INVENT-FAS): Schlussbericht.
- Bazilinskyy, P; Kyriakidis, M; de Winter, J (2015): An International Crowdsourcing Study into People's Statements on Fully Automated Driving. In: *Procedia Manufacturing* 3, S. 2534–2542. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.540.
- Behrens, R; Engelsberg, A; Kersken, U; Kleine-Besten, T; Mlasko, T; Pöchmüller, W und Schepers, H (2015): Navigation und Verkehrstelematik, in Hakuli, S; Lotz, F und Winner, H (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch*, Springer, Wiesbaden, S. 1047–1082.
- Benmimoun, M; Faber, F; Gustafson, D; Jonkers, E; Malta, L; Metz, B; Noort, M; Pütz, A und Saint Pierre, G (2012): euroFOT Deliverable 6.5 and 6.6: Final results: impacts on traffic efficiency and environment.
- Berscheid, A L (2014): Autonome Fahrzeuge und hegemoniale Männlichkeit in der Automobilkultur. In: *Femina politica* 23 (2), S. 22–34. Online verfügbar unter <http://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/44857>.
- Bhavsar, P; Chowdhury, M; He, Y; Pisu, P und Rios, J (2012): Forward power-train energy management modeling for assessing benefits of integrating predictive traffic data into plug-in-hybrid electric vehicles, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17(3), 201–207.
- BGL (2017): Kostenentwicklung und -Anteile im Güterkraftverkehr nach Fern- und Nahverkehr 2016. Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V., http://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm
- Bideaux, E; Mensing, F; Tattgrain, H und Trigui, R (2013): Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 18, 55–61.

- bitkom Research (2017): Autonomes Fahren und vernetzte Mobilität. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Anhaenge-an-PIs/2017/02-Februar/Bitkom-Charts-Mobility-15-02-2017-final.pdf>.
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin.
- Bösch, P; Becker, F; Becker, H; Axhausen K W (2017): Cost-based analysis of autonomous mobility services. In: Transport Policy 2017 1-16, Elsevier.
- Boston Consulting Group (BCG) (2015a): Revolution in the driver's seat. The road to autonomous vehicles. Boston, USA.
- Boston Consulting Group (BCG) (2015b): Revolution vs. Regulation. The make-or-break questions about autonomous vehicles. Boston, USA.
- Brown, A; Gonder, J und Repac, B (2013): Autonomous Vehicles Have a Wide Range of Possible Energy Impacts: Workshop on Road Vehicle Automation.
- Bühler R, Kunert U (2008): Trends und Determinanten des Verkehrsverhaltens in den USA und in Deutschland. Endbericht des Forschungsprojekts im Auftrag des BMVBS. Berlin.
- BAST (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Band 83 von Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F, Fahrzeugtechnik, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- Bundesgesetzblatt (1977): Bundesgesetzblatt Teil II, Nr. 39 vom 11.10.1977.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Klimaschutzbericht 2016: Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren: Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten.
- Bundesrat (2017): Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes.
- Bundesrat (2016): Entwurf eines Gesetzes zur Änderung der Artikel 8 und 39 des Übereinkommens vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr.
- Burns, L D, Jordan, W C and Scarborough, B A (2013): Transforming personal mobility. The Earth Institute at Columbia University.
- Butz, B; Kluth, T; Kotzagiorgis, S; Leible, M; Nebauer, G; Ratzenberger, R; Schneider, W und Schubert, M (2014): Verkehrsverflechtungsprognose: 2030 Abschlussbericht.
- California PATH Program (2011): Investigating the Potential Benefits of Broadcasted Signal Phase and Timing (SPaT) Data under IntelliDrive: Final Report, Institute of Transportation Studies.
- Choi, J K; Ji, Y G (2015): Investigating the Importance of Trust on Adopting an Autonomous Vehicle. In: International Journal of Human-Computer Interaction 31 (10), S. 692–702. DOI: 10.1080/10447318.2015.1070549.
- Continental AG (2013): Continental-Mobilitätsstudie 2013. Online verfügbar unter http://www.continental-corporation.com/www/download/presseportal_com_de/themen/initiativen/ov_mobilitaetsstudien_de/ov_mobilitaetsstudie_2013/download_channel/paes_mobilitaetsstudie_de.pdf.

- Continental AG (2015): Continental-Mobilitätsstudie 2015. Online verfügbar unter http://www.continental-corporation.com/www/download/presseportal_com_de/themen/initiativen/ov_mobilitaetsstudien_de/ov_mobilitaetsstudie2015_de/download_channel/mobistud2015_praesentation_de.pdf.
- DAF (2017): DAF - Predictive Cruise Control. URL: <http://www.daftrucks.de/de-de/trucks/comfort-and-safetysystems-euro-6/predictive-cruise-control> [Zuletzt abgerufen am: 30.01.2017]
- Daimler AG (2016): Unterwegs im Internet der Dinge: Die Welt der Logistik 1. [Zuletzt abgerufen am: 27.01.2017]
- Daimler AG (2017): Der Autopilot für Lkw: Highway Pilot. URL: <https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/special/technologie-lkw.html> [Zuletzt abgerufen am: 05.04.2017]
- de Haan, P; Kahlenborn, W; Marth, H; Peters, A und Semmling, E (2015): Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik.
- de Jong, G; Schrotten, A; van Essen, H; Otten, M; Bucci, P (2010): Price sensitivity of European road freight transport – towards a better understanding of existing results”. Significance/CE Delft.
- de Kievit, M (2014): ECOSTAND Final project report: Deliverable 1.1.
- DEKRA e.V. (2015): Studie zur Akzeptanz autonomer Fahrzeuge. Online verfügbar unter http://www.dekra.de/de/pressemitteilung?p_p_lifecycle=0&p_p_id=ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay&_ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay_articleID=55294524#prettyPhoto.
- Dokic, J; Müller, B und Meyer, G (2015): European Roadmap: Smart Systems for Automated Driving.
- Detecon Consulting (2016): Autonomes Fahren: Wenn das Lenkrad zur Sonderausstattung wird. Eine empirische Untersuchung der Akzeptanz autonom fahrender Fahrzeuge.
- Eimler, S C; Geisler, S (2015): Zur Akzeptanz Autonomes Fahrens – Eine A-Priori Studie. In: A. Weisbecker, M. Burmester & A. Schmidt (Hg.): Mensch und Computer 2015. Stuttgart: Oldenbourg Wissenschaftsverlag,, S. 533-540.
- e-Mobil BW (2015): Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg. Landesagentur für Elektromobilität
- Ernst, C S; Harter, C; Olschewski, I und Eckstein, L (2014): CO2-Emissionsreduktion bei Pkw und LNF nach 2020: Abschlussbericht.
- Ernst & Young GmbH (2013): Autonomes Fahren – die Zukunft des PKW-Marktes? Was Autofahrer von Fahrzeugen mit Autopilot halten und wie sie über Fahrer-Assistenzsysteme denken. Online verfügbar unter [http://www.ey.com/Publication/vwLUAs-sets/EY_Studie_-_Autonomes_Fahren_-_die_Zukunft_des_Pkw-Marktes/\\$FILE/EY-Autopilot-2013-Praesentation.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAs-sets/EY_Studie_-_Autonomes_Fahren_-_die_Zukunft_des_Pkw-Marktes/$FILE/EY-Autopilot-2013-Praesentation.pdf).
- ERTRAC (2015): Automated Driving Roadmap.
- ERTRAC (2017): Automated Driving Roadmap. ERTRAC Working Group “Connectivity and Automated Driving”. Version 7.0. Brussels, Belgium.
- Etemad, A. et al. (2017): Automated Driving Applications and Technologies for Intelligent Vehicles. Endbericht des Adaptive Projekts. Wolfsburg, Deutschland.

- Fagant, D J und Kockelman, K M (2013): Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations, Eno Center for Transportation.
- Fagnant, D; Kockelmann, K M (2014): The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios, Austin.
- Fagnant, D; Kockelman, K M (2015): Dynamic ride-sharing and optimal fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles. In: Paper presented at 94th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C.
- Fahrenkrog, F; Wang, L; Rösener, C; Sauerbier, J; Breunig, S (2017): Impact analysis for supervised automated driving applications. Deliverable D7.3 des EU-Projekts Adaptive-IP. Aachen.
- Fermi, F; Fiorello, D; Krail, M; Schade, W (2014): Description of the ASTRA-EC model and of the user interface. Deliverable D4.2 of ASSIST (Assessing the social and economic impacts of past and future sustainable transport policy in Europe). Projekt aus dem 7. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe.
- Fochler, O; Lüke, S; Regensburger, T und Schaller, T (2015): Stauassistentz und -automation, in Hakuli, Stephan; Lotz, Felix und Winner, Hermann (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden, S. 995–1008.
- Fraedrich, E; Lenz, B (2014a): Automated Driving. Individual and Societal Aspects. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2416, S. 64–72. DOI: 10.3141/2416-08.
- Fraedrich, E; Lenz, B (2014b): Autonomes Fahren - Mobilität und Auto in der Welt von morgen. Ausblick zur Akzeptanz des autonomen Fahrens im Projekt „Villa Ladenburg“ der Daimler und Benz Stiftung. In: Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis (23), S. 46–53.
- Fraedrich, E; Lenz, B (2015): Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung, in Maurer, Markus; Gerdes, Joseph Christian; Lenz, Barbara und Winner, Hermann (Hrsg.), Autonomes Fahren, Springer, Berlin Heidelberg, S. 175–195.
- Fraedrich, E; Cyganski, R; Wolf, I; Lenz, B (2016): User Perspectives on Autonomous Driving: A Use-Case-Driven Study in Germany. Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin (Arbeitsberichte, 187).
- Fraedrich, E; Lenz, B (2016a): Societal and Individual Acceptance of Autonomous Driving. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): Autonomous Driving. Technical, legal and social aspects. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 621–640.
- Fraedrich, E; Lenz, B (2016b): Taking a Drive, Hitching a Ride: Autonomous Driving and Car Usage. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): Autonomous Driving. Technical, legal and social aspects. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 665–685.
- Frank, P, Friedrich, M, Schlaich, J (2008): Betriebskosten von Busverkehren schnell und genau ermitteln, Der Nahverkehr, Heft 11, Alba Fachverlage, Düsseldorf 2008
- Franz, M (2016): Rechtlicher Rahmen für automatisiertes Fahren in Arbeit [WWW Document]. Heise Autos. URL <http://www.heise.de/autos/artikel/Rechtlicher-Rahmen-fuer-automatisiertes-Fahren-in-Arbeit-3172273.html> (letzter Zugriff am 20.02.2017).

- Fraunhofer IAO (2016): The Value of Time. Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren.
- Friedrich, M; Hartl, M (2016): MEGAFON – Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Forschungsbericht. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Frost & Sullivan (2014): Futuretech Alert.
- Frost & Sullivan (2015): Strategic Outlook for Autonomous Heavy-duty Trucks: Autonomous Truck Capabilities to First Appear in the Form of Truck Platooning by 2022.
- Gasser, T M (2012): Gemeinsamer Schlussbericht: BAST-Projektgruppe 'Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung', in Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Band 83 von Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F, Fahrzeugtechnik, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, S. 5–26.
- Gasser, T M; Seeck, A und Smith, B W (2015): Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung, in Hakuli, Stephan; Lotz, Felix und Winner, Hermann (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZFachbuch, Springer, Wiesbaden, S. 27–54.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (2016): Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung. Teil 1: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten. Forschungsbericht Nr. 39. Unter Mitarbeit von Tobias Vogelpohl und Mark Vollrath. Lehrstuhl für Ingenieur- und Verkehrspsychologie Institut für Psychologie, TU Braunschweig. Berlin.
- Gold, C; Koerber, M; Hohenberger, C; Lechner, D; Bengler, K (2015): Trust in automation - Before and after the experience of take-over scenarios in a highly automated vehicle. In: 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (Ahfe 2015) and the Affiliated Conferences, Ahfe 2015, S. 3025–3032. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.847.
- Gurzu, A (2016): Connected cars could be big energy savers, or not.
- Hartmann, M; Busch, F; Vortisch, P (2017): Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. Studie im Auftrag des VDA. FAT-Schriftenreihe 296. München.
- Hazan, J; Lang, N; Ulrich, P et al. (2016): Will autonomous vehicles derail trains? In: bcg.Perspectives, September 2016.
- Hilgendorf, E (2014): Recht, Maschinen und die Idee des Posthumanen [WWW Document]. Telepolis. URL <https://www.heise.de/tp/features/Recht-Maschinen-und-die-Idee-des-Posthumanen-3365376.html> (letzter Zugriff am 23.02.2017).
- Hohenberger, C; Spörrle, M; Welpel, I M (2016): How and why do men and women differ in their willingness to use automated cars? The influence of emotions across different age groups. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 94, S. 374–385. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.022.
- Howard, D; Dai, D (2014): Public Perceptions of Self-driving Cars: The Case of Berkeley, California. Prepared for the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. University of California, Berkeley – Department of City and Regional Planning. Berkeley, CA 94720.
- ifmo (2016): Autonomous Driving: The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour. Institut für Mobilitätsforschung, München.

- iMobility Forum (2013): Roadmap Automation in Road Transport [WWW Document]. URL <http://www.imobilitysupport.eu/library/imobility-forum/working-groups/active/automation/reports-3/2185-auto-wg-automation-roadmap-final-report-june-2013/file> (letzter Zugriff am 25.10.2016).
- INRIX (2017): INRIX Traffic Scorecard 2016. INRIX Research.
- Ioannou, P (2003): Evaluation of the Effects of Intelligent Cruise Control Vehicles in Mixed Traffic: Final report.
- Jin, Q; Wu, G; Boriboonsomsin, K und Barth, M J (2016): Power-Based Optimal Longitudinal Control for a Connected Eco-Driving System, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17(10), 2900–2910.
- Kauer, M; Franz, B; Schreiber, M; Bruder, R; Geyer, S (2012): User acceptance of cooperative maneuver-based driving - a summary of three studies. In: *Work-A Journal of Prevention Assessment & Rehabilitation* 41, S. 4258–4264. DOI: 10.3233/WOR-2012-0720-4258.
- Keller, M und Würthrich, P (2014): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 3.1/3.2: Quick Reference.
- Klunder, G; Benz, T; Winder, A; Villa, T R; Wolfermann, A; Mans, D und Nedelcu, B (2014): Methodology for classification of ITS: AMITRAN Project.
- Krempf, S (2017): Verbraucherschützer verreißen Dobrindts Gesetzentwurf zum automatisierten Fahren [WWW Document]. Heise Online. URL <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Verbraucherschuetzer-verreissen-Dobrindts-Gesetzentwurf-zum-automatisierten-Fahren-3589269.html> (letzter Zugriff am 23.03.2017).
- Krueger, R; Rashidi, T H; Rose, J M (2016): Preferences for shared autonomous vehicles. In: *Transportation Research Part C-Emerging Technologies* 69, S. 343–355. DOI: 10.1016/j.trc.2016.06.015.
- Kyriakidis, M; Happee, R; de Winter, J C F (2015): Public opinion on automated driving. Results of an international questionnaire among 5000 respondents. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 32, S. 127–140. DOI: 10.1016/j.trf.2015.04.014.
- Lease Plan (2016): Studie: Zwei Drittel der befragten Autofahrer würde nur unter Vorbehalt in ein autonomes Fahrzeug einsteigen. Presseinformation vom 23.05.2016. Online verfügbar unter <https://www.leaseplan.de/en/our-company/press/press-detail-view/article/studie-zwei-drittel-der-befragten-autofahrer-wuerde-nur-unter-vorbehalt-in-ein-autonomes-fahrzeug-e.html>.
- Lederer, M; Markschläger, P; Wahl, H G und Weberbauer, F (2014): Assistenzsystem für mehr Kraftstoffeffizienz, in Siebenpfeiffer, Wolfgang (Hrsg.), *Vernetztes Automobil, ATZ / MTZ-Fachbuch*, Springer, Wiesbaden.
- Lee, J G; Kim, K J; Lee, S; Shin, D H (2015): Can Autonomous Vehicles Be Safe and Trustworthy? Effects of Appearance and Autonomy of Unmanned Driving Systems. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 31 (10), S. 682–691. DOI: 10.1080/10447318.2015.1070547.
- Lemmer, K. (2016): Neue autoMo-bilität: automatisierter Straßenverkehr der Zukunft, *acatech STUDIE*. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Eds.), Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- Lenz, B; Fraedrich, E (2016): New Mobility Concepts and Autonomous Driving: The Potential for Change. In: Maurer, M.; Gerdes, J.C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): *Autonomous Driving. Technical, legal and social aspects*, S. 173-192.

- London School of Economics and Political Science (LSE) Consulting; Goodyear (2016): Think Good Mobility. Autonomous vehicles: negotiating a place on the road. A study on how drivers feel about interacting with Autonomous Vehicles on the road.
- Litman, S (2014): Transportation Elasticities - How Prices and Other Factors Affect Travel Behaviour. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T A (2016): Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning.
- MacKenzie, D; Wadud, Z und Leiby, P (2016): A first order estimate of energy impacts of automated vehicles in the United States.
- Madigan, R; Louw, T; Dziennus, M; Graindorge, T; Ortega, E; Graindorge, M; Merat, N (2016): Acceptance of Automated Road Transport Systems (ARTS). An Adaptation of the UTAUT Model. In: Transportation Research Procedia 14, S. 2217–2226. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.237.
- Marberger, C; Braeuchle, H; Mielenz, H; Fuehrer, T (2015): Kundenwünsche beim automatisierten Fahren in der Stadt. In: ATZ Extra 7, S. 18–22.
- Marinik, A.; Bishop, R.; Fitchett, V.; Morgan, J. F.; Trimble, T. E. und Blanco, M. (2014): Human Factors Evaluation of Level 2 And Level 3 Automated Driving Concepts: Concepts of Operation DOT HS 812 044, Washington, DC.
- Matthaei, R; Reschka, A; Rieken, J; Dierkes, F; Ulbrich, S; Winkle, T und Maurer, M (2015): Autonomes Fahren. In Hakuli, S; Lotz, F und Winner, H (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden, S. 1139–1166.
- Maurer, M; Gerdes, C J; Lenz, B; Winner, H (Hrsg.) (2016): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer Verlag.
- Mensing, F; Trigui, R und Bideaux, E (2011): Vehicle trajectory optimization for application in ECO-driving, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011, IEEE, Piscataway, NJ, S. 1–6.
- Miller, S A und Heard; B R (2016): The Environmental Impact of Autonomous Vehicles Depends on Adoption Patterns, Environmental science & technology 50(12), 6119–6121.
- National Highway Traffic Safety Administration (2013): Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles, U.S. Department of Transportation.
- National Highway Traffic Safety Administration (2016): Federal Automated Vehicles Policy: Accelerating the Next Revolution In Roadway Safety, U.S. Department of Transportation.
- Naus, G; Ploeg, J; Steinbuch, M; van de Molengraft, R und Vugts, R (2010): Cooperative adaptive cruise control, design and experiments, American Control Conference (ACC), 2010, IEEE, Piscataway, NJ, S. 6145–6150.
- Nowak G (2016): The era of digitized trucking - Transforming the logistics value chain. PwC 2016
- OECD/ ITF (2015): Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic. International Transport Forum, Paris.
- Oonk, M und Svensson, J (2013): Automation in Road transport: Roadmap.
- Orfila, O (2011): Impact of the penetration rate of ecodriving on fuel consumption and traffic congestion.

- Ortúzar; J, Willumsen, L (2011): *Modelling Transport*. Fourth Edition. John Wiley & Sons. New York.
- Oum; T H, Waters W G, Yong J S (1990): *A Survey of Recent Estimates of Price Elasticities of Demand for Transport*. Infrastructure and Urban Development Department of The World Bank.
- Payre, W; Cestac, J; Delhomme, P (2014): *Intention to use a fully automated car. Attitudes and a priori acceptability*. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 27, S. 252–263. DOI: 10.1016/j.trf.2014.04.009.
- Pendleton, S; Uthaicharoenpong, T; Chong, Z J; Fu, G M J; Qin, B; Liu, W et al. (2015): *Autonomous Golf Cars for Public Trial of Mobility-on-Demand Service*. In: 2015 IEEE/Rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems (Iros), S. 1164–1171.
- Pettersson, I; Karlsson, I. Marianne C (2015): *Setting the stage for autonomous cars. A pilot study of future autonomous driving experiences*. In: *IET Intelligent Transport Systems* 9 (7), S. 694–701. DOI: 10.1049/iet-its.2014.0168.
- Plötz, P; Schneider, U; Globisch, J; Dütschke, E (2014): *Who will buy electric vehicles? Identifying early adopters in Germany*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 67, S. 96–109. DOI: 10.1016/j.tra.2014.06.006.
- Reif, K (Hrsg.) (2010): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*, Bosch Fachinformation Automobil, 1 Aufl., Vieweg+Teubner.
- Römer, V (2015): *Predictive Powertrain Control*.
- Roland Berger (2013): *Connected Mobility 2025 - How tomorrow's passenger transportation will add new value*.
- Roland Berger (2016): *Automated Trucks The next big disruptor in the automotive industry?* Chicago / Munich – April 2016
- Roland Berger, fka (2016): *Automatisierte Fahrzeuge*. URL https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_index_autonomous_driving_q3_2016_final_d.pdf (letzter Zugriff am 19.01.2017).
- Rumbolz, P (2013): *Untersuchung der Fahrereinflüsse auf den Energieverbrauch und die Potenziale von verbrauchsreduzierenden Verzögerungsassistentenfunktionen beim PKW*, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- SAE International (2016): *Surface and Vehicle recommended practice: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*.
- Schade, W; Krail, M (2016): *Energiepreise für ein Referenzszenario der MKS (ARBEITSPAPIER zum Projekt Unterstützung des BMVI bei der Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie)*
- Schlag, B (2016): *Automatisiertes Fahren im Straßenverkehr – Automatisiertes Fahren im Straßenverkehr - Offene Fragen aus Sicht der Psychologie*. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 62 (2). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Bernhard_Schlag/publication/303667026_Automatisiertes_Fahren_im_Straassenverkehr_-_Offene_Fragen_aus_Sicht_der_Psychologie/links/574c1c2108ae538af6a50c32.pdf.
- Schoettle, B; Sivak, M (2014): *A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the U.S, the UK and Australia*. Report No. UMTRI-2014-21. The University of Michigan, Transportation Research Institute. Michigan.

- Schubert, M et al. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht. Intra-plan, Freiburg.
- Simon, K; Jentsch, M; Bullinger, A C.; Schamber, G; Meincke, E (2015): Sicher aber langweilig? Auswirkungen vollautomatisierten Fahrens auf den erlebten Fahrspaß. In: Z. Arb. Wiss. 69 (2), S. 81–88. DOI: 10.1007/BF03373944.
- Spence, A; Turksma, S; Schelling, A; Benz, T; Medevielle, J P; Mc Crae, I; Jaaskelainen, J und Boethius, E (2009): Methodologies for Assessing the Impact of ITS-Applications on CO2-Emissions: Technical Report.
- Stephens, T; Gonder, J; Chen, Y et al. (2016): Estimated bounds and important factors for fuel use and consumer costs of connected and automated vehicles. Technical Report, U.S. Department of Energy, November 2016.
- Stiller, C (2005): Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr, in Maurer, Markus und Stiller, Christoph (Hrsg.), Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 1–20.
- Thompson, C (2016): Driverless Cars and the future of parking. Zugriff unter: <http://eu-rope.newsweek.com>
- Trommer, S; Fraedrich, E; Kolarova, V; Lenz, B (2016): Exploring user expectations on autonomous driving, 11.10.2016.
- U.S. Department of Energy (2015): Technology Assessments: Connected and Automated Vehicles Technology Assessment.
- VDA (2016): Datenschutzrechtliche Aspekte bei der Nutzung vernetzter und nicht vernetzter Kraftfahrzeuge.
- VDA (2015): Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren.
- VDV (2015): Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge. Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen. Positionspapier, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Köln.
- Vimmerstedt, L; Brown, A; Newes, E; Markel, T; Schroeder, A; Zhang, Y; Chipman, P und Johnson, S (2015): Transformative Reduction of Transportation Greenhouse Gas Emissions: Opportunities for Change in Technologies and Systems.
- Vogel, M (2015): Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) Ergebnispapier Nr. 9. Deutsches Dialog Institut GmbH 2015
- Wadud, Z; MacKenzie, D und Leiby, P (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles, Transportation Research Part A: Policy and Practice 86, 1–18.
- Wietschel, M., Plötz, P., Gnann, T., Kühn, A.: (2014): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Woisetschläger, D M (2016): Consumer Perceptions of Automated Driving Technologies: An Examination of Use Cases and Branding Strategies. In: Maurer, M; Gerdes, J C; Lenz, B; und Winner, H (Hg.): Autonomous Driving. Technical, legal and social aspects. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 687–706.
- World Economic Forum/Boston Consulting Group (2015): Self-driving Vehicles in an Urban Context. Pressemitteilung vom 24.11.2015. Online verfügbar unter http://www3.weforum.org/docs/WEF_Press%20release.pdf.

- WSP/Parsons Brinckerhoff (2016): Making better places: Autonomous vehicles and future opportunities, London.
- Wüstenhagen, R; Wolsink, M; Bürer, M J (2007): Social acceptance of renewable energy innovation. An introduction to the concept. In: Energy Policy 35 (5), S. 2683–2691. DOI: 10.1016/j.enpol.2006.12.001.
- Yap, M D.; Correia, G; 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, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.003.
- Zimmermann, W und Schmidgall, R (2014): Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle, Standards und Softwarearchitektur, ATZ / MTZ-Fachbuch, 5 Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Zmud, J; Sener, I N; Wagner, J (2016): Self-Driving Vehicles Determinants of Adoption and Conditions of Usage. In: Transportation Research Record (2565), S. 57–64. DOI: 10.3141/2565-07.