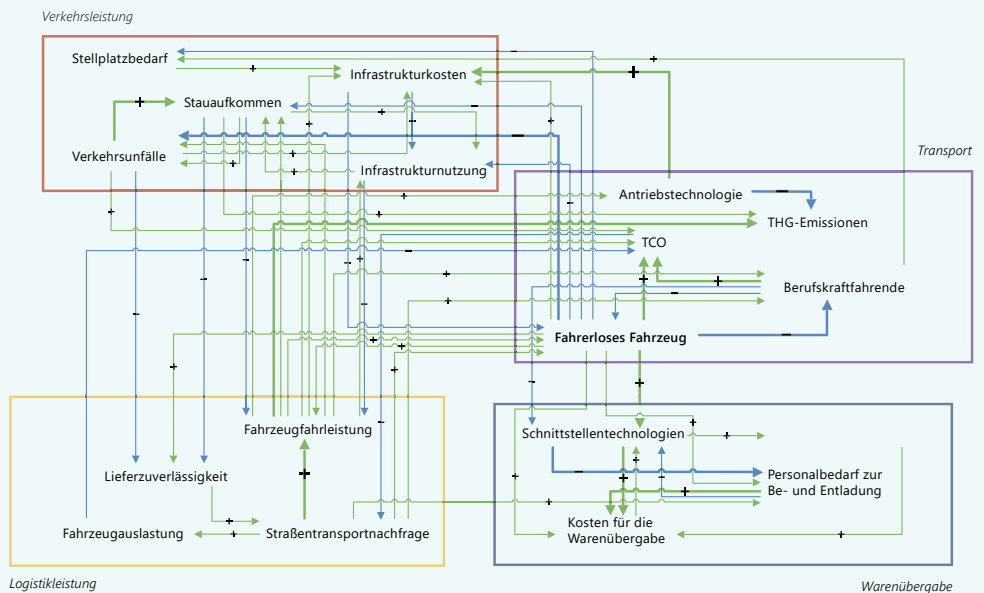


Sandra Tjaden

Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem



Band 24

Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik

Herausgegeben von

Heike Flämig und Carsten Gertz

Technische Universität Hamburg

Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur(in) (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Sandra Tjaden

aus
Gifhorn

2023

1. Betreuerin: Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig
2. Betreuerin: Prof. Dr. habil. Barbara Lenz

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2023

DOI: 10.15480/882.5104

URI: <http://hdl.handle.net/11420/15287>

URN: urn:nbn:de:gbv:830-882.0219433

Creative Commons Lizenzvertrag

Der Text steht, soweit nicht anders gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0). Das bedeutet, dass er vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets der Urheber, die Quelle des Textes und o. g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann aufgerufen werden unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

© 2023 Institut für Verkehrsplanung und Logistik

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Institut für Verkehrsplanung und Logistik

Umschlag: Institut für Verkehrsplanung und Logistik

Sandra Tjaden

Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

Band 24

Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik

Technische Universität Hamburg

herausgegeben von

Heike Flämig und Carsten Gertz

Vorwort

In Deutschland ist es seit dem Jahr 2021 rechtlich möglich, »Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen« einzusetzen. Für Unternehmen ist das fahrerlose Fahren eine Alternative, die den Mangel an Berufskraftfahrenden beheben könnte sowie Effizienzsteigerungen und Kosteneinsparungen verspricht. Allerdings übernehmen Berufskraftfahrende in der heutigen Zeit neben der reinen Fahrtätigkeit unter anderem auch die Be- und Entladung des Fahrzeugs, sichern die Ladung und dokumentieren die Warenbegleitpapiere. Diese Tätigkeiten müssten mit der Einführung fahrerloser Fahrzeuge vollständig durch Automatisierungssysteme oder anderes Personal übernommen werden (Flämig 2015). Negative Folgen fahrerloser Fahrzeuge werden bisher meist nur aus der Sicherheitsperspektive betrachtet.

Eine ganzheitliche Betrachtung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens fehlt bisher. Und obwohl die Potenziale des Einsatzes fahrerloser Fahrzeuge im Straßengüterverkehrssystem höher eingeschätzt werden, dominiert bis heute die Personenverkehrsforschung. Die vorgelegte Dissertation von Sandra Tjaden widmet sich dieser hoch aktuellen Forschungslücke und erforscht die sich im Straßengüterverkehrssystem durch das fahrerlose Fahren ergebenden Veränderungen aus einer aktorsübergreifenden, logistikprozessbezogenen Perspektive.

Kern der Arbeit bildet das aus dem selbst entworfenen qualitativen Zukunftsmodell abgeleitete systemdynamische Rechnermodell. Da die systemdynamische Modellierung keine explizite Methode für die Identifizierung der zu berücksichtigenden Variablen und ihrer Wirkungen vorsieht, identifiziert die Kandidatin das Sensitivitätsmodell und den Papiercomputer nach Vester (1990) als geeignete Methode und reichert das methodische Vorgehen in herausragender Weise an.

Das entwickelte systemdynamische Simulationsmodell ist in der Lage, die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens auf das Logistiksystem ganzheitlich zu quantifizieren. Darin sind alle mit Hilfe der Einflussmatrix nach Vester identifizierten Wirkungszusammenhänge und somit auch alle Rückkopplungsschleifen abgebildet. Dadurch können erstmalig die Wirkungen einer zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser

Fahrzeuge über den Zeitverlauf auf die anderen Variablen im Logistiksystem quantifiziert werden. Dies stellt eine wissenschaftliche Neuerung gegenüber den bisher meist qualitativen Forschungen und Ermittlungen einzelner Wirkungen dar. Das Modell bildet dabei nicht nur die direkten und indirekten Wirkungsbeziehungen, sondern auch die Stärke der Wirkung, die Wirkungsrichtung und die drei positiven und sechs negativen Rückkopplungsschleifen zwischen den Subsystemen sowie die elf negativen und 16 positiven Rückkopplungsschleifen innerhalb der Subsysteme des Gesamtsystems ab. Die Arbeit leistet somit einen wesentlichen Beitrag für ein ganzheitliches Verständnis für potenzielle Änderungen im Logistiksystem durch das fahrerlose Fahren, einer noch nicht verfügbaren Technologie im Logistiksystem und damit auf dem Gebiet der Zukunftsforschung.

Durch die ganzheitliche Betrachtung zeigt die Simulation im Jahr 30 nicht nur den Rückgang von Berufskraftfahrenden von ca. 30% auf, sondern auch von Personal zur Be- und Entladung von über 40%. Ausgehend vom Basisjahr würden 30 Jahre nach der Einführung von fahrerlosen Straßengüterfahrzeugen insgesamt etwa 190.000 Arbeitsplätze für Berufskraftfahrende und Personal beim Versender bzw. Empfänger in Deutschland weniger benötigt. Überraschend ist, dass sich die Personalkosten in der Warenübergabe erst reduzieren, wenn in Deutschland der Personalbedarf in der Warenübergabe unter 30.000 Personen gesunken ist und wenn von den verbleibenden Personen in der Warenübergabe, Dreiviertel eine Führungsposition innehaben.

Für die Entwicklung des Straßengüterverkehrs und der Logistikbranche ist es für die Unternehmen und die weitere Forschungsförderung von hoher Relevanz, die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens nicht nur im Transportprozess, sondern im gesamten Logistiksystem abschätzen zu können. Nur mit Hilfe einer fundierten Grundlage können die Interessengruppen des Logistiksystems eine weitestgehend reibungslose Einführung der Technologie in den Realbetrieb ermöglichen.

Die Arbeit endet jedoch nicht mit der Identifikation der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem. Sie geht vielmehr darüber hinaus, indem ökologische, ökonomische und soziale Gestaltungsoptionen für eine nachhaltige Einführung des fahrerlosen Fahrens evaluiert werden. Die modellierten und interpretierten Gestaltungsoptionen und die

zielgerichtete Einbeziehung der relevanten Akteure in ihrer jeweiligen Rolle liefern eine über die Maße anwendungsorientierte Handlungsanweisung für eine spezifische Ansprache der relevanten Akteure im Veränderungsprozess. Hier arbeitet Sandra Tjaden hervorragend heraus, dass die Politik für die meisten Gestaltungsoptionen den Impuls geben muss, damit die umsetzenden Akteure tätig werden können. Frau Tjaden legt damit in hervorragender Weise die Grundlage für eine ökologisch, ökonomisch und sozial verträgliche und erfolgreiche Einführung des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr.

Hamburg, Mai 2023

Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig
Prof. Dr. habil. Barbara Lenz

Danksagung

Eine Dissertation anzufertigen, ist ein bereichernder aber auch ein intensiver Weg, bei dem die Begleitung durch andere Menschen eine wertvolle Unterstützung darstellt. Sowohl im universitären als auch im privaten Umfeld konnte ich auf diesem Weg, den ich während meiner Zeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrsplanung und Logistik der Technischen Universität Hamburg beschritten habe, auf treue Begleiterinnen und Begleiter zählen, denen ich an dieser Stelle herzlichen danken möchte.

Zunächst und ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Doktormutter Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig, die mich in den Jahren meiner Promotion stets unterstützt, aber auch herausgefordert hat, das Beste aus meiner Arbeit herauszuholen. Die Welt der Systeme und ihrer Dynamiken, in die sie mich eingeführt hat, haben mir eine neue Perspektive aufgezeigt und prägen die Arbeit und mein Denken nachhaltig. Mit ihrer fachlichen, konstruktiven und selbstlosen Art sowie ihrer unermüdlichen Entschlossenheit hat sie diese Arbeit in besonderem Maße bereichert.

Ich bedanke mich außerdem ganz herzlich bei Prof. Dr. habil. Barbara Lenz für die Übernahme des Zweitgutachtens. Das gemeinsame Forschungsprojekt ATLaS mit der Verkehrsforschungsabteilung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt hat die Grundlage für mein Interesse am fahrerlosen Fahren gelegt und diese Arbeit maßgeblich beeinflusst.

Ein großer Dank gilt auch meinen (ehemaligen) Kolleginnen und Kollegen aus dem Logistik-Team. Allen voran danke ich meiner Zimmerkollegin Dr.-Ing. Kerstin Rosenberger sowie Marcel Steffen, Patrick Fieltsch und Katharina Beck für den großartigen Zusammenhalt, das offene Ohr und den guten Rat auf diesem langjährigen Weg. Auch den übrigen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Verkehrsplanung und Logistik danke ich herzlich für diese besondere und prägende Zeit.

Neben der fachlichen Begleitung ist auch die private Unterstützung essentiell auf dem Weg zur Dissertation. Meine Familie und meine Freunde waren neben der Arbeit eine wichtige Stütze während meiner gesamten akademischen Laufbahn, denen ein großer Dank gilt.

Mein abschließender, ganz besonderer Dank richtet sich an meinem Mann Jürgen für seine bedingungslose Unterstützung, das entgegengebrachte Verständnis, die unermüdliche Motivation und das stetige Vertrauen in mich und meine Arbeit.

Vielen Dank!

Hamburg, Mai 2023

Sandra Tjaden

Zusammenfassung

Obwohl das fahrerlose Fahren Optimierungspotenziale für die Logistikbranche verspricht, werden in der Literatur und Forschung die Wirkungen im Logistiksystem bislang kaum berücksichtigt. Diese Arbeit hat zum Ziel, das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu verstehen, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren. Aufbauend auf einer systematischen Literaturanalyse und einer vollständigen Auswertung von 31 identifizierten Publikationen werden drei Forschungsfragen in dieser Arbeit abgeleitet: 1) Anhand welcher Elemente lässt sich das straßengebundene Logistiksystem beschreiben, 2) Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet und 3) Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu reduzieren.

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage werden die Elemente des Logistiksystems aus einer verkehrsplanerischen und einer unternehmerischen Perspektive ermittelt. Die identifizierten Elemente dienen im Weiteren als Grundlage für die Analyse der Wirkungen. Anhand eines dreistufigen Modellansatzes bestehend aus Wortmodell, qualitativem und quantitativem Zukunftsmodell und Gestaltungsmodellen werden die weiteren Forschungsfragen beantwortet. Das Wortmodell beschreibt die Welt des fahrerlosen Fahrens. Mithilfe einer Literaturanalyse sind 53 nichttechnische Aspekte des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem identifiziert und zu 18 Variablen, die durch das fahrerlose Fahren beeinflusst werden, zusammengeführt. Das qualitative Zukunftsmodell bildet die Wirkungen basierend auf der Literatur und einem Expertenworkshop ab. Dies dient der Visualisierung und der Analyse des Wirkungsgefüges im System und seiner Subsysteme. Insgesamt werden 19 positive und 17 negative Rückkopplungsschleifen im System ermittelt. Außerdem werden die Rollen der Variablen im System identifiziert. Das qualitative Zukunftsmodell wird mit Hilfe einer Einflussmatrix nach Vester (1990) in einem quantitativen Zukunftsmodell systemdynamisch modelliert, das das Wirkungsgefüge des Systems umfasst und ausgehend vom Jahr 2019 in drei Zeitintervallen über 30 Jahre quantifiziert. Die Ergebnisse des

Simulationsmodells zeigen, dass das fahrerlose Fahren zu erwünschten aber auch unerwünschten Wirkungen im Logistiksystem führen kann. Anhand der ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension einer nachhaltigen Entwicklung werden die Wirkungen den verkehrspolitischen und unternehmerischen Zielen zugeordnet. Mithilfe des Simulationsmodells erfolgt die Entwicklung von drei Gestaltungsmodellen, welche 10 Gestaltungsoptionen für eine ökologische, ökonomische und soziale Gestaltung des Logistiksystems mit fahrerlosen Fahrzeugen quantifizieren. Die Gestaltungsoptionen werden den impulsgebenden, den umsetzenden und den nutzengewinnenden Akteuren zugeordnet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	25
1.1	Zielsetzung, Forschungsfragen und Systemgrenzen der Arbeit	27
1.2	Vorgehen der Arbeit	28
2	Grundlagen des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr	33
2.1	Entwicklung vom assistierten zum fahrerlosen Fahren	33
2.2	Begriffsbestimmung des fahrerlosen Fahrens anhand von Automatisierungsstufen und Tätigkeitsprofilen	38
2.3	Rechtliche und ethische Rahmenbedingungen des fahrerlosen Fahrens	46
2.4	Technische Voraussetzungen des fahrerlosen Fahrens	50
2.5	Ableitung der Erkenntnisse für die weitere Arbeit	52
3	Forschungsstand zum automatisierten und fahrerlosen Fahren	55
3.1	Methodisches Vorgehen zur Ermittlung des Forschungsstands	56
3.2	Systematische Literaturanalyse	59
3.3	Detaillierte Analyse ausgewählter Literatur	62
3.3.1	Bestehende Literatur zur Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	62
3.3.2	Literatur zur Analyse von Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Güterverkehr	65
3.4	Ableitung der Forschungsfragen	77
4	Systemdynamischer Forschungszugang	81
4.1	Grundlegendes Systemverständnis und die Methode System Dynamics	83
4.2	Sensitivitätsmodell und Papiercomputer nach Vester (1990)	85
4.3	Dreistufiger Modellansatz	89

5	Systemgrenzen des straÙengebundenen Logistiksystems	93
5.1	Bestehende Systemmodelle und Einordnung des Logistiksystems	93
5.2	Prozessuale Gestaltung des straÙengebundenen Logistiksystems	103
5.3	Arbeitsdefinition des straÙengebundenen Logistiksystems	111
6	Wortmodell des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem	115
6.1	Die Welt des fahrerlosen Fahrens	115
6.2	Ableitung der Variablen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem	117
6.3	Überprüfung des Variablensatzes	131
7	Qualitatives Zukunftsmodell des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem	135
7.1	Wirkungsbeziehungen des fahrerlosen Fahrens anhand der Literatur	135
7.1.1	Perspektive der dienstleistenden Unternehmen	136
7.1.2	Perspektive der versendenden und empfangenden Unternehmen	143
7.1.3	Perspektive der Transportunternehmen	154
7.1.4	Perspektive der Politik	165
7.1.5	Zusammenfassung der Wirkungsbeziehungen	174
7.2	Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem	174
7.2.1	Wirkungsgefüge im Logistiksystem	176
7.2.2	Rollen der Variablen im Logistiksystem	178
7.2.3	Analyse der Subsysteme	181
7.3	Ergebnisse aus dem qualitativen Zukunftsmodell	193
8	Quantitatives Zukunftsmodell der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem	195
8.1	Aufbau des Simulationsmodells	196
8.1.1	Formalisierung der Variable »Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge«	198
8.1.2	Formalisierung der Subsysteme	203
8.1.3	Limitationen des Simulationsmodells	216

8.2	Auswertung des Simulationsmodells	218
8.2.1	Auswertung des Subsystems »Logistikleistung«	218
8.2.2	Auswertung des Subsystems »Warenübergabe«	221
8.2.3	Auswertung des Subsystems »Transport«	223
8.2.4	Auswertung des Subsystems »Verkehrsleistung«	227
8.3	Diskussion der Ergebnisse des quantitativen Zukunftsmodells	230
9	Gestaltungsmodelle zur Reduktion unerwünschter Wirkungen durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem	235
9.1	Ökologisches Gestaltungsmodell	235
9.2	Ökonomisches Gestaltungsmodell	240
9.3	Soziales Gestaltungsmodell	251
9.4	Zuordnung der Gestaltungsoptionen zu den relevanten Akteuren	252
10	Schlussbetrachtung	259
10.1	Zusammenfassung	259
10.2	Limitationen der Arbeit	267
10.3	Weiterer Forschungsbedarf	269
11	Literaturverzeichnis	273
12	Anhang	295

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorgehen der Arbeit	32
Abbildung 2:	Ausgewählte Projekte vom assistierten zum fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr von 1921 bis 2021	34
Abbildung 3:	Automatisierungsstufen im Güterverkehr	43
Abbildung 4:	Zeitliche Entwicklung der Veröffentlichungen zum automatisierten und fahrerlosen Fahren	59
Abbildung 5:	Verteilung der thematischen Gebiete zum automatisierten und fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr	61
Abbildung 6:	Aufbau des Sensitivitätsmodells	86
Abbildung 7:	Strukturen des Logistiksystems	94
Abbildung 8:	Verkehrssystem nach Manheim (1980)	99
Abbildung 9:	Systemmodell nach Sjöstedt (1996) erweitert durch Flämig et al. (2002)	100
Abbildung 10:	Einstufige Logistikkette	106
Abbildung 11:	Prozesse im Umschlagspunkt	108
Abbildung 12:	Akteure des Transportsystems	109
Abbildung 13:	Struktur des betrachteten Logistiksystems mit seinen Elementen, Prozessen und Akteuren	113
Abbildung 14:	Variablen anhand der ausgewählten Literatur	118
Abbildung 15:	Zuordnung der Variablen zu den Subsystemen des Logistiksystems	120
Abbildung 16:	Kriterienmatrix des Untersuchungssystems	132
Abbildung 17:	Automatisierte Umschlagstechnologien in Wareneingang und Warenausgang	147
Abbildung 18:	Einflussmatrix des Untersuchungssystems	175
Abbildung 19:	Kausaldiagramm des Untersuchungssystems	177
Abbildung 20:	Einflussdiagramm der Variablen im Logistiksystem	179
Abbildung 21:	Kausaldiagramm des Subsystems »Logistikleistung« ohne die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	182
Abbildung 22:	Kausaldiagramm des Subsystems »Logistikleistung« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	183

Abbildung 23:	Kausaldiagramm des Subsystems »Warenübergabe« ohne die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	184
Abbildung 24:	Kausaldiagramm des Subsystems »Warenübergabe« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	187
Abbildung 25:	Kausaldiagramm des Subsystems »Transport« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	189
Abbildung 26:	Kausaldiagramm des Subsystems »Verkehrsleistung« ohne die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	190
Abbildung 27:	Kausaldiagramm des Subsystems »Verkehrsleistung« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens	192
Abbildung 28:	Kurve der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge	198
Abbildung 29:	Modell der Variable »Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge«	199
Abbildung 30:	Simulierte Umwandlung fahrerloser Fahrzeuge pro Jahr	200
Abbildung 31:	Simulationsebene »Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge«	202
Abbildung 32:	Simulationsmodell »Logistikleistung«	204
Abbildung 33:	Simulationsmodell »Warenübergabe«	206
Abbildung 34:	Simulationsmodell »Transport«	209
Abbildung 35:	Simulationsmodell »Verkehrsleistung«	213
Abbildung 36:	Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems »Logistikleistung«	219
Abbildung 37:	Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems »Warenübergabe«	222
Abbildung 38:	Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems »Transport«	224
Abbildung 39:	Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems »Verkehrsleistung«	228
Abbildung 40:	Variablen und Richtung der Wirkungsbeziehung auf die Variable »Fahrzeugfahrleistung« für eine ökologische Gestaltung	236
Abbildung 41:	Variablen und Richtung der Wirkungsbeziehung auf die Variable »Personalbedarf zur Be- und Entladung« für eine ökonomische Gestaltung	244

Abbildung 42: Ansatzpunkte für eine gleichermaßen ökonomische als auch ökologische Gestaltung im Simulationsmodell	248
Abbildung 43: Mögliche Gestaltungsoptionen und Annahmen für eine erwünschte Einführung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem und beteiligte Akteure	254

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Automatisierungsstufen nach SAE International (2014), Gasser et al. (2012) und VDA (2015) im Vergleich	39
Tabelle 2:	Typische transportbezogene Tätigkeiten unterschiedlicher Akteure	44
Tabelle 3:	Liste der hochrangigen Journals in ausgewählten Datenbanken (Stand: 2021)	57
Tabelle 4:	Suchstrings für die Datenbanksuche	58
Tabelle 5:	Nichttechnische Aspekte des automatisierten und fahrerlosen Fahrens in ausgewählter Literatur (n=31)	74
Tabelle 6:	Elemente, Interaktionen und Umfeld in Systemen anhand der Literatur	102
Tabelle 7:	Variablensatz des Logistiksystems	128
Tabelle 8:	Prozessbezogene Chancen und Risiken von automatisierten Schnittstellentechnologien für den Informationsfluss	145
Tabelle 9:	Prozessbezogene Chancen und Risiken von automatisierten Schnittstellentechnologien im Güterfluss	149
Tabelle 10:	Technologien der Automatisierungsstufen nach SAE International (2014) für schwere Nutzfahrzeuge	155
Tabelle 11:	Potenzielle Kostenveränderungen aufgrund des automatisierten und des fahrerlosen Fahrens	161
Tabelle 12:	Zusatzkosten für Automatisierungstechnologie	162
Tabelle 13:	Dateninput für die Berechnung der TCO von batterieelektrischen Sattelzugmaschinen	212
Tabelle 14:	Vergleich der TCO für den Einsatz von fahrerlosen BEV im Logistiksystem	226
Tabelle 15:	Veränderungseffekte durch eine abnehmende Fahrzeugfahrleistung	238
Tabelle 16:	Veränderungseffekte aufgrund einer Zunahme der Fahrzeugauslastung durch fahrerloses Fahren	241
Tabelle 17:	Kostenveränderungen in der Warenübergabe im Jahr 30	243

Tabelle 18:	Veränderungseffekte aufgrund einer Zunahme der Fahrzeugauslastung und eines Rückgangs des Personalbedarfs in der Warenübergabe durch fahrerloses Fahren	246
Tabelle 19:	Veränderungseffekte aufgrund einer Kombination des ökologischen und ökonomischen Gestaltungsmodells	250

Formelverzeichnis

Formel 1:	Fundamentaldiagramm	125
Formel 2:	Berechnungsschema der Wirkungsbeziehungen	201
Formel 3:	Berechnungsschema der gerichteten Gewichtung	201

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Active Cruise Control
AETR	Accord Européen sur les Transports Routiers
AGV	Automated Guided Vehicle
AHS	Automated Highway System
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Battery electric vehicle
BFStrMG	Bundesfernstraßenmautgesetz
BGBI	Bundesgesetzblatt
BPMN	Business Process Modelling Notation
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
ECU	Steuergerät (electronic control unit)
EU	Europäische Union
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
Fz	Fahrzeuge
Fzkm	Fahrzeugkilometer
g	Gramm
Galileo	Europäisches Globales Satellitennavigationssystem
GLONASS	Russisches Globales Satellitennavigationssystem
GPS	Amerikanisches Globales Satellitennavigationssystem (Global Positioning System)
GüKG	Güterkraftverkehrsgesetz
ITS	Intelligente Transportsysteme
Kfz	Kraftfahrzeug
KI	Künstliche Intelligenz
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Lidar	Light detection and ranging
LKA	Lane Keeping Assist
Lkw	Lastkraftwagen
m	Meter

Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
P	Produkt
PCC	Predictive cruise control
Pkw	Personenkraftwagen
Q	Quotient
Radar	Radiowave detection and ranging
RCA	Radio Company America
SD	System Dynamics
SJR	SCImago Journal & Country Rank
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
t	Tonnen
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
TIAF	Trilateral impact assessment framework
tkm	Tonnenkilometer
TMS	Transportmanagementsystem
TtW	Tank-to-Wheel
UNESCO	Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur
USA	United States of America
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-X
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLAN	Wireless Local Area Network
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

1 Einleitung

Die Idee eines fahrerlosen Fahrzeugs fasziniert die Menschen bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts. Wurden zunächst die Fahrzeuge noch ferngesteuert, hat sich immer mehr die Idee des autonomen, sich selbst steuernden Fahrzeugs durchgesetzt, das sich ohne menschliches Einwirken vom Start bis zum Ziel bewegt.

Das fahrerlose Fahren wurde bislang im öffentlichen Straßenraum nur im Rahmen von Pilotversuchen erprobt. Trotzdem schreitet die technische Entwicklung und Forschung weiter voran. Im Gegensatz zum Personenverkehr bleibt die Forschung im kommerziellen Güterverkehrssystem zum fahrerlosen Fahren jedoch zurück, obwohl die Potenziale des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge als höher eingeschätzt werden. Die Vorteile des fahrerlosen Fahrens im Güterverkehr liegen laut Literatur in einer Effizienzsteigerung und Kosteneinsparungen (Kückelhaus et al. 2014; Freedman 2017). Zusätzlich wird mit zunehmendem Personalmangel und steigenden Transportkosten eine Alternative zum herkömmlichen Transportprozess für die Logistikunternehmen immer relevanter, die mit geringen Margen und hohem Kostendruck konfrontiert sind (Flämig et al. 2020; Müller und Voigtländer 2019). Die Unternehmen Einride und DB Schenker versprechen sich von fahrerlosen Straßengüterfahrzeugen eine höhere Zuladungskapazität, geringere Fertigungs- und Betriebskosten sowie mehr Flexibilität (DB Schenker 2018; Einride 2021b).

Mit dem fahrerlosen Fahren gehen zwangsläufig auch strukturelle Veränderungen einher. Diese betreffen unter anderem Akteure wie versendende und empfangende Unternehmen, dienstleistende Unternehmen oder auch Berufskraftfahrende. Berufskraftfahrende übernehmen in der heutigen Zeit neben der reinen Fahrtätigkeit unter anderem auch die Be- und Entladung des Fahrzeugs, sichern die Ladung und dokumentieren die Warenbegleitpapiere. Diese Tätigkeiten müssen mit der Einführung fahrerloser Fahrzeuge vollständig durch Automatisierungssysteme oder anderes Personal übernommen werden (Flämig 2015).

Mit der Einführung des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr sind folglich Wirkungen verbunden. Der Begriff »Wirkung« wird nach dem Duden mit »durch eine verursachende Kraft wirkende Veränderung,

Beeinflussung, bewirktes Ergebnis« definiert. Synonyme sind hierbei »Auswirkung, Durchschlagkraft, Durchsetzungskraft, Effektivität« (Duden 2021c). In dieser Arbeit wird Wirkung von dem Begriff der »Auswirkung« unterschieden. Der Begriff »Auswirkung« wird nach dem Duden als »das Sichauswirken« oder »Wirkung, sich auswirkende Folge« erläutert (Duden 2021a). Vergleichbar ist diese Abgrenzung mit den englischen Begriffen »Outcome« und »Impact«, wobei Outcome die kurz- und mittelfristige Veränderung beschreibt, während »Impact« die langfristigen Effekte darstellt (OECD 2010, S. 20ff.). Der Begriff »Wirkung« wird damit als eine Veränderung im Sinne des englischen Begriffs »Outcome« formuliert, während Auswirkung als die langfristigen Effekte im Sinne von »Impact« verstanden wird. Eine Wirkung mit kurz- oder mittelfristiger Veränderung, beispielsweise steigende Emissionen, führt zu einer langfristigen Auswirkung, wie der Zunahme der Erderwärmung. In dieser Arbeit wird nicht die Auswirkung, sondern bereits die Veränderung durch das fahrerlose Fahren im Sinne der Wirkung untersucht. Dabei kann sich die Intensität der Wirkung über einen Zeitverlauf jedoch in Abhängigkeit einer Einflussgröße verändern.

Eine Wirkung tritt durch den kausalen Zusammenhang von einem Element auf ein anderes Element auf. Wird die Vernetzung mehrerer Wirkungen innerhalb eines Systems dargestellt, spricht Vester (1990, S. 35) von einem »Wirkungsgefüge«. Wirkungsgefüge geben Aufschluss über die in ihnen ablaufenden Regelkreise, also die rückgekoppelte Wirkungsbeziehung zwischen zwei und mehr Elementen, und helfen, das Systemverhalten zu verstehen (Vester 1990, S. 40).

Fraglich ist, ob das fahrerlose Fahren im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und von den beteiligten Akteuren des Logistiksystems erwünscht ist. Wird nachhaltige Entwicklung verstanden, als eine Entwicklung in der zukünftige Generationen die gleichen Voraussetzungen haben, wie die vergangenen Generationen (World Commission on Environment and Development 1987, S. 41), müssen mögliche ökologischen, ökonomischen und sozialen Veränderungen durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem beachtet werden. Im Idealfall gilt es, die negativen Wirkungen in allen drei Dimensionen zu vermeiden.

In der Literatur und Forschung fehlt bislang eine ganzheitliche Betrachtung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem, um potenziell unerwünschte Wirkungen zu ermitteln und diese erwünscht zu beeinflussen. Für die Entwicklung des Straßengüterverkehrs und der Logistikbranche ist es für die weitere Forschungsförderung und die Zukunft der Logistikbranche von hoher Relevanz, die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens nicht nur im Transportprozess, sondern im gesamten Logistiksystem abschätzen zu können. Nur mithilfe einer fundierten Grundlage können die Interessengruppen des Logistiksystems eine weitestgehend gewünschte Einführung der Technologie in den Realbetrieb ermöglichen.

1.1 Zielsetzung, Forschungsfragen und Systemgrenzen der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es, das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu verstehen, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren. Als Ergebnis liegen Handlungsoptionen für eine zukunftsfähige Gestaltung des Logistiksystems mit dem fahrerlosen Fahren vor.

Der Fokus liegt auf dem gesamten Logistiksystem. Die Arbeit weitet die in der Regel gewählte inhaltliche Systemgrenze aus und führt dazu, dass nicht nur der Transportprozess in die Betrachtung integriert wird, sondern eine ganzheitliche Analyse des Logistiksystems erfolgt, bei der auch dem Transport vor- und nachgelagerte Prozesse einbezogen werden. Die Betrachtung des gesamten Systems dient dazu, möglicherweise versteckte Effekte, sogenannte Rebound-Effekte, zu identifizieren, die bei einer engen Fokussierung auf die Transportkette unentdeckt bleiben.

Das Logistiksystem umfasst nach eigener Definition basierend auf Pfohl (2010) die Planung, Steuerung und Durchführung von Prozessen zur raumzeitlichen Gütertransformation. Hierzu gehören auch die Prozesse, wie Transport, Umschlag und Lagerung, die den Güterfluss realisieren, sowie die dem Güterfluss vorausseilenden, begleitenden und nachteilenden Informationsprozesse. Zur Strukturierung wird das

1 Einleitung

Logistiksystem in dieser Arbeit in vier Subsysteme gegliedert, die in ihrer Gesamtheit das Logistiksystem umfassen: Logistikleistung umfasst die Inputgrößen im Logistiksystem, die Subsysteme Warenübergabe und Transport bilden physische Prozesse und ihre Elemente im Logistiksystem ab und die Verkehrsleistung umfasst die relevanten Outputgrößen. Zur Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem ergeben sich die folgenden forschungsleitenden Fragen:

- 1) *Anhand welcher Elemente lässt sich das straßengebundene Logistiksystem beschreiben?*
- 2) *Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet?*
- 3) *Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren?*

Da das fahrerlose Fahren im Güterverkehr in der Bundesrepublik Deutschland bislang nicht im Realbetrieb implementiert ist, erfolgt in dieser Arbeit Zukunftsforschung. Als zeitlicher Rahmen wurde der Zeitpunkt der Markteinführung plus 30 Jahre gewählt. Die räumliche Untersuchungsgränze ist das Hoheitsgebiet der Bundesrepublik Deutschland.

Die zwei Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit sind auf der einen Seite das Logistiksystem und auf der anderen Seite das fahrerlose Fahren im Straßengüterverkehr. Zur Ermittlung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens bedarf es zunächst der Festlegung der Systemgrenzen des Logistiksystems als Grundlage für die weitere Forschung.

1.2 Vorgehen der Arbeit

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Forschungsfragen lässt sich die Arbeit in zwei Teile gliedern: Zum einen werden die theoretischen Grundlagen beschrieben, um ein Verständnis für das methodische Vorgehen sowie den Forschungsgegenstand zu schaffen. Zum anderen wird ein dreistufiger Modellansatz durchgeführt, der zur Untersuchung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem sowie zur Beantwortung der

Forschungsfragen beiträgt. Eingerahmt werden diese beiden Teile durch eine Einführung und ein abschließendes Fazit.

Das **Kapitel 1** umfasst die Problemstellung, die darauf aufbauende Zielsetzung sowie die forschungsleitenden Fragen. Auch werden die Systemgrenzen sowie das Vorgehen dieser Arbeit zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben.

In **Kapitel 2** werden die begrifflichen Grundlagen für diese Arbeit gelegt. Es erfolgt eine Beschreibung der Entwicklung vom assistierten zum fahrerlosen Fahren sowie eine Begriffsbestimmung des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr. Darüber hinaus umfasst das Kapitel die Erläuterung der rechtlichen und ethischen sowie der technischen Rahmenbedingungen des fahrerlosen Fahrens. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden die Erkenntnisse für die weitere Arbeit als Grundlage der Systemabgrenzung beschrieben.

Das **Kapitel 3** umfasst die Darstellung des aktuellen Forschungsstands in der Literatur. Hierfür wird zunächst eine systematische Literaturanalyse durchgeführt, mithilfe derer die Themenschwerpunkte zum automatisierten und fahrerlosen Fahren herausgearbeitet werden. Daran schließt sich eine Literaturanalyse an, die die identifizierten Publikationen aus der systematischen Literaturanalyse sowie Grundlagenliteratur und weitere Publikationen vollständig untersucht. Ziel des Kapitels ist es, die unterschiedlichen Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu identifizieren sowie das methodische Vorgehen zur Identifizierung der Wirkungen aufzuzeigen. Ausgewählt wurden 31 Publikationen der letzten 10 Jahre, die mögliche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens untersuchen. Das Ergebnis des Kapitels bildet die Ableitung der Forschungsfragen für die vorliegende Arbeit.

Das **Kapitel 4** beinhaltet die Beschreibung des systemdynamischen Forschungszugangs, der in dieser Arbeit zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen dient. Hierfür wird zunächst ein grundlegendes Systemverständnis beschrieben, um die angewendete Methode des System Dynamics (SD) zu erläutern. Umgesetzt wird die Methode in dieser Arbeit mithilfe des Sensitivitätsmodells und des Papiercomputers nach Vester (1990), dessen Vorgehen in diesem Kapitel erläutert wird, sowie mit der Software Vensim. Das Kapitel schließt mit der Herleitung des dreistufigen Modellansatzes, der in dieser Arbeit Anwendung findet.

Das **Kapitel 5** beinhaltet die Systemgrenzen des straßengebundenen Logistiksystems zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage »*Anhand welcher Elemente lässt sich das straßengebundene Logistiksystem beschreiben?*«. Zur Identifizierung der relevanten Elemente im Logistiksystem werden bestehende Modelle aus verkehrsplanerischer Perspektive sowie die prozessuale Gestaltung der Logistikkette auf Basis der Literatur herangezogen. Grundlage für die weitere Arbeit ist die Arbeitsdefinition des straßengebundenen Logistiksystems, die in diesem Kapitel aufgestellt wird.

In **Kapitel 6** erfolgt der erste Teil des dreistufigen Modellansatzes, der in dieser Arbeit zum strukturierten Vorgehen eingesetzt wird. Eingeleitet wird das Kapitel mit einem Wortmodell, das die Welt des fahrerlosen Fahrens beschreibt. Zusammen mit der in Kapitel 3 durchgeführten Literaturanalyse werden die Variablen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem abgeleitet. Das Logistiksystem bildet dabei den Rahmen der Untersuchung, sodass vier Subsysteme mit insgesamt 18 Variablen in einem Variablensatz aufgestellt werden können. Diese umfassen die Variablen im Logistiksystem auf die das fahrerlose Fahren, basierend auf der Literatur, einwirkt.

Auf Grundlage des Variablensatzes wird in **Kapitel 7** das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystems mithilfe der Literatur ermittelt und in einer Einflussmatrix nach Vester (1990) festgehalten. Kern dieses Kapitels ist ein qualitatives Zukunftsmodell. Das qualitative Zukunftsmodell dient zum einen zur Visualisierung der Wirkungszusammenhänge aus der Einflussmatrix mithilfe von Kausaldiagrammen und zum anderen der Ermittlung der Rollen der Variablen im System. Mithilfe des qualitativen Zukunftsmodells werden zudem Rückkopplungsschleifen im System, zunächst auf übergeordneter Ebene und anschließend auf detaillierter Subsystemebene, identifiziert.

Da es sich bei den kausalen Wirkungszusammenhängen um eine rein qualitative Untersuchung handelt, wird in **Kapitel 8** ein quantitatives Zukunftsmodell aufgestellt, das gemeinsam mit dem qualitativen Zukunftsmodell den zweiten Teil des Modellansatzes bildet. Das quantitative Zukunftsmodell wird als ein simulationsbasiertes System Dynamics-Modell

1 Einleitung

mithilfe der Software Vensim¹ modelliert. Im Rahmen des Simulationsmodells werden mögliche quantitative Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem ermittelt und verglichen.

Die zwei entstehenden Zukunftsmodelle dienen der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage »*Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet?*«. Fraglich ist, ob die Wirkungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung von den relevanten Akteuren als erwünscht gelten.

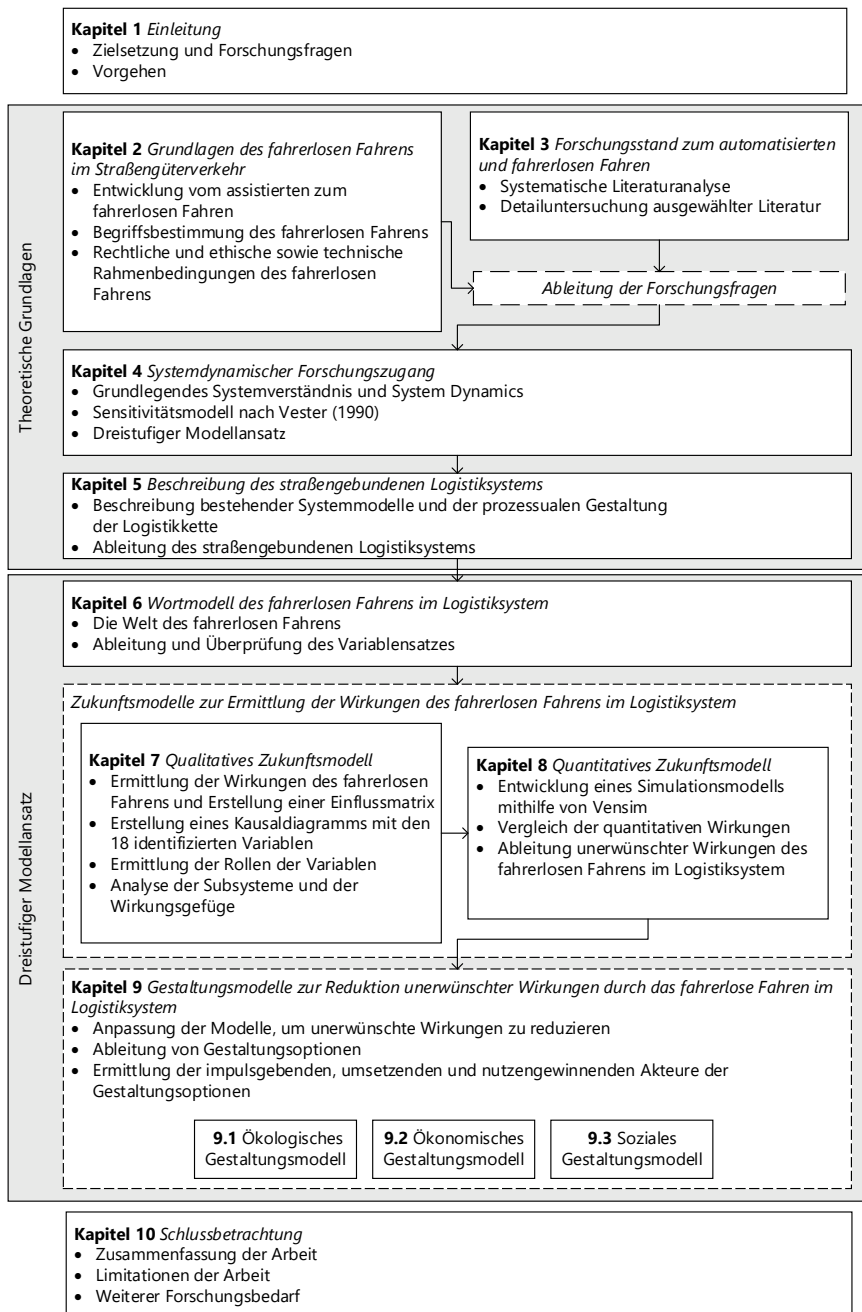
Aus diesem Grund werden die ermittelten Ergebnisse genutzt, um in **Kapitel 9** drei Gestaltungsmodelle abzuleiten. Auf Grundlage eines ökologischen, eines ökonomischen und eines sozialen Gestaltungsmodells wird versucht, unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu reduzieren. Im Rahmen dieses Kapitels wird damit die dritte Forschungsfrage »*Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren?*« beantwortet. Das Ergebnis des Kapitels bildet die Ableitung von Gestaltungsoptionen für eine erwünschte Entwicklung des Logistiksystems mit fahrerlosen Fahrzeugen, die jeweils den impulsgebenden, den umsetzenden und den nutzengewinnenden Akteuren zugeordnet werden.

Das **Kapitel 10** beinhaltet die Schlussbetrachtung dieser Arbeit. Dabei werden zunächst die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst. Zudem werden die Limitationen der Arbeit erläutert und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

Das Vorgehen dieser Arbeit ist in Abbildung 1 visualisiert.

1 Vensim ist eine Simulationssoftware, mithilfe derer reale Systeme abgebildet werden können. Die Software ist spezialisiert auf die Entwicklung von dynamischen Rückkopplungsmodellen (Vensim 2015).

Abbildung 1: Vorgehen der Arbeit



Quelle: Eigene Darstellung

2 Grundlagen des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für das Verständnis des Forschungsgegenstandes, dem fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr, bereitgestellt. Dafür wird zunächst die Entwicklung vom assistierten zum fahrerlosen Fahren beschrieben. Auf Basis der historischen Entwicklung wird ein Begriffsverständnis des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr entwickelt, das sich an bestehenden Definitionen anlehnt, sodass dieser Arbeit eine einheitliche Definition des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr zugrunde gelegt werden kann. Darauf aufbauend wird der aktuelle rechtliche, ethische und technische Forschungsstand beschrieben und die Erkenntnisse für die weitere Arbeit abgeleitet.

2.1 Entwicklung vom assistierten zum fahrerlosen Fahren

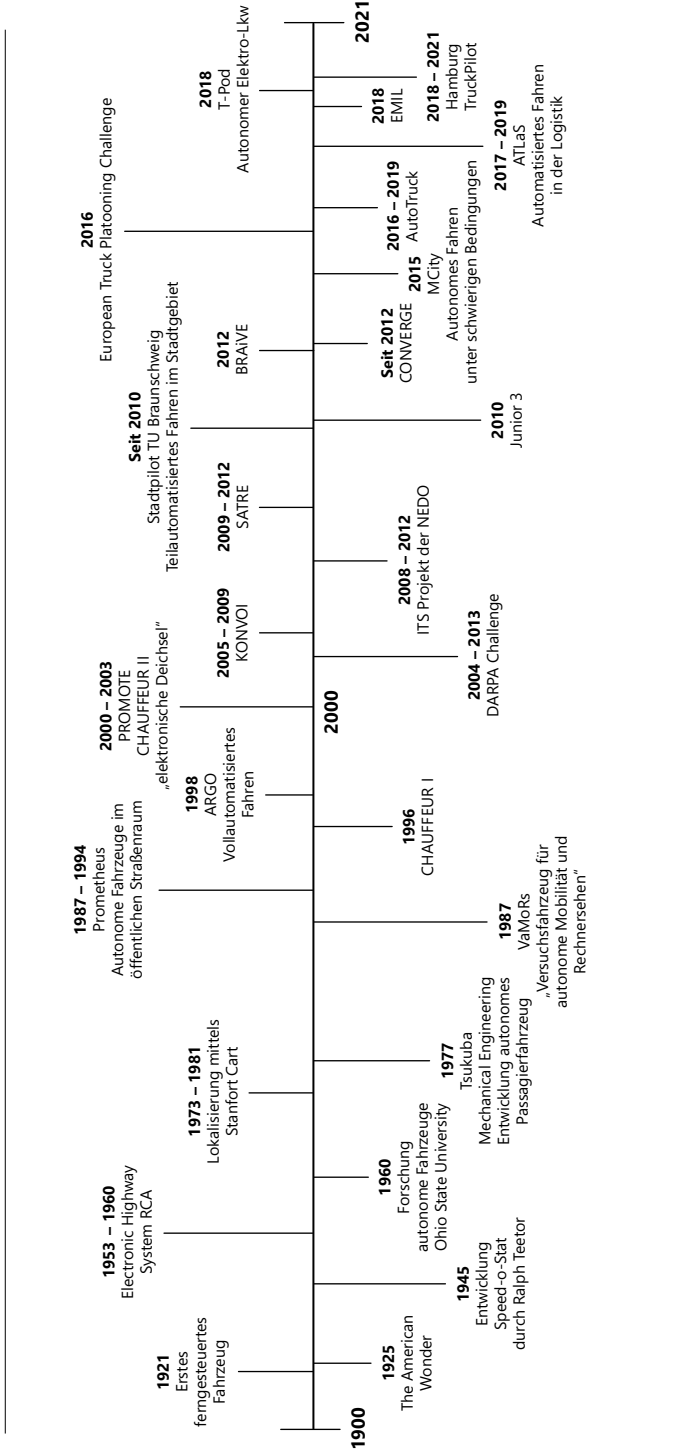
Das fahrerlose Fahren befindet sich zum heutigen Zeitpunkt in der Entwicklungsphase. Die Idee eines fahrerlosen Fahrzeuges im Straßenverkehr und die ersten Entwicklungen liegen jedoch bereits 100 Jahre zurück. Die Entwicklung des fahrerlosen Fahrens in den letzten 100 Jahren ist dem Zeitstrahl der Abbildung 2 zu entnehmen. Um ein Verständnis zu schaffen, wie die Entwicklung von den Anfängen des assistierten Fahrens bis zur heutigen Zeit vorangeschritten ist, wird diese im Weiteren in Anlehnung an Kröger (2015) zusammengefasst.

Die Entwicklung des fahrerlosen Fahrens begann bereits in den 1920er Jahren. Die Idee eines selbststeuernden Fahrzeuges war aufgekommen, da durch die Massenmotorisierung zunehmend tödliche Unfälle verursacht wurden (Norton 2008, S. 21). Der Mensch als potenzielle Fehlerquelle sollte durch ein sicheres System ersetzt werden. Die Einführung der Radiotechnik sowie der erste Airplane Stabilizer von Lawrence B. Sperry im Jahr 1914 ebneten den Weg für die Entwicklung selbststeuernder Fahrzeuge (Green 1925, S. 171).

Im Jahr 1921 wurde erstmal ein aus einem vorausfahrenden Wagen gelenktes Fahrzeug der Öffentlichkeit in Dayton, Ohio, mit Unterstützung

Abbildung 2: Ausgewählte Projekte vom assistierten zum fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr

von 1921 bis 2021



Quelle: Eigene Darstellung

des US-Militärs vorgestellt. Das Fahrzeug wurde per Funk gesteuert. Es gilt zwar nicht im eigentlichen Sinne als autonom, zeigt aber die frühen Anfänge der Technologie auf. Gleiches gilt für das American Wonder, das ferngesteuert im Jahr 1925 über den Broadway in New York fuhr (Kröger 2015, S. 44).

Das Bild des fahrerlosen Fahrens löste sich in den folgenden Jahren von der Idee des ferngesteuerten Fahrzeugs und die Technologie der Leitdrahtführung wurde zunehmend thematisiert. Hierbei wird ein elektromagnetisches Kabel in die Fahrbahn eingelassen, das die Geschwindigkeiten und Steuerung der Fahrzeuge auf der Autobahn reguliert (Murtfeldt 1938, S. 27). Zwischen 1953 und 1960 teste General Motors mit dem Elektronikunternehmen Radio Company America (RCA) die automatisierte Straße (Mann 1985, S. 27; Kilbon 1960, S. 26ff.). Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zum fahrerlosen Fahren war der im Jahr 1945 von Ralph Teetor entwickelte Speed-o-Stat. Der im Jahr 1958 kommerziell verbreitete automatisierte Geschwindigkeitshalter wurde unter dem Namen Tempomat oder Cruise Control populär (Rowsome Jr. 1954, S. 264, 1958, S. 105). Heute gilt die Technologie als ein wichtiges Fahrerassistenzsystem, das die Vorstufe zum fahrerlosen Fahren bildet.

Wurde im Jahr 1960 an der Ohio State University noch an fahrerlosen Fahrzeugen mit Leitdraht-Technologie geforscht, verlagerte sich diese Entwicklung hin zu Fahrzeugen, die unabhängig von der Infrastruktur agieren (The Ohio State University 2019). Die Forschung wurde in Japan und den USA verstärkt, sodass im Jahr 1977 das japanische Mechanical Engineering Laboratory unter Leitung von Sadayuki Tsugawa einen autonomen Personenkraftwagen (Pkw) entwickelte (Kröger 2015, S. 59). Parallel forschte Hans Moravec von der Stanford University von 1973 bis 1981 an der Lokalisierung des Fahrzeugs und nutzte hierbei das ursprünglich für die Raumfahrt entwickelte Stanford Cart (Moravec 1990, S. 407).

In Europa und explizit in Deutschland wurde die Forschung zum fahrerlosen Fahren Ende der 1980er Jahre verstärkt. Unter der Leitung von Ernst Dickmann wurde das Versuchsfahrzeug VaMoRs (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen) ab 1985 entwickelt, das mit Kameras und Mikroprozessoren ausgestattet war, um die autonome Mobilität und das Rechnersehen, die computerbasierte Umfelderkennung,

zu untersuchen. Die Längs- und Querführung² wurde dabei maschinell durch das Fahrzeug ausgeführt, eine Person überwachte parallel den Vorgang und löste beispielsweise den Spurwechselprozess aus. Die erste fahrerlose Fahrt erfolgte im Jahr 1987 (Dickmanns 2007, 205ff.).

Das Projekt PROMETHEUS (PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 1987–1994) untersuchte autonome Fahrzeuge im öffentlichen Straßenraum. Im Jahr 1994 fuhren erstmals zwei Fahrzeuge (VAMP und VITA-2) mit einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf einer dreispurigen Autobahn ohne manuelles Eingreifen. Auch der Spurwechsel und das Überholmanöver erfolgten, nachdem das Sicherheitspersonal die Freigabe erteilt hatte, ohne menschliche Unterstützung. Möglich wurde dies durch hinter der Front- und Heckscheibe verbaute Kameras, die das Verkehrsgeschehen aufnahmen und die Daten an einen Bordcomputer weiterleiteten (Daimler AG 2016).

Im Rahmen der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Challenge versuchte das US Department of Defense Research die Entwicklung weiter voranzutreiben. Auf einem abgesperrten Militärstützpunkt konnten fahrerlose Fahrzeuge erprobt werden (Defense Advanced Research Projects Agency 2019; Kröger 2015, S. 63). Projekte zum automatisierten Fahren, wie ARGO und BRAiVE der Universität von Parma, Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig, Junior 3 der Stanford University, CONVERGE zur Entwicklung kooperativer Systeme oder MCity der University of Michigan, untersuchten ebenfalls die Möglichkeiten des automatisierten Fahrens (Reschka 2015, S. 493ff.; Wieker 2015; University of Michigan 2019; Università di Parma o.J.).

Mit zunehmender Entwicklung von automatisierten Systemen in Straßenfahrzeugen wurde auch an möglichen Einsatzoptionen geforscht. Im Bereich des Güterverkehrs wurde beispielsweise die Kopplung von Lastkraftwagen (Lkw) mithilfe von Infrarot und Funk, auch bekannt als elektronische Deichsel oder Platooning, erprobt. Diese wurde erstmal im Zeitraum von 2000 bis 2003 im Rahmen des Projekts PROMOTE CHAUFFEUR II auf die technische Machbarkeit und die notwendige

2 Begriffserklärung siehe Abschnitt 2.4, S. 50

Umrüstung der Fahrzeuge hin überprüft (European Commission 2019). Das Projekt KONVOI, das von 2005 bis 2009 durchgeführt wurde, fokussierte sich auf die Wirkungen auf Fahrende und Umgebungsverkehr, die Akzeptanz von Fahrenden sowie weitere Umfeldfaktoren. In einem im Jahr 2009 durchgeführten Test absolvierten Lkw im Platoon eine Strecke von 3.100 km. Die Fahrzeuge wurden dabei miteinander und mit der Infrastruktur vernetzt und waren mit Kameras und Sensorik ausgestattet (Zlocki 2019). Die japanische Organisation NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) förderte ebenfalls ein Projekt zu intelligenten Transportsystemen (ITS), bei dem elektronisch gekoppelte Lkw, die im Konvoi fuhren, entwickelt und erprobt wurden. Mit einer Geschwindigkeit von etwa 80 Kilometer pro Stunde und einem Abstand von 4 Metern (m) fuhren die Fahrzeuge über die Autobahn (Tsugawa 2012, S. 4). Eine Erprobung von Mischplatoons aus Lkw und Pkw wurde im Projekt SATRE (Safe Road Trains for the Environment) von 2009 bis 2012 erforscht. Zwei Lkw und drei Pkw folgten mit verringertem Sicherheitsabstand vollautomatisch einem Führungsfahrzeug (Druce 2012). An der European Truck Platooning Challenge im Jahr 2016, bei der Lkw-Platoons aus verschiedenen europäischen Ländern zum Rotterdamer Hafen fuhren, nahmen fahrzeugherstellende Unternehmen wie MAN, Daimler, Scania, Iveco und Volvo teil und untersuchten gleichzeitig Fahrerassistenzsysteme, WLAN-Verbindungen, Software, Bremsen oder Abstandseinhaltung der Fahrzeuge (Alkin et al. 2016). Das Projekt AutoTruck, das von 2016 bis 2019 lief, setzte seinen Schwerpunkt auf die Erforschung von Verteilerverkehren mit Automatisierungstechnologie. Diese Erprobung von Rangier- und Pendelfahrten erfolgte allerdings im innerbetrieblichen Bereich (Sähn 2019). Im öffentlichen Straßenraum führte das schwedische Start-up Einride und DB Schenker im Jahr 2018 den Testbetrieb eines fahrerlosen, elektrifizierten Lkw (T-Pod) zwischen Warenhäusern durch, mit dem Ziel die Straßenzulassung durch die schwedischen Behörden zu erhalten (Einride 2019). Auch der elektrifizierte Kleinbus EMIL wurde im Jahr 2018 genutzt, um das autonome Fahren im Realbetrieb zu erproben. Schwerpunkte der Erprobung in der Stadt Regensburg lagen auf der Objekterkennung sowie der Lokalisierung im urbanen Raum (Bertrandt 2018).

Im Jahr 2021 wurde das Projekt Truckpilot von MAN Trucks & Bus und der Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) abgeschlossen. Das Projekt umfasste die Entwicklung und den Testbetrieb eines fahrerlosen Lkw, der für Containerumfuhren im Container Terminal Altenwerder eingesetzt wurde (MAN Truck & Bus SE 2021). Zu Beginn des Projekts war geplant, dass der fahrerlos fahrende Lkw vom Container Terminal Altenwerder zusätzlich eine Strecke von 70 km über die Autobahn 7 zurücklegt (Jentzsch 2018). Dies wurde auf die fahrerlose Fahrt auf dem Terminalgelände reduziert, wo sich das Fahrzeug im Mischverkehr bewegte und zu seiner Parkposition selbstständig rangierte (MAN Truck & Bus SE 2021).

2.2 Begriffsbestimmung des fahrerlosen Fahrens anhand von Automatisierungsstufen und Tätigkeitsprofilen

Die historische Entwicklung vom assistierten zum fahrerlosen Fahren zeigt, dass die Fahrzeuge zunehmend mit Automatisierungstechnologie ausgestattet wurden, sodass der Grad der Automatisierung schrittweise zunahm. Um die Entwicklungsstadien hin zum fahrerlosen Fahren abzugrenzen, wurden Automatisierungsstufen definiert. Zur Einordnung der Automatisierungsstufen wird in der Literatur aktuell auf die Definitionen nach SAE International (2014, S. 2) oder nach Gasser et al. (2012, S. 9) zurückgegriffen, die jedoch nicht einheitlich formuliert sind. Auch der Verband der Automobilindustrie (VDA) (2015, S. 15) hat Automatisierungsstufen bzw. -level definiert. Die Automatisierungsstufen beschreiben den unterschiedlichen Grad an Automatisierungstechnologie in Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr. Die Tabelle 1 zeigt die Unterschiede des Automatisierungsverständnisses in den Definitionen der Organisationen.

Beim nicht automatisierten Fahren werden die Fahrzeuge vollständig manuell gesteuert. Durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen können die Fahrenden beim assistierten Fahren unterstützt werden. Fahrende sind jedoch sowohl beim nicht automatisierten als auch beim assistierten Fahren in jeder Situation für die Handhabung und Steuerung des Fahrzeugs verantwortlich. Beim teilautomatisierten Fahren übernimmt

Tabelle 1: Automatisierungsstufen nach SAE International (2014), Gasser et al. (2012) und VDA (2015) im Vergleich

Bezeichnung	SAE International (2014)	Gasser et al. (2012)	VDA (2015)
No Automation/ Driver Only	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querrführung (Lenken) aus	Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querrführung aus. Kein eingreifendes Fahrzeugsystem aktiv.
Driver Assistance/ Assistiert	the <i>driving mode-specific</i> execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt <ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein 	Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querrführung aus. System übernimmt die jeweils andere Funktion.
Partial Automation/ Teilautomatisiert	the <i>driving mode-specific</i> execution by one or more driver assistance systems of both steering an acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für einen gewissen Zeitraum oder/und in spezifischen Situationen) <ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein 	Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. System übernimmt die Längs- und Querrführung in einem spezifischen Anwendungsfall*. *Anwendungsfälle beinhalten Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen
Conditional Automation/ Hochautomatisiert	the <i>driving mode-specific</i> performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a request to intervene	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen <ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme des Fahraufgabe mit ausreichender Zeitrserve aufgefordert Systemgrenzen werden alle vom System erkannt. Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen 	Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen. Fahrer muss potenziell in der Lage sein, zu übernehmen. System übernimmt Längs- und Querrführung in einem spezifischen Anwendungsfall*. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitrserve auf.
High Automation/ Vollautomatisiert	the <i>driving mode-specific</i> performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a request to intervene	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall <ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitrserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf Erfolg dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen 	Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall. System kann im spezifischen Anwendungsfall* alle Situationen automatisch bewältigen.
Full Automation/ Fahrerlos	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>		Von »Start« bis »Ziel« ist kein Fahrer erforderlich. Das System übernimmt die Fahraufgabe voll umfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umweltbedingungen.

Quelle: Eigene Zusammenstellung in Anlehnung an SAE International (2014, S. 2), Gasser et al. (2012, S.9) und Verband der Automobilindustrie (2015, S. 15)

das Fahrzeugsystem entweder Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs. Die jeweils andere Aufgabe wird von den Fahrenden manuell ausgeführt. Während des hochautomatisierten Fahrens übernimmt das Fahrzeugsystem sowohl Längs- als auch Querführung. Die Fahrenden sind jedoch weiterhin für die Beaufsichtigung der Fahrt verantwortlich und können im Notfall das Fahrzeug übersteuern oder ausschalten. Die Beaufsichtigung des Fahrzeugs fällt beim vollautomatisierten Fahren teilweise weg. Weiterhin sind die Fahrenden in bestimmten Situationen zur Übernahme der Fahrzeugsteuerung aufgefordert, die Fahrt muss aber nicht mehr dauerhaft überwacht werden. Beim fahrerlosen Fahren sind keine Fahrenden mehr im Fahrzeug erforderlich, da die Fahrzeugsysteme die gesamte Steuerung und Entscheidung während der Fahrt von der Quelle bis zur Senke übernehmen. Beim Vergleich der Definitionen fällt auf, dass keine direkte Übersetzung der englischen Bezeichnung für den deutschen Sprachgebrauch möglich ist. Die im Deutschen als »Hochautomatisiertes Fahren« bezeichnete Stufe 3 wird im Englischen beispielsweise als »Conditional Automation« definiert, während die Stufe 4 »Vollautomatisiertes Fahren« als »High Automation« bezeichnet wird. Inhaltlich gleichen sich die Definitionen hingegen. Die Definition des VDA (2015) ist stark an der nach Gasser et al. (2012) angelehnt.

Um Unklarheiten aufgrund der unterschiedlichen Definitionen zu vermeiden, hat die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Jahr 2021 ein vereinfachtes Modell der Automatisierungsstufen entwickelt. Hierbei wird lediglich in »Assistierter Modus«, »Automatisierter Modus« und »Autonomer Modus« unterschieden. Der assistierte Modus beschreibt Fahrten, bei dem Fahrende die Fahraufgabe ununterbrochen innehaben und die Fahrzeugsysteme gleichzeitig aktiviert sind, um die Fahrenden zu unterstützen. Im automatisierten Modus haben die Fahrenden nur noch teilweise die Fahraufgabe, sowohl inhaltlich als auch zeitlich, inne, sodass weitere fahrfremde Tätigkeiten übernommen werden können. Im autonomen Modus übernimmt das Fahrzeugsystem ununterbrochen die Fahraufgabe und Mitfahrende sind ausschließlich Passagiere im Fahrzeug (Bundesanstalt für Straßenwesen 2021a).

Sowohl in der englischsprachigen Version nach SAE International (2014) als auch in der deutschsprachigen Definition nach VDA (2015)

wird der Begriff »autonom« nicht verwendet. SAE International (2014) benutzt zwar den Begriff »autonomous vehicle« oder »autonomous driving« zur Erläuterung der Technologie, in der Einstufung der Automatisierungsgrade wird allerdings der Terminus »Full Automation« verwendet. VDA (2015) benutzt ebenfalls das Synonym »fahrerlos« für die letzte Stufe der Automatisierung. Gasser et al. (2012) definiert die fünfte Stufe der Automatisierung nicht. Der Begriff »autonom« wird nach dem Duden zum einen mit »verwaltungsmäßig selbstständig, unabhängig« zum anderen mit »unabhängig, eigenständig« gedeutet (Duden 2021b).

Der Autonomiebegriff kann sowohl auf das Fahrzeug als auch auf die Fahraufgabe bezogen werden (Flämig et al. 2020, S. 49). Für das autonome Fahren im Straßenverkehr gilt es daher sowohl das Fahrzeug als auch die Fahraufgabe fahrerlos zu gestalten. Ein Fahrzeug ist autonom, wenn die Längs- und Querführung des Fahrzeugs ohne menschliches Eingreifen erfolgt. Die Autonomie des Fahrzeugs bezieht sich folglich auf die technische Ausgestaltung des Fahrzeugs hinsichtlich seiner internen Fahrzeugsteuerung, wie z. B. der Objekterkennung, Lokalisierung, Längs- sowie Querführung. Die Fahraufgabe ist autonom, wenn nicht nur Aufgaben auf der Stabilisierungsebene und Bahnführungsebene, sondern auch auf der Navigationsebene ohne menschliches Einwirken erledigt werden. Nach Donges (1982, 2009, S. 14f.) werden auf der Stabilisierungsebene Informationen hinsichtlich der Fahrbahnoberfläche aufgenommen, auf der Bahnführungsebene wird die Verkehrssituation erfasst und die Navigationsebene benötigt Informationen zum Verkehrsnetz.

Die Stufen wurden für Kraftfahrzeuge (Kfz) im Allgemeinen definiert, unabhängig von ihrer Nutzungsart oder Größenklasse. Daher bestehen aktuell keine separaten Definitionen für den Einsatz der Fahrzeuge im Personenverkehr und im Güterverkehr. Unbeantwortet bleibt, ob eine Definition der Automatisierungsstufen explizit für den Güterverkehr getroffen werden sollte, um eine klare Abgrenzung der Verkehrsarten und um eine vollständige Abdeckung aller erforderlichen Tätigkeiten zum Transport eines Gutes zu gewährleisten. Flämig (2015, S. 385) führt beispielsweise an, dass sich Fahrzeuge geringerer Automatisierungsstufen bereits fahrerlos bewegen können. Für den Gütertransport existiert eine Zwischenstufe zwischen Automatisierungsstufe 3 und 4 nach











Gasser et al. (2012), da das Fahrzeug sich hochautomatisiert bzw. fahrerlos bewegen kann, die Navigation jedoch weiterhin von einem Operator ferngesteuert durchgeführt wird und die Fahrt dadurch teleoperiert erfolgt. Damit unterscheidet Flämig (2015) nach der Autonomie des Fahrzeugs und der Fahraufgabe. Aufbauend auf der vereinfachten Definition der BASt (2021) und der Definition nach Flämig (2015) wird für den Güterverkehr die folgende Unterscheidung der Automatisierungsstufen vorgenommen:


- **Assistierter Modus:** Eine natürliche Person ist dauerhaft im Fahrzeug anwesend und übernimmt während der gesamten Fahrt alle Fahraufgaben auf der Bahnführungs-, Stabilisierung- und Navigationsebene.
- **Automatisierter Modus:** Eine natürliche Person ist dauerhaft im Fahrzeug anwesend und übernimmt während der gesamten Fahrt die Navigationsebene. Bahnführungs- und Stabilisierungsebene können in bestimmten Anwendungsfällen durch das Fahrzeugsystem übernommen werden.
- **Fahrerloser Modus:** Eine natürliche Person zur Wahrnehmung der Fahraufgabe ist nicht mehr im Fahrzeug anwesend, übernimmt allerdings während der gesamten Fahrt die Navigationsebene in Form einer technischen Aufsicht. Bahnführungs- und Stabilisierungsebene werden durch das Fahrzeugsystem übernommen.
- **Autonomer Modus:** Eine natürliche Person zur Wahrnehmung der Fahraufgabe ist nicht mehr im Fahrzeug anwesend. Bahnführungs-, Stabilisierung- und Navigationsebene werden durch das Fahrzeugsystem übernommen.


Diese vier Automatisierungsstufen sind hinsichtlich der Ebenen der Fahraufgabe sowie der Anwesenheit von Fahrpersonal in der Abbildung 3 visualisiert.


Der Güterverkehr, als Ergebnis der Fahraufgabe zum Transport von Waren und Gütern, steht dabei nicht isoliert wie im Personenverkehr. Vielmehr ist die Raumüberwindung ein Teilsystem in der Logistikkette. Das bedeutet, dass eine Automatisierung im Güterverkehr nicht nur hinsichtlich des Transports sondern auch hinsichtlich ihrer vor- und nachgelagerten Prozesse betrachtet werden muss (siehe auch Flämig 2015, S. 390ff.).

Abbildung 3: Automatisierungsstufen im Güterverkehr

	Automatisierungsmodus	Assistierter Modus	Automatisierter Modus	Fahrerloser Modus	Autonomer Modus
	Fahrende im Fahrzeug				
Fahraufgabe	Bahnführungs-ebene				
	Stabilisierungs-ebene				
	Navigations-ebene				

 Manuelle Steuerung

 Steuerung durch technische Aufsicht

 Steuerung durch das Fahrzeugsystem

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Bundesanstalt für Straßenwesen (2021a)

Hier fallen weitere Tätigkeiten, sogenannte fahrfremde Tätigkeiten, an, die bisher teilweise von den Fahrenden übernommen werden.

Im Wareneingang und -ausgang sowie während des Transportprozesses und in der Disposition sind Disponierende, Lager- und Verkaufspersonal und Berufskraftfahrende tätig. Diesen drei operativen und administrativen Akteuren können typische Tätigkeiten zugeordnet werden, wobei die Aufgaben des Lagerpersonals oder auch des Verkaufspersonals und die der Berufskraftfahrenden Überschneidungen beinhalten können. Die Übernahme der Aufgaben ist von der Organisation des Transportunternehmens, der Spedition oder des dienstleistenden Unternehmens sowie den Verträgen mit den versendenden oder empfangenden Unternehmen abhängig.

Die Tabelle 2 zeigt das typische transportbezogene Tätigkeitspektrum der drei Akteure. Dabei wird deutlich, dass insbesondere die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden zumeist manueller Art sind. In diese Prozesse, vor allem des Güterflusses, ist bisher wenig Automatisierungstechnologie implementiert.

In der Disposition werden alle administrativen und organisatorischen Tätigkeiten durchgeführt, wie die Bestellung auslösen, Touren, Stauräume und den Fahrzeugeinsatz planen. Außerdem werden in der Disposition Versandpapiere nach abgeschlossener Planung erstellt.

Tabelle 2: Typische transportbezogene Tätigkeiten unterschiedlicher Akteure

	Disponierende	Lager- oder Verkaufspersonal	Berufskraftfahrende
<i>Materialfluss</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Ware intern transportieren • Ware auslagern • Ware verpacken • Ware verladen • Ware entladen • Ware identifizieren • Qualität der Ware überprüfen • Ware einlagern • Ware kommissionieren • Ware verräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ware verladen • Ware sichern • Ware transportieren • Lenk- und Ruhezeiten einhalten • Ware entladen • Fahrzeugbe- oder -entladung überwachen • Ggf. Fahrzeug warten und reparieren (z. B. Reifen, Wasser, Öl) • Ladung bewachen • Fahrzeug tanken
<i>Informationsfluss</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bestellung erstellen • Bestellung auslösen • Tour planen • Fahrzeugeinsatz planen • Stauraum planen • Versandpapiere erstellen 		<ul style="list-style-type: none"> • Warenbegleitpapiere prüfen • Tachometer/Mauterfassung programmieren • Warenbegleitpapiere dokumentieren • Auslieferung buchen • Empfangsbestätigung fordern • Ggf. Zollabwicklung durchführen

Quelle: Eigene Zusammenstellung in Anlehnung an VDI 4400 Blatt 3 (S. 3), Flämig (2015, S. 391) und Bieber und Deiß (2006, S. 123)

Das Lager oder Verkaufspersonal ist für den innerbetrieblichen Transport der Ware aus dem Lager in den Warenausgang und/oder aus dem Wareneingang in das Lager und/oder für die Kommissionierung verantwortlich. Es kann darüber hinaus Tätigkeiten, wie Verpackung, Verladung oder Entladung der Ware, übernehmen. Im Wareneingang ist das Personal zusätzlich für die Identifizierung und die Überprüfung der eingetroffenen Waren verantwortlich. Im Warenausgang fällt die Identifizierung der zu verladenen Waren in den Aufgabenbereich der Lkw-Fahrenden.

Die Hauptaufgabe der Berufskraftfahrenden ist die Steuerung des Fahrzeugs zwecks Transport der Ware zum empfangenden Unternehmen. Zusätzlich werden die weiteren typischen Tätigkeiten der Fahrenden in die Betrachtung integriert, um ein ganzheitliches Abbild zu erhalten. Die typischen Tätigkeiten der Lkw-Fahrenden umfassen im Warenausgang das Beladen des Fahrzeugs beziehungsweise dessen Überwachung. Außerdem prüfen sie die Frachtpapiere, sichern die Ladung und planen die Fahrroute. Darüber hinaus steuern sie das Fahrzeug und müssen die vorgegebenen Lenk- und Ruhezeiten einhalten. Die Fahrenden sind außerdem für die Programmierung des Tachometers und die Mauterfassung zuständig und dokumentieren die Warenbegleitpapiere. Im Fall von zollpflichtiger Ware sind die Berufskraftfahrenden zusätzlich für die Zollabwicklung verantwortlich. Im Wareneingang fordern die Fahrenden die Empfangsbestätigung vom empfangenden Unternehmen. Anschließend entladen sie das Fahrzeug oder überwachen die Entladung. Die Fahrenden können darüber hinaus auch weitere Tätigkeiten in der Produktion, dem Lager, der Kommissionierung oder der Filiale innehaben (Flämig 2015, S. 390ff.).

Für eine allgemeingültige Definition des fahrerlosen Fahrens im Güterverkehr und dessen Wirkung im Logistiksystem scheint daher eine eigenständige Kategorisierung der Automatisierungsstufen nach Fahrzeug, Fahraufgabe und Tätigkeit zielführend zu sein.

2.3 Rechtliche und ethische Rahmenbedingungen des fahrerlosen Fahrens

Die Automatisierungsstufen wurden neben der technischen Entwicklung auch rechtlich zunehmend legitimiert. Die Legitimation des fahrerlosen Fahrens auf internationaler Ebene wird maßgeblich durch das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr bestimmt. Das Wiener Übereinkommen ist ein am 08. November 1968 geschlossener, internationaler Vertrag, der den Straßenverkehr sowie die Straßenverkehrszeichen auf völkerrechtlicher Ebene regelt. In Artikel 8 Absatz 1 wurde festgehalten, dass »jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge [...], wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben« müssen. In Artikel 8 Absatz 5 wird darüber hinaus geschrieben, dass »jeder Führer [...] dauernd sein Fahrzeug beherrschen [...]« muss. In Artikel 13 Absatz 1 ist ebenfalls formuliert, dass »jeder Fahrzeugführer [...] unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen [muss], um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen« (Bundestag 21.09.1977, S. 821ff.). Diese Formulierungen legten fest, dass die Fahrzeugführenden dauerhaft die Kontrolle über das Fahrzeug innehaben müssen. Eine fahrerlose Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr war zu diesem Zeitpunkt rechtlich nicht zulässig.

Die Änderung des Wiener Übereinkommens im Jahr 2014, die am 23. März 2016 in Deutschland in Kraft trat, relativiert diese Aussage und lässt voll- und hochautomatisiertes Fahren rechtlich zu. Die Änderung des Artikel 8 besagt, dass »Fahrzeugsysteme, die einen Einfluss auf das Führen eines Fahrzeugs haben [...] [...] als vereinbar mit Absatz 5 und Artikel 13 Absatz 1 gelten, wenn diese Systeme vom Führer übersteuert oder abgeschaltet werden können«. Ähnliches gilt für die Änderung des Artikels 39 (Bundestag 07.12.2016, S. 1307f.). Dieser definiert basierend auf Anhang 5 die technischen Anforderungen an die Kraftfahrzeuge. Mit der Änderung des Artikel 39 entsprechen die Fahrzeuge nach Artikel 8 den technischen Anforderungen.

Auf nationaler Ebene war die Anpassung des Straßenverkehrsrechts, neben der Umsetzung des Wiener Übereinkommens, im Jahr 2017 eine Maßnahme, die die Zulassung von hoch- und vollautomatisierten

Fahrerfunktionen ermöglichte. Paragraph 1 des Achten Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes legt dabei fest, welche Ausstattung eines Fahrzeugs mit hoch- und vollautomatisierten Fahrerfunktionen zulässig ist. In Paragraph 1a Absatz 2 Nr. 3 ist festgehalten, dass eine manuelle Übersteuerung und Deaktivierung des Fahrzeugs durch Fahrerführende von hoch- und vollautomatisierten Fahrerfunktionen möglich sein muss (Bundestag 16.06.2017, S. 1648). Damit ist eine dauerhafte Führung des Fahrzeugs während der Fahrt nicht mehr erforderlich. Nur im Notfall müssen die Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen können – im Sinne eines automatisierten Fahrens nach BASt (2021). Ein fahrerloses Fahren wurde jedoch weiterhin nicht legitimiert.

Am 28.05.2021 hat der deutsche Bundesrat einem Gesetzentwurf zum autonomen Fahren im öffentlichen Straßenverkehr zugestimmt, welches am 28.07.2021 in Kraft trat. Mit diesem Gesetz wird in Zukunft das »autonome Fahren« in festgelegten Betriebsbereichen ermöglicht. Hierbei wurde das Straßenverkehrsgesetz um die Abschnitte Paragraph 1d bis l erweitert. Im Gesetz wird geregelt, dass »Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrerfunktion in festgelegten Betriebsbereichen« eingesetzt werden können, wenn sie die Fahraufgabe selbstständig durchführen können und über eine technische Ausrüstung verfügen. Die technische Ausrüstung muss laut Gesetz in der Lage sein, die Fahraufgabe zu übernehmen, die Verkehrsvorschriften einzuhalten, das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand zu versetzen sowie die technische Aufsicht mit Informationen zu versorgen. Die technische Aufsicht ist laut Gesetz eine natürliche Person, die das Fahrzeug während des Betriebs deaktivieren oder Fahrermanöver freigeben kann, das Fahrzeug aber nicht dauerhaft überwachen muss (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2021; Bundestag 12.07.2021). Damit wird ein fahrerloses Fahren basierend auf dem Gesetz möglich, unter der Prämisse, dass die Fahraufgabe durch eine technische Aufsicht während des Betriebs übersteuert werden kann. Ein autonomes Fahren, bei dem keine natürliche Person mehr in das System eingreifen muss, ist auf Basis dieses Gesetzes allerdings nicht möglich.

Aufgrund der zunehmenden Diskussion nicht nur in Bezug auf die rechtlichen, sondern auch die ethischen Rahmenseetzungen des automatisierten Fahrens wurde im Jahr 2017 eine Ethik-Kommission

»Automatisiertes und Vernetztes Fahren« eingesetzt, um Leitlinien zum Umgang mit der neuen Fahrzeugfunktion festzulegen. 20 Regeln wurden dabei formuliert, um unklare ethische Fragestellungen zu beantworten und damit die Akzeptanz für fahrerlose Fahrzeuge zu erhöhen. Die Regeln geben den herstellenden Unternehmen zusätzlich Leitlinien, wie die automatisierten Systeme in Zukunft zu entwickeln sind:

- Teil- und vollautomatisierte Fahrzeuge sind in erster Linie zur Verbesserung der Sicherheit im Straßenverkehr für alle Beteiligten einzusetzen. Die erste Priorität bei automatisierten Systemen gilt dem Schutz der Menschen (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 10).
- Die Einführung der automatisierten Fahrzeugsysteme ist ausschließlich mit behördlicher Zulassung und Kontrolle möglich. Die gesetzliche Gestaltung der Systeme erfolgt unter der Prämisse, dass eine Eigenverantwortung sowie der gesetzliche Rahmen zum Schutz der Menschen im Einklang sind (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 10).
- Automatisierte Fahrzeuge sollen so konzipiert sein, dass sie den größtmöglichen Schutz für Beteiligten bieten und konfliktäre Situationen, wie Dilemma-Situationen, schon bei der Entwicklung der Fahrzeuge ausgeschlossen werden (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 10).
- Die Nutzung höherer Automatisierungsstufen ist gesellschaftlich und ethisch akzeptiert, wenn sie zur Schadensminderung beiträgt. Gleichzeitig wird die gesetzliche Vorgabe zum Einsatz höherer Automatisierungsstufen aber als ethisch bedenklich angesehen, wenn es ausschließlich der technischen Entwicklung (»technischer Imperativ«) dient (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 11).
- In kritischen Situationen, die nicht vermeidbar sind, hat der Schutz der Menschen oberste Priorität. Automatisierte Fahrzeuge sind daher so zu konzipieren, dass Tier- und Sachschaden akzeptiert werden, wenn Menschen dadurch geschützt werden können (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 11).

- Entscheidungen in Notfallsituationen können durch eine Software nicht so programmiert werden, dass sie die Entscheidungen der Menschen in Dilemma-Situationen vollumfänglich abbildet. Erfahrungen mit Dilemma-Situationen sind daher durch eine unabhängige öffentliche Einrichtung zu verarbeiten (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 11).
- In einer Dilemma-Situation ist die Entscheidung nach persönlichen Merkmalen sowie die Abwägung von Leben gegeneinander verboten. Eine allgemeine Programmierung zur Minimierung der Personenschäden darf zugrunde gelegt werden (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 11).
- Die Verantwortung von automatisierten Fahrzeugen verlagert sich von den Fahrenden zu den herstellenden Unternehmen, Betreibenden und den Entscheidungsinstanzen für Infrastruktur sowie aus Politik und Recht. Es bleibt der Grundsatz der Produkthaftung bestehen, sodass herstellende Unternehmen und Betreibende für die kontinuierliche Optimierung und Beobachtung bestehender Systeme verantwortlich sind (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 11f.).
- Eine transparente Kommunikation hinsichtlich der neuen Technologien für die Öffentlichkeit soll gegeben sein. Dafür werden Leitlinien definiert, die die Öffentlichkeit über den Einsatz und die Programmierung der Technologie informieren und von einer unabhängigen Instanz geprüft werden (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 12).
- Als ethisch bedenklich wird eine zentrale Steuerung und Überwachung aller Fahrzeuge im Straßenverkehr eingestuft, wenn ein Eingriff durch Dritte nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Das automatisierte Fahren ist darüber hinaus nur akzeptiert, wenn Eingriffe durch Dritte nicht nachhaltig zu einem Vertrauensverlust in das Straßenverkehrssystem führen (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 12).
- Die Datenhoheit obliegt den Fahrzeughaltern und Fahrzeughalterinnen sowie den Nutzenden der Fahrzeuge. Sie entscheiden über die Verarbeitung und Weitergabe der im automatisierten Betrieb

gesammelten Daten (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 12).

- Die Zuständigkeiten während der Fahrt müssen zu jeder Zeit erkennbar sein, sodass eine Zuordnung hinsichtlich des menschlichen oder des maschinellen Eingriffs möglich ist. Eine Dokumentation und Speicherung dieser Daten sollte gegeben sein. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist dabei so auszulegen, dass die Technik sich dem Verhalten der Menschen anpasst. Eine abrupte Übergabe der Fahrzeugsysteme an den Menschen ist daher möglichst zu vermeiden (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 13).
- Selbstlernende Systeme sind unter der Prämisse der Erhöhung der Sicherheit zulässig. Sie müssen aber die hier genannten Regeln stets befolgen. Ein Szenarienkatalog ist durch eine unabhängige Instanz zu erstellen, sodass allgemeingültige Vorgaben zur Nutzung selbstlernender Systeme beim automatisierten Fahren abgeleitet werden können (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 13).
- Autonome Fahrzeugsysteme müssen in der Lage sein, das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand versetzen zu können (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 13).
- Die Nutzung automatisierter Fahrzeuge soll in die Fahrausbildung integriert werden, um den sachgerechten Umgang mit diesen Systemen zu erlernen (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017b, S. 13).

2.4 Technische Voraussetzungen des fahrerlosen Fahrens

Zur Umsetzung des fahrerlosen Fahrens bedarf es technischer Voraussetzungen. Die Definitionen der Automatisierungsstufen nach Gasser et al. (2012) und VDA (2015) unterscheiden in Quer- und Längsführung. Die Querführung beschreibt die Lenkung des Fahrzeugs nach rechts oder links, während die Längsführung das Beschleunigen und Bremsen umfasst. Zusätzlich muss das Fahrzeug die Tätigkeiten des Menschen, wie

das Erkennen von Objekten und das situative Entscheiden, übernehmen. Zur optischen Erkennung von Verkehrsteilnehmenden, Fahrspuren oder Objekten dienen Sensoren. Für ein fahrerloses Fahrzeug werden mehrere miteinander interagierende Sensoren benötigt (»Sensorfusion«). Für die Nah- und Fernbereichserkennung werden Radar (Radiowave Detection and Ranging) oder Lidar (Light Detection and Ranging) eingesetzt, die im Fall des Radars auf der Resonanz von Radiowellen und im Fall des Lidar auf Lichtstrahlen basieren und damit ihr Umfeld erkennen können. Kamerasysteme liefern darüber hinaus Informationen zu Verkehrsschildern oder ähnlichen Gegenständen. Die Sensoren leiten ihre Informationen an die Fahrzeugsysteme weiter, die diese verarbeiten und als Grundlage für Entscheidungen zur Steuerung des Fahrzeugs heranziehen. Die verarbeiteten Informationen werden zur Auslösung der Aktoren zur Motorsteuerung sowie für Brems- und Lenkvorgänge eingesetzt (Dietmayer 2015, S. 422).

Darüber hinaus ist eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen bzw. auch mit der Infrastruktur erforderlich, um frühzeitig Gefahrensituationen identifizieren, vorbeugende Maßnahmen einleiten oder um Lichtsignalanlagen oder andere Verkehrsinfrastruktur erkennen zu können. Hierbei werden Kommunikationskanäle wie Fahrzeug-zu-Fahrzeug (engl. Vehicle-to-Vehicle, kurz V2V) oder Fahrzeug-zu-Infrastruktur (engl. Vehicle-to-Infrastructure, kurz V2I) eingesetzt. Die Kombination der beiden Kommunikationskanäle (engl. Vehicle-to-X, kurz V2X) beinhaltet sowohl die Kommunikation mit einem anderen Fahrzeug als auch mit der Infrastruktur. Die Kommunikation erfolgt bei diesen Technologien über das mobile Netz, Wireless Local Area Network (WLAN) oder Infrarot. Ziel ist es, Echtzeit-Informationen zwischen möglichst vielen Fahrzeugen zu teilen, um eine Schwarmintelligenz zu erzeugen. Umso mehr Fahrzeuge miteinander vernetzt sind, desto vollständiger kann die aktuelle Verkehrssituation erfasst werden. Unerwartetes Abbremsen vor einer Gefahrenstelle oder Unfälle durch plötzliche Wetteränderungen sollen mithilfe der Technologie vermindert werden (Johanning und Mildner 2015, S. 15). Die Ortung und Navigation der Fahrzeuge erfolgt zusätzlich über Satellitennavigation, wie z. B. Galileo, GPS oder GLONASS.

Aktuell sind Lkw bereits mit unterschiedlichen Fahrerassistenzsystemen ausgestattet. Fahrerassistenzsysteme unterstützen die Fahrenden in unterschiedlichen Situationen, wie bei der Quer- und Längsführung oder beim Einparken. Für eine Verbesserung der Entscheidungsfindung der Fahrzeuge wird der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in Fahrzeugen erforscht. Als KI werden selbstlernende Systeme oder Maschinen bezeichnet, die auf Grundlage sich wiederholender Informationen oder Verhalten Wissen generieren. Der Einsatz von KI in einem fahrerlosen Fahrzeug soll dazu dienen, Entscheidungen durch sich wiederholende Situationen selbstständig zu treffen und nach denselben Prinzipien zu reagieren. Darüber hinaus sollen besonders komplexe Situationen mithilfe von KI gelöst werden. Für einen sicheren Einsatz von KI ist es jedoch erforderlich, Tests und Erprobungen im Realbetrieb durchzuführen. Je mehr Testkilometer gefahren werden, desto sicherer funktionieren die Entscheidungsalgorithmen (Wittpahl 2019, S. 177ff.).

2.5 Ableitung der Erkenntnisse für die weitere Arbeit

Der Abschnitt 2.2 verdeutlicht, dass eine Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten zu den Automatisierungsstufen erst in den letzten Jahren erfolgt ist, die bestehenden Definitionen aber weiterhin keine Unterscheidung zwischen den Verkehrsarten vornehmen. Nach Betrachtung der einzelnen Tätigkeiten wurde zudem deutlich, dass neben der Steuerung des Fahrzeugs weitere Aufgaben im Straßengüterverkehr, wie die Be- oder Entladung des Fahrzeugs sowie die Sicherung der Ladung, in den Tätigkeitsbereich der Fahrenden fallen, die im Personenverkehr nicht anfallen. Um ein fahrerloses Fahren im Straßengüterverkehr ermöglichen zu können, ist es notwendig, dass diese Tätigkeiten ebenfalls durch das Fahrzeugsystem oder andere, externe Systeme abgedeckt sind. Die bereits aufgestellte Definition muss folglich neben der Perspektive des Fahrzeugs und der Fahraufgabe um die Perspektive der Tätigkeiten erweitert werden. Aus diesem Grund wurde in diesem Kapitel eine Definition der Automatisierungsstufen im Güterverkehr entwickelt, die im weiteren Verlauf der Arbeit als

Grundlage für die Untersuchung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem dient.

Berufskraftfahrende sind während der fahrerlosen Fahrt nicht länger im Fahrzeug anwesend. Eine natürliche Person hat während der gesamten Fahrt die Navigationsebene in Form einer technischen Aufsicht zu übernehmen. Fahraufgaben auf der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene werden durch das Fahrzeugsystem übernommen. Alle anderen Fahraufgaben und Tätigkeiten, die für den physischen Transport eines Gutes erforderlich sind, werden entweder durch das Fahrzeugsystem oder durch Dritte übernommen.

Wird die entwickelte Definition mit den Vorgaben durch die Gesetzgebung verglichen, spricht das Gesetz zum autonomen Fahren zwar von »autonomen Fahrfunktionen«, diese sind aber nur zulässig, wenn eine technische Aufsicht die Fahrt überwacht. Damit kann abgeleitet werden, dass mit dem Gesetz zum autonomen Fahren, die fahrerlose Fahrt legitimiert ist, eine vollständig autonome Fahrt, bei der keine natürliche Person mehr eingreifen muss, jedoch bislang nicht zulässig ist.

In diesem Kapitel wurde zudem deutlich, dass obwohl die technische Entwicklung des fahrerlosen Fahrens bereits vor 100 Jahre begann, diese weiterhin vor sowohl technischen als auch rechtlichen Herausforderungen steht. Das fahrerlose Fahren ist zum heutigen Zeitpunkt technisch noch nicht vollständig entwickelt. Wie die Entwicklung zeigt, befindet sich die Technologie weiterhin in der Erprobungsphase. Insbesondere der urbane Raum, mit vielen unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren, stellt eine große Herausforderung dar. Dabei spielen auch rechtliche Rahmenbedingungen eine wichtige Rolle. Wie Abschnitt 2.2 zeigt, trat erst Mitte des Jahres 2021 das Gesetz zum autonomen Fahren in Kraft, das jedoch zunächst nur das fahrerlose Fahren in festgelegten Bereichen legitimiert. Die Voraussetzungen, die in diesem Kapitel angesprochen wurden, betreffen nur die technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Unberücksichtigt bleibt bislang welche infrastrukturellen und gesellschaftlichen Herausforderungen durch das

fahrerlose Fahren im Straßengüterverkehr auftreten können. Beispielsweise gilt es, mit der Einführung der Technologie auch die Übergänge zum Wareneingang und Warenausgang infrastrukturell auszustatten. Besonders im nicht-standardisierten Umfeld, wie bei Supermärkten, Hotels oder dem Einzelhandel müssen spezifische Einrichtungen geschaffen werden, die das fahrerlose Fahren ermöglichen. Diese Veränderungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht, es wird aber bereits an dieser Stelle deutlich, dass Wirkungen durch die Einführung des fahrerlosen Fahrens auftreten. Für eine tiefergehende Untersuchung, welche Wirkungen durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem auftreten können, erfolgt im nächsten Kapitel eine Literaturanalyse, die systematisch den aktuellen Forschungsstand aufarbeitet und die bisher identifizierten Wirkungen herausfiltert.

3 Forschungsstand zum automatisierten und fahrerlosen Fahren

Das automatisierte und fahrerlose Fahren ist in der Literatur ein verhältnismäßig junges Forschungsgebiet. Erst seit Anfang der 2000er Jahre nehmen die Zitationen zum automatisierten Fahren exponentiell zu. In der Literatur werden die Termini »automatisiert«, »fahrerlos« und »autonom« (engl. driverless, self-driving, automated driving oder autonomous driving) teilweise äquivalent genutzt. Im Folgenden wird daher sowohl das automatisierte als auch das fahrerlose Fahren thematisiert, um das Forschungsgebiet ganzheitlich zu erfassen.

Das Sammelwerk »Autonomes Fahren« (Maurer et al. 2015), das im Jahr 2015 veröffentlicht wurde, stellt das erste Werk dar, das Informationen zum automatisierten und fahrerlosen Fahren wissenschaftlich fundiert zusammenfasst. In diesem Werk werden rechtliche, technische und gesellschaftliche Aspekte der Technologie beschrieben, wobei der Fokus auf automatisierten Personenkraftwagen (Pkw) liegt. Lediglich Flämig (2015) diskutiert das automatisierte und fahrerlose Fahren ausschließlich im Gütertransport. Hierbei nähert sich Flämig (2015) dem automatisierten Fahren im Straßengüterverkehr aus der Perspektive der innerbetrieblichen Logistik, in welcher automatisierte Transportsysteme bereits seit den 1950er Jahren eingesetzt werden. Anwendungsfälle automatisierter Fahrzeuge außerhalb des Betriebsgeländes werden vorgestellt und Veränderungen in der Supply Chain diskutiert.

In diesem Kapitel dient eine systematische Literaturanalyse dazu, die Themenschwerpunkte des automatisierten und fahrerlosen Fahrens, die in der Forschung untersucht werden, aufzuzeigen, um den aktuellen Forschungsstand zum automatisierten und fahrerlosen Fahren zu erfassen. Darauf aufbauend erfolgt eine detaillierte Literaturanalyse, die ausgewählte frei verfügbare Forschungsarbeiten zu Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens benennt und das methodische Vorgehen dieser beschreibt, um die Forschungslücke für diese Arbeit aufzuzeigen.

3.1 Methodisches Vorgehen zur Ermittlung des Forschungsstands

Zur Ermittlung des Forschungsstands im Bereich des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr wird auf die systematische Literaturanalyse nach Fink (2010) zurückgegriffen. Fink (2010, S. 5f.) formuliert sieben Schritte einer Literaturanalyse:

1. Auswahl der Forschungsfragen
2. Auswahl von bibliographischen oder Artikeldatenbanken, Websites und anderen Quellen
3. Auswahl der Suchbegriffe
4. Anwendung von praktischen Suchkriterien
5. Anwendung methodologischer Suchkriterien
6. Durchführung der Literaturanalyse
7. Synthese der Ergebnisse

Diese Schritte werden im Weiteren angewendet. Dabei wurden für die Literaturanalyse folgende forschungsleitende Frage festgelegt, um einen übergeordneten Einblick in die Forschungsschwerpunkte und Themengebiete zu erlangen, die bislang und aktuell zum fahrerlosen Fahren untersucht wurden:

1. *Was sind die Forschungsschwerpunkte und Themengebiete im Bereich des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr?*

Zur Auswahl geeigneter Datenbanken im Bereich »Transportation« wurde zunächst überprüft, ob Zeitschriften und Journals, die ein sehr hohes Ranking (Top 10) nach SCImago Journal & Country Rank (SJR) und Google Scholar (Stand: 2021) aufweisen, in bekannten Datenbanken vorhanden sind. Die Überprüfung wurde für die vier Datenbanken Web of Science, Scopus, Business Source Premier und IEEE Xplore vorgenommen.

Die Tabelle 3 zeigt, dass in den Datenbanken Web of Science und Scopus die meisten der hochrangigen Journals vertreten sind. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden diese beiden Datenbanken für die Literaturanalyse ausgewählt.

Tabelle 3: Liste der hochrangigen Journals in ausgewählten Datenbanken (Stand: 2021)

Journals	Web of Science	Scopus	Business Source Premier	IEEE Xplore
Transportation Research Part C: Emerging Technologies	x	x	x	
Transportation Research, Series B: Methodological	x	x	x	
Transport Reviews	x	x	x	
Transportation Research, Part A: Policy and Practice	x	x	x	
Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review	x	x	x	
Transportation Science	x	x	x	
Transportation	x			
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	x	x		x
Transportation Research Part D: Transport and Environment	x	x	x	
Transport Policy	x	x	x	
Transportation Research Procedia		x		

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Da das fahrerlose Fahren in der Regel unter dem Überbegriff der Automatisierung behandelt wird, werden für die Literaturanalyse zusätzlich zum Begriff des fahrerlosen Fahren (»driverless« und »self-driving«) die Begriffe »automatisiertes Fahren« und »autonomes Fahren« (»automated driving« und »autonomous driving«) in die Suche eingebunden. Neben dem Tätigkeitsbegriff »Fahren« wird in der Suche darüber hinaus nach den Begriffen »Lkw« (»truck«) sowie dem Schwerpunkt Logistik und Güterverkehr (»logistics« und »freight transport«) gefiltert. Um die Suche

3 Forschungsstand zum automatisierten und fahrerlosen Fahren

zusätzlich zu verfeinern, werden die Begriffe »Pkw« (»car«) und Personen (»passenger«) ausgeschlossen.

Folgende Suchkriterien wurden für die Literaturanalyse ausgewählt:

- Mindestens eine Kombination der zuvor benannten Begriffe soll in Titel, Keywords oder dem Abstract genannt werden.
- Die Suche erfolgt in englischer Sprache, da es sich sowohl bei Web of Science als auch bei Scopus um internationale Plattformen handelt.
- Der Veröffentlichungszeitraum ist unbegrenzt.
- Es wird nach Veröffentlichungen aus den Forschungsbereichen Betriebswirtschaftslehre, Ingenieurwissenschaften, Transport und Logistik gesucht.

Für die Suche wurden spezifische Suchstrings erstellt, mithilfe derer die ausgewählten Datenbanken hinsichtlich passender Literatur durchsucht werden (siehe Tabelle 4).

Nach Fink (2010, S. 5f.) sollen in die Suche qualitativ hochwertige Veröffentlichungen einfließen. Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle aber, dass das Thema des automatisierten und fahrerlosen Fahrens in der Logistik bzw. im Straßengüterverkehr bislang am Anfang der Forschung steht, sodass viele Publikationen auch in Zeitschriften veröffentlicht werden, die keinem Peer-Review unterliegen, aber trotzdem den Forschungsstand und dessen -themen zum fahrerlosen Fahren widerspiegeln.

Tabelle 4: Suchstrings für die Datenbanksuche

Datenbank	Suchstring
Web of Science	TS=(driverless OR "self-driving" OR "automated driving" OR "autonomous driving") AND TS=(truck* OR logistics* OR "freight transport") NOT TS=(car* OR passenger*)
Scopus	TITLE-ABS-KEY(driverless OR "self-driving" OR "automated driving" OR "autonomous driving") AND TITLE-ABS-KEY(truck* OR logistics* OR "freight transport") AND NOT TITLE-ABS-KEY(car* OR passenger*)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

3 Forschungsstand zum automatisierten und fahrerlosen Fahren

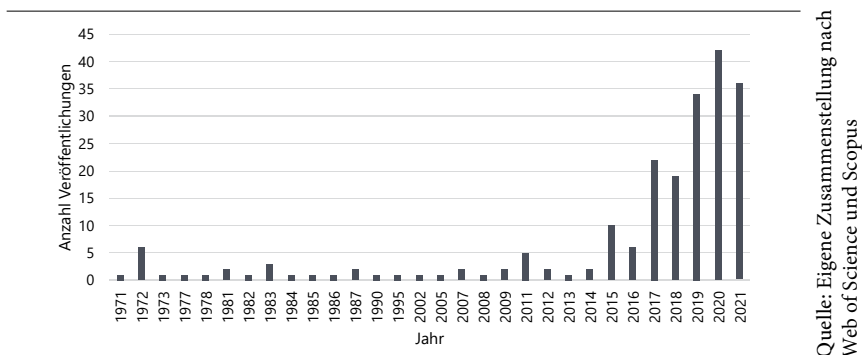
Für eine über die Datenbanken hinausgehende Suche wird die Methode der konzentrischen Kreise (»Schneeballsystem«) angewendet, sodass mithilfe der identifizierten Literatur aus den Datenbanken auch weitere Publikationen ermittelt werden können. Diese werden für eine möglichst vollständige Betrachtung in der Literaturanalyse berücksichtigt. Nachdem die Literaturanalyse durchgeführt wurde, werden die Ergebnisse ausgewertet und zusammengefasst.

3.2 Systematische Literaturanalyse

Die Datenbanksuche hat mit den angegebenen Suchstrings zu 63 Publikationen auf der Plattform Web of Science und 241 Publikationen bei Scopus geführt. Dabei konnte eine Schnittmenge von 53 Publikationen ermittelt werden, die in beiden Datenbanken aufgelistet sind. Nach einer Analyse der Titel und Abstracts der einzelnen Publikationen wurden 44 Publikationen als nicht relevant identifiziert, sodass letztlich 209 Publikationen in die Datenauswertung eingehen.

Dabei verteilen sich die Publikationen über die Jahre von 1971 bis 2021, wie die Abbildung 4 zeigt. Deutlich wird, dass ab dem Jahr 2015 die Anzahl an Publikationen stark zugenommen hat und etwa 81 % der Veröffentlichungen auf die Jahre 2015 bis 2021 entfallen.

Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Veröffentlichungen zum automatisierten und fahrerlosen Fahren

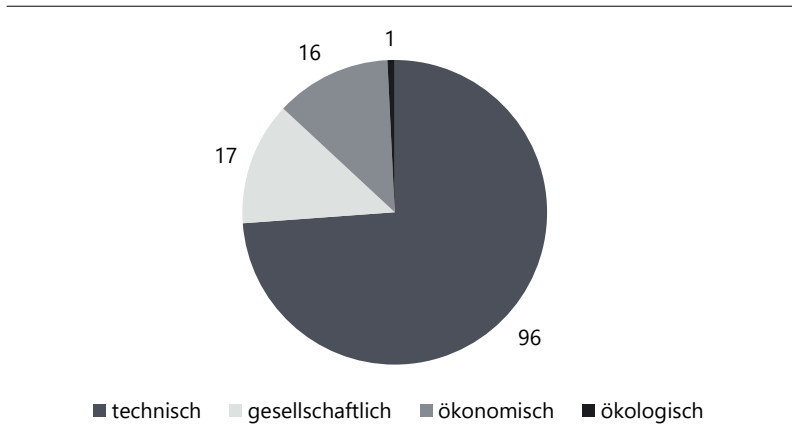


Anhand der Titel der Publikationen kann eine erste Abschätzung zu den Themenschwerpunkten ermittelt werden. Die Veröffentlichungen der Jahre 1971 bis 1995 thematisieren ausschließlich die Technologie der fahrerlosen Transportfahrzeuge (engl. Automated Guided Vehicle, kurz AGV), die in der Intralogistik eingesetzt werden, sowie Minenfahrzeuge, die ebenfalls im innerbetrieblichen Bereich ihren Einsatz finden. Insgesamt wurde 49 Publikationen dem automatisierten und fahrerlosen Fahren im innerbetrieblichen Bereich zugeordnet. Hierbei handelte es sich um Fahrzeuge, wie automatisierte Gabelstapler, fahrerlose Transportfahrzeuge, Minenfahrzeuge und landwirtschaftlich genutzte Traktoren. Konzepte, wie Automated Highway Systems (AHS), technisch ausgestattete Autobahnen, die das fahrerlose Fahren ermöglichen, wurden zu Beginn der 2000er Jahre thematisiert, im weiteren zeitlichen Verlauf aber nicht wieder aufgegriffen. Die Technologie des Platooning, der digitalen Kopplung von Fahrzeugen, wurde erstmal im Jahr 2009 zunächst im landwirtschaftlichen Kontext und anschließend auch im öffentlichen Verkehr untersucht. Insgesamt konnten 28 Quellen in den Jahren 2009 bis 2021 ermittelt werden, die diese Technologie thematisieren. Damit wird deutlich, dass das Platooning seit etwa 10 Jahren eine hohe Relevanz im Forschungsbereich des automatisierten und fahrerlosen Fahrens besitzt.

Unbeachtet der Quellen mit Bezug zu innerbetrieblichen Technologien sowie zum Platooning verteilen sich die restlichen 132 Publikationen zum einen auf die technische Ausgestaltung der automatisierten und fahrerlosen Fahrzeuge und zum anderen auf ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Gesichtspunkte (eigene Zuordnung). Die technische Ausgestaltung des Fahrzeugs umfasst Fragestellungen zum Design oder der Architektur des Fahrzeugs sowie zu Navigation, Steuerung, Erkennung, Sensorik oder Mensch-Maschine-Interaktion. 96 Publikationen thematisieren die zuvor genannten Fragestellungen. Dagegen beinhalten nur 34 Quellen Themen zu ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten. Zwei Publikationen können aufgrund fehlender Informationen nicht zugeordnet werden. Die zuvor genannten Themenbereiche verteilen sich wie in Abbildung 5 dargestellt.

Die systematische Literaturanalyse zeigt, dass die technischen Fragestellungen deutlich stärker in der Literatur vertreten sind als die

Abbildung 5: Verteilung der thematischen Gebiete zum automatisierten und fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr



Quelle: Eigene Zusammenstellung

ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Themen zum automatisierten und fahrerlosen Fahren. Gesellschaftliche Fragestellungen beziehen sich beispielsweise auf die Akzeptanz der Technologie, auf das Verhalten der Fahrenden, auf die allgemeinen Entwicklungen sowie auf die Wirkungen auf die Fahrenden oder den Verkehrsfluss. Die ökonomischen Themen umfassen unter anderem wirtschaftliche Herausforderungen, Kostenanalysen, Lebenszyklusanalysen sowie Wirkungen auf Geschäftsmodelle oder Handelsflüsse. Eine einzige Publikation konnte mit direktem Bezug zu einer ökologischen Fragestellung identifiziert werden. Hierbei handelt es sich um die Analyse von CO₂-Emissionen durch automatisierte Fahrzeuge. Es fällt auf, dass sich die Publikationen zu Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens sowohl auf ökonomische, ökologische als auch gesellschaftliche Themen beziehen. In der Literatur wird allerdings abweichend zum Verständnis dieser Arbeit der englische Begriff »Impact« zur Beschreibung der Wirkungen genutzt. Im Folgenden werden auch die Wirkungen unter dem Begriff »Impacts« in die Analyse integriert. Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die

Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens damit ein breites Themenspektrum abdecken. Bei der Betrachtung der Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens wird zudem deutlich, dass diese sehr stark variieren, von Wirkungen auf den Verkehrsfluss, also auch auf Geschäftsmodelle oder Handelsströme. Darüber hinaus zeigt sich, dass auch die Publikationen in denen nicht direkt von Wirkungen (»Impacts« oder »Outcome«) gesprochen wird, trotzdem Veränderungen oder Entwicklungen aufgrund des automatisierten und fahrerlosen Fahrens thematisieren. Damit kann zusätzlich abgeleitet werden, dass die Literatur zu ökonomischen, gesellschaftlichen und ökologischen hemen ebenfalls Wirkungen, wenn auch indirekt, untersucht. Gleichzeitig werden diese Wirkungen und Wirkungszusammenhänge jedoch nicht ganzheitlich betrachtet, sondern jeweils auf einen Untersuchungsgegenstand, z. B. Kosten oder CO₂-Emissionen, heruntergebrochen.

3.3 Detaillierte Analyse ausgewählter Literatur

In der weiterführenden Literatur sind bereits Analysen zu finden, die sich mit dem aktuellen Wissensstand zu den Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens auseinandersetzen. Diese werden in Abschnitt 3.3.1 zunächst beschrieben, um die bereits bestehenden Grundlagen zur Analyse der Wirkungen fahrerloser Fahrzeuge aufzuzeigen. Da es sich hierbei allerdings um Literatur mit Bezug auf den Personenverkehr handelt, wird im Abschnitt 3.3.2 die Literatur ausschließlich für den Güterverkehr aufgearbeitet.

3.3.1 Bestehende Literatur zur Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens

Milakis et al. (2017) führen eine Literaturanalyse durch, die die potenziellen Wirkungen des automatisierten Fahrens im Personenverkehr hinsichtlich Politik und Gesellschaft untersucht und Themen für eine zukünftige Forschung identifiziert. Engholm et al. (2018, S. 4) nehmen ebenfalls eine Literaturanalyse zu Wirkungen selbstfahrender Fahrzeuge vor, die zum einen das Ziel verfolgt, das bestehende Wissen für die Gestaltung eines

konzeptionellen Rahmens zu Wirkungen aus einer Systemperspektive zusammenzufassen. Zum anderen soll das Wissen zu Wirkungen selbst-fahrender Fahrzeuge aus der vorhandenen Literatur gesammelt werden. Pernestål et al. (2020) bauen auf den Erkenntnissen der Literatur auf und untersuchen die Wirkungen des automatisierten Fahrens sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr, um Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Einführung der Technologie zu erzielen. Handlungsempfehlungen sind beispielsweise die Stärkung von Förderungen für die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße oder die Überprüfung der Arbeitsbedingung von Berufskraftfahrenden (Pernestål et al. 2020, S. 43).

In dem Bericht nach Engholm et al. (2018) werden Konzepte wie das »Trilateral impact assessment framework« (TIAF) nach Innamaa et al. (2018) oder der »Ripple effect of automated driving« nach Milakis et al. (2015) aufgeführt, die jeweils Wirkungen des automatisierten Fahrens thematisieren und strukturieren. Engholm et al. (2018, S. 27f.) vergleichen diese beiden Konzepte hinsichtlich ihrer Stärken und Grenzen. Das TIAF betrachtet Auswirkungen und ihre Wirkungsmechanismen und bietet Empfehlungen für Indikatoren zur Bewertung der Wirkungen. Der Ripple effect of automated driving bietet einen ganzheitlichen Überblick zu Wirkungskategorien und Wirkungen und leitet qualitative Annahmen zu Mechanismen ab. Beide Konzepte sind jedoch beschränkt auf den Personenverkehr. Auch die von Engholm et al. (2018) im Weiteren analysierte Literatur thematisiert hauptsächlich Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Personenverkehr.

Methodisch nähern sich sowohl Innamaa et al. (2018) als auch Milakis et al. (2015) über die Wirkungszusammenhänge in Form von Wirkungsstrukturen oder Kausaldiagrammen. Basierend auf den Ergebnissen nach Milakis et al. (2017) entwickelten Engholm et al. (2018, S. 45) ein Kausaldiagramm, das zeigt, dass viele der Wirkungen miteinander verknüpft sind und in Abhängigkeit zueinander stehen. Auch Pernestål et al. (2020, S. 46) entwickelten ein Kausaldiagramm, das die Wirkungen der Einführung fahrerloser Fahrzeuge im Personenverkehr und im Güterverkehr auf das Transportsystem zeigen und diese hinsichtlich von Handlungsempfehlungen qualitativ diskutieren. Einen ähnlichen Ansatz wählen May et al. (2018, S. 1), die, basierend auf der Literatur zum

automatisierten Fahren im Personenverkehr, ein Kausaldiagramm zu den Wirkungen des automatisierten Fahrens auf die urbane Landnutzung sowie das Transportsystem ermittelten. May et al. (2018, S. 3) gehen jedoch über die qualitative Analyse hinaus und implementieren die Wirkungszusammenhänge mittels hinterlegten Daten in ein System Dynamics-Simulationsmodell, das den Anteil der privat genutzt oder öffentlich geteilten automatisierten Fahrzeuge in der Flotte, die Auswirkung auf die Netzkapazität, die Notwendigkeit für Parkplatzkosten, die Zeit, welche im Fahrzeuge verbracht wird, sowie die Möglichkeit, für eingeschränkte Menschen automatisierte Fahrzeuge zu nutzen, aufzeigt. Anhand von zehn Szenarien konnten so quantitative Auswirkungen des automatisierten Fahrens im Personenverkehr ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Fahrzeugfahrleistung im Vergleich zum Basisszenario ansteigt (May et al. 2018, S. 4f.). May et al. (2018, S. 5f.) resümieren, dass die Ergebnisse zwar von den Inputfaktoren der Simulation bestimmt sind, aber diese nichtsdestotrotz verdeutlichen, dass es wichtig ist, die einzelnen Einflussfaktoren und ihr Verhalten besser zu verstehen, um Maßnahmen zu ergreifen, die unerwünschte Wirkungen durch automatisierte Fahrzeuge in Städten vermeiden.

Im Rahmen der Projekte »PATH Program« oder »CHAUFFEUR I und II« wurden ab Anfang der 2000er Jahre unterschiedliche Studien zu automatisierten und vernetzten Fahrzeuge im Güterverkehr, insbesondere im Hinblick auf Platooning, veröffentlicht (Geißler 2001; Shladover et al. 2005; Flämig 2016, S. 375). Tsao und Botha (2003, S. 7f.) entwickelten beispielsweise anhand einer Literaturanalyse Betriebskonzepte für die Automatisierung von Bussen und Lkw im urbanen Raum. Das Konzept für die Automatisierung von Lkw basiert zum einen auf einer separaten Lkw-Spur und zu anderen auf elektronisch gekoppelten Lkw (Platooning). Ermittelte Vorteile waren eine bessere Kraftstoffeffizienz, eine Erhöhung der Sicherheit, ein homogenerer Verkehr, eine verbesserte Ausnutzung der Infrastruktur und eine Steigerung der Produktivität.

Basierend auf der vorhandenen Literatur konnten vier Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Die vorhandenen Literaturanalysen thematisieren fast ausschließlich die Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Personenverkehr.
2. Die Wirkungen und ihre Wirkungszusammenhänge werden in der existierenden Literatur methodisch vermehrt mithilfe von Kausal-diagrammen oder Wirkungsstrukturen dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine qualitative Analyse der Wirkungszusammenhänge.
3. Die Analysen zeigen die Wirkungen hinsichtlich des Transportsystems sowie der urbanen Landnutzung. Eine Betrachtung des Logistiksystems fehlt bislang.
4. Ab den 2000er Jahren werden auch Wirkungen im Güterverkehr thematisiert, allerdings insbesondere für das Platooning.

3.3.2 Literatur zur Analyse von Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Güterverkehr

Aus den vorangegangenen Ergebnissen wird im Folgenden der Literaturstand explizit für das automatisierte und fahrerlose Fahren im Güterverkehr dargestellt. Hierfür werden basierend auf der systematischen Literaturanalyse und nach dem Schneeballsystem ausgewählte Journalartikel sowie unterschiedliche universitäre oder wirtschaftliche Berichte näher untersucht, die Open Access zur Verfügung stehen. Die Literaturanalyse verfolgt dabei das Ziel, mögliche Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem aufzulisten und das methodische Vorgehen näher zu untersuchen. Die ausgewählte Literatur soll aggregiert einen Überblick über potenzielle Wirkungen liefern. Eine Vollständigkeit dieser kann aufgrund der Beschränkung auf Open Access-Veröffentlichungen nicht gewährleistet werden.

Im Folgenden werden 31 Artikel und Berichte zwischen den Jahren 2010 und 2021 vollständig ausgewertet, die den Lkw-Verkehr thematisieren und mögliche Wirkungen der Technologie beinhalten. Hierbei sind Wirkungen aufgrund von Platooning nicht berücksichtigt, da die Wirkungen nicht als allgemeingültig für das automatisierte oder fahrerlose Fahren gelten, sondern weiteren Rahmenbedingungen unterliegen.

Beispielsweise führt die Fahrt im Platoon zu einem anderen Kraftstoff- und Energieverbrauch, da der Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen bis auf wenige Meter verringert werden kann und so durch die Aerodynamik Einsparungen entstehen (Alam et al. 2015, S. 40). Die Literatur wird chronologisch vorgestellt.

Shladover (2010, S. 1072f.) benennt verschiedene Betriebskonzepte für die Automatisierung von Lkw und ihre Funktionen. Die Konzepte basieren auf unterschiedlichen Assistenzsystemen, wie Adaptive Cruise Control (ACC) oder Lane Keeping Assistance (Spurhalte-Assistent), die zu Wirkungen wie verbesserter Sicherheit oder mehr Komfort während der Fahrt führen können, aber auch zu einer Reduzierung der Wachsamkeit der Fahrenden oder einem überhöhten Vertrauen in die Fahrzeugsysteme. Hierbei handelt es sich um bereits existierende Assistenzsysteme, die entweder bereits erprobt oder bislang nur als Hypothesen aufgestellt wurden, aber noch nicht implementiert sind.

Fang et al. (2013, S. 171) entwickeln einen Algorithmus zur Reservierung von Fahrstreifen für den automatisierten Lkw-Verkehr. Dabei sollen bestehende Fahrspuren in Spuren für automatisierte Lkw umgewandelt werden, um fristgerechte Transporte zu ermöglichen. Der Algorithmus ermöglicht die Einhaltung und Vorhersagbarkeit der Fahrzeiten bei gleichzeitiger Minimierung des Einflusses auf den übrigen Verkehr.

Kückelhaus et al. (2014, S. 27f.) betrachten in einer Studie des Unternehmens DHL mögliche Anwendungsfälle von Automatisierungstechnologien im Straßengüterfernverkehr und führen Vorteile und Risiken auf. Wirkungen, wie die Reduzierung von Unfällen oder die Bekämpfung des Personalmangels sowie eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs, werden in der Studie genannt.

Nowakowski et al. (2015) vergleicht, welche unterschiedlichen Motive zwischen der Automatisierung von Personen- und Güterfahrzeugen bestehen. Die Motivation zur Automatisierung schwerer Nutzfahrzeugen sieht Nowakowski et al. (2015, S. 2946f.) in einer Zunahme der Sicherheit durch die Reduzierung von Unfällen und in ökonomischen Motiven, wie der zunehmenden Produktivität der Mitarbeitenden, geringeren Personalkosten und verminderten Kraftstoffkosten. Durch die Einführung der Automatisierung kann die Anzahl der Fahrenden reduziert und der

Kraftstoffverbrauch verringert werden. Darüber hinaus gelten als Motive die Reduzierung von Infrastrukturkosten und die Zunahme der Effizienz sowie die Verringerung der Fahrzeiten.

Wie bereits beschrieben, thematisiert Flämig (2015) das automatisierte Fahren im Güterverkehr. Hierbei werden Veränderungen in der Logistikkette aufgrund eines zunehmenden Automatisierungsgrads im Güterverkehr anhand bestehender Pilotprojekte und potenzieller Assistenzsysteme diskutiert. Zum einen ergeben sich einzelwirtschaftliche Veränderungen, da die Tätigkeiten der Lkw-Fahrenden in anderer Weise übernommen werden müssen (Lagerpersonal oder zusätzliche Automatisierungstechnologie) (Flämig 2015, S. 391). Damit einher gehen auch Veränderungen in den Schnittstellen, die zur erfolgreichen Implementierung erfolgen müssen (Flämig 2015, S. 392). Gesamtwirtschaftliche Wirkungen beziehen sich auf eine Verbesserung der Infrastrukturnutzung oder die Erreichung von Klimazielen aufgrund von reduziertem Treibstoffverbrauch. Darüber hinaus kann das automatisierte Fahren zu einer Reduzierung der Unfallzahlen führen (Flämig 2015, S. 393). Auf der anderen Seite kann das automatisierte Fahren im Straßengüterverkehr jedoch auch zu Konflikten mit anderen Massentransportmitteln, wie der Bahn oder dem Binnenschiff, führen (Flämig 2015, S. 394).

Fagnant und Kockelman (2015, S. 167ff.) untersuchen mögliche Aspekte von automatisiertem Fahren und diskutieren potenzielle Wirkungen auf das Transportsystem anhand der bestehenden Literatur und Experteninterviews. Neben Sicherheit, Stau und Reiseverhalten werden für den Gütertransport spezifische Wirkungen, wie die Erhöhung von Kraftstoffeinsparungen, der reduzierte Bedarf an Lkw-Fahrenden und die Übernahme der Tätigkeiten durch Lagerpersonal, genannt und in Form einer Szenariobetrachtung berechnet (Fagnant und Kockelmann 2015, S. 175).

Mithilfe einer Literaturanalyse von rund 120 Dokumenten und einem Austausch mit Experten ermitteln Fitzpatrick et al. (2016) unterschiedliche Bedenken, Chancen und Hindernisse hinsichtlich des automatisierten Fahrens im Straßengüterverkehr, um letztlich mögliche weitere Schritte zur Entwicklung der Technologie zu formulieren. In dem Bericht nennen Fitzpatrick et al. (2017, S. 1f.) Wirkungen des automatisierten Fahrens, wie die Steigerung der Infrastrukturkapazität, eine auf den Lkw-Verkehr

ausgelegte Infrastruktur, die Zunahme der Straßengüternachfrage, die Verringerung von Umwelteinflüssen sowie die Verbesserung der Routenwahl.

In ihrem Bericht beschreiben Nowak et al. (2016, S. 10) potenzielle Veränderungen durch das autonome Fahren, wie der Wegfall der Fahrenden auf langen Strecken, Kosteneinsparungen durch optimiertes Bremsen und Beschleunigen oder die verbesserte Verkehrssicherheit, die zu verringerten Versicherungskosten führt. Mithilfe eines Vergleichs der fixen, variablen und Personalkosten ausgehend vom Jahr 2016 wird eine veränderte Struktur der Betriebskosten bis über das Jahr 2025 abgebildet (Nowak et al. 2016, S. 13).

Roland Berger (2016) thematisieren disruptive Veränderungen in der Transportbranche durch die Einführung von automatisierten Lkw anhand von Szenarioberechnungen. Als erwartete Vorteile benennen Roland Berger (2016, S. 4) zum einen Wirkungen auf die Flottenbetreibenden, die zunehmende Sicherheit, eine sich verändernde Rolle der Fahrenden, die Reduzierung von Stress, die Verbesserung der Gesundheit der Fahrenden, eine verringerte Infrastrukturnutzung, die Reduzierung von Kraftstoffkosten sowie optimierte Ruhezeiten. Zum anderen werden soziale Wirkungen genannt, wie die Reduzierung von Emissionen, Unfallfolgeminderung, sicherere Straßen sowie die Reduzierung von Stau.

Short und Murray (2016, S. 15) beschreiben zum einen den aktuellen Stand des automatisierten Fahrens und zum anderen potenzielle Wirkungen anhand der wichtigsten Themen in der Transportindustrie. Top-Themen im Jahr 2015 wurden folgendermaßen bewertet: 1. Betriebszeiten, 2. Compliance, Sicherheit, Verantwortlichkeit, 3. Personalmangel, 4. Bindung der Fahrenden, 5. Lkw-Parkplätze, 6. Mandat für elektronische Logging-Geräte, 7. Gesundheit/Wohlbefinden der Fahrenden, 8. Wirtschaft, 9. Infrastruktur/Stau/Finanzierung, 10. Ablenkung des Fahrenden (The American Transportation Research Institute 2015, S. 3). Wirkungen aufgrund des automatisierten Fahrens führen nach Short und Murray (2016, S. 38) zu einer Simultanität von Ruhe- und Betriebszeiten, einer Erhöhung der Produktivität, einer Bekämpfung des Personalmangels und einer Attraktivitätssteigerung des Berufs von Lkw-Fahrenden. Außerdem führt automatisiertes Fahren zu einer verringerten Nachfrage nach Parkplätzen. Zusätzlich wäre eine Verbesserung der

Gesundheit der Fahrenden durch eine sinkende Monotonie und den Abbau von Stress möglich. Das automatisierte Fahren könnte eine Steigerung der Produktivität bewirken und Kostenvorteile erzielen sowie zu einer Reduzierung von Unfällen führen und damit Staus verringern. Ähnlich zu Flämig (2015) wird angeführt, dass es einige Transporttätigkeiten gibt, die weiterhin Lkw-Fahrende erforderlich machen, wie z. B. die Interaktion mit dem Kunden, Verwaltung der Ausstattung, Routenmanagement, Güterhandhabung oder Regulierungen (Short und Murray 2016, S. 23). Die Überlegungen von Short und Murray (2016) basieren auf der bestehenden Literatur.

Wadud et al. (2016) untersuchen Fahr-, Energie- und Kraftstoffwirkungen anhand von Automatisierungsmechanismen quantitativ. Die Wirkungen wurden vorab mithilfe einer Literaturanalyse und gegebenenfalls eigenen Annahmen identifiziert. Die mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms nach Greene und Plotkin (2011) ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Automatisierung zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Energieverbrauchs führen kann, jedoch sind diese Potenziale eher bei einer Teilautomatisierung gegeben. Eine deutliche Steigerung der Emissionen ist bei einer Vollautomatisierung aufgrund von zunehmenden Fahraktivitäten zu erwarten (Wadud et al. 2016, S. 11f.).

Wirtholt und Harding (2016) analysieren mittels mikroskopischer Verkehrssimulation den Einfluss dynamischer Kontrollsysteme auf den Verkehrsfluss anhand von Fallstudien. Unter der Annahme, dass fahrerlose Fahrzeuge präziser und effizienter agieren, kann die Kapazität auf komplexen Autobahnabschnitten erhöht werden, wenn sich ausschließlich fahrerlose Fahrzeuge auf diesen bewegen. Dadurch sind keine kostenintensiven Verbesserungen der Straßeninfrastruktur notwendig (Wietholt und Harding 2016, S. 186).

Abbott et al. (2017) beschreiben anhand eines deterministischen Modells die ökonomischen Wirkungen von automatisierten Langstrecken-Lkw. Das automatisierte Fahren kann beispielsweise Veränderungen auf Kraftstoff-, Instandhaltungs-, Unfall- sowie Verlustkosten haben (Abbott et al. 2017, S. 3f.). Außerdem kann das automatisierte Fahren zu einer Reduzierung von Unfällen führen. Abbott et al. (2017, S. 4) gehen

allerdings davon aus, dass die Fahrenden weiterhin gebraucht werden und es daher nicht zu einer Reduzierung der Arbeitsnachfrage kommen wird.

Clements und Kockelmann (2017) fokussieren auf die wirtschaftlichen Wirkungen in unterschiedlichen Branchen. Für die Transportbranche werden anhand der bestehenden Literatur Wirkungen wie eine Reduzierung der Lkw-Unfälle, der langfristige Wegfall der Lkw-Fahrenden, die Verbesserung von Sicherheit und Effizienz sowie die Einsparungen von Kraftstoff, Zeit und Geld für die Transportunternehmen genannt. Darüber hinaus führen Clements und Kockelmann (2017, S. 6) an, dass die Kapazität der Transportunternehmen erhöht werden könnte, wodurch mehr Transporte möglich werden. Die Übernahme anderer Tätigkeiten während der Fahrt sowie die Möglichkeit zu vermehrten Ruhepausen können dazu führen, dass Lkw längere Strecken zu geringeren Kosten zurücklegen. Dies kann eine Verringerung der Schienengüternachfrage bewirken (Clements und Kockelmann 2017, S. 1).

Fraedrich et al. (2017) thematisieren die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf den Modal-Split, das Verkehrssystem sowie die Siedlungsstruktur sowohl aus Sicht des Personen- als auch des Güterverkehrs. Dabei werden unter anderem Wirkungen des automatisierten Fahrens auf den Güterverkehr anhand der existierenden Literatur beschrieben. Für eine detaillierte Analyse werden mithilfe des Modells von Liedtke und Sonntag Szenarioberechnungen durchgeführt, die die Wirkungen automatisierter Lkw auf den Schienengüterverkehr beurteilen. Im Vergleich zum Jahr 2010 könnte ein Rückgang der Schienennutzung von 17 bis 55 % durch automatisierte Lkw im Jahr 2035 einsetzen (Fraedrich et al. 2017, S. 40).

Freedman (2017) diskutiert anhand von Interviews die Wirkungen der Reduzierung von Lkw-Fahrenden durch die Einführung des automatisierten Fahrens auf dem amerikanischen Markt. In dem Artikel werden darüber hinaus Wirkungen im Hinblick auf Sicherheit, Kosten und Kraftfahrende genannt (Freedman 2017, S. 63). Im Hinblick auf die Frage der Sicherheit wird in den Interviews deutlich, dass fahrerlose Fahrzeuge im öffentlichen Raum nur eingesetzt werden, wenn sichergestellt ist, dass diese kein Risiko für andere Verkehrsteilnehmenden darstellen (Freedman 2017, S. 71).

Krause et al. (2017) untersuchen die Wirkungen des teil- und hoch-automatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur mithilfe einer mikroskopischen Untersuchung an kleinen Straßennetzelementen und Hochrechnung auf das deutsche Fernstraßennetz. Bei einer Verringerung der Fahrabstände kann eine Automatisierung zu einer Steigerung der Infrastrukturkapazität führen (Krause et al. 2017, S. 88). Darüber hinaus zeigt eine Hochrechnung, dass mit Vollausrüstung kommunizierende Fahrzeuge zu einer Reduzierung der Fahrzeiten führen können (Krause et al. 2017, S. 89).

Lex et al. (2017) führen eine Literaturrecherche zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen durch. Darauf aufbauend dienen Experteninterviews dazu, die erwarteten Vorteile, Probleme und Risiken von automatisierten Nutzfahrzeugen aufzuzeigen. So wurden Potenziale, wie die »Erhöhung der Verkehrssicherheit, des finanziellen Nutzens für Transportunternehmer und Komfortgewinn für den Fahrer« ermittelt (Lex et al. 2017, IV).

Noorvand et al. (2017) simulieren die Leistungsfähigkeit des Straßenbelags mit sowohl autonomen als auch nicht autonomen Verkehren, um die geeignete Straßenbelagsdicke auf Autobahnen zu ermitteln. Hierfür nutzen sie die Simulationssoftware »The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide«, da diese die einzige sei, die vollständig auf die Leistung im Betrieb abgestimmt ist und somit ein möglichst realistisches Ergebnis erzeugt (Noorvand et al. 2017, S. 3). Die Ergebnisse zeigen, dass autonome Fahrzeuge vorteilhaft für die Gestaltung der Straßeninfrastruktur sein können, insbesondere wenn mehr als 50 % der Verkehre autonom stattfinden (Noorvand et al. 2017, S. 1).

Auf Grundlage von unterschiedlichen Szenarien für eine großflächige Einführung des automatisierten Fahrens im Straßengüterverkehr gibt der Bericht des Internationalen Transport Forums (2017) Handlungsempfehlungen für eine störfreie Einführung des fahrerlosen Fahrens. Als Wirkungen werden in dem Bericht Kosteneinsparungen, Emissionsreduzierungen und sichere Straßen genannt. Darüber hinaus kann durch das fahrerlose Fahren der Personalmangel zwar reduziert werden, jedoch ist es möglich, dass die Einführung der Technologie zu einer starken Abnahme

der Nachfrage an Lkw-Fahrenden mit negativen sozialen Auswirkungen, wie dem Arbeitsplatzverlust, führt (International Transport Forum 2017, S. 7). Handlungsempfehlungen, die in dem Bericht formuliert werden, betreffen unter anderem die zeitliche Einführung der fahrerlosen Lkw und den Umgang mit wegfallenden Arbeitsplätzen für Berufskraftfahrende. Zu berücksichtigen ist laut dem Internationalen Transport Forum die Balance zwischen ökonomischen und sozialen Kosten (International Transport Forum 2017, S. 55).

Ross und Guhathakurta (2017) versuchen mithilfe von Szenarien mögliche Wirkungen hinsichtlich der Energiebilanz zu identifizieren und zu quantifizieren. Hierbei unterscheiden Ross und Guhathakurta (2017, S. 49) nicht nach Personen- und Nutzfahrzeug, sondern fassen diese für ihre Untersuchung zusammen. Lediglich Busse werden nicht betrachtet. Obwohl der Schwerpunkt bei den Szenarien auf der Personenbeförderung liegt, zeigen die Ergebnisse, dass eine Vollautomatisierung zu einer steigenden Nachfrage von Wegen (»Trips«) führen kann und die Zunahme an Fahrten wiederum zu einer Zunahme des Energieverbrauchs führt (Ross und Guhathakurta 2017, S. 52).

Wadud (2017, S. 164) führt eine Total Cost of Ownership (TCO)-Kalkulation durch, die Gesamtbetriebskosten unterschiedlicher Fahrzeugklassen nach Einführung des automatisierten Fahrens umfasst. Mithilfe von drei Szenarien werden mögliche Kosten ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass Fahrzeuge im kommerziellen Gebrauch höhere Kostenvorteile haben, jedoch kann die Umstellung auf einen automatisierten Betrieb zu einer starken Zunahme von Arbeitslosigkeit führen (Wadud 2017, S. 173f.).

Williams et al. (2017) beschäftigen sich mit Wirkungen der Verkehrsplanung auf das automatisierte Fahren, um die Technologie in die Planung zu integrieren. Basierend auf der bestehenden Literatur nennen Williams et al. (2017, S. 46f.) in dem Bericht unterschiedliche Wirkungen, die das automatisierte Fahren haben kann, wie z. B. die Reduzierung von Stau, die Erhöhung der Straßenkapazität, die Reduzierung der Anzahl von Lkw-Fahrenden und gleichzeitig Reduzierung der Arbeitsbelastung von Lkw-Fahrenden, die Reduzierung von Umwelteinflüssen sowie die Verringerung von Unfällen.

Bracy et al. (2018) betrachten potenzielle Sicherheitsaspekte und Infrastrukturanforderungen, die die Masseneinführung von fahrerlosen Fahrzeugen in der Automobilindustrie fördern. Anhand von Unfallzahlen schwerer Lkw wurden mittels eines Entscheidungsbaumverfahrens die Auswirkungen von Automatisierungstechnologie auf die Unfallschwere abgeschätzt (Bracy et al. 2018, S. 7). Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Reduzierung von menschlichem Fehlverhalten, die Unfallzahlen deutlich vermindert werden können (Bracy et al. 2018, S. 8ff.).

Vigrass (2018) diskutiert Vor- und Nachteile von automatisierten Lkw. Als Wirkungen von automatisierten Lkw nennt Vigrass (2018, S. 20) zum einen eine zunehmende Belastung der Infrastruktur aufgrund einer erhöhten Frequenz von schweren Lkw und zum anderen die Verlagerung von Industrien aufgrund von signifikanten Veränderungen der Transportkosten.

Elgharbawy et al. (2019) bewerten hingegen Software-Releases für autonome Lkw. Daraus resultierend werden Anforderungen für ein adaptives Testkonzept formuliert. Potenzielle Wirkungen wie eine Erhöhung der Sicherheit, eine Reduzierung der Transportkosten, eine Verbesserung der Kraftstoffeffizienz sowie eine Erhöhung der Fahrerproduktivität werden innerhalb des Artikels genannt (Elgharbawy et al. 2019, S. 202).

Lunkeit et al. (2019) untersuchen die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Straßenverkehr anhand einer Kostenanalyse. Hierbei wurde ein systemdynamischer Ansatz gewählt, der die unterschiedlichen Kostengrößen miteinander in Beziehung setzt. Mithilfe eines Simulationsmodells wurde eine mögliche Kostenentwicklung durch die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge abgebildet, die auch die Auswirkungen durch eine Veränderung der jährlichen Fahrleistung umfasst (Lunkeit et al. 2019, S. 116).

Eine weitere Kostenanalyse führen Engholm et al. (2020) durch, die die Betriebskosten fahrerloser Lkw untersuchen. Die Analyse umfasst eine TCO-Berechnung, bei der die Betriebskosten verschiedener Fahrzeugklassen im Güterverkehr in unterschiedlichen Szenarien verglichen wurden. Die Analyse zeigt, dass mithilfe von fahrerlosen Lkw substantielle Kosten reduziert und damit ökonomische Vorteile erzielt werden können (Engholm et al. 2020, S. 511).

Tabelle 5: Nichttechnische Aspekte des automatisierten und fahrerlosen Fahrens in ausgewählter Literatur (n=31)

Publikation	Nichttechnische Aspekte																						
	Wohlbefinden der Fahrenden	Gesundheit	Ermüdung der Fahrenden	Personalmangel	Bindung von Fahrenden	Attraktivität des Fahrendenberufs	Bedarf an Fahrenden	Langfristiger Wegfall der Fahrenden	Arbeitsplatzverlust	Personalproduktivität	Ablenkung der Fahrenden	Einhaltung der Dienstzeitvorschriften	Unsichere Fahrweisen	Hohes Vertrauen in Fahrzeugsysteme	Wachsamkeit	Übernahme von Aufgaben der Fahrenden durch Lagerpersonal	Veränderung der Tätigkeiten der Fahrenden	Verantwortlichkeit von Fahrenden	Frachtkosten	Gesamtbetriebskosten (TCO)	Equipmentkosten	Versicherungskosten	
Shladover (2010)																							
Fang et al. (2013)																							
Kückelhaus et al. (2014)																							
Nowakowski et al. (2015)																							
Flämig (2015)																							
Fagnant und Kockelman (2015)																							
Fitzpatrick et al. (2016)																							
Nowak et al. (2016)																							
Roland Berger (2016)																							
Short und Murray (2016)																							
Wadud et al. (2016)																							
Wietholt und Harding (2016)																							
Abbott et al. (2017)																							
Clements und Kockelman (2017)																							
Fraedrich et al. (2017)																							
Freedman (2017)																							
Krause et al. (2017)																							
Lex et al. (2017)																							
Noorvand et al. (2017)																							
Internationales Transport Forum (2017)																							
Ross und Guhathakurta (2017)																							
Wadud (2017)																							
Williams et al. (2017)																							
Bracy et al. (2018)																							
Vigrass (2018)																							
Elgharbawy et al. (2019)																							
Lunkeit et al. (2019)																							
Engholm et al. (2020)																							
Ghandriz et al. (2020)																							
Pernestål et al. (2020)																							
Engholm et al. (2021)																							
Anzahl Nennungen	5	3	3	9	2	1	5	3	1	2	2	1	2	1	1	3	2	1	12	4	2	3	

Ghandriz et al. (2020) führen eine Untersuchung der Wirkungen von automatisierten Lkw und dem elektrifizierten Antrieb von schweren Fahrzeugen durch. Mithilfe einer Berechnung von 3.072 Transportszenarien, bei denen Faktoren wie die Straßensteigung, Entfernung zwischen Logistikknöten, Ladestationen, Durchschnittsgeschwindigkeit, Fahrzeuggröße, Antriebstechnologie und Rolle der Fahrenden kombiniert wurden, konnte gezeigt werden, dass batterieelektrische, automatisierte Lkw zu einer deutlichen Einsparung der TCO, verglichen mit einem herkömmlichen Fahrzeugantrieb, führen können (Ghandriz et al. 2020, S. 7).

Die Veränderungen der umfangreichen Einführung fahrerloser Lkw untersuchen Engholm et al. (2021) anhand des schwedischen Verkehrssystems. Zwei Szenarien fahrerloser Lkw werden mithilfe eines Simulationsmodells untersucht, das das schwedische Verkehrssystem abbildet. Im ersten Szenario nutzen fahrerlose Lkw das gesamte schwedische Verkehrsnetz, während im zweiten Szenario die fahrerlosen Fahrzeuge nur auf den Hauptrouten zwischen logistischen Hubs operieren. Engholm et al. (2021, S. 227) zeigen, dass in beiden Szenarien sowohl die Fahrzeugkilometer als auch die Tonnenkilometer deutlich zunehmen, während die Transportkosten sinken. Eine Schlussfolgerung der Arbeit ist darüber hinaus, dass die Transportnachfrage aufgrund des Modal Shifts von der Schiene und dem Wasserweg hin zur Straße deutlich zunimmt.

Nach Auswertung der einzelnen Journalartikel und Berichte liegen die in den Spalten der Tabelle 5 aufgeführten 53 nichttechnischen Aspekte vor, die mit dem automatisierten und fahrerlosen Fahren im Straßen-güterverkehr in Zusammenhang gebracht werden. Einige werden nur von einzelnen Autoren (Zeilen) und andere Aspekte von mehreren Autoren genannt (Punkt). Die Literaturanalyse verdeutlicht, dass das fahrerlose Fahren Wirkungsbeziehungen zu unterschiedlichen nichttechnischen Aspekten haben kann. Diese Aspekte betreffen unter anderem die Fahrenden, die Transportunternehmen, die Infrastruktur, die Umwelt, die Sicherheit und den Verkehr.

3.4 Ableitung der Forschungsfragen

Ein Ergebnis der Literaturanalyse ist, dass die Forschung zu Wirkungen im Personenverkehrssystem und die Darstellung eines Gesamtzusammenhangs dieser deutlich weiter fortgeschritten ist, als die Forschung zum automatisierten und fahrerlosen Fahren im Güterverkehr. Zwar gibt es bereits seit Anfang der 2000er Jahre Untersuchungen zum automatisierten und fahrerlosen Fahren im Güterverkehr, allerdings liegt hierbei der Fokus auf dem Platooning von Lkw.

Seit dem Jahr 2010 findet sich mehr Literatur zu Wirkungen von automatisierten Lkw, die nicht im Konvoi fahren. In den analysierten Literaturquellen werden potenzielle Wirkungen des automatisierten Fahrens im Güterverkehr in unterschiedlichen Themenbereichen genannt und mit verschiedenen methodischen Vorgehensweisen untersucht.

Am Häufigsten sind potenzielle Wirkungen anhand von bestehender Literatur argumentativ – also rein qualitativ – identifiziert worden. Hierbei dienten beispielsweise Vergleiche zwischen den Veränderungen im Personen- und im Güterverkehr. Zur Ermittlung von Wirkungen werden darüber hinaus Interviews eingesetzt. Quantitative Wirkungen werden zudem durch Szenarioberechnungen ermittelt. Eingesetzt werden dafür unter anderem mikroskopische oder deterministische Modelle. Außerdem sind Wirkungen mittels Verkehrssimulation, Entscheidungsbaumverfahren oder Total Cost of Ownership-Berechnung quantifiziert. Potenzielle Wirkungen werden außerdem mit möglichen Veränderungen der bestehenden Prozesse begründet.

Gemein ist der analysierten Literatur, dass immer nur Teilaspekte betrachtet werden und das Logistiksystem bislang unberücksichtigt bleibt. Die Literatur bezieht sich zwar auf die Automatisierung im Straßengüterverkehr, die umfassende Betrachtung des Logistiksystems bleibt jedoch aus. Um diese Lücke zu schließen, gilt es daher zunächst die zugrundeliegenden Elemente oder Variablen des Logistiksystems zu ermitteln. Dies führt zu der ersten Forschungsfrage:

- 1) *Anhand welcher Elemente lässt sich das straßengebundene Logistiksystem beschreiben?*

Es fehlt aber nicht nur an der Identifikation der Elemente bzw. Variablen des Logistiksystems, sondern auch die Wirkungszusammenhänge aller Variablen.

In der Literatur wurden bereits Wirkungszusammenhänge vom fahrerlosen Fahren auf andere Variablen, wie beispielsweise Kosten oder Verkehr, diskutiert (Pernestål et al. 2020; International Transport Forum 2017). Wadud et al. (2016) argumentiert beispielsweise, dass das automatisierte Fahren in einer Zunahme an Straßengütertransporten resultieren kann, was wiederum zu einer Zunahme der Treibhausgasemissionen führen würde. Jedoch sind diese Wirkungszusammenhänge im Gegensatz zu Innamaa et al. (2018), Engholm et al. (2018), May et al. (2018) oder Pernestål et al. (2020) nicht als Kausaldiagramme abgebildet, sondern lediglich im Text benannt. Ein ganzheitliches Bild der Wirkungszusammenhänge im Logistiksystem – sowohl qualitativ als auch quantitativ – findet sich jedoch in keiner der vorliegenden Literaturquellen. Daraus folgt die zweite Forschungsfrage:

2) *Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet?*

Mit der Identifizierung der betroffenen Variablen im Logistiksystem ist es möglich, kausale Zusammenhänge durch den Einsatz des fahrerlosen Fahrens zwischen den Variablen zu ermitteln. Das vertiefte Wissen zu den Variablen, deren Wirkungen und der Wirkungszusammenhänge ermöglicht zudem das Ableiten möglicher Gestaltungsoptionen, um potenziell unerwünschte Wirkungen, die durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem auftreten können, zu reduzieren.

In der Literatur lassen sich bereits Handlungsempfehlungen für die Einführung des fahrerlosen Fahrens im Straßengütersystem finden. Diese beziehen sich beispielsweise auf einen potenziellen Anstieg der Arbeitslosigkeit durch den Wegfall von Berufskraftfahrenden (International Transport Forum 2017) oder nehmen keine Unterscheidung zwischen dem Personen- und Güterverkehr vor (Pernestål et al. 2020). Diese Arbeit erweitert jedoch die bisherige Perspektive auf dem Transportprozess, da Veränderungen durch das fahrerlose Fahren nicht nur für die Berufskraftfahrenden zu erwarten sind, sondern auch für die anderen Akteure des Logistiksystems.

3 Forschungsstand zum automatisierten und fahrerlosen Fahren

Vor dem Hintergrund der internationalen und gesellschaftlichen Herausforderungen von Klimawandel, Krieg und Inflation müssen Gestaltungsoptionen akteursspezifisch formuliert werden, die zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen und nicht nur einzelne Akteure fokussieren. Aufgrund des Dilemmas alle drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung in Einklang zu bringen, verfolgt die Arbeit das Ziel, zumindest die unerwünschten Wirkungen durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem soweit wie möglich zu reduzieren. Daher lautet die dritte Forschungsfrage:

- 3) *Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren?*

4 Systemdynamischer Forschungszugang

Das Forschungsfeld des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr ist bisher wenig erforscht. Insbesondere eine ganzheitliche Betrachtung im Logistiksystem fand bislang nicht statt. Grund hierfür könnte unter anderem die fehlende Implementierung des fahrerlosen Fahrens im Regelbetrieb sein, weshalb kaum umfassende Tests im Realbetrieb stattfinden und größere Datenerhebungen fehlen. Zudem ist die Technologieentwicklung noch nicht so weit vorangeschritten, das ein unfallfreies Fahren möglich ist. Beispielsweise wurde im August 2021 bekannt, dass das fahrerlos herstellende Unternehmen Daimler und das Technologieunternehmen Bosch ihre Zusammenarbeit zur Entwicklung von Roboter-Taxis im Stadtverkehr beenden, da die Herausforderung zum aktuellen Zeitpunkt »größer ist, als es viele gedacht hätten«, wie Harald Kröger, Geschäftsführer von Bosch, angab (dpa-Newskanal 2021). Die Untersuchung des fahrerlosen Fahrens ist folglich die Betrachtung einer zukünftigen Entwicklung und daher Zukunftsforschung.

Der Grundgedanke der Zukunftsforschung rührt von der Erkenntnis, dass der Mensch einerseits folgenreiche Wirkungen erzielt hat, wie die Einführung des Automobils, andererseits aber nicht gelernt hat die Folgen seines Wirkens zu kontrollieren, wie die zunehmende Luftverschmutzung durch Emissionen. Steinbuch (1973) führt an, dass viele der seinerseits und gegenwärtigen Gefahren (z. B. Zerstörung der Umwelt) auf »[...] ein mangelhaftes Verständnis der Technik und ihren Folgen [...]« zurückzuführen seien (Steinbuch 1973, S. 13). Es muss folglich ein ganzheitliches Verständnis der Wirkungen in der Gegenwart für die Folgen in der Zukunft entwickelt werden.

Generell liegt der Zukunftsforschung die Tatsache zugrunde, dass die Zukunft nicht vorhergesehen und infolgedessen nicht vorhergesagt werden kann, weshalb nicht ein einziges Zukunftsbild, sondern vielmehr unterschiedliche Optionen der Zukunft betrachtet werden können oder gar müssen (Müller-Stewens 1988, S. 2919; Schimanski 1976, S. 7; Hinterhuber 1996, S. 36f.; Wagenführ 1970, S. 127ff., 1985, S. 578).

Im Zentrum der Zukunftsforschung steht »die zukünftige Veränderung des jeweiligen Untersuchungsobjektes« (Göpfert 2019, S. 5). Ziel ist es, den Veränderungsprozess transparent zu machen, um mögliche Entwicklungen zu verstehen, sodass die Zukunft aktiv gestaltet werden kann (Steinmüller 1995, S. 22). Göpfert (2019, S. 6) benennt das »Denken in Alternativen« als ein Merkmal der Zukunftsforschung. Es gilt damit nicht nur den Blick auf eine Option zu legen, sondern die unterschiedlichen Veränderungen zu berücksichtigen, die die Zukunft haben kann (Bruckmann 1977, S. 18; Jouvenel 1967; Wagenführ 1985, S. 571f.; Müller-Stewens 1988, S. 2920; Kreibich 1995).

Zukunftsmethoden sollen helfen »[...] to systematically explore, create, and test both possible and desirable future visions« (Glenn 1994, S. 2). Wie auch in Göpfert (2019) weist Glenn (1994, S. 2) darauf hin, dass die Untersuchung möglicher Zukunftsvisionen dazu beitragen soll, langfristige Maßnahmen, Strategien und Pläne zu entwickeln. Zu beachten ist nach Glenn (1994, S. 4) jedoch, dass mithilfe von Zukunftsforschung keine exakte Vorhersage getätigt werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem identifiziert und analysiert, weshalb es einer Methode bedarf, die zum einen das Verstehen eines Systems ermöglicht und zum anderen eine zukünftige Entwicklung abbilden kann. Bei dem betrachteten System handelt es sich um ein sozio-technisches System. Daher wird ein systemdynamischer Forschungszugang angewendet, so dass Wirkungen qualitativ und quantitativ abgebildet werden können. Mithilfe des Sensitivitätsmodells nach Vester (1990) und der Zukunftsmethode »System Dynamics« können simulationsbasiert Gestaltungsoptionen ermittelt und analysiert werden. Die genannten methodischen Ansätze werden im Folgenden eingeführt.

4.1 Grundlegendes Systemverständnis und die Methode System Dynamics

Nach Bertalanffy (1972, S. 18) ist »ein System [...] eine Menge (im mathematischen Sinne) von Elementen, zwischen denen Wechselbeziehungen bestehen«. Gronau (1994) unterscheidet fünf wesentliche Merkmale von Systemen: »die Systemgrenzen, die Systemelemente, die Systembeziehungen, der Input/Output und der Systemzweck« (Gronau 1994, S. 6). Die Systemgrenzen beinhalten die Abgrenzung des Systems von seiner Umgebung. Die verschiedenen Bestandteile des Systems werden als Systemelemente bezeichnet, wobei diese miteinander in Beziehung stehen. Bertalanffy (1972) unterscheidet in offene und geschlossene Systeme: Offene Systeme tauschen »Materie, Energie oder Informationen mit ihrer Umgebung« aus (Bertalanffy 1972, S. 21f.). Die in das System fließenden Ströme werden als Input und die das System verlassenden Ströme als Output bezeichnet. Jedes System ist darüber hinaus durch einen Systemzweck gekennzeichnet, durch den ein zuvor definiertes Ziel verfolgt wird (Gronau 1994, S. 9f.). Auch Bossel (1992, S. 17) und Bossel (2004, S. 35) führen an, dass ein Objekt als System bezeichnet werden kann, wenn es durch einen Systemzweck, eine Konstellation von Systemelementen oder Wirkungsverknüpfungen und eine Systemintegrität, die das Zusammenwirken der Eigenschaften eines Systems bezogen auf sein Ziel beschreibt, gekennzeichnet ist.

Um ein System zu verstehen, bedarf es dem Verständnis der unterschiedlichen Elemente im System sowie ihrem strukturellen Aufbau (Nagel 1988, S. 12). Zur Analyse eines Systems ist es daher erforderlich, sowohl seine Elemente als auch die Beziehungen zwischen den Elementen zu kennen. Dabei können die Wechselbeziehungen als Kausalketten beschrieben werden, die Ursache-Wirkungs-Beziehungen abbilden.

Im Logistiksystem können Knoten, Kanten und Objekte als Systemelemente verstanden werden (Pfohl 2010, S. 6). Weitere Systembestandteile können Fließbeziehungen sein, bei denen es sich um Verbindungen zwischen Knoten handelt und in Form von Güter- oder Informationsflüssen sowie Transformationen auftreten. In Logistiksystemen findet eine Dynamik sowohl systemintern durch den Transformationsprozess als auch extern durch die Wechselbeziehungen mit der Umwelt statt

(Isermann 1998, S. 48). Da die hier betrachtete zukünftige Welt des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem einer Veränderung im Zeitverlauf erfährt, handelt es sich um ein dynamisches System, das auch als solches betrachtet werden muss.

Für die dieser Arbeit zugrundeliegende Zielsetzung bietet sich daher die Methode der Zukunftsforschung »System Dynamics« (SD) an, die erstmals im Jahr 1961 von Jay W. Forrester in seinem Buch *Industrial Dynamics* angewandt wurde (Forrester 1961). Ziel von System Dynamics ist es, die Zusammenhänge zwischen Struktur und Verhalten durch eine ganzheitliche Analyse eines dynamischen Systems über die Zeit zu verstehen, z. B. die strukturellen Ursprünge einer bestimmten zeitlichen Entwicklung und die verhaltensbedingten Folgen von Systemänderungen (Forrester 1995, S. 16). Das wohl bekannteste System Dynamics Modell, das Weltmodell nach Forrester, untersucht die Grenzen für das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum auf der Erde und stellt ein System dar, »[...] dessen Elemente die Menschen selbst, ihre Sozialordnung, ihre Technologie und ihre natürliche Umwelt sind« (Forrester 1972, S. 15). Das Weltmodell nach Forrester beruht auf den Grundprinzipien, die für alle dynamischen Systeme gelten: Das Prinzip der rückgekoppelten Regelkreise. Prozesse verlaufen wie eine geschlossene Kurve (Forrester 1972, S. 33). »Jede Ursache ist Ursache von Ursachen, die dauernde Veränderungen der ursprünglichen Ursachen verursachen.« (Forrester 1972, S. 36) Basierend auf den Erkenntnissen Forresters muss das System im Zusammenhang mit anderen Elementen betrachtet werden. Nur so können verschiedene, negative und/oder positive Wirkungen ganzheitlich abgebildet und untersucht werden. Um ein Problem zu lösen, ist es wichtig zu wissen, wie sich etwas auf sich selbst auswirkt und wo sein Ursprung liegt (Forrester 1995, S. 16).

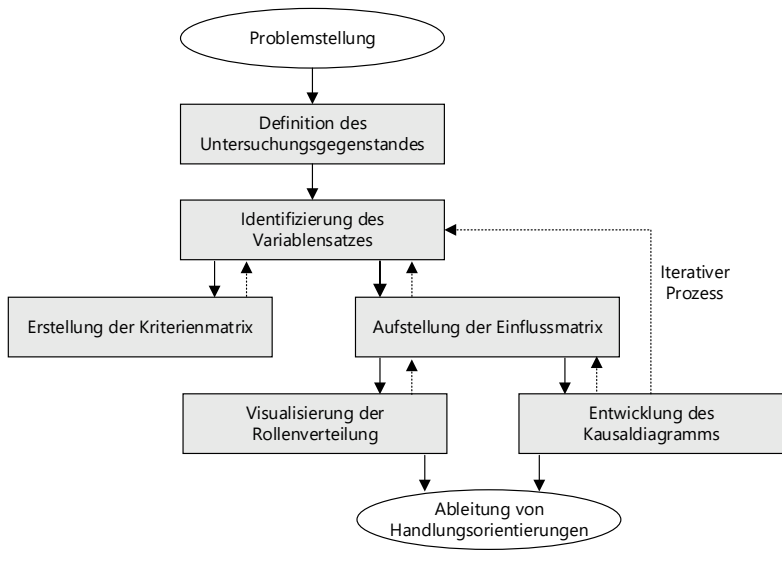
Systemdynamische Modelle können sowohl qualitative als auch quantitative Zusammenhänge visualisiert und modelliert werden. Computermodelle oder mathematische Modelle bieten im Gegensatz zu einem Denkmodell den Vorteil, dass die komplexen Zusammenhänge ungehindert ihrer Menge mithilfe des Computers nachverfolgt und in ihrer Gesamtheit erfasst werden können (Meadows 2000, S. 15f.). Bossel (2004, 15f.) nennt als Vorteile unter anderem die vergleichbar

geringen Kosten im Gegensatz zur Simulation am realen System sowie die flexible Untersuchung durch die Beeinflussung des zeitlichen Ablaufs (Verkürzung, Raffung oder Dehnung der Betrachtung beliebig möglich). Darüber hinaus hat die Erstellung eines Computermodells keine Konsequenzen oder Risiken für das reale System. Computermodelle bieten die Möglichkeit, sowohl die Theorie einer Systemstruktur als auch die Annahmen über ein System abzubilden. Daher ist eine exakte und präzise Definition der Theorie und Annahmen für die Qualität des Computermodells entscheidend (Forrester 1972, S. 30).

4.2 Sensitivitätsmodell und Papiercomputer nach Vester (1990)

Da Forrester keine Methode für die Identifizierung der zu berücksichtigenden Variablen und ihrer Wirkungen in einem SD-Modell liefert, wird auf das Sensitivitätsmodell nach Vester (1990) zurückgegriffen. Das Modell wurde Ende der 1970er Jahre im Rahmen eines UNESCO-Programms durch Frederic Vester und Alexander von Hesler (1980) entwickelt und Ende der 1980er Jahre in der Ford-Systemstudie erweitert und eingesetzt (Vester 1990, S. 29). Kern dieser Methodik ist die systematische Erarbeitung von Inhalten, die im Gegensatz zu der üblichen »konstruktivistischen« oder »deterministischen« Vorgehensweise steht. Die Untersuchung eines Objekts erfolgt »vom Ganzen zum Detail« (Vester 1991, S. 10). Im Gegensatz einer Sichtweise »von innen«, aus dem System heraus, bei dem ein Unternehmen beispielsweise auf seine Konkurrenz und deren Entwicklung blickt und sich daran orientiert, gilt es nach Vester (1991, S. 17ff.) den Blick auf ein System »von außen« zu richten, sodass das eigene System verstanden und dadurch besser gesteuert werden kann. Mithilfe des Sensitivitätsmodells lassen sich Variablen sowie Zusammenhänge eines Systems ermitteln und in einem iterativen Prozess deren Wirkung und Rolle auf das Gesamtsystem charakterisieren, wie es in Abbildung 6 grafisch dargestellt ist, sodass das Systemverständnis gestärkt werden kann (Vester 1990, S. 30).

Abbildung 6: Aufbau des Sensitivitätsmodells



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Vester (1990, S. 45) und Flämig et al. (2001, S. 129)

Zur Analyse der Wirkungen bedarf es zunächst einer Definition des Untersuchungsgegenstandes, um die relevanten Variablen im System identifizieren zu können. Anschließend werden alle Faktoren, die im Rahmen der Untersuchung von Bedeutung sein könnten, mittels Brainstorming und Diskussionsrunden von Experten gesammelt (Vester 1990, S. 30). In einem iterativen Prozess wird die Thematik diskutiert, um die relevanten Variablen zu erfassen. Vester (1990, S. 31) gibt in seinem Vorgehen an, dass im Anschluss eine visuelle Skizze als »Systembild des Gesamtmodells« erstellt wird, um den betroffenen Lebensraum schematisch abzubilden. Bereits an dieser Stelle werden erste Beziehungen zwischen den Elementen eingezeichnet, die zu einem »heuristischen Wirkungsgefüge« führen (Vester 1990, S. 31). Nachdem die Variablen gebildet wurden, erfolgt die Aufteilung der Variablen zu Teilmodellen. In jedem Teilmodell werden spezifische Variablensätze definiert und in Wirkungsgefüge überführt. Zusätzlich werden weitere Variablen ergänzt (Vester 1990, S. 31f.).

Nach der Bildung des Variablensatzes werden die Variablen definiert und mit Indikatoren versehen. Dies ist notwendig, um die Variablen zu messen und abzubilden. Darüber hinaus werden jeder Variable externe Einflüsse zugeordnet, die auf das Verhalten der Variablen einwirken könnten (Vester 1990, S. 32). Bei der Definition ist es wichtig, die Variablen auszurichten, also ihnen eine verstärkende oder abschwächende Richtung zuzuordnen. Dies dient in der weiteren Betrachtung dazu, die Intensität einer Wirkung und die Richtung der Wirkungsbeziehung im System zu bestimmen (Vester 1991, S. 29).

Um festzustellen, ob alle Systembereiche mit dem definierten System als Untersuchungsgegenstand abgebildet werden, erfolgt die Erstellung einer Kriterienmatrix (Vester 1990, S. 33). Sind alle Systemkomponenten durch den Untersuchungsgegenstand erfasst, kann die Erstellung der Einflussmatrix erfolgen (Vester 1990, S. 36).

Die Einflussmatrix vergleicht die Variablen des Systems untereinander und wird als »Papiercomputer« bezeichnet (Vester 1990, S. 36). Im Rahmen der Matrixerstellung wird abgeschätzt, welche Wirkung eine Variable auf eine andere hat. Dies wird anhand einer mehrstufigen Skala vorgenommen (Vester 1990, S. 36):

- 0 = keine oder nur sehr schwache Wirkung
- 1 = schwache Wirkung
- 2 = mittelstarke Wirkung
- 3 = sehr starke Wirkung

Eine Aussage über die Verstärkung oder Schwächung der Wirkung lässt sich aus der Definition der Variablen, die qualitativ gerichtet sind, ableiten (Vester 1991, S. 29). Die Wirkung kann sowohl gleichgerichtet als auch gegengerichtet sein.

Bei Vester (1990, S. 37) wird die Einflussmatrix mit Hilfe eines Expertengremiums ausgefüllt, bis alle Einflüsse feststehen. In dieser Arbeit basiert die Einflussmatrix auf einer Literaturanalyse und den Ergebnissen eines Workshops von Fachkundigen. Im Anschluss erfolgt ein iterativer Prozess, um Variablen mit geringer Relevanz oder ähnlichen Wirkungen identifizieren und aus dem Variablensatz entfernen zu können (Vester 1990, S. 37f.).

Nach der Bearbeitung der Einflussmatrix können aus den Werten der einzelnen Variablen Summen gebildet werden. Die horizontale Summe jeder Variable bildet die Aktivsumme einer Variable (Welchen Einfluss übt eine Variable auf andere Variablen aus?) während die vertikale Summe die Passivsumme (Inwieweit wird eine Variable durch andere Variablen beeinflusst?) abbildet (Vester 1990, S. 36).

Mithilfe der Multiplikation von Aktiv- und Passivsumme kann das Produkt (P) ermittelt werden. Der Quotient (Q) ergibt sich aus der Division der Summen. Der P-Wert kann verwendet werden, um kritische oder puffernde Variablen zu identifizieren (Vester 1991, S. 90). Variablen mit einem hohen P-Wert haben einen starken Einfluss auf andere Variablen, werden aber auch stark von anderen beeinflusst und gelten daher als kritisch (Vester 1991, S. 98). Diese Variable können zwar als Hebel für Veränderungen im System verwendet werden, sind dadurch aber auch in der Lage das System stark zu verändern. Elemente mit einem niedrigen P-Wert stellen puffernde Variablen dar. Sie haben einen schwachen Einfluss auf andere Elemente und werden auch nur schwach von anderen Elementen beeinflusst. Die Elemente werden auch als träge bezeichnet, da ihre Wirkung mit einer langen Zeitverzögerung beginnen kann oder sie die Wirkung bis zu einem Grenzwert speichern. Es kann vorkommen, dass die Elemente letztlich andere Elemente stark beeinflussen, dies bleibt aber zunächst unbemerkt (Vester 1991, S. 99).

Mit dem Q-Wert können die Variablen identifiziert werden, die eine aktive oder reaktive Wirkung auf das System haben. Variablen mit einem hohen Q-Wert werden als aktive Variablen bezeichnet (Vester 1991, S. 98). Sie weisen einen starken Einfluss auf andere Variablen auf, werden aber nur wenig von anderen Variablen beeinflusst. Die Veränderung einer aktiven Variable kann zu einem nachhaltigen Einfluss auf das System führen. Variablen mit einem niedrigen Q-Wert werden als reaktive Elemente bezeichnet, da sie nur einen schwachen Einfluss auf andere Variablen haben, aber stark von anderen Variablen beeinflusst werden (Vester 1991, S. 98).

Vester (1990, S. 39) wählt zur Visualisierung der Variablen im System zum einen ein Diagramm, das die unterschiedlichen Rollenverteilungen (aktiv, reaktiv, kritisch, puffernd) der Variablen abbildet. Zum anderen

werden die Wirkungsbeziehungen der einzelnen Variablen zueinander in einem Kausaldiagramm dargestellt (Vester 1990, S. 40). Dies ist sowohl für die Teilmodelle als auch für das Gesamtsystem möglich. Auf Grundlage der Ergebnisse leitet Vester (1990, S. 39f.) Interpretationen zu den Wirkungsbeziehungen und Rollenverteilungen der Variablen im System ab.

4.3 Dreistufiger Modellansatz

Für die Analyse von dynamischen Systemen kann ein Modell des Untersuchungsgegenstandes erstellt werden. Nagel (1988) unterscheidet zwei Arten von Modellen, »[...] wenn Modelle im Hinblick auf ein zu lösendes Problem bewußt [sic!] konstruiert werden [...]« (Nagel 1988, S. 13): Das Erklärungsmodell dient dem Verständnis eines Problems während das Gestaltungsmodell dazu eingesetzt werden kann, eine gewünschte Realität zu schaffen (Nagel 1988, S. 13). Im Gegensatz zu Nagel (1988) formuliert Gronau (1994, S. 16) das Beschreibungsmodell als weiteren Modelltyp. Das Beschreibungsmodell, das auch als Erfassungs- oder Ermittlungsmodell bezeichnet werden kann, dient dazu, eine bestimmte Entscheidungssituation zu erfassen, indem es »[...] Daten über Situation oder Struktur eines Basissystems« liefert (Gronau 1994, S. 16). Bossel (1992, S. 49) nutzt hierfür den Begriff des Wortmodells, um einen Sachverhalt verbal und umgangssprachlich darzustellen.

Das Wortmodell dient in dieser Arbeit dazu, die relevanten Elemente des Logistiksystems für die Analyse der Wirkungszusammenhänge zu ermitteln. Dafür wird zuvor die erste Forschungsfrage bearbeitet und die Grundlage für die Auswahl der Systemelemente gelegt. Das Wortmodell in dieser Arbeit umfasst die Darstellung einer zukünftigen Welt des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem als zugrundeliegendes Systembild. Das Ergebnis des Wortmodells ist ein Variablensatz, der als Ausgangsbasis für die qualitative und quantitative Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit dient.

Gronau (1994) unterscheidet hinsichtlich des Erklärungsmodells und des Entscheidungsmodells, vergleichbar dem Erklärungs- und Gestaltungsmodell nach Nagel (1988). Gronau (1994) konkretisiert, dass »Erklärungsmodelle, die zukünftige Entwicklungen vorhersagen sollen, [...] als Prognosemodelle bezeichnet« werden (Gronau 1994, S. 17). Bei dieser Bezeichnung ist jedoch die Unterscheidung nach Flechthelm (1987, S. 42f.) zu berücksichtigen, der in Prognostik und Futurologie unterscheidet, wobei sich der zeitliche Betrachtungshorizont unterscheidet. Ein Prognosemodell würde, angelehnt an diese Unterscheidung, eine kurzfristige Zukunft vorhersagen, während ein Zukunftsmodell versucht, die langfristige Zukunft darzustellen. Da in dieser Arbeit eine langfristige Zukunft abgebildet werden soll, wird von einem Zukunftsmodell gesprochen.

Mit einem Zukunftsmodell, mit dem die Dynamik des Gesamtsystems mithilfe von Hypothesen einer langfristigen zukünftigen Entwicklung begründet werden kann, wird die zweite Forschungsfrage bearbeitet. Hierbei wird auf die Methode »System Dynamics« zurückgegriffen. Nach Bossel (1992, S. 47) gilt es zunächst, das System qualitativ zu beschreiben bevor es näher zu quantifizieren ist. Für die qualitative Erklärung kann zunächst ein Wirkungsgraph bzw. ein Wirkungsdiagramm erstellt werden, während eine Quantifizierung mithilfe eines Simulationsmodells möglich ist. Dieser grundsätzliche Aufbau wird genutzt, um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen. Auf Grundlage der Literaturanalyse werden die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens auf die Elemente des Logistiksystems ermittelt. Diese fließen in das Sensitivitätsmodell nach Vester (1990) ein, um eine Aussage über das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem treffen zu können. Die Dynamik im Logistiksystem wird mithilfe eines Kausaldiagramms visualisiert, das dazu dient, versteckte Effekte, wie Rückkopplungsschleifen, sichtbar zu machen. Diese Analyse führt zu einem qualitativen Zukunftsmodell.

Um die Wirkungen zu quantifizieren und potenzielle Entwicklungstrend abzuleiten, wird ein Simulationsmodell mithilfe der Software Vensim erstellt und hinsichtlich der Dynamiken im System ausgewertet. Dies bildet das quantitative Zukunftsmodell in dieser Arbeit. Die Ergebnisse stellen die Grundlage für die Gestaltung des Logistiksystems dar.

4 Systemdynamischer Forschungszugang

Der dritte Modelltyp, der in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, ist das Gestaltungsmodell in Anlehnung an Nagel (1988, S. 13). Gestaltungsmodelle werden genutzt, um Gestaltungsoptionen zu eruieren. Dafür werden die Variablen des Zukunftsmodells dahingehend angepasst, die unerwünschten Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu reduzieren. Ein Gestaltungsmodell bietet demzufolge die Grundlage für die Beantwortung der dritten Forschungsfrage. Hierbei wird eine Szenario-betrachtung durchgeführt. Die Szenariomethode bietet den Vorteil, dass sowohl qualitativ als auch quantitativ Alternativen der Zukunft aufgezeigt werden können, wenn verschiedene Ausprägungen einer Systemvariablen, z. B. das Fahren mit und ohne Fahrenden, und mögliche flankierende Systeminterventionen betrachtet werden.

5 Systemgrenzen des straÙengebundenen Logistiksystems

Die Ergebnisse der Literaturanalyse in Kapitel 3 verdeutlichen, dass das fahrerlose Fahren im StraÙengüterverkehr auch Wirkungen auÙerhalb des StraÙengüterverkehrssystems im engeren Sinne verursachen kann. Um zu identifizieren, welche dieser Wirkungen das Logistiksystem betreffen, ist zunächst zu ermitteln, aus welchen Elementen bzw. Prozessen das Logistiksystem besteht. In diesem Kapitel wird das straÙengebundene Logistiksystem beschrieben, um die erste Forschungsfrage (*Anhand welcher Elementen lässt sich das straÙengebundene Logistiksystem beschreiben?*) zu beantworten und somit potenzielle Elemente zu ermitteln, auf die das fahrerlose Fahren im StraÙengüterverkehr einwirkt.

In dieser Arbeit wird auf bestehende Modellstrukturen aus der verkehrsplanerischen Perspektive zurückgegriffen und um Prozesse des Logistiksystems ergänzt. Zunächst werden bestehende Systemmodelle sowie Definitionen des Logistiksystems anhand der Literatur vorgestellt. Aufbauend darauf wird zur weiteren Detaillierung die prozessuale Gestaltung der Logistikkette dargestellt. Basierend auf den Erkenntnissen erfolgt die Identifizierung und Strukturierung der Elemente des Logistiksystems. Die Elemente werden bestimmten Akteuren im Logistiksystem zugeordnet, sodass eine Unterteilung in Subsysteme stattfindet, die die Verantwortungs- und Aufgabenbereiche der Akteure umfassen.

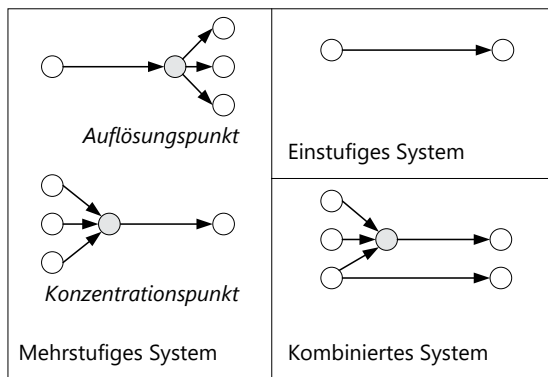
5.1 Bestehende Systemmodelle und Einordnung des Logistiksystems

Pfohl (1985) war einer der ersten, der die Logistik aus einem systemischen Zugang beschrieben hat. Er bezeichnet Logistiksysteme als »Systeme zur raumzeitlichen Gütertransformation« (Pfohl 1985, S. 3). Logistiksysteme sind geprägt durch die in ihnen ablaufenden Prozesse, die von Unternehmen der Logistikbranche durchgeführt werden. Dabei führen Logistikprozesse zu einem Güterfluss, der eine Verbindung zwischen Güterbereitstellung und Güterverwendung bewirkt (Pfohl 1985, S. 5). Bei logistischen

Prozessen handelt es sich um operative Leistungsstellen, die von Objekten, wie Gütern, Material oder Sendungen, durchlaufen werden. Während der Prozesse unterliegen die Objekte einer räumlichen, zeitlichen und physischen Veränderung. Dieser Fluss wird je nach Transportobjekt auch als Waren-, Material- oder übergeordnet als Güterfluss bezeichnet (Gudehus 2005, S. 28).

Mit der raumzeitlichen Veränderung als Grundfunktion von Logistiksystemen geht häufig eine Mengen- und Sortenveränderung einher (Pfohl 1985, S. 7). Diese Funktionen werden durch die Kernprozesse – Transport-, Umschlag-, Lagerprozesse – und die Unterstützungsprozesse – Kommissionierungs-, Verpackungs- und Signierungsprozesse – des Güterflusses realisiert. Für einen Güterfluss bedarf es einen Informationsfluss zwischen den Knoten im Logistiksystem. Der Informationsfluss kann einen voraus-eilenden, begleitend erläuternden und nachfolgenden Charakter aufweisen. Zu den Prozessen des Informationsflusses gehören unter anderem die Auftragsübermittlung und die Auftragsbearbeitung (Pfohl 2010, S. 8). »Die genannten Logistikprozesse sind Aufgaben, deren Ausführung die Güter- und Informationsflüsse realisieren« (Pfohl 2010, S. 8). Die sogenannte Realisierungsaufgabe ist dabei verbunden mit Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben in Logistiksystemen (Pfohl 2010, S. 8).

Abbildung 7: Strukturen des Logistiksystems



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Pfohl (1985, S. 6)

Pfohl (2010, S. 6) unterscheidet die Grundstruktur von Logistiksystemen in drei Kategorien, das einstufige, das mehrstufige und das kombinierte System, die in Abbildung 7 dargestellt sind.

Das einstufige System ist durch einen Direktfluss vom Ort der Güterbereitstellung (Quelle) zum Ort der Güterverwendung (Senke) charakterisiert und bietet den Vorteil, dass keine zusätzlichen Lager- und Bewegungsprozesse im Güterfluss notwendig werden (Pfohl 1985, S. 5). In einem mehrstufigen System befindet sich ein Auflösungs- beziehungsweise Konzentrationspunkt im Güterfluss zwischen Liefer- und Empfangspunkt. Im Auflösungspunkt werden Güter, die in größeren Mengen angeliefert werden, separiert und in kleineren Mengen an unterschiedliche Empfangspunkte weitergeleitet. Der Konzentrationspunkt dient im Gegensatz dazu der Bündelung von Mengen, die von verschiedenen Lieferpunkten gesendet und an einen Empfangspunkt versandt werden. Diese gebrochenen Logistikketten werden auch als indirekter Güterfluss bezeichnet (Pfohl 1985, 5f.). Das kombinierte System verbindet das einstufige und das mehrstufige System miteinander, wodurch direkter und indirekter Güterfluss parallel zueinander ablaufen. Im Gegensatz zum direkten Fluss bietet ein indirekter Güterfluss den Vorteil, dass sich beispielsweise ein Auslieferungslager in der Nähe des Kunden ansiedeln kann und somit Effizienzgewinne verzeichnet werden können (Pfohl 1985, S. 7).

Ähnlich zu den generischen Strukturen des Logistiksystems nach Pfohl (1985) differenziert Gudehus (2012) fünf Standardfrachtketten. Zwischen Quelle und Senke befinden sich verschiedene Stationen, die die Ware durchlaufen kann. Der Transport kann in einem Direktverkehr von Quelle zu Senke stattfinden, es ist jedoch auch eine Unterteilung des Transports möglich (Vorlauf, Hauptlauf, Zulauf, Auslauf und Nachlauf). Die Teilabschnitte der Frachtkette sind beispielsweise durch Umschlags-, Sammel- oder Verteilpunkte miteinander verbunden, an denen die Frachtkette beginnt bzw. endet sowie der Wechsel des Transportmittels oder -behälters erfolgen kann (Gudehus 2012, S. 99off.).

Das Logistiksystem nach Pfohl (1985) als System zur Ortsveränderung von Gütern ist in das Güterverkehrssystem eingebettet. Nach Claussen (1979) dient die Betrachtung des Güterverkehrs als System – bestehend aus mehreren Elementen – dem besseren Verständnis der Vielschich-

tigkeit von relevanten Strukturen und Prozessen. Zu diesen Elementen zählen im Güterverkehrssystem unter anderem »Güterverkehrsbetriebe, Transportmittel, Transportgüter, Wege und Stationen, Behörden und Ministerien, Verbände etc.« (Claussen 1979, S. 16) zwischen denen sich verändernde Beziehungen existieren. Dabei handelt es sich im Falle des Güterverkehrs um ein offenes System, das von einer ökonomischen, sozialen, politischen, technologischen und ökologischen Umwelt umgeben ist (Claussen 1979, S. 15f.).

Claussen (1979) definiert das Güterverkehrssystem als Teilmenge des Verkehrssystems, das auf der räumlichen Verteilung der Wirtschaftsbetriebe, privater und öffentlicher Haushalte im Raum basiert. Für den Austausch von Gütern werden diese Raumpunkte mittels Transportprozess verbunden (Claussen 1979, S. 14). Das Güterverkehrssystem kann darüber hinaus nach den zur Verfügung stehenden Verkehrsträgern gegliedert werden (Schulte 2005, S. 171). Die Verkehrsträger beziehen sich auf das Transportmedium, welches hinsichtlich Land-, Luft- oder Wasserverkehr unterschieden werden kann. Diese weisen dementsprechend unterschiedliche Ausprägungen auf. Der Straßengüterverkehr, das in dieser Arbeit thematisierte Güterverkehrssystem, ist, neben dem Schienengüterverkehr und dem Rohrleitungsverkehr, eine Teilmenge des Landverkehrs (Claussen 1979, S. 23). Erfolgte früher der Landtransport fast ausschließlich zu Fuß, mit Tieren und später dann mit dem Fahrrad, dominiert heute der Kraftverkehr den Straßenverkehr, mit Ausnahme der ersten bzw. letzten Meile.

Der Straßengüterkraftverkehr umfasst die Beförderungen von Gütern auf dem Verkehrsträger Straße, die mit Kraftfahrzeugen durchgeführt werden. Kennzeichen des Straßengüterverkehrs sind »eine flächendeckende Infrastruktur, kurze Transportzeiten und eine [...] zumeist direkte [...] Verbindung zwischen Quelle (Versender) und Senke (Empfänger)« (Dabidian und Langkau 2013, S. 137). Die Beförderung der Güter erfolgt mittels Kraftfahrzeugen wie beispielsweise Lkw oder Sattelzugmaschine mit Anhänger (Cardeneo 2008, S. 727).

Das Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) definiert den Güterkraftverkehr wie folgt: »Güterkraftverkehr ist die geschäftsmäßige oder entgeltliche Beförderung von Gütern mit Kraftfahrzeugen, die einschließlich Anhänger ein höheres zulässiges Gesamtgewicht als 3,5 Tonnen haben.« (GüKG, vom 22.06.1998 (BGBl. I S. 1485), das zuletzt durch Artikel 141 des Gesetzes vom 20.11.2019 (BGBl. I S. 1626) geändert worden ist, §1)

Der Straßengüterverkehr gliedert sich in den gewerblichen Straßengüterverkehr und den Werkverkehr. Im Güterkraftverkehrsgesetz werden der gewerbliche Güterkraftverkehr und Werkverkehr wie folgt definiert: »Werkverkehr ist Güterkraftverkehr für eigene Zwecke eines Unternehmens, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die beförderten Güter müssen Eigentum des Unternehmens oder von ihm verkauft, gekauft, vermietet, gemietet, hergestellt, erzeugt, gewonnen, bearbeitet oder instandgesetzt worden sein.
2. Die Beförderung muss der Anlieferung der Güter zum Unternehmen, ihrem Versand vom Unternehmen, ihrer Verbringung innerhalb oder – zum Eigengebrauch – außerhalb des Unternehmens dienen.
3. Die für die Beförderung verwendeten Kraftfahrzeuge müssen vom eigenen Personal des Unternehmens geführt werden oder von Personal, das dem Unternehmen im Rahmen einer vertraglichen Verpflichtung zur Verfügung gestellt worden ist.
4. Die Beförderung darf nur eine Hilfstätigkeit im Rahmen der gesamten Tätigkeit des Unternehmens darstellen.« (GüKG, vom 22.06.1998 (BGBl. I S. 1485), das zuletzt durch Artikel 141 des Gesetzes vom 20.11.2019 (BGBl. I S. 1626) geändert worden ist, §1 Abs. (2))

»Güterkraftverkehr, der nicht Werkverkehr im Sinne der Absätze 2 und 3 darstellt, ist gewerblicher Güterkraftverkehr.« (GüKG, vom 22.06.1998 (BGBl. I S. 1485), das zuletzt durch Artikel 141 des Gesetzes vom 20.11.2019 (BGBl. I S. 1626) geändert worden ist, §1 Abs. (4))

Sowohl der gewerbliche als auch der Werkverkehr werden nach Claussen (1979) in Nah- und Fernverkehr unterteilt. Voigt (1973) unterscheidet den Nah- und Fernverkehr zudem hinsichtlich ihres Haupteinsatzgebiets. Der Nahverkehr ist als Sammel- oder Verteilverkehr für den Knotenpunktfernverkehr anzusehen. Zurückzuführen ist dies auf die Wahl unterschiedlicher Verkehrsmittel zur Bedienung von Haus-zu-Haus-Transportleistungen oder der Erbringung weiträumiger Transportleistungen von Knotenpunkt zu Knotenpunkt. Im Nahverkehr werden beispielsweise Verkehrsmittel eingesetzt, die den Raum flächenmäßig besser erschließen (Voigt 1973, S. 41). Der Fernverkehr lässt sich nach Voigt (1973, S. 41) gliedern in: internationaler Verkehr, transkontinentaler Verkehr und Kabotage mit Beteiligung ausländischer Verkehrsunternehmen.

Mannheim (1980) und Sjöstedt (1996), erweitert durch Flämig et al. (2002), betten die Elemente des Verkehrssystems in eine übergeordnete Struktur ein.

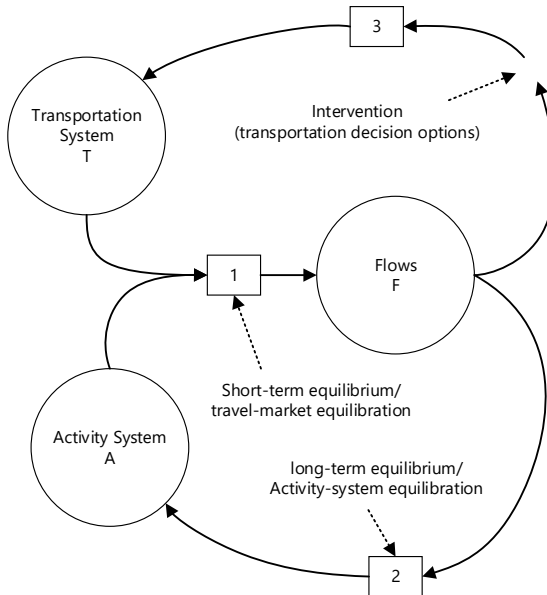
Manheim (1980, S. 11) legt zur Analyse des Verkehrssystems (»Transportation System«) zwei Prämissen zugrunde:

1. Das gesamte Verkehrssystem einer Region wird als einfaches, multimodales System verstanden.
2. Die Betrachtung des Verkehrssystems erfolgt stets unter Einbeziehung der Annahmen des sozialen, ökonomischen und politischen Systems.

Für die Durchführung der Analyse erfolgt daher zum einen die Einbeziehung aller Verkehrsmittel und -träger, der transportierten Güter und Personen, der Infrastruktur und Einrichtungen, der Güter- und Personenflüsse von der Quelle bis zur Senke sowie der Gesamttransport für alle spezifischen Flüsse im System und zum anderen die Berücksichtigung externer Einflüsse aus dem sozialen, ökonomischen und politischen Umfeld (Manheim 1980, S. 12).

Manheim (1980) stellt dar, dass das Verkehrssystem Interaktionen zum sozioökonomischen System aufweist, die in die Analyse des Systems integriert werden müssen. Er definiert drei Basisvariablen: Das Verkehrssystem (»transportation system«), das Aktivitätensystem (»activity system«), das die Struktur des sozialen und ökonomischen Systems abbildet, und die Flüsse im System, welche die Quellen, Senken, Routen, Güter- und

Abbildung 8: Verkehrssystem nach Manheim (1980)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Manheim (1980, S. 13)

Personenvolumina im System darstellen (Manheim 1980, S. 12). Die Abbildung 8 zeigt die Variablen und Interaktionen im System nach Manheim (1980).

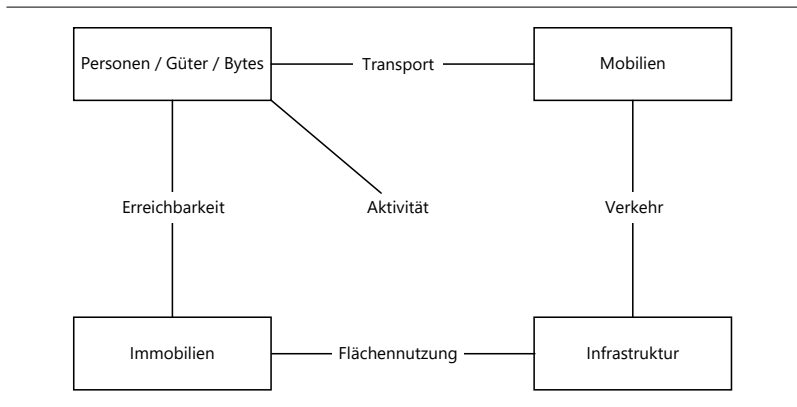
Manheim (1980) stellt die Dynamik im System heraus, indem er die Interaktionen im System definiert. Die Struktur der Flüsse ist durch sowohl das Verkehrssystem als auch das Aktivitätssystem bestimmt. Die Veränderung im Aktivitätssystem über einen Zeitraum ist dabei durch das Angebot und die Nachfrage im Verkehrssystem beeinflusst. Das System wird ebenfalls über die Zeit verändert. Aufgrund von tatsächlichen und angenommenen Flüssen, Entrepreneuren und der Politik werden neue und veränderte Leistungen im System auftreten, die wiederum Auswirkungen auf das gesamte System haben (Manheim 1980, S. 13).

Das Systemmodell nach Sjöstedt (1996), erweitert durch Flämig et al. (2002), (»System model of land use, accessibility, transport, traffic«) ähnelt der Struktur von Knoten und Kanten, wobei die Knoten die Elemente des Systems und die Kanten die Interaktionen zwischen diesen abbilden. Das Grundmodell mit den Elementen und Interaktionen ist in der Abbildung 9 aufgeführt.

Sjöstedt (1996, S. 73f.) legt die Begriffe »Persons, Goods«, »Vehicles, vessels«, »Infrastructure« und »Facilities« für die Elemente sowie »Transport«, »Traffic«, »Land use« und »Accessibility« für die Interaktionen zwischen den Elementen fest. Im Zentrum steht die »Activity« als menschliche Aktivität und Treiber des Systems. Diese ist nach Sjöstedt (1996, S. 74) mit dem Element »Facilities« verknüpft, gilt jedoch nicht direkt als Teil des Systems. Die Einrichtung »Facility« stellt in diesem Modell die Basis für menschliche Aktivität dar.

Flämig et al. (2002) erweitern dieses Modell, indem zum einen die Elemente angepasst sind. Dabei wird dem Element »Persons, Goods« der Begriff »Byte« hinzugefügt, um auch die übermittelten Informationen im System abzubilden. Zusätzlich ist der Begriff »Vehicles, vessels« durch »Movable« ersetzt, der ein breiteres Spektrum an Transportmitteln abdeckt.

Abbildung 9: Systemmodell nach Sjöstedt (1996) erweitert durch Flämig et al. (2002)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Sjöstedt (1996, S. 74) und Flämig et al. (2002)

Zum anderen ist die menschliche Aktivität an das Element »Persons, Goods, Bytes« geknüpft. Die Konsumierenden treiben durch ihr Verhalten das System an. Dies bezieht sich insbesondere auf die Nachfrage, wodurch Aktivitäten, wie Logistikplanung oder Produktdesign, hervorgerufen werden (Flämig et al. 2002).

Die zuvor aufgelisteten Elemente und Interaktionen, die in den unterschiedlichen Systemdefinitionen und -modellen in der Literatur aufgeführt sind, sind in der nachfolgenden Tabelle 6 gegenübergestellt.

Anhand der Literatur wird deutlich, dass sich die verschiedenen Systemmodelle und -definitionen inhaltlich ähneln. Deutliche Parallelen sind in Claussen (1979), Manheim (1980) sowie Sjöstedt (1996) und Flämig et al. (2002) zu finden. Elemente, die in allen Systemmodellen genannt werden, sind Transportmittel/Verkehrsmittel/Mobilien, Transportgüter/transportierte Güter/Güter, Wege und Stationen/Verkehrsträger/Infrastruktur sowie Güterverkehrsbetriebe/Einrichtungen/Immobilien. Diese vier werden im Systemmodell nach Sjöstedt (1996) erweitert durch Flämig et al. (2002) »explizit als Elemente bezeichnet. In Claussen (1979) werden darüber hinaus Akteure wie Behörden, Ministerien und Verbände als Element erwähnt. Manheim (1980) und Pfohl (1985) führen jeweils die Güterflüsse in ihren Systemmodellen auf. Auch im Modell nach Sjöstedt (1996) und Flämig et al. (2002) werden sogenannte Interaktionen beschrieben, die vergleichbar mit den zuvor genannten Flüssen sind, wobei Sjöstedt (1996) und Flämig et al. (2002) diese als »Transport«, »Verkehr«, »Landnutzung« und »Erreichbarkeit« spezifizieren. Ein wichtiges Element in den Modellen ist darüber hinaus der Verkehr, der durch die raumzeitliche Güterformation entsteht und anhand des Güterkraftverkehrs in Fahrzeugkilometern definiert wird.

Pfohl (1985) grenzt sich von den anderen Modellen ausgeprägter ab, da nur die Grundstrukturen des Logistiksystems beschrieben werden. Diese Berücksichtigung der spezifischen Prozesse, die in einem Logistiksystem ablaufen, fehlt in den anderen Modellen. Für eine ganzheitliche Betrachtung des Logistiksystems – wie in der Arbeit verfolgt – sind auch die Logistikprozesse, die das Logistiksystem umfassen, von zentraler Bedeutung und werden in die weitere Bearbeitung mit einbezogen.

Tabelle 6: Elemente, Interaktionen und Umfeld in Systemen anhand der Literatur

Literatur	Elemente	Interaktionen	Umfeld
Claussen (1979) »Güterverkehrssystem«	<ul style="list-style-type: none"> • Güterverkehrsbetriebe • Transportmittel • Transportgüter • Wege und Stationen • Behörden, Ministerien, Verbände, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Transportprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökonomische, soziale, politische, technologische und ökologische Umwelt
Manheim (1980) »Transportation system«	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsmittel • Verkehrsträger • Transportierte Güter und Personen • Infrastruktur und Einrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Güter- und Personenflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> • Interventionen durch tatsächliche und angenommenen Flüsse, Entrepreneurure und Politik
Pfohl (1985) »Logistiksystem«	<ul style="list-style-type: none"> • Quelle und Senke • Auflösung- und Konzentrationspunkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Flüsse 	
Sjøstedt (1996) und Flämig et al. (2002) »System model of land use, accessibility, transport and traffic«	<ul style="list-style-type: none"> • Güter, Personen, Bytes • Mobilität • Infrastruktur • Einrichtungen • Aktivitäten 	<ul style="list-style-type: none"> • Transport • Verkehr • Landnutzung • Erreichbarkeit 	

Quelle: Eigene Zusammenstellung

5.2 Prozessuale Gestaltung des straßengebundenen Logistiksystems

Prozesse des Logistiksystems sind bereits umfangreich in Normen des Deutsches Institut für Normung (DIN) definiert, um diese besser zu verstehen bzw. diese den einzelnen Teilsystemen des Logistiksystems zuzuordnen.

Nach der DIN 30781 Teil 1 wird Logistik als »die Planung, Steuerung und Überwachung aller Vorgänge in der Transportkette« (DIN 30 781 Teil 1, S. 2) verstanden. Logistik nimmt damit eine dem Transport übergeordnete Funktion ein. »Der Transport ist die Ortsveränderung von Personen und/oder Gütern mit manuellen oder technischen Mitteln.« (DIN 30 781 Teil 1, S. 3) Die »Folge von technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden« (DIN 30 781 Teil 1, S. 3), wird als Transportkette bezeichnet. Die DIN 30781 Teil 1 benennt »Transport«, »Umschlag« und »Lagern« als Vorgänge in der Transportkette.

Logistische Prozesse definiert Isermann (1998) wie folgt: »Logistische Prozesse verändern stets die zeitlichen und gegebenenfalls darüber hinaus die räumlichen und/oder art- und mengenmäßigen Merkmale von Logistikobjekten oder logistischen Einheiten.« (Isermann 1998, S. 26) Im physischen Bereich umfasst dies die »TUL-Prozesse«, also Transport, Umschlag, Lagerung. Transportieren bezieht sich nach Isermann (1998, S. 26) auf die außerbetriebliche Ortsveränderung wohingegen die innerbetriebliche Ortveränderung als »Fördern« bezeichnet wird. Als Umschlag wird der Wechsel des Logistikobjekts oder der logistischen Einheit von Fahrzeug zu Fahrzeug oder von Fahrzeug zu Umschlagspunkt und umgekehrt beschrieben. Die Umschlag- und Transportprozesse, die der Ortsveränderungen dienen, werden dem Begriff »Befördern« zugeordnet. Auch anfallende Lagerungsprozesse werden hierbei miteingeschlossen. Die Lagerung dient primär der zeitlichen Verfügbarkeit bzw. Überbrückung des Bedarfs von Objekten und Einheiten. Weitere logistische Prozesse sind das Sammeln, das Sortieren, das Kommissionieren sowie informatorische Prozesse, wie Speichern, Konvertieren, Übertragen, Weiterverarbeiten oder Ausgeben (Isermann 1998, S. 26). Isermann

formuliert eine logistische Prozesskette als »[...] eine Folge zusammenhängender elementarer logistischer Leistungsprozesse. Jeder logistische Leistungsprozeß [sic!] bewirkt eine Zustandsänderung der Systemelemente über die Zeit« (Isermann 1998, S. 48).

Es wird deutlich, dass es zur Erfassung des gesamten straßengebundenen Logistiksystems erforderlich ist, nicht nur den Teilprozess des Transports zu berücksichtigen, sondern auch vor- und nachgelagerte Prozesse in die Betrachtung zu integrieren, damit eine ganzheitliche Abbildung des Systems erfolgen kann.

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert Logistikprozesse für unterschiedliche Abteilungen. So beinhalten beispielsweise die Richtlinien VDI 4400 Blatt 1, VDI 4400 Blatt 3, VDI 4490 und VDI 4405 die Prozesse des Wareneingangs und -ausgangs. Auch Lagerungs- und Kommissionierungsprozesse werden in den Richtlinien erwähnt. Die genannten Richtlinien fokussieren aber auch auf die innerbetrieblichen Logistikprozesse im Straßengüterverkehr:

- In den VDI-Richtlinien 4400 Blatt 1 und 3 werden Prozesse aus der Stückgüterbeschaffung und -distribution abgebildet.
- Die VDI-Richtlinie 4490 betrachtet die innerbetriebliche Logistik in Lager- und Distributionszentren zwischen Wareneingang und -ausgang.
- Die VDI-Richtlinie 4405 benennt die Prozesse einer Montagebelieferung eines fahrzeugherstellenden Unternehmens. Es werden Prozesse aus dem Wareneingang sowie Prozesse aus dem Warenausgang für Leergut aufgeführt. Folgende Prozessbeschreibung findet sich dort: Nach Eintreffen des Fahrzeugs am Unternehmensstandort werden die Güter im Wareneingang angeliefert, entladen, identifiziert und auf ihre Qualität überprüft. Dies erfolgt per Abgleich mit dem Versandpapieren. Die VDI-Richtlinien 4400 Blatt 1, 4490 und 4405 stellen diese Prozesse in unterschiedlichem Detaillierungsgrad dar.
- Die Warenausgangsprozesse sind nur in den Richtlinien 4400 Blatt 3 und 4405 aufgelistet. Diese umfassen die Transportplanung, die Verpackung und die Verladung der Ware sowie die Erstellung der Versandpapiere.

- Die VDI-Richtlinien 4400 Blatt 1 und 3 beinhalten die Prozesse des Lagers und der Kommissionierung, die sowohl die Einlagerung der Ware als auch die Auslagerung dieser sowie die Verbuchung beider Prozesse. Dazwischen kann zusätzlich eine Vorkommissionierung und kundenauftragsbezogene Kommissionierung erfolgen.

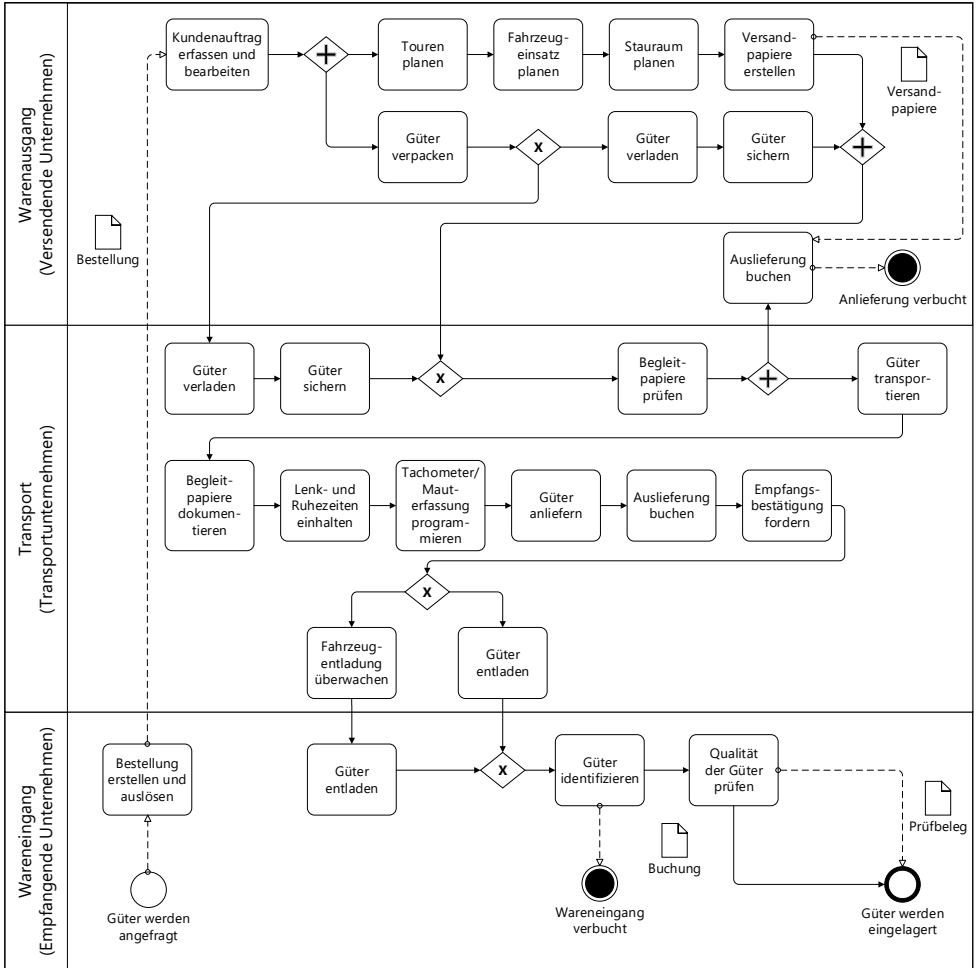
Eine detaillierte Betrachtung der Logistikkette ergibt sich durch die Verknüpfung aufgeführter Logistikprozesse des Warenausgangs, Transports und Wareneingangs. Die Darstellung der Prozesse in Form von standardisierten Ketten mittels Business Process Modelling Notation (BPMN)⁴ bietet die Möglichkeit, die Prozesse zu Bereichen bzw. Akteuren zuzuordnen sowie die Verknüpfung zwischen den Prozessen aufzuzeigen. Eine generische Darstellung der logistischen Prozesse mit direktem Güterfluss ist der Abbildung 10 zu entnehmen.

Die Abbildung 10 zeigt, dass der Ausgangspunkt der Logistikkette in der Erstellung und Auslösung einer Bestellung durch das empfangende Unternehmen liegt. Dieses sendet eine Bestellung an das versendende Unternehmen. Das versendende Unternehmen erfasst den Auftrag und bearbeitet diesen. Dafür werden die Touren, der Fahrzeugeinsatz und der Stauraum geplant sowie die Versandpapiere erstellt. Gleichzeitig werden die angefragten Güter verpackt. Die Verladung und Transportsicherung kann im Anschluss entweder durch das versendende Unternehmen oder durch das Transportunternehmen erfolgen. Anschließend werden die Begleitpapiere durch das Transportunternehmen geprüft und die Auslieferung durch das versendende Unternehmen verbucht. Die Güter werden daraufhin durch das Transportunternehmen befördert.

Die Güter werden nach Abschluss des Transportprozesses beim empfangenden Unternehmen im Wareneingang angeliefert. Hier werden die Güter entweder durch das Transport- oder das versendende

4 BPMN ist ein Standard für die Darstellung von graphischen Geschäftsprozessen mithilfe von einheitlich festgelegten Symbolen und Elementen (Object Management Group (OMG) 2021). Die Erläuterung der Symbole ist in Anhang A zu finden.

Abbildung 10: Einstufige Logistikkette



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 4400 Blatt 1, VDI 4400 Blatt 3, VDI 4490 und VDI 4405 und Flämig et al. (2020, S. 17ff.)

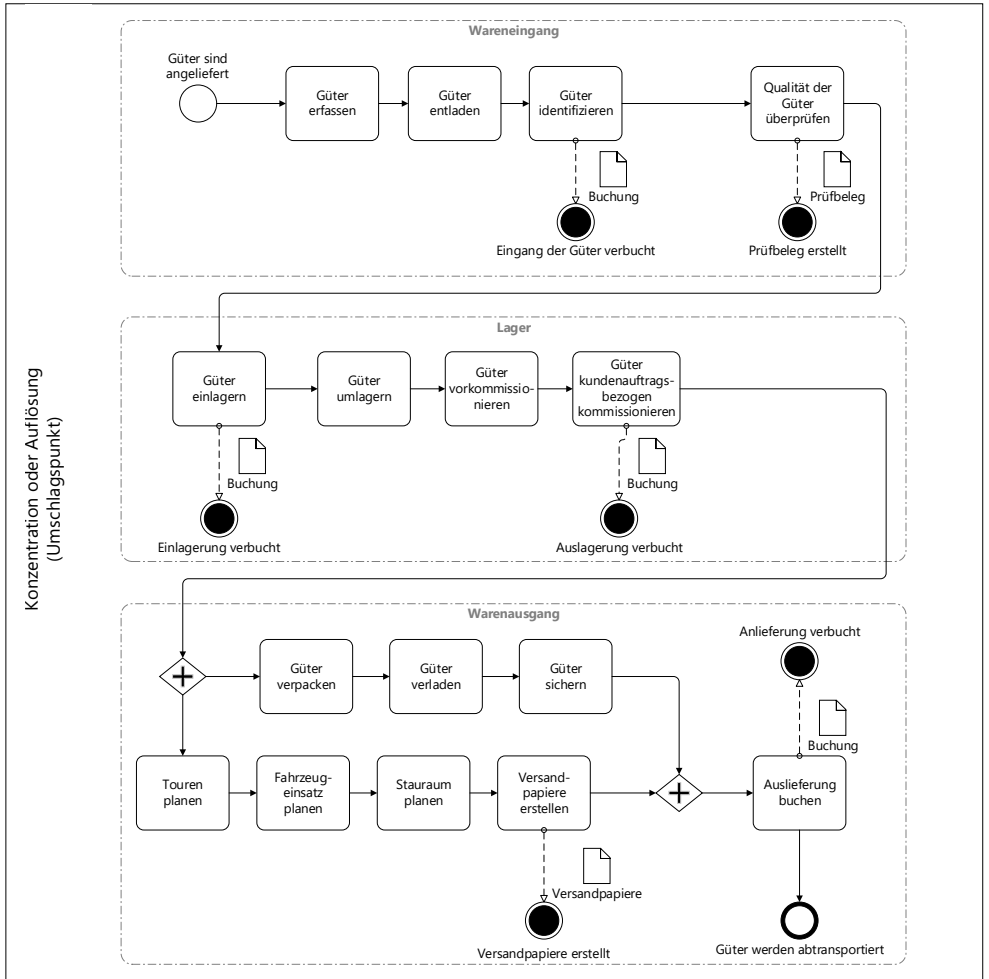
Unternehmen entladen. Ist letzteres der Fall, überwacht das Personal des Transportunternehmens lediglich den Entladungsprozess. Im Anschluss werden die Güter identifiziert und verbucht. Des Weiteren wird die Qualität der Güter geprüft und zur Einlagerung weitergeleitet. Die Bestätigung des Vorgangs wird durch einen Prüfbeleg festgehalten.

Eine mehrstufige Logistikkette hat zwischen versendenden und empfangenden Unternehmen ein oder mehrere Umschlagspunkte, also einen oder mehrere Konzentrations- oder Auflösungspunkte. Auch bei einer mehrstufigen Logistikkette werden die Güter wie bei der einstufigen Logistikkette im Wareneingang erfasst, entladen und identifiziert sowie ihre Qualität überprüft. Im Umschlagslager werden die Güter zunächst eingelagert und/oder umgelagert. Danach werden diese zunächst vor-kommissioniert und anschließend kundenauftragsbezogen kommissioniert. Im Anschluss werden die Güter im Warenausgang wieder verpackt, verladen und gesichert. Gleichzeitig erfolgt die Planung des Transports bevor die Güter zum nächsten Umschlagspunkt oder zum empfangenden Unternehmen befördert werden. Die detaillierte Darstellung der Prozesse im Umschlagspunkt ist der Abbildung 11 zu entnehmen.

Wie in der prozessualen Darstellung deutlich wird, gibt es mehrere beteiligte Akteure im Logistiksystem. Fleischmann (2008) differenziert hinsichtlich verladenden, dienstleistenden und empfangenden Unternehmen in Transportsystemen, wobei Industrie- und Handelsunternehmen sowohl Quelle als auch Senke der Logistikkette sein können (Fleischmann 2008, S. 12f.).

Sjöstedt und Franzén (2009, S. 5) ordnen den Elementen und Interaktionen des Systemmodells nach Sjöstedt (1996) verschiedene Akteure zu. »Supply Chain Manager« sind zuständig für das Element der Güter, »Transportation Manager« wirken auf das Element »Fahrzeuge« ein. Das Element der Infrastruktur wird durch »Traffic Manager« und das Element »Facilities« durch »Logistics Manager« verantwortet. Darüber hinaus wirken auf die Interaktionen zwischen den Elementen die Perspektive der Speditionen und Transportunternehmen (»Transport«), der Berufskraftfahrenden (»Traffic«), der Stadtplanenden und privaten Investierenden (»Location«) sowie die Handels- und Industrieunternehmen (»Business demand«) ein. Die Abbildung 12 zeigt die relevanten Akteure des Transportsystems.

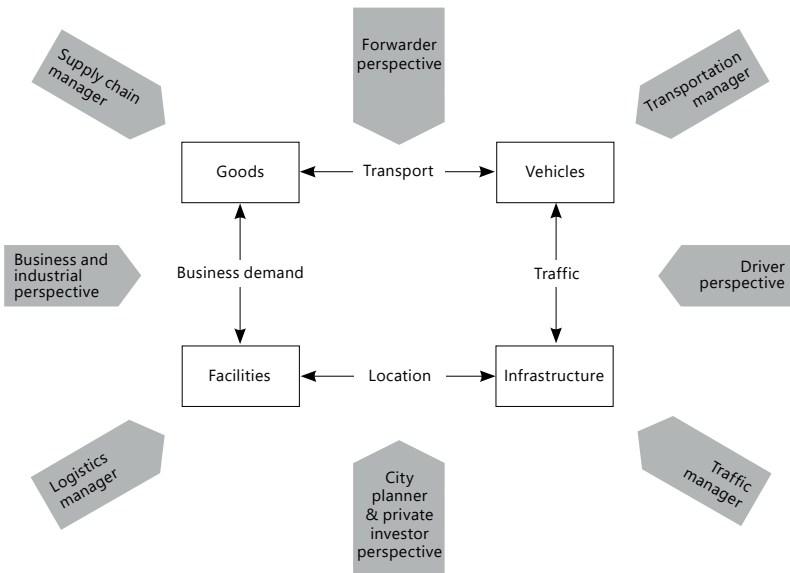
Abbildung 11: Prozesse im Umschlagpunkt



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 4400 Blatt 1 und VDI 4400 Blatt 3

Ebel (2013, S. 126) unterscheidet für die Verkehrslogistik in die drei Akteure »Versender bzw. Verlader, Transportdienstleister und Empfänger«. Versendende Unternehmen sind für die Verladung der Ware zuständig und stellen die Quelle des Transportprozesses dar. Die Begriffe »versendendes Unternehmen« und »verladendes Unternehmen« werden synonym verwendet, da beide Unternehmen die Verladung der Güter verantworten (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 2022). Als transportdienstleistende Unternehmen definiert Ebel (2013) all diejenigen, die für die Planung und den Transport der Ware verantwortlich sind. Dazu gehören unter anderem Speditionen oder Frachtführende. Die empfangenden Unternehmen sind die Senke des Transportprozesses, wie Endkonsumierende, Produktions- oder Handelsunternehmen (Ebel 2013, S. 126f.).

Abbildung 12: Akteure des Transportsystems



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Sjöstedt und Franzén (2009, S. 5)

Auf Grundlage der vorangegangenen Erläuterungen werden in dieser Arbeit die folgenden drei Akteure unterschieden:

1. Dienstleistende Unternehmen
2. Transportunternehmen
3. Versendende und empfangende Unternehmen

Dienstleistende Unternehmen sind in dieser Arbeit definiert als all diejenigen Unternehmen, die die Planung und Organisation von Transporten übernehmen; in der Regel aber externe Transportunternehmen mit der Durchführung der Transporte beauftragen.

Transportunternehmen, Speditionen oder Frachtführende, aber auch Unternehmen im Selbsteintritt (Werkverkehr) sind für die Beförderung von Gütern verantwortlich und verfügen über einen eigenen Fuhrpark. Diese werden unter dem Begriff der Transportunternehmen zusammengefasst.

Versendende bzw. verladende und empfangende Unternehmen werden ebenfalls in einer Kategorie zusammengefasst, da an diesen Standorten entweder die Güter empfangen oder versendet werden. Insgesamt weisen diese Unternehmen aber ähnliche strukturelle Rahmenbedingungen auf.

Ebel (2013) nennt zudem als weitere Akteure »Fahrzeughersteller, IT-Dienstleister, Baufirmen, legislative, exekutive und judikative Staatsorgane sowie Presse und Öffentlichkeit« (Ebel 2013, S. 127). Darüber hinaus verdeutlichen sowohl Sjöstedt (1996) als auch Manheim (1980), dass Verkehrs- und Logistiksysteme durch die Konsumierenden aktiviert werden. Die Konsumierenden stellen den Treiber der Systeme dar. Gleichzeitig werden die Systeme durch externe Einflüsse, wie rahmengebende Instanzen beeinflusst. Aus diesem Grund werden für diese Arbeit zwei weitere Akteure abgeleitet, die im Güter- und Logistiksystem eine zentrale Rolle innehaben:

4. Öffentlichkeit
5. Politik

Der vierte Akteur – die Öffentlichkeit – umfasst zum einen Konsumierende und zum anderen Verkehrsteilnehmende. Diese sind ausschlaggebend für die Akzeptanz von Fahrzeugsystemen oder Technologien.

Die Politik stellt den fünften Akteur dar, die als legislative, exekutive und judikative Instanz im Logistiksystem berücksichtigt wird.

Basierend auf der prozessualen Gestaltung des Logistiksystems werden neben den bereits aufgeführten Elementen des Systemmodells – Güter, Mobilien, Infrastruktur, Einrichtungen – sowie den dazwischenliegenden Flüssen – Prozesse des Transports, des Umschlags, der Lagerung sowie der vor- und nachgelagerten Prozesse (Wareneingang und Warenausgang) – auch die beteiligten Akteure in die Betrachtung des straßengebundenen Logistiksystems hinzugezogen.

5.3 Arbeitsdefinition des straßengebundenen Logistiksystems

Die vorangestellte Diskussion der Definitionen von Elementen und Prozessen des Güter- und Logistiksystems verdeutlicht, dass zur Beschreibung des Systems zur raumzeitlichen Gütertransformation in der Literatur unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet werden, wie Logistiksystem, Güterflusssystem, Standardfrachtketten oder Güterverkehrssystem. Grundsätzlich umfassen alle Definitionen ähnliche Charakteristika. In dieser Arbeit umfasst das Logistiksystem, basierend auf der Definition nach Pfohl (2010) und der prozessualen Gestaltung der Logistikkette, die Elemente zur Planung, Steuerung und Durchführung von Prozessen zur raumzeitlichen Gütertransformation.

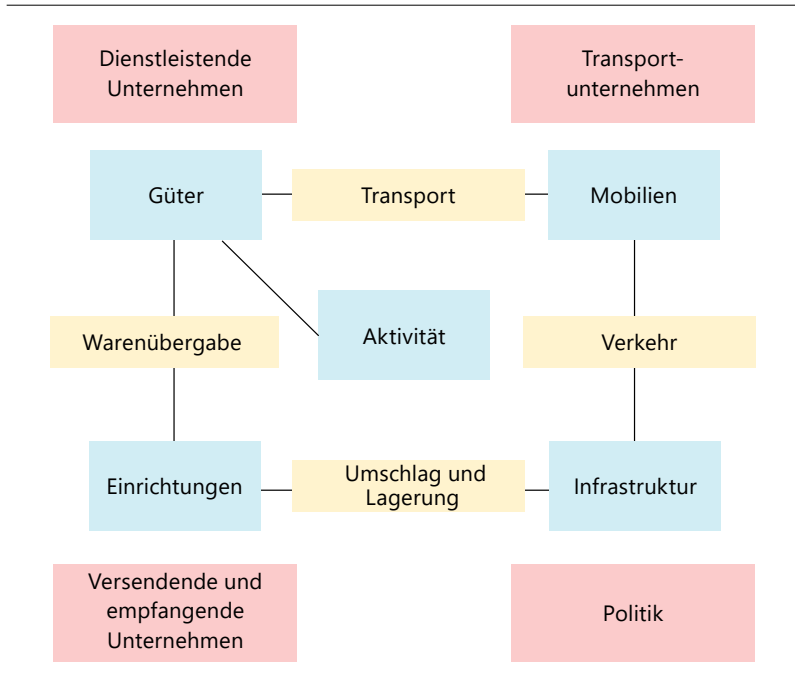
Für die weitere Forschungsarbeit wurde daher eine geeignete Systemabgrenzung vorgenommen und auf der Basis der Literaturanalyse eine eigene Definition des straßengebundenen Logistiksystems vorgenommen. Mit der Aufstellung des Logistiksystems und der Identifizierung seiner Elemente kann die erste Forschungsfrage (*Anhand welcher Elemente lässt sich das straßengebundene Logistiksystem beschreiben?*) beantwortet werden:

Räumlich umfasst das System die logistischen Standorte sowie die Straßeninfrastruktur der Bundesrepublik Deutschland, die für die Prozesse der raumzeitlichen Gütertransformationen genutzt werden.

Die Abbildung 13 zeigt die Struktur des Logistiksystems mit den für diese Arbeit relevanten Komponenten. In blauer Farbe sind die Elemente, in gelber Farbe die Prozesse des straßengebundenen Logistiksystems und in roter Farbe die beteiligten Akteure hinterlegt.

Die operative raumzeitliche Gütertransformation wird von den dienstleistenden Unternehmen geplant und gesteuert. Mithilfe von Mobilien werden die Güter von einem Ort zu einem anderen durch die Transportunternehmen transportiert. Dabei entsteht aufgrund der Fahrzeuge auf der Infrastruktur Verkehr. Der Güterverkehr ist der physische Prozess, der deutliche Wechselwirkungen zum Systemumfeld aufweist, beispielsweise durch verkehrsbedingte Emissionen. Der Verkehr unterliegt durch Infrastruktur-, Raum- und Verkehrsplanung in seiner Ausgestaltung bestimmten Restriktionen. Als rahmengebende Instanz ist hierbei die Politik als Akteur von Relevanz. Die Einrichtungen bezeichnen Standorte von Unternehmen der versendenden und empfangenden Betriebe im Logistiksystem bzw. von Privatkunden. Diese sind über die Prozesse des Umschlags und der Lagerung mit der Infrastruktur verbunden, an die auch die infrastrukturellen Knoten der Transportkette, wie Häfen, Bahnterminals, Flughäfen oder Depots, angebunden sind. Die Erreichbarkeit der Einrichtungen wird durch den Wareneingang und den Warenausgang – die Warenübergabe – abgebildet.

Abbildung 13: Struktur des betrachteten Logistiksystems mit seinen Elementen, Prozessen und Akteuren



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Sjöstedt (1996), Flämig et al. (2002) und Sjöstedt und Franzén (2009, S. 5)

6 Wortmodell des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

Aufbauend auf dem zuvor entwickelten konzeptionellen Modell des Logistiksystems wird ein dreistufiger Modellansatz bestehend aus Wortmodell, Zukunftsmodell und Gestaltungsmodell verfolgt. Zunächst wird ein Wortmodell des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystems in Abschnitt 6.1 entwickelt. Dieses wird dazu verwendet, um einen Rahmen für die Untersuchung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu schaffen. Aufbauend auf diesem Systembild sowie der vorangegangenen Literaturanalyse in Kapitel 3 erfolgt die Ableitung eines Variablensatzes in Abschnitt 6.2 und dessen Validierung in Abschnitt 6.3.

6.1 Die Welt des fahrerlosen Fahrens

Im Vorgehen nach Vester (1990) wird zu Beginn ein Systembild erstellt. Das Systembild dieser Arbeit basiert auf Szenarien nach Flämig et al. (2020). Flämig et al. (2020, S. 87ff.) stellen drei mögliche Szenarien eines automatisierten bis fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr sowie deren Veränderungen auf. Diese wurden für die Erstellung des Systembilds um eigene Gedanken anhand der bestehenden Literatur (siehe auch Flämig 2015; Engholm et al. 2020; Pernestål et al. 2020) ergänzt. Folgendes Systembild einer Welt des fahrerlosen Fahrens im straßengebundenen Logistiksystem liegt dieser Arbeit zugrunde:

Auf der Warenausgangsfläche des versendenden Unternehmens stehen Paletten mit Gütern bereit. An der Rampe dockt ein selbstfahrendes Fahrzeug an. Die Türen der Ladefläche des Fahrzeugs öffnen sich automatisch und gleichzeitig beginnt sich eine Warenausgangsfläche mit Paletten auf das Fahrzeug zuzubewegen. Die Warenausgangsfläche wird vollständig in die Ladefläche des Fahrzeugs geschoben. Dabei passen die Maße der Paletten exakt mit der beweglichen Warenausgangsfläche und den Maßen der Ladefläche des Fahrzeugs überein. Die Türen des Fahrzeugs schließen sich automatisch, sobald die Ladefläche ihren Zielort erreicht hat. Die Paletten in der Ladefläche können sich nicht mehr bewegen. Personal des versendenden Unternehmens überwacht diesen Prozess und greift bei Störungen ein.

Das selbstfahrende Fahrzeug besteht aus einer Ladefläche auf einer Plattform mit Rädern. Im vorderen Teil des Fahrzeugs befindet sich eine Rechneinheit. Das selbstfahrende Fahrzeug verfügt zudem über unterschiedliche Sensoren und Vernetzungstechnologien.

Mithilfe der Technologie werden Daten gesammelt und an eine technische Aufsicht gesendet. Diese ist entweder bei einem dienstleistenden Unternehmen oder bei einem Transportunternehmen verortet. Die technische Aufsicht überwacht auf mehreren Bildschirmen die Fahrzeuge und bietet Entscheidungsvorlagen, wenn das Fahrzeugsystem eine Störungsmeldung übermittelt. Während des Transports wird zum einen der Zustand der Fracht und zum anderen alle Umgebungsbedingungen überwacht.

Das selbstfahrende Fahrzeug, das während der Verladung über eine automatisierte Ladeinfrastruktur mit Strom versorgt wurde, dockt von der Rampe ab und beginnt seine Fahrt zum empfangenden Unternehmen. Das Fahrzeug fährt vom versendenden Unternehmen, das sein Lager an einer Landstraße hat, über die Bundesstraße zur Autobahn. Auf der Autobahn angekommen, reiht sich das Fahrzeuge in eine Schlange, einen Platoon, anderer selbstfahrender Fahrzeuge ein. Mit dem durch das Platoon möglichen verringertem Sicherheitsabstand bewegt sich der Platoon aus selbstfahrenden Fahrzeugen über die Autobahn und reißt jeweils ab, wenn ein Fahrzeug die Autobahn verlässt. Hierbei halten sich die Fahrzeuge auf der linken Spur auf, die extra für fahrerlose Fahrzeuge eingerichtet wurde. Verkehrsregeln werden dabei eingehalten. Ein Überholen der anderen fahrerlosen Fahrzeuge im Platoon ist nicht möglich, da alle Fahrzeuge mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fahren; außer bei Ein- und Ausfahrten werden die Geschwindigkeiten angepasst. Die Strecke vom Start bis zum Ziel des Transports kann ohne Pausen zurückgelegt werden.

Dem empfangenden Unternehmen wird der exakte Standort des Fahrzeugs in einem Transportmanagementsystem angezeigt, das zum Beispiel durch ein dienstleistendes Unternehmen verwaltet wird. Die Ankunftszeit wurde zuvor berechnet und passt sich echtzeitgenau an Störungen im Betriebsablauf an. Wartezeiten für das empfangende Unternehmen sollen dadurch entfallen.

Zur angegebenen Ankunftszeit trifft das selbstfahrende Fahrzeug im Lager des empfangenden Unternehmens ein. Dort öffnen sich die Türen der Ladefläche automatisch und die Plattform mit den Paletten fährt automatisch aus dem Fahrzeug. Die Plattformen und die Paletten sind Teil eines Pfandsystems, sodass diese standardisierte Maße haben und von allen beteiligten Akteuren genutzt werden können.

6.2 Ableitung der Variablen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

Die zuvor dargestellte Welt beschreibt ein Logistiksystem mit fahrerlosen Straßengüterfahrzeugen in der Zukunft. Um die sich durch das fahrerlose Fahren ergebenden Veränderungen im Logistiksystem zu spezifizieren, wird das Sensitivitätsmodell nach Vester (1990) genutzt. Das Vorgehen zur Ermittlung der Wirkungen nach Vester (1990), bei dem mithilfe eines Expertengremiums ein Variablensatz entwickelt wird, der die Elemente des Forschungsgegenstands umfasst, wird in dieser Arbeit abgewandelt. Zur Erstellung des Variablensatzes wurde ein Workshop mit Forschenden durchgeführt und zusätzlich die bestehende Literatur herangezogen. Damit werden soweit möglich wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse genutzt, um ein ganzheitliches Bild der Variablen im Logistiksystem zu erzeugen.

Zur Ermittlung der Variablen wird auf die im Abschnitt 3.3 ausgewählte Literatur zurückgegriffen. Die Abbildung 14 gibt eine Übersicht über die identifizierten Variablen, die im Folgenden näher erläutert werden.

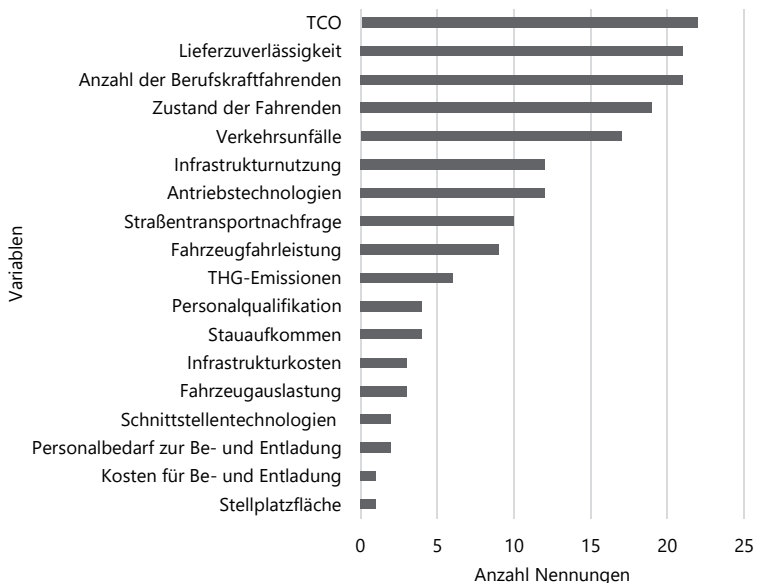
Die in der Literaturanalyse ermittelten 53 nichttechnischen Aspekte konnten zu Variablen in Bezug auf die Anzahl der Berufskraftfahrenden, die Lieferzuverlässigkeit, die Gesundheit der Fahrenden, die Total Cost of Ownership (TCO), die Verkehrsunfälle, die Infrastrukturnutzung, die Antriebstechnologie, die Straßentransportnachfrage, die Treibhausgas (THG)-Emissionen, die Fahrzeugfahrleistung, die Qualifikation des Lagerpersonals, die Fahrzeugauslastung, das Stauaufkommen, die Infrastrukturkosten, das Lagerpersonal zur Be- und Entladung, die Schnittstellentechnologien, den Parkplatzbedarf und die Kosten für die

Warenübergabe aggregiert werden. Die Zuordnung der nichttechnischen Aspekte aus der Literatur zu Variablen ist in Anhang B zu finden und basiert auf einer eigenen Zusammenstellung.

Für eine Strukturierung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden im Weiteren die Perspektiven der verschiedenen Akteure (siehe Abschnitt 5.3) genutzt, die im straßengebundenen Logistiksystem ermittelt wurden. Es ergibt sich für die Betrachtung der Wirkungen ein System mit vier Subsystemen: Logistikleistung, Transport, Warenübergabe und Verkehrsleistung.

Veränderungen im Subsystem Logistikleistung betreffen die dienstleistenden Unternehmen. Da im Mittelpunkt dieser Arbeit die Prozesse des fahrerlosen Transports stehen, werden der Prozess »Lagerung«

Abbildung 14: Variablen anhand der ausgewählten Literatur



Quelle: Eigene Zusammenstellung

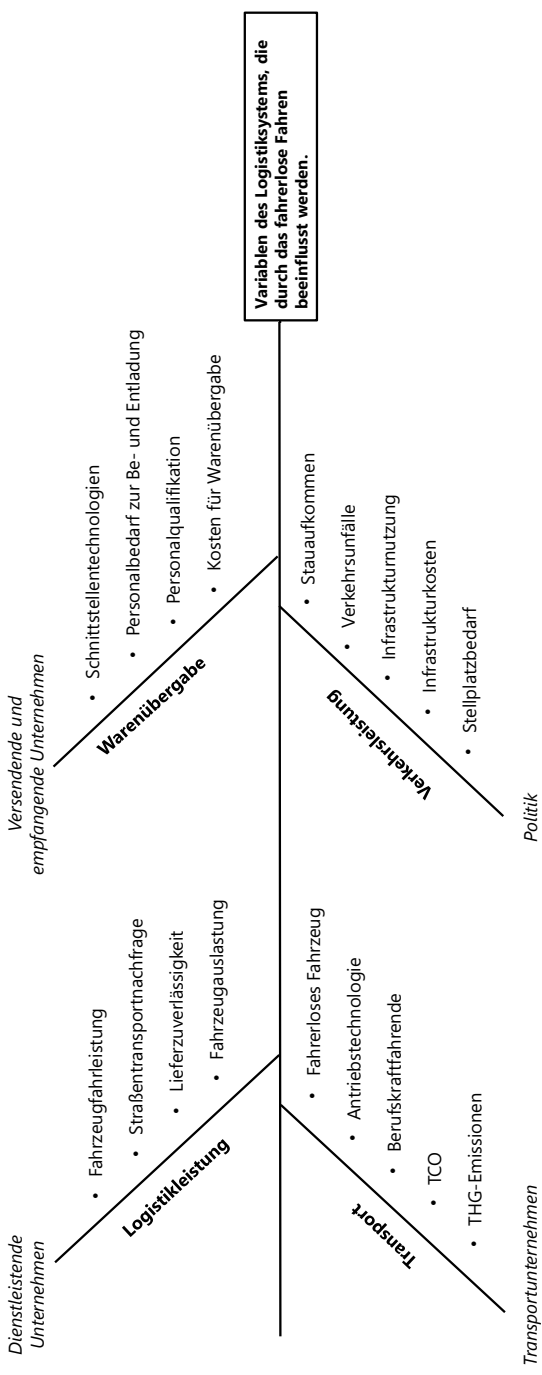
nicht und der Prozess »Umschlag« teilweise berücksichtigt. Obwohl die meisten Fahrenden nicht dazu verpflichtet sind, übernehmen sie häufig den Umschlag im Warenausgang des versendenden Unternehmens bzw. im Wareneingang des empfangenden Unternehmens (Bundesamt für Güterverkehr 2018, S. 2). Der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit umfasst daher auch den Teilprozess der Warenübergabe. Die versendenden und empfangenden Unternehmen werden durch die Veränderungen in der Warenübergabe beeinflusst. Die Veränderungen im Subsystem Transport wirken sich auf die Transportunternehmen aus und die Veränderungen im Subsystem Verkehrsleistung betreffen die Politik.

Es erfolgt zudem bei der Ableitung der Variablen keine Inklusion der Wirkungen auf die Fahrenden, wie z. B. die Gesundheit, da es sich um die Untersuchung des fahrerlosen Fahrens handelt. Es wird allerdings die Anzahl an Berufskraftfahrenden in die Betrachtung integriert.

Zu den Prozessen »Transport« und »Warenübergabe« (vergleiche Abschnitt 5.3) wird die Logistikleistung als weiteres Subsystem hinzugezogen, um die Leistungskomponenten aus Sicht der dienstleistenden Unternehmen im Logistiksystem abzubilden. Der Prozess »Verkehr« wird unter dem Subsystem »Verkehrsleistung« gebündelt. Hier sind als Pendant zur Logistikleistung die Leistungskomponenten aus Sicht des Verkehrs enthalten. Das Subsystem »Logistikleistung« umfasst damit die Inputgrößen des Logistiksystems während das Subsystem »Verkehrsleistung« die relevanten Outputgrößen beinhaltet.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Variablen, wie in Abbildung 15 mithilfe eines Ishikawa-Diagramms visualisiert, in den jeweiligen Subsystemen sowie ihre Bedeutung und Indikatoren näher beschrieben.

Abbildung 15: Zuordnung der Variablen zu den Subsystemen des Logistiksystems



Quelle: Eigene Darstellung

Logistikleistung

Im Systemmodell nach Sjöstedt (1996) und Flämig et al. (2002) steht die »menschliche Aktivität«, die Nachfrage nach Gütern, im Zentrum des Systems und gilt als Systemtreiber. Gleiches wird im Transportsystem nach Manheim (1980) mit dem Aktivitätensystem abgebildet. In dieser Arbeit wird das System durch die Straßentransportnachfrage aktiviert. Bei der Straßentransportnachfrage handelt es sich um die nachgefragte Menge an Gütern in Tonnen (t) pro Jahr, das sogenannte Transportaufkommen.

Die Leistung des Logistiksystems wird mit der Fahrzeugfahrleistung in Fahrzeugkilometern (Fzkm) pro Jahr gemessen. Sie wird durch die Nachfrage nach Straßengütertransporten aktiviert. Die Fahrzeugfahrleistung wird in dieser Arbeit den dienstleistenden Unternehmen zugeordnet, da diese den Logistikprozess planen und steuern. Sie sind folglich verantwortlich, welche Touren das Fahrzeug zurücklegen wird.

Die Liefertreue ist neben der Lieferflexibilität, Lieferqualität und Lieferzeit ein Bestandteil des Lieferservices. Die Liefertreue wird als »[...] ein Maß für die Einhaltung der mit dem Kunden vereinbarten Lieferzeit, z. B. ausgedrückt als Anteil verspäteter Lieferungen oder durchschnittliche Verspätung« definiert (Fleischmann 2008, S. 8). Sie bildet den Anteil an einwandfreien Lieferungen an den insgesamt getätigten Lieferungen (Fleischmann 2008, S. 8). Als relevante Messgröße für die Qualität des Gütertransports wird die Liefertreue im Weiteren in Prozent pro Jahr an den insgesamt durchgeführten Transporten festgelegt.

Ein Ziel der dienstleistenden Unternehmen ist es, die Effizienz des Transports zu steigern, in dem die Auslastung der Fahrzeuge möglichst vollständig maximiert wird. Der Auslastungsgrad der Beförderungsleistung in Tonnenkilometern (tkm) kann beispielsweise als Verhältnis von tatsächlicher zu möglicher Beförderungsleistung in % pro Jahr angegeben werden.

Warenübergabe

Orte, die als Basis für menschliche Aktivitäten oder als Standort von diesen genutzt werden, sind nach Sjöstedt (1996) »Facilities« und erweitert durch Flämig et al. (2002) »Immobilien«. Sjöstedt (1996) hält dabei fest, dass die Adresse der Immobilie zwar zur Infrastruktur gehört, der Eingang allerdings den Übergang von der Infrastruktur zur Immobilie markiert (Sjöstedt 1996, S. 74). Das Element »Immobilien« besteht aus den Logistikbetrieben und -immobilien, wie z. B. Standorten der versendenden und empfangenden Unternehmen. Überregionale Distributionszentren und Hubs als Immobilien dienen der Konzentration oder der Auflösung zur Verteilung von große Warenströmen. Lagerhallen gelten ebenfalls als Logistikimmobilien.

Im Logistiksystem gilt es, die Erreichbarkeit dieser Immobilien zu gewährleisten. Als Erreichbarkeit (»Accessibility«) wird im Modell nach Sjöstedt (1996) die Fähigkeit eines Gutes verstanden, von einer Adresse A zu einer Adresse B zu wechseln (Sjöstedt 1996, S. 73). Darunter fallen auch die Prozesse der Warenübergabe (vergleiche Abbildung 10). Dabei sind die Immobilien zunehmend mit neuen Automatisierungstechnologien ausgestattet, sodass der Anteil an Schnittstellentechnologien, die zur Warenübergabe eingesetzt werden, von hoher Relevanz ist. Der Einsatz von Schnittstellentechnologien wird in dieser Arbeit als der Anteil an Automatisierungstechnologien in der Warenübergabe (in % pro Jahr) angegeben.

Zum aktuellen Zeitpunkt führt in der Regel Personal die Warenübergabe aus. Der Personalbedarf, der für die Warenübergabe erforderlich ist, wird in der Anzahl des Lagerpersonals pro Jahr festgelegt. Hierbei ist auch die Qualifikation des Lagerpersonals zu berücksichtigen. Diese kann durch die Anzahl der Erwerbstätigen in Berufen mit Führungsaufgaben in der Logistikbranche im Verhältnis zu Erwerbstätigen im Waren- und Güterumschlag pro Jahr gemessen werden.

Für die Bewertung der Prozesse in der Warenübergabe spielen die verursachten Kosten eine wesentliche Rolle. Die Kosten für die Warenübergabe umfassen die Summe der Kosten für das Personal zur Be- und Entladung, die Umrüstungskosten zur Abfertigung der fahrerlosen Fahrzeuge, die Technologiekosten durch Schnittstellentechnologien in der Immobilie und ggf. die Kosten für Ladeinfrastruktur in Euro pro Jahr.

Transport

Die Ortsveränderung von Personen und Gütern wird nach Sjöstedt (1996) als Transport bezeichnet. Ähnlich dazu beschreibt Ihde (2001) Transport als »Vorgänge, die die Raumkoordinaten von Güter[n] verändern. Transportleistungen sind dementsprechend Ortsveränderungen von Gütern« (Ihde 2001, S. 4). Die Ortsveränderung der Güter soll dabei einen bestimmten Zweck erfüllen, der mit einer Kosten- und Nutzenwirksamkeit verbunden ist und daher bestimmten Anforderungen unterliegt. Planungs- und Leistungsgrößen von Transportprozessen sind: »Transportmittel, Transporthilfsmittel, Transportkapazitäten, Transportwege, -weiten, -geschwindigkeiten und -zeiten« (Ihde 2001, S. 5). Transport ist daher von der Nachfrage der zu transportierenden Güter und dem Angebot passender Transportmittel zur Beförderung bestimmt, wie auch in Manheim (1980) beschrieben.

Der Transport der Güter erfolgt mit einem Nutzfahrzeug. Hierzu zählen sowohl nicht-motorisierte Fahrzeuge wie Sackkarren oder (Lasten-)Fahrräder als auch motorisierte Fahrzeuge wie Lastkraftwagen. Fahrzeuge mit mindestens vier Rädern werden in der Regel nach ihrer zulässigen Gesamtmasse unterschieden. Die Anlage XXIX (zu § 20 Absatz 3a Satz 4) der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) definiert die Nutzfahrzeugklassen N₁ bis N₃, wobei es sich um Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 Tonnen (N₁), von mehr als 3,5 bis 12 Tonnen (N₂) und von mehr als 12 Tonnen (N₃) handelt. Darüber hinaus kann eine Unterteilung nach Lastkraftwagen und Zugmaschine vorgenommen werden. Bei Letzterem können Zugmaschinen in Form von Sattelzugmaschinen oder als land- und forstwirtschaftliche Zugmaschine auftreten. In dieser Arbeit werden ausschließlich Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von 40 Tonnen (t) und Sattelzugmaschinen betrachtet. Unter Berücksichtigung des Forschungsgegenstandes dieser Arbeit, dem fahrerlosen Fahren, wird im Logistiksystem der prozentuale Anteil fahrerloser Fahrzeuge im öffentlichen Verkehrssystem (in % pro Jahr) am Gesamtbestand berücksichtigt.

Mit der Umstellung der Fahrzeuge von einem manuellen auf einen fahrerlosen Betrieb kann auch ein Wechsel der Antriebstechnologie einhergehen. Im Personenverkehr sind die fahrerlosen oder hochautomatisierten Fahrzeuge, wie Pkw oder Personen-Shuttle, in der Regel

bereits mit einem batterieelektrischen Motor ausgestattet (NAVYA 2021a; Einride 2021b). In dieser Arbeit wird daher der Wechsel der Antriebstechnologie von dieselbetriebenen Fahrzeugen zu batterieelektrischen Fahrzeugen für den Transport angenommen. Diese Veränderung der Antriebstechnologie wird mithilfe der Anzahl der batterieelektrischen Fahrzeuge am Gesamtbestand pro Jahr abgebildet.

Zum jetzigen Zeitpunkt wird für die Ortsveränderung neben dem Fahrzeug auch immer eine fahrerführende Person benötigt. In der Prozessdarstellung der Logistikkette (vergleiche Abbildung 10) werden diese als Transport(durchführende)Unternehmen bezeichnet, die Berufskraftfahrer einsetzen, die in der Regel vielfältige Tätigkeiten neben der reinen Fahraufgabe zum Gütertransport im Logistiksystem durchführen. Damit ist die Anzahl der Berufskraftfahrer im Güterverkehr pro Jahr ein wichtiges Element im Logistiksystem.

Aus logistischer Sicht sind die Kosten für den Transportprozess eine relevante Steuerungsgröße. Um nicht nur die reinen Transportkosten zu berücksichtigen, werden in dieser Arbeit die durch den Transportprozess entstehenden Kosten als TCO in Euro pro Jahr berücksichtigt. In den TCO sind die Personalkosten, die Fahrzeugkosten, die fixen Kosten (Energiesteuer, Versicherungskosten, Kfz-Steuer) sowie die variablen Kosten (Reparatur- und Instandhaltungskosten, Kosten für AdBlue, Energiekosten, Mautkosten) beinhaltet. Die Transaktionskosten werden vernachlässigt.

Im Hinblick auf eine nachhaltige Gestaltung der Prozesse sind die THG-Emissionen eine weitere wichtige Steuerungsgröße des Transports. Diese werden im Weiteren in CO₂-Äquivalenten (CO₂e) in Tonnen pro Jahr gemessen.

Verkehrsleistung

Zur Ortsveränderung der Güter werden Transportmittel eingesetzt, die zu Verkehren führen. Nach Sjøstedt (1996, S. 73) wird der Verkehr (»Traffic«) als die Bewegung von Einheiten entlang einer Verbindung bezeichnet (»Traffic is the movement of units along a route«). Losgelöst von der Art des zu transportierenden Objekts wird der Verkehr als »[...] die Überwindung von Raum durch Personen, Güter und Nachrichten« verstanden,

wobei jede Raumüberwindung in diese Definition einzubeziehen ist (Voigt 1973, S. 34). Verkehr setzt also immer eine Ortsveränderung voraus (Sjøstedt 1996, S. 73). Konkreter ist dies durch Stock und Bernecker (2014, S. 6) definiert, wonach Verkehr »[...] nur jene Raumüberwindung [umfasst,] die sich besonderer technischer und organisatorischer Einrichtungen (Verkehrsmittel, Verkehrswege, Verkehrsstationen und Verkehrsanlagen) bedient« .

Die Verkehrsleistung wird durch unterschiedliche Faktoren bestimmt. In dieser Arbeit wird die Verkehrsleistung unter anderem mithilfe des Stauaufkommens ermittelt. Drei wesentliche Ursachen für Stau sind Engstellen, hohes Verkehrsaufkommen und Störungen im Verkehrsfluss. Letztere treten beispielsweise durch Unachtsamkeit, fehlerhaften Fahrstreifenwechsel, mangelnden Sicherheitsabstand, nicht angepasste Geschwindigkeit und einander überholende Lkw auf (Treiber und Kesting 2010, S. 257ff.).

Der Verkehrsfluss ist die Ausnutzung der Infrastruktur durch Fahrzeuge zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses zeigt den Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Verkehrsgeschwindigkeit. Die Verkehrsstärke, auch als durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) bezeichnet, ist die Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde an einem bestimmten Querschnitt. Die Verkehrsstärke wird auch oft mit dem Verkehrsfluss gleichgesetzt. Die Verkehrsdichte beschreibt hingegen das Aufkommen der Fahrzeuge pro Verkehrsabschnitt (z. B. ein Kilometer) zu einem bestimmten Zeitpunkt und wird in Kfz pro km angegeben. Die Verkehrsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit der Fahrzeuge in Kilometer pro Stunde (h). Die grundlegende Formel des Fundamentaldiagramms lautet:

Formel 1: Fundamentaldiagramm

$$Q = D * V$$

wobei

Q = Verkehrsfluss in Kfz/h

D = Verkehrsdichte in Kfz/km

V = Verkehrsgeschwindigkeit in km/h

Das Diagramm zeigt beispielsweise, dass Verkehrsdichte und Fahrzeuggeschwindigkeit sich gegenseitig bedingen. Bei einer hohen Verkehrsdichte – einem starken Fahrzeugaufkommen auf einem bestimmten Infrastrukturabschnitt – kommt es zu reduzierten Fahrtgeschwindigkeiten. Im Jahr 2016 betrug die DTV_{Kfz} auf Bundesautobahnen beispielsweise etwa 51.200 Kfz/24h mit einem Schwerverkehrsaufkommen von rund 7.580 Kfz/24h mit steigender Tendenz (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2019b, S. 139).

Gemessen wird das Stauaufkommen im Weiteren mit dem durchschnittlichen Verkehrsfluss als Anzahl Verkehrsteilnehmende (Fahrzeuge (Fz)) pro Stunde auf einem bestimmten Streckenabschnitt pro Jahr.

Mit zunehmendem Stauaufkommen kann es auf der Straßeninfrastruktur zu einer Verschärfung der Unfallsituation kommen. Wesentlich für die Verkehrsleistung ist im Logistiksystem daher auch die Anzahl der Verkehrsunfälle, gemessen durch die Anzahl der Verkehrsunfälle in Deutschland unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen pro Jahr.

Darüber hinaus gilt es im Logistiksystem die Infrastruktur möglichst optimal auszunutzen. Das Straßennetz in Deutschland umfasst im Jahr 2019 etwa 830.000 km, von denen etwa 51.000 km Bundesfernstraßen, darunter rund 13.000 km Bundesautobahnen und rund 37.000 km Bundesstraßen, ca. 87.000 km Landes- und Staatsstraßen und etwa 92.000 km Kreisstraßen sind. Rund 600.000 km werden sonstigen Straßen zugeordnet (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2019a). Da in dieser Arbeit nur Lkw mit 40 t zGG und Sattelzugmaschinen im Fernverkehr betrachtet werden, liegt der Fokus der Straßeninfrastruktur auf Bundesautobahnen, gleichwohl die Fahrzeuge auch in anderen öffentlichen Räumen, wie Hafengebieten, eingesetzt werden. Die Nutzung der Infrastruktur wird in dieser Arbeit als die Kapazität der Straßeninfrastruktur von Bundesautobahnen in Deutschland in Kilometern pro Jahr gemessen.

Die Infrastrukturnutzung ist jedoch mit Kosten verbunden. Zu diesen sogenannten Infrastrukturkosten zählen Kosten für Aus- und Neubau, Kosten für Unfälle, Kosten für Vernetzungstechnologien, Kosten für Ladesäulen und Kosten für Stellplätze. In dieser Arbeit wird ein konstantes Infrastrukturnetz angenommen, weshalb die Kosten für Aus- und Neubau hier als die Instandhaltungskosten für die bestehende

Infrastruktur definiert sind. Darüber hinaus benennen existierende Infrastrukturkostenaufstellungen die Kosten für Vernetzungstechnologien nicht explizit. Unter Berücksichtigung des Forschungsgegenstandes, dem fahrerlosen Fahren, werden diese allerdings für die Verkehrsleistung zunehmend relevant und daher in dieser Arbeit ebenfalls aufgeführt. Die Infrastrukturkosten werden in dieser Arbeit in Euro pro Jahr und Kilometer gemessen und beeinflussen die Verkehrsleistung maßgeblich.

Als Transportinfrastruktur werden nach Sjøstedt (1996) alle von Menschen geschaffenen permanenten Einrichtungen bezeichnet. Damit werden auch Teile von Gebäuden wie Eingänge als Infrastruktur benannt (Sjøstedt 1996, S. 73). Infrastruktur beinhaltet in der Regel feste Strukturen im Verkehrssystem, wie z. B. Straßen und Verkehrsknotenpunkte. Darüber hinaus zählen Park- und Stellflächen für motorisierte Nutzfahrzeuge zur Infrastruktur. Im Logistiksystem ist die Stellplatzfläche von Relevanz, da rechtlich festgelegte Ruhezeiten im Güterkraftverkehr festgelegt sind. Neben dem Sonntagsfahrverbot in Deutschland gelten nach Verordnung (EG) Nr. 561/2006 und des AETR (Accord Européen sur les Transports Routiers, das europäische Übereinkommen über die Arbeit des im internationalen Straßenverkehr beschäftigten Fahrpersonals) zudem für Berufskraftfahrende spezifische Pausen- und Ruhezeiten, die eingehalten werden müssen. Der Bedarf an Stellplatzfläche wird in dieser Arbeit als die Fläche für Parkplätze in km^2 gemessen.

Ableitung des Variablensatzes

Unter Berücksichtigung der vier formulierten Subsysteme (Logistikleistung, Warenübergabe, Transport und Verkehrsleistung) aus Akteursperspektive wird für die weitere Untersuchung des Logistiksystems folgender Variablensatz definiert, der der Tabelle 7 zu entnehmen ist. Der Methodik nach Vester (1990) folgend, wurden Variablen näher ausformuliert, mit Indikatoren hinterlegt und der externe Einfluss auf die Variablen bestimmt. Bei der Definition der Variablen wird von einer erhöhenden Wirkung aller Variablen ausgegangen. Diese Ausprägung erleichtert die Analyse des Variablensatzes im Zukunftsmodell. Um Dopplungen in dieser Arbeit zu vermeiden, erfolgt die genauere Erläuterung der Variablen jeweils bei der Beschreibung der Modelle bzw. der Wirkbeziehungen der Variablen untereinander.

Tabelle 7: Variablensatz des Logistiksystems

Akteure	Subsystem	Variable	Definition	Indikator	Externer Einfluss
Dienstleistende Unternehmen	Logistikleistung	Fahrzeughilfeleistung	Zunehmende Fahrzeughilfeleistung im Straßengüterverkehr	Fahrzeughilfeleistung im Straßengüterverkehr (in Fzkm pro Jahr)	Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände Planungs- und Entscheidungsverfahren Wirtschaftslage
		Straßentransportnachfrage	Zunehmende Nachfrage nach Straßentransporten	Transportaufkommen (in t pro Jahr)	Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände Planungs- und Entscheidungsverfahren Wirtschaftslage
		Lieferzuverlässigkeit	Zunahme der Zuverlässigkeit von Transporten	Termingerechte Zustellung von Transporten (in % pro Jahr)	Wirtschaftslage Rohstoffmangel
		Fahrzeugauslastung	Zunehmende Fahrzeugauslastung	Auslastungsgrad von Beförderungsleistung (tkm) im Fahrzeug (Verhältnis von tatsächlicher zu möglicher Beförderungsleistung in % pro Jahr)	Planungs- und Entscheidungsverfahren
Versendende und empfangende Unternehmen	Warenübergabe	Schnittstellentechnologien	Zunehmender Einsatz von Automatisierungstechnologien in der Warenübergabe	Anteil der Automatisierungstechnologien in der Warenübergabe (Verhältnis von Technologieinsatz zum personellen Einsatz in % pro Jahr)	Wirtschaftslage Personalmangel Umwelt- und Wittereinflüsse Gesetzeslage Wirtschaftslage
		Personalbedarf zur Be- und Entladung	Zunehmender Bedarf an Personal zur Be- und Entladung	Anzahl des Personals zu Be- und Entladung in der Warenübergabe (in Anzahl Personal in der Warenübergabe pro Jahr)	Wirtschaftslage Personalmangel
		Personalqualifikation	Zunehmende Qualifizierung des erwerbstätigen Personals zur Be- und Entladung	Anteil der Erwerbstätigen in Berufen mit Führungsaufgaben in der Logistikbranche (in Anteil des Personals mit Führungsaufgaben am Gesamtbestand % pro Jahr)	Umstrukturierung des Bildungssystems
		Kosten für Warenübergabe	Zunehmende Kosten für die Warenübergabe	Summe der Kosten in der Warenübergabe (Kosten für die Warenübergabe in € pro Jahr)	Steuerliche Veränderungen Wirtschaftslage

Akteure	Subsystem	Variable	Definition	Indikator	Externer Einfluss		
Transportunternehmen	Transport	Fahrerloses Fahrzeug	Zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge	Prozentualer Anteil fahrerloser Lkw (40 t zGG) und Sattelzugmaschinen im öffentlichen Verkehr (Anteil der Fahrzeuge am Gesamtbestand in % pro Jahr)	Personalmangel Umwelt- und Wettereinflüsse Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände Gesetzeslage Strategische Veränderungen in der Automobilindustrie (neue Leitung, neue Produktausrichtung) Lobbyarbeit der Umwelt- und Verkehrsverbände		
				Anzahl batterieelektrischer Lkw (40 t zGG) und Sattelzugmaschinen am Gesamtbestand (Anzahl BEV pro Jahr)	Medienberichte Strategische Veränderungen in der Automobilindustrie (neue Leitung, neue Produktausrichtung) Planungs- und Entscheidungsverfahren Steuerliche Veränderungen		
		Antriebstechnologie	Zunehmender Bestand an batterieelektrischen Fahrzeugen	Anzahl der Berufskraftfahrenden im Güterverkehr (Anzahl Berufskraftfahrende pro Jahr)	Haushalts- und Wirtschaftslage Personalmangel Rohstoffmangel Technische Entwicklung (fahrerloses Fahren)		
				Absolute Summe der TCO pro Fahrzeug (TCO in € pro Jahr)	Steuerliche Veränderungen und Bepreisung		
		Berufskraftfahrende	Zunehmende Anzahl an Berufskraftfahrenden	TCO	Zunahme transportbedingter THG-Emissionen	Summe der emittierten CO ₂ -Äquivalente durch Güterkraftfahrzeuge (CO ₂ -Äquivalente in t pro Jahr)	Technische Entwicklung Umwelt- und Wettereinflüsse Rohstoffmangel

Akteure	Subsystem	Variable	Definition	Indikator	Externer Einfluss
Politik	Verkehrserstellung	Stauaufkommen	Zunahme des Verkehrsfusses	Verkehrfluss von Lkw (40 t zGG) und Sattelzugmaschinen auf Bundesautobahnen (Anzahl Fahrzeuge pro Stunde auf einem bestimmten Autobahnabschnitt pro Jahr)	Planungsverfahren
		Verkehrsunfälle	Zunahme der Verkehrsunfälle durch Güterkraftfahrzeuge	Anzahl der Verkehrsunfälle in Deutschland unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen (Anzahl der Verkehrsunfälle pro Jahr)	Planungsverfahren Stadtentwicklung Geschwindigkeitsbegrenzung Verkehrsregelung
		Infrastrukturnutzung	Zunehmende Ausnutzung der Straßeninfrastrukturkapazität	Kapazität der Straßeninfrastruktur auf Bundesautobahnen in Deutschland (Genutzte Infrastruktur von Lkw (40 t zGG) und Sattelzugmaschinen in km pro Jahr)	Umweltereignisse (Rohstoffknappheit, Naturkatastrophen)
		Infrastrukturkosten	Zunehmende Kosten durch Aus- und Neubau sowie Instandhaltung von Straßeninfrastruktur	Summe der Kosten für Straßeninfrastrukturflächenbereitstellung (Infrastrukturkosten in € pro Jahr)	Planungs- und Entscheidungsverfahren
		Stellplatzbedarf	Zunehmender Flächenbedarf für Parkplätze	Summe der Stellplatzfläche (Stellplatzfläche für Lkw (40 t zGG) und Sattelzugmaschinen in km ² pro Jahr)	Umweltereignisse (Rohstoffknappheit, Naturkatastrophen)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

6.3 Überprüfung des Variablensatzes

Um sicherzustellen, dass der Variablensatz alle relevanten Systembereiche abdeckt, führt Vester (1991, S. 67ff.) eine Überprüfung des Variablensatzes nach festgelegten Kriterien durch: Sieben Lebensbereiche, drei physische Kategorien, drei dynamische Kategorien und vier Systembeziehungen. Insgesamt liegen damit 18 Kriterien zur Überprüfung des Variablensatzes vor. Für die Bewertung kann eine vollständige Zustimmung (●), eine teilweise Zustimmung (◐) sowie keine Zustimmung (freies Feld) unterschieden werden. Die Summe der einzelnen Bewertungen ergibt einen Überblick über die Vollständigkeit des Variablensatzes und ob eine Variable im System unter- oder überrepräsentiert ist. Dabei ist es zulässig, dass der Problembereich stärker betont ist.

Im betrachteten »Logistiksystem mit fahrerlosen Fahrzeugen« ist der Lebensbereich »Wirtschaft« am stärksten ausgeprägt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Logistiksystem einen ökonomischen Forschungsgegenstand darstellt. Die anderen Lebensbereiche sind etwa gleichmäßig im System vertreten, sodass bei diesen keine Über- oder Unterrepräsentation vorliegt. Am schwächsten ausgeprägt ist der Lebensbereich »Naturhaushalt«. Dieser wird allerdings explizit durch die Variablen »THG-Emissionen« und »Antriebstechnologie« abgebildet, die jeweils ökologische Zielrichtungen aufweisen. Die physische Kategorie »Materie« ist leicht stärker ausgeprägt als die Kategorien »Informationen« und »Energie«. Dies ist damit begründet, dass das Untersuchungssystem insbesondere Veränderungen materieller Variablen, wie »Fahrerlose Fahrzeuge« und »Schnittstellentechnologien«, betrachtet. Die dynamischen Kategorien sind jeweils relativ gleichmäßig im System durch die Variablen repräsentiert und erfüllen damit die von Vester (1991, S. 69) festgelegte Anforderung. In der Betrachtung der Systembeziehung ist eine stärkere Ausprägung bei den von innen beeinflussten Entscheidungsprozessen zu erkennen. Gleichwohl werden viele Variablen aber auch von außen beeinflusst und öffnen das System durch Input oder Output, sodass kein geschlossenes System vorliegt.

Abbildung 16: Kriterienmatrix des Untersuchungssystems

Variable	Lebensbereiche						Physische Kategorie			Dynamische Kategorie				Systembeziehung				
	Wirtschaft	Population	Flächennutzung	Humanökologie	Naturhaushalt	Infrastruktur	Gemeinwesen	Materie	Energie	Information	Flussgröße	Strukturgröße	zeitliche Dynamik	räumliche Dynamik	öffnet d. System durch Input	öffnet d. System durch Output	von Innen beeinflusst	von Außen beeinflusst
Fahrzeugharleistung	●	○	○	○	○	○		○	○		●		●	●	●	○	○	○
Straßentransportnachfrage	●							●	○	●	●	●	●	●	●	○	○	○
Lieferzuverlässigkeit	●							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Fahrzeugauslastung	●							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schnittstellentechnologien	●					○		○			○	○	○	○	○	○	○	○
Personalbedarf zur Be- und Entladung	○	●	○	○			●	●			○	○	○	○	○	○	○	○
Personalqualifikation		○	○	○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kosten für Warenübergabe	●					○			●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
Fahrerloses Fahrzeug	○	●				○	●				○	○	○	○	○	○	○	○
Antriebstechnologie	○			○	●		●				○	○	○	○	○	○	○	○
Berufskraftfahrende	○	●		○			●	●		●	●	●	●	●	○	○	○	○
TCO	●								●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
THG-Emissionen				○	●		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Stauaufkommen		●		●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Verkehrsunfälle		●		●			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Infrastrukturnutzung				○		●	●				○	○	○	○	○	○	○	○
Infrastrukturkosten						○	○		●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
Stellplatzbedarf		●				●	●				○	○	○	○	○	○	○	○
Gesamt:	9,0	3,5	4,5	5,5	2,5	5,0	3,5	10,0	6,5	7,0	11,0	8,5	11,0	11,5	7,5	11,0	13,5	10,5

○ teilweise zutreffend
● voll zutreffend

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der formulierte Variablen-satz alle Systembereiche umfasst, stärkere Ausprägungen den Forschungs-gegenstand repräsentiert und damit für eine Analyse geeignet ist. Die Abbildung 16 zeigt die Kriterienmatrix des betrachteten Logistiksystems sowie die Bewertung der Variablen je Kriterium.

7 Qualitatives Zukunftsmodell des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

In diesem Kapitel wird mithilfe des im Abschnitt 6.2 aufgestellten Variablensatzes ein Zukunftsmodell entwickelt, das auf dem Sensitivitätsmodell nach Vester (1990) basiert. Es bildet das Wirkungsgefüge im Logistiksystem durch den Einfluss des fahrerlosen Fahrens qualitativ ab.

Dafür werden die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens anhand der Literatur beschrieben und hinsichtlich ihrer Wirkungsstärke und Richtung der Wirkungsbeziehung eingeordnet. Die Zusammenfassung des Wirkungsgefüges findet sich in Abschnitt 7.1.5.

Anschließend wird in Abschnitt 7.2.1 ein Kausaldiagramm erstellt, das das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem visualisiert. Aufbauend auf einer Einflussmatrix nach Vester (1990) werden zudem die Rollen der Variablen im System in Abschnitt 7.2.2 ermittelt. Eine Analyse der Subsysteme und ihrer Wirkungsgefüge in Abschnitt 7.2.3 gibt Aufschluss darüber, welche Rückkopplungsschleifen im System auftreten können.

Das qualitative Zukunftsmodell wird einerseits zur Erstellung eines quantitativen Zukunftsmodells, einem Simulationsmodell, genutzt, dessen Ergebnisse andererseits zur zielgerichteten Ableitung von Gestaltungsoptionen zur gewünschten Einführung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem genutzt werden.

7.1 Wirkungsbeziehungen des fahrerlosen Fahrens anhand der Literatur

In diesem Abschnitt werden die erwarteten Wirkungen des fahrerlosen Fahrens anhand der Literatur aus Kapitel 3 beschrieben. Dies dient der Schärfung der aufgestellten Systemgrenzen dieser Arbeit und als Grundlage für die Analyse der Wirkungsbeziehungen.

Die Beschreibung der Wirkungen erfolgt entlang der Perspektiven der in Abschnitt 5.2 identifizierten Akteure sowie der in Abschnitt 6.2 festgelegten Variablen. Die Wirkungen werden zunächst beschrieben und anschließend auf einer Einflusskala von sehr stark gleichgerichtet (+3) bis sehr stark entgegengerichtet (-3) eingeordnet. Entgegengerichtet bedeutet, dass beispielsweise die Zunahme einer Variable zu einer Reduktion einer anderen führt, also entgegen der zugewiesenen Richtung. Gleichgerichtet bedeutet dementsprechend, dass die Wirkungen in die gleiche Richtung – Zunahme führt zu Zunahme – verlaufen. Die Einordnung erfolgte zum einen auf Grundlage der Literaturanalyse und zum anderen mithilfe eines Workshops von Forschenden.

7.1.1 Perspektive der dienstleistenden Unternehmen

In diesem Abschnitt werden die erwarteten Wirkungen des fahrerlosen Fahrens aus der Perspektive der dienstleistenden Unternehmen anhand der Literatur beschrieben. Diese Wirkungen betreffen die Fahrzeugfahrleistung, die Straßentransportnachfrage, die Lieferzuverlässigkeit sowie die Fahrzeugauslastung.

7.1.1.1 Fahrzeugfahrleistung

Fraerich et al. (2017, S. 25) beschreiben, dass durch das fahrerlose Fahren Ruhezeiten entfallen und somit mehr Strecke pro Lkw zurückgelegt werden kann. Auch Pernestål et al. (2020, S. 46) gehen von einer Erhöhung der gefahrenen Kilometer pro Lkw durch das fahrerlose Fahren aus, wobei es sich hierbei um einen indirekten Effekt handle, der aus den sinkenden Grenzkosten für Gütertransporte resultiert.

Auf Grundlage dieser Argumentation kann abgeleitet werden, dass eine zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge zu einer Erhöhung der Fahrzeugfahrleistung führen kann. Hierbei wird ein starker gleichgerichteter Einfluss (+2) zugrundegelegt, da mit einer Zunahme fahrerloser Fahrzeuge auch die zurückgelegten Fahrzeugkilometer (Fzkm) ansteigen.

Die Zunahme der Fahrzeugfahrleistung kann zu einem sehr starken Anstieg der THG-Emissionen führen (+3). Dieselbetriebene Lkw verursachen pro zurückgelegtem Kilometer 877,1 Gramm (g) CO₂e⁵ (infras 2022). Mit zunehmender Anzahl an Fzkm steigen auch die emittierten CO₂e.

Aus den Ergebnissen des Expertenworkshops konnte zudem ermittelt werden, dass durch den Anstieg der Fahrzeugfahrleistung die Nachfrage nach Fahrzeugen, die batterieelektrisch betrieben sind, zunehmen kann (+2). Eine zunehmende Fahrzeugfahrleistung führt zudem zu einem Anstieg an Berufskraftfahrenden, da mit zunehmender Leistung auch mehr Berufskraftfahrende erforderlich werden (+2). Auch die TCO werden stark gleichgerichtet beeinflusst, da mit zunehmender Fahrleistung variable Kosten, wie Instandhaltungskosten, ebenfalls ansteigen (+2).

Auf die Variablen des Subsystems Verkehrsleistung »Stauaufkommen«, »Verkehrsunfälle«, »Infrastrukturnutzung« und »Infrastrukturkosten« wirkt die Fahrzeugfahrleistung ebenfalls stark gleichgerichtet (+2). Werden mehr Fahrzeugkilometer pro Jahr zurückgelegt, wird in der Folge auch die Infrastruktur stärker beansprucht und die Kosten steigen. Stau wird verursacht. Auch die Wahrscheinlichkeit für Unfälle steigt.

Eine leicht gleichgerichtete Wirkung besteht von der Fahrzeugfahrleistung auf die Fahrzeugauslastung (+1), da durch die zunehmende Fahrzeugfahrleistung mehr Güter transportiert werden können. Auch auf den Stellplatzbedarf hat die Fahrzeugfahrleistung eine leicht gleichgerichtete Wirkung, sodass einer Erhöhung der Fahrzeugfahrleistung auch zu einer Zunahme der Pause- und Ruhezeiten der Fahrenden führt (+1). Letztere sind jedoch nur sehr leichte Wirkungen, die im Rahmen des Expertenworkshops ermittelt wurden.

7.1.1.2 Straßentransportnachfrage

Fitzpatrick et al. (2017, S. 2) argumentieren, dass eine Reduzierung der Betriebskosten durch fahrerlose Fahrzeuge zu einem Anstieg von Straßengütertransporten führt. Auch Nowakowski et al. (2015,

5 Der Wert für CO₂e gilt für Lkw > 34-40 t Euro-VI D-E bei einer aggregierten durchschnittlichen Straßensituation nach UBA 2021 in Deutschland. Als Basis gilt das Jahr 2020.

S. 2947) argumentieren, dass aufgrund von geringeren Frachtkosten, einem reduzierten Kraftstoffverbrauch und einer Erhöhung der Produktivität das autonome Fahren zu einer Zunahme des Wettbewerbs zwischen Unternehmen mit autonomen und nicht autonomen Fahrzeugen führen kann, da Straßentransporte mit autonomen Fahrzeugen zu günstigeren Preisen angeboten werden können. Außerdem ist es möglich, dass neue Geschäftsfelder durch das autonome Fahren entstehen, die zusätzlich neue Marktteilnehmende hervorrufen. Dabei kann es aufgrund des fahrerlosen Fahrens zu einer Verdrängung kleiner und mittelständischer Unternehmen durch große, finanzstarke Unternehmen kommen. Aufgrund der geringen Margen ist es kleinen und mittelständischen Unternehmen nur schwer möglich, neue Technologien zu entwickeln und zu erproben, weshalb die finanzstarken Unternehmen die neue Technologie zuerst einsetzen und damit Gewinne erwirtschaften können (Flämig et al. 2020, S. 75).

Gleichzeitig kann der Wettbewerb nicht nur im straßengebundenen Transportmarkt, sondern auch zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern stattfinden. Flämig (2015, S. 394) merkt an, dass die Effizienzsteigerung des Straßenverkehrs zu Interessenskonflikten mit anderen Massentransportmitteln, wie der Bahn oder dem Binnenschiff, führen können. Damit würde durch das fahrerlose Fahren eine Verlagerung zum Straßengüterverkehr verstärkt werden. Auch Clements und Kockelmann (2017, S. 1) geben an, dass das automatisierte Fahren im Straßengüterverkehr einen Rückgang der Nachfrage von Schienengütertransporten bewirken kann. Fraerich et al. (2017, S. 40f.) führen anhand von drei Szenarien mithilfe des Modells nach Liedtke und Sonntag eine Berechnung durch, die zeigt, wie stark sich die Verkehrsleistung durch das automatisierte Fahren zwischen den Verkehrsträgern verändern kann. Es wird abgeschätzt, dass langfristig ein Rückgang der Verkehrsleistung auf der Schiene von bis zu 55 % möglich ist. Zugrunde liegt hierbei die Annahme, dass die Eisenbahnunternehmen ihre Leistungen verringern, da die Nachfrage nach Schienengütertransporten durch das automatisierte Fahren im Straßengüterverkehr sinkt. Eine vergleichbare Rechnung führen Flämig et al. (2020, S. 135) durch, die die Verlagerungseffekte anhand von zwei Szenarien berechnen. Im ersten Szenario werden Verkehre ausschließlich

auf der Autobahn betrachtet, während das zweite Szenario auch Verkehr bis zu den Logistikzentren außerhalb des urbanen Raums umfasst. Ähnlich wie bei der Berechnung zuvor sind Verlagerungen von bis zu 66 % von der Schiene auf die Straße durch automatisiertes Fahren im Güterverkehr denkbar.

Auch Engholm et al. (2021, S. 235) berechnen die Verlagerungseffekte von der Schiene und der Wasserstraße zur Straße aufgrund des fahrerlosen Fahrens in Schweden. Anhand einer Szenariokalkulation wird ermittelt, dass die Transportleistung in tkm durch das fahrerlose Fahren für Straßentransporte um 22 % bei einer vollständigen Implementierung fahrerloser Fahrzeuge im Transportsystem zunimmt. Auch bei den Hub and Spoke Verkehren konnte eine Zunahme der tkm um 11 % berechnet werden. Gleichzeitig nimmt die Transportleistung im Schienenverkehr um 29 % und im Seeverkehr um 19 % ab, wenn davon ausgegangen wird, dass fahrerlose Fahrzeuge das gesamte Verkehrsnetz abdecken.

William et al. (2017, S. 46) argumentieren dagegen, dass der Einsatz automatisierter Fahrzeuge aufgrund von spezialisierten Routenführungen oder Wegerechten zu einem Rückgang von Straßengütertransporten führt. Hierbei handelt es sich um eine Verlagerung von Lkw-Transporten auf andere automatisierte Fahrzeuge, wie zum Beispiel das »Freight Shuttle System«, einem schienengeführten fahrerlosen Fahrzeug. Die verbliebenen Lkw könnten die Infrastruktur in der Folge effizienter nutzen. Sie gehen prinzipiell aber von einer Zunahme von Straßengütertransporten aufgrund aktueller Prognosen aus.

Auf Basis der vorangegangenen Diskussion kann kein direkter Einfluss des fahrerlosen Fahrens auf die Straßentransportnachfrage abgeleitet werden. Im Rahmen des Expertenworkshops wurde hingegen abgeleitet, dass die Straßentransportnachfrage aufgrund von Effizienzsteigerungen sowie Kosteneinsparungen fahrerloser Fahrzeuge erhöht wird. Daher wirken sowohl die Lieferzuverlässigkeit (+2) als auch die TCO (-2) stark auf die Variable »Straßentransportnachfrage«, da mit zunehmender Lieferzuverlässigkeit und sinkenden Kosten die Attraktivität von Straßengütertransporten steigt.

Ein Anstieg der Straßentransportnachfrage hat zudem einen sehr stark gleichgerichteten Einfluss auf die Fahrzeugfahrleistung (+3). Mit zunehmender Nachfrage werden mehr Transporte und größere Entfernungen realisiert, wodurch die zurückgelegten Kilometer ansteigen. Im Jahr 2019 umfasste die Beförderungsmenge im gewerblichen Straßengüterverkehr deutscher Lkw beispielsweise knapp 2,5 Milliarden Tonnen (Kraftfahrt-Bundesamt 2021b, S. 241). Dabei lag eine Zunahme von etwa 20 % vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2019 vor. Im gleichen Zeitraum stieg die Fahrzeugfahrleistung deutscher Sattelzugmaschinen von 16,9 auf 20,4 Milliarden (Mrd.) km und verzeichnete damit ebenfalls einen Anstieg von etwa 20 % (Bundesanstalt für Straßenwesen 2021b, S. 2).

Im Expertenworkshop wurde zudem ermittelt, dass aus der steigenden Straßentransportnachfrage auch eine zunehmende Anzahl der Berufskraftfahrenden resultiert, um diese Nachfrage nach Transporten zu bedienen (+2).

Werden die anderen Variablen im System berücksichtigt, zeigt sich, dass die Zunahme der Straßentransportnachfrage einen starken Anstieg der Fahrzeugauslastung (+2) sowie der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge (+2) bewirkt. Eine stark gleichgerichtete Wirkung hat die Variable zudem auf den Personalbedarf zur Be- und Entladung (+2). Ein Anstieg der Straßentransportnachfrage bewirkt das der Bedarf an Personal zur Be- und Entladung zunimmt, da mehr Transporte in der Warenübergabe abgefertigt werden müssen. Gleichzeitig führt die zunehmende Straßentransportnachfrage zu einer Erhöhung an Schnittstellentechnologien (+1) sowie der Kosten für die Warenübergabe (+1).

Eine größere Nachfrage kann zu Lieferengpässen und dementsprechend Verzögerungen führen. Die Lieferzuverlässigkeit sinkt daher leicht bei einer zunehmenden Straßentransportnachfrage (-1).

7.1.1.3 Lieferzuverlässigkeit

Flämig (2015, S. 378) gibt an, dass die Automatisierungstechnologie von Fahrzeugen deshalb zunimmt, weil dadurch eine höhere Zuverlässigkeit der Raumüberwindung erwartet wird. Die Zuverlässigkeit eines Transports ist dabei eng mit den Rahmenbedingungen, wie beispielsweise dem Verkehrsfluss oder der Verfügbarkeit von Ressourcen (Waren, Fahrende,

Treibstoff, etc.), verknüpft, die zu einer Beeinträchtigung der Lieferzuverlässigkeit führen können.

Zu einer Erhöhung der Lieferzuverlässigkeit kann auch eine optimierte Routenwahl beitragen. Fitzpatrick et al. (2017, S. 1) gehen davon aus, dass durch die Einführung des automatisierten und vernetzten Fahrens eine größere Flexibilität in der Routenwahl möglich wird. Eine verbesserte Routenwahl kann dazu führen, dass Staus vermieden werden und dadurch die Lieferzuverlässigkeit steigt.

Auf dieser Basis kann abgeleitet werden, dass sich das fahrerlose Fahren positiv auf die Lieferzuverlässigkeit auswirkt (+2). Es wird darüber hinaus deutlich, dass eine Staureduktion und eine Verringerung von Verkehrsunfällen zu einer Zunahme der Lieferzuverlässigkeit führen können, sodass beide Variablen stark entgegengerichtet auf die Lieferzuverlässigkeit wirken (-2).

Mit zunehmender Lieferzuverlässigkeit könnte folglich auch die Attraktivität von Straßengütertransporten steigen. Eine Zunahme der Lieferzuverlässigkeit hat daher eine stark gleichgerichtete Wirkung auf die Straßentransportnachfrage (+2).

Im Expertenworkshop wurde festgehalten, dass eine ansteigende Lieferzuverlässigkeit auf die Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Schnittstellentechnologien« ebenfalls eine leicht gleichgerichtete Wirkung hat (+1). Mit zunehmender Lieferzuverlässigkeit nimmt allerdings die Anzahl der Berufskraftfahrenden ab, sodass hierbei eine leicht entgegengerichtete Wirkung auftritt (-1).

7.1.1.4 Fahrzeugauslastung

In der Regel wird für den Transport von Gütern ein Fahrzeug unterschiedlicher Größenklasse eingesetzt. Je nach Entfernungsbereich und Transportvolumen wird in Nutzfahrzeug, leichter Lkw, schwerer Lkw und Sattelzug unterschieden. Gemein haben alle Nutzfahrzeugklassen, dass sie im vorderen Teil aus einer Fahrzeugkabine sowie dem Motor bestehen und im hinteren Teil aus einer Ladefläche, die zwischen den Nutzfahrzeugklassen variiert. Paragraph 32 der StVZO legt die Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen fest: Lkw inklusive Anhänger dürfen eine maximale Länge von 18,75 m nicht überschreiten. Bei Sattelzügen

(Zugmaschine und Auflieger) gilt eine maximale Länge von 16,50 m. Die maximale Breite ist bei allen Lkw-Typen auf 2,55 m festgelegt.

Im Hinblick auf ein fahrerloses Fahrzeug wird eine Fahrzeuggabine nicht mehr notwendig sein. Das Unternehmen Einride hat bereits einen möglichen autonomen Lkw konstruiert, der ohne Fahrzeuggabine auskommt (Einride 2019). Bestehen bleibt im vorderen Teil des Fahrzeugs der Motor. Zusätzlich muss ein Bord-Computer für die Steuerung des Fahrzeugs integriert werden. Ein fahrerloses Fahrzeug müsste nicht länger die Anforderungen an das Fahrzeugdesign erfüllen, denen ein herkömmliches Fahrzeug unterliegt. In Abhängigkeit des Fahrzeugdesigns kann sich in einem fahrerlosen Fahrzeug folglich die Transportkapazität ändern.

Abhängig von der Fahrzeugklasse ist nur ein bestimmtes Gesamtgewicht zulässig, der gewonnene Laderaum kann sich durch das fahrerlose Fahren leicht erhöhen. Die mögliche weitere gewichtsmäßige Zuladung hängt von den Gewichten der Automatisierungstechnologien und Rechereinheiten gegenüber der herkömmlichen Fahrzeugausstattung ab. Der volumenmäßige Laderaum kann sich daher erhöhen, das Ladegewicht wird jedoch gleichbleiben. Es bietet sich bei einer Erhöhung der Transportkapazität die Möglichkeit, das ungenutzte Volumen auszuschöpfen und den Auslastungsgrad des Fahrzeugs zu erhöhen. Die Statistik zum Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD₁) des Kraftfahrt-Bundesamts (2020b, S. 87) zeigt, dass im gewerblichen Verkehr nur rund 60 % der Fahrzeuge ihren Rauminhalt von mehr als 91 %, gemessen in Beförderungsleistung, nutzen. Das bedeutet, dass die Fahrzeugzuladungskapazitäten im gewerblichen Güterverkehr eine mögliche Beförderungsleistung von knapp 504 Mrd. tkm im Jahr 2019 zuließen aber nur rund 272 Mrd. tkm tatsächlich befördert wurden.

In der Literatur wird lediglich genannt, dass das fahrerlose Fahren zu einer Optimierung der Fahrzeugauslastung führen kann (Elgharbawy et al. 2019). Eine tiefere Analyse ist bislang nicht erfolgt.

Das fahrerlose Fahren könnte jedoch auch dazu führen, dass Fahrzeuge weniger ausgelastet werden. Aufgrund entfallender Pausen- und Ruhezeiten können Fahrzeuge zeitlich flexibel Güter transportieren. Der Anreiz, Fahrzeuge möglichst vollständig auszulasten, könnte daher sinken. In diesem Fall würden kleinere Fahrzeuge eingesetzt werden, deren

Fahrzeugauslastung deutlich geringer ist. Der fahrerlose Lkw des Unternehmens Einride umfasst beispielsweise eine Kapazität von 33 Paletten bei einer maximalen Zuladung von 24 Tonnen (Einride 2021a). Eine Sattelzugmaschine hat im Vergleich dazu eine Kapazität von circa 34 Paletten und in Abhängigkeit des Eigengewichts des Fahrzeugs eine maximale Zuladung circa 25 Tonnen. Das zulässige Gesamtgewicht von Sattelzugmaschinen ist in Paragraph 34 der StVZO festgelegt. Damit wird abgeleitet, dass das fahrerlose Fahren zu einem leichten Rückgang der Fahrzeugauslastung führen kann.

Im Workshop wurde festgehalten, dass mit zunehmender Fahrzeugauslastung die Kosten für die Warenübergabe steigen, da mehr Güter an den Standorten der versendenden und empfangenden Unternehmen be- und entladen werden müssen. Auf diese Variable hat die Fahrzeugauslastung eine leicht gleichgerichtete Wirkung (+1).

Eine Erhöhung der Fahrzeugauslastung wirkt sich hingegen stark entgegengerichtet (-2) auf die TCO aus, die zurückgehen, wenn in einem Fahrzeug mehr transportiert wird. Die Variablen »Berufskraftfahrende«, »THG-Emissionen«, »Stauaufkommen«, »Stellplatzbedarf«, »Infrastrukturnutzung« und »Infrastrukturkosten« werden leicht entgegengerichtet beeinflusst (-1). Bei diesen Variablen bewirkt die Zunahme der Fahrzeugauslastung eine Reduktion, sodass die THG-Emissionen, das Stauaufkommen, der Stellplatzbedarf und die Infrastrukturkosten vermindert werden.

7.1.2 Perspektive der versendenden und empfangenden Unternehmen

In diesem Abschnitt wird die Perspektive der versendenden und empfangenden Unternehmen näher untersucht. Hierbei werden die erwarteten Wirkungen des fahrerlosen Fahrens auf die Schnittstellentechnologien, den Personalbedarf zur Be- und Entladung, die Personalqualifikation sowie die Kosten für Warenübergabe anhand der Literatur beschrieben und die Stärke der Einflüsse bewertet.

7.1.2.1 Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe

Es gibt bereits Technologien, die die Tätigkeiten der Disponierenden, der Fahrenden und des Personals in der Warenübergabe übernehmen können. Hierbei kann grob in zwei Kategorien unterschieden werden: Technologien für den Informationsfluss und Technologien für den Güterfluss.

Zur Durchführung der Tätigkeiten des Informationsflusses kann ein Transportmanagementsystem eingesetzt werden. Moderne Transportmanagementsysteme (TMS) können Fahrzeuge und Trailer orten, das Wartungsmanagement sowie die Touren- und Auftragsplanung durchführen oder das Tachomanagement überwachen (TB Digital Services 2020).

Die Tätigkeiten der Disposition, wie die Auftragserstellung, die Bestellauslösung, die Tourenplanung, die Fahrzeugeinsatzplanung sowie die Erstellung der Versandpapiere, könnten durch ein TMS vollständig übernommen werden. Da diese Tätigkeiten zum aktuellen Zeitpunkt oftmals mithilfe unterschiedlicher Softwarelösungen durchgeführt werden, stellt die Vereinheitlichung aller zuvor eingesetzten Systeme auf einer Plattform eine Chance von TMS dar. Die Vereinheitlichung aller Systeme birgt allerdings das Risiko, dass bei einem unbefugten Eingriff durch Dritte das Potenzial für ein höheres Schadensausmaß steigt.

Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden, wie die Prüfung und Dokumentation der Warenbegleitpapiere sowie die Programmierung des Tachometers und der Mauterfassung, könnten in Zukunft ebenfalls über ein TMS erfolgen. Dieses würde über alle Informationen verfügen, die für eine fachgerechte Überprüfung erforderlich sind. Voraussetzung ist jedoch, dass alle Warenbegleitpapiere digitalisiert vorliegen und eine Manipulation ausgeschlossen wird. Um Manipulationen zu verhindern, könnte die Technologie der Blockchain eine potenzielle Lösung darstellen, da Informationen so dokumentiert werden, dass eine Anpassung zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr möglich ist (Fill et al. 2020, 9f.).

Weitere Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden, wie die Buchung der Auslieferung sowie die Anforderung der Empfangsbestätigung, können ebenfalls mithilfe eines TMS durchgeführt werden. Dies bietet die Chance, dass die Übermittlung zum versendenden oder empfangenden Unternehmen automatisch erfolgt. Allerdings besteht hierbei ebenfalls das Risiko einer steigenden Betrugsgefahr, wie die Tabelle 8 zeigt.

Tabelle 8: Prozessbezogene Chancen und Risiken von automatisierten Schnittstellentechnologien für den Informationsfluss

Beteiligtes Personal	Prozesse	Schnittstellen-technologien	Chancen	Risiken	
Informationsfluss					
Disponierende	Bestellung erstellen		<ul style="list-style-type: none"> Zusammenführung aller relevanten Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> Zunehmendes Schadensausmaß bei unbefugtem Eingriff Dritter 	
	Bestellung auslösen				
	Tour planen				
	Fahrzeugeinsatz planen				
	Versandpapiere erstellen				
	Warenbegleitpapiere prüfen				
Berufskräfteführende	Tachometer / Mauterfassung programmieren	Transportmanagement-system	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierte Übermittlung der Zustellung 	<ul style="list-style-type: none"> Aktive, menschliche Prüfung entfällt Steigende Betrugsgefahr 	
	Warenbegleitpapiere dokumentieren				
	Auslieferung buchen				
	Empfangsbestätigung fordern				
					<ul style="list-style-type: none"> Manuelle Änderungen nur durch Systemadministrator möglich Steigende Betrugsgefahr
					<ul style="list-style-type: none"> Aktive, menschliche Dokumentation entfällt Steigende Betrugsgefahr
		<ul style="list-style-type: none"> Automatisierte Übermittlung des Empfangs der Ware 	<ul style="list-style-type: none"> Steigende Betrugsgefahr 		

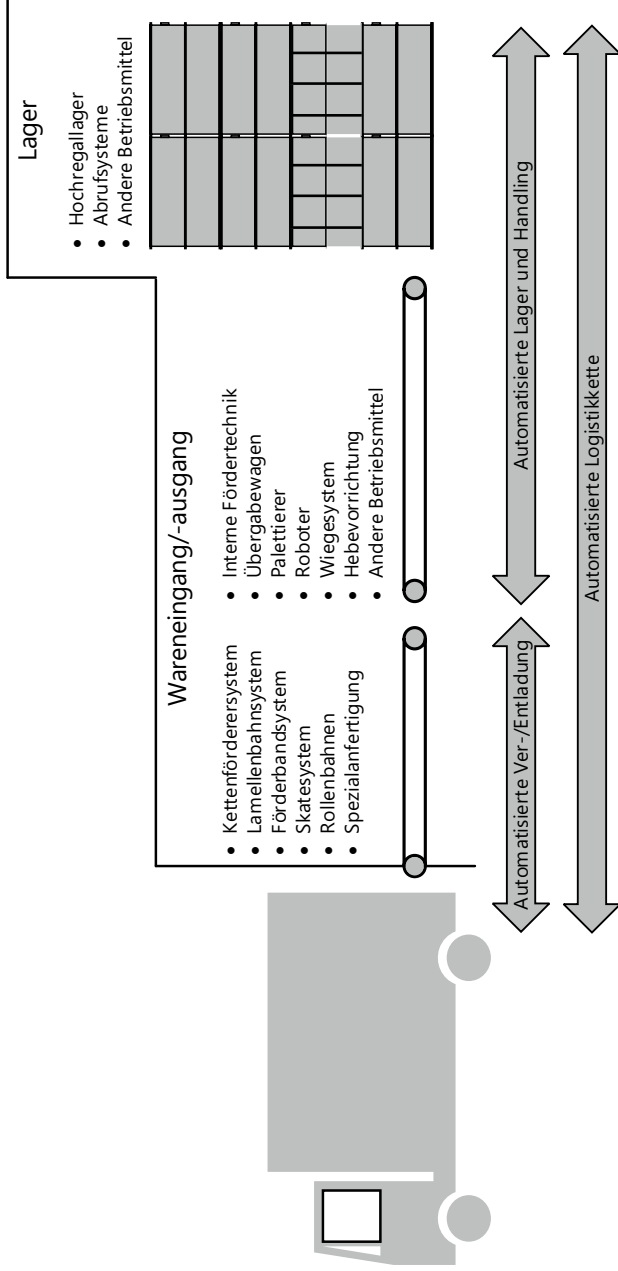
Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis von TB Digital Service (2020)

Für die Tätigkeiten des Güterflusses können je nach Prozess ebenfalls unterschiedliche Automatisierungstechnologien eingesetzt werden. Die automatisierte Be- und Entladung der Waren kann mit unterschiedlichen Systemen stattfinden. Hierbei gibt es Technologien wie den Expresslader oder mit Förderbändern ausgestattete Container. Der Expresslader ist ein System, bei dem die Waren vom Lagerpersonal auf eine Plattform geladen werden, die die Grundfläche eines Standard-Lkw-Aufliegers ($2,4 \text{ m} \times 13,6 \text{ m}$) misst (Logispeed 2019). Diese Plattform wird mit den Waren vollständig in den Lkw-Auflieger »geschoben«, sodass der Lkw nicht mehr manuell durch Lkw-Fahrende beladen werden muss, sondern die Prozesse vollständig im Warenausgang stattfinden können. Das Lagerpersonal sowie Flurförderzeuge werden jedoch weiterhin benötigt. Außerdem müssen die Auflieger für diese Art von Technologie ausgestattet sein.

Eine weitere Möglichkeit zur automatisierten Be- und Entladung ist die der integrierten Kettenförderersysteme (Ancra Systems BV 2010, S. 6). Hierbei ist es erforderlich, dass sowohl der Auflieger des Lkw mit Fördersystemen als auch der Warenausgang bzw. -eingang mit diesen ausgestattet ist, um eine ganzheitliche automatisierte Verladung und Entladung erwirken zu können. Das System wird mithilfe einer Kontrolleinheit gesteuert, die es ermöglicht, die Fördersysteme ein- und auszuschalten. Vorteile hierbei sind die Reduktion der Verladezeiten und die Reduzierung von Unfällen. Es werden jedoch hohe Investitionskosten sowie modifizierte Wareneingänge, -ausgänge und Auflieger erforderlich. Der Aufbau einer solchen Technologie ist in der nachfolgenden Abbildung 17 dargestellt.

Eine Alternative hierzu stellen Fahrerlose Transportsysteme (FTS) dar, die bereits in der innerbetrieblichen Logistik oder der Produktion eingesetzt werden, um Kommissionierplätze oder Produktionsstraßen mit Material oder Werkzeug zu versorgen. Sie könnten ebenfalls zur Be- und Entladung von Lkw eingesetzt werden. Diese Systeme wurden in der Vergangenheit in der Regel induktionsgeführt eingesetzt (Ullrich 2014, S. 2; Flämig 2015, S. 379). Eine Umstellung auf vollständig digitale Steuerungssysteme bietet den Vorteil, dass die Systeme flexibel eingesetzt werden können und »jegliches Stückgut« transportiert werden kann (Ullrich 2014, S. 11). Eine Induktionsführung im Fahrzeug wäre dann nicht nötig.

Abbildung 17: Automatisierte Umschlagtechnologien in Wareneingang und Warenausgang



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Ancra Systems BV (2010, S. 6)

Eine weitere wichtige Aufgabe der Berufskraftfahrenden ist die Ladungssicherung. Bei der automatisierten Beladung in Verladebahnen kann die Verladung von standardisierten Paletten auf den Bahnen exakt abgestimmt ausgelagert werden. Durch die enge Verladung ohne Unebenheiten im Fahrzeug entsteht eine sichere Verladung (logistikjournal 2009). Darüber hinaus kann eine automatisierte Ladungssicherung durch die Nutzung von Luftkissen erfolgen, die im Fahrzeug angebracht sind und sich automatisch befüllen und abpumpen (Meyer und Wiedemann 2008).

Die zuvor beschriebenen Veränderungen sind als potenzieller Technologieeinsatz zu verstehen. Alternative Automatisierungstechnologien könnten ebenfalls eingesetzt werden. Die Technologien bergen dabei unterschiedliche Chancen und Risiken. Auf der einen Seite können die Technologien Prozesszeiten verringern oder Informationen bündeln. Auf der anderen Seite sind die genannten Technologien bislang kaum in einem menschenlosen Umfeld eingesetzt worden. Sie verursachen einen Investitionsaufwand sowohl für innerbetriebliche Umbaumaßnahmen als auch für die Umrüstung bzw. Ausstattung des Lkw-Aufliegers. Des Weiteren gibt es Funktionen, wie die automatisierte Ladungssicherung, die bislang wenig entwickelt sind. Besonders bei nicht-standardisierten Stückgütern gibt es aktuell kaum passende Lösungen. Weitere Chancen und Risiken der Schnittstellentechnologien sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Technologien verdeutlicht, dass die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden sowie des Personals in der Warenübergabe durch Automatisierungstechnologien übernommen werden können.

Mit Einführung des fahrerlosen Fahrens und dem Wegfall der Berufskraftfahrenden, die aktuell einige der aufgelisteten Tätigkeiten durchführen, wird der Einsatz von Schnittstellentechnologien unumgänglich, sodass eine Zunahme fahrerloser Fahrzeuge auch zu einem Anstieg der Schnittstellentechnologien führt (+3). Gleichzeitig ersetzen die Technologien auch bestimmte Tätigkeiten in der Warenübergabe, sodass der Personalbedarf zur Be- und Entladung mit zunehmendem Anteil an Schnittstellentechnologien abnimmt (-3). Als Folge der Einführung von Schnittstellentechnologien ist darüber hinaus mit einer

Tabelle 9: Prozessbezogene Chancen und Risiken von automatisierten Schnittstellentechnologien im Güterfluss

Beteiligtes Personal	Prozesse	Schnittstellen-technologien	Chancen	Risiken
Güterfluss				
Berufskraftfahrende oder Personal in der Warenübergabe	Ware beladen / entladen	Expresslader	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung von Prozesszeiten • Kein Eingreifen durch die Lkw-Fahrenden erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> • Umrüstung der Infrastruktur sowohl beim versendenden als auch empfangenden Unternehmen • Umrüstung des Auflegers • Investitionsaufwand
		Kettenförderer	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Anpassung der vorhandenen Infrastruktur • Flexibler Einsatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichbleibende Umgebung erforderlich • Unfallrisiko
	Ladung sichern	Verladebahnen	<ul style="list-style-type: none"> • Sichere Position der Waren im Aufleger 	<ul style="list-style-type: none"> • Umrüstung des Auflegers
		Luftkissen	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisches Befüllen und Abpumpen 	<ul style="list-style-type: none"> • Umrüstung des Auflegers

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis von Logispeed (2019), Ancra Systems BV (2010, S. 6), Ullrich (2014, S. 11), Logistikjournal (2009), Meyer und Wiedemann (2008)

Zunahme der Personalqualifikation in der Warenübergabe zu rechnen (+2), da die Schnittstellentechnologien durch zusätzlich ausgebildetes Personal bedient werden. Mit zunehmender Personalqualifikation und steigendem Technologieeinsatz erhöhen sich die Kosten für die Warenübergabe. Auf die Kosten für die Warenübergabe wirkt sich die Zunahme an Schnittstellentechnologien daher sehr stark gleichgerichtet aus (+3). Im Expertenworkshop wurde zudem ermittelt, dass sich die Erhöhung der Schnittstellentechnologien leicht gleichgerichtet auf die Lieferzuverlässigkeit und die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge auswirkt (+1), sodass beide Variablen zunehmen.

7.1.2.2 Personalbedarf zur Be- und Entladung

Durch die Einführung des automatisierten Fahrens kann sich das Tätigkeitsprofil der Berufskraftfahrenden verschieben. Short und Murray (2016) nennen als mögliche erweiterte Verantwortungsbereiche der Lkw-Fahrenden die dynamische Routenplanung, administrative Aufgaben und eine Zunahme des Kundendienstes durch E-Mail und telefonische Kommunikation (Short und Murray 2016, S. 28). Diese Tätigkeiten müssten mit Einführung des automatisierten Fahrens in die Ausbildung der Berufskraftfahrenden integriert werden. Zusätzlich müssen diese in der Lage sein, die Fahrzeugsysteme fachgerecht zu steuern und zu kontrollieren, um die manuelle Steuerung im spezifischen Anwendungsfall wieder zu übernehmen. Mit zunehmender Komplexität der Fahrzeugsysteme könnte eine technische Ausbildung zusätzlich erforderlich werden. Für das hoch- und vollautomatisierte Fahren (Stufe 3 und 4) könnte es daher zu einer Verschiebung der Personalqualifikation kommen.

Mit Umsetzung des fahrerlosen Fahrens würde die Steuerung und Kontrolle des Fahrzeugs vollständig als Tätigkeit der Berufskraftfahrenden entfallen. Administrative Tätigkeiten könnten während der Fahrt nicht übernommen werden. Short und Murray (2016, S. 28) führen jedoch an, dass es einige Tätigkeiten gibt, die nur schwierig durch ein Automatisierungssystem ersetzt werden können, wie z. B. Be- und Entladung, Kommunikation mit versendenden oder empfangenden Unternehmen oder der Güterumschlag. Insbesondere im Hinblick auf nicht standardisierte Prozesse oder Güter mit spezifischen Anforderungen, wie

Gefahrgüter, müssen die zuständigen Personen adäquat ausgebildet und qualifiziert für den Umgang mit den Anforderungen sein.

Flämig (2015, S. 391), Fagnant und Kockelmann (2015, S. 171) sowie Engholm et al. (2020, S. 513) argumentieren daher, dass das Personal der Warenübergabe die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden mit Einführung des fahrerlosen Fahrens übernimmt. Dadurch würde der Personalbedarf in der Warenübergabe deutlich ansteigen. Es wird folglich eine stark gleichgerichtete Wirkung abgeleitet (+2).

Zwischen der Zunahme des Personalbedarfs zur Be- und Entladung und den Kosten für Warenübergabe besteht eine sehr stark gleichgerichtete Wirkung (+3), da die Personalkosten für die Warenübergabe mit steigendem Personalbedarf zunehmen.

Auch zur Variable »Lieferzuverlässigkeit« besteht eine leicht gleichgerichtete Wirkungsweise (+1), die ebenfalls dazu führt, dass mit zunehmendem Personalbedarf die Lieferzuverlässigkeit steigt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Lieferzuverlässigkeit zunimmt, da mehr Personal zur Verfügung steht, das die ankommenden und abgehenden Fahrzeuge be- und entladen kann und daher Liefertermine eingehalten werden.

Eine Zunahme des Personalbedarfs zur Be- und Entladung wirkt sich dagegen stark entgegengerichtet auf den Anteil an Schnittstellentechnologien aus (-2), sodass mit zunehmendem Bedarf an Personal, der Einsatz an Schnittstellentechnologien sinkt. Hierbei liegt die Argumentation zugrunde, dass das zusätzliche Personal die Tätigkeiten der Schnittstellentechnologien übernehmen kann. Darüber hinaus führt der steigende Bedarf auch zu einer leicht entgegengerichteten Wirkung auf die Personalqualifikation (-1), die ebenfalls sinkt, da mehr Personal zur Be- und Entladung erforderlich wird und weniger für die Bedienung von Schnittstellentechnologien mit zusätzlicher Qualifikation.

7.1.2.3 Personalqualifikation

Wie bereits in den Abschnitten 7.1.2.1 und 7.1.2.2 beschrieben, kann die Einführung von Schnittstellentechnologien zu einem höheren Qualifikationsgrad des Personals führen.

Im Rahmen des Workshops sowie auf Grundlage der vorangegangenen Literatur wird abgeleitet, dass eine zunehmende Personalqualifikation zu einer stark gleichgerichteten Wirkung auf die Kosten für die Warenübergabe führt (+2), welche ansteigen. Hierbei wird argumentiert, dass für höher qualifiziertes Personal auch die Personalkosten ansteigen.

Im Workshop wurde eine leicht gleichgerichtete Wirkung auf die Variablen »Lieferzuverlässigkeit« und »Schnittstellentechnologien« identifiziert (+1). Mit zunehmender Personalqualifikation wird angenommen, dass Lieferungen zeitlich und qualitativ effizienter abgewickelt werden können. Darüber hinaus ermöglicht ein höheres Qualifikationsniveau der Mitarbeitenden das Potenzial Schnittstellentechnologien einzuführen.

Eine leicht entgegengerichtete Wirkung tritt hingegen zum Personalbedarf für die Be- und Entladung auf (-1). Mit ansteigender Personalqualifikation geht der Personalbedarf zur Be- und Entladung zurück, da die vorhandenen Mitarbeitenden die Tätigkeiten effizienter übernehmen.

7.1.2.4 Kosten für die Warenübergabe

Bei der Diskussion des fahrerlosen Fahrens bleiben die Kosten für logistische Knoten (englisch »node costs«) bislang wenig berücksichtigt. Diese werden bei Engholm et al. (2020) mit in die TCO-Betrachtung fahrerloser Fahrzeuge einbezogen. Knotenkosten sind Kosten, die am logistischen Knoten im Rahmen des Transportprozesses anfallen, wie für die Be- und Entladung des Fahrzeugs. Hierbei handelt es sich sowohl um volumen- als auch zeitbezogene Komponenten. Engholm et al. (2020) unterscheiden den Arbeitsaufwand dabei nicht zwischen herkömmlichem und fahrerlosem Lkw. Es wird mit der Annahme gearbeitet, dass die Arbeit von Personal am Knoten übernommen wird. Bei einem herkömmlichen Lkw (40 t zGG) betragen die Knotenkosten 58 US-Dollar pro 1.000 km (Engholm et al. 2020, S. 513). Das sind etwa 23 % der Gesamtkosten. Bei einem automatisierten Lkw (40 t zGG) liegen die Knotenkosten zwischen 25 % und 40 % an den Gesamtkosten.

Kosten für die Warenübergabe können sowohl für Personal als auch für die Umrüstung der Schnittstellen anfallen. Zu den Schnittstellen

gehören zum einen die Immobilien und zum anderen die Fahrzeuge. Wie bereits in Abschnitt 7.1.2.1 beschrieben, können für den Wareneingang und -ausgang sogenannte Expresslader, Kettenförderer oder Fahrerlose Transportsysteme eingesetzt werden. Die Kosten hierzu sind jedoch vom Individualfall abhängig. Für die Umrüstung von Fahrzeugen für die Be- und Entladung mithilfe des Expressladers werden beispielsweise etwa 5.000 Euro pro Fahrzeug veranschlagt (Complete Logistics Systems international GmbH 2021).

Aufbauend darauf stellt sich damit die Frage, welche zusätzlichen Kosten durch den Wegfall der Berufskraftfahrenden hervorgerufen werden. Die Prozesse können entweder durch Begleitpersonen oder durch Automatisierungstechnologien übernommen werden. In beiden Fällen ist es jedoch betriebswirtschaftlich wichtig, dass die Kosten unterhalb der Einsparungen durch den Wegfall der Berufskraftfahrenden liegen, andernfalls wäre ein solches Einsatzszenario für Transportunternehmen nicht wirtschaftlich.

Die Entscheidung zur Implementierung von Schnittstellentechnologien ist mit Investitionskosten verknüpft, die die versendenden und empfangenden Unternehmen tragen müssen. Es kann daher bei Einführung des fahrerlosen Fahrens zu einem Anstieg der Kosten für die Warenübergabe durch zusätzliche Investitionskosten kommen (+2). Langfristig könnten diese Investitionen allerdings durch einen reduzierten Personalbestand ausgeglichen werden, da weniger Personal für die Durchführung der Wareneingangs- und Warenausgangsprozesse benötigt wird und somit Personalkosten sinken (-3).

Die zunehmenden Kosten für die Warenübergabe wirken sich auf die Schnittstellentechnologien stark gleichgerichtet aus (+2). Hierbei wird argumentiert, dass zunehmende Kosten mit dem Einsatz von Schnittstellentechnologien ausgeglichen werden sollen, da die Personalkosten die Kosten für Schnittstellentechnologien deutlich übersteigen.

Werden die Warenübergänge mit Automatisierungstechnologien ausgestattet, müssen sich auch die fahrerlosen Fahrzeuge diesen Technologien anpassen. Daher steigen auch die TCO mit zunehmenden Kosten für die Warenübergabe (+1), sodass eine leicht gleichgerichtete Wirkung auftritt.

7.1.3 Perspektive der Transportunternehmen

Die Perspektive der Transportunternehmen umfassen die Veränderung fahrerloser Fahrzeuge, der Antriebstechnologie, der Berufskraftfahrenden, der TCO sowie der THG-Emissionen. Im nachfolgenden Abschnitt werden die erwarteten Wirkungen durch das fahrerlose Fahren anhand der Literatur beschrieben.

7.1.3.1 Fahrerlose Fahrzeuge

Zur Umsetzung des fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr bedarf es unterschiedlicher Fahrzeugtechnologien, wie in Abschnitt 2.4 bereits beschrieben. Die Tabelle 10 zeigt anhand der Automatisierungsstufen nach SAE International (2014), welche Technologien zum fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr erforderlich sind.

Es wird angenommen, dass Güter mit einem fahrerlosen Fahrzeug transportiert werden, das sich ohne menschliches Einwirken vom versendenden zum empfangenden Unternehmen bewegt. Dieses Fahrzeug muss sowohl mit einem Computer als auch mit im Fahrzeug integrierten Sensoren (z. B. Radar, Lidar, Kamerasysteme oder Wärmefühler) ausgestattet sein, welche das Fahrzeug und die Fracht dauerhaft überwachen und kontrollieren. In technischer, rechtlicher als auch gesellschaftlicher Hinsicht besteht jedoch die Herausforderung eine einsatzfähige Technologie zu entwickeln und diese in den bestehenden Verkehr zu integrieren. Das Fahrzeug sollte sich dabei nicht nur im öffentlichen Straßenraum, sondern auch auf dem Betriebsgelände, insbesondere beim Andockvorgang an die Rampe, fahrerlos bewegen.

Krail et al. (2019) prognostizieren die Einführung der unterschiedlichen Automatisierungsstufen im Zeitverlauf. Sie gehen davon aus, dass im Jahr 2015 bereits das teilautomatisierte Fahren, ab dem Jahr 2019 das hochautomatisierte Fahren, ab dem Jahr 2026 das vollautomatisierte Fahren und letztlich ab dem Jahr 2035 das fahrerlose Fahren eingeführt wird. Der Anteil am Fahrzeugbestand in Deutschland liegt in der Prognose zwischen 80 und 90 % mit zunehmender Tendenz. Das fahrerlose Fahren wird parallel zu assistierten und vollautomatisierten Fahrzeugen auftreten und die anderen Technologien schrittweise verdrängen bis im Jahr 2050 nur noch weniger als 10 % assistierte Fahrzeuge und 80 % fahrerlose Fahrzeuge den Fahrzeugbestand ausmachen (Krail et al. 2019, S. 106).

Tabelle 10: Technologien der Automatisierungsstufen nach SAE International (2014) für schwere Nutzfahrzeuge

Technologien	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Onboard Navigationssystem mit Echtzeit-Rerouting	x	x	x	x	
Automatisiertes Eco-Driving mit V2V-Vernetzung	x	x	x	x	
Predictive Cruise Control (PCC)	x				
Adaptive Cruise Control (ACC)	x				
Baustellenassistent	x				
Lane Keeping Assist (LKA)	x				
Parklenkassistent	x				
Highway-Assist		x			
Traffic Jam-Assist		x			
Platooning		x	x	x	
Pilotiertes Parken		x	x		
Highway Chauffeur			x		
Traffic Jam Chauffeur			x		
Highway Pilot				x	
Traffic Jam Pilot				x	
Valet Parking				x	
Urban Pilot				x	
Fahrerloses und vernetztes Fahren					x

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Krail et al. (2019, S. 26f.)

Wie bereits in der Literaturanalyse deutlich wurde, kann das fahrerlose Fahrzeug einen Einfluss auf fast alle Variablen im System haben. Es wird zunehmend Technologie im Fahrzeug erforderlich, die mit Kosten verbunden ist. Das fahrerlose Fahren führt folglich zu einer starken Zunahme der TCO (+3). Auch werden für die Warenübergabe Schnittstellentechnologien notwendig, sodass die Prozesse fahrerlos ablaufen können. Aus diesem Grund besteht auch zu dieser Variable eine sehr stark gleichgerichtete Wirkung (+3). Zwischen dem Anstieg der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge und den Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Lieferzuverlässigkeit«, »Personalbedarf zu Be- und Entladung« sowie »Kosten für Warenübergabe« besteht ebenfalls eine stark gleichgerichtete Wirkung (+2). Eine leicht entgegengerichtete Wirkung besteht zur Variable »Fahrzeugauslastung«, sodass mit der Zunahme der Marktdurchdringung die Fahrzeugauslastung leicht vermindert werden (-1). Die Wirkungen wurden in den Abschnitten zuvor bereits erläutert.

Die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens auf die Variablen »Antriebstechnologie«, »Berufskraftfahrenden«, »TCO«, »THG-Emissionen«, »Verkehrsunfälle«, »Stauaufkommen«, »Infrastrukturnutzung«, »Infrastrukturkosten« und »Stellplatzbedarf« werden in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben.

7.1.3.2 Antriebstechnologie

Die Erhöhung des Lkw-Bestands im urbanen Raum ist laut Williams et al. (2017) nicht möglich, außer die Fahrzeugflotte wird auf alternative Antriebe umgestellt. Bei der Implementierung automatisierter Lkw muss daher auch die Antriebsart überdacht werden, damit bei einem Anstieg der Fahrzeugzahlen die Emissionswerte nicht zusätzlich zunehmen (Williams et al. 2017, S. 47).

Im Bereich der automatisierten Fahrzeugentwicklungen sind die Entwicklungen im Personenverkehr deutlich weiter vorangeschritten. Fahrzeuge des Unternehmens Tesla, die über eine hohe Automatisierung ihrer Fahrzeugsysteme verfügen, sind mit einem batterieelektrischen Antrieb ausgestattet (Tesla 2021). Auch automatisierte Personen-Shuttle der Unternehmen Navya oder Easymile verfügen ausschließlich über einen batterieelektrischen Antrieb (NAVYA 2021a; Easymile 2021a).

Beide Unternehmen haben darüber hinaus automatisierte Zugmaschinen entwickelt, die beispielsweise Gepäck an Flughäfen transportieren. Auch diese Fahrzeuge sind mit batterieelektrischen Antrieben ausgestattet (NAVYA 2021b; Easymile 2021b).

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge ist die Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) hingegen deutlich weniger fortgeschritten. Herausforderungen liegen in der erforderlichen Batterie(-größe), wodurch zum heutigen Zeitpunkt ein hoher Anteil des Zuladungsvolumens und -gewichts verloren gehen wird. Ein Beispiel für die erfolgreiche Entwicklung eines batterieelektrischen, fahrerlosen Fahrzeugs liefert das schwedische Unternehmen Einride, das ein solches Fahrzeug entwickelt hat. Auch das Unternehmen DB Schenker hat bereits fahrerlose batterieelektrische Lkw erprobt. Mit dem Kleinbus EMIL, der über einen batterieelektrischen Antrieb verfügte, wurde ebenfalls das automatisierte Fahren getestet (Bertrandt 2018).

Alternativen zum rein batterieelektrischen Antrieb liegen im Güterverkehr in der Entwicklung von Oberleitungs-Lkw, die sowohl batterieelektrisch als auch hybride Antriebe besitzen können, sowie in der Entwicklung von Wasserstoff-Lkw (Wietschel et al. 2017). Einen Vorteil bietet die Möglichkeit zur Nutzung von Oberleitungsstrecken für fahrerlose Fahrzeuge. Oberleitungs-Strecken könnten in der Zukunft speziell für fahrerlose Lkw eingerichtet werden, sodass die Fahrzeuge einerseits einen Orientierungspunkt haben und andererseits weniger Einflüsse anderer Verkehrsteilnehmenden unterliegen.

Es kann angenommen werden, dass Fahrzeuge, die speziell für die automatisierte Fahrt konstruiert sind, in der Regel auch mit einem batterieelektrischen Antrieb ausgestattet werden. Die Entwicklungen erfolgen bislang parallel.

Im Rahmen des Workshops wurde ermittelt, dass zwischen der Zunahme an batterieelektrischen Antrieben und den Infrastrukturkosten eine sehr stark gleichgerichtete Wirkungsweise (+2) besteht. Die Kosten für die Straßeninfrastruktur werden durch den Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge deutlich erhöht, da Ladeinfrastruktur oder Oberleitungen ausgebaut werden müssen. Auf die Kosten für die Warenübergabe sowie die TCO wirkt sich die zunehmende batterieelektrische Antriebstechnologie leicht gleichgerichtet aus (+1), wodurch die Kosten in beiden Fällen,

durch die erforderliche Technologie zum einen bei den versendenden und empfangenden Unternehmen und zum anderen im Fahrzeug, ansteigen. Eine Zunahme an batterieelektrischen Antrieben führt dagegen zu einer sehr stark entgegengerichteten Wirkung auf die THG-Emissionen (-3), da der Kraftstoffausstoß im Güterverkehr deutlich reduziert wird und somit THG-Emissionen sinken. Batterieelektrische Fahrzeuge werden in einer Tank-to-Wheel (TtW) Betrachtung mit Null CO_{2e} angenommen (infras 2022).

7.1.3.3 Berufskraftfahrende

Durch die Einführung des fahrerlosen Fahrens fallen langfristig die Arbeitsplätze der Berufskraftfahrenden weg. Nowakowski et al. (2015, S. 2947) nennen die Reduzierung der Arbeit als möglichen ökonomischen Vorteil durch das autonome Fahren. Die Automatisierungssysteme erlauben die Anzahl an erforderlichen Fahrenden zu reduzieren. Auch Fragnant und Kockelmann (2015, S. 171) sprechen von einer Verringerung des Bedarfs an Berufskraftfahrenden. Zwar wird Personal weiterhin zur Be- und Entladung des Fahrzeugs erforderlich, während des reinen Transportprozesses werden jedoch keine Fahrenden mehr benötigt sein. Freedman (2017, S. 63) beschreibt ebenfalls den Wandel der Berufskraftfahrenden durch autonome Fahrzeuge. Demnach wird ein vollständiger Wegfall in den nächsten Jahren zwar nicht einsetzen, aber eine Veränderung der Situation ist insbesondere auf den langen Transportdistanzen zu erwarten. Williams et al. (2017, S. 46) benennen ebenso die Reduzierung der Berufskraftfahrenden sowie die Reduktion des Arbeitspensums als mögliche Auswirkung des autonomen Fahrens im Güterverkehr. Clements und Kockelmann (2017, S. 6) gehen soweit, dass sie von einem langfristigen Wegfall des Berufs ausgehen.

Auf den Arbeitsplatzverlust nicht nur von Berufskraftfahrenden (Güterverkehr/Lkw) sondern auch von Taxifahrenden weist Wadud (2017) hin. Im Jahr 2016 waren etwa 400.000 Lkw-Fahrende und knapp 300.000 Taxifahrende in Großbritannien, rund 3,5 Millionen Fahrende in den

USA im Güterverkehr sowie etwa eine Million Menschen weltweit bei Uber beschäftigt. Die Einführung des autonomen Fahrens könnte diese Arbeitsplätze ersetzen (Wadud 2017, S. 174).

Das Internationale Transport Forum (2017) erwartet ebenfalls einen Rückgang der Berufskraftfahrenden. Es wird prognostiziert, dass dieser sogar schneller erfolgen kann als der Rückgang durch den Eintritt der aktuellen Fahrenden in das Rentenalter. Von 6,4 Millionen Arbeitsplätzen in Europa und den USA im Jahr 2030 könnten zwischen 3,4 und 4,4 Millionen Lkw-Fahrende redundant werden, wenn die Einführung autonomer Lkw schneller erfolgen sollte (International Transport Forum 2017, S. 7).

Basierend auf den Annahmen zum Fahrzeugbestand nach Krail et al. (2019, S. 106) ist davon auszugehen, dass der Rückgang der Berufskraftfahrenden erst ab dem Jahr 2036 erfolgen wird. Dabei kann ein Rückgang der Berufskraftfahrenden in einem Zeitraum von 15 Jahren bis zum Jahr 2050 von ca. 90 % abgeleitet werden.

Insgesamt zeigt die Literatur, dass das fahrerlose Fahren zu einem sehr starken Rückgang an Berufskraftfahrenden führen kann (-3). Darüber hinaus wirkt sich die Variable »Berufskraftfahrende« sehr stark gleichgerichtet auf die TCO aus (+2). Im Workshop wurde festgehalten, dass eine zunehmende Anzahl der Berufskraftfahrenden gleichzeitig auch Personalkosten als Bestandteil der TCO erhöht. Auf die Variable »Stellplatzbedarf« ist ebenfalls eine stark gleichgerichtete Wirkung auszumachen (+2). Durch die zunehmende Anzahl an Fahrenden werden mehr Stellplätze erforderlich, um Pausen- und Ruhezeiten einzuhalten. Auf die Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Verkehrsunfälle« wirkt sich die zunehmende Anzahl von Berufskraftfahrenden leicht gleichgerichtet aus (+1).

Die Variable »Schnittstellentechnologien« wird ähnlich der Variable »Fahrerloses Fahrzeug« stark entgegengerichtet beeinflusst (-2). Die Zunahme der Berufskraftfahrenden führt zu einem Rückgang der Schnittstellentechnologien und der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge, da die herkömmlichen Prozesse durch die Berufskraftfahrenden übernommen werden und daher keine zusätzliche Technologie erforderlich

ist. Die Variable »Personalbedarf zur Be- und Entladung« wird ebenfalls leicht entgegengerichtet beeinflusst (-1).

7.1.3.4 Total Cost of Ownership

Der Rückgang der Berufskraftfahrenden wirkt sich direkt auf die TCO aus. TCO sind die für die Anschaffung, Nutzung und ggf. Entsorgung von Produkten entstehenden Kosten (Ellram 2002, S. 660). Nach Wittenbrink (2014, S. 73f.) setzen sich diese aus allen Personal-, Material- und kalkulatorischen Kosten zusammen, die für den Transport von Gütern anfallen. Diese können in fixe (zeitabhängige), variable (kilometerabhängige) und Personalkosten unterschieden werden: Fixe Kosten beinhalten beispielsweise Zeitabschreibungen, Zinskosten, Steuern oder Versicherungen, wohingegen variable Kosten Kraftstoffkosten, AdBlue-Kosten oder Reparatur- und Instandhaltungskosten umfassen. Die Personalkosten sind die Kosten, die für die Berufskraftfahrenden aufgebracht werden müssen.

In der Literatur sind unterschiedliche Kostenberechnungen bereits durchgeführt worden, die sowohl für das automatisierte als auch für das fahrerlose Fahren Kostenveränderungen prognostizieren. Die Tabelle 11 zeigt eine Sammlung unterschiedlicher Kostenveränderungen auf Grundlage der Literatur. Die prozentuale Veränderung bildet den Mittelwert der Werte aus den aufgeführten Quellen.

Lunkeit et al. (2019) berechnen mithilfe eines systemdynamischen Modells mögliche Veränderungen der Transportkosten, die durch die zunehmende Marktdurchdringung autonomer Fahrzeuge auftreten können. Hierbei wurde ein System Dynamics Modell verwendet, das annimmt, dass nach 50 Jahren eine 99-prozentige Marktdurchdringung mit autonomen Lkw im Straßengüterfernverkehr vorliegt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Einsparung der Personalkosten, finanzielle Vorteile erreicht werden können. Wird jedoch von einem Anstieg der Transportleistung durch die autonomen Fahrzeuge ausgegangen, kann es zu einer Erhöhung der Transportkosten kommen. Diese wird aufgrund steigender Kraftstoffkosten in Summe aller Fahrzeuge verursacht, die die Vorteile durch die eingesparten Personalkosten substituieren (Lunkeit et al. 2019, S. 126). Die Veränderung der Transportkosten durch die Einführung von fahrerlosen Fahrzeugen ist demnach direkt mit anderen Variablen, wie der Transportleistung oder dem Kraftstoffverbrauch, verknüpft.

Tabelle 11: Potenzielle Kostenveränderungen aufgrund des automatisierten und des fahrerlosen Fahrens

Kostengröße	Automatisiert	Fahrerlos	Veränderung	Quelle
Anschaffungskosten	+15%	+21%	↗	(Krail et al. 2019; Roland Berger 2016)
Versicherungskosten	-9%	-14%	↘	(Engholm et al. 2020; Krail et al. 2019)
Wartungs- & Reparaturkosten	+20%	-7%	↗↘	(Engholm et al. 2020; Krail et al. 2019)
Endenergieverbrauch	-9%	-11%	↘	(Krail et al. 2019; Roland Berger 2016)
Personalkosten für Berufskraftfahrende	-60%	-89%	↘	(Engholm et al. 2020; Krail et al. 2019; Roland Berger 2016)
Kosten für Ausfalltage	-60%	-89%	↘	Ableitung aus Personalkosten

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Fraglich ist, welche zusätzlichen Fahrzeugkosten durch die Einführung des fahrerlosen Fahrens entstehen. Die Technologiekosten sind derzeit nicht direkt in den Investitionskosten von Fahrzeugen enthalten, könnten aber für die Investitionskosten von Bedeutung sein. Je höher der Automatisierungsgrad, desto mehr Technologie ist im Fahrzeug installiert. Auch Short und Murray (2016, S. 28) weisen darauf hin, dass das automatisierte Fahren insbesondere für »Early Adopters« zu einer Erhöhung der Equipmentkosten führen kann.

Eine quantitative Abschätzung der Unternehmensberatung Roland Berger im Jahr 2016 zeigt, dass pro Automatisierungsstufe zusätzliche Technologiekosten für Software und Hardware anfallen. Bei einem fahrerlosen Lkw werden Zusatzkosten in Höhe von über 20.000 Euro (23.400 US-Dollar) prognostiziert, wobei etwa 85 % der Kosten auf die Software und 15 % auf die Anschaffungen für zusätzliche Hardware zurückgeführt werden. Die Werte basieren auf Expertenbefragungen (siehe Tabelle 12) (Roland Berger 2016, S. 11).

Tabelle 12: Zusatzkosten für Automatisierungstechnologie

Auto- matisierungs- stufe	Zusatzkosten (in US-Dollar)	Hardware	Software
Stufe 1	+1.800	<ul style="list-style-type: none"> • Langstreckenradar • Kurzstreckenradar (Abtastung in Längsrichtung) • Verkabelung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitung von Sensordaten von ACC und/oder Spurunterstützung behalten
Stufe 2	+5.100	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzstreckenradar (seitliches Abtasten) • Automatisierte Lenkung • Frontkamera • Mensch-Maschine-Schnittstelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitung von zusätzlichem Sensoreingang • Höheres Niveau von umgebungsbedingter Erkennung erforderlich
Stufe 3	+6.200	<ul style="list-style-type: none"> • Innenkamera • Zentrale elektronische Kontrolleinheit • Lidar • Konnektivitätssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> • Höheres Niveau an Sensorik für bedingten Ersatz von Sinneswahrnehmung erforderlich
Stufe 4	+5.900		<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Automatisierung von Abtastverfahren für spez. Umgebung • Berechnung von Umgebungskarte
Stufe 5	+4.400		<ul style="list-style-type: none"> • Fähigkeit zur Korrektur von unbekanntem Variablen in jeder Situation erforderlich
Gesamt	+23.400		

Quelle: Eigene Zusammenstellung in Anlehnung an Roland Berger (2016, S. 11)

Im Rahmen der Studie »Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport« aus dem Jahr 2017 durch das Internationale Transport Forum prognostizieren die Projektbeteiligten die zusätzlichen Kosten für fahrerlose Fahrzeuge auf unter 5 % der Gesamtkosten für einen Lkw. Bei einem Anschaffungswert einer Sattelzugmaschine von rund 100.000 Euro würden sich die zusätzlichen Kosten für Technologie folglich auf etwa 5.000 Euro belaufen. Dieser Wert ist allerdings abhängig von Angebot und Nachfrage nach fahrerlosen Fahrzeugen am Markt und kann durch kurzfristige Angebotsengpässe stark beeinflusst werden. Langfristig können die Fahrzeuge jedoch kostengünstiger durch den Wegfall der Fahrzeug- und Schlafkabine im Vergleich zum herkömmlichen Langstreckenfahrzeug sein (International Transport Forum 2017, S. 20f.).

Wadud (2017) führt eine TCO-Analyse für vollautomatisierte, kommerzielle Fahrzeuge in Großbritannien durch. Dabei werden Kosten für Technologien, wie GPS-Systeme, Lidar oder Videokameras im Fahrzeug berücksichtigt. Auf Grundlage der Literatur wird mit unterschiedlichen Lernraten ein optimistisches, pessimistisches und ein Referenzszenario angenommen (KPMG o. J.; Bansal und Kockelmann 2017; Mosquet et al. 2015). Bei einem Lkw von 7,5 t zGG liegen die Automatisierungskosten zwischen 12.800 und 20.100 Euro. Bei einem Lkw von 18 t zGG werden in der Studie Technologiekosten zwischen 13.400 und 21.000 Euro angenommen. Wadud (2017, S. 169f.) geht bei einem Lkw von 38 t zGG von Automatisierungskosten zwischen 14.000 und 22.000 Euro aus. In der Studie liegen die Technologiekosten folglich zwischen 20 und 50 % vom Anschaffungswert des jeweiligen Fahrzeugs. Dieser Wert ist vergleichbar mit den Ergebnissen von Roland Berger (2016) für das vollautomatisierte Fahren nach SAE International (2014) Stufe 5.

Die potenziellen Kosten für zusätzliche Technologie eines fahrerlosen Fahrzeugs schwanken folglich zwischen etwa 5 und 50 % vom Anschaffungswert. Technologiekosten von etwa 50 % sind voraussichtlich nur in der Implementierungsphase des fahrerlosen Fahrens zu erwarten. Sowohl Wadud (2017, S. 168) als auch das Internationale Transport Forum (2017, S. 21) merken an, dass die Kosten langfristig aufgrund von Massenproduktion und weiterer Entwicklung sinken werden.

Die Diskussion der TCO verdeutlicht, dass sich das fahrerlose Fahren deutlich auf die Entwicklung der Kosten auswirkt. Die Anschaffungskosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie Versicherungskosten verändern sich durch das fahrerlose Fahren. Technologiekosten zwischen 5 und 20 % vom Anschaffungswert gelten basierend auf der vorangegangenen Diskussion als realistischeres Szenario. Die Veränderung der Kosten wird jedoch in erster Linie durch die Veränderung des Personals sowie der Antriebstechnologie hervorgerufen. Es ist folglich ein sehr starker Rückgang (+3) der Kosten durch die Reduktion der Berufskraftfahrenden zu erwarten, da die Personalkosten etwa 30 % der regulären TCO umfassen (Wittenbrink 2014, S. 116).

Im Workshop wurde zudem ermittelt, dass sich die steigenden TCO auf die Fahrzeugauslastung leicht gleichgerichtet auswirken (+1), sodass die Fahrzeugauslastung steigt, da die Transporte mit zunehmenden Kosten besser ausgelastet werden, um wiederum Kosten einzusparen. Eine Zunahme der TCO wirkt sich stark entgegengerichtet auf die Straßen-transportnachfrage aus (-1), da mit steigenden Kosten die Attraktivität für Straßentransporte sinkt. Auch die Fahrzeugfahrleistung wird leicht entgegengerichtet beeinflusst (-1), sodass auch diese mit steigenden TCO abnimmt.

7.1.3.5 THG-Emissionen

Die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens auf die Luftverschmutzung werden in der Literatur mit unterschiedlicher Detaillierung thematisiert.

Roland Berger (2016, S. 4) benennen lediglich Emissionsreduzierung als Wirkung automatisierten Fahrens auf die Gesellschaft. Ähnlich dazu zählt das Internationale Transport Forum (2017, S. 7) verringerte Emissionen als mögliche Wirkung automatisierter Lkw auf. Fitzpatrick et al. (2017, S. 1) nennen ebenfalls als potenzielle Auswirkung des automatisierten Fahrens von schweren Lkw die Reduzierung von Umwelteinflüssen. Aufgrund der fehlenden Spezifizierung in der Literatur geben Fitzpatrick et al. (2017, S. 67) daher als Empfehlungen an, dass eine Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen autonomer Lkw vorgenommen werden sollte, da es nur wenige Informationen darüber gibt, wie sich die

Technologie auf den allgemeinen Verkehrsablauf und die Luftemissionen auswirken wird.

Wadud et al. (2016) nehmen eine solche detaillierte Analyse für die Wirkungen von hochautomatisierten Lkw auf die transportbedingten Energie- und Kohlenstoffverbräuche vor. Mithilfe von Szenario-berechnungen sollen quantifizierbare Wirkungen ermittelt werden. Wichtige Erkenntnisse sind, dass das automatisierte Fahren das Potenzial zu einer wesentlichen Reduzierung des Energieverbrauchs und von Emissionen aufweist. Diese Reduzierungen sind jedoch nicht sicher, da sie nicht direkt durch die Automatisierung auftreten, sondern durch andere Faktoren, wie das Fahrzeugdesign, den Fahrzeugbetrieb oder eine zunehmende Konnektivität der Fahrzeuge. Im Gegensatz dazu steht, dass Verkehr und Kraftstoffverbrauch deutlich zunehmen können, wenn die Automatisierung zu einer Reduzierung der Kosten aber keine ausreichenden Vorteile bei der Energieintensität erzielt werden (Wadud et al. 2016, S. 11f.). Es wurde zudem festgestellt, dass die Vorteile bei geringeren Automatisierungsstufen deutlich höher ausfielen als bei zunehmender Automatisierung, weshalb angeraten wird, dass die Politik frühzeitig eingreift, um mögliche negative Effekte zu verhindern (Wadud et al. 2016, S. 12).

Auf Basis der geringen Informationsgrundlage wird angenommen, dass das fahrerlose Fahren nur einen leichten Rückgang der THG-Emissionen bewirkt. Ein stärkerer Einfluss wird durch die Fahrzeugfahrleistung, die Antriebstechnologie und das Stauaufkommen erwartet.

Der Rückgang der THG-Emissionen wirkt sich ausschließlich auf die Infrastrukturkosten leicht gleichgerichtet aus (+1). Es ist davon auszugehen, dass mit steigenden Emissionen auch die Infrastrukturkosten zunehmen.

7.1.4 Perspektive der Politik

In diesem Abschnitt wird die Perspektive der Politik detaillierter betrachtet. Diese umfasst die erwarteten Wirkungen des fahrerlosen Fahrens auf das Stauaufkommen, die Verkehrsunfälle, die Infrastrukturnutzung, die Infrastrukturkosten und den Stellplatzbedarf.

7.1.4.1 Stauaufkommen

Das automatisierte Fahren hat das Potenzial, Staus zu reduzieren und den Verkehrsfluss zu verbessern. Beispielsweise zählt die Unternehmensberatung Roland Berger (2016) auf, dass Stau durch automatisierte Lkw adressiert wird, da geringere Distanzen zwischen Fahrzeugen zu einer Reduzierung der genutzten Straßenfläche führen können. Dies hat zum einen Auswirkungen auf die Flottenbetreiber als auch auf die Gesellschaft (Roland Berger 2016, S. 4). Bereits in den Projekten PATH und CHAUFFEUR I und II konnte gezeigt werden, dass die Kopplung von Fahrzeugen eine Reduzierung des Sicherheitsabstandes ermöglicht (Geißler 2001; Shladover et al. 2005).

Short und Murray (2016) geben an, dass autonome Fahrzeugsysteme das Potenzial haben, effizienter zu sein als Menschen. Sie begründen dies damit, dass die Technologie sich auf die Fahrzeugsteuerung fokussiert und das Fahrzeug sicher und effizient, ohne Ablenkung, von einem Ort zum anderen bewegt. In Kombination mit V2X-Kommunikation können zusätzlich die Routen optimiert werden, um überflüssige Stop-and-Go-Verkehre zu vermeiden, die zu Stau führen können (Short und Murray 2016, S. 29).

Williams et al. (2017, S. 43) beziehen sich auf das Umfeld von automatisierten Fahrzeugen im Güterverkehr, welches zu einer Lösung von Stauproblemen, beispielsweise durch eine verbesserte Systemplanung oder durch die Verwaltung von Fahrspuren ausschließlich für den Lkw-Verkehr in Stoßzeiten, führen könnte.

Das fahrerlose Fahren könnte folglich zum einen selbst durch die Fahrzeugsysteme und zum anderen durch die angepasste Umgebung mit separaten Fahrspuren zu einer Reduzierung von Stau und damit einer Verbesserung des Verkehrsflusses führen (-2).

Eine Zunahme des Stauaufkommens würde folglich zu einer Erhöhung der THG-Emissionen, der Verkehrsunfälle und der Infrastrukturnutzung führen. Dadurch tritt eine stark gleichgerichtete Wirkung auf (+2). Auf die TCO und die Infrastrukturkosten wirkt sich das zunehmende Stauaufkommen leicht gleichgerichtet aus (+1). Beide Variablen nehmen mit steigendem Stauaufkommen zu. Die Reduktion des Stauaufkommens hat hingegen eine stark entgegengerichtete Wirkung auf

die Fahrzeugfahrleistung sowie die Lieferzuverlässigkeit (-2). Sowohl die Fahrzeugfahrleistung als auch Lieferzuverlässigkeit sinken mit zunehmendem Stauaufkommen. Wenn allerdings das fahrerlose Fahren eingeführt wird, könnte dies zu einer Verringerung des Stauaufkommens führen und hätte folglich positive Wirkungen auf die genannten Variablen.

7.1.4.2 Verkehrsunfälle

Das fahrerlose Fahren hat das Potenzial Verkehrsunfälle zu vermindern. Bei der Betrachtung der Ursachen für Unfälle mit Personenschaden zeigt sich, dass etwa 88 % der Unfälle auf personenbezogene Ursachen zurückzuführen sind, wohingegen nur etwa 0,9 % durch technische Mängel verursacht werden. Rund 75 % der Unfälle gelten als allgemeine Unfallursachen, wie etwa Glatteis oder Regen (Statistisches Bundesamt 2020, S. 49f.).

Bei der Betrachtung der Unfallursachen durch Fehlverhalten der Fahrzeugführenden ist etwa ein Viertel der Unfälle durch Fehlverhalten durch Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, ein Viertel durch Vorfahrts- oder Vorrangfehler und etwa ein Viertel durch Abbiege-, Wende-, Rückwärtsfahr- oder Ein- und Anfahrfehler verursacht. Die restlichen 25 % verteilen sich auf nicht angepasste Geschwindigkeiten und Alkoholeinfluss der Fahrenden (Statistisches Bundesamt 2020, S. 49f.). Die aufgeführten Ursachen durch Fehlverhalten sind zu etwa 95 % im Fahrverhalten der Fahrenden begründet. Dieses Fahrverhalten kann bereits heute, ohne die Einführung fahrerloser Systeme, komplett durch die Systeme automatisierter Fahrzeuge übernommen werden. Das fahrerlose Fahren bietet aufgrund der technischen Ausstattung durch Fahrzeugtechnologien, wie Abstands- und Spurhalteassistent, Active Cruise Control (ACC), den Abbiegeassistenten oder die Einparkhilfe, das Potenzial, diese Unfallursachen zu minimieren.

Darüber hinaus ist das fahrerlose Fahrzeug nicht durch Emotionen geleitet, unterliegt keinem Alkoholkonsum und kann so programmiert werden, dass die Straßenverkehrsordnung immer eingehalten wird (Fagnant und Kockelmann 2015, S. 169). Fagnant und Kockelmann (2015, S. 173) prognostizieren für das autonome Fahren bei einer Marktdurchdringung von 10 % eine Reduzierung der Verletzungsrate von 50 % gegenüber einem vollständig manuell geführten Verkehr ohne automatisiertes

Fahren. Bei einer Marktdurchdringung von 90 % wird die Erhöhung der Sicherheit sogar auf 90 % geschätzt. Diese Einsparungen werden durch die Einhaltung der Verkehrsregeln also auch durch die Automatisierungstechnik erzeugt. Folgende Zahlen wurden für Fahrzeuge in der USA ermittelt ohne Unterscheidung zwischen Fahrzeugtypen (Personenkraftwagen oder Lastkraftwagen): Bei einer Marktdurchdringung von 10 % werden laut Studie 1.100 Leben gerettet und 211.000 weniger Unfälle verursacht. Bei einer Marktdurchdringung von 50 % beträgt die Anzahl der geretteten Leben 9.600 und 1.880.000 weniger Unfälle. Bei einer Marktdurchdringung von 100 % belaufen sich die Zahlen sogar auf 21.700 geretteter Leben und 4.220.000 weniger Unfälle (Fagnant und Kockelmann 2015, S. 175).

Sivak und Schoettle (2015, S. 2ff.) führen hingegen auf, dass eine Erwartung von Null Todesfällen für fahrerlose Fahrzeuge als nicht realistisch gelte. Außerdem sehen sie es als keine Selbstverständlichkeit an, dass ein autonomes Fahrzeug sicherer ist als erfahrene Berufskraftfahrende mittleren Alters. Des Weiteren könnte es in der Übergangszeit vom konventionellen zum automatisierten Fahren sogar zu einer Verschlechterung der Sicherheit im Straßenverkehr kommen, insbesondere für konventionelle Fahrzeuge, da Erwartungen des Fahrverhaltens, die zuvor bestanden, nicht mehr gelten oder der Augenkontakt oder die Körpersprache nicht mehr genutzt werden können, um Situationen einzuschätzen. Darüber hinaus werden weitere Herausforderungen, wie das Erkennen von unüblichen Verkehrsteilnehmenden (z. B. Pferde), oder die Sicht bei Nebel oder starkem Regen, als hemmende Faktoren für das fahrerlose Fahren aufgeführt.

Elgharbawy et al. (2019, S. 210) gibt an, dass die Vision eines unfallfreien Fahrens die Entwicklung des automatisierten Fahrens beschleunigt, es jedoch keine Langzeittests zur Überprüfung dieses Argumentes gibt. Der Versuch, die Sicherheit des fahrerlosen Fahrens quantitativ zu ermitteln, zeigte, dass es ökonomisch nicht möglich ist, die Sicherheit automatisierter Systeme mit hoher Verbreitung vor der Einführung dieser in den Markt statistisch nachzuweisen.

Zusätzlich zu den regulären Transportkosten, können Unfälle ebenfalls Kosten beim Transport von Gütern verursachen. Das amerikanische Department of Transportation hat für die Jahre 2001 bis 2003 pro Unfall von mittelschweren und schweren Lkw durchschnittliche Kosten von 38.429 US-Dollar (etwa 35.000 Euro) ermittelt. Diese Kosten setzen sich aus den durchschnittlichen Kosten für Sachschäden (7.847 US-Dollar) und aus den durchschnittlichen Kosten für entgangene Produktivität (30.582 US-Dollar) zusammen (Zaloshnja und Miller 2007, S. 10). Auf Basis dieser Berechnungsgrundlage könnten in Deutschland bei einer Anzahl von 27.103 Unfällen mit Personenschaden durch Güterkraftfahrzeuge im Jahr 2019, bei denen mindestens ein Güterkraftfahrzeug involviert war, Gesamtunfallkosten von rund einer Mrd. Euro entstehen.

Die Diskussion zeigt, dass das fahrerlose Fahren langfristig zu einem sehr starken Rückgang der Verkehrsunfälle führen kann (-3), eine zunehmende Anzahl von Verkehrsunfällen zu Beginn der Markteinführung aber möglich ist.

Im Workshop wurde zudem deutlich, dass eine Zunahme der Verkehrsunfälle zu einer sehr stark gleichgerichteten Wirkung des Stauaufkommens (+3) führt. Mit der Zunahme der Verkehrsunfälle wird auch das Stauaufkommen deutlich erhöht, da Unterbrechungen im Verkehrsfluss eine der zentralen Ursachen für Stau darstellen (Treiber und Kesting 2010, S. 257ff.). Auf die Variablen »TCO« und »Infrastrukturkosten« wirken sich die zunehmenden Verkehrsunfälle ebenfalls stark gleichgerichtet aus (+2), sodass die TCO und die Infrastrukturkosten ansteigen. Auf die Lieferzuverlässigkeit hat die Zunahme der Verkehrsunfälle hingegen eine stark entgegengerichtete Wirkung (-2), sodass mit zunehmender Anzahl an Verkehrsunfällen die Lieferzuverlässigkeit abnimmt.

7.1.4.3 Straßeninfrastrukturnutzung

In der Literatur wird vielfach angegeben, dass das automatisierte Fahren Wirkungen auf die Kapazität der Infrastruktur hat. Damit wird in der Regel ein verbesserter Verkehrsfluss, also weniger Stau und Unfälle, beschrieben. Direkte Wirkungen auf die Straßeninfrastruktur beziehen sich hingegen auf die Ausprägung der Fahrbahn und deren Folgen auf das Verkehrssystem.

Die Nutzung der Infrastruktur kann beispielsweise durch verringerte Sicherheitsabstände zurückgehen. In der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) ist in Paragraph 4 festgelegt, dass Lastkraftwagen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t auf Autobahnen bei einer Geschwindigkeit von über 50 km/h einen Sicherheitsabstand von 50 m einhalten müssen. Bei automatisierten Fahrzeugen, beispielsweise durch das Platooning, kann dieser Sicherheitsabstand auf 15 bis 21 m verringert werden, wodurch weniger Infrastruktur erforderlich wird (MAN 2020).

Fitzpatrick et al. (2017, S. 2) geben an, dass das automatisierte Fahren eine Erhöhung der existierenden Infrastrukturlkapazität verspricht. Es wird jedoch angeführt, dass automatisierte Fahrzeuge grundlegende Infrastrukturvoraussetzungen, wie eine verbesserte Fahrqualität oder sichtbare Fahrbahnmarkierungen, benötigen. Darüber hinaus können weitere Anpassungen wie gleichmäßigere Kurven für Auf- und Abfahrten erforderlich werden.

Williams et al. (2017, S. 46f.) argumentieren, dass das automatisierte Fahren zu einer höheren Anzahl von Lkw führen kann, die die vorhandene Straßeninfrastruktur gleichzeitig nutzen, indem unter anderem Abstände zwischen den Fahrzeugen reduziert und Leerlaufzeiten durch eine optimierte Parkplatzsuche vermieden werden.

Bereits das automatisierte Fahren kann folglich durch verringerte Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen zu einer Verringerung der Infrastrukturnutzung führen. Hierbei besteht folglich eine stark entgegengerichtete Wirkung des fahrerlosen Fahrens auf die Straßeninfrastrukturnutzung (-2).

Wird die Infrastruktur stärker genutzt, kann dies zu Unterbrechungen des Verkehrsflusses und damit zu einem starken Anstieg des Stauaufkommens (+3) führen (Treiber und Kesting 2010, S. 257ff.). Auch zu der Variable »Verkehrsunfälle« besteht eine leicht gleichgerichtete Wirkung, da die Verkehrsunfälle mit zunehmender Infrastrukturnutzung ansteigen (+1). Die zunehmende Infrastrukturnutzung wirkt sich stark entgegengerichtet auf die Fahrzeugfahrleistung aus (-3). Mit zunehmender Nutzung wird die Fahrzeugfahrleistung reduziert, da die Infrastruktur stärker belastet ist. Die Nutzung der Straßeninfrastruktur wird folglich für Transportunternehmen unattraktiver. Leicht entgegengerichtet wirkt eine

zunehmende Infrastrukturnutzung zudem auf die Variablen »Straßen-transportnachfrage«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Fahrerloses Fahrzeug« (-1).

7.1.4.4 Infrastrukturkosten

Im Jahr 2017 wurden etwa 7 Mrd. Euro in den Neu- und Ausbau sowie die Erhaltung von Bundesfernstraßen in Deutschland investiert (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2020). Nowakowski et al. (2015, S. 2947) geben an, dass das automatisierte Fahren zu einer Reduzierung der Infrastrukturkosten durch die Fahrt auf schmalere Fahrspuren mithilfe eines Spurassistenten führen kann. Die Fahrzeuge orientieren sich mit dem Assistenzsystem an der Fahrbahnspur, sodass weniger Abweichungen entstehen und der Flächenbedarf zur Quersteuerung abnimmt (Short und Murray 2016, S. 29). Die Investition in den Ausbau und die Schaffung der notwendigen Voraussetzungen kann jedoch zu hohen Investitionskosten in die Infrastruktur führen.

Aktuell bedarf die Umsetzung des automatisierten Fahrens Infrastrukturanpassungen, wie die Ausstattung der Straßen mit Landmarkenschildern. Auf dem Digitalen Testfeld Autobahn auf der A9 in Bayern wurden im Abstand von 2,5 km Landmarkenschilder aufgestellt (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017a). Für die Ausstattung der gesamten Bundesautobahn mit insgesamt 26.000 km werden damit 10.400 Landmarkenschilder erforderlich. Wird angenommen, dass pro Verkehrsschild Kosten in Höhe von 2.000 Euro entstehen, führt die Ausstattung der Infrastruktur zu Investitionen in Höhe von ca. 20,8 Mio. Euro. Gegebenenfalls können weitere Kosten für die Entwicklung und Instandhaltung der Schilder anfallen. Darüber hinaus wurde der Autobahnabschnitt auf der A9 für das automatisierte Fahren mit Sensorik und Kamerasystemen zur Verkehrsüberwachung und Datenbereitstellung sowie mit 5G-Abdeckung ausgestattet. Um eine Größenordnung der Kosten zu erhalten, können als Vergleichswert die Kosten für die Ausstattung der Autobahn mit Oberleitungen herangezogen werden. Auf dem E-Highway in Hessen wurden 14,5 Mio. Euro für 10 km Oberleitungsnetz investiert (VFR Verlag für Rechtsjournalismus 2019). Wird von ca. 1,5 Mio. Euro pro km für die Einrichtung der Oberleitung ausgegangen, entstehen für die

Vernetzung der gesamten Bundesautobahn Kosten in Höhe von ca. 39 Mrd. Euro. Für das fahrerlose Fahren sollte es daher das Ziel sein, von wenig physischer Infrastruktur abhängig zu sein, um die Infrastrukturkosten möglichst gering zu halten.

Das fahrerlose Fahren kann einen Einfluss auf die Infrastrukturkosten haben, die mit einer Erhöhung der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge aufgrund der erforderlichen Ausstattung voraussichtlich zunehmen (+2).

Im Rahmen des Workshops wurde ermittelt, dass eine Zunahme der Infrastrukturkosten zu einer leichten Erhöhung der TCO und des Stellplatzbedarfs führen kann (+1). Hierbei könnten Infrastrukturkosten auf die Kfz-Steuer der Fahrzeuge umgelegt werden. Mit zunehmenden Kosten kann auch vermutet werden, dass mehr Infrastruktur, wie Stellplatzfläche zur Verfügung gestellt wird. Auf die Infrastrukturnutzung wirken sich die zunehmenden Infrastrukturkosten stark entgegengerichtet aus (-3). Das bedeutet, dass mit steigenden Kosten die Infrastrukturnutzung abnimmt. Die zunehmenden Infrastrukturkosten führen dagegen zu einer leicht entgegengerichteten Wirkung auf die Variablen »Straßentransportnachfrage«, »Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrerloses Fahrzeug«, »Antriebstechnologie«, »Stauaufkommen« und »Verkehrsunfälle« (-1). Die Straßentransportnachfrage, die Fahrzeugfahrleistung, die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge sowie die Anzahl von BEV sinken mit zunehmenden Infrastrukturkosten.

7.1.4.5 Stellplatzbedarf

Neben der Straße als Infrastruktur kann sich das fahrerlose Fahren auch auf weitere Aspekte der Infrastruktur, wie Parkplätze, auswirken. Eine Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aus dem Jahr 2019 untersuchte die Lkw-Parkplatzsituation an und auf Bundesautobahnen in Deutschland. Die Studie zeigt, dass im Jahr 2018 pro Erhebungsnacht im Mittel rund 94.100 Lkw abgestellt wurden. Etwa 74.500 der Fahrzeuge nutzen die 1.929 bewirtschafteten und nicht-bewirtschafteten Rastanlagen sowie ehemalige Zollanlagen, die regulär etwa 51.600 Parkmöglichkeiten bieten. Etwa 19.100 Lkw nutzen die 224 zur Verfügung stehenden privaten Autohöfe, welche etwa 18.700 reguläre Parkmöglichkeiten aufweisen. Laut

Irzik (2019, S. 5) konnte damit im Jahr 2018 ein nächtlicher Fehlbestand von circa 23.800 Lkw-Parkmöglichkeiten bundesweit auf und an Bundesautobahnen identifiziert werden. Es wird vermutet, dass das automatisierte Fahren die Nachfrage nach Parkplätzen und damit die Flächennutzung reduziert.

Das fahrerlose Fahren (Stufe 5) könnte nach Short und Murray (2016, S. 25) zu einem signifikanten Rückgang der Pausen- und Ruhezeiten führen. Die Notwendigkeit des Parkens würde vollständig entfallen. Das Fahrzeug müsste lediglich für Tank- oder Instandhaltungsvorgänge abgestellt werden.

Der in der Studie der BASt (2019) festgestellte Fehlbestand an Parkplatzmöglichkeiten könnte unter den Annahmen von Short und Murray (2016) mit Einführung der Automatisierung deutlich verringert werden. Insbesondere die Implementierung des fahrerlosen Fahrens kann dazu führen, dass eine deutlich geringere Anzahl an Parkplätzen an und auf Bundesautobahnen in Zukunft genutzt wird. Es würde sich jedoch nicht nur die Nutzung der Parkplätze reduzieren. Auch die Infrastruktur, wie Restaurants, Toiletten oder Übernachtungsmöglichkeiten, an und auf Bundesautobahnen, die bislang durch Lkw-Fahrende genutzt werden, wäre nicht mehr im gleichen Umfang notwendig. Durch einen fahrerlosen Betrieb des Lkw würden Angebote wie diese nur noch von Pkw-Fahrenden in Anspruch genommen werden.

Auf dieser Grundlage kann abgeleitet werden, dass das fahrerlose Fahren einen Rückgang des Stellplatzbedarfs bewirkt (-2). Abhängig ist der Stellplatzbedarf zusätzlich von der Anzahl an Berufskraftfahrenden (+2). Mit einem Rückgang der Berufskraftfahrenden nimmt folglich auch der Stellplatzbedarf ab, da Pausen- und Ruhezeiten der Fahrenden entfallen.

Eine Zunahme des Parkplatzbedarfs und folglich der Stellplatzfläche führt zu einer stark gleichgerichteten Wirkung auf die Infrastrukturkosten (+3), sodass diese erhöht werden. Es müssen mehr Kosten für den Ausbau der Stellplatzflächen aufgewendet werden. Bis zum Jahr 2024 stellt die Bundesregierung beispielsweise 90 Mio. Euro für den Ausbau von Lkw-Parkplätzen bereit, um den aktuellen Fehlbestand zu kompensieren (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2021).

Auf die TCO und die THG-Emissionen wirkt sich der zunehmende Stellplatzbedarf hingegen leicht entgegengerichtet aus, weshalb sowohl die TCO als auch die THG-Emissionen leicht sinken (-1), da unnötige Suchvorgänge durch die Verfügbarkeit der Stellflächen entfallen.

7.1.5 Zusammenfassung der Wirkungsbeziehungen

Auf Grundlage der mithilfe der Literatur identifizierten erwarteten Wirkungen des fahrerlosen Fahrens sowie dem Workshop mit Forschenden wurden vielfältige Wirkungszusammenhänge identifiziert. Zur Strukturierung der Wirkung des fahrerlosen Fahrens in direkte und indirekte Wirkungsbeziehungen wird der Papiercomputer nach Vester (1990) angewendet. Dieser stellt eine Einflussmatrix dar, die die Wirkungen von einer Variable auf eine andere abbildet und quantifiziert.

Der Papiercomputer nach Vester (1990) bietet den Vorteil, ein Wirkungsgefüge zu ermitteln und dieses zu quantifizieren, sodass Wirkungen vergleichbar werden. Mithilfe der Quantifizierung kann darüber hinaus eine Aussage über die Stärke der Wirkung sowie der Rolle der Variable im System getätigt werden. Die Abbildung 18 zeigt die Wirkungsbeziehung, ihre Richtung und ihre Stärke im Logistiksystem, die basierend auf den vorangegangenen Erkenntnissen der Abschnitte 7.1.1 bis 7.1.4 zusammengefasst wurden.

7.2 Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

Die in Abschnitt 7.1 ermittelten Wirkungen sowie ihre Gewichtung und Richtung werden in diesem Abschnitt in ein Kausaldiagramm überführt. Das Diagramm dient dazu, Rückkopplungsschleifen im Gesamtsystem und zwischen den Subsystemen zu identifizieren. Darüber hinaus werden die Rollen der Variablen im System nach Vester (1990) ermittelt. Die Rollen geben Aufschluss über die Wirkungsweise der Variablen, sodass abgeleitet werden kann, welche Variablen sehr stark auf das System wirken oder welche sehr stark vom System beeinflusst werden. Anschließend werden die Wirkungszusammenhänge anhand der vier identifizierten Subsysteme

Abbildung 18: Einflussmatrix des Unterscheidungssystems

Variable	Fahrzeugfahrlistung	Strabentransportnachfrage	Lieferzuverlssigkeit	Fahrzeugauslastung	Schnittstellentechnologien	Personalbedarf zur Be- und Entladung	Personalqualifikation	Kosten fr Warenbergabe	Fahrerloses Fahrzeug	Antriebstechnologie	Berufskraftfahrende	TCO	THG-Emissionen	Stauaufkommen	Verkehrsunfalle	Infrastrukturnutzung	Infrastrukturkosten	Stellplatzbedarf	Aktivsumme	
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
+	Fahrzeugfahrlistung	0	0	1	0	0	0	0	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	1	21
+	Strafentransportnachfrage	3	-1	2	1	2	0	1	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	14
+	Lieferzuverlssigkeit	1	2	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
+	Fahrzeugauslastung	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-2	-1	-1	0	-1	-1	-1	9	
+	Schnittstellentechnologien	0	0	1	0	-3	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
+	Personalbedarf zur Be- und Entladung	0	0	1	0	-2	-1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
+	Personalqualifikation	0	0	1	0	1	-1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
+	Kosten fr Warenbergabe	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
+	Fahrerloses Fahrzeug	2	0	2	-1	3	2	0	2	-1	-3	3	-1	-2	-3	-2	2	-2	31	
+	Antriebstechnologie	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-3	0	0	0	3	0	8	
+	Berufskraftfahrende	1	0	1	0	-2	-1	0	-2	0	0	3	0	0	1	0	0	2	13	
+	TCO	-1	-2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	
+	THG-Emissionen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
+	Stauaufkommen	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	1	0	0	12	
+	Verkehrsunfalle	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	2	0	0	9	
+	Infrastrukturnutzung	-2	-1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	8	
+	Infrastrukturkosten	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	0	1	0	-1	-1	-2	1	1	10	
+	Stellplatzbedarf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	2	4	4	
Passivsumme		13	6	12	5	12	9	3	13	9	4	9	17	11	10	9	14	7		
AS/PS		1,62	2,33	0,42	1,80	0,83	0,78	1,67	0,23	3,44	2	1,44	0,24	0,1	1,09	0,90	0,89	0,71	0,57	
AS x PS		273	84	60	45	120	63	15	39	279	32	117	68	11	132	90	72	140	28	

Stärke des Einflusses: + gleichgerichtete Wirkung 3 sehr stark 2 stark 1 gering 0 kein/sehr geringer Einfluss
 - entgegengerichtete Wirkung -1 gering -2 stark -3 sehr stark

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Vester (1990, S. 72f.)

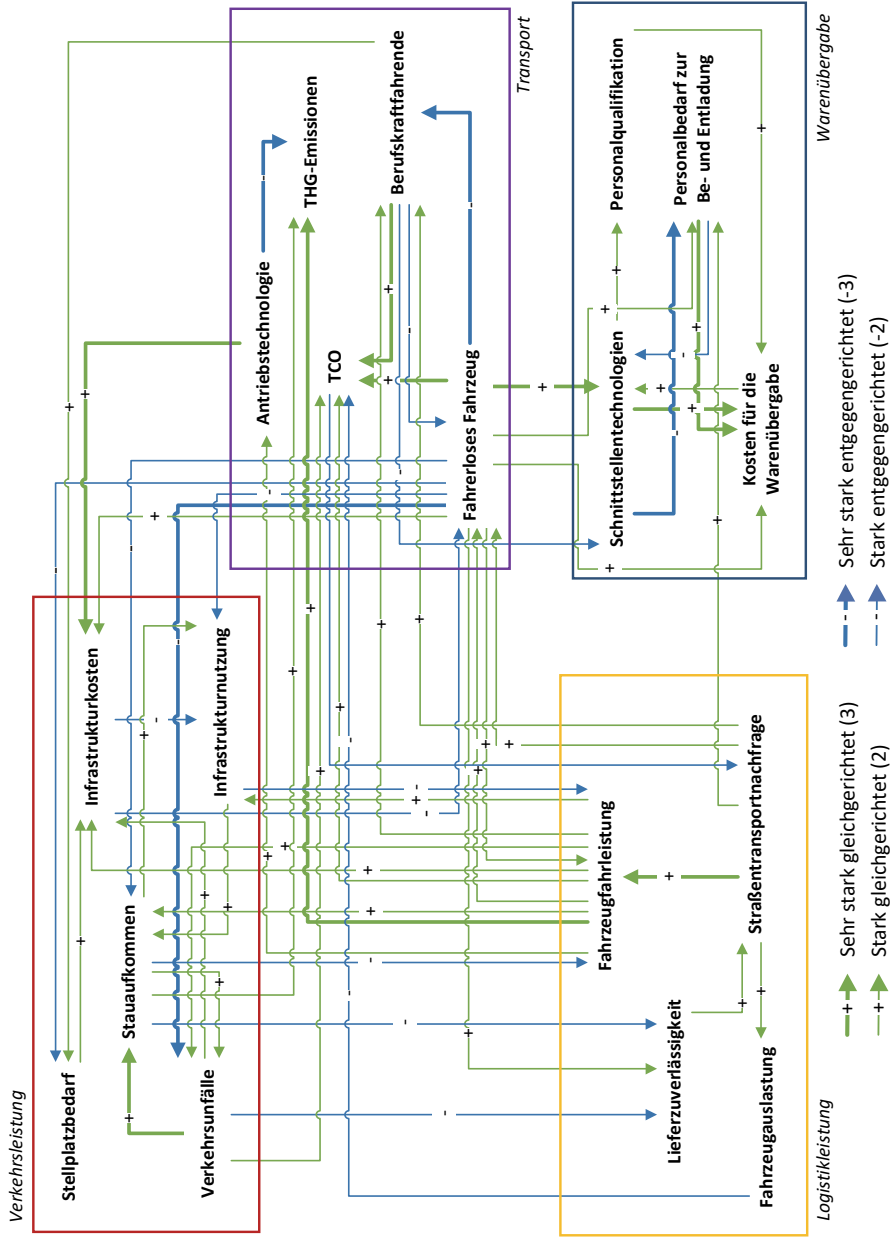
ausgewertet, um Rückkopplungsschleifen mit einem höheren Detaillierungsgrad zu ermitteln. Die subsystemspezifische Analyse kann in der weiteren Arbeit dazu genutzt werden, Gestaltungsoptionen abzuleiten, die den jeweiligen Akteuren zugeordnet werden.

7.2.1 Wirkungsgefüge im Logistiksystem

Die Abbildung 19 zeigt die zuvor beschriebenen Zusammenhänge in Form eines Kausaldiagramms, um die Richtung der Wirkungen und ihre Stärke, aber auch die Vielzahl an Wirkungsbeziehungen im Logistiksystem zu visualisieren. Im Diagramm sind die sehr starken (+3/-3) und starken (+2/-2) Wirkungen aus der Einflussmatrix eingezeichnet, die geringen Einflüsse werden aufgrund der Übersichtlichkeit an dieser Stelle nicht in das Diagramm integriert. Das Kausaldiagramm verdeutlicht aber dennoch, dass bestimmte Variablen, wie »Fahrzeugfahrleistung«, »Stauaufkommen« oder »Fahrerloses Fahrzeug«, durch eine Vielzahl an Wirkungen mit anderen Variablen verknüpft sind. Für eine Gestaltung des Logistiksystems sind diese Variablen daher besonders beachtenswert, da sie einen wichtigen Hebel für Veränderungen darstellen.

Das Diagramm zeigt das Logistiksystem in seiner Gesamtheit. Zusätzlich sind die vier Subsysteme farblich umrandet, die Logistikleistung in gelb, die Warenübergabe in blau, der Transport in violett und die Verkehrsleistung in rot. Die Variablen der Subsysteme sind jeweils in ihren Subsystemen miteinander verknüpft. Zu erkennen sind darüber hinaus aber auch Verbindungen zu Variablen anderer Subsysteme. Das Subsystem »Logistikleistung« wirkt beispielsweise stark auf die Subsysteme »Transport« und »Verkehrsleistung« ein. Zum Subsystem »Warenübergabe« bestehen nur wenige Verbindungen, wie beispielsweise zwischen den Variablen »Straßentransportnachfrage« und »Personalbedarf zur Be- und Entladung« oder den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug« und »Schnittstellentechnologien«. Das Subsystem »Verkehrsleistung« steht in keiner Verbindung zum Subsystem »Warenübergabe«. Für eine Gestaltung des Logistiksystems und seiner Subsysteme kann damit abgeleitet werden, dass eine Veränderung im Subsystem »Verkehrsleistung« keinerlei direkte Wirkung auf das Subsystem »Warenübergabe« hat und mögliche Gestaltungsoptionen das Subsystem nur indirekt tangieren.

Abbildung 19: Kausaldiagramm des Untersuchungssystems



Quelle: Eigene Darstellung

Besonders beachtenswert sind auch die rückgekoppelten Wirkungen im Untersuchungssystem. Diese sogenannten Rückkopplungsschleifen sind direkte oder indirekte Verbindungen zwischen zwei oder mehreren Variablen, die entweder zu einer stabilisierenden Wirkung auf das System, aufgrund von unterschiedlichen Richtungen ihrer Wirkungsbeziehungen (»negative Rückkopplungsschleife«), oder zu einer Destabilisierung dieses Systems, aufgrund von gleichgerichteten Wirkungen (»positive Rückkopplungsschleife«), führen können. Daher sind dies besonders beachtenswerte und empfindliche Verbindungen.

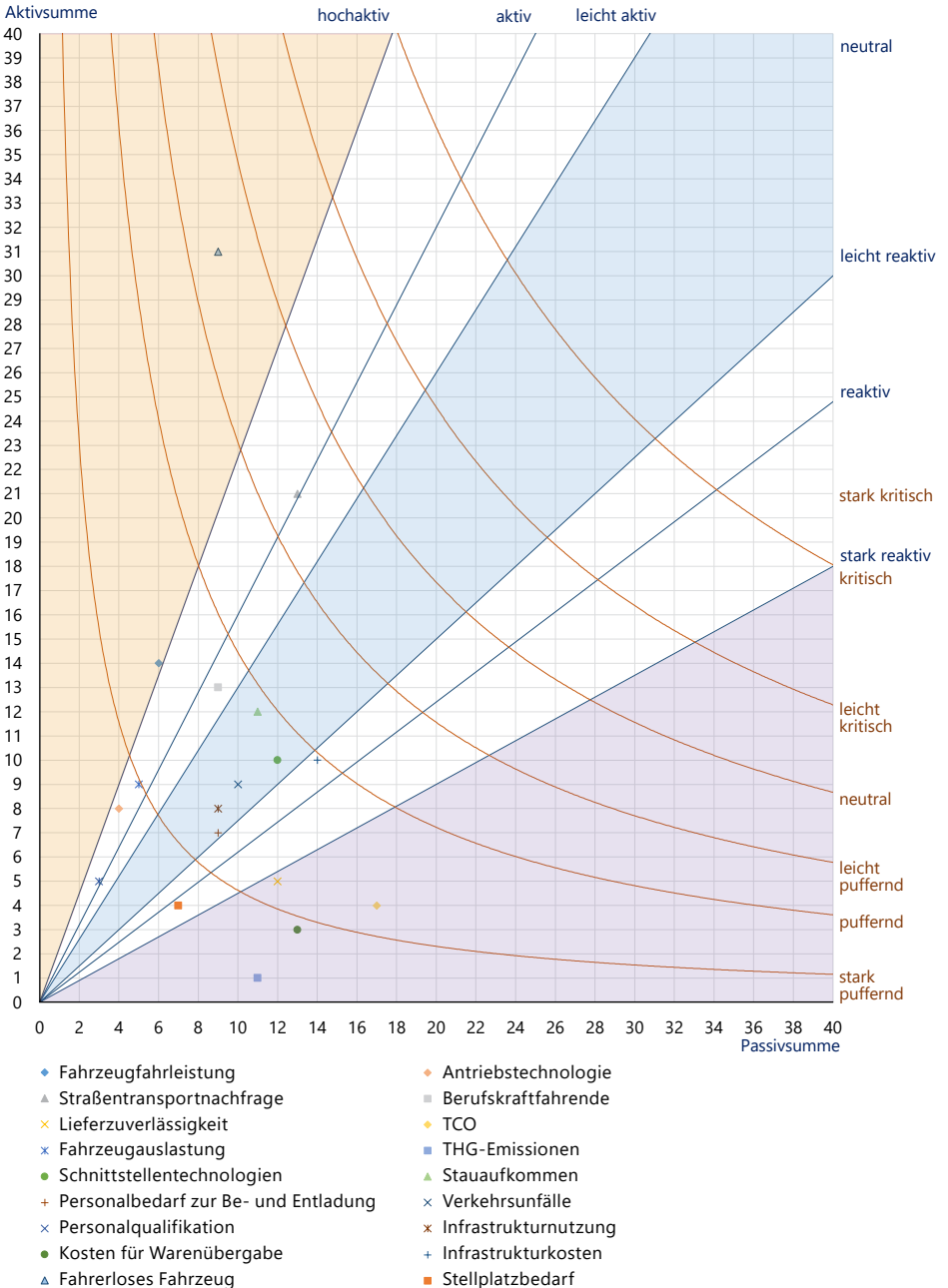
Sowohl innerhalb der Subsysteme als auch zwischen den Subsystemen bestehen Rückkopplungsschleifen, wie beispielsweise zwischen den Variablen »Stauaufkommen« des Subsystems »Verkehrsleistung« und »Fahrzeugfahrleistung« des Subsystems »Logistikleistung«. Hierbei ist eine negative Rückkopplungsschleife identifiziert worden, die aus einer gleichgerichteten und einer entgegengerichteten Wirkung besteht. Gleiches gilt für die negative Rückkopplungsschleife zwischen den Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Infrastrukturnutzung«. Auch zwischen den Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Fahrerloses Fahrzeug«, das sich im Subsystem »Transport« befindet, besteht eine Rückkopplungsschleife. In diesem Fall handelt es sich um eine positive Rückkopplungsschleife, die aus zwei gleichgerichteten Beziehungen besteht. Weitere Rückkopplungsschleifen zwischen den Subsystemen treten zwischen den Variablen

- »Straßentransportnachfrage«, »Fahrzeugauslastung« und »TCO«,
- »Fahrzeugfahrleistung«, »TCO« und »Straßentransportnachfrage«,
- »TCO«, »Straßentransportnachfrage« und »Fahrerloses Fahrzeug«,
- »Fahrzeugfahrleistung«, »Berufskraftfahrende« und »Fahrerloses Fahrzeug«,
- »Verkehrsunfälle«, »Lieferzuverlässigkeit«, »Straßentransportnachfrage« und »Fahrzeugfahrleistung« sowie
- »Fahrzeugfahrleistung«, »Infrastrukturkosten« und »Infrastrukturnutzung« auf.

7.2.2 Rollen der Variablen im Logistiksystem

Mithilfe der Einflussmatrix lassen sich die Rolle der Variablen im System ableiten, welche nach Vester (1991, S. 98f.) in aktive, reaktive, puffernde und kritische Effekte unterschieden werden können. Das folgende Diagramm zeigt die 18 Variablen des Logistiksystems und ihre Wirkungsbereiche.

Abbildung 20: Einflussdiagramm der Variablen im Logistiksystem



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Vester (1990, S.34)

Die Auswertung der Matrix ergibt unterschiedliche Rollen der Variablen im System. Die Auswertung des Einflussdiagramms zeigt, dass die Variable »Fahrerloses Fahrzeug« eine hochaktive Rolle im System hat. Auffällig ist außerdem, dass die Variable »Fahrzeugfahrleistung« in den meisten Wirkungsbeziehungen auftritt. Die Variable »Fahrzeugfahrleistung« hat ebenfalls eine hochaktive Rolle im System. Der hochaktive Bereich ist in Abbildung 20 orange hinterlegt.

Die »Straßentransportnachfrage« wirkt sowohl aktiv als auch puffernd. Durch ihre aktive Rolle kann sie die anderen Variablen im System stark beeinflussen. Da sie zusätzlich als puffernd eingestuft wird, hat sie jedoch eher eine »träge« Wirkung. Ähnlich hierzu werden auch die Variablen »Fahrzeugauslastung«, »Personalqualifikation« und »Antriebstechnologie« eingeordnet. Auch diese Variablen beeinflussen das System, aber nicht so stark wie die hochaktiven Variablen.

Als leicht aktiv gilt die Variable »Berufskraftfahrende«, da diese nur einen sehr geringen Einfluss auf das System hat. Zusätzlich hat sie eine puffernde Wirkung, da sie unter den getroffenen Annahmen kaum Variablen beeinflusst, aber von einigen stark beeinflusst wird.

Neutrale Variablen sind im Logistiksystem die fünf Variablen »Schnittstellentechnologien«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung«, »Stauaufkommen«, »Verkehrsunfälle« und »Infrastrukturnutzung«. Diese Variablen haben alle eine neutrale, puffernde Rolle und sind damit sehr gut für die Selbstregulierung des Systems geeignet (in Abbildung 20 blau hinterlegt).

Die Variable »Infrastrukturkosten« kann als leicht reaktiv und puffernd eingeordnet werden. Sie wird damit leicht durch das System beeinflusst.

Eine reaktive Variable ist im Untersuchungssystem die Variable »Stellplatzbedarf«. Auch diese Variable wird durch das System beeinflusst. Sie hat allerdings eine stark puffernde Wirkung, die darauf hindeutet, dass die Veränderungen sehr gering oder sehr stark verzögert auftreten.

Sehr stark vom System beeinflusst und damit als stark reaktiv gelten die vier Variablen »Lieferzuverlässigkeit«, »Kosten für Warenübergabe«, »TCO« und »THG-Emissionen« (in Abbildung 20 violett hinterlegt). Zusammen mit den Infrastrukturkosten und dem Stellplatzbedarf bilden

diese Variablen gute Systemindikatoren, da eine Veränderung der aktiven Variablen zu einer Veränderung dieser reaktiven Variablen führt, die selbst aber kaum Änderungen im System hervorrufen.

Mithilfe der Einteilung der Variablen hinsichtlich ihrer Rollen kann aufgezeigt werden, dass einige Variablen sehr stark durch das System beeinflusst werden, wie z. B. die Kosten-Variablen, wohingegen andere Variablen einen starken Einfluss auf das System haben und dieses dadurch verändern können (z. B. »Fahrerloses Fahrzeug«). Die Rollen können folglich dazu genutzt werden, Hebel für Veränderungen zu identifizieren, die beispielsweise für eine Gestaltung des Systems genutzt werden. Obwohl fast alle Variablen eher puffernde Variablen sind und damit eine träge Wirkung haben, können sie dennoch genutzt werden, um Veränderungen zu bewirken, die jedoch gegebenenfalls verzögert auftreten.

Kritische Variablen konnten im Untersuchungssystem nicht identifiziert werden.

7.2.3 Analyse der Subsysteme

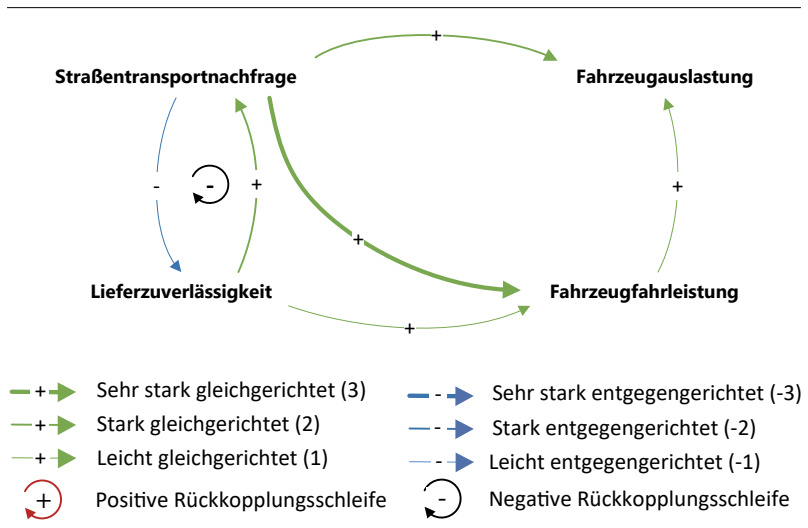
Im Kausaldiagramm des Untersuchungssystems sind die jeweiligen Einflüsse von einer Variable auf eine andere sowie deren Intensität (Stärke der Linien) und Wirkungsrichtung (Pfeilrichtung) aufgeführt (vergleiche Abschnitt 7.2.1). Zur näheren Analyse der Wirkungsbeziehungen erfolgt eine Gliederung in die vier Subsysteme. Anhand der Kausaldiagramme der Subsysteme werden weitere Rückkopplungsschleifen im System identifiziert.

7.2.3.1 Subsystem »Logistikleistung«

Das Subsystem »Logistikleistung« umfasst die vier Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Straßentransportnachfrage«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Fahrzeugauslastung«. Die Abbildung 21 zeigt die Interaktionen zwischen den Variablen.

Zwischen allen Variablen im Subsystem »Logistikleistung« treten Wirkungsbeziehungen auf. Hervorzuheben sind die Variablen »Straßentransportnachfrage« und »Lieferzuverlässigkeit«, zwischen denen eine negative Rückkopplungsschleife besteht. Durch eine Erhöhung der Straßentransportnachfrage sinkt die Lieferzuverlässigkeit, da

Abbildung 21: Kausaldiagramm des Subsystems »Logistikleistung« ohne die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



Quelle: Eigene Darstellung

gegebenenfalls Transportkapazitäten knapp werden. Mit einer Reduzierung der Lieferzuverlässigkeit sinkt auch die Straßentransportnachfrage, da diese unattraktiver wird. Diese negative Rückkopplungsschleife führt zu einer Selbstregulierung der beiden Variablen und damit zu einer Stabilisierung des Systems.

Unter Hinzunahme der Variable »Fahrerloses Fahrzeug« treten weitere Rückkopplungsschleifen auf, die in Abbildung 22 abgebildet sind.

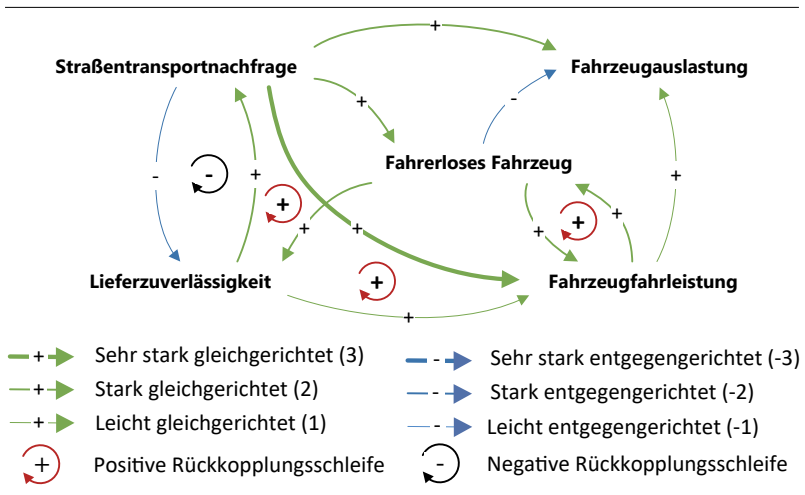
Zwischen den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug« und »Fahrzeugfahrleistung« kann eine positive Rückkopplungsschleife identifiziert werden. Eine Zunahme fahrerloser Fahrzeuge führt zu einem Anstieg der Fahrzeugfahrleistung, da mehr Fahrzeugkilometer aufgrund von wegfallenden Pausen- und Ruhezeiten zurückgelegt werden können. Die zunehmende Fahrzeugfahrleistung führt wiederum dazu, dass mehr fahrerlose Fahrzeuge eingesetzt werden, da diese attraktiver für die dienstleistenden Unternehmen sind. Die gleichgerichtete Wirkungsweise

kann zu einer Beschleunigung der Markteinführung bzw. zu einem beschleunigten Anstieg der Fahrzeugfahrleistung führen.

Eine weitere positive Rückkopplungsschleife besteht zwischen den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Fahrzeugfahrleistung«. Diese drei Variablen wirken gleichgerichtet und führen zur Erhöhung der jeweils anderen. Mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge steigt beispielsweise die Lieferzuverlässigkeit, da die Fahrzeuge gleichmäßiger und sicherer fahren, wodurch eine bessere Planbarkeit gewährleistet werden kann. Mit zunehmender Lieferzuverlässigkeit steigt auch die Fahrzeugfahrleistung, da mehr Fahrzeugkilometer zurückgelegt werden können. Mit ansteigender Fahrzeugfahrleistung nimmt, wie bereits beschrieben, die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge zu.

Eine dritte positive Rückkopplungsschleife tritt zwischen den drei Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Straßen-transportnachfrage« auf. Wie zuvor erläutert, steigt mit zunehmender

Abbildung 22: Kausaldiagramm des Subsystems »Logistikleistung« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



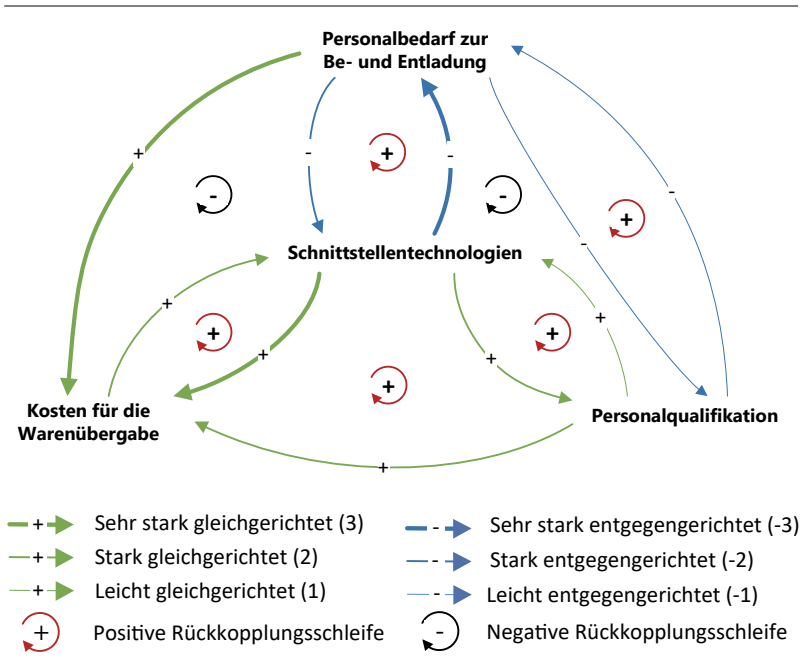
Quelle: Eigene Darstellung

Marktdurchdringung die Lieferzuverlässigkeit an. Ein Anstieg der Lieferzuverlässigkeit steigert wiederum die Attraktivität von Straßen-transporten, wodurch die Nachfrage zunimmt. Eine zunehmende Nachfrage bewirkt erneut die Zunahme von fahrerlosen Fahrzeugen im Güterverkehr, da ggf. mehr Tonnen transportiert werden können.

7.2.3.2 Subsystem »Warenübergabe«

Das Subsystem »Warenübergabe« umfasst die vier Variablen »Schnittstellentechnologien«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung«, »Personalqualifikation« und »Kosten für Warenübergabe«, welche ebenfalls in einem Wirkungsgefüge zueinanderstehen. Die Wirkungsbeziehungen sind im Abbildung 23 dargestellt.

Abbildung 23: Kausaldiagramm des Subsystems »Warenübergabe« ohne die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



Quelle: Eigene Darstellung

Insgesamt können zwei negative und fünf positive Rückkopplungsschleifen im Subsystem »Warenübergabe« identifiziert werden.

Eine negative Rückkopplungsschleife besteht zwischen den drei Variablen »Schnittstellentechnologien«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung« und »Kosten für Warenübergabe«. Gekennzeichnet sind diese Wirkungsbeziehungen durch verstärkende und abschwächende Wirkungen, sodass sie zu einer Stabilisierung des Systems führen. Mit zunehmendem Einsatz von Schnittstellentechnologien nimmt der Personalbedarf für die Be- und Entladung ab, da das Personal nicht mehr benötigt wird. Der Rückgang des Personals führt zu sinkenden Kosten in der Warenübergabe, da die Personalkosten reduziert werden. Mit sinkenden Kosten wird allerdings das Unternehmen entlastet, sodass der Einsatz von Schnittstellentechnologien abnimmt, da keine weitere Kostenoptimierung durch Automatisierung erforderlich wird.

Die zweite negative Rückkopplungsschleife tritt zwischen den Variablen »Schnittstellentechnologien«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung« und »Personalqualifikation« auf. Mit zunehmendem Einsatz von Schnittstellentechnologien sinkt der Personalbedarf zur Be- und Entladung. Mit abnehmender Anzahl an Lagerpersonal muss das Personal jedoch besser ausgebildet sein, sodass die Personalqualifikation ansteigt. Dies führt wiederum zu einem Anstieg an Schnittstellentechnologien.

Zwischen den Variablen »Schnittstellentechnologien« und »Kosten für Warenübergabe« besteht eine positive Rückkopplungsschleife. Diese zeigt an, dass eine Erhöhung der Schnittstellentechnologien zu einer Erhöhung der Kosten in der Warenübergabe führt. Mit Zunahme der Kosten für die Warenübergabe steigt auch der Einsatz von Schnittstellentechnologien, da Personalkosten durch die höhere Automatisierung verringert werden.

Eine Zunahme an Schnittstellentechnologien bei den versendenden und empfangenden Unternehmen führt dazu, dass auch die notwendige Personalqualifikation steigt, da die eingesetzten Technologien fachgerecht bedient werden müssen. Gleichzeitig können durch die Erhöhung der Personalqualifikation mehr Schnittstellentechnologien eingesetzt werden. Personal mit einer geringen Qualifikation wird damit langfristig weniger benötigt. Beispielsweise können weniger Zeitarbeitskräfte

eingesetzt werden, wenn sie über keine adäquate Qualifikation verfügen. Hier bestehen zwei verstärkende Wirkungen zwischen den Variablen.

Zwischen den Variablen »Schnittstellentechnologien« und »Personalbedarf zur Be- und Entladung« bestehen zwei gleichgerichtete Wirkungen. Ein zunehmender Einsatz von Schnittstellentechnologien führt dazu, dass weniger Personal im Lager benötigt wird. Umgekehrt führt ein Rückgang des Personals im Lager zu einem zusätzlichen Einsatz von Schnittstellentechnologien, um die Arbeitskraft zu ersetzen.

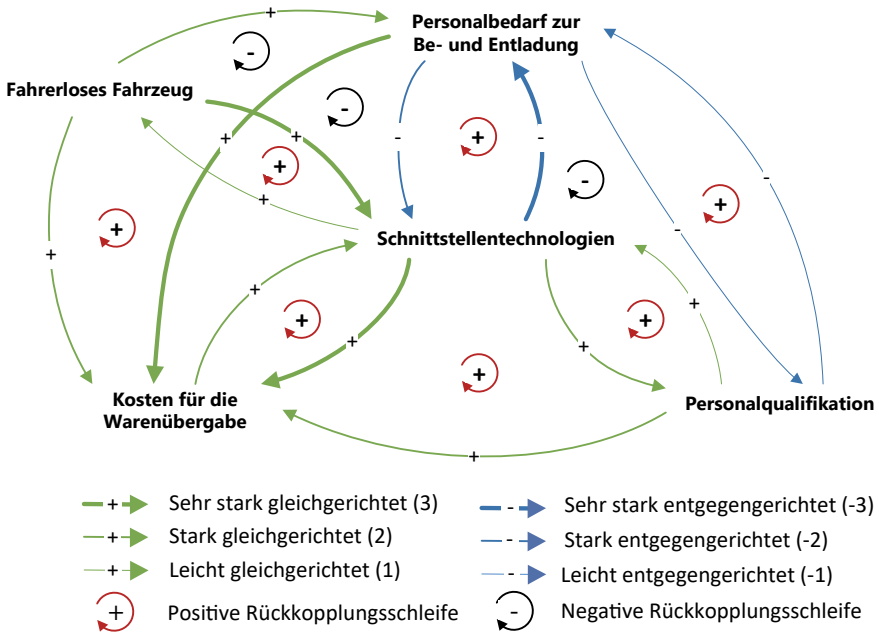
Darüber hinaus tritt eine positive Rückkopplungsschleife zwischen den zwei Variablen »Personalbedarf zur Be- und Entladung« und »Personalqualifikation« auf. Durch den Rückgang des Personalbedarfs steigt die Personalqualifikation. Mit zunehmender Qualifikation sinkt abermals der Personalbedarf, da weniger Personal für die Tätigkeiten erforderlich wird.

Die fünfte positive Rückkopplungsschleife bewirkt eine Erhöhung der Personalqualifikation durch den zunehmenden Anteil an Schnittstellentechnologien, was wiederum zu einer Zunahme der Kosten für die Warenübergabe führt. Die Kosten steigen an, da ein höher qualifiziertes Personal ein höheres Lohnniveau zur Folge hat. Zur Einsparung der Logistikkosten werden daher mehr Schnittstellentechnologien eingesetzt, sodass jeweils verstärkende Wirkungen zwischen den Variablen auftreten.

Die Entwicklungen der positiven Rückkopplungsschleifen werden zusätzlich durch den Einsatz fahrerloser Fahrzeuge verstärkt. Wie in Abbildung 24 dargestellt, treten neben den bereits bestehenden Rückkopplungsschleifen drei weitere – zwei positive und eine negative – Rückkopplungsschleifen auf.

Die negative Rückkopplungsschleife tritt zwischen den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung« sowie »Schnittstellentechnologien« auf. Durch den Wegfall der Berufskraftfahrenden wird es erforderlich, dass die Tätigkeiten an den Schnittstellen durch eine automatisierte Technologie oder Personal übernommen werden. Dadurch führt die Erhöhung fahrerloser Fahrzeuge zu einer Zunahme des Personalbedarfs für die Be- und Entladung. Mit zunehmendem Personalbedarf sinkt allerdings die Nutzung von Schnittstellentechnologien, da das Personal die Tätigkeiten selbstständig übernehmen

Abbildung 24: Kausaldiagramm des Subsystems »Warenübergabe« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



Quelle: Eigene Darstellung

kann und somit Schnittstellentechnologie redundant wird. Die Schnittstellentechnologien führen allerdings zu einer erleichterten Nutzung von fahrerlosen Fahrzeugen, sodass mit dem Rückgang an Technologien auch fahrerlose Fahrzeuge weniger genutzt werden.

Die erste positive Rückkopplungsschleife entsteht zwischen den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug« und »Schnittstellentechnologien«. Wie bereits beschrieben, führt die Zunahme fahrerloser Fahrzeuge auch zu einem Anstieg an Schnittstellentechnologien, da keine Berufskraftfahrenden mehr die Warenübergabe durchführen können. Gleichzeitig fördern die zunehmend eingesetzten Schnittstellentechnologien die Attraktivität des fahrerlosen Fahrens.

Auch zwischen den drei Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Schnittstellentechnologien« und »Kosten für Warenübergabe« besteht eine positive Rückkopplungsschleife. Der zunehmende Einsatz fahrerloser Fahrzeuge bewirkt eine Zunahme der Kosten für die Warenübergabe, da diese mit neuen Technologien ausgestattet werden müssen. Um die Kosten in der Warenübergabe, beispielsweise durch einen reduzierten Personalbestand, zu optimieren, werden zunehmend Schnittstellentechnologien eingesetzt, die die Markteinführung fahrerloser Fahrzeuge beschleunigen.

Dadurch, dass die jeweiligen negativen und positiven Rückkopplungsschleifen mit der Variable »Schnittstellentechnologien« verknüpft sind, verstärkt sich die Wirkung direkt durch eine zunehmende Marktdurchdringung mit fahrerlosen Fahrzeugen. Die positiven Rückkopplungsschleifen können langfristig dazu führen, dass weniger Personal im Lager erforderlich wird und das eingesetzte Personal höher qualifiziert sein muss. Die Anzahl an Arbeitsplätzen sinkt damit, gleichzeitig könnte aber auch die Vergütung steigen und die Arbeitsplätze attraktiver werden. Der Trend könnte etwas verlangsamt werden, da mit zunehmendem Anteil an Schnittstellentechnologien auch die Kosten für die Warenübergabe steigen. Allerdings ist davon auszugehen, dass Schnittstellentechnologien nur eingesetzt werden, wenn deren wirtschaftlicher Nutzen überwiegt.

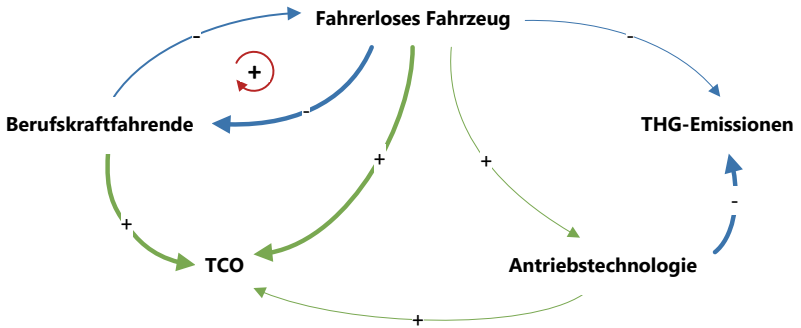
7.2.3.3 Subsystem »Transport«

Die fünf Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Antriebstechnologie«, »Berufskraftfahrende«, »TCO« und »THG-Emissionen« wurden dem Subsystem »Transport« im Logistiksystem zugeordnet. Die Abbildung 25 zeigt das Wirkungsgefüge des Subsystems.

Eine positive Rückkopplungsschleife tritt zwischen der Variable »Fahrerloses Fahrzeug« und »Berufskraftfahrende« auf. Mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge sinkt die Anzahl der Berufskraftfahrenden, da diese nicht länger zur Steuerung des Fahrzeugs erforderlich sind. Mit Rückgang der Berufskraftfahrenden steigt die Attraktivität fahrerloser Fahrzeuge, sodass die Marktdurchdringung zunimmt.

Zwischen den anderen Variablen im Subsystem »Transport« bestehen ausschließlich eindimensionale Wirkungsbeziehungen. Beispielsweise

Abbildung 25: Kausaldiagramm des Subsystems »Transport« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



- | | | | |
|--------|--------------------------------|--------|-----------------------------------|
| — + —> | Sehr stark gleichgerichtet (3) | — - -> | Sehr stark entgegengerichtet (-3) |
| — + —> | Stark gleichgerichtet (2) | — - -> | Stark entgegengerichtet (-2) |
| — + —> | Leicht gleichgerichtet (1) | — - -> | Leicht entgegengerichtet (-1) |
| ⊕ | Positive Rückkopplungsschleife | ⊖ | Negative Rückkopplungsschleife |

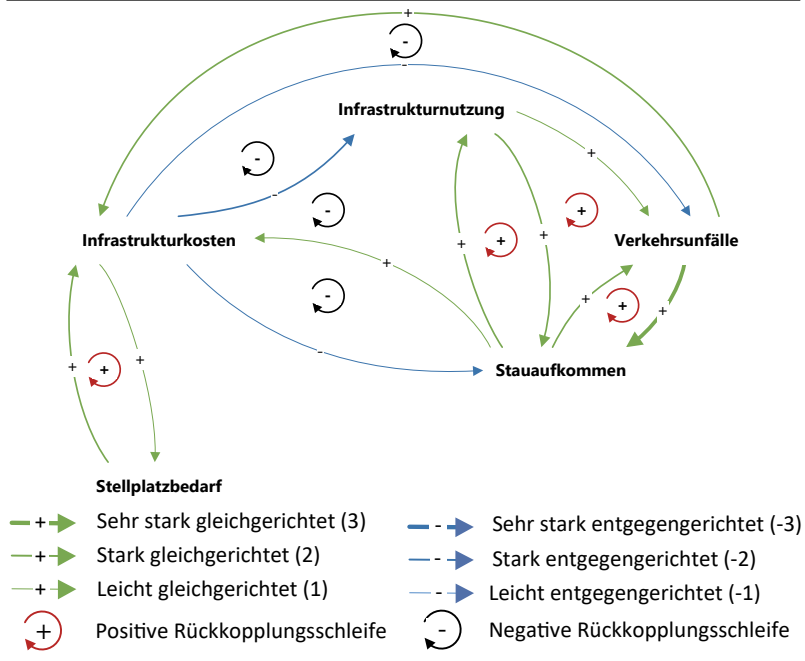
Quelle: Eigene Darstellung

wirkt die Antriebstechnologie auf die TCO ein, diese verändern jedoch die Variable »Antriebstechnologie« nicht. Es wird aber deutlich, dass die Variable »Fahrerloses Fahrzeug« auf alle anderen Variablen des Subsystems einwirkt und damit das System maßgeblich beeinflusst.

7.2.3.4 Subsystem »Verkehrsleistung«

Das Subsystem »Verkehrsleistung« umfasst die fünf Variablen »Stauaufkommen«, »Verkehrsunfälle«, »Infrastrukturnutzung«, »Infrastrukturkosten« und »Stellplatzbedarf«. Deren Beziehungen zueinander sind in Abbildung 26 dargestellt.

Abbildung 26: Kausaldiagramm des Subsystems »Verkehrsleistung« ohne die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



Quelle: Eigene Darstellung

In diesem Subsystem können vier positive und vier negative Rückkopplungsschleifen identifiziert werden.

Ein Anstieg des Stauaufkommens führt zu einer Erhöhung der Verkehrsunfälle, da die Risiken für Unfälle zunehmen. Die Erhöhung der Verkehrsunfälle führt abermals zu einer Erhöhung des Stauaufkommens. Diese beiden Variablen können aufgrund der positiven Rückkopplungsschleife durch Aufschaukeln zu einer Destabilisierung des Systems führen.

Eine Zunahme des Stauaufkommens kann darüber hinaus zu einer Erhöhung der Infrastrukturnutzung führen, da mehr Fahrzeuge die Infrastruktur verwenden. Mit zunehmender Nutzung der Infrastruktur nimmt jedoch auch das Stauaufkommen zu. Der Effekt der Destabilisierung kann auch zwischen diesen Variablen auftreten.

Eine weitere positive Rückkopplungsschleife besteht zwischen den Variablen »Stellplatzbedarf« und »Infrastrukturkosten«. Mit einer Zunahme des Stellplatzbedarfs steigen auch die Kosten für die Infrastruktur, beispielsweise zum Aus- und Neubau sowie zur Instandhaltung. Stehen mehr Infrastrukturgelder, beispielsweise durch zunehmende Steuern, zur Verfügung, kann der Ausbau der Stellplatzfläche vorangetrieben werden, sodass ein leichter Anstieg des Stellplatzbedarfs resultiert.

Auch zwischen den drei Variablen »Infrastrukturnutzung«, »Verkehrsunfälle« und »Stauaufkommen« besteht eine positive Rückkopplungsschleife. Mit einer Zunahme der Infrastrukturnutzung steigt die Anzahl der Verkehrsunfälle. Wie beschrieben, steigt damit das Stauaufkommen und die Infrastrukturnutzung nimmt in der Folge weiter zu.

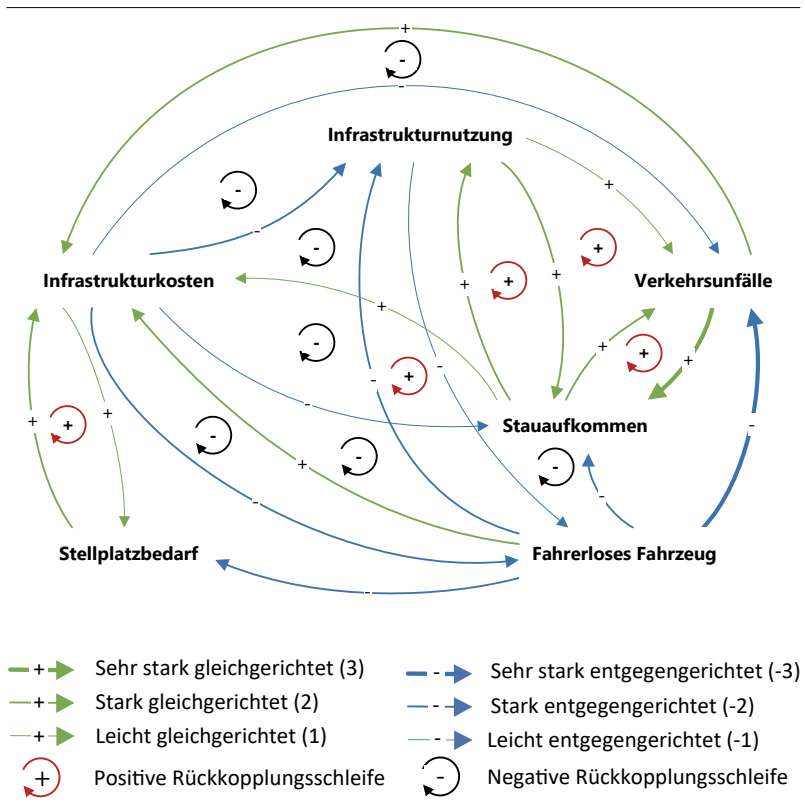
Eine Zunahme des Stauaufkommens bewirkt beispielsweise ein Anstieg der Infrastrukturkosten, da mehr Instandhaltungsaufwand notwendig wird. Zunehmende Kosten bedeuten gleichzeitig, dass mehr Mittel für die Instandhaltung zur Verfügung stehen, deren Investitionen zu einem Rückgang des Stauaufkommens führen können. Die unterschiedlichen Wirkungsweisen dieser negativen Rückkopplungsschleife führen damit zu einer Stabilisierung im Subsystem. Das gleiche Prinzip tritt zwischen den Variablen »Verkehrsunfälle« und »Infrastrukturkosten« auf. Auch hier besteht eine negative Rückkopplungsschleife.

Eine weitere negative Rückkopplungsschleife besteht zwischen den drei Variablen »Infrastrukturkosten«, »Infrastrukturnutzung« und »Stauaufkommen«. Durch die zunehmenden Infrastrukturkosten entfallen mehr Steuern für die Infrastrukturnutzung auf die Nutzenden. Diese höheren Kosten führen zu einer abnehmenden Nutzung der Infrastruktur. Der Rückgang der Infrastrukturnutzung resultiert wiederum in einer Reduktion des Stauaufkommens. Eine vergleichbare Rückkopplungsschleife kann zwischen den Variablen »Infrastrukturkosten«, »Infrastrukturnutzung« und »Verkehrsunfälle« identifiziert werden, da durch die verminderten Infrastrukturkosten auch die Verkehrsunfälle zurückgehen. Mit sinkenden Unfallzahlen werden auch die Infrastrukturkosten vermindert.

Unter Hinzunahme der Variable »Fahrerloses Fahrzeug« tritt eine weitere positive Rückkopplungsschleife im Subsystem »Verkehrsleistung« auf. Diese besteht zwischen den Variablen »Fahrerloses

Fahrzeug« und »Infrastrukturnutzung«, wie die Abbildung 27 visualisiert. Mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge sinkt die Infrastrukturnutzung, da die fahrerlosen Fahrzeuge mit einem verringerten Sicherheitsabstand fahren können und somit mehr Kilometer auf der Bundesautobahn (BAB) zur Verfügung stehen. Die Reduktion der Infrastrukturnutzung wirkt sich positiv auf die Attraktivität fahrerloser Fahrzeuge aus, sodass die Anzahl der Fahrzeuge steigt.

Abbildung 27: Kausaldiagramm des Subsystems »Verkehrsleistung« mit den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens



Quelle: Eigene Darstellung

Eine negative Rückkopplungsschleife kann dagegen zwischen den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug« und »Infrastrukturkosten« ermittelt werden. Mit dem Anstieg der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge steigen die Infrastrukturkosten an, da mehr Technologie für die Fahrzeuge auf der Straßeninfrastruktur erforderlich wird. Mit zunehmenden Kosten sinkt die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge, da die Technologie für die Politik und Öffentlichkeit unattraktiver wird.

Eine zweite negative Rückkopplungsschleife tritt durch die Zunahme fahrerloser Fahrzeuge auf, die zu einem Anstieg der Infrastrukturkosten führen, da mehr Vernetzungstechnologie durch fahrerlose Fahrzeuge erforderlich wird. Die Zunahme der Kosten bewirkt eine Reduktion der Infrastrukturnutzung, weil die Nutzung der Infrastruktur unattraktiver wird. Mit sinkender Infrastrukturnutzung werden fahrerlose Fahrzeuge vermehrt eingesetzt, da die Straßeninfrastruktur für Transporte wiederum an Attraktivität gewinnt.

Eine weitere negative Rückkopplungsschleife besteht zudem zwischen den Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Stauaufkommen« und »Infrastrukturnutzung«. Die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge führt zu einem Rückgang des Stauaufkommens, das in einer sinkenden Infrastrukturnutzung resultiert. Diese Reduktion der Infrastrukturnutzung wirkt sich ebenfalls verstärkend auf die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge aus.

7.3 Ergebnisse aus dem qualitativen Zukunftsmodell

In diesem Kapitel wurden die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem qualitativ ausgewertet und das Wirkungsgefüge untersucht. Mit der Identifikation der Wirkungsbeziehungen und Rückkopplungsschleifen im Zukunftsmodell ist der erste Teil der zweiten Forschungsfrage »*Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet?*« hinsichtlich der qualitativen Wirkungen beantwortet.

Auf Grundlage der Einflussmatrix aus Abschnitt 7.1.5 konnten darüber hinaus die Rollen der Variablen im System identifiziert werden. Dies ist wichtig, um zu erkennen, welche Variablen besonders stark auf das System einwirken und dadurch zu Veränderungen im System führen bzw. welche

Variablen durch das System stark beeinflusst werden. In Bezug auf die Ableitung von Gestaltungsoptionen können diese Ergebnisse genutzt werden, um Hebel für Veränderungen zu identifizieren. Beispielsweise konnte die Variable »Fahrerloses Fahrzeug« als hochaktiv eingestuft werden, sodass diese genutzt werden kann, um das System zu verändern. Die Variablen »TCO«, »THG-Emissionen«, »Kosten für Warenübergabe« sowie »Lieferzuverlässigkeit« wurden hingegen als stark reaktiv eingestuft, sodass diese stark durch das System beeinflusst werden und damit Veränderungen im System sichtbar werden lassen. Sie dienen im betrachteten Logistiksystem als Wirkungsindikatoren des fahrerlosen Fahrens.

Die Einflussmatrix ermöglicht es zudem, ein Kausaldiagramm des Wirkungsgefüges abzubilden, das das Untersuchungssystem und seine Wirkungsbeziehungen ganzheitlich darstellt. In Abschnitt 7.2.3 wurden Rückkopplungsschleifen zum einen zwischen den Subsystemen sowie zum anderen innerhalb der Subsysteme identifiziert. Zwischen den Subsystemen wurden insgesamt neun Rückkopplungsschleifen – drei positive und sechs negative – ermittelt. Innerhalb der Subsysteme konnten insgesamt elf negative und 16 positive Rückkopplungsschleifen identifiziert werden.

Die offensichtlichste Verbindung besteht zwischen dem fahrer losen Fahren und der Reduktion der Berufskraftfahrenden im Subsystem »Transport«. Es wird deutlich, dass eine zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge zu einer Reduzierung der erforderlichen Berufskraftfahrenden führen kann. Dieser Rückgang bewirkt wiederum, dass die Attraktivität fahrerloser Fahrzeuge steigt und die Marktdurchdringung zunimmt. Diese beiden Effekte, verbunden durch eine positive Rückkopplungsschleife, können darin münden, dass ein beschleunigter Rückgang der Berufskraftfahrenden bzw. eine beschleunigte Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge einsetzt. Für mögliche Gestaltungsoptionen kann abgeleitet werden, dass Transportunternehmen und dienstleistende Unternehmen zwar schneller von der neuen Technologie profitieren können, gleichzeitig kann aber ein rapider Rückgang der Arbeitsplätze für Lkw-Fahrende negative Auswirkungen auf die Gesellschaft haben. Als weiterer Wirkungsindikator ist daher die Anzahl der Berufskraftfahrenden zu nennen, der allerdings selbst auch in das System zurückwirkt und damit als Beschleuniger der Einführung des fahrerlosen Fahrens gelten kann.

8 Quantitatives Zukunftsmodell der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem

Im qualitativen Zukunftsmodell wurde deutlich, dass durch das fahrerlose Fahren unterschiedliche Wirkungsbeziehungen auftreten. Aufbauend auf den qualitativen Wirkungen des fahrerlosen Fahrens wird ein Simulationsmodell erstellt, das die Wirkungen einer zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge im Logistiksystem über einen Zeitverlauf quantitativ abbildet. Dies soll die bestehenden Literaturanalysen dahingehend ergänzen, als dass nicht nur qualitative Wirkungszusammenhänge, ausgelöst durch das fahrerlose Fahren, abgebildet werden, sondern auch quantitative Entwicklungen dieser Wirkungen sichtbar und mögliche nicht intendierte Wirkungen (über Rückkopplungsschleifen) berücksichtigt werden.

Um auch die quantitativen Wirkungen abschätzen und in einen zeitlichen Kontext setzen zu können, bedarf es weiterer Analysen und Annahmen. Zunächst wird der Aufbau sowie die Variablen des Simulationsmodells beschrieben. Die Schlüsselvariable im Simulationsmodell stellt die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge dar. Sie ist der Hebel, mithilfe dessen die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem aufgezeigt werden.

Im quantitativen Zukunftsmodell werden alle Wirkungen aus der Einflussmatrix (vergleiche Abschnitt 7.1.5) simuliert. Aufgrund der Komplexität des Logistiksystems wird das quantitative Zukunftsmodell in Form von fünf Simulationsmodellen aufgebaut, die jeweils die Subsysteme abbilden. Diese werden miteinander verknüpft, sodass ein Gesamtmodell des Untersuchungssystems entsteht. Anschließend erfolgt die quantitative Auswertung der Simulationsmodelle hinsichtlich der Veränderungen aufgrund einer zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge.

Basierend auf den Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung werden wünschenswerte Entwicklungen der Variablen beschrieben, sodass Gestaltungsoptionen in der weiteren Arbeit zielgerichtet ermittelt werden können, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu reduzieren.

8.1 Aufbau des Simulationsmodells

Zur Quantifizierung der vorangegangenen Wirkungen werden Vergangenheitsdaten des Jahres 2019 sowie Annahmen für einzelne Variablen herangezogen. Das Jahr 2019 als Basisjahr der Simulation wurde ausgewählt, da die Daten unabhängig der Entwicklungen durch die Covid-19-Pandemie sowie die Ukraine Krise in den Folgejahren 2020 und 2021 vorliegen und somit disruptive Entwicklungen der Weltwirtschaft vernachlässigt werden, deren Auswirkungen zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abgeschätzt werden können. Aus diesem Grund wird keine Trendfortschreibung vorgenommen. Alle Veränderungen werden nur im Vergleich zum Basisjahrs betrachtet.

Mithilfe der identifizierten Indikatoren des Variablensatzes (vgl. Tabelle 7 in Abschnitt 6.2) werden diese Basiswerte in das Simulationsmodell eingepflegt. Das Simulationsmodell bildet alle Wirkungsbeziehungen, die in der Einflussmatrix (vgl. Abbildung 18 in Abschnitt 7.1.5) aufgeführt wurden, ab, sodass auch indirekte Effekte, die nicht ausschließlich durch die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge auftreten, berücksichtigt werden.

Der zeitliche Betrachtungshorizont der Simulation orientiert sich an der bestehenden Literatur. Krail et al. (2019, S. 106) gehen von einer Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge ab dem Jahr 2036 aus. Die Einführung des fahrerlosen Fahrens erfolgt insgesamt über einen Zeitraum von 35 Jahren mit einer etwa 90-prozentigen Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge im Jahr 2050. Dabei gehen geringere Automatisierungsstufen dieser Entwicklung voraus. Da in diesem Modell keine vorgelagerten Automatisierungsstufen betrachtet werden und potenzielle Entwicklungen der langfristigen Zukunft ermittelt werden sollen, umfasst der Betrachtungshorizont der Simulation insgesamt 30 Jahre.

Der Betrachtungszeitraum wird in drei gleichmäßige Zeitintervalle eingeteilt: Eine kurzfristige, eine mittelfristige und eine langfristige Zukunft. Dies dient dazu, eine realitätsnähere Aussagekraft der Trendabschätzung abzuleiten. Die Zeitintervalle gliedern sich wie folgt:

- Kurzfristige Zukunft: 0 bis 10 Jahre
- Mittelfristige Zukunft: 11 bis 20 Jahre
- Langfristige Zukunft: 21 bis 30 Jahre

An dieser Stelle wird jedoch explizit nicht über eine Prognose, sondern über eine Trendabschätzung gesprochen. Die Entwicklung des Simulationsmodells dient nicht dazu, eine exakte Aussage über die Zukunft zu treffen, sondern dazu, eine denkbare Zukunft aufzuzeigen, um mögliche unerwünschte und erwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem aus ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Sicht hervorzuheben. Das Simulationsmodell kann daher vielmehr als Grundlage für eine Szenariobetrachtung mit drei unterschiedlichen Zeitständen verstanden werden.

Das Simulationsmodell enthält die in Abschnitt 6.2 ermittelten Variablen des Logistiksystems, welche in ihren Subsystemen abgebildet werden. Es besteht aus fünf Ebenen, die mithilfe von Schattenvariablen⁸ miteinander verknüpft sind.

Zur Berechnung der Variablen werden jeweils die Indikatoren herangezogen. Insgesamt umfasst das Modell 18 Hauptvariablen.

Die einzelnen Variablen werden in der Regel mithilfe von Hilfsvariablen beschrieben. Für das Simulationsmodell wurde zudem eine weitere Hilfsvariable eingefügt, die die simultane Berechnung (»simultaneous equation«) der Rückkopplungsschleifen unterstützt. Diese Hilfsvariable ist ein Platzhalter und ohne Wert hinterlegt.

Die Formalisierung der Bestandteile des Simulationsmodells sowie die hinterlegten Annahmen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

⁸ Schattenvariablen sind im Simulationstool Vensim Variablen, die über eine Verknüpfung auf einer anderen Ebene oder in einer anderen Gleichung definiert wurden. Sie dienen dazu, die Komplexität eines Simulationsmodells zu reduzieren. Im Folgenden werden die Schattenvariablen in den Abbildungen grau hinterlegt dargestellt.

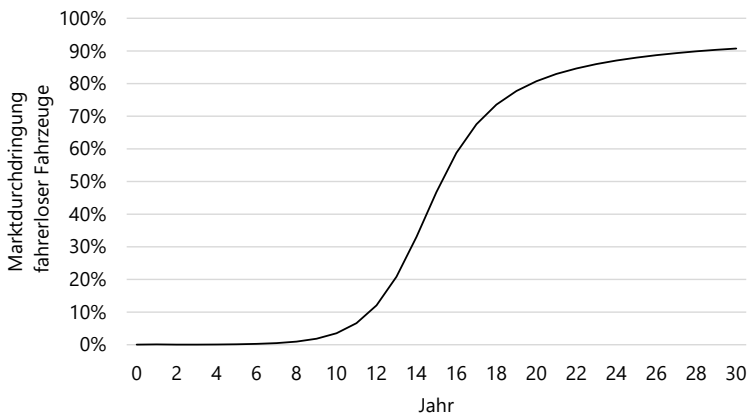
8.1.1 Formalisierung der Variable

»Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge«

Die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge im Straßen-güterverkehr ist die untersuchungsleitende Hypothese ausgehend von einer S-förmigen Entwicklung – mit einem geringen Zuwachs in der Einführungsphase, einem starken Zuwachs in der Wachstumsphase und einer leichten Stagnation in der Reifephase. Diese wurde in Anlehnung an Ginsburg und Uygur (2017, S. 6) basierend auf dem Produktlebenszyklusmodell in entwickelten Ländern nach Vernon (1966, S. 199) aufgestellt (siehe Abbildung 28).

Es handelt sich bei der Marktdurchdringung um eine ex-ante-Betrachtung, ausgehend von Jahr Null (Markteinführung) bis Jahr 30. Dabei erfolgt keine Marktdurchdringung von 100 % nach 30 Jahren, da davon ausgegangen wird, dass parallel weiterhin manuell geführte Fahrzeuge im Markt verbleiben. Die Annahme erfolgt in Anlehnung an Krail et al. (2019, S. 106). Im Jahr 30 liegt daher die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge bei etwa 90 %, wie in Abbildung 28 visualisiert. Die weitere Diskussion basiert dementsprechend auf den festgelegten Werten dieser als Steuerungsvariable identifizierten Variable.

Abbildung 28: Kurve der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge

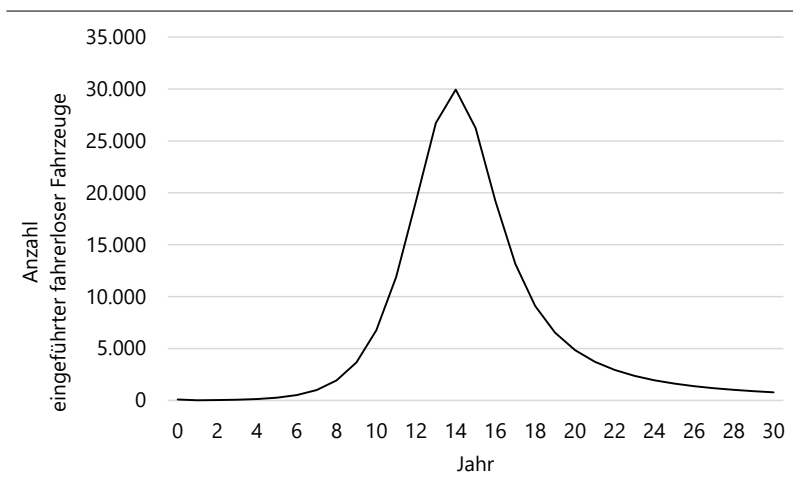


Quelle: Eigene Darstellung

Das Modell in Abbildung 29 wurde zur Berechnung der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge im Straßengüterverkehr mithilfe der Simulationssoftware Vensim in Anlehnung an Martin (2001, S. 26f.) entwickelt.

Zur Entwicklung einer S-Kurve bedarf es unterschiedlicher Rückkopplungsschleifen im Modell: Eine positive Rückkopplungsschleife bildet die Kaufbereitschaft ab, während eine negative Rückkopplungsschleife die Kaufsättigung beinhaltet. Der Anteil der manuellen Fahrzeuge nimmt über den Zeitverlauf ab, da durch die Kaufbereitschaft für fahrerlose Fahrzeuge die Fahrzeuge umgewandelt werden. Damit steigt die Anzahl fahrerloser Fahrzeuge und auch der Anteil am Gesamtbestand, ausgedrückt in der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge. Um die stagnierende Umwandlung manueller in fahrerlose Fahrzeuge am Ende des Betrachtungszeitraums darzustellen, wird eine Kaufsättigung in das Modell integriert. Diese führt zur Deckelung des Bestands bis zu einem gewissen Grenzwert.

Abbildung 30: Simulierte Umwandlung fahrerloser Fahrzeuge pro Jahr



Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung 30 zeigt den simulierten Fahrzeugbestand durch die Umwandlung manueller in fahrerlose Fahrzeuge pro Jahr. Dieser startet mit einem Anfangswert von 10 fahrerlosen Fahrzeugen und steigert sich bis zum Jahr 14 auf knapp 30.000 Fahrzeuge pro Jahr. Anschließend sinkt die Anzahl der Umwandlungen pro Jahr wieder.

Im Gegensatz zu den Subsystemen wird die Variable »Fahrerloses Fahrzeug« als Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge abgebildet und auf einer eigenen Ebene darstellt, wie Abbildung 31 zeigt.

Im Simulationsmodell wirken die Veränderungseffekte der Variablen »Infrastrukturkosten«, »Infrastrukturnutzung«, »Fahrzeugfahrleistung«, »Straßentransportnachfrage«, »Berufskraftfahrende« und »Schnittstellentechnologien« auf die Kaufbereitschaft fahrerloser Fahrzeuge ein, die in der Abbildung grau hinterlegt sind. Die Wirkungen werden anteilig nach ihrer Intensität sowie ihrer Richtung der Wirkungsbeziehung in der Einflussmatrix auf die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge addiert.

Die Berechnungen der Wirkungen erfolgen nach dem Schema in Formel 2.

Formel 2: Berechnungsschema der Wirkungsbeziehungen

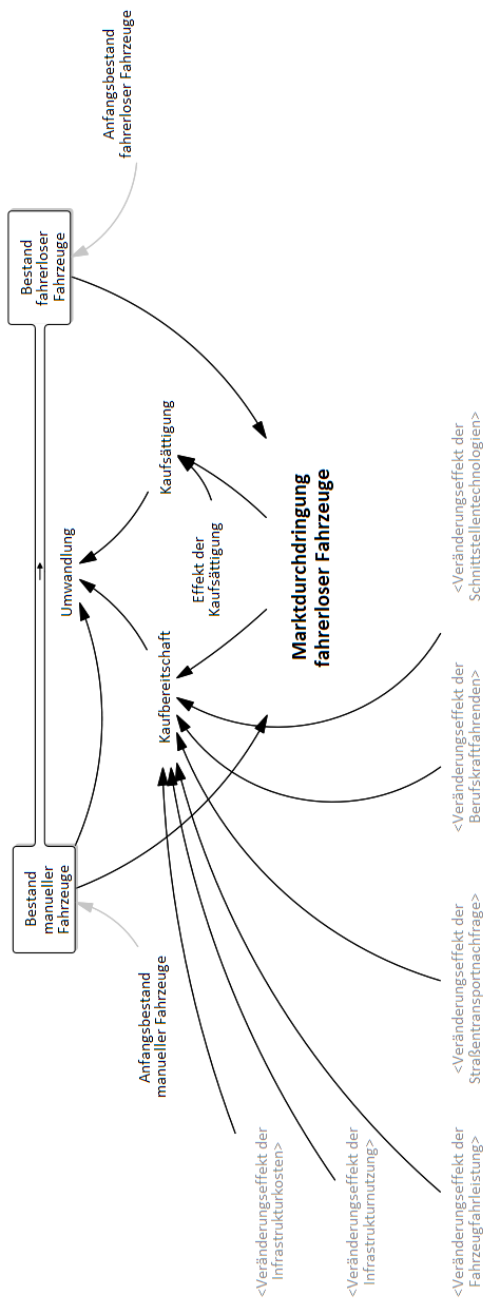
$$\begin{aligned} \text{Variable } Y &= \text{Anfangsbestand Variable } Y \\ &+ ((\text{Anfangsbestand Variable } Y \\ &\quad * \text{anteiliger Veränderungseffekt Variable } X) \\ &\quad * \text{gerichtete Gewichtung}) \end{aligned}$$

Die gerichtete Gewichtung ist dabei der gewichtete Mittelwert der Einflüsse auf eine Variable, nach dem Schema in Formel 3.

Formel 3: Berechnungsschema der gerichteten Gewichtung

$$\text{Gerichtete Gewichtung} = \frac{\text{Einfluss Variable } X}{\text{Passivsumme Variable } Y}$$

Abbildung 31: Simulationsebene »Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge«



Quelle: Eigene Darstellung mittels Vensim

8.1.2 Formalisierung der Subsysteme

In Abbildung 32 ist ein Ausschnitt aus dem Simulationsmodell zu sehen, der das Subsystem »Logistikleistung« mit seinen Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Straßentransportnachfrage«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Fahrzeugauslastung« zeigt.

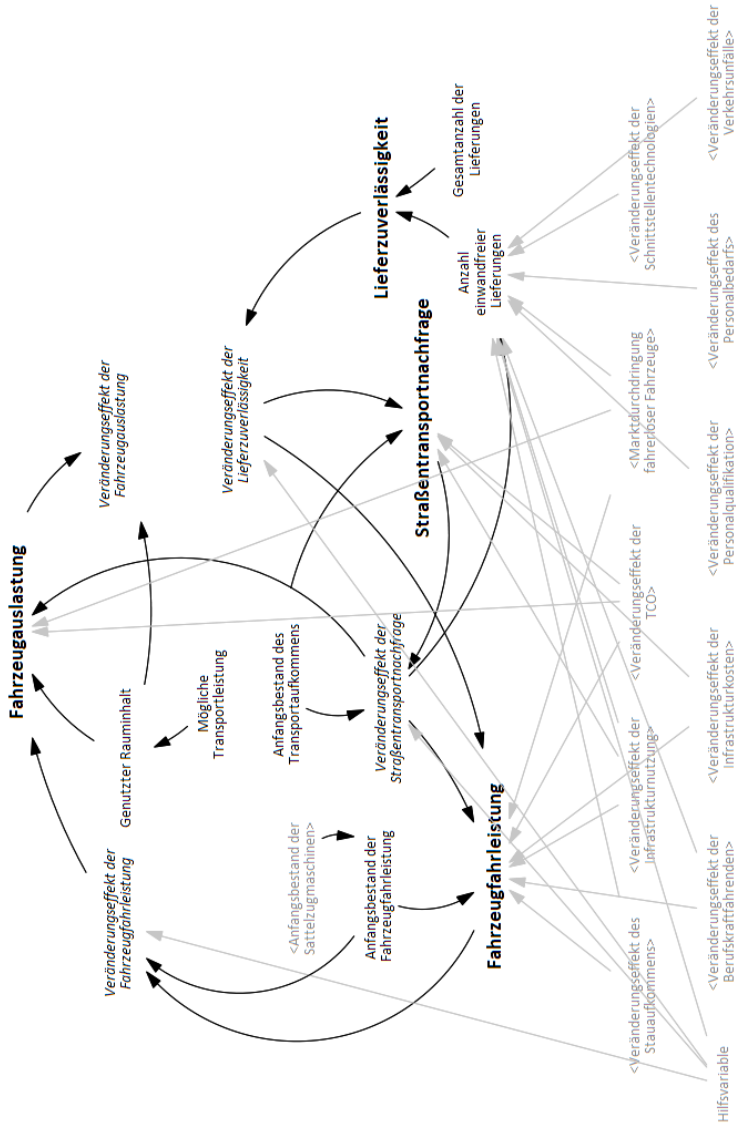
In schwarz hinterlegt sind die dem Subsystem zugehörigen Haupt- und Hilfsvariablen, die grau hinterlegten Schattenvariablen sind Teil der anderen Subsysteme und stellen Wirkungen dar.

Die Fahrzeugfahrleistung (in Fzkm) pro Jahr ist die Summe der zurückgelegten Kilometer pro Fahrzeug pro Jahr. Im Jahr 2019 betrug die Summe der Fahrleistung aller Sattelzugmaschinen 20,4 Mrd. km. Bei einem Anfangsbestand von 218.454 Fahrzeugen beläuft sich die Fahrzeugfahrleistung im Jahr Null der Simulation auf 93.384 km pro Fahrzeug (Bundesanstalt für Straßenwesen 2021b, S. 2). Die Variable »Fahrzeugfahrleistung« wird durch die Veränderungseffekte der Variablen »Stauaufkommen«, »Berufskraftfahrende«, »Infrastrukturnutzung«, »Infrastrukturkosten«, »TCO« und »Fahrerloses Fahrzeug« beeinflusst.

Die Variable »Straßentransportnachfrage« bildet das Transportaufkommen (in Mio. t) ab. Das Transportaufkommen im Straßengüterverkehr beläuft sich zum Zeitpunkt Null auf etwa 2.477 Mio. t (Kraftfahrt-Bundesamt 2021b, S. 241). Die Straßentransportnachfrage wird durch die Veränderungseffekte der Variablen »Infrastrukturnutzung«, »Infrastrukturkosten« sowie »TCO« beeinflusst.

Die Lieferzuverlässigkeit in Prozent pro Jahr stellt den Anteil an einwandfreien Lieferungen an der Gesamtanzahl an Fahrten im Straßengüterverkehr pro Jahr dar. Im Jahr Null finden 105,7 Mio. Fahrten statt (Kraftfahrt-Bundesamt 2020b, S. 14). Wird ein Anteil einwandfreier Fahrten von 80 % angenommen, beläuft sich die Anzahl einwandfreier Fahrten auf 84,56 Mio. für das Jahr Null. Die Anzahl einwandfreier Fahrten wird neben der Straßentransportnachfrage durch die Veränderungseffekte der Variablen »Stauaufkommen«, »Berufskraftfahrende«, »Infrastrukturnutzung«, »Personalqualifikation«, »Personalbedarf zu Be- und Entladung«, »Schnittstellentechnologien« und »Verkehrsunfälle« beeinflusst.

Abbildung 32: Simulationsmodell »Logistikleistung«



Quelle: Eigene Darstellung mittels Vensim

Die Fahrzeugauslastung beschreibt den Auslastungsgrad von Beförderungsleistung (in tkm) in Prozent. Dieser berechnet sich durch den genutzten Rauminhalt, welcher aus der genutzten Transportleistung dividiert durch die mögliche Transportleistung zusammengesetzt wird. Die mögliche Transportleistung für Sattelzugmaschinen und Sattelanhänger liegt im Jahr Null bei 392 Mrd. tkm (Fahrten mit Ladung). Die tatsächliche Beförderungsleistung liegt jedoch nur bei 224 Mrd. tkm und entspricht damit einem Anteil von ca. 57 % im Jahr Null (Kraftfahrt-Bundesamt 2020b, S. 14). Auf diese Variable wirkt zum einen die Transportleistung und zum anderen die Variablen »TCO« und »Fahrerloses Fahrzeug« ein.

Das Subsystem Warenübergabe setzt sich aus den vier Variablen »Schnittstellentechnologien«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung«, »Personalqualifikation« und »Kosten für Warenübergabe« zusammen.

Wie in den Modellen zuvor bilden die schwarz hinterlegten Variablen das eigentliche Subsystem ab und die grau hinterlegten die Veränderungseffekte, die auf die Variablen einwirken. Ein Ausschnitt des Subsystems »Warenübergabe« aus dem Simulationsmodell ist in der Abbildung 33 zu sehen.

Im Simulationsmodell wird angenommen, dass der Anteil an Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe in Immobilien zum Zeitpunkt Null bei 20 % liegt. Dieser Wert ist fiktiv und dient der Visualisierung möglicher Effekte. Dieser Anteil wird im Modell durch die Veränderungseffekte der Variablen »Kosten für Warenübergabe«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung«, »Personalqualifikation«, »Berufskraftfahrende«, »Straßentransportnachfrage«, »Fahrerloses Fahrzeug« und »Lieferzuverlässigkeit« beeinflusst.

Der Personalbedarf zur Be- und Entladung pro Jahr ergibt sich aus der Anzahl des Personals für den Güterumschlag addiert zu der Anzahl an Personal für Aufsicht, Führung der Lagerwirtschaft und des Güterumschlags. Erstere liegt bei 20.242 Personen mit Berufen im Güterumschlag, letztere beläuft sich auf 28.087 Personen mit Berufen für Aufsicht und Führung zum Zeitpunkt Null (Bundesagentur für Arbeit Statistik 2020). Beeinflusst wird der Personalbedarf zur Be- und Entladung durch die Veränderungseffekte der Schnittstellentechnologien, der Personalqualifikation, der Berufskraftfahrenden, der Straßentransportnachfrage und der Fahrerlosen Fahrzeuge.

Die Variable »Personalqualifikation« wird als der Anteil des Personals zur Aufsicht und Führung am Personalbestand in der Warenübergabe insgesamt gemessen. Dieser beträgt im Jahr Null etwa 58 %, gemessen am Bestand des Personals in der Warenübergabe (Bundesagentur für Arbeit Statistik 2020). Auf diese Variable wirken die Veränderungseffekte der Variablen »Personalbedarf zur Be- und Entladung« sowie »Schnittstellentechnologien« ein.

In den Kosten für die Warenübergabe sind die Personalkosten in der Warenübergabe, die Schnittstellenkosten der Immobilie und die Kosten für Ladeinfrastruktur in Euro pro Jahr berücksichtigt. Die Personalkosten berechnen sich aus der Anzahl des Personals für den Güterumschlag und der Anzahl des Personals in Führungspositionen multipliziert mit dem jeweiligen Unternehmensentgelt. Das Unternehmensentgelt für Personal im Güterumschlag wird mit 37.500 Euro angenommen. Dies berechnet sich aus einem Durchschnittsgehalt für Lager-Fachkräfte von etwa 30.000 Euro und einem Arbeitgeberanteil von etwa 25 % (stepstone.de 2022b). Die Unternehmensentgelte für Aufsicht- und Führungspersonal werden mit 62.500 Euro angenommen (stepstone.de 2022a). Die Personalkosten werden auf eine Immobilie heruntergebrochen, mit der Annahme, dass es 8.000 Logistikimmobilien⁹ in Deutschland gibt. Dies erfolgt, da es sich bei der Kostenbetrachtung um eine einzelwirtschaftliche Perspektive handelt und daher die Kosten pro Unternehmen ermittelt werden.

Es wird angenommen, dass die Ausstattung der Warenübergabe mit Schnittstellentechnologien pro Immobilie maximal 100.000 Euro kostet. Dieser Wert basiert auf den Annahmen nach Flämig et al. (2020, S. xiii) zu den Gesamtkosten für die automatisierte Warenübergabe in Logistikimmobilien. Die Kosten für Schnittstellentechnologien schwanken je nach Größe der Immobilie und auszustattender Warenübergabeplätze. In Abhängigkeit des Anteils an Schnittstellentechnologien entwickeln sich die Kosten für die Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe.

9 Die Anzahl der Logistikimmobilien orientiert sich an der erhobenen Datenmenge von 8.000 Einzelimmobilien nach Veres-Homm et al. (2015, S. 24).

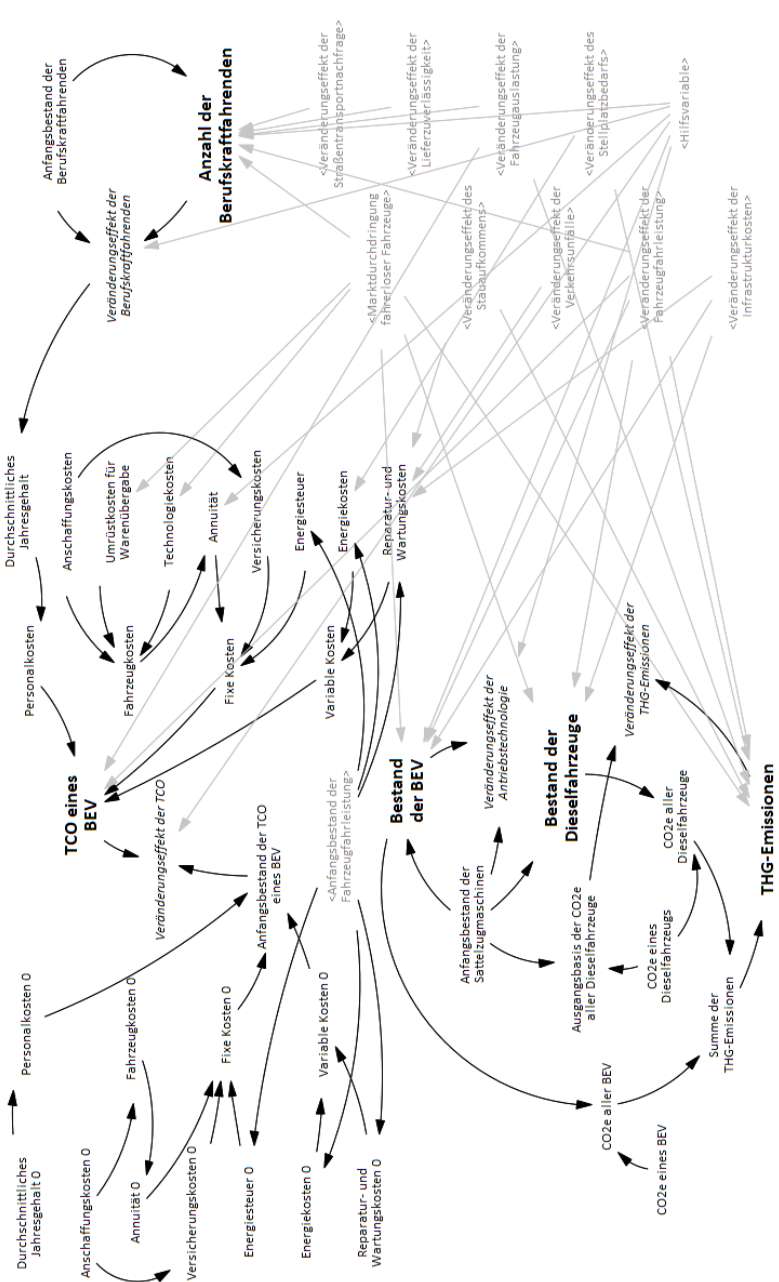
Auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur entwickeln sich in Abhängigkeit des Anteils an batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Der Kaufpreis von Ladeinfrastruktur schwankt zwischen 2.000 Euro für eine Wallbox und über 100.000 Euro für eine Ladesäule (Böttcher AG 2022; ESL Mobility 2022). Für den Ladevorgang einer Sattelzugmaschine ist eine Ladestation mit 180 Kilowatt (kW) oder mit 360 kW denkbar. Da die Fahrzeuge in der Warenübergabe nur für einen beschränkten Zeitraum aufgeladen werden können, ist davon auszugehen, dass Schnellladesäulen mit 360 kW installiert werden (heliox 2022). Eine solche Ladesäule kostet etwa 100.000 Euro.

Die Kosten sowohl für Ladesäulen als auch für Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe sind angelehnt an bestehende Werte und können hinsichtlich der ausgewählten Automatisierungs- und Antriebstechnologie variieren. Die Kosten für die Warenübergabe werden zusätzlich durch die Veränderungseffekte der Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Fahrzeugauslastung« und »Straßentransportnachfrage« beeinflusst.

Die Abbildung 34 zeigt das Subsystem »Transport« mit den vier Variablen »Antriebstechnologie«, »Berufskraftfahrende«, »TCO« und »THG-Emissionen«.

Die Variable »Antriebstechnologie« wird im Simulationsmodell in die Anzahl der dieselbetriebenen und der batterieelektrischen Fahrzeuge unterteilt. Diese zwei Variablen beschreiben die zeitliche Veränderung der Antriebstechnologie im Logistiksystem. Die Variablen der Anzahl an Dieselfahrzeugen und der BEV pro Jahr werden gebildet aus dem Bestand an Sattelzugmaschinen (218.454 Sattelzugmaschinen zum Zeitpunkt Null) (Kraftfahrt-Bundesamt 2022a). Dabei wird angenommen, dass im Jahr Null ausschließlich Dieselfahrzeuge eingesetzt werden und keine BEV. Über die Zeit ersetzen die BEV die Dieselfahrzeuge, sodass die Anzahl an Dieselfahrzeugen prozentual zur Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge sinkt während die Anzahl an batterieelektrischen Fahrzeugen prozentual steigt. Gleichzeitig wirken die Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Infrastrukturkosten« auf die Variable der Antriebstechnologie ein. Der Veränderungseffekt der Antriebstechnologie wird in Form der Veränderung der BEV dargestellt.

Abbildung 34: Simulationsmodell »Transport«



Quelle: Eigene Darstellung mittels Vensim

Die Variable »Berufskraftfahrende« ergibt sich aus der Anzahl an Berufskraftfahrenden pro Jahr. Zum Zeitpunkt Null sind 572.248 Berufskraftfahrende in Deutschland tätig (Bundesagentur für Arbeit Statistik 2020). Die Variable wird durch die Veränderungseffekte der Variablen »Straßen-transportnachfrage«, »Fahrzeugfahrleistung«, »Lieferzuverlässigkeit«, »Fahrzeugauslastung« und »Fahrerloses Fahrzeug« in Abhängigkeit der Gewichtung aus der Einflussmatrix beeinflusst.

Die TCO werden im Simulationsmodell für BEV mit und ohne Automatisierungstechnologie berechnet, um die Veränderungen durch das fahrerlose Fahren vergleichen zu können, da angenommen wird, dass fahrerlose Fahrzeuge auch gleichzeitig BEV sind. Allgemein setzen sich die TCO in Euro pro Jahr aus den variablen Kosten, den fixen Kosten und den Personalkosten zusammen. In diesem Fall wird das Bezugsjahr 2020 zugrunde gelegt, da hierfür eine breite Datenbasis vorhanden ist. Es werden zudem die Werte ohne zusätzliche Steuerungselemente oder zukünftige Entwicklungen angenommen.

Die variablen Kosten umfassen die Reparatur- und Wartungskosten, die Energiekosten sowie die Mautkosten. Die Reparatur- und Wartungskosten werden in Anlehnung an die Nationale Plattform Mobilität Arbeitsgruppe 1 »Klimaschutz und Verkehr« (2020, S. 41) mit 14.600 Euro pro Fahrzeug angenommen. Die angegebenen Kosten werden durch die jährliche Fahrzeugfahrleistung eines Fahrzeugs dividiert, um die Kosten pro km zu erhalten. Gleichzeitig wirken die Veränderungseffekte der Variablen »Stauaufkommen«, »Verkehrsunfälle« und »Infrastrukturkosten« auf die Reparatur- und Wartungskosten, da diese aufgrund der höheren Abnutzung der Fahrzeuge steigen. Die Energiekosten ergeben sich aus dem Energieverbrauch und den Treibstoffkosten. Im Simulationsmodell wird angenommen, dass der Veränderungseffekt des Stellplatzbedarfs auf die Energiekosten wirkt, da mit einer zunehmenden Anzahl von Stellplätzen weniger Energie für die Parkplatzsuche aufgewendet werden muss. Für BEV werden keine Mautkosten im Jahr Null angenommen, da BEV nach Paragraph 1 Absatz 2 Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG) im Jahr 2019 mautbefreit sind.

Die fixen Kosten in Euro pro Jahr ergeben sich aus den Annuitäten, der Energiesteuer und den Versicherungskosten in Euro pro Jahr. Die

Annuität in Euro pro Jahr wird auf Basis der Fahrzeugkosten in Euro pro Jahr sowie der Berechnung für ein Fahrzeug mit einer Laufzeit von 6 Jahren und einem Steuersatz von 2 % errechnet. Die Fahrzeugkosten in Euro pro Jahr umfassen die Anschaffungskosten, die Umrüstkosten für die Warenübergabe und die Kosten für Automatisierungstechnologie im Fahrzeug in Euro pro Jahr. Um einen Veränderungseffekt durch das fahrerlose Fahren zu erzielen, werden die Umrüst- und Automatisierungstechnologiekosten anteilig an der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge berechnet. Die Kosten für die Energiesteuer ergeben sich aus dem Energieverbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro km und der Treibstoffsteuer in Euro pro kWh multipliziert mit der Fahrleistung. Die Versicherungskosten betragen 1,5 % der Anschaffungskosten.

Für die Berechnung der Personalkosten wird die Anzahl der Berufskraftfahrenden mit dem durchschnittlichen Unternehmensentgelt von Berufskraftfahrenden in Euro pro Jahr multipliziert. In Abhängigkeit der Anzahl der Berufskraftfahrenden verändern sich im Simulationsmodell auch die Personalkosten über die Zeit.

Die Tabelle 13 fasst den Dateninput für die einzelnen Kostengrößen der TCO zusammen.

Die absoluten THG-Emissionen werden zum einen für Dieselfahrzeuge und zum anderen für BEV berechnet. Hierbei wird die Anzahl der jeweiligen Fahrzeuge mit der Fahrzeugfahrleistung multipliziert. Anschließend werden die Fahrzeugkilometer aller Dieselfahrzeuge bzw. BEV mit den jeweiligen Werte für CO₂-Äquivalente (CO₂e) verrechnet. Für Dieselfahrzeuge werden 877,1 Gramm (g) CO₂e pro km¹⁰, für BEV werden Null kg CO₂e pro km angenommen (infras 2022). Hierbei wird eine Tank-to-Wheel-Perspektive eingenommen. Die Summe der CO₂e von Diesel und BEV wird den CO₂e einer reinen Dieselfahrzeugflotte des Jahres Null gegenübergestellt. Die Summe der CO₂e wird zudem durch den Einfluss der zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge sowie der Veränderungseffekte der Variablen

10 Der Wert für CO₂e gilt für Lkw >34-40t Euro-VI D-E bei einer aggregierten durchschnittlichen Straßensituation nach UBA 2021 in Deutschland. Als Basis gilt das Jahr 2020.

Tabelle 13: Dateninput für die Berechnung der TCO von batterieelektrischen Sattelzugmaschinen

Kostengröße	Kosten
Reparatur- und Wartungskosten	0,156 €/km
Energieverbrauch	1,29 kWh/km
Treibstoffkosten	0,1201 €/kWh
Mautkosten	0 €/km
Energiesteuer	0,0132 €/kWh
Versicherungskosten	9.900 €
Anschaffungskosten	660.000 €
Umrüstkosten für die Warenübergabe	5.000 €
Kosten für Automatisierungstechnologie	21.588 €
Personalkosten	66.000 €

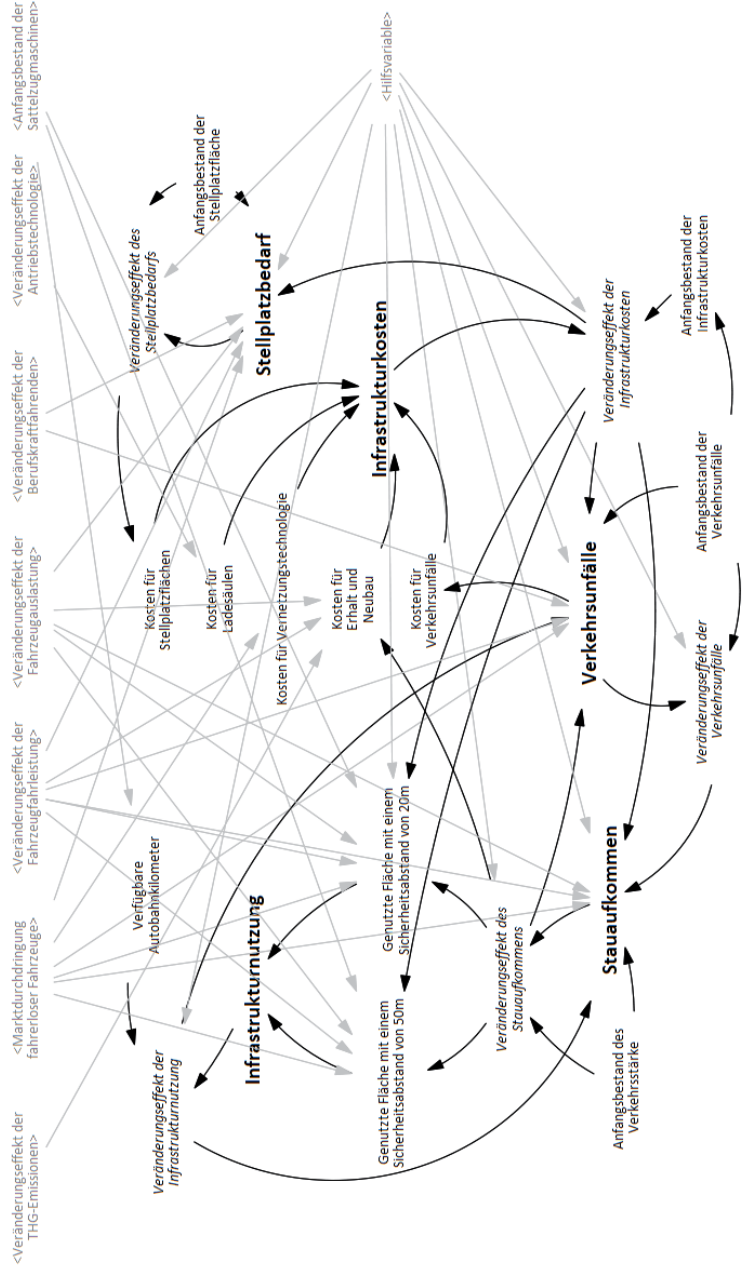
Quelle: Eigene Zusammenstellung in Anlehnung an Nationale Plattform Mobilität Arbeitsgruppe 1 »Klimaschutz und Verkehr« (2020, S. 22ff.), Jöhrens et al. (2018, S. 40), Roland Berger (2016, S. 11), Complete Logistics Systems international GmbH (2021)

»Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrzeugauslastung«, »Stauaufkommen« und »Stellplatzbedarf« beeinflusst.

Die Abbildung 35 präsentiert einen Ausschnitt aus dem Subsystem »Verkehrsleistung«. Es sind die Variablen »Stauaufkommen«, »Verkehrsunfälle«, »Infrastrukturnutzung«, »Infrastrukturkosten« und »Stellplatzbedarf« abgebildet, die im Weiteren formalisiert werden. Das Stauaufkommen im Simulationsmodell wird durch den Verkehrsfluss und die Veränderungseffekte der Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrzeugauslastung«, »Fahrerloses Fahrzeug«, »Verkehrsunfälle«, »Infrastrukturnutzung« und »Infrastrukturkosten« berechnet.

Das Stauaufkommen wird mithilfe des Verkehrsflusses ermittelt, der sich aus der Stromgeschwindigkeit und der Verkehrsdichte ergibt. Als Annahme wird eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke von circa 7.580 Kraftfahrzeuge pro 24 Stunden im Schwerlastverkehr zugrunde

Abbildung 35: Simulationsmodell »Verkehrsleistung«



Quelle: Eigene Darstellung mittels Vensim

gelegt (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2019b, S. 139). Wird die tägliche Verkehrsstärke auf ein Jahr umgerechnet, führt dies dazu, dass im Jahr etwa 2.766.700 Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs einen bestimmten Streckenabschnitt durchquert haben.

Die Variable »Verkehrsunfälle« wird mithilfe der Anzahl an Verkehrsunfällen berechnet. Die Anzahl der Unfälle zum Zeitpunkt Null beträgt 36.939 (Statistisches Bundesamt 2020). Hierbei handelt es sich um Unfälle unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen mit Personen- (27.103) und Sachschaden (9.836). Die Variable wird durch die Veränderungseffekte der Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrerloses Fahrzeug«, »Berufskraftfahrende«, »Stauaufkommen«, »Infrastrukturnutzung« und »Infrastrukturkosten« beeinflusst.

Wie in Abschnitt 7.1.4.3 beschrieben, kann angenommen werden, dass sich durch fahrerlose Fahrzeuge der Sicherheitsabstand von 50 auf 20 m verringern lässt. Dies führt dazu, dass sich mehr Fahrzeuge pro km aufhalten können und damit mehr Infrastrukturokapazität zur Verfügung steht. Die Infrastrukturnutzung in km pro Jahr ergibt sich aus der Länge der Fahrzeuge mit einem Sicherheitsabstand von 50 m und der Länge der Fahrzeuge mit einem Sicherheitsabstand von 20 m. Die genutzte Straßlänge je Lkw setzt sich aus der Länge für Sattelzugmaschinen (16,5 m) und dem Sicherheitsabstand in m (50 m oder 20 m) zusammen. Diese Länge wird multipliziert mit der Anzahl an Sattelzugmaschinen pro Jahr (218.454 im Jahr Null). Die Verkürzung von einem Sicherheitsabstand von 50 auf 20 m wird durch die Veränderungseffekte der Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrzeugauslastung«, »Fahrerloses Fahrzeug«, »Stauaufkommen« und »Infrastrukturkosten« beeinflusst.

Die Infrastrukturkosten setzen sich zusammen aus den Kosten für Stellplatzfläche, den Kosten für Ladesäulen, den Kosten für Vernetzungstechnologie, den Kosten für Neu- und Ausbau sowie den Kosten für Unfälle. Die Kosten für die Stellplatzfläche pro Jahr ergeben sich aus den Kosten für den Bau in Höhe von 10.000 Euro pro Parkplatz multipliziert mit der Anzahl an neuen Parkplätzen pro Jahr, die mit 5.000 fiktiv angenommen wird. Dieser Wert ist angelehnt an die Stellplatzentwicklung an und auf Autobahnen in Deutschland der letzten 10 Jahre, die bei circa 2.000 Parkplätzen lag, wobei weiterhin ein Fehlbestand von etwa 23.000

regulären Parkmöglichkeiten vorliegt (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2021). Somit müssten etwa doppelt so viele Parkmöglichkeiten geschaffen werden, um den Fehlbestand auszugleichen. Auf diese Kosten wirkt der Veränderungseffekt der Variable »Stellplatzbedarf« ein.

Die Bundesregierung hat in ihrem Masterplan »Ladeinfrastruktur« den Ausbau von einer Million öffentlich-zugänglichen Ladepunkten bis zum Jahr 2030 festgelegt (Die Bundesregierung 2019, S. 2). Mit einem Volumen von 300 Mio. Euro wurden in dem daraus resultierenden Förderprogramm das Ziel von 15.000 Ladepunkten festgelegt. Daraus kann abgeleitet werden, dass pro Ladepunkt Kosten in Höhe von etwa 20.000 Euro für die öffentlich-zugängliche Ladeinfrastruktur anfallen. Bis zum Jahr 2030 sollen eine Million Ladepunkte in Deutschland entstanden sein, die folglich zu Gesamtkosten von 20 Mrd. Euro führen (Die Bundesregierung 2019, S. 2). Da dieser Wert für die Infrastruktur in der gesamten Bundesrepublik Deutschland gilt, wird für die Bundesautobahn, die einen Anteil von 6% am Straßennetz des überörtlichen Verkehrs ausmacht, Kosten in Höhe von 1,2 Mrd. Euro angenommen. Da eine Ladesäule für Sattelzugmaschinen etwa 100.000 Euro kostet, könnten 1.200 Lkw-Ladesäulen an der BAB entstehen. Die Entwicklung der Kosten für die Ladeinfrastruktur werden in Abhängigkeit der Anzahl der BEV berechnet.

Die Kosten für die Infrastrukturtechnologie, die aufgrund der fahrerlosen Fahrzeuge erforderlich wird, ergeben sich durch die notwendige Ausstattung zum automatisierten und vernetzten Fahren. Zur Ausstattung gehören beispielsweise Erfassungstechnik, Hintergrundsysteme, Kartenmaterial, Abbild der Infrastruktur, Kommunikationstechnologie, mobile Aufbauten oder Schnittstellen (DLR Verkehr 2022). Auf dem Digitalen Testfeld Niedersachsen ist diese Ausstattung auf einer Strecke von 280 km installiert. Dabei wird das Projekt mit 2,5 Mio. Euro von den Niedersächsischen Ministerien für Wirtschaft und Wissenschaft und mit Geldern des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert. Pro Kilometer Straßeninfrastruktur entfallen 9.000 Euro an Technologiekosten. Bei einer Länge von 26.000 Kilometern Bundesautobahn ergeben sich Infrastrukturkosten für Technologien von 234 Mio. Euro. Diese Gesamtkosten werden mit der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge multipliziert.

Für den Aus- und Neubau der Verkehrsinfrastruktur wurden im Jahr 2017 etwa 1,767 Mrd. Euro aufgewendet (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2020). Dieser Wert wird als Ausgangsbasis im Simulationsmodell angenommen und durch die Veränderungseffekte der Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrzeugauslastung«, »THG-Emissionen« und »Stauaufkommen« beeinflusst.

Zuletzt werden die Kosten für Unfälle mit 7.000 Euro pro Unfall pro Jahr angenommen. Dieser Wert beruht auf der Erhebung nach Zaloshnja und Miller (2007, S. 10), die Sachkosten pro Unfall von mittelschweren und schweren Lkw in Höhe von etwa 7.000 US-Dollar angeben. Die Unfallkosten als Teil der Infrastrukturkosten ergeben sich folglich aus der Anzahl an Verkehrsunfällen multipliziert mit den Kosten pro Unfall.

Die Berechnung für den Stellplatzbedarf basiert auf den Annahmen aus Abschnitt 7.1.4.5, dass in Deutschland ca. 93.600 Parkplätze für den Straßengüterverkehr zur Verfügung stehen (Irzik et al. 2019, S. 5). Bei einer Mindestlänge von 17,5 m und einer Mindestbreite von 3,5 m pro Parkplatz für Sattelzugmaschinen, ergibt dies eine Gesamtfläche an Parkplätzen von 5.733 km² (Bauprüfdienst (BPD) 6/1998, S. 6). Dieser Stellplatzbedarf verändert sich durch Effekte der Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Fahrzeugauslastung«, »Fahrerloses Fahrzeug«, »Berufskraftfahrende« und »Infrastrukturkosten« im Simulationsmodell.

8.1.3 Limitationen des Simulationsmodells

Bei dem Simulationsmodell handelt es sich nicht um ein direktes Abbild des Realsystems, sondern um eine vereinfachte Darstellung des Systems, mit dem Fokus auf den Veränderungen der Variablen durch eine Zunahme der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge. Um ein möglichst realitätsnahes Modell aufzubauen, werden soweit vorliegend Realdaten für das Modell verwendet. Externe Einflüsse, wie die Wirtschaftslage, werden allerdings nicht in die Simulation integriert.

Im Simulationsmodell werden, wenn vorliegend, Realdaten des Jahres 2019 als Ausgangswerte der Berechnung verwendet. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass das fahrerlose Fahren seit dem Basisjahr der Simulation, dem Jahr 2019, im Regelbetrieb eingesetzt wird. Prognosen gehen jedoch davon aus, dass das fahrerlose Fahren erst ab dem

Jahr 2035 eingeführt ist (Krail et al. 2019, S. 106). Dies ist mit der schrittweisen Einführung von zunächst vorgelagerten Automatisierungsstufen und der Entwicklung hin zu einem fahrerlosen Fahrzeug zu begründen. Um jedoch keine weitere zeitliche Unbekannte in das Simulationsmodell zu integrieren, wurden die Werte des Basisjahres für die Laufzeit der Simulation angenommen.

Das automatisierte Fahren erfordert weiterhin eine Begleitperson, die im Simulationsmodell unberücksichtigt bleibt. Bei der Betrachtung müssten weitere Annahmen im Simulationsmodell, beispielsweise für die Entwicklung der Berufskraftfahrenden, eingepflegt werden. In diesem hier erarbeiteten Simulationsmodell wird ausschließlich das fahrerlose Fahren betrachtet. Vorgelagerte Automatisierungsstufen und ihre Wirkungen im Logistiksystem werden in das Modell nicht integriert, um keine Vermischung unterschiedlicher Wirkungen zu erzeugen.

Es wird im Simulationsmodell mit gerichteten Mittelwerten für die Darstellung der Einflüsse auf eine Variable gearbeitet, um die Verteilung der Einflüsse innerhalb einer Variable abzubilden. Die Nutzung eines gewichteten Mittelwerts der Einflüsse auf eine Variable führt dazu, dass die Gewichtungen in Abhängigkeit der Anzahl von Einflüssen auf eine Variable errechnet werden. Die Einflusstärke kann folglich zwischen den unterschiedlichen Variablen variieren, indem eine Gewichtung mit der Stärke 2 beispielsweise für eine Variable A eine andere Gewichtung haben kann als für eine Variable B. Dies wurde vernachlässigt, da für die vorliegenden Fragestellungen die Verteilung der Einflüsse auf eine Variable entscheidender ist.

Für die Auswertung des Simulationsmodells ist zudem zu berücksichtigen, dass eine Kombination aus unterschiedlichen Einflüssen auf eine Variable besteht. In der Literatur wird beispielsweise angenommen, dass durch jedes fahrerlose Fahrzeug eine fahrerführende Person entfällt. Im Modell wirken jedoch mehrere unterschiedliche Einflüsse auf die Variable der Berufskraftfahrenden ein, sodass die Wirkung des fahrerlosen Fahrens abgeschwächt werden kann.

Insgesamt ist zu bedenken, dass die Ergebnisse des Simulationsmodells auf den zuvor festgelegten Annahmen und integrierten Werten beruhen. Bei der Kalibrierung des Modells wurden die einzelnen

Variablen verändert, um die Sensitivität des Modells zu überprüfen. Darüber hinaus wurden Veränderungen einzelner Variablen bei der Suche nach Gestaltungsoptionen vorgenommen, so dass eine weitere Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde (siehe Kapitel 9). Die vollständigen Berechnungen der einzelnen Variablen sind in Anhang C aufgelistet.

8.2 Auswertung des Simulationsmodells

Im Folgenden wird die Entwicklung der Variablen quantitativ ausgewertet. Für einen Vergleich der Wirkungen der zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge wurden die Entwicklungen den Ausgangswerten im Jahr Null gegenübergestellt. Die »Ausgangssituation« enthält die Basiswerte der jeweiligen Variable, vernachlässigt aber die Einflüsse durch das fahrerlose Fahren und berücksichtigt, dass alle Werte über den Zeitverlauf konstant bleiben.

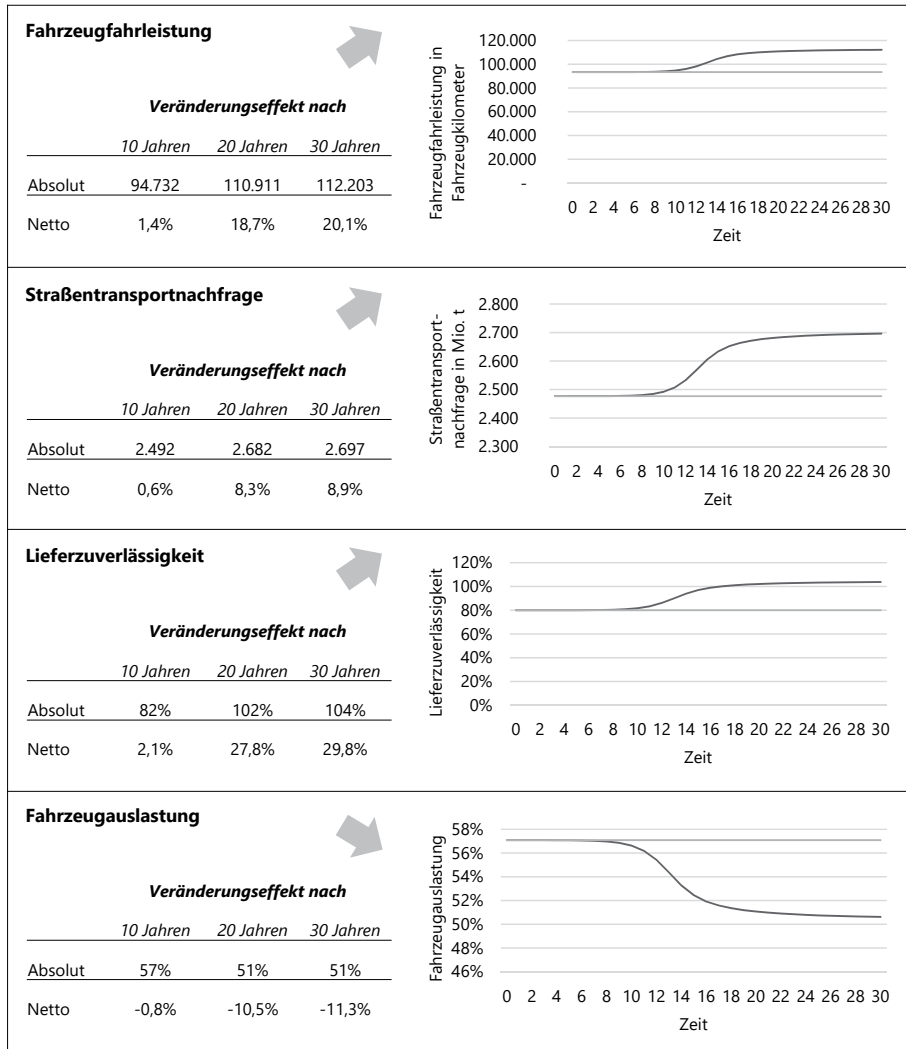
Die Auswertung der Wirkungen erfolgt anhand der vier Subsysteme. Die Variablen werden hinsichtlich ihrer Wirkung mit und ohne fahrerloses Fahren untersucht. Die Auswertung zeigt darüber hinaus die drei zeitlichen Perspektiven, die in Abschnitt 8.1 erläutert wurden.

8.2.1 Auswertung des Subsystems »Logistikleistung«

Die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge hat einen direkten Einfluss auf die drei Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Lieferzuverlässigkeit« und »Fahrzeugauslastung«, während sie nur indirekt auf die Variable »Straßentransportnachfrage« einwirkt; diese jedoch das fahrerlose Fahrzeuge beeinflusst. Die Abbildung 36 zeigt eine Übersicht der Veränderungen durch das fahrerlose Fahren auf die Variablen des Subsystems »Logistikleistung«.

Nach den ersten 10 Jahren wächst die Fahrzeugfahrleistung um etwa 1,4 % von 93.384 Fzkm auf 94.732 Fzkm an. Im Jahr 20 beträgt die Zunahme bereits 18,7 % und nach 30 Jahre 20,1 % gegenüber dem Jahr Null. Dies entspricht einem Anstieg der Fahrzeugfahrleistung auf über 112.000 Fzkm nach 30 Jahren. Die Variablen »Straßentransportnachfrage«, »Lieferzuverlässigkeit«, »Fahrerloses Fahrzeug« und »Stauaufkommen«, führen

Abbildung 36: Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems
»Logistikleistung«



Quelle: Eigene Darstellung

zu einer Zunahme der Fahrzeugfahrleistung während die Variablen »Berufskraftfahrende«, »TCO« und »Infrastrukturkosten« den Trend abschwächen.

Von ursprünglich knapp 2.480 Mio. t Straßentransportgütern steigt die Nachfrage nach 10 Jahren um etwa 0,6 %, nach 20 Jahren um 8,3 % und erreicht nach 30 Jahren eine Steigerung von 8,9 %. Nach 30 Jahren liegt die Straßentransportnachfrage damit bei etwa 2.700 Mio. t. Dies bestätigt die Angaben aus der Literatur, dass die Straßentransportnachfrage durch das fahrerlose Fahren zunehmen wird. Dies ist unter anderem durch die steigende Lieferzuverlässigkeit begründet.

Wie die Fahrzeugfahrleistung und die Straßentransportnachfrage steigt auch die Lieferzuverlässigkeit mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge an. Nach 10 Jahren ist die Lieferzuverlässigkeit um 2,1 % von ursprünglich 80 % auf 82 % angestiegen. Im Jahr 20 liegt die Lieferzuverlässigkeit bereits bei 102 % und wächst bis zum Jahr 30 auf 104 % an. Es liegt damit ein Zuwachs fast 30 % nach 30 Jahren vor. Im Simulationsmodell wird von einem Startwert von 80 % ausgegangen. Dies führt dazu, dass die Lieferzuverlässigkeit über 100 % ansteigt. Da die Lieferzuverlässigkeit in der realen Welt 100 % nicht überschreiten kann, stellt dieser Wert hier lediglich eine Trendeinschätzung dar. Insgesamt wird die Lieferzuverlässigkeit von neun Variablen beeinflusst.

Die Auswertung zeigt, dass die Variable »Fahrzeugauslastung« durch die Einflüsse des fahrerlosen Fahrens in Kombination mit den Wirkungen der anderen Variablen über den Zeitverlauf abnimmt. Dies ist durch die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge begründet, die zu einer Verminderung der Fahrzeugauslastung führt. Eine zunehmende Straßentransportnachfrage, Fahrzeugfahrleistung und TCO bewirken zwar eine Erhöhung der Auslastung, haben aber einen weniger starken Einfluss. Das Simulationsmodell zeigt einen Rückgang der Fahrzeugauslastung um 0,8 % nach 10 Jahren, um 10,5 % nach 20 Jahren und um 11,3 % nach 30 Jahren, sodass die Fahrzeugauslastung von 57 % im Jahr Null auf 51 % im Jahr 30 sinkt.

8.2.2 Auswertung des Subsystems »Warenübergabe«

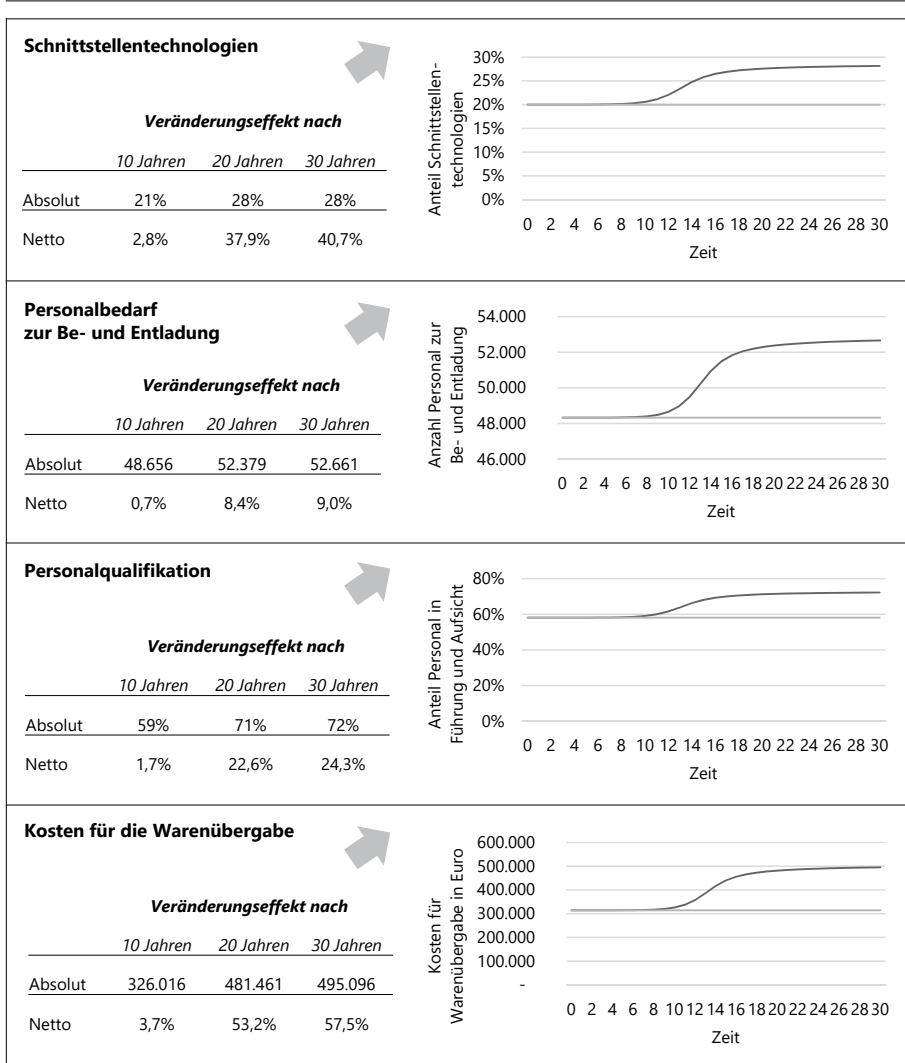
Im Subsystem »Warenübergabe« hat das fahrerlose Fahren einen direkten Einfluss auf die Variablen »Schnittstellentechnologien«, »Personalbedarf zur Be- und Entladung« sowie »Kosten für Warenübergabe«. Indirekt wirkt die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge auf die Personalqualifikation ein. Die Auswertung der Variablen des Subsystems »Warenübergabe« sind in der Abbildung 37 zu sehen.

Im Subsystem steigen die Werte aller Variablen über den Zeitverlauf an. Die Variable »Schnittstellentechnologien« steigt um 40,7 % bis zum Jahr 30. Bereits nach 10 Jahren kann ein Zuwachs von 2,8 % und nach 20 Jahren von 37,9 % verzeichnet werden. Wie zuvor beschrieben, wird angenommen, dass Unternehmen bereits mit 20 % Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe ausgestattet sind. Dieser Wert steigt nach 30 Jahren auf etwa 28 % an. Die Wirkungen aller einfließenden Variablen führen zu einem Anstieg der Schnittstellentechnologien. Allerdings sind die Wirkungen teilweise nur sehr schwach, sodass die Variable über den Zeitverlauf nicht auf 100 % ansteigt.

Obwohl mehr Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe eingesetzt werden, steigt der Personalbedarf in der Warenübergabe. Dies ist auf andere Wirkungszusammenhänge im System zurückzuführen. Die Wirkung der steigenden Straßentransportnachfrage, der zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge, der zunehmenden Personalqualifikation und des Rückgangs der Berufskraftfahrenden resultiert in einer positiven Entwicklung des Personalbedarfs. Der Veränderungseffekt ist im Gegensatz zur Variable »Schnittstellentechnologien« mit 9 % nach 30 Jahren deutlich geringer. In der Warenübergabe steigt die Anzahl des Personals von ursprünglich 48.329 auf etwa 48.700 Personen nach 10 Jahren und auf circa 52.600 nach 20 Jahren. Nach 30 Jahren beträgt der Personalbedarf knapp 53.000 Mitarbeitende.

Wie in der Literatur angegeben, steigt die Personalqualifikation im Simulationsmodell über den Zeitverlauf an. Sowohl der positive Effekt durch die zunehmenden Schnittstellentechnologien als auch der positive Trend durch den Personalbedarf unterstützen diese Entwicklung. Nach 10 Jahren ist die Personalqualifikation um 1,7 % gestiegen, nach 20 Jahren um 22,6 % und nach 30 Jahren ist eine Zunahme von 24,3 % zu verzeichnen.

Abbildung 37: Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems
»Warenübergabe«



— Veränderung mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge
 — Ausgangssituation

Quelle: Eigene Darstellung

Damit hat sich der Anteil von Personal in Führungspositionen von ursprünglich 58 % auf 72 % nach 30 Jahren erhöht.

Mit zunehmender Nutzung von Schnittstellentechnologien, steigendem Personalbedarf und zunehmender Personalqualifikation nehmen auch die Kosten für die Warenübergabe zu. In der Literatur wird aufgeführt, dass eine Verschiebung der Tätigkeiten von den Berufskraftfahrenden auf die Mitarbeitenden der Warenübergabe zu erwarten ist. Dies schlägt sich auch in den Kosten nieder. Nach 10 Jahren ist eine Zunahme der Kosten von 3,7 % zu verzeichnen. Diese steigt auf 53,2 % nach 20 Jahren und auf 57,5 % nach 30 Jahren. Obwohl die einzelnen Kostenkomponenten zunehmen, werden diese durch den negativen Trend der Fahrzeugauslastung vermindert. Insgesamt ist ein Kostenanstieg in der Warenübergabe von ursprünglich etwa 314.000. Euro auf circa 495.000 Euro nach 30 Jahren zu beobachten. Wobei der Großteil der Kosten auf Personalkosten zurückzuführen ist.

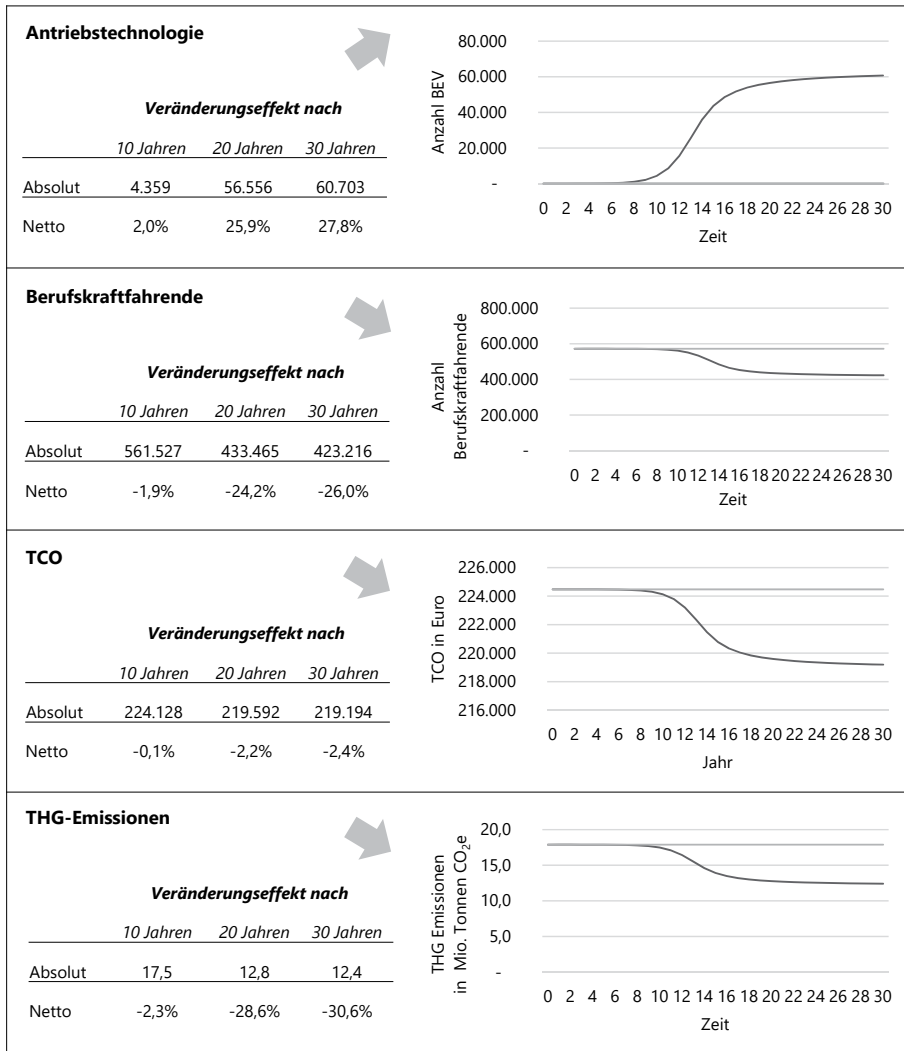
8.2.3 Auswertung des Subsystems »Transport«

Im qualitativen Modell wurde angegeben, dass die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge auf die Variablen »Antriebstechnologie« und »TCO« einen verstärkenden Effekt hat, während sie auf die Variablen »Berufskraftfahrende« und »THG-Emissionen« im Subsystem »Transport« abschwächend wirkt. Diese Trends sind auch in der Auswertung des Simulationsmodells zu erkennen, wie die Abbildung 38 zeigt.

Obwohl das fahrerlose Fahren nur auf zwei der vier Variablen sehr stark wirkt, werden drei der vier Variablen verhältnismäßig stark beeinflusst. Dies liegt nicht ausschließlich an der zunehmenden Marktdurchdringung, sondern auch an den anderen auftretenden Einflüssen, die durch das fahrerlose Fahren angestoßen werden.

In der Literatur und auch im qualitativen Zukunftsmodell wird davon ausgegangen, dass alle fahrerlosen Fahrzeuge elektrifiziert eingeführt werden. Dieser Trend wird im Simulationsmodell allerdings durch die Variable »Infrastrukturkosten« vermindert, die abschwächend auf die Einführung von BEV wirkt. Diese Variable hat die gleiche Gewichtung wie die Variable »Fahrerloses Fahrzeug« auf die Variable »Antriebstechnologie«, sodass sich die Veränderungseffekte gegenseitig ausgleichen. Nach 10

Abbildung 38: Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems
»Transport«



Jahren wird ein Anstieg von BEV um 2 % berechnet. Dieser steigt auf 25,9 % nach 20 Jahren und auf 27,8 % nach 30 Jahren, bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl an Dieselfahrzeugen. Insgesamt wächst die Anzahl von BEV ausgehend von Null Fahrzeugen auf etwa 60.700 Fahrzeuge im Jahr 30. Abgeleitet werden kann, dass für eine vollständig batterieelektrische Flotte fahrerloser Fahrzeuge auch die Infrastrukturkosten zurückgehen müssen oder sich die externen Kaufentscheidungen ändern müssten. In den Jahren 2019 bis 2021 wurden insgesamt lediglich 13 BEV-Sattelzugmaschinen neu zugelassen (Kraftfahrt-Bundesamt 2020a, 2021a, 2022b).

Ein ähnlicher Effekt ist bei der Anzahl der Berufskraftfahrenden zu beobachten. Die Anzahl der Berufskraftfahrenden reduziert sich nur um 26 % nach 30 Jahren, obwohl die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge nach 30 Jahren bei etwa 90 % liegt. Berufskraftfahrende verbleiben weiterhin im Markt, da eine zunehmende Straßentransportnachfrage und Fahrzeugfahrleistung auftritt, die den Effekt durch das fahrerlose Fahren abschwächt. Mit zunehmender Nachfrage und Fahrzeugfahrleistung werden mehr Berufskraftfahrende erforderlich, die die Transporte durchführen. Im Rückschluss müsste auch die Anzahl an manuell geführten Fahrzeugen zunehmen, die allerdings im Simulationsmodell nicht abgebildet wurde, da der Fahrzeugbestand in der Literatur nicht als Einflussvariable des fahrerlosen Fahrens identifiziert wurde. Von ursprünglich etwa 572.000 Berufskraftfahrenden in Deutschland verbleiben nach 30 Jahren ca. 423.000 Berufskraftfahrende im Transportmarkt.

Eine verhältnismäßig schwache Abnahme ist bei den TCO im Simulationsmodell zu sehen. Nach 10 Jahren sinken die Kosten um 0,1 % von ca. 224.500 Euro auf etwa 224.100 Euro. Nach 20 Jahren sind die Kosten um 2,2 % auf ca. 219.500 Euro gesunken. Nach 30 Jahren betragen die Kosten etwa 219.200 Euro pro Fahrzeug pro Jahr, was ein Rückgang von 2,4 % bedeutet. Dieser geringe Rückgang ist mit den höheren Kosten für Automatisierungstechnologie und Umrüstkosten für die Warenübergabe begründet. Obwohl Effekte durch die Variablen »Stauaufkommen« und »Verkehrsunfälle« die Reparatur- und Instandhaltungskosten positiv beeinflussen, nehmen die Gesamtkosten durch das fahrerlose Fahren, das zunehmende Transportaufkommen, die verringerte Fahrzeugauslastung

sowie den Stellplatzbedarf geringfügig ab. Die Kostenveränderungen für die einzelnen Kostengrößen sind in der Tabelle 14 aufgeführt.

Die Tabelle 14 zeigt, dass die variablen Kosten der BEV über den Zeitverlauf abnehmen. Wie zuvor beschrieben, werden diese positiv durch andere Variablen beeinflusst, sodass diese sinken. Auch die Personalkosten nehmen aufgrund der zunehmenden fahrerlosen Fahrzeuge und der rückläufigen Anzahl der Berufskraftfahrenden ab. Die fixen Kosten nehmen hingegen über die Zeit zu. Dies liegt an den zusätzlichen Kosten, die für die Automatisierungstechnologien im Fahrzeug entstehen. An dieser Stelle ist zu berücksichtigen, dass von einer prozentualen Erhöhung der Automatisierungs- und Umrüstkosten durch das fahrerlose Fahren ausgegangen wurde. Wird eine solche prozentuale Veränderung nicht angenommen, würde es zu einer sprunghaften Kostenentwicklung kommen, sodass bereits im Jahr 1 die vollen Kosten für ein fahrerloses Fahrzeug des Jahres 30 entstehen. Insgesamt ist allerdings eine Kostenreduktion der Gesamtkosten über den Zeitverlauf zu sehen.

Die THG-Emissionen nehmen im Simulationsmodell kontinuierlich ab. Nach 10 Jahren ist ein Rückgang um 2,3 % zu verzeichnen. Dieser Rückgang erhöht sich auf 28,6 % nach 20 Jahren. Nach 30 Jahren sind die THG-Emissionen um 30,6 % zurückgegangen, was einen Rückgang von ursprünglich etwa 17,9 Mio. t auf ca. 12,4 Mio. t CO₂e nach 30 Jahren bedeutet. Die THG-Emissionen werden insbesondere durch die Umstellung der Antriebstechnologie beeinflusst. Zur Minderung der

Tabelle 14: Vergleich der TCO für den Einsatz von fahrerlosen BEV im Logistiksystem

Kostengröße	Jahr 0	Jahr 10	Jahr 20	Jahr 30
Variable Kosten	29.036 €	29.007 €	28.660 €	28.632 €
Fixe Kosten	129.317 €	129.630 €	133.388 €	133.689 €
Personalkosten	66.123 €	64.893€	50.094 €	48.906 €
Gesamtkosten	224.476 €	224.131 €	219.596 €	219.198 €

Quelle: Eigene Zusammenstellung

THG-Emissionen tragen auch die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge und das Stauaufkommen bei. Gleichzeitig gleicht sich der Effekt durch den Rückgang der Fahrzeugauslastung sowie des Stellplatzbedarfs aus, da im qualitativen Zukunftsmodell angenommen wird, dass diese beiden Faktoren zu mehr Verkehr und dementsprechend mehr THG-Emissionen führen.

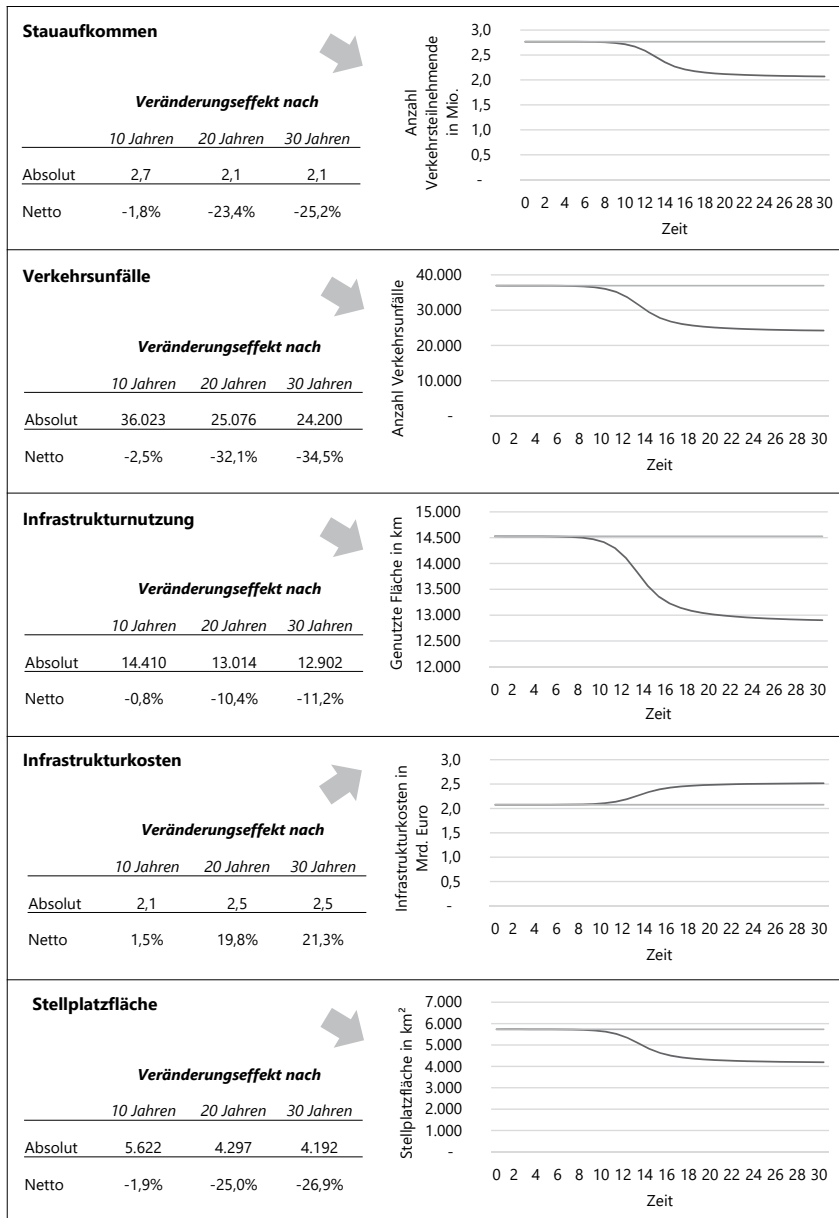
8.2.4 Auswertung des Subsystems »Verkehrsleistung«

Die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge hat einen direkten Einfluss auf alle Variablen des Subsystems »Verkehrsleistung«. In der Simulation zeigt sich, dass vier der fünf Variablen durch die zunehmende Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge abnehmen, während eine Variable über den Zeitverlauf ansteigt, wie in Abbildung 39 dargestellt.

In der Literaturanalyse wurde deutlich, dass das fahrerlose Fahren zu einem Rückgang des Stauaufkommens führt, da die Fahrzeuge gleichmäßiger und mit verringertem Sicherheitsabstand zueinander fahren. Dieser Trend zeigt sich auch in der Simulation. Nach den ersten 10 Jahren hat das fahrerlose Fahren nur einen geringen Einfluss von minus 1,8 %, dieser Einfluss führt nach Jahr 20 zu einem Rückgang um 23,4 % und beträgt im Jahr 30 minus 25,2 %. Das Stauaufkommen wird allerdings nicht nur durch das fahrerlose Fahren beeinflusst, sondern auch durch andere Variablen. Eine Erhöhung der Fahrzeugfahrleistung sowie der Anzahl der Verkehrsunfälle führt zu einem zunehmenden Stauaufkommen. Während die Zunahme der Variablen »Fahrzeugauslastung«, »Fahrerloses Fahrzeug«, »Infrastrukturnutzung« und »Infrastrukturkosten« zu einem Rückgang des Stauaufkommens führen. Insgesamt wirken allerdings die Variablen mit der Folge eines abnehmenden Stauaufkommens stärker. Dies ist auch in der Simulation deutlich geworden. Von ursprünglich 2,8 Mio. Fahrzeugen auf einem definierten Streckenabschnitt pro Jahr sinkt die Anzahl auf 2,1 Mio. Fahrzeuge nach 30 Jahren.

Auch die Anzahl an Verkehrsunfällen sinkt laut der Simulation durch den Einfluss des fahrerlosen Fahrens. Die Anzahl der Verkehrsunfälle steht in einer positiven Rückkopplungsschleife mit dem Stauaufkommen, wie in Abschnitt 7.2.3.4 beschrieben. Eine Erhöhung des Stauaufkommens sowie der Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Berufskraftfahrende«

Abbildung 39: Quantifizierte Veränderungen der Variablen des Subsystems
»Verkehrsleistung«



— Veränderung mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge
- - - Ausgangssituation

führen zu einer Zunahme der Verkehrsunfälle. Der negative Trend in der Simulation resultiert daher aus den entgegenwirkenden Einflüssen der Variablen »Fahrerloses Fahrzeug«, »Infrastrukturnutzung« und »Infrastrukturkosten«. Nach 10 Jahren geht die Anzahl der Verkehrsunfälle von ursprünglich 36.939 auf etwa 36.000 zurück, was zunächst einer Reduktion von 2,5 % entspricht. Nach 20 Jahren beträgt die Anzahl der Verkehrsunfälle ca. 25.000 (minus 32,1 %), nach 30 Jahren ist die Anzahl der Verkehrsunfälle auf etwa 24.200 (minus 34,5 %) zurückgegangen. In der Literatur wurde zwar von einer Null-Fehler-Quote autonomer Fahrzeuge gesprochen, es wird in der Simulation aber deutlich, dass andere Variablen ebenfalls auf die Fehlerquote der Fahrzeuge einwirken und eine Null-Fehler-Quote nicht zu erreichen ist.

Wie bei den Variablen zuvor ist auch bei der Variable »Infrastrukturnutzung« ein Rückgang zu erkennen. Dabei ist der Rückgang positiv zu werten, da die genutzte Fläche kleiner wird und damit mehr Infrastruktur zur Verfügung steht. Die Simulation zeigt einen Rückgang der genutzten Fläche nach 10 Jahren um 0,8 %. Nach 20 Jahren beläuft sich dieser Rückgang auf 10,4 % und nach 30 Jahren liegt dieser bei 11,2 %. Dies ist ein Rückgang der genutzten Fläche von ursprünglich 14.527 km auf etwa 13.000 km nach 30 Jahren. Hierbei bestimmt sich die genutzte Fläche nicht nur aus dem Einfluss des fahrerlosen Fahrens, bei dem durch einen verringerten Sicherheitsabstand mehr Fläche zur Verfügung steht, sondern auch aus den Variablen »Transportleistung«, »Fahrzeugauslastung«, »Stauaufkommen« und »Infrastrukturkosten«. Dabei haben bis auf die Variable »Fahrzeugauslastung« alle die gleiche Gewichtung, die allerdings sowohl gleichgerichtet als auch entgegengerichtet wirken, sodass sich die Einflüsse gegenseitig abschwächen. Die Variable »Fahrzeugauslastung« hat im Gegensatz zu den anderen Variablen nur einen leichten Einfluss auf die Infrastrukturnutzung.

Als einzige Variable im Subsystem »Verkehrsleistung« steigen die Infrastrukturkosten über den Zeitverlauf an. Die Kosten setzen sich aus fünf Komponenten zusammen. Während die Kosten für Stellplatzflächen, die Kosten für Neu- und Ausbau sowie die Kosten für Unfälle über den Zeitverlauf sinken, steigen die Kosten durch Vernetzungstechnologie und Ladesäulen. Die zusätzlichen Kosten von etwa 330 Mio. Euro für

Ladesäulen und ca. 215 Mio. Euro für Vernetzungstechnologie ergeben in Summe mehr als der Rückgang von ca. 90 Mio. Euro Unfallkosten, ca. 6 Mio. Euro Kosten für Aus- und Neubau sowie 14 Mio. Euro Kosten für Stellplatzfläche nach 30 Jahren. Die Zunahme der Infrastrukturkosten von etwa 440 Mio. Euro nach 30 Jahren stellt eine Zunahme der Kosten um etwa 21,3 % dar.

Auch der Stellplatzbedarf nimmt über den Zeitverlauf ab. Wie in der Literaturanalyse beschrieben, werden durch die wegfallenden Pausen- und Ruhezeiten der Berufskraftfahrenden auch die Stellplätze redundant. Laut der Simulation beträgt der Stellplatzbedarf von ursprünglich 5.733 km² nach 10 Jahren 5.600 km², nach 20 Jahren etwa 4.300 km² und nach 30 Jahren ca. 4.200 km². Dies stellt einen Rückgang von 26,9 % nach 30 Jahren dar. Auch in diesem Fall nimmt die Fläche jedoch nicht prozentual zur Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge ab, sondern in geringerem Maße, da der Rückgang durch den Einfluss einer zunehmenden Fahrzeugfahrleistung, des Rückgangs der Fahrzeugauslastung sowie zunehmender Infrastrukturkosten abgeschwächt wird.

8.3 Diskussion der Ergebnisse des quantitativen Zukunftsmodells

Im Simulationsmodell wurden alle Wirkungen, die im qualitativen Zukunftsmodell ermittelt wurden, modelliert. Dadurch konnten die Wirkungen einer zunehmenden Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge über den Zeitverlauf auf die anderen Variablen im Logistiksystem quantifiziert werden. Mithilfe des Simulationsmodells wird die zweite Forschungsfrage »*Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet?*« auch quantitativ beantwortet.

Offen bleibt an dieser Stelle, welche der Variablen aus Sicht der Akteure eine unerwünschte Wirkung durch das fahrerlose Fahren zeigen. Werden die drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung herangezogen, kann in ökonomische, ökologische und soziale Ziele der Akteure differenziert werden. Für die World Commission on Environment and Development (1987, S. 41) bedeutet eine nachhaltige Entwicklung,

dass die Bedürfnisse der heutigen Zeit befriedigt werden, ohne die Erfüllung der Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu gefährden. Nachhaltige Entwicklung kann nur durch einen möglichst ausgeglichenen Einklang des ökologischen, ökonomischen und sozialen Systems erreicht werden.

Aus ökologischer Perspektive steht »der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der vielfältigen Funktionen der Natur zum Nutzen der Menschen« im Zentrum (Deutscher Bundestag 13. Wahlperiode 1998, S. 20). Im Logistiksystem stellt ein ökologisches Ziel beispielsweise die Reduktion von THG-Emissionen durch den Transport dar. Darüber hinaus führt die Reduktion der Fahrzeugfahrleistung zur Verringerung von Verkehr. Auch die verminderte Flächenversiegelung durch eine Reduktion der Stellplatzfläche stellt eine ökologisch gewünschte Wirkung dar.

Aus ökonomischer Perspektive gilt es die Funktionsfähigkeit des Wirtschaftssystems zu sichern, ohne das ökologische und soziale System auszubeuten (World Commission on Environment and Development 1987, S. 42). Dabei sind insbesondere die Kostenvariablen wichtige Indikatoren. Auch Variablen, wie die Straßentransportnachfrage, die Lieferzuverlässigkeit oder die Fahrzeugauslastung, können den relevanten ökonomische Leistungsgrößen von dienstleistenden Unternehmen zugeordnet werden.

Um die menschlichen Bedürfnisse aus sozialer Sicht zu befriedigen, können Ziele, wie die Erhöhung des Personalbestands, die Reduktion von Stauaufkommen, Verminderung von Verkehrsunfällen oder die Reduktion der Infrastrukturnutzung, für das Logistiksystem genannt werden. Durch mehr Arbeitsplätze, eine Reduktion von Feinstaub und eine erhöhte Verkehrssicherheit kann die Lebensqualität der Bevölkerung gesteigert werden.

Als erwünschte Wirkungen werden in dieser Arbeit diejenigen bezeichnet, die eine nachhaltige Entwicklung fördern. Die drei Dimensionen bedingen sich teilweise gegenseitig und die erwünschten Wirkungen können in Konflikt zueinanderstehen. Eine sogenannte Win-Win-Situation tritt beispielsweise beim Transport ein: eine geringe Fahrzeugfahrleistung emittiert weniger THG-Emissionen; da dadurch auch weniger Antriebsenergie benötigt wird, verringern sich gleichermaßen die Energiekosten. Ökologisch und ökonomisch sind dies beides gewünschte Wirkungen.

Eine Dilemma-Situation entsteht beispielsweise durch den Personaleinsatz im Logistiksystem. Aus sozialer Perspektive ist ein Rückgang an Arbeitsplätzen nicht erwünscht; auch nicht aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive. Aus einer einzelwirtschaftlichen Perspektive ist ein Rückgang der Personalkosten eine erwünschte Wirkung, um die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen sicherzustellen. Im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung kann ein sinkender Personalbedarf akzeptiert werden, wenn Sorge dafür getragen wird, dass Alternativen geschaffen werden, die Lebensstandard und Lebensqualität der Menschen sicherstellen.

Nach Auswertung der Ergebnisse aus dem Simulationsmodell können vier unerwünschte Trendentwicklungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem abgeleitet werden, da die Entwicklungen gegenteilig der erwünschten Wirkungen sind.

Für die dienstleistenden Unternehmen des Logistiksystems zeigt sich als unerwünschte Trendentwicklung die Reduktion der Fahrzeugauslastung. Die sinkende Fahrzeugauslastung führt dazu, dass Fahrzeuge nicht mehr optimal ausgelastet werden und dadurch mögliche Transportleistung im Güterverkehr nicht genutzt wird. Diesem Trend gilt es entgegenzuwirken, um Folgewirkungen, wie steigende THG-Emissionen, zunehmendes Stauaufkommen oder zunehmende Kosten für Fahrzeuge und Infrastruktur zu reduzieren. Auch die steigende Fahrzeugfahrleistung kann aus verkehrspolitischer Sicht als unerwünschte ökologische und soziale Wirkung gelten. Diese führt zu mehr Verkehr auf der Infrastruktur und in der Folge zu unerwünschten Umwelteinwirkungen.

Ebenfalls unerwünscht sind die anwachsenden Kosten in der Warenübergabe für versendende und empfangende Unternehmen. Obwohl das fahrerlose Fahren einem höheren Einsatz von Schnittstellentechnologien führt, steigt der Personalbestand durch die unterschiedlichen Wirkungen und auch die Personalqualifikation nimmt im Zukunftsmodell zu. Diese Variablen sowie zusätzliche Kosten für die Technologie führen dazu, sodass die Kosten für die Warenübergabe steigen. Diese Wirkung bietet für die versendenden und empfangenden Unternehmen keinen Vorteil, die Einführung fahrerloser Fahrzeuge zu unterstützen, weshalb den steigenden Kosten entgegengewirkt werden sollte.

Das fahrerlose Fahren ist für Transportunternehmen hingegen positiv zu bewerten, da sowohl TCO als auch THG-Emissionen sinken. Bei einer genauen Betrachtung der TCO wird allerdings deutlich, dass die fixen Kosten durch zusätzliche Technologiekosten steigen. Es wird zudem zugrunde gelegt, dass es sich bei den Fahrzeugen um BEV handelt, die im Gegensatz zu Dieselfahrzeugen deutlich höhere Anschaffungskosten aufzeigen. Um fahrerlose Fahrzeuge attraktiv für Transportunternehmen zu machen, ist es daher erforderlich, die Kosten für die Anschaffung zu senken.

Aus Sicht der Politik stellen die steigenden Infrastrukturkosten eine unerwünschte Entwicklung dar. Insbesondere die Einführung der BEV bedeutet hohe Investitionen in den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Auch die Kosten für Vernetzungstechnologie für fahrerlose Fahrzeuge stellen eine monetäre Belastung sowie personelle Aufwände dar. Diesem Trend gilt es daher ebenfalls entgegenzuwirken, um die Umsetzung des fahrerlosen Fahrens kostengünstiger zu gestalten.

Für die Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Reduktion der beschriebenen unerwünschten Wirkungen sind bestimmte Akteure verantwortlich. Es ist daher bei der Einführung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu berücksichtigen, welche die impulsgebenden, die umsetzenden und die nutzengewinnenden Akteure dieser Wirkungen sind.

9 Gestaltungsmodelle zur Reduktion unerwünschter Wirkungen durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem

Mithilfe des quantitativen Zukunftsmodells konnten unerwünschte Trendentwicklungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem aufgezeigt werden. In diesem Kapitel werden die identifizierten unerwünschten ökologischen, ökonomischen und sozialen Trendentwicklungen sowie ihre Ursachen modelliert, um Gestaltungsoptionen zu ermitteln, die zu einer erwünschten Trendentwicklung führen. Dies dient der Beantwortung der dritten Forschungsfrage »*Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren?*«.

Die Gestaltungsoptionen werden als Szenarien mithilfe des quantitativen Zukunftsmodells abgebildet. Dabei werden einzelne Richtungen der Wirkungsbeziehungen von Variablen des bestehenden Simulationsmodells verändert, sodass die Wirkung dieser Veränderung auf die anderen Variablen ausgewertet werden kann. Gleichzeitig kann dadurch validiert werden, wie sensitiv das Simulationsmodell auf die Veränderung einzelner Variablen reagiert.

Die ermittelten Gestaltungsoptionen werden anschließend den impulsgebenden, den umsetzenden sowie den nutzengewinnenden Akteuren zugeordnet, sodass die Gestaltungsoptionen adressatengerecht für die jeweiligen Akteure des Logistiksystems genutzt werden können.

9.1 Ökologisches Gestaltungsmodell

Die ökologischen Gestaltungsoptionen haben Einfluss auf die im Modell berücksichtigten Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Antriebstechnologie«, »THG-Emissionen« und »Stellplatzbedarf«, wie in Abschnitt 8.3 beschrieben.

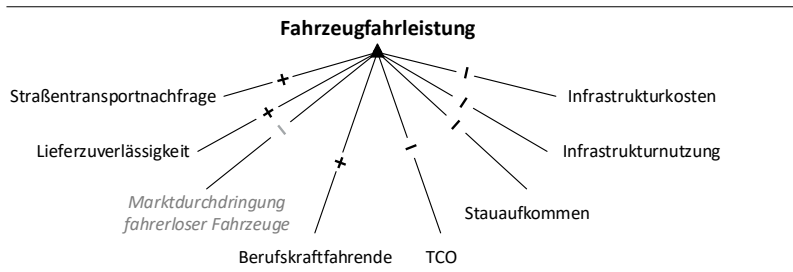
Im qualitativen Zukunftsmodell wurden die Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Antriebstechnologie« als aktive Variablen klassifiziert, während die Variablen »THG-Emissionen« und »Stellplatzbedarf«

als reaktiv eingestuft wurden. Das bedeutet, dass eine Veränderung der Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Antriebstechnologie« stark auf die anderen Variablen im System wirkt und diese beeinflusst. Die Variablen »THG-Emissionen« und »Stellplatzbedarf« werden hingegen stark durch das System beeinflusst, haben selbst aber wenig Wirkung auf das System. Es kann für die Gestaltungsoptionen daher angenommen werden, dass eine direkte Veränderung der Variablen »THG-Emissionen« und »Stellplatzbedarf« wenig Einfluss auf das System nehmen wird.

Die ökologischen Gestaltungsoptionen setzen daher bei der Veränderung der Variablen »Fahrzeugfahrleistung« und »Antriebstechnologie« an. Die Anzahl der BEV nahm im quantitativen Simulationsmodell über den Zeitverlauf zu, sodass die erwünschte ökologische Wirkung zu erwarten ist. Die Fahrzeugfahrleistung stieg ebenfalls an. Dies ist jedoch eine unerwünschte ökologische Wirkung, sodass Gestaltungsoptionen zu suchen sind, die diesem Anstieg entgegenwirken.

Im quantitativen Zukunftsmodell wirkt die Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge gleichgerichtet auf die Fahrzeugfahrleistung. Mit steigender Anzahl fahrerloser Fahrzeuge wird auch die Fahrzeugfahrleistung erhöht. Die Abbildung 40 zeigt die Variablen, die auf die Fahrzeugfahrleistung im Simulationsmodell einwirken und die Richtung ihrer Wirkungsbeziehung. Ein Ansatzpunkt für die ökologische Gestaltung ist die Umkehr der Richtung der Wirkungsbeziehung der

Abbildung 40: Variablen und Richtung der Wirkungsbeziehung auf die Variable »Fahrzeugfahrleistung« für eine ökologische Gestaltung



Quelle: Eigene Darstellung

Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge auf die Fahrzeugfahrleistung (in grau hinterlegt). Eine Gestaltungsoption stellt damit die Senkung der Fahrzeugfahrleistung dar, wenn fahrerlose Fahrzeuge im Realbetrieb implementiert werden.

Diese Entwicklung wird in das bestehende Simulationsmodell integriert und verändert andere Variablen im System, wie die Tabelle 15 zeigt. In grüner Farbe sind die erwünschten Wirkungen und in roter Farbe die unerwünschten Wirkungen visualisiert.

Im Simulationsmodell wird mit der Annahme eines gleichbleibenden Fahrzeugbestands gearbeitet. Wird der Faktor berücksichtigt, dass die gleiche Anzahl an Fahrzeugen weniger Kilometer pro Jahr zurücklegt, entsteht in der Folge weniger Verkehr. Die Auswertung des Szenarios zeigt, dass die Variablen des Subsystems »Verkehrsleistung« in der gewünschten Wirkungsweise besonders beeinflusst werden.

Eine verringerte Fahrzeugfahrleistung kann allerdings auch zu ökonomisch, ökologisch und sozial unerwünschten Wirkungen führen: Die Fahrzeugauslastung wird zunehmend verringert, auch die Antriebstechnologie steigt weniger stark und in der Folge nehmen die THG-Emissionen im Vergleich zum quantitativen Zukunftsmodell weniger wirksam ab. Die Anzahl der Berufskraftfahrenden nimmt außerdem zunehmend ab.

Um eine ökonomisch gewünschte Wirkung zu erreichen, gilt es, die Richtung der Wirkungsbeziehung der Fahrzeugauslastung umzukehren, sodass die Fahrzeugauslastung steigt. Bei einem gleichbleibenden Transportaufkommen in t sowie einer reduzierten Fahrzeugfahrleistung kann dies beispielsweise durch eine Regulierung der Fahrzeugauslastung, durch die Verringerung der absoluten Anzahl an Fahrzeugen oder durch die Veränderung des Fahrzeugdesigns erfolgen, sodass die mögliche Beförderungsleistung (in tkm) besser ausgenutzt wird. Diese Gestaltungsoption wird im ökonomischen Modell näher untersucht.

Die Antriebstechnologie als weitere aktive Variable – neben der Fahrzeugfahrleistung – führt dazu, dass sich die THG-Emissionen verändern. Da die Variable »Antriebstechnologie« aber maßgeblich durch die Fahrzeugfahrleistung beeinflusst wird – weniger Fahrleistung bedeutet im Simulationsmodell eine abnehmende Umwandlung von Dieselfahrzeugen zu BEV – kann auch die Variable »THG-Emissionen« nicht zunehmend

Tabelle 15: Veränderungseffekte durch eine abnehmende Fahrzeugfahrleistung

Variablen	Einheit	Quantitatives Zukunftsmodell (QZ)			Szenario »Abnehmende Fahrzeugfahrleistung«		Absolute Veränderung im Vergleich zum Jahr 0	Absolute Veränderung des Szenarios zum QZ im Jahr 30
		Absolut Jahr 0	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30		
Fahrzeugfahrleistung	Fzkm	93.384	112.203	20 %	88.901	-5 %	↗	
Straßentransportnachfrage	Mio. t	2.477	2.697	9 %	2.787	13 %	↗	
Lieferzuverlässigkeit	%	80	104	30 %	105	31 %	↗	
Fahrzeugauslastung	%	57	51	-11 %	48	-16 %	↘	
Schnittstellentechnologien	%	20	28	41 %	28	41 %	↗	
Personalbedarf zur Be- und Entladung	Anzahl	48.329	52.661	9 %	53.174	10 %	↗	
Personalqualifikation	%	58	72	24 %	72	24 %	↗	
Kosten für Warenübergabe	€	314.320	495.096	58 %	487.826	55 %	↗	
Fahrerloses Fahrzeug	%	0	92	92 %	92	92 %	↗	
Antriebstechnologie	%	0	60.703	28 %	38.513	18 %	↘	
Berufskraftfahrende	Anzahl	572.238	423.216	-26 %	398.451	-30 %	↘	
TCO	€	224.476	219.194	-2 %	210.859	-6 %	↘	
THG-Emissionen	Mio. t CO ₂ e	17,9	12,4	-31 %	13,2	-27 %	↘	
Stauaufkommen	Mio. Fz	2,8	2,1	-25 %	1,9	-30 %	↘	
Verkehrsunfälle	Anzahl	36.938	24.199	-34 %	22.125	-40 %	↘	
Infrastrukturnutzung	km	14.527	12.902	-11 %	12.639	-13 %	↘	
Infrastrukturkosten	Mrd. €	2,1	2,5	21 %	2,3	12 %	↗	
Stellplatzbedarf	km ²	5.733	4.192	-27 %	3.880	-32 %	↘	

Quelle: Eigene Zusammenstellung

sinken. Es gilt daher – trotz einer verringerten Fahrzeugfahrleistung – Anreize für die Umwandlung von Dieselfahrzeugen zu BEV zu setzen. Dies kann mithilfe von Förderprogrammen oder Anreizsystemen, wie einer entfallenden Kfz-Steuer für BEV, geschehen. Da trotz dieses Anreizsystems die Anzahl an neu zugelassenen BEV in der Logistik weiterhin sehr gering ist, braucht es die Umsetzung weiterer Gestaltungsoptionen, wie eine zunehmende Forschung und Entwicklung wettbewerbsfähiger Technologien sowie deren Förderung.

Die Anzahl an Berufskraftfahrenden geht durch die sinkende Fahrzeugfahrleistung zunehmend zurück. In Simulationsmodell wurde angenommen, dass zur Bewältigung einer steigenden Fahrzeugfahrleistung – unabhängig vom fahrerlosen Fahren – mehr Berufskraftfahrende eingesetzt werden müssen. Geht die Fahrzeugfahrleistung zurück, sind weniger Berufskraftfahrende für den Transport der Güter erforderlich. Dies stellt jedoch eine unerwünschte soziale Wirkung dar, da es zu einer höheren Arbeitslosigkeit führen kann. Als Gestaltungsoption ist daher denkbar, Umschulungsmaßnahmen für Berufskraftfahrende frühzeitig zur Verfügung zu stellen.

Im Vergleich zum Jahr Null steigen die Infrastrukturkosten sowohl im quantitativen Zukunftsmodell als auch im Szenario mit reduzierter Fahrzeugfahrleistung. Die Infrastrukturkosten gehen allerdings durch die Reduktion der Fahrzeugfahrleistung im Vergleich zum quantitativen Zukunftsmodell leicht zurück. Um sowohl eine gewünschte ökologische Wirkung als auch ökonomische Wirkung zu erzielen (sogenannte Win-Win-Situation), gilt es, die Infrastrukturkosten langfristig zu senken. Dies könnte beispielsweise durch eine Senkung der Aus- und Neubaukosten oder der Reduktion der Infrastrukturtechnologie erfolgen. Diese Gestaltungsoption wird im ökonomischen Gestaltungsmodell näher betrachtet.

Mögliche ökologische Gestaltungsoptionen sind auf Grundlage der vorangegangenen Diskussion:

- Die Senkung der Fahrzeugfahrleistung
- Das Setzen von Anreizen zur Umwandlung von Dieselfahrzeugen in BEV
- Die Stärkung der Forschung und Entwicklung wettbewerbsfähiger BEV

Eine weitere soziale Gestaltungsoption ist darüber hinaus:

- Die Bereitstellung frühzeitiger Umschulungsmaßnahmen für Berufskraftfahrende

9.2 Ökonomisches Gestaltungsmodell

Das zweite Gestaltungsmodell setzt an den ökonomischen Wirkungen im Logistiksystem an. Darunter fallen die Variablen »Straßentransportnachfrage«, »Fahrzeugauslastung«, »Lieferzuverlässigkeit« sowie »Kosten für Warenübergabe«, »TCO« und »Infrastrukturkosten«, die den jeweiligen Akteuren des Logistiksystems zugeordnet werden können. Die genannten Variablen stellen unterschiedliche Leistungsgrößen aus Sicht der Unternehmen dar, wie in Abschnitt 8.3 erläutert.

Die erwünschten ökonomischen Wirkungen für dienstleistende Unternehmen, wie die Erhöhung der Straßentransportnachfrage sowie die Erhöhung der Lieferzuverlässigkeit, wurden durch das Simulationsmodell bestätigt. Im Gegensatz dazu zeigte das quantitative Zukunftsmodell allerdings auf, dass durch die Einführung fahrerloser Fahrzeuge die Fahrzeugauslastung über den Zeitverlauf sinkt. Dies wurde im ökologischen Gestaltungsmodell ebenfalls deutlich und durch die dort modellierten Veränderungen sogar noch verstärkt.

Zur Steigerung des Auslastungsgrad ist es erforderlich, den Fahrzeugbestand und dessen mögliche Beförderungsleistung besser auszulasten. Wie bereits in Abschnitt 9.1 beschrieben, kann dies entweder bei gleichbleibendem Transportaufkommen durch eine Reduktion des Fahrzeugbestands oder durch ein verändertes Fahrzeugdesign erfolgen. Da in dieser Arbeit von einem gleichbleibenden Fahrzeugbestand ausgegangen wird, ist eine weitere Gestaltungsoption die Fahrzeugauslastung zu regulieren, sodass Unternehmen, die fahrerlose Fahrzeuge nutzen, dazu aufgefordert werden, die Fahrzeuge möglichst auszulasten. Die Fahrzeugauslastung gilt als aktive Variable und hat daher einen Einfluss auf die anderen Variablen im System. Wird im Simulationsmodell hinterlegt, dass das fahrerlose Fahren zu einer Erhöhung der Fahrzeugauslastung führt (Zunahme der Fahrzeugauslastung auf ca. 72 % nach 30 Jahren), bewirkt dies eine Veränderung der anderen Variablen, wie in Tabelle 16 aufgezeigt.

Tabelle 16: Veränderungseffekte aufgrund einer Zunahme der Fahrzeugauslastung durch fahrerloses Fahren

Variablen	Einheit	Quantitatives Zukunftsmodell (QZ)			Szenario »Zunehmende Fahrzeugauslastung«		Absolute Veränderung im Vergleich zum Jahr 0	Absolute Veränderung des Szenarios zum QZ im Jahr 30
		Absolut Jahr 0	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30		
Fahrzeugfahrleistung	Fzkm	93.384	112.203	20 %	113.803	22 %	↗	↗
Straßentransportnachfrage	Mio. t	2.477	2.697	9 %	2.759	11 %	↗	↗
Lieferzuverlässigkeit	%	80	104	30 %	104	31 %	↗	↗
Fahrzeugauslastung	%	57	51	-11 %	72	26 %	↗	↗
Schnittstellentechnologien	%	20	28	41 %	29	43 %	↗	↗
Personalbedarf zur Be- und Entladung	Anzahl	48.329	52.661	9 %	52.736	9 %	↗	↗
Personalqualifikation	%	58	72	24 %	73	26 %	↗	↗
Kosten für Warenübergabe	€	314.320	495.096	58 %	514.412	64 %	↗	↗
Fahrerloses Fahrzeug	%	0	92	92 %	92	92 %	↗	↔
Antriebstechnologie	%	0	60.703	28 %	63.672	29 %	↗	↗
Berufskrafftahrende	Anzahl	572.238	423.216	-26 %	404.367	-29 %	↘	↘
TCO	€	224.476	219.194	-2 %	208.029	-7 %	↘	↘
THG-Emissionen	Mio. t CO ₂ e	17,9	12,4	-31 %	11,8	-34 %	↘	↘
Stauaufkommen	Mio. Fz	2,8	2,1	-25 %	2,0	-29 %	↘	↘
Verkehrsunfälle	Anzahl	36.938	24.199	-34 %	23.935	-35 %	↘	↘
Infrastrukturnutzung	km	14.527	12.902	-11 %	12.633	-13 %	↘	↘
Infrastrukturkosten	Mrd. €	2,1	2,5	21 %	2,5	19 %	↗	↗
Stellplatzbedarf	km ²	5.733	4.192	-27 %	3.834	-33 %	↘	↘

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die Erhöhung der Fahrzeugauslastung führt – wie auch im ökologischen Modell – zu einer erwünschten Entwicklung im Subsystem »Verkehrsleistung«. Durch eine höhere Auslastung der Fahrzeuge sind weniger Fahrzeuge für den Transport einer gleichbleibenden Menge erforderlich. Auch die Variablen »Antriebstechnologien« und »THG-Emissionen« werden durch die zunehmende Fahrzeugauslastung erhöht. Dies könnte allerdings damit begründet sein, dass die Fahrzeugfahrleistung durch die höhere Auslastung ebenfalls ansteigt. Die Erhöhung der Fahrzeugfahrleistung ist jedoch nicht damit begründet, dass die Fahrzeugauslastung direkt auf die Fahrzeugfahrleistung wirkt, sondern dass die Veränderung der anderen Variablen die Fahrzeugfahrleistung beeinflusst (siehe Abbildung 40). Es entsteht durch eine erwünschte ökonomische Wirkung folglich eine unerwünschte ökologische Wirkung. An dieser Stelle wird deutlich, wie sehr sich die ökologischen und ökonomischen Variablen beeinflussen. Für eine erwünschte Entwicklung mit fahrerlosen Fahrzeugen gilt es daher, sowohl die ökologische als auch die ökonomische Dimension gleichermaßen zu betrachten.

Eine unerwünschte ökonomische Wirkung ist zudem die Zunahme der Kosten für die Warenübergabe. Die Variable ist als sehr stark reaktiv eingestuft worden und wird damit durch das System wirksam beeinflusst. Dieser Wirkung liegt die Annahme zugrunde, dass eine höhere Fahrzeugauslastung auch zu mehr Umschlag an der Warenübergabe und damit höheren Kosten führt. Bereits im quantitativen Zukunftsmodell wurde deutlich, dass das fahrerlose Fahren keine Vorteile für die versendenden und empfangenden Unternehmen bietet, da der Personalbestand, die Personalqualifikation und die Kosten für die Warenübergabe ansteigen. Aus einer ökonomischen Perspektive spricht insbesondere der Anstieg der Kosten gegen eine Einführung fahrerloser Fahrzeuge.

Bei der Betrachtung der Kosten für die Warenübergabe im Jahr 30 bei einer zunehmenden Fahrzeugauslastung (Jahr 30) in Tabelle 17 wird deutlich, dass der größte Kostentreiber die Personalkosten sind. Bei einem Umfang von etwa sieben Mitarbeitenden (Vollzeitäquivalenten) pro Logistikstandort in der Warenübergabe entstehen trotz des fahrerlosen Fahrens Kosten in Höhe von 367.503 Euro im Jahr 30. Dies entspricht einer Kostenzunahme von über 53.000 Euro in Vergleich zum Jahr 0. Die

Tabelle 17: Kostenveränderungen in der Warenübergabe im Jahr 30

Kostengröße	Kosten für die Warenübergabe im Szenario »Zunehmende Fahrzeugauslastung« im Jahr 30
Kosten für Ladeinfrastruktur	29.147 €
Kosten für Schnittstellentechnologien	42.714 €
Personalkosten	367.503 €
Weitere Kosten durch Veränderungseffekte	75.048 €
Gesamtkosten in der Warenübergabe	514.412 €

Quelle: Eigene Zusammenstellung

zusätzlichen Kosten sind zum einen auf den Mehrbedarf von Personal (9 % mehr Personal zur Be- und Entladung bis zum Jahr 30) und zum anderen auf das höherqualifizierte Personal zur Bedienung der Schnittstellentechnologien (26 % mehr Personal in Führungspositionen bis zum Jahr 30 bei äquivalentem Rückgang des Personals zum Güter- und Warenumschlag) zurückzuführen. Es gilt daher, die Personalkosten zu reduzieren, um die Attraktivität fahrerloser Fahrzeuge für versendende und empfangende Unternehmen zu steigern.

In der Literatur (u.a. Flämig 2015; Engholm et al. 2020) wird diskutiert, dass mit der Einführung fahrerloser Fahrzeuge Aufgaben der Berufskraftfahrenden an die Mitarbeitenden in der Be- und Entladung übergehen könnten. Daher wurde im quantitativen Zukunftsmodell angenommen, dass mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge auch der Bedarf an Personal zur Be- und Entladung steigt.

Im quantitativen Zukunftsmodell steigt allerdings auch der Anteil an Schnittstellentechnologien, die eigentlich die Tätigkeiten des Personals in der Warenübergabe und der Berufskraftfahrenden übernehmen sollen, ohne deutliche Wirkung auf den Personalbedarf. Wird nun zugrundegelegt, dass die Schnittstellentechnologien, die für das fahrerlose Fahren

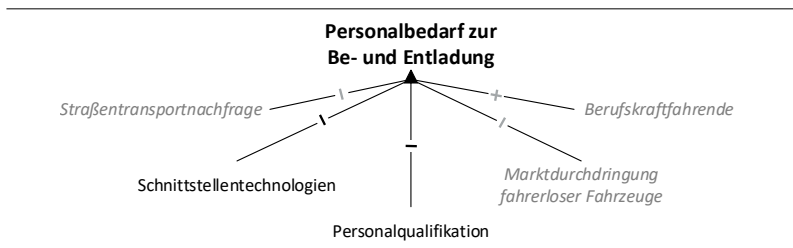
implementiert werden, diese Prozesse übernehmen und somit weniger Personal erforderlich sein wird, sinken auch die Personalkosten über den Zeitverlauf.

Bei der Auswertung der Ergebnisse wird deutlich, dass eine Reduktion der Personalkosten in der Warenübergabe erst einsetzt, wenn der Personalbedarf in der Warenübergabe unter 30.000 Personen in Deutschland gesunken ist. Das bedeutet, dass maximal vier Personen in der Warenübergabe tätig sein dürfen, von denen drei Personen in Führungsposition und eine Person über eine geringere Personalqualifikation verfügen. Auf dieser Basis lässt sich ein weiterentwickeltes Szenario ableiten, dem zusätzlich folgenden Veränderungen im Simulationsmodell zugrunde liegen:

1. Das fahrerlose Fahren führt zu einer Reduktion des Personalbedarfs in der Warenübergabe.
2. Die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden werden nicht durch Personal in der Warenübergabe übernommen.
3. Die Zunahme der Straßentransportnachfrage führt nicht zu einer Erhöhung des Personalbedarfs in der Warenübergabe.

Die Variablen und die Richtung ihrer Wirkungsbeziehungen auf die Variable »Personalbedarf zur Be- und Entladung« für eine ökonomische Gestaltung des Logistiksystems zeigt die Abbildung 41. In grau hinterlegt sind die Veränderungen, die in das Simulationsmodell integriert werden.

Abbildung 41: Variablen und Richtung der Wirkungsbeziehung auf die Variable »Personalbedarf zur Be- und Entladung« für eine ökonomische Gestaltung



Quelle: Eigene Darstellung

Alle Tätigkeiten werden – soweit wie möglich – durch Schnittstellentechnologien übernommen. Es ergibt sich in der Folge eine Veränderung anderer Variablen im Logistiksystem, wie die Tabelle 18 zeigt. Die Berechnung zeigt, dass durch die Modellierung einer steigenden Fahrzeugauslastung und eines sinkenden Personalbedarfs in der Warenübergabe unerwünschte Wirkungen bei den Variablen »Fahrzeugfahrleistung«, »Lieferzuverlässigkeit«, »Berufskraftfahrende« und »Infrastrukturkosten« auftreten.

Im ökonomischen Gestaltungsmodell steigt die Fahrzeugfahrleistung über den Zeitverlauf zunehmend an. Um dieser Trendentwicklung entgegenzuwirken, kann die Gestaltungsoption des ökologischen Gestaltungsmodells zusätzlich in das ökonomische Gestaltungsmodell integriert werden, sodass die Fahrzeugfahrleistung sinkt. Dafür werden die bestehenden ökonomischen Anpassungen im Simulationsmodell dahingehend ergänzt, dass von einer gleichgerichteten Wirkung des fahrerlosen Fahrens auf die Fahrzeugauslastung ausgegangen wird.

Ökonomisch unerwünscht ist zudem die Reduktion der Lieferzuverlässigkeit. Im quantitativen Zukunftsmodell und auch im ökologischen Gestaltungsmodell steigt die Lieferzuverlässigkeit über den Zeitverlauf an. Durch die zunehmende Fahrzeugauslastung sowie den reduzierten Personalbedarf sinkt allerdings die Lieferzuverlässigkeit um 8 %. Dies ist mit der hinterlegten Annahme begründet, dass mit steigendem Personalbedarf auch die Prozesse in der Warenübergabe problemloser und schneller durchgeführt werden können. Mit sinkendem Personalbedarf nimmt in der Folge auch die Lieferzuverlässigkeit ab. Wird allerdings davon ausgegangen, dass die Schnittstellentechnologien die Prozesse der Warenübergabe effizienter durchführen, könnte die Lieferzuverlässigkeit steigen. Es ist daher anzunehmen, dass die Prozesse mit verringerten Personalbedarf mindestens genauso effizient ablaufen, wie mit einem hohen Personalbestand.

Darüber hinaus lässt sich anhand der Berechnung schlussfolgern, dass Schnittstellentätigkeiten, wie die Be- und Entladung, in Zukunft nicht durch zusätzliches Personal erledigt werden, wenn monetäre Anreize für versendende und empfangende Unternehmen geschaffen werden sollen. Wird allerdings die Technologie dahingehend entwickelt, müssen die

Tabelle 18: Veränderungseffekte aufgrund einer Zunahme der Fahrzeugauslastung und eines Rückgangs des Personalbedarfs in der Warenübergabe durch fahrerloses Fahren

Variablen	Einheit	Quantitatives Zukunftsmodell (QZ)			Szenario »Zunehmende Fahrzeugauslastung und verringerter Personalbedarf«		Absolute Veränderung im Vergleich zum Jahr 0	Absolute Veränderung des Szenarios zum QZ im Jahr 30
		Absolut Jahr 0	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30		
Fahrzeugfahrleistung	Fzkm	93.384	112.203	20 %	113.415	21 %	↗	↗
Straßentransportnachfrage	Mio. t	2.477	2.697	9 %	2.736	10 %	↗	↗
Lieferzuverlässigkeit	%	80	104	30 %	72	28 %	↗	↘
Fahrzeugauslastung	%	57	51	-11 %	102	25 %	↗	↗
Schnittstellentechnologien	%	20	28	41 %	28	42 %	↗	↗
Personalbedarf zur Be- und Entladung	Anzahl	48.329	52.661	9 %	26.899	-44 %	↘	↘
Personalqualifikation	%	58	72	24 %	83	43 %	↗	↗
Kosten für Warenübergabe	€	314.320	495.096	58 %	311.940	-1 %	↘	↘
Fahrerloses Fahrzeug	%	0	92	92 %	92	92 %	↔	↔
Antriebstechnologie	%	0	60.703	28 %	63.285	29 %	↗	↗
Berufskraftfahrende	Anzahl	572.238	423.216	-26 %	404.811	-29 %	↘	↘
TCO	€	224.476	219.194	-2 %	208.088	-7 %	↘	↘
THG-Emissionen	Mio. t CO ₂ e	17,9	12,4	-31 %	11,8	-33 %	↘	↘
Staufaufkommen	Mio. Fz	2,8	2,1	-25 %	2,0	-29 %	↘	↘
Verkehrsunfälle	Anzahl	36.938	24.199	-34 %	23.911	-35 %	↘	↘
Infrastrukturnutzung	km	14.527	12.902	-11 %	12.632	-13 %	↘	↘
Infrastrukturkosten	Mrd. €	2,1	2,5	21 %	2,5	19 %	↗	↗
Stellplatzbedarf	km ²	5.733	4.192	-27 %	3.835	-33 %	↘	↘

Quelle: Eigene Zusammenstellung

jeweiligen Unternehmen höher qualifiziertes Personal in ihre Prozesse einbinden, die die Schnittstellentechnologien überwachen und bedienen können.

Die Entwicklung eines abnehmenden Bedarfs an Personal zur Be- und Entladung hat zwar Vorteile für versendende und empfangende Unternehmen, kann aber für die Politik zu negativen Folgen, aufgrund zunehmender Arbeitslosigkeit, führen. Auch wenn die bestehenden Arbeitsplätze durch eine höhere Qualifizierung und damit einhergehend einem höheren Gehalt, an Attraktivität gewinnen können, ist der Rückgang des Personalbedarfs von über 40 % bis zum Jahr 30 beachtlich und sollte in eine zukünftige Planung einbezogen werden. Neue Stellenprofile, beispielsweise als technische Aufsicht, könnten eine Alternative für das Personal darstellen.

Gleichzeitig ist aber auch zu berücksichtigen, dass die Anzahl an Berufskraftfahrenden mit Einführung des fahrerlosen Fahrens ebenfalls sinkt. Auch hier zeigt das ökonomische Gestaltungsmodell (Szenario »Zunehmende Fahrzeugauslastung und verringerter Personalbedarf«) einen Rückgang von ca. 30 % bis zum Jahr 30. Ausgehend vom Basisjahr könnte dies einen Rückgang von insgesamt etwa 190.000 Arbeitsplätzen bei Berufskraftfahrenden sowie bei versendenden und empfangenden Unternehmen bis zum Jahr 30 bedeuten.

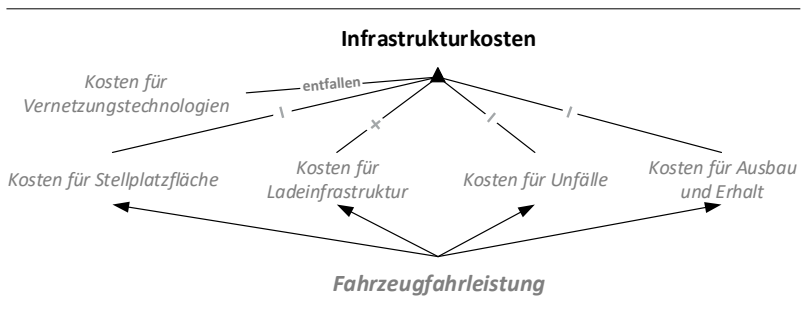
Ähnlich zu den Kosten in der Warenübergabe steigen die Infrastrukturkosten mit zunehmender Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge ebenfalls über den Zeitverlauf an. Die Variablen »Infrastrukturkosten« ist eine leicht reaktive Variable. Bis zum Jahr 30 kann anhand des quantitativen Zukunftsmodells sowie des Szenarios »zunehmende Fahrzeugauslastung und verringerter Personalbedarf« eine Zunahme der Infrastrukturkosten um ca. 400 Mio. Euro ermittelt werden.

Die Infrastrukturkosten setzen sich zusammen aus den Kosten für Stellplatzfläche, für Ladeinfrastruktur, für Vernetzungstechnologien, für Erhalt und Neubau sowie Unfälle. Die Kosten für Stellplatzfläche, Erhalt und Neubau sowie Unfälle gehen über den Zeitverlauf sowohl im quantitativen Zukunftsmodell als auch im betrachteten Szenario zurück, während die Kosten für Ladeinfrastruktur und Vernetzungstechnologien steigen. Die Zunahme der Kosten ist dabei zum einen auf die steigende

Anzahl fahrerloser Fahrzeuge zurückzuführen, die auf infrastrukturelle Vernetzungstechnologien angewiesen sind, zum anderen sind die steigenden Kosten durch die zunehmende Einführung von BEV begründet, für die Ladeinfrastruktur bereitgestellt werden muss. Eine mögliche Gestaltungsoption zur Kostensenkung ist folglich die Reduktion der Kosten für Ladesäulen und der Kosten für Vernetzungstechnologie.

Zur Untersuchung der Wirkungen wird, im Gegensatz zum quantitativen Zukunftsmodell, angenommen, dass die Kosten für Vernetzungstechnologie entfallen, da zugrunde gelegt wird, dass die Fahrzeuge sich selbstständig ohne Infrastrukturtechnologie bewegen können. Um den Wert des Basisjahrs Null zu erreichen, gilt es weitere knapp 217 Mio. Euro einzusparen. Möglich ist dies zum einen durch eine kostengünstigere Ladeinfrastruktur für BEV, um die Öffentlichkeit nicht zusätzlich, beispielsweise durch höhere Steuern, zu belasten. Zum anderen könnten die Infrastrukturkosten auch durch eine zusätzliche Reduktion der Kosten für Erhalt und Ausbau gesenkt werden. Die Kosten für Erhalt und Ausbau sind unter anderem durch die Fahrzeugfahrleistung beeinflusst. Wenn diese, wie im ökologischen Modell dargestellt, ebenfalls als sinkend angenommen wird, entwickeln sich die Infrastrukturkosten fast parallel zu denen des Basisjahrs. Die Abbildung 42 zeigt, in grau hinterlegt, die Ansatzpunkte im Simulationsmodell für eine gleichermaßen ökonomische als auch ökologische Gestaltung.

Abbildung 42: Ansatzpunkte für eine gleichermaßen ökonomische als auch ökologische Gestaltung im Simulationsmodell



Quelle: Eigene Darstellung

Werden nun in einem Simulationsmodell alle bisherigen Gestaltungsoptionen integriert, zeigt sich, dass die Gestaltungsoptionen auf fast alle Variablen eine erwünschte Wirkung haben. Die Tabelle 19 zeigt die Veränderungen aufgrund einer Kombination der zuvor genannten Gestaltungsoptionen.

Die Kombination der Gestaltungsoptionen des ökologischen Modells mit den in diesem Abschnitt herausgearbeiteten ökonomischen Gestaltungsoptionen zeigt, dass im Vergleich zum Jahr Null fast alle Variablen in gewünschter Wirkungsweise beeinflusst wurden. Nur die Anzahl an Berufskraftfahrenden und die Anzahl des Personals in der Warenübergabe nimmt über den Zeitverlauf ab.

Bei dem Vergleich des kombinierten Szenarios mit dem quantitativen Zukunftsmodell ist eine leichte Abschwächung bei den Variablen »Lieferzuverlässigkeit«, »Antriebstechnologie« und »THG-Emissionen« zu beobachten. Die Lieferzuverlässigkeit steigt im quantitativen Zukunftsmodell bereits nach 16 Jahren über 100 %, im Szenario »ökologisches und ökonomisches Modell« tritt dies erst ein Jahr später ein. In beiden Fällen steigt die Lieferzuverlässigkeit aber schon vor dem Jahr 30 auf über 100 %. Die Entwicklung der Antriebstechnologie und der THG-Emissionen wurde bereits in Abschnitt 9.1 erläutert. Beide Variablen entwickeln sich aber trotz der Gestaltungsoptionen in gewünschter Wirkungsweise.

Folgende ökonomische Gestaltungsoptionen können auf Grundlage der vorangegangenen Szenariobetrachtung festgehalten werden:

- Die Erhöhung der Fahrzeugauslastung
- Die Übernahme der Tätigkeiten durch Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe
- Die Ausbildung des Personals zur Bedienung der Schnittstellentechnologien
- Die Reduktion der Kosten für Ladeinfrastruktur
- Der Verzicht auf Infrastrukturtechnologien für fahrerlose Fahrzeuge
- Die Reduktion der Kosten für Ausbau und Erhalt

Insgesamt konnte das kombinierte Szenario zeigen, dass mithilfe der genannten Gestaltungsoptionen die ökologisch und ökonomisch erwünschten Wirkungen eintreffen können.

Tabelle 19: Veränderungseffekte aufgrund einer Kombination des ökologischen und ökonomischen Gestaltungsmodells

Variablen	Einheit	Quantitatives Zukunftsmodell (QZ)			Szenario »ökologisches und ökonomisches Modell«		Absolute Veränderung im Vergleich zum Jahr 0	Absolute Veränderung des Szenarios zum QZ im Jahr 30
		Absolut Jahr 0	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30	Absolut Jahr 30	Relativ Jahr 30		
Fahrzeugfahrleistung	Fzkm	93.384	112.203	20 %	90.547	-3 %	↘	↘
Straßentransportnachfrage	Mio. t	2.477	2.697	9 %	2.851	15 %	↗	↗
Lieferzuverlässigkeit	%	80	104	30 %	103	28 %	↗	↘
Fahrzeugauslastung	%	57	51	-11 %	70	22 %	↗	↗
Schnittstellentechnologien	%	20	28	41 %	29	43 %	↗	↗
Personalbedarf zur Be- und Entladung	Anzahl	48.329	52.661	9 %	26.039	-46 %	↘	↘
Personalqualifikation	%	58	72	24 %	84	44 %	↗	↗
Kosten für Warenübergabe	€	314.320	495.096	58 %	297.125	-5 %	↘	↘
Fahrerloses Fahrzeug	%	0	92	92 %	92	92 %	↗	↗
Antriebstechnologie	%	0	60.703	28 %	46.499	21 %	↗	↘
Berufskraftfahrende	Anzahl	572.238	423.216	-26 %	381.926	-33 %	↘	↘
TCO	€	224.476	219.194	-2 %	200.114	-11 %	↘	↘
THG-Emissionen	Mio. t CO ₂ e	17,9	12,4	-31 %	12,2	-32 %	↘	↘
Stauaufkommen	Mio. Fz	2,8	2,1	-25 %	1,9	-32 %	↘	↘
Verkehrsunfälle	Anzahl	36.938	24.199	-34 %	22.338	-40 %	↘	↘
Infrastrukturnutzung	km	14.527	12.902	-11 %	12.518	-14 %	↘	↘
Infrastrukturkosten	Mrd. €	2,1	2,5	21 %	2,1	1 %	↗	↗
Stellplatzbedarf	km ²	5.733	4.192	-27 %	3.457	-40 %	↘	↘

Quelle: Eigene Zusammenstellung

9.3 Soziales Gestaltungsmodell

Die im Simulationsmodell berücksichtigten erwünschten sozialen Wirkungen sind zum einen die Erhöhung der berufstätigen Berufskraftfahrenden sowie der Mitarbeitenden in der Warenübergabe. Zum anderen sind sozial erwünschte Wirkungen die Reduktion des Stauaufkommens, der Verkehrsunfälle und der Infrastrukturnutzung. Die letzteren erwünschten Wirkungen konnten bereits mit dem zuvor beschriebenen kombinierten ökologischen und ökonomischen Gestaltungsmodell erzielt werden.

Die Anzahl der berufstätigen Personen zum Transport von Gütern konnte jedoch nicht erhöht werden. Dies liegt in der Grundannahme begründet, dass es sich bei dem Forschungsgegenstand um das fahrerlose Fahren handelt. Eine zunehmende Anzahl an Berufskraftfahrenden kann mit steigender Einführung fahrerloser Fahrzeuge nicht eintreten. Auch die Anzahl an Personal in der Warenübergabe sinkt über den Zeitverlauf. Hierbei liegt zugrunde, dass Schnittstellentechnologien für die Warenübergabe eingesetzt werden, die die Prozesse automatisieren und damit Personal einsparen. Es ist jedoch auch denkbar, dass keine Automatisierungstechnologie in der Warenübergabe eingesetzt wird und stattdessen bestehendes Personal die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden übernimmt. Hierbei ist aus ökonomischer Perspektive zu berücksichtigen, dass in Deutschland die Personalkosten, die Kosten für Schnittstellentechnologien derzeit übersteigen. Eine wettbewerbsfähige Umsetzung dieses Konzepts ist nur möglich, wenn die Personalkosten unter den Kosten für Automatisierungstechnologien liegen.

Wie bereits beschrieben, stellen die sozialen Wirkungen Anforderungen an die Unternehmen und Politik. Bei einer Marktdurchdringung von 92 % fahrerlosen Fahrzeugen können etwa 190.000 Arbeitsplätze wegfallen. Es gilt daher Lösungen zu finden, um neue Arbeitsplätze für Berufskraftfahrende und Personal in der Warenübergabe zu generieren. Eine mögliche Gestaltungsoption ist daher, wie bereits in Abschnitt 9.1 genannt:

- Die Aus- und Weiterbildung für Personal in der Warenübergabe und Berufskraftfahrende

9.4 Zuordnung der Gestaltungsoptionen zu den relevanten Akteuren

Die vorangegangene Szenariobetrachtung zeigt, dass mithilfe von Gestaltungsoptionen das Logistiksystem mit fahrerlosen Fahrzeugen wünschenswert beeinflusst werden kann. Damit wird die dritte Forschungsfrage »Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren?« beantwortet. Die Veränderung einzelner Variable zur Reduktion unerwünschter Wirkungen des fahrerlosen Fahrens entspricht einer Sensitivitätsanalyse.

Die 10 ermittelten Gestaltungsoptionen sind in der Abbildung 43 hinsichtlich ihrer ökologischen, ökonomischen und sozialen Wirkung unterschieden. Zudem wurden die wesentlichen Annahmen hier noch einmal dokumentiert.

Jede Spalte in der Abbildung 43 steht für einen Akteur. Je nach Gestaltungsoption und Annahme können sie impulsgebender, umsetzender sowie nutzengewinnender Akteur sein. Dies ist in der Abbildung 43 durch die drei Symbole visualisiert. Neben den bereits genannten Akteuren des Logistiksystems – dienstleistende Unternehmen, Transportunternehmen, versendende und empfangende Unternehmen, Politik sowie die Öffentlichkeit – sind an der Entwicklung fahrerloser Fahrzeuge und ihrem Einsatz auch technologieentwickelnde und herstellende Unternehmen beteiligt. Für die Umsetzung können zudem Schulungsinstitute von Relevanz sein.

Als impulsgebender Akteur der ökologischen Gestaltungsoptionen ist die Politik eingeordnet. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass eine Transformation des Verkehrssystems nur erreicht werden kann, wenn diese nicht zu Wettbewerbsverzerrungen führt. Die Politik kann Rahmenbedingungen vorgeben, durch die Fahrzeugfahrleistungen reduziert, Anreize zur Umwandlung von Dieselfahrzeugen in BEV gegeben und die Forschung und Entwicklung von BEV gestärkt werden.

Umsetzungsakteure sind die dienstleistenden Unternehmen, die Politik sowie die herstellenden Unternehmen: Die Entwicklung der BEV muss von den herstellenden Unternehmen vorangetrieben werden.

Die dienstleistenden Unternehmen müssen die Planung und Steuerung der durchzuführenden Transporte dahingehend verändern, dass Transportunternehmen weniger Strecke pro Jahr zurückzulegen haben. Dies könnte beispielsweise durch die Verlagerung von Standorten der Logistikunternehmen oder durch eine angepasste Touren- und Routenplanung erzielt werden. Die Politik gibt Anreize zur Umwandlung der Fahrzeugflotten von Dieselfahrzeugen zu BEV. Eine Umsetzung der ökologischen Gestaltungsoptionen kann allerdings bei den herstellenden Unternehmen dazu führen, dass weniger Fahrzeuge nachgefragt werden.

Aufgrund einer zurückgehenden ökologischen Belastung entsteht insgesamt ein Nutzen für die Öffentlichkeit und Umwelt. Die Transportunternehmen profitieren zusätzlich von den Gestaltungsoptionen, da sie durch die Anreize in der Lage sind, ihre Fahrzeugflotten umzurüsten und ihre Wettbewerbsfähigkeit durch die Forschung und Entwicklung von BEV zu stärken.

Den ökologischen Gestaltungsoptionen liegen verkehrliche sowie antriebsbezogene Annahmen zugrunde. Um die erwünschten Wirkungen zu realisieren, ist ein gleichbleibender Fahrzeugbestand Voraussetzung. Diese Annahme ist von der Politik zu initiieren und von den Transportunternehmen umzusetzen. Auch sollten fahrerlose Fahrzeuge ausschließlich als BEV zugelassen werden dürfen. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass die fahrerlosen batterieelektrischen Fahrzeuge keine THG-Emissionen (Tank-to-Wheel) verursachen. In beiden Fällen gilt die Politik als impulsgebend, während die fahrzeugherstellenden Unternehmen diese Annahmen umsetzen müssen. Sowohl bei der ersten als auch bei den anderen zwei Annahmen profitiert jeweils die Öffentlichkeit durch eine Reduktion der Umweltbelastungen. Neben den genannten Annahmen ist zu gewährleisten, dass die Anschaffungskosten für BEV die Anschaffungskosten von herkömmlichen, dieselbetriebenen Lkw in Zukunft nicht überschreiten, sodass die Anschaffung der BEV keine zusätzliche Belastung für die Nutzenden darstellt. Als impulsgebend gelten hierbei die Transportunternehmen, die Nutzfahrzeuge kaufen. Die Kostenreduktion ist allerdings von den fahrzeugherstellenden und technologieentwickelnden Unternehmen umzusetzen, sodass die Transportunternehmen letztlich davon profitieren.

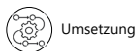
Abbildung 43: Mögliche Gestaltungsoptionen und Annahmen für eine erwünschte Einführung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem und beteiligte Akteure

		Gestaltungsoptionen							
		Dienst-leistende Unternehmen	Transport-unternehmen	Versendende und empfangende Unternehmen	Politik	Öffentlichkeit	Fahrzeug-herstellende Unternehmen	Technologie-entwickelnde Unternehmen	Schulungs-institute
Ökologisch	1	Senkung der Fahrzeugfahrleistung							←
	2	Setzen von Anreize zur Umwandlung von Dieselfahrzeugen in BEV							←
	3	Stärkung der Forschung und Entwicklung wettbewerbsfähiger BEV							←
Ökonomisch	4	Erhöhung der Fahrzeugauslastung							←
	5	Reduktion der Kosten für Ladeinfrastruktur							←
	6	Verzicht auf Infrastrukturtechnologie für fahrerlose Fahrzeuge							←
	7	Reduktion für Kosten für Ausbau und Erhalt							←
	8	Übernahme der Tätigkeiten durch Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe							←
	9	Ausbildung des Personals zur Bedienung von Schnittstellentechnologien							←
Sozial	10	Aus- und Weiterbildung für Personal in der Warenübergabe und Berufskraftfahrende							←

		Annahmen					
		Transport- unternehmen	Versendende und empfangende Unternehmen	Politik	Öffentlichkeit	Fahrzeug- herstellende Unternehmen	Technologie- entwickelnde Unternehmen
Verkehrlich	1	Gleichbleibender Fahrzeugbestand					
Antriebsbezogen	2	Fahrzeuge werden ausschließlich als BEV eingeführt					
	3	BEV verursachen keine THG-Emissionen (TtW)					
	4	Anschaffungskosten für BEV verringern					
Technologisch	5	Verringerter Sicherheitsabstand zwischen fahrerlosen Fahrzeugen					
	6	Gleichmäßiger Verkehrsfluss durch fahrerlose Fahrzeuge					
	7	Keine Verkehrsunfälle durch fahrerlose Fahrzeuge					
Waren- übergabe- bezogen	8	Effiziente Wirkungsweise von Schnittstellentechnologien					



Impuls



Umsetzung



Nutzen

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Der Impuls für die ökonomischen Gestaltungsoptionen geht zum einen von der Politik und zum anderen von den versendenden und empfangenden Unternehmen aus. Die Politik könnte beispielsweise Rahmenbedingungen vorgeben, sodass fahrerlose Fahrzeuge bis zu einem festgelegten Grenzwert ausgelastet sein müssen. Dadurch kann sich die Fahrzeugauslastung insgesamt erhöhen. Diese Rahmenbedingung muss von den dienstleistenden Unternehmen in der Planung der Gütertransporte berücksichtigt und von den Transportunternehmen realisiert werden. Ein Nutzen entsteht hierbei für die Öffentlichkeit, da die zunehmende Fahrzeugauslastung zu weniger eingesetzten Fahrzeugen führen kann, wodurch beispielsweise das Stauaufkommen und die Verkehrsunfälle vermindert werden. Dies erhöhte die Lebensqualität für die Öffentlichkeit. Die Erhöhung der Fahrzeugauslastung wird durch die verkehrliche Annahme des gleichbleibenden Fahrzeugbestandes beeinflusst.

Auch die Gestaltungsoptionen zur Reduktion der Kosten für Ladeinfrastruktur, den Verzicht auf Infrastrukturtechnologie für fahrerlose Fahrzeuge und die Reduktion der Kosten für Ausbau und Erhalt der Infrastruktur sind von der Politik anzustoßen. Die Umsetzung erfolgt durch technologieentwickelnde Unternehmen, die die Ladeinfrastruktur kostengünstiger, fahrerlose Fahrzeuge selbstständiger und infrastruktur-schonender entwickeln. Von der Umsetzung profitiert in erster Linie die Öffentlichkeit aufgrund von Steuervergünstigungen durch verringerte Infrastrukturkosten.

Die Reduktion der Kosten für Ladeinfrastruktur wird begleitet durch die Annahme, dass fahrerlose Fahrzeuge ausschließlich als BEV einzuführen sind. Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass sich die Gestaltungsoption und die Annahmen gegenseitig bedingen. Ohne die Umsetzung von Ladeinfrastruktur können keine BEV genutzt werden, gleichzeitig ist es aus ökonomischer Perspektive erforderlich, die Kosten möglichst gering zu halten, andernfalls werde keine BEV und damit auch keine fahrerlosen Fahrzeuge implementiert. Mit dem Beschluss des Umweltrats der Europäischen Union (EU), dass ab dem Jahr 2035 nur noch batterieelektrische Pkw zugelassen werden dürfen, könnte sich diese Entwicklung auch im Nutzfahrzeugsegment durchsetzen (Die Bundesregierung 2022).

Diese Annahme wird folglich bereits durch die Politik forciert, indem das Inverkehrbringen und den Betrieb von Pkw mit Verbrennungsmotor in Zukunft untersagt wird.

Die Gestaltungsoptionen zum Verzicht auf Infrastrukturtechnologie sowie zur Reduktion der Kosten für Ausbau und Erhalt unterliegen den technologiebezogenen Annahmen. Der verringerte Sicherheitsabstand, der gleichmäßigere Verkehrsfluss und auch die verminderten Kosten sind wichtig zur Umsetzung der Gestaltungsoptionen. Die Impulse für die Annahmen gehen zwar von der Politik aus, umgesetzt werden diese allerdings durch fahrzeugherstellende und technologieentwickelnde Unternehmen, damit die genannten Gestaltungsoptionen greifen können. In beiden Fällen profitiert die Öffentlichkeit von der Umsetzung der Annahmen.

Die innerbetrieblichen Gestaltungsoptionen werden von den versendenden und empfangenden Unternehmen initiiert. Schnittstellentechnologien werden nachgefragt, die effizienter und ohne menschliche Hilfe arbeiten. Außerdem werden Aus- und Weiterbildungsangebote für das Personal zur Umsetzung der Prozesse erforderlich. Die Entwicklung der Schnittstellentechnologien liegt dabei im Umsetzungsbereich der technologieentwickelnden Unternehmen, während die Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen von Schulungsinstituten umgesetzt werden. Einen Nutzen erzielen in beiden Fällen die versendenden und empfangenden Unternehmen, die ihre Mitarbeitenden in höher oder anders qualifizierten Bereichen einsetzen können.

Warenübergabebezogene Annahmen liegen diesen innerbetrieblichen Gestaltungsoptionen zugrunde. Insgesamt ist von einem zurückgehenden Personalbedarf durch das fahrerlose Fahren in der Warenübergabe auszugehen. Außerdem dürfen die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden nicht durch das Personal in der Wareübergabe übernommen werden, da ansonsten der Personalbedarf wieder ansteigt. Auch eine zunehmende Straßentransportnachfrage darf diese Wirkung nicht beeinflussen. Es wird zudem vorausgesetzt, dass die Schnittstellentechnologien vollständig automatisiert sind und damit kein Personal für die Durchführung der Warenübergabe erforderlich wird. Damit liegt die Annahme zugrunde, dass die Schnittstellentechnologien genauso effizient arbeiten, wie ein sich

erhöhender Personalbestand. Wie auch bei den Gestaltungsoptionen geht der Impuls von den versendenden und empfangenden Unternehmen aus und auch diese profitieren von der Umsetzung. Die Umsetzung erfolgt durch die technologieentwickelnden Unternehmen.

Diese Annahme gilt auch für die sozialen Gestaltungsoptionen. Der Impuls für die soziale Gestaltungsoption geht von den versendenden und empfangenden sowie von den Transportunternehmen aus. Diese benötigen weniger Personal, sodass der Personalbedarf zurückgeht. Um die potenzielle Arbeitslosigkeit zu reduzieren, werden Schulungsinstitute erforderlich, die Aus- und Weiterbildungsprogramme für Personal der Warenübergabe und Berufskraftfahrende anbieten. Die Öffentlichkeit profitiert von dieser Maßnahme, indem neue Berufschancen ermöglicht werden.

Weitere Implikationen können aus der Einführung fahrerloser Fahrzeuge folgen, die über das in dieser Arbeit betrachtete System hinausgehen. Beispielsweise wird der Stellplatzbedarf für Lkw durch die Einführung des fahrerlosen Fahrens deutlich reduziert. Daraus kann eine Abnahme von weiteren Infrastruktureinrichtungen, wie Raststätten, resultieren, da diese nicht länger von Berufskraftfahrenden genutzt werden. Dies führt dazu, dass weitere Gestaltungen abgeleitet werden können, wie zum Beispiel die Förderung von Renaturierungs- oder Umgestaltungsmaßnahmen für ungenutzte Stellplatzflächen.

Insgesamt wird deutlich, dass die Politik bei der Einführung des fahrerlosen Fahrens über die Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Implementierung diskutieren sollte, damit die umsetzenden Unternehmen und Institutionen Leitlinien erhalten und unerwünschte Wirkungen vermieden werden. Deutlich wird zudem, dass herstellende und technologieentwickelnde Unternehmen sichere, bedienungsfreundliche, kostengünstige und funktionsfähige Technologien bereitstellen müssen, um das fahrerlose Fahren einzuführen. Diese Arbeit leistet damit einen Beitrag nicht nur das Verständnis für potenzielle Veränderungen im Logistiksystem zu stärken, sondern auch für eine spezifische Ansprache der relevanten Akteure im Veränderungsprozess.

10 Schlussbetrachtung

Dem fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr werden hohe Optimierungspotenziale für die Logistikbranche zugeschrieben, für die es bisher in der wissenschaftlichen Literatur keine profunden Belege gibt. Insbesondere die Wirkungen, die mit der Einführung dieser Technologie im Logistiksystem zu erwarten sind, wurden bislang kaum berücksichtigt. Diese Arbeit schließt diese Lücke durch eine ganzheitliche Wirkungsabschätzung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst sowie deren Limitationen diskutiert und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

10.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystems zu verstehen, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren. Aus der Perspektive einer nachhaltigen Entwicklung bedeutet dies beispielsweise, dass durch das fahrerlose Fahren die einzel- und gesamtwirtschaftlichen Kosten reduziert, die transportbedingten Luftemissionen gesenkt sowie die Beschäftigungssituation in Anzahl und Qualifikation verbessert wird. Als Ergebnis dieser Arbeit liegen Handlungsoptionen für eine zukunftsfähige Gestaltung des Logistiksystems mit fahrerlos fahrenden Lkw (40 t zGG) und Sattelzugmaschinen vor. Die Arbeit leistet somit einen Beitrag auf dem Gebiet der Zukunftsforschung sowie dem Verständnis der Wirkungen, die von der Einführung dieser neuen Technologie im Logistiksystem zu erwarten sind.

Die Beschreibung der Grundlagen des Forschungsgegenstands – dem fahrerlosen Fahren im Straßengüterverkehr – in Kapitel 2 veranschaulicht, dass die Entwicklungen des fahrerlosen Fahrens bislang nicht abgeschlossen sind. Bis zum Jahr 2022 ist das fahrerlose Fahren nur in Pilotprojekten umgesetzt, wie die Einordnung in den historischen Kontext verdeutlicht. Das Gesetz zum autonomen Fahren, das im Jahr 2021 durch

den Bundestag verabschiedet wurde, ebnet den Weg hin zu einem fahrerlosen Fahren.

In der Arbeit wird festgestellt, dass die bestehenden Begriffsbestimmungen bislang Fahrzeuge unabhängig ihres Einsatzes im Personen- oder Güterverkehr betrachten. Im Güterverkehr stellen die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden einen essentiellen Beitrag zum physischen Transport von Gütern vom versendenden zum empfangenden Unternehmen dar, sodass eine Erweiterung der Definition des fahrerlosen Fahrens um die Tätigkeiten der Berufskraftfahrenden erforderlich wird (siehe auch Flämig 2015). Das fahrerlose Fahren im Straßengüterverkehr wird in dieser Arbeit wie folgt definiert:

Berufskraftfahrende sind während der fahrerlosen Fahrt nicht länger im Fahrzeug anwesend. Eine natürliche Person hat während der gesamten Fahrt die Navigationsebene in Form einer technischen Aufsicht zu übernehmen. Fahraufgaben auf der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene werden durch das Fahrzeugsystem übernommen. Alle anderen Fahraufgaben und Tätigkeiten, die für den physischen Transport eines Gutes erforderlich sind, werden entweder durch das Fahrzeugsystem oder durch Dritte übernommen.

Zur Ermittlung des aktuellen Forschungsstands zum fahrerlosen Fahren und zur Identifizierung der Forschungslücke wird zunächst eine systematische Literaturanalyse und darauf aufbauend eine Literaturanalyse ausgewählter Veröffentlichungen genutzt (siehe Kapitel 3). Die Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse zum aktuellen Forschungsstand machen deutlich, dass die Forschung sich bislang fast ausschließlich auf Wirkungen des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Personenverkehr fokussiert. Das fahrerlose Fahren im Güterverkehr wird vermehrt ab den 2000er Jahren thematisiert, wobei der Fokus der Veröffentlichungen auf der Technologie des Platooning liegt. Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass die Wirkungen und Wirkungszusammenhänge in der Regel qualitativ mithilfe von Kausaldiagrammen visualisiert werden. Dabei beschränken sich die Wirkungen auf das Transport-

system sowie die urbane Landnutzung. Die ganzheitliche Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem fehlt in der Literatur bislang.

Im Rahmen der weiterführenden Literaturanalyse werden 31 Artikel vollständig ausgewertet. Als Ergebnis liegen 53 nichttechnische Aspekte des automatisierten und fahrerlosen Fahrens im Straßengüterverkehr vor und eine Erläuterung, wie diese methodisch ermittelt wurden. Auf dieser Grundlage werden drei Forschungsfragen für diese Arbeit abgeleitet:

1. *Anhand welcher Elemente lässt sich das straßengebundene Logistiksystem beschreiben?*
2. *Welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem werden erwartet?*
3. *Welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren?*

Zur Beantwortung der Forschungsfragen bietet die Methode »System Dynamics« (SD) die Grundlage für eine ganzheitliche Auseinandersetzung mit potenziellen Entwicklungen eines realen Systems in der Zukunft. Das Sensitivitätsmodell und der Papiercomputer nach Vester (1990) dienen dabei der Entwicklung des SD-Modells im Rahmen dieser Arbeit. Hierbei wird einem dreistufigen Modellansatz bestehend aus Wortmodell, qualitativem und quantitativem Zukunftsmodell sowie einem ökonomischen, einem ökologischen sowie einem sozialen Gestaltungsmodell gefolgt. Ein eigens entwickeltes Simulationsmodell mithilfe der Software Vensim quantifiziert die potenziellen Wirkungen.

Zur Identifizierung und Analyse der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem ist es zunächst erforderlich, das Logistiksystem zu definieren und seine Elemente zu ermitteln. In dieser Arbeit wird anhand von bestehenden Systemmodellen aus der verkehrsplanerischen Perspektive sowie der prozessualen Gestaltung der Logistikkette aus der unternehmerischen Sicht ein straßengebundenes Logistiksystem aufgestellt. Das definierte Logistiksystem ist angelehnt an das Systemmodell nach Sjöstedt (1996), erweitert durch Flämig et al. (2002), und umfasst die fünf Elemente »Güter«, »Mobilien«, »Infrastruktur«, »Einrichtungen« und

»Aktivitäten« sowie die verbindenden Prozesse »Transport«, »Verkehr«, »Umschlag und Lagerung« sowie »Wareneingang und Warenausgang«. Darüber hinaus können die Elemente des Logistiksystems den verantwortlichen Akteuren zugeordnet werden. In dieser Arbeit wird erstmalig ein Logistiksystem formuliert, das nicht nur die verkehrsplanerische, sondern auch die unternehmerische Perspektive vereint. Das entwickelte Logistiksystem dient im Weiteren als Grundlage für die Anwendung des dreistufigen Modellansatzes in dieser Arbeit.

Das erste Modell bildet das Wortmodell des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem. Angelehnt an das Vorgehen nach Vester (1990) wird zunächst ein Systembild in Form einer Beschreibung einer zukünftigen Welt des fahrerlosen Fahrens erstellt. Gemeinsam mit den 53 ermittelten nicht-technischen Aspekte aus der Literaturanalyse werden 18 Variablen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem abgeleitet. Die identifizierten Variablen werden im Weiteren auf das Logistiksystem übertragen und anhand von Subsystemen aus der Akteursperspektive strukturiert (siehe Abbildung 15, S. 120). Die relevanten Subsysteme, die aus mehreren Variablen bestehen, bilden die »Logistikleistung«, als Inputgrößen, »Transport« und »Warenübergabe«, als Prozesse im Logistiksystem, sowie die »Verkehrsleistung«, als relevante Outputgrößen ab. Die einzelnen Subsysteme sowie die jeweiligen Variablen mit Definition, Indikator und externem Einfluss werden vorgestellt, sodass ein Variablensatz entwickelt ist, der die Grundlage für die qualitative und quantitative Analyse der Wirkungen bildet. Der Variablensatz wird mittels der Kriterienmatrix nach Vester (1990) auf Vollständigkeit überprüft.

Im zweiten Teil des Modellansatzes dieser Arbeit werden zunächst ein qualitatives und anschließend ein quantitatives Zukunftsmodell entwickelt. Im qualitativen Zukunftsmodell werden die Wirkungen der 18 Variablen basierend der bestehenden Literatur diskutiert und hinsichtlich ihrer Richtung der Wirkungsbeziehung und Wirkungsintensität bewertet. Darauf aufbauend erfolgt die Einordnung der Wirkungen in die Einflussmatrix nach Vester (1990), die das Wirkungsgefüge zusammenfasst. Anhand der Einflussmatrix werden zum einen die Rollen der Variablen und zum anderen die Wirkungsgefüge ermittelt. Für eine Gestaltung des Logistiksystems mit fahrerlosen Fahrzeugen sind diese zwei Faktoren zu

berücksichtigen, um Veränderungen gezielt und in erwünschter Weise zu beeinflussen.

Basierend auf der Einflussmatrix nach Vester (1990) erfolgt die Auswertung der qualitativen Wirkungen und Wirkungsbeziehungen. Zunächst wird ein ganzheitliches Kausaldiagramm der Wirkungen im Logistiksystem mit dem fahrerlosen Fahren erstellt. Anschließend erfolgte die Betrachtung auf Subsystemebene. Die Analyse der Wirkungen zeigt, dass im Logistiksystem Rückkopplungsschleifen zwischen den Variablen bestehen. Hierbei werden 17 negative und 19 positive Rückkopplungsschleifen ermittelt. Diese Rückkopplungsschleifen sind besonders beachtenswert, da sie das System entweder stabilisieren oder destabilisieren können. Das qualitative Zukunftsmodell (siehe Kapitel 7) leistet damit einen wesentlichen Beitrag zum Offenlegen und zum Verständnis der Wirkungen zwischen den Variablen des Logistiksystems und dem fahrerlosen Fahren, die dadurch ganzheitlich aufgezeigt werden.

Zur Ermittlung der potenziellen quantitativen Wirkungen wird das qualitative Zukunftsmodell genutzt, in einen zeitlichen Kontext eingeordnet und in ein Simulationsmodell als quantitatives Zukunftsmodell überführt (siehe Kapitel 8). Das entwickelte systemdynamische Simulationsmodell ist in der Lage, die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem ganzheitlich zu quantifizieren. Dies stellt eine wissenschaftliche Neuerung zu den bisher meist qualitativ umgesetzten Methoden zur Ermittlung einzelner Wirkungen dar. Das Modell bildet dabei nicht nur die Wirkungsbeziehungen, sondern auch die Stärke der Wirkung, die Richtung der Wirkungsbeziehung und alle enthaltenen Rückkopplungsschleifen im Gesamtsystem ab.

Eingeteilt in drei Zeitintervalle werden Wirkungen im Jahr 10, im Jahr 20 und im Jahr 30 als Trendabschätzungen nach dem Jahr der Einführung ermittelt. Als Bezugsjahr dient das Jahr 2019, obwohl zu diesem Zeitpunkt die Einführung fahrerlose Straßenfahrzeuge rechtlich noch nicht möglich war. Das Jahr 2019 wurde als Bezugsjahr ausgewählt, da hierzu eine vollständige und durch die Covid-19-Pandemie, den Ukrainekrieg und die hohe Inflation unverzerrte Datengrundlage vorliegt. Unter Berücksichtigung der Annahmen und Limitationen eines solchen Simulationsmodells werden die Ergebnisse ausgewertet.

Es zeigt sich, dass sich die Variablen in den ersten 10 Jahren nur sehr geringfügig verändern, nach 20 Jahren ist die steigende oder sinkende Trendentwicklung sehr stark ausgeprägt, welche bis zum Jahr 30 wieder stagniert. Diese Entwicklung basiert auf dem zuvor festgelegten Kurvenverlauf der Variable »Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge«. Basierend auf den zugrundeliegenden Annahmen des Simulationsmodells können die Veränderungen der einzelnen Variablen ausgehend vom Basisjahr 2019 quantifiziert werden. Damit wird die zweite Forschungsfrage – *welche Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem sind zu erwarten* – nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ beantwortet.

Anhand der drei Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung zeigt sich, dass das fahrerlose Fahren zu ökologisch, ökonomisch und sozial unerwünschten Trendentwicklungen führen kann. Unerwünschte Entwicklungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem stellen aus ökologischer Perspektive die zunehmende Fahrzeugfahrleistung, aus ökonomischer Perspektive die abnehmende Fahrzeugauslastung, die steigenden Kosten in der Warenübergabe sowie die zunehmenden Infrastrukturkosten sowie aus sozialer Perspektive der verringerte Personalbedarf in der Warenübergabe und die abnehmende Anzahl an Berufskraftfahrenden dar.

Zur Beantwortung der letzten Forschungsfrage – *welche Gestaltungsoptionen können abgeleitet werden, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren* – dient eine Szenariobetrachtung von drei Gestaltungsmodellen – einem ökologischen, einem ökonomischen und einem sozialen Modell. Die identifizierten unerwünschten Wirkungen auf die Fahrzeugfahrleistung, die Fahrzeugauslastung, die Kosten für die Warenübergabe sowie die Infrastrukturkosten werden mithilfe des quantitativen Simulationsmodells gestaltet und unter der Berücksichtigung veränderter Variablen diskutiert (siehe Kapitel 9). Die Gestaltungsmodelle zeigen dabei, welche Wirkungen durch die Anpassung einer oder mehrerer Variablen im System entstehen können. Diese Veränderungen, insbesondere aufgrund der Vielzahl an Verbindungen und Rückkopplungsschleifen, sind durch ein rein qualitatives Modell nicht identifizierbar, weshalb das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell sowie die Gestaltungsmodelle einen wichtigen Beitrag liefern, die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem in ihrer Gesamtheit zu verstehen. Die Modellierung

ausgewählter Variablen führt zu einem kombinierten Szenario aus ökologischen und ökonomischen Gestaltungsoptionen, das eine Reduzierung unerwünschter Wirkungen durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem zur Folge hat. Mithilfe des kombinierten Szenarios konnten zudem einige der sozialen Wirkungen ebenfalls verbessert werden. Lediglich der Rückgang des Personals konnte mithilfe des Simulationsmodells nicht wünschenswert beeinflusst werden, da der Wegfall der Berufskraftfahrenden eine unvermeidliche Folge des fahrerlosen Fahrens darstellt. Um diese Wirkung allerdings wünschenswert zu beeinflussen, wurden neben den ökologischen und ökonomischen Optionen auch soziale Gestaltungsoptionen beschrieben. Die Anpassungen im Gestaltungsmodell sowie Annahmen aus dem qualitativen Zukunftsmodell führen zur Ableitung von 10 Gestaltungsoptionen in dieser Arbeit.

Im Simulationsmodell wurden die Richtung der Wirkungsbeziehung der Marktdurchdringung auf die Fahrzeugfahrleistung und den Personalbedarf zur Be- und Entladung (von gleichgerichtet auf entgegengerichtet) sowie auf die Fahrzeugauslastung (von entgegengerichtet auf gleichgerichtet) angepasst. Außerdem wirken die Berufskraftfahrenden im Gestaltungsmodell gleichgerichtet auf das Personal zur Be- und Entladung. Die Straßentransportnachfrage wirkt dagegen entgegengerichtet auf den Personalbedarf zur Be- und Entladung. Darüber hinaus wurden die Kosten für Vernetzungstechnologie mit Null angenommen. Grundsätzliche Annahmen, die sowohl für das quantitative Zukunftsmodell als auch die Gestaltungsmodelle gelten, lauten:

- Gleichbleibender Fahrzeugbestand
- Fahrzeuge ausschließlich als BEV eingeführt
- Fahrzeuge verursachen keine THG-Emissionen (TtW)
- Anschaffungskosten für BEV langfristig unter denen von Dieselfahrzeugen
- Effiziente Wirkungsweise von Schnittstellentechnologien
- Verringerter Sicherheitsabstand zwischen fahrerlosen Fahrzeugen
- Gleichmäßiger Verkehrsfluss durch fahrerlose Fahrzeuge
- Keine Verkehrsunfälle durch fahrerlose Fahrzeuge

Auf dieser Grundlage wurden die folgenden Gestaltungsoptionen in dieser Arbeit abgeleitet, die zu einer ökologisch verträglicheren Einführung des fahrerlosen Fahrens beitragen können:

- Die Senkung der Fahrzeugfahrleistung
- Das Setzen von Anreizen zur Umwandlung von Dieselfahrzeugen in BEV
- Die Stärkung der Forschung und Entwicklung wettbewerbsfähiger BEV

Zu den ökonomischen Gestaltungsoptionen zählen:

- Die Erhöhung der Fahrzeugauslastung
- Die Übernahme der Tätigkeiten durch Schnittstellentechnologien in der Warenübergabe
- Die Ausbildung des Personals zur Bedienung der Schnittstellentechnologien
- Die Reduktion der Kosten für Ladeinfrastruktur
- Der Verzicht auf Infrastrukturtechnologien für fahrerlose Fahrzeuge
- Die Reduktion der Kosten für Ausbau und Erhalt

Um den bereits beschriebenen Wegfall der Arbeitsplätze im Logistiksystem aufzufangen, ist die folgende soziale Gestaltungsoption zu nennen:

- Die Aus- und Weiterbildung für Personal in der Warenübergabe und Berufskraftfahrende

Diese Gestaltungsoptionen werden hinsichtlich der impulsgebenden, umsetzenden und nutzengewinnenden Akteure eingeteilt (siehe Abbildung 43, S. 254). Die Einteilung der Gestaltungsoptionen hinsichtlich der beteiligten Gruppen dient der akteursspezifischen Ansprache im Veränderungsprozess. Neben den bereits aufgeführten Akteuren – dienstleistende Unternehmen, Transportunternehmen, versendende und empfangende Unternehmen, Politik und Öffentlichkeit – sind weitere Akteure für eine erwünschte Einführung zu berücksichtigen. Dazu gehören die herstellenden Unternehmen, die technologieentwickelnden Unternehmen sowie die Schulungsinstitute. Deutlich wird, dass die Politik für die meisten Gestaltungsoptionen den Impuls geben muss, damit die umsetzenden Akteure die Gestaltungsoptionen durchführen können. In der Regel profitiert die Öffentlichkeit aufgrund von verringerten Umweltwirkungen.

10.2 Limitationen der Arbeit

Das fahrerlose Fahren als Zukunftsforschung ist mit Unsicherheiten belegt und unterliegt nicht zuletzt dadurch unterschiedlichen Limitationen.

Empirische Grundlagen für die Untersuchung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem sind zum aktuellen Zeitpunkt kaum vorhanden. Das fahrerlose Fahren mit Straßengüterfahrzeugen ist bislang nur in geschlossenen Bereichen (z. B. in Minen) oder in Pilotprojekten (z. B. Hafenumfuhren) implementiert. Reale Daten zu fahrerlosen Straßengüterfahrzeugen und dessen Wirkungen fehlen daher fast vollständig. Die empirische Grundlage dieser Arbeit bilden aus diesem Grund eine systematische Literaturanalyse und ein Workshop mit Fachkundigen. Die Literaturlauswertung ausgewählter Publikationen mit dem Fokus auf den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens von schweren Nutzfahrzeugen und Sattelzugmaschinen im Güterverkehr zeigt, dass diese größtenteils auf theoretischen Ableitungen und Überlegungen beruhen. Darüber hinaus wurden in der vorliegenden Arbeit nur frei zugängliche Publikationen berücksichtigt, sodass Forschungsarbeiten und Artikel, die nicht Open-Access waren, nicht in die Auswertung einfließen. Auch interne Forschungsarbeiten von herstellenden oder technologieentwickelnden Unternehmen wurden nicht in die Auswertung integriert. Vor diesem Hintergrund spiegelt diese Arbeit zwar den aktuellen wissenschaftlichen Forschungsstand zu möglichen Wirkungen des fahrerlosen Fahrens wider. Aspekte, die sich insbesondere aus der Technologieentwicklung ergeben, sind ggf. weniger berücksichtigt und in die eigenen Analysen eingeflossen.

Die unvollständige und unsichere Datengrundlage lässt keine exakte Prognose der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem mithilfe eines Prognosemodells zu. Das wäre in der hier vorliegenden Zukunftsforschung auch nicht möglich. Alternativ beruht das gewählte Vorgehen auf einem dreistufigen Modellansatz:

Im ersten Modell, dem Wortmodell, wurde ein Variablensatz definiert, der diejenigen Variablen umfasst, die durch das fahrerlose Fahren im Logistiksystem beeinflusst werden.

Im zweiten Modell, dem qualitativen Zukunftsmodell, wurde auf dieser Grundlage eine Einflussmatrix erstellt, mithilfe derer das Wirkungsgefüge im System ermittelt werden konnte. Die Einflussmatrix beruht auf einer Literaturrecherche ausgewählter Publikationen der letzten 20 Jahre, einem Expertenworkshop und eigenen Ableitungen. Anhand der Ergebnisse wurde ein Kausaldiagramm erstellt. Es ist allerdings denkbar, dass das fahrerlose Fahren weitere Variablen des Logistiksystems beeinflusst, diese konnten jedoch nicht belegt werden.

Das quantitative Zukunftsmodell ist ein Simulationsmodell. Simulationsmodelle sind eine vereinfachte Darstellung des realen Systems, die auf Annahmen beruht und das Ergebnis maßgeblich bestimmen. Zudem ist im Simulationsmodell eine S-förmige Entwicklung der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge als Grundannahme integriert. Dabei ist in den ersten 10 Jahren nur eine marginale Veränderung zu beobachten, während zwischen den Jahren 11 und 20 ein Zuwachs von über 80 % der Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge hinterlegt ist. Diese Entwicklung ist fiktiv und an den typischen Produktlebenszyklus nach Vernon (1966, S. 199) sowie Trendabschätzungen aus der Literatur (vergleiche Ginsburg und Uygur 2017, S. 6; Krail et al. 2019, S. 106) angelehnt.

Die Erforschung einer zukünftigen Entwicklung ist stets mit unbekanntem Einflüssen verbunden. Dies wird beispielsweise durch die Covid-19-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 sowie die Ukraine Krise und die zunehmende Inflation im Jahr 2022 besonders deutlich. Diese disruptiven Veränderungen bleiben in der Arbeit unberücksichtigt. Eine weitere Limitation im Simulationsmodell ist daher die Nutzung des Jahres 2019 als Basisjahr. Die Werte der Folgejahre 2020 bis 2022 haben sich aufgrund der Covid-19-Pandemie, der Ukraine Krise und steigenden Inflationsrate unvorhersehbar entwickelt und wurden nicht in die Simulation integriert. Vergangenheitswerte wurden aufgrund der Unsicherheiten nicht fortgeschrieben. Eine Veränderung der betrachteten Variablen wird daher stets in Verhältnis zum Basisjahr 2019 gesetzt. Dieser gewählte Betrachtungszeitpunkt des Modells und auch die Exklusion von weiteren externen Einflüssen, wie politischen Steuerungsmechanismen, müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Weitere Limitationen des Simulationsmodells sind in Abschnitt 8.1.3 beschrieben.

Bei der Auswertung der Daten des Simulationsmodells wird deutlich, dass Variablen sich gegenseitig beeinflusst haben. Dies ist zwar Teil der Systemdynamik des Simulationsmodells, zeigt aber Lücken auf. Am Beispiel der Berufskraftfahrenden wird beispielsweise deutlich, dass trotz einer Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge von 90 % die Anzahl an Berufskraftfahrenden nicht um 90 % zurückging. Als logische Schlussfolgerung hätte dieser Effekt eintreffen müssen, da ein fahrerloses Fahrzeug einen Berufskraftfahrenden ersetzt. Bei der Entwicklung des Simulationsmodells lag der Fokus allerdings nicht auf realistischen Werteentwicklungen, sondern vielmehr auf dem Verständnis der Wirkungen im System. Eine Variable wird dabei nicht nur durch eine andere beeinflusst, sondern steht in Beziehung mit mehreren Variablen. Die Variable »Berufskraftfahrende« wird nicht nur durch das fahrerlose Fahren verändert, sondern auch durch Variablen wie »Fahrzeugfahrleistung« und »Straßentransportnachfrage«, die die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens abschwächen. Insgesamt treten im Simulationsmodell über 32.000 Rückkopplungsschleifen auf. Der Fokus und die Komplexität eines solchen Simulationsmodells ist daher bei der Beurteilung der Daten zu berücksichtigen.

10.3 Weiterer Forschungsbedarf

Das fahrerlose Fahren im Straßengüterverkehr ist ein bislang junges Forschungsfeld und die wissenschaftlichen Erkenntnisse stehen noch am Anfang. Die vorliegende Arbeit liefert einen weiterführenden Beitrag, schafft es aber nicht, das Forschungsfeld vollumfänglich zu untersuchen. Begründet ist dies insbesondere in den vielen Unsicherheiten zukünftiger Entwicklungen, denen ein derartiges sozioökonomisches System ausgesetzt ist. Die Arbeit liefert eine mögliche Trendabschätzung der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem, kann und will diese nicht exakt prognostizieren.

Die Eingrenzung auf das Logistiksystem wurde vorgenommen, da das Logistiksystem selbst und die Einflüsse des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem als ganzheitliche Betrachtung in der bestehenden

Literatur bislang fehlten. Diese Systemgrenzen führen allerdings dazu, dass Annahmen getroffen werden müssen, durch die Ergebnisse der Arbeit maßgeblich beeinflusst werden. Vor diesem Hintergrund sollten zukünftige Forschungen weitere Entwicklungsalternativen der Zukunft berücksichtigen.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf den Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Schwerlast- und Fernverkehr. Die Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem des Nahverkehrs und mit kleinen Nutzfahrzeugen < 3,5 t zGG bleiben in dieser Arbeit unberücksichtigt, gleichwohl die Annahme plausibel erscheint, dass auch dieses Logistiksystem durch das fahrerlose Fahren beeinflusst wird. Allerdings sind im urbanen Raum Transportunternehmen mit stärker wechselnden Umgebungsbedingungen, beispielsweise bei der Warenübergabe zum Einzelhandel, Hotels oder der Gastronomie, konfrontiert, die beispielsweise eine nicht- bzw. schwer zu standardisierende und damit nicht automatisierte Be- und Entladung bedingen. Die Technik des fahrerlosen Fahrens ist allerdings zum heutigen Zeitpunkt auf ein gleichbleibendes Umfeld ausgelegt. Technologische Lösungen für diese vielfältigen Einsatzbereiche und deren Wirkungen sind spannende Felder zukünftiger Forschungsaktivitäten.

Weiterer Forschungsbedarf liegt zudem in der begrifflichen Abgrenzung des fahrerlosen Fahrens. Mit Verabschiedung des Gesetzes zum autonomen Fahren im Jahr 2021 wurde deutlich, dass eine begriffliche eindeutige Unterscheidung des assistierten, automatisierten, fahrerlosen und autonomen Fahrens bis heute fehlt. Zudem umfasst das Gesetz zum autonomen Fahren nur das fahrerlose Fahren. Das autonome Fahren, bei dem es keinerlei Eingriffe von außen bedarf, ist bislang nicht durch dieses Gesetz legitimiert. Zwar versuchte die Bundesanstalt für Straßenwesen mit ihrer Neudefinition der Automatisierungsstufen im Jahr 2021 eine Eindeutigkeit herzustellen, es zeigt sich aber, dass eine Verfeinerung in Personen- und Güterverkehr sinnvoll ist; insbesondere unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzenpotenziale.

Die fehlende Unterscheidung zwischen den Definitionen des fahrerlosen Fahrens im Güterverkehr und im Personenverkehr lässt wesentliche Aspekte außeracht. Der physische Transport von Gütern macht nicht nur

die reine Fahrtätigkeit erforderlich, sondern auch weiterführende Tätigkeiten, wie die Be- und Entladung von Gütern sowie die Transportsicherung (siehe auch Flämig 2015; Flämig et al. 2020). Eine Unterscheidung zwischen dem Personen- und Güterverkehr wird daher auch mit zunehmender Entwicklung und Einführung in den Realbetrieb von fahrerlosen Fahrzeugen relevant. Neue logistische Lösungen müssen gefunden werden, um einen fahrerlosen Transport im Güterverkehr überhaupt abbilden zu können.

Die durchgeführte Literaturanalyse ergab 53 nichttechnische Aspekte des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem. Die Literaturanalyse zeigte allerdings, dass die Forschung bislang am Anfang steht und daher weitere Wirkungen potenziell möglich sind. Empirische Untersuchungen des fahrerlosen Fahrens im Güterverkehr durch den Einsatz der Fahrzeuge im Realbetrieb können weitere bzw. präzisere Wirkungsabschätzungen ermöglichen. Mit der Verabschiedung des Gesetzes zum autonomen Fahren im Jahr 2021 wird es in Zukunft möglich sein, fahrerloses Fahren in zugelassenen Bereichen (»Operational Design Domains«) im Realbetrieb zu erproben. Dies bietet die Möglichkeit, die Wirkungen, die im Rahmen dieser Arbeit zunächst nur basierend auf der vorhandenen Literatur ermittelt wurden, in Zukunft als Realdaten zu erheben und damit empirisch zu belegen. Diese Daten könnten in das hier entwickelte Simulationsmodell integriert werden und zu neuen Ableitungen führen.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich auch aus der Anwendung des Simulationsmodells selbst. Dieses ist mit Daten des Jahres 2019 hinterlegt, gleichzeitig wurden aber auch unterschiedliche Annahmen in das Simulationsmodell integriert. Dabei wurden die Wirkungen in Form von prozentualen Veränderungen, ausgelöst durch das fahrerlose Fahren, angenommen und auf die einzelnen Variablen übertragen. Es ist allerdings auch möglich, mit prognostizierten Veränderungen zu arbeiten. Für eine Weiterentwicklung des Simulationsmodells ist die Anpassung des Dateninputs denkbar, sodass statt prozentualer Veränderungen extrapolierte Daten integriert werden. Auch der Vergleich zum Basisjahr 2019 über den kompletten Untersuchungszeitraum entspricht nicht der Realität und könnte zur Erweiterung des Simulationsmodells durch eine Trendextrapolation gestärkt werden. Möglich ist zudem die Integration externer Einflüsse, wie politische Steuerungsmechanismen.

Darüber hinaus betrachtet das entwickelte Simulationsmodell ausschließlich die Veränderungen des fahrerlosen Fahrens. Die aktuelle Entwicklung zeigt jedoch, dass dem fahrerlosen Fahren weitere Automatisierungsstufen vorangehen. Für eine Erweiterung der Ergebnisse könnten die vorgelagerten Automatisierungsstufen in das Simulationsmodell integriert werden, sodass auch die verschiedenen Wirkungen der einzelnen Automatisierungsstufen im Logistiksystem herausgearbeitet werden. Im Fall der Berufskraftfahrenden würde das bedeuten, dass in den ersten Automatisierungsstufen noch kein Wegfall dieser Arbeitsplätze eintritt, erst mit der letzten Stufe würde die Anzahl der Berufskraftfahrenden signifikant sinken. Für die jeweilige Automatisierungsstufe müssten folglich Annahmen zu den Veränderungen getroffen und im Simulationsmodell hinterlegt werden. Es könnte sich anschließend eine Entwicklung der Variablen unter Einfluss aller Automatisierungsstufen über den Zeitverlauf abbilden lassen.

Die auf Grundlage des quantitativen Zukunftsmodells und von Szenariountersuchungen abgeleiteten Gestaltungsoptionen sind nicht final, sondern legen mögliche weitere Forschungsbedarfe auch hinsichtlich der realen Umsetzung offen. Die Arbeit liefert folglich ein Verständnis der Wirkungen des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem und motiviert im Idealfall die Umsetzungsakteure, die vorgeschlagenen Gestaltungsoptionen zu prüfen und ggf. die Forschung in diesem Bereich zu vertiefen, um eine Implementierung des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu ermöglichen, die auf Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft überwiegend positiv wirkt.

11 Literaturverzeichnis

- Abbott, John D.; Gaffar, Ashraf; Bisht, Manju (2017): Autonomous trucking: The interplay between design and business constraints. In: *2017 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computed, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*. S. 1–5.
- Alam, Assad; Besselink, Bart; Turri, Valerio; Martensson, Jonas; Johansson, Karl H. (2015): Heavy-Duty Vehicle Platooning for Heavy-Duty Vehicle Platooning for Sustainable Freight Transportation. A cooperative method to enhance safety and efficiency. In: *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, 2015, S. 34–56.
- Alkin, Tom; van Vliet, Arjan; Aarts, Loes; Eckhardt, Jacqueline (2016): European Truck Platooning Challenge 2016. Creating next generation mobility.
- Ancra Systems BV (2010): Automatische LKW-Verladesysteme.
- Bansal, Prateek; Kockelmann, Kara (2017): Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. In: *Transportation Research Part A* (95), S. 49–63.
- Bauprüfdienst (BPD) 6/1998, 1998: Bauliche Anforderungen an Stellplätze und Garagen (BPD Garagen).
- Bertalanffy, Ludwig von (Hg.) (1972): Vorläufer und Begründer der Systemtheorie. Berlin: Colloquium Verlag Otto H. Hess (12).
- Bertrandt (2018): Bertrandt präsentiert Ergebnisse aus Forschungsplattform EMIL. »Dem Ziel autonomes Fahren wieder ein Stück näher gekommen«. Regensburg. Nonnenmacher, Julia.
- Bieber, Daniel; Deiß, Manfred (2000): Schnittstellenoptimierung in der Distributionslogistik: innovative Dienstleistungen in der Wertschöpfungskette; Dokumentation zur Abschlußkonferenz am 04.05.2000 in Köln. Hg. v. Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V. ISF München. Berlin. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-99931>, zuletzt geprüft am 06.09.2022.

- Bossel, Hartmut (1992): Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; ein Lehr- und Arbeitsbuch mit Simulations-Software. Braunschweig: Vieweg.
- Bossel, Hartmut (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand.
- Böttcher AG (Hg.) (2022): Wallbox-Chargers Wallbox Commander 2, schwarz, Typ 2, 22 kW, RFID, App-fähig, Kabel 5 m – Böttcher AG. Bueromarkt-ag.de. Online verfügbar unter https://www.bueromarkt-ag.de/wallbox_wallbox-chargers_commander_2_schwarz,p-681305,l-google-css,pd-b2c.html?gclid=CjoKCQjwj7CZBhDHARIsAPPWv3cqCMeUmduKdQZVGoT_lyRdDQOQB-k2znKiL8_5bxH6p8WaoXp_jesaAiKNEALw_wcB, zuletzt geprüft am 22.09.2022.
- Bracy, Jill M. Bernard; Bao, Ken; Mundy; Ray A. (2018): Paving the Way for Autonomous and Connected Vehicle Technologies in the Motor Carrier Industry. University of Missouri-St. Louis. St. Louis, MO, USA.
- Bruckmann, Gerhart (1977): Aufgaben, Möglichkeiten und Grenzen der Langfristprognostik. In: Gerhart Bruckmann und Rudolf Avenhaus (Hg.): Langfristige Prognosen. Möglichkeiten und Methoden der Langfristprognostik komplexer Systeme. 2., durchges. Aufl. Würzburg: Physica-Verl., S. 9–26.
- Bundesagentur für Arbeit Statistik (Hg.) (2020): Tabellen, Beschäftigte nach Berufen (KldB 2010) (Quartalszahlen). Nürnberg.
- Bundesamt für Güterverkehr (Hg.) (2018): Marktbeobachtung Güterverkehr. Abläufe an den Laderampen verbessern Ergebnisse einer Befragung von Kraftfahrern und Rampenbetreibern. Köln.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.) (2021a): Selbstfahrende Autos – assistiert, automatisiert oder autonom? Nr. 06/2021. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Presse/Mitteilungen/2021/06-2021.html, zuletzt geprüft am 06.08.2021.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.) (2021b): Verkehrs- und Unfalldaten. Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland. Bergisch Gladbach.

- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hg.) (2021): Ministerium startet Förderung für mehr Lkw-Parkplätze. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/neuefoerderung-lkw-parkplaetze.html>, zuletzt geprüft am 17.11.2022.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2017a): Digitales Testfeld Autobahn. Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2017b): Ethik Kommission. Automatisiertes und vernetztes Fahren.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2019a): Infrastruktur. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/infrastruktur-statistik.html>, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2019b): Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2017.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2020): Investitionen. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/investitionen-statistik.html>, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hg.) (2021): Deutschland wird international die Nummer 1 beim autonomen Fahren. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.
- Bundestag (21.09.1977): Gesetz zu den Übereinkommen vom 08. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 01. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 01. März 1973 über Straßenmarkierungen. In: Bundesgesetzblatt Teil II.
- Bundestag (07.12.2016): Gesetz zu Änderung der Artikel 8 und 39 des Übereinkommens vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr. In: Bundesgesetzblatt Teil II.
- Bundestag (16.06.2017): Achstes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes. In: Bundesgesetzblatt Teil I.

- Bundestag (12.07.2021): Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren. In: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 48.
- Cardeneo, Andreas (2008): Straßengüterverkehr, Speditionen, Logistik-Dienstleistungen. In: Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch), S.727–735.
- Claussen, Thies (1979): Grundlagen der Güterverkehrsökonomie. Die Gestaltung des inländischen Güterverkehrs. Hamburg: Dt. Verkehrs-Verl.
- Clements, Lewis M.; Kockelmann, Kara M. (2017): Economic Effects of Automated Vehicles. In: *Transportation Research Record* (2602), S.106–114.
- Complete Logistics Systems international GmbH (Hg.) (2021): CLSi Logispeed – LKW Ladungsträger, CLSi – Logispeed. Online verfügbar unter <https://www.clsi-logispeed.de/produkte/logispeed-ladungstraeger/>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.
- Dabidian, Peiman; Langkau, Sven (2013): Straßengüterverkehr. In: Uwe Clausen und Christiane Geiger (Hg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch), S.137–160.
- Daimler AG (2016): Das Projekt PROMETHEUS ab 1986: Vorreiter des autonomen Fahrens. Online verfügbar unter <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Das-Projekt-PROMETHEUS-ab-1986-Vorreiter-des-autonomen-Fahrens.xhtml?oid=13744534>, zuletzt geprüft am 02.10.2019.
- DB Schenker (Hg.) (2018): DB Schenker und Einride: Erster autonomer Elektro-Lkw »T-Pod« nimmt kommerziellen Betrieb auf. Online verfügbar unter <https://www.dbschenker.com/de-de/ueber-uns/pressecenter/db-schenker-news/db-schenker-und-einride--erster-autonomer-elektro-lkw--t-pod--nimmt-kommerziellen-betrieb-auf--562174>, zuletzt geprüft am 11.03.2020.

- Defense Advanced Research Projects Agency (2019): The Grand Challenge. U.S. Department of Defense. Online verfügbar unter <https://www.darpa.mil/about-us/timeline/-grand-challenge-for-autonomous-vehicles>, zuletzt geprüft am 02.10.2019.
- Deutscher Bundestag 13. Wahlperiode (Hg.) (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung«. Konzept Nachhaltigkeit Vom Leitbild zur Umsetzung. 13/11200. Bonn.
- Dickmanns, Ernst (2007): Dynamic vision for perception and control of motion. London: Springer.
- Die Bundesregierung (Hg.) (2019): Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung. Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturausbau bis 2030.
- Die Bundesregierung (Hg.) (2022): Verbrennermotoren ab 2035 nur im Betrieb CO₂-frei | Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450>, zuletzt geprüft am 18.11.2022.
- Dietmayer, Klaus (2015): Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. s.l.: Springer, S. 420–438.
- DLR Verkehr (2022): Testfeld Niedersachsen. Dienste und Schnittstellen. Online verfügbar unter <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/testfeld-niedersachsen-fuer-automatisierte-und-vernetztemobilitaet/dienste-und>, zuletzt aktualisiert am 27.09.2022, zuletzt geprüft am 27.09.2022.
- Donges, Edmund (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* 27, 1982, S. 183–190.

- Donges, Edmund (2009): Fahrerhaltensmodelle. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; mit 45 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 15–23.
- dpa-Newskanal (2021): Bosch und Daimler wollen Arbeit an Robotaxis beenden. In: *Süddeutsche Zeitung*, 10.08.2021. Online verfügbar unter <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/auto-gerlingen-bosch-und-daimler-wollen-arbeit-an-robotaxis-beenden-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210810-99-795859>, zuletzt geprüft am 15.09.2021.
- Druce, Nikola (2012): Das ika erforscht gemeinsam mit anderen Partnern autonomes Kolonnenfahren im EU-Projekt SARTRE. Pressemitteilungen. Hg. v. RWTH Aachen Universität. Online verfügbar unter <https://www.ika.rwth-aachen.de/de/pressemitteilungen/357-das-ika-erforscht-gemeinsam-mit-anderen-partnern-autonomes-kolonnenfahren-im-eu-projekt-sartre.html>, zuletzt geprüft am 10.08.2022.
- Duden (Hg.) (2021a): Auswirkung. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Auswirkung>, zuletzt geprüft am 08.11.2021.
- Duden (2021b): autonom. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/autonom>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- Duden (Hg.) (2021c): Wirkung. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Wirkung>, zuletzt geprüft am 08.11.2021.
- Easymile (Hg.) (2021a): EZ10 passenger shuttle, EasyMile. Online verfügbar unter <https://easymile.com/vehicle-solutions/ez10-passenger-shuttle>, zuletzt geprüft am 19.08.2021.
- Easymile (Hg.) (2021b): TractEasy, EasyMile. Online verfügbar unter <https://easymile.com/vehicle-solutions/tracteasy>, zuletzt geprüft am 19.08.2021.
- Ebel, Gerald (2013): Akteure. In: Uwe Clausen und Christiane Geiger (Hg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 126–127.

- Einride (Hg.) (2019): World premiere: First cab-less and autonomous, fully electric truck in commercial operations on public road. Online verfügbar unter <https://www.einride.tech/news/world-premiere-first-cab-less-and-autonomous-fully-electric-truck-in-commercial-operations-on-public-road>, zuletzt geprüft am 02.12.2019.
- Einride (Hg.) (2021a): Carrier. Online verfügbar unter <https://www.einride.tech/carrier/>, zuletzt geprüft am 20.08.2021.
- Einride (Hg.) (2021b): Ship Electric with Einride. Online verfügbar unter <https://www.einride.tech/shipper/>, zuletzt geprüft am 20.08.2021.
- Elgharabawy, Mohamed; Scherhauer, Ingo; Oberhollenzer, Klara; Frey, Michael; Gauterin, Frank (2019): Adaptive functional testing for autonomous trucks. In: *International Journal of Transportation Science and Technology* (8), S. 202–218.
- Ellram, Lisa M. (2002): Total cost of ownership. In: Dietger Hahn (Hg.): *Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement. Internationale Konzepte, Innovative Instrumente, Aktuelle Praxisbeispiele*. Unter Mitarbeit von Lutz Kaufmann. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 659–672.
- Engholm, Albin; Kristoffersson, Ida; Pernestål, Anna (2021): Impacts of large-scale driverless truck adoption on the freight transport system. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 154, S. 227–254.
- Engholm, Albin; Pernestål, Anna; Kristoffersson, Ida (2018): System-level impacts of self-driving vehicles: terminology, impact frameworks and existing literature syntheses. Hg. v. KTH Royal Institute of Technology. Schweden.
- Engholm, Albin; Pernestål, Anna; Kristoffersson, Ida (2020): Cost Analysis of Driverless Truck Operations. In: *Transportation Research Record* 2674 (9), S. 511–524.
- ESL Mobility (Hg.) (2022): Ecotap DC180, Elektroauto DC Ladestation CCS Typ 2 und CHAdemo. Online verfügbar unter https://esl-mobility.com/de/ecotap-dc180-elektroauto-wallbox-dc-ladestation-ccs-und-chademo-typ-2-180-kw-500v.html?gclid=CjoKCQjwj7CZBhDHARIsAPPWv3dGpIlwDNxYjJGaUeCN_kY-e4oWEMyRchQGfV2DDqFV1fnV_01tRREaAk4tEALw_wcB, zuletzt geprüft am 22.09.2022.

- European Commission (2019): Chauffeur II. Promote Chauffeur II. Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS). Online verfügbar unter <https://trimis.ec.europa.eu/project/promote-chauffeur-ii#tab-outline>, zuletzt geprüft am 02.10.2019.
- Fagnant, Daniel; Kockelmann, Kara (2015): Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. In: *Transportation Research Part A* (77), S. 167–181.
- Fang, Yunfei; Chu, Feng; Mammari, Said; Che, Ada (2013): An optimal algorithm for automated truck freight transportation via lane reservation strategy. In: *Transportation Research Part C* (26), S. 170–183.
- Fill, Hans-Georg; Härer, Felix; Meier, Andreas (2020): Wie funktioniert die Blockchain? In: Hans-Georg Fill und Andreas Meier (Hg.): *Blockchain. Grundlagen, Anwendungsszenarien und Nutzungspotenziale*. 1. Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg (Edition HMD), S. 3–19.
- Fink, Arlene (2010): *Conducting research literature reviews. From the Internet to paper*. 3rd ed. Thousand Oaks, Calif.: Sage.
- Fitzpatrick, David; Cordahi, Gustave; O'Rourke, Larry; Ross, Catherine; Kumar, Amit; Bevely, David (2017): *Challenges to CV and AV Applications in Truck Freight Operations*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Flämig, Heike (2015): *Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes*. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. s.l.: Springer, S. 377–398.
- Flämig, Heike (2016): *Autonomous Vehicles and Autonomous Driving in Freight Transport*. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): *Autonomous Driving. Technical, Legal and Social Aspects*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, S. 365–385.

- Flämig, Heike; Einacker, Ingo; Ermann, Ulrich; Hesse, Markus; Schindler, Kirsten; Sparmann, Udo et al. (2001): Feststellung von Art, Richtung und Intensität der Wechselwirkungen zwischen Stadtentwicklungspotentialen und Verkehrswebsitesprojekten und Benennung möglicher Gestaltungskorridore für die Stadt- und Verkehrsplanung. Schlussbericht. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), TransportTechnologie-Consult Karlsruhe (TTK), Institut für Raumentwicklung und Strukturplanung (IRS). Bonn.
- Flämig, Heike; Lunkeit, Sandra; Fieltsch, Patrick; Müller, Stephan; Thaller, Carina; Liedtke, Gernot et al. (2020): Automatisiertes und vernetztes Fahren in der Logistik - Chancen für mehr Wertschöpfung (ATLaS). Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur.
- Flämig, Heike; Sjøstedt, Lars; Hertel, Christof (2002): Multimodal Transport: An Integrated Element for Last-Mile-Solutions? In: TRAIL Research School (Hg.): International congress on freight transport automation and multimodality: organisational and technological innovations, Proceedings, Part 1. Delft, 23.-24.05.2002, S. 1–17.
- Flechtheim, Ossip K. (1987): Ist die Zukunft noch zu retten? Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Fleischmann, Bernhard (2008): Systeme der Transportlogistik. In: Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch), S. 12–18.
- Forrester, Jay W. (1961): Industrial Dynamics. United States of America.
- Forrester, Jay W. (1972): Der teuflische Regelkreis. Das Globalmodell der Menschheitskrise. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.
- Forrester, Jay W. (1995): The beginning of system dynamics. In: *McKinsey Quarterly*, 1995 (4), S. 4–16.

- Fraedrich, Eva; Kröger, Lars; Bahamonde-Birke, Francisco; Frenzel, Ina; Liedtke, Gernot; Trommer, Stefan et al. (2017): Automatisiertes Fahren im Personenund Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstruktur. Hg. v. e-mobil BW GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. und Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg.
- Freedman, David H. (2017): Self-Driving Trucks. In: *MIT Technology Review* 120 (2). S. 62-71.
- Gadatsch, Andreas (2010): Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis; eine Einführung für Studenten und Praktiker. 6., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Vieweg Studium).
- Gasser, Tom; Arzt, Clemens; Ayoubim Mihiar; Bartels, Arne; Eier, Jana; Flemisch, Frank et al. (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe »Fahrzeugsicherheit«, F 83).
- Geißler, Torsten (2001): Automated Highway Systems – Konzept, Bewertungsmethodik und empirische Auswirkungsanalyse des CHAUFFEUR-Systems. Inauguraldissertation. Universität Köln, Köln. Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (Hg.) (2022): Definition der beteiligten Parteien. Ladungssicherungshandbuch – Transport-Information-Service. Online verfügbar unter https://www.tis-gdv.de/tis/pub/lshb/01lshb_0102-htm/, zuletzt geprüft am 13.11.2022.
- Ghandriz, Toheed; Jacobson, Bengt; Laine, Leo; Hellgren, Jonas (2020): Impact of automated driving systems on road freight transport and electrified propulsion of heavy vehicles. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 115, S. 102610.
- Ginsburg, Robert; Uygur, Arin Rubaci (2017): Changing Technology in Transportation: Automated Vehicles in Freight. Final Report. The University of Illinois at Chicago.
- Glenn, Jerome C. (1994): Introduction to Futures Research Methodology Series. AC/UNU Millenium Project.

- Göpfert, Ingrid (2019): *Logistik der Zukunft – logistics for the future*. Springer Gabler.
- Green, F. (1925): Radio Control - Marvel of the Future. In: *Popular Science* (106/3), S. 171–172.
- Greene, David L.; Plotkin, Steven E. (2011): Reducing Greenhouse Gas Emissions from U.S. Transportation. The Center for Climate and Energy Solutions (C2ES).
- Gronau, Norbert (1994): Grundlagen der Systemanalyse. In: Hermann Krallmann (Hg.): *Systemanalyse im Unternehmen. Geschäftsprozeßoptimierung, partizipative Vorgehensmodelle, objektorientierte Analyse*. Unter Mitarbeit von Gerard Derszteler, Helmut Frank, Norbert Gronau, Susanne König, Oliver Kundt, Ruth Marzi et al. München: Oldenbourg, S. 5–24.
- Gudehus, Timm (2005): *Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.
- Gudehus, Timm (2012): *Logistik 2. Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. 4., aktualisierte und erw. Aufl., Studienausg. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- GüKG, vom 22.06.1998 (BGBl. I S. 1485), das zuletzt durch Artikel 141 des Gesetzes vom 20.11.2019 (BGBl. I S. 1626) geändert worden ist (22.06.1998): *Güterkraftverkehrsgesetz*.
- heliox (Hg.) (2022): *Flex 360 kW. Datenblatt*.
- Hinterhuber, Hans H. (1996): *Strategische Unternehmensführung. Band I: Strategisches Denken. Vision, Unternehmenspolitik*. 6., Neubearb. und erw. Aufl. Berlin, New York.
- Ihde, Gösta B. (2001): *Transport, Verkehr, Logistik. Gesamtwirtschaftliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung*. 3., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- infras (2022): *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)*. 4.2. Aufl.
- Innamaa, Satu; Smith, Scott; Barnard, Yvonne; Rainville, Lydia; Rakoff, Hannah; Horiguchi, Ryota; Gellerman, Helena (2018): *Trilateral Impact Assessment Framework for Automation in Road Transportation*. Trilateral Impact Assessment Sub-Group for ART.

- International Transport Forum (2017): Managing the Transition to Driverless Road Freight Transport. Case-Specific Policy Analysis. Hg. v. OECD und ITF.
- Irzik, Marco; Habermann, Marilena; Löhe, Ulrich; Treichel, Hartmut (2019): Lkw-Parksituation im Umfeld der BAB 2018. Bundesweite Erhebung der Lkw-Parksituation an und auf BAB in Deutschland in den Nachtstunden. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Isermann, Heinz (Hg.) (1998): Logistik. Gestaltung von Logistiksystemen. 2., überarb. und erw. Aufl. Landsberg/Lech: mi Verl. Moderne Industrie.
- Jentzsch, Gregor (2018): MAN und HHLA starten »Hamburg TruckPilot« zum Test automatisiert und autonom fahrender Lkw. Hg. v. MAN Truck & Bus. Online verfügbar unter <https://www.truck.man.eu/de/de/Automatisierung.html>, zuletzt geprüft am 02.12.2019.
- Johanning, Volker; Mildner, Roman (2015): Car IT kompakt. Das Auto der Zukunft, Vernetzt und autonom fahren. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Jöhrens, Julius; Rücker, Julius; Kräck, Jan; Allekotte, Michel; Jamet, Marie; Keller, Marc et al. (2018): Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw. Analyse im Rahmen des Verbundvorhabens »Roadmap OH-Lkw«. ifeu. Heidelberg.
- Jouvenel, Bertrand de (1967): Die Kunst der Vorausschau. Neuwied Berlin Luchterhand.
- Kilbon, Kenyon (1960): Tomorrow's Thruway Is Here Today! In: *RCA Electronic Age*, S. 26–29.
- KPMG (Hg.): Connected and Autonomous Vehicles. The UK Economic Opportunity.
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2020a): Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2019 FZ 14. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2020b): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Verkehrsaufkommen Jahr 2019 VD 1. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2021a): Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2020 FZ 14. Flensburg.

- Kraftfahrt-Bundesamt (2021b): Verkehr in Zahlen 2021/2022. Hg. v. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2022a): Fahrzeugklassen und Aufbauarten – Bestand nach Fahrzeugklassen und Aufbauarten. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/2022/b_fzkl_zeitreihen.html?nn=3524712&fromStatistic=3524712&yearFilter=2022&fromStatistic=3524712&yearFilter=2022, zuletzt geprüft am 21.09.2022.
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2022b): Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2021 FZ 14. Flensburg.
- Krail, Michael; Hellekes, Jens; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth; Schellert, Maximilian; Rüdiger, David et al. (2019): Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).
- Krause, Sabine; Motamedidehkordi, Nassim; Hoffmann, Silja; Busch, Fritz; Hartmann, Martin; Vortisch, Peter (2017): Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. Hg. v. FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Berlin.
- Kreibich, Rolf (1995): Zukunftsforschung. In: Bruno Tietz (Hg.): Handwörterbuch des Marketing. 2., völlig neu gestaltete Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 4), S. 2814–2834.
- Kröger, Fabian (2015): Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. s.l.: Springer, S. 41–67.
- Kückelhaus, Markus; Zeiler, Katrin; Niezgodá, Denis (2014): Self-Driving Vehicles in Logistics. A DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. Hg. v. Matthias Heutger. DHL Trend Research.

- Lex, Cornelia; Grasser, Stephan; Jäger, Fabian (2017): Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen. Hg. v. FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Berlin.
- Logispeed (2019): Expresslader zur automatischen Verladung. Reduzierung der Hofzeiten durch automatisierten Warenaustausch. Hg. v. Complete Logistics Systems international GmbH. Online verfügbar unter https://www.cls-i-logispeed.de/LOGISPEED%20Expresslader_12-.html, zuletzt geprüft am 04.12.2019.
- logistikjournal (Hg.) (2009): Westfalia modernisiert für Henkell. Online verfügbar unter <https://www.logistik-journal.de/westfalia-modernisiert-fuer-henkell-44688>, zuletzt geprüft am 04.12.2019.
- VDI 4400 Blatt 1, 2001: Logistikkennzahlen für die Beschaffung.
- VDI 4400 Blatt 3, 2002: Logistikkennzahlen für die Distribution.
- Lunkeit, Sandra; Flämig, Heike; Rosenberger, Kerstin (2019): The Impact of Driverless Vehicles on Transportation Costs in Road Haulage: A System Dynamical Approach. In: Uwe Clausen, Sven Langkau und Felix Kreuz (Hg.): Advances in production, logistics and traffic. Proceedings of the 4th Interdisciplinary Conference on Production Logistics and Traffic 2019. Cham: Springer (Lecture notes in logistics), S. 116–127.
- MAN (Hg.) (2020): Warum Platooning die Zukunft des Lieferverkehrs ist. Online verfügbar unter <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/warum-platooning-die-zukunft-des-lieferverkehrs-ist.html>, zuletzt geprüft am 19.05.2021.
- MAN Truck & Bus SE (Hg.) (2021): Zukunft des Güterverkehrs: MAN und HHLA leisten mit dem autonomen Hamburg TruckPilot Pionierarbeit für die Logistik 4.0. Online verfügbar unter <https://press.mantruckandbus.com/corporate/de/zukunft-des-gueterverkehrs-man-und-hhla-leisten-mit-dem-autonomen--hamburg-truckpilot-pionierarbeit-fuer-die-logistik-40/>, zuletzt geprüft am 11.08.2022.
- Manheim, Marvin L. (1980): Fundamentals of transportation systems analysis. 3. pr. Cambridge, Mass.: MIT Pr (MIT Press series in transportation studies, 4).

- Mann, Martin (1985): The Car That Drives Itself. In: *Popular Science* (171/5), S. 75-79 und 226-227.
- Martin, Leslie A. (2001): Exploring S-Shaped Growth. Hg. v. Massachusetts Institute of Technology.
- Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (Hg.) (2015): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. s.l.: Springer.
- May, Anthony D.; Shepherd, Simon; Pfaffenbichler, Paul; Emberger, Günter (2018): The potential impacts of automated cars on urban transport: an exploratory analysis. In: *Vienna Special Interest Group Workshop SIG 2 – Regional and National*.
- Meadows, Dennis L. (2000): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. 17. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst.
- Meyer, Christian; Wiedemann, Reinhold (2008): Automatisiertes Verladen und Ladungssicherung an der Rampe. Hg. v. MMLogistik. Online verfügbar unter <https://www.mm-logistik.vogel.de/automatisiertes-verladen-und-ladungssicherung-an-der-rampe-a-197322/>, zuletzt geprüft am 04.12.2019.
- Milakis; Dimitris; van Arem, Bart; van Wee; Bert (2017): Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* 21 (4), S. 324–348.
- Milakis, Dimitris; van Arem, Bart; van Wee, Bert (2015): The ripple effect of automated driving. In: *BIVEC-GIBET Transport Research Day, May 28-29, 2015, Eindhoven, The Netherlands*. S. 1-3.
- Moravec, Hans P. (1990): The Stanford Cart and the CMU Rover. In: Ingemar J. Cox und Gordon T. Wilfong (Hg.): *Autonomous Robot Vehicles*. New York, NY: Springer New York, S. 407–419.
- Mosquet, Xavier; Dauner, Thomas; Lang, Nikolaus; Rößmann, Michael; Mei-Pochtler, Antonella; Agrawal, Rakshita; Schmiegl, Florian (2015): Revolution in the Driver's Seat. The Road to Autonomous Vehicles. Hg. v. The Boston Consulting Group.

- Müller, Stephan; Voigtländer, Felix (2019): Automated Trucks in Road Freight Logistics: The User Perspective. In: Uwe Clausen, Sven Langkau und Felix Kreuz (Hg.): *Advances in production, logistics and traffic. Proceedings of the 4th Interdisciplinary Conference on Production Logistics and Traffic 2019*. Cham: Springer (Lecture notes in logistics), S. 102–115.
- Müller-Stewens, Günter (1988): Zukunftsforschung. In: *Gabler Wirtschafts-Lexikon*. 12. vollst. neu bearb. und erw. Wiesbaden, S. 2915–2922.
- Murthfeldt, E. W. (1938): Highways of the Future. In: *Popular Science* (132/5), S. 27-29 und 118-119.
- Nagel, Peter (1988): Systemdenken. In: Walter F. Daenzer und Alfred Büchel (Hg.): *Systems Engineering. Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*. 6. Aufl., Nachdr. Zürich: Verl. Industrielle Organisation, S. 10–25.
- Nationale Plattform Mobilität Arbeitsgruppe 1 »Klimaschutz und Verkehr« (2020): *Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge. Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung*. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur. Berlin.
- NAVYA (Hg.) (2021a): Self-Driving Shuttle for Passenger Transportation – NAVYA. Online verfügbar unter <https://navya.tech/en/solutions/moving-people/self-driving-shuttle-for-passenger-transportation/>, zuletzt geprüft am 19.08.2021.
- NAVYA (Hg.) (2021b): Self-driving tow-tractor for logistics – NAVYA. Online verfügbar unter <https://navya.tech/en/solutions/moving-goods/self-driving-tow-tractor-for-logistics/>, zuletzt aktualisiert am 22.12.2020, zuletzt geprüft am 19.08.2021.
- Noorvand, Hossein; Karnati, Guru; Underwood, B. Shane (2017): Autonomous Vehicle Assessment of the Implications of Truck Positioning on Flexible Pavement Performance and Design. In: *Transportation Research Record* (2640), S. 21–28.
- Norton, Peter D. (2008): *Fighting traffic. The dawn of the motor age in the American city*. Cambridge, Mass.: MIT Press (Inside technology).

- Nowak, Gerhard; Maluck, Jens; Stürmer, Christoph; Pasemann, Jan (2016): The era of digitized trucking. Transforming the logistics value chain. Hg. v. PwC Strategy&.
- Nowakowski, Christopher; Shladover, Steven E.; Tan, H.-S. (2015): Heavy vehicle automation: Human factors lessons learned. In: *Procedia Manufacturing* (3), S. 2945–2952.
- Object Management Group (OMG) (Hg.) (2021): About the Business Process Model And Notation Specification Version 2.0. Online verfügbar unter <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0>, zuletzt geprüft am 13.08.2021.
- OECD (Hg.) (2010): Glossary of Key Terms in Evaluation and Results Based Management. reprinted.
- VDI 4490, 2007: Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand.
- Pernestål, Anna; Engholm, Albin; Kristoffersson, Ida; Hammes, Johanna Jussila (2020): The Impacts of Automated Vehicles on the Transport System and How to Create Policies that Target Sustainable Development Goals. In: *Shaping smart mobility futures. Governance and policy instruments in times of sustainability transitions*. Unter Mitarbeit von Alexander Paulsson und Claus Hedegaard Sørensen. First edition. Bingley: Emerald Publishing Limited, S. 37–53.
- Pfohl, Hans-Christian (1985): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 2., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen).
- Pfohl, Hans-Christian (2010): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8., neu bearb. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer.
- VDI 4405, 2003: Prozessorientierte Kostenanalyse in der innerbetrieblichen Logistik.
- Reschka, Andreas (2015): Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. s.l.: Springer, S. 490–513.
- Roland Berger (2016): Automated Trucks. The next big disruptor in the automotive industry? Short version.

- Ross, Catherine; Guhathakurta, Subhrajit (2017): Autonomous Vehicles and Energy Impacts: A Scenario Analysis. In: *Energy Procedia* (143), S. 47–52.
- Rowsome Jr., Frank (1954): Educated Gas Pedal Keeps Cops Away. In: *Popular Science* (164/1), S. 166–169 und 264.
- Rowsome Jr., Frank (1958): What It’s Like to Drive an Auto-Pilot Car. In: *Popular Science* (172/4), S. 105–107, 248 und 250.
- SAE International (2014): Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Surface Vehicle Information Report J3016. Hg. v. SAE International (1).
- Sähn, Elke (2019): AutoTruck. Vollautomatischer Verteiler-Lkw für Automatisierungszonen. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Online verfügbar unter <http://www.autotruck-projekt.de/>, zuletzt geprüft am 02.12.2019.
- Schimanski, Jürgen (1976): Die Zukunftsforschung und ihr Einfluss auf die Grundlagen langfristiger Unternehmensplanung. Dissertation, Berlin.
- Schulte, Christof (2005): Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. 4., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen.
- Shladover, Steven E. (2010): Truck Automation Operational Concept Alternatives. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IV ; 21–24 June 2010, University of California, San Diego, CA, USA*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1072–1077.
- Shladover, Steven E.; Lu, Xiao-Yun; Song, Bongsob; Dickey, Susan; Nowakowski, Christopher; Howell, Adam et al. (2005): Demonstration of Automated Heavy-Duty Vehicles. California PATH Research Report. Hg. v. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkley.
- Short, Jeffrey; Murray, Dan (2016): Identifying Autonomous Vehicle Technology Impacts on the Trucking Industry. American Transportation Research Institute. Arlington, Virginia, USA.
- Sivak, Michael; Schoettle, Brandon (2015): Road Safety with Self-Driving Vehicles: General Limitations and Road Sharing with Conventional Vehicles. University of Michigan Transportation Research Institute. Michigan, USA.

- Sjöstedt, Lars (1996): A Theoretical Framework - From An Applied Engineering Perspective. In: European Council of Applied Sciences and Engineering (Euro-CASE) (Hg.): Mobility, Transport and Traffic in the Perspective of Growth, Competitiveness, Employment. Paris, S. 71–79.
- Sjöstedt, Lars; Franzén, Stig (2009): Smartfreight. Theoretical background and intermediate local scenarios for services to be provided. European Commission; DG Information Society and Media.
- Statistisches Bundesamt (2020): Verkehrsunfälle. Zeitreihen 2019.
- Steinbuch, Karl (1973): Mensch, Technik, Zukunft. Probleme von morgen. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verl. (Rororo Sachbuch, 6821).
- Steinmüller, Karlheinz (1995): Beiträge zu Grundfragen der Zukunftsforschung. Sekretariat für Zukunftsforschung. Gelsenkirchen (Arbeitsberichte, 2/95).
- stepstone.de (Hg.) (2022a): Führungskraft Logistik Gehälter in Deutschland 2022 – StepStone. Online verfügbar unter <https://www.stepstone.de/gehalt/Fuehrungskraft-Logistik.html>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.
- stepstone.de (Hg.) (2022b): Lagerarbeiter/in Gehälter in Deutschland 2022 - StepStone. Online verfügbar unter <https://www.stepstone.de/gehalt/Lagerarbeiter-in.html>, zuletzt geprüft am 21.09.2022.
- Stock, Wilfried; Bernecker, Tobias (2014): Verkehrsökonomie. Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft. 2., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler.
- TB Digital Services (Hg.) (2020): Speditionssoftware und Logistiksoftware für Auftragsplanung. Online verfügbar unter <https://logistic.rio.cloud/de/de/RIO-bietet-Produkte-fuer/spediteur.html>, zuletzt geprüft am 11.03.2020.
- Tesla (Hg.) (2021): Elektrofahrzeuge, Solaranlagen und saubere Energie Tesla. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_de, zuletzt aktualisiert am 19.08.2021, zuletzt geprüft am 19.08.2021.
- The American Transportation Research Institute (Hg.) (2015): Critical issues in the trucking industry – 2015. Arlington, Virginia, USA.

- The Ohio State University (Hg.) (2019): Intelligent Transportation Systems. Online verfügbar unter <https://car.osu.edu/research/its>, zuletzt geprüft am 02.12.2019.
- DIN 30 781 Teil 1, Mai 1989: Transportkette.
- Treiber, Martin; Kesting, Arne (2010): Verkehrsdynamik und -simulation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Tsao, H. S. Jacob; Botha, Jan L. (2003): Definition and Evaluation of Bus and Truck Automation Operations Concepts: Final Report. California PATH Research Report. Hg. v. UC Berkeley.
- Tsugawa, Sadayuki (2012): Energy ITS: What we learned and what we should learn. TRB Road Vehicle Automation Workshop, 2012.
- Ullrich, Günter (2014): Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung; mit zahlr. Tab. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Universita di Parma (Hg.) (o.J.): The ARGO project. Online verfügbar unter <http://www.argo.ce.unipr.it/ARGO/english/index.html>, zuletzt geprüft am 02.12.2019.
- University of Michigan (Hg.) (2019): Mcity. Leading the transformation to connected and automated vehicles. Online verfügbar unter <https://mcity.umich.edu/>, zuletzt geprüft am 02.12.2019.
- Vensim (Hg.) (2015): Vensim Software | Vensim. Online verfügbar unter <https://vensim.com/vensim-software/>, zuletzt geprüft am 22.08.2021.
- Verband der Automobilindustrie (2015): Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren (VDA Magazin).
- Veres-Homm, Uwe; Kübler, Annemarie; Weber, Natalie; Cäsar, Estella (2015): Logistikimmobilien. Markt und Standorte 2015. Nürnberg.
- Vernon, Raymond (1966): International Investment and International Trade in the Product Cycle. In: *Q J Econ* 80 (2), S. 190–207.
- Vester, Frederic (1990): Ausfahrt Zukunft. Strategien für den Verkehr von morgen ; eine Systemuntersuchung. 2., korr. Aufl. München: Heyne.
- Vester, Frederic (1991): Ausfahrt Zukunft Supplement. Material zur Systemuntersuchung. München: Studiengruppe für Biologie und Umwelt GmbH.

- VFR Verlag für Rechtsjournalismus (2019): E-Highway: LKW mit Oberleitung künftig auf mehreren Strecken zu sehen. In: *bussgeldkatalog.org*, 29.07.2019. Online verfügbar unter <https://www.bussgeldkatalog.org/e-highway/#kosten>, zuletzt geprüft am 19.05.2021.
- Vigrass, J. William (2018): Autonomous Trucks: An Elephant in the Economy. In: *Railway Age*, S. 20.
- Voigt, Fritz (1973): Verkehr. Berlin: Duncker & Humblot.
- Wadud, Zia (2017): Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption. In: *Transportation Research Part A* (101), S. 163–176.
- Wadud, Zia; MacKenzie, Don; Leiby, Paul (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. In: *Transportation Research Part A* (86), S. 1–18.
- Wagenführ, Horst (1970): Industrielle Zukunftsforschung. München: Moderne Industrie.
- Wagenführ, Horst (1985): Zukunftsforschung. In: Verlag Moderne Industrie (Hg.): Management-Enzyklopädie. 2. Aufl. Landsberg/Lech, S. 571–588.
- White, Stephen A. (o.J.): Introduction to BPMN.
- Wieker, Horst (2015): Eine neue Architektur für die V2X-Kommunikation. COmmunication Network VEhicle Road Global Extension (Converge). Hg. v. Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar).
- Wietholt, Thomas; Harding, Jochen (2016): Influence of dynamic traffic control systems and autonomous driving on motorway traffic flow. In: *Transportation Research Procedia* 15, S. 176–186.
- Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, Andre; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI). Karlsruhe.






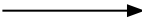
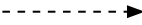
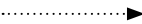


- Williams, Thomas; Wagner, Jason; Morgan, Curtis; Hall, Kevin, Sener, Ipek; Stoeltje, Gretchen; Pang, Hao (2017): Transport Planning Implications of Automated/Connected Vehicles of Texas Highways. Texas A&M Transportation Institute. Austin, Texas, USA.
- Wittenbrink, Paul (2014): Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe: Gabler.
- Wittpahl, Volker (Hg.) (2019): Künstliche Intelligenz. Technologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future. Hg. v. United Nations. Oxford University Press.
- Zaloshnja, Eduard; Miller, Ted (2007): Unit Costs of Medium and Heavy Truck Crashes. Hg. v. U.S. Department of Transportation. Federal Motor Carrier Safety Administration.
- Zlocki, Adrian (2019): Forschungsprojekt–Automatisiertes Fahren. KONVOI. RWTH Aachen Universität. Online verfügbar unter <https://www.ika.rwth-aachen.de/de/forschung/projekte/automatisiertes-fahren/1635-konvoi.html>, zuletzt geprüft am 02.10.2019.

12 Anhang

A. BPMN Notation	296
B. Zuordnung der nichttechnischen Aspekte zu Einflussvariablen	297
C. Berechnungen im quantitativen Zukunftsmodell	300

A. Business Process Modelling Notation

Tabelle A.1: Business Process Modelling Notation

Symbol	Name	Bedeutung
	Aktivität	Eine Aktivität (Activity) beschreibt einen Vorgang, der durch das Unternehmen ausgeführt wird.
  	Startereignis Zwischenereignis Endereignis	Ereignisse (Events) sind Geschehnisse, die während eines Prozesses auftreten. Sie können auslösend sein oder das Ergebnis einer Aktivität. Es gibt drei grundlegende Typen (start, intermediate und end) und Spezialfälle.
	Entscheidung (Gateway)	Gateways sind Synchronisationspunkte im Prozessverlauf. Sie entscheiden über den weiteren Verlauf des Prozesses. Es gibt mehrere Gateway-Typen: XOR, OR, AND und eventbasierte Entscheidung.
	Kontrollfluss (Sequence flow)	Der Kontrollfluss beschreibt den zeitlichen Ablauf der Aktivitäten im Prozess.
	Nachrichtenfluss (Message flow)	Der Nachrichtenfluss beschreibt den Austausch von Nachrichten zwischen zwei Objekten (Aktivitäten, Ereignisse oder Entscheidungen).
	Verbindung (Association)	Die Verbindung zeigt an, dass Daten, Texte oder andere Objekte dem Kontrollfluss verbunden sind, z.B. Input oder Output einer Aktivität.
	Datenobjekt (Data Object)	Das Datenobjekt zeigt an, welche Informationen/Daten als Input benötigt bzw. Output einer Aktivität sind.
	Swimlane	Die Swimlane dient als graphische Abgrenzung, um Aktivitäten voneinander zu trennen. Sie repräsentiert verschiedene Rollen und kann zahlreiche Beteiligte darstellen.

Quelle: Flämig et al. (2020, S. xxvii) basierend auf Gadatsch (2010, S. 128) und White (o.J., S. 2ff.)

B. Zuordnung der nichttechnischen Aspekte zu Variablen

Tabelle B.1: Zuordnung der nichttechnischen Aspekte zu Variablen und Anzahl der Nennungen in der Literatur

Variable	Nichttechnische Aspekte anhand der Literatur	Anzahl Nennungen
TCO	Frachtkosten	12
	Gesamtbetriebskosten (TCO)	4
	Equipmentkosten	2
	Versicherungskosten	3
	Finanzieller Nutzen für Transportunternehmen	1
Antriebstechnologie	Kraftstoffverbrauch	12
Berufskraftfahrende	Personalmangel	9
	Bedarf an Fahrenden	5
	Bindung von Fahrenden	2
	Langfristiger Wegfall der Fahrenden	3
	Arbeitsplatzverlust	1
	Attraktivität des Fahrendenberufs	1
Verkehrsunfälle	Unfällen	8
	Straßensicherheit	9
Stauaufkommen	Stau	4
Infrastrukturnutzung	Infrastrukturkapazität	8
	Straßeninfrastruktur	2
	Auf Lkw-Verkehr ausgelegte Infrastruktur	1
	Lkw-Spuren	1

Variable	Nichttechnische Aspekte anhand der Literatur	Anzahl Nennungen
Zustand der Fahrenden	Wohlbefinden der Fahrenden	5
	Gesundheit	3
	Ermüdung der Fahrenden	3
	Personalproduktivität	2
	Ablenkung der Fahrenden	2
	Unsichere Fahrweisen	2
	Hohes Vertrauen in Fahrzeugsysteme	1
	Wachsamkeit	1
THG-Emissionen	Umwelteinflüsse	5
	Treibhausgasemissionen	1
Lieferzuverlässigkeit	Verkürzte Fahrzeiten	4
	Ruhezeiten	2
	Verlängerte Fahrzeiten	2
	Effizienz	5
	Produktivität	4
	Einhaltung der Dienstzeitvorschriften	1
	Routenwahl	1
	Logistikplanung	1
	Zuverlässigkeit	1
Fahrzeugauslastung	Fahrzeugauslastung	3
Fahrzeugfahrleistung	Transportleistung	3
	Anzahl von Transporten	3
	Fahrzeugkilometer	3

Variable	Nichttechnische Aspekte anhand der Literatur	Anzahl Nennungen
Straßentransportnachfrage	Straßengüternachfrage	4
	Konflikte mit Massentransportmitteln	2
	Nachfrage von Schienengütertransporten	4
Personalbedarf zur Be- und Entladung	Veränderung der Tätigkeiten der Fahrenden	2
Personalqualifikation	Übernahme von Aufgaben der Fahrenden durch Lagerpersonal	3
	Verantwortlichkeit von Fahrenden	1
Infrastrukturkosten	Infrastrukturkosten	1
	Investitionen in Infrastruktur	2
Stellplatzbedarf	Nachfrage nach Parkplätzen	1
Schnittstellentechnologien	Schnittstellen	2
Kosten für Be- und Entladung	Knotenkosten	1

Quelle: Eigene Zusammenstellung

C. Berechnungen im quantitativen Zukunftsmodell

Nachfolgend finden sich die alphabetisch sortierten Berechnungen des Simulationsmodells aus dem Programm Vensim:

- (01) Anfangsbestand der Berufskraftfahrende = 572248
Units: Anzahl Berufskraftfahrende
- (02) Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung = $2.04e + 10$ /
Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen
Units: Fahrzeugfahrleistung in Fahrzeugkilometer
- (03) Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen = 218454
Units: Anzahl Sattelzugmaschinen
- (04) Anfangsbestand der Stellplatzfläche = $(93600 * (17.5 * 3.5)) / 1000$
Units: Stellfläche in km^2
- (05) Anfangsbestand der Verkehrsunfälle = 36939
Units: Anzahl Verkehrsunfälle unter Beteiligung von
Güterkraftfahrzeugen
- (06) Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung = 28087
Units: Anzahl des Personals für Aufsicht und Führung
- (07) "Anfangsbestand des Personals für Güter- und
Warenumschlag" = 20242
Units: Anzahl des Personals für Güter- und Warenumschlag
- (08) Anfangsbestand des Transportaufkommens = 2476.76
Units: Transportaufkommen in Mio t
- (09) Anfangsbestand der Verkehrsstärke = $2.7667e + 06$
Units: Anzahl Verkehrsteilnehmende pro Stunde pro km
- (10) Anteil der Schnittstellentechnologien = 0.2
Units: Anteil der Automatisierungstechnologie in der
WÜ in Prozent
- (11) Anteil des Personals für Aufsicht und Führung = Anfangsbestand
des Personals für Aufsicht und Führung / (Anfangsbestand des
Personals für Aufsicht und Führung + "Anfangsbestand des
Personals für Güter- und Warenumschlag")
Units: Anteil

- (12) Anzahl der Berufskraftfahrenden = SIMULTANEOUS
 (Anfangsbestand der Berufskraftfahrende + ((Anfangsbestand der Berufskraftfahrende * Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) * 0.22) + ((Anfangsbestand der Berufskraftfahrende * Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung) * 0.22) + ((Anfangsbestand der Berufskraftfahrende * Veränderungseffekt der Lieferzuverlässigkeit) * -0.11) + ((Anfangsbestand der Berufskraftfahrende * Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung) * -0.11) + ((Anfangsbestand der Berufskraftfahrende * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * -0.33), Hilfsvariable)
 Units: Anzahl Berufskraftfahrende
- (13) Anzahl des Personals für Aufsicht und Führung =
 "Personalbedarf zur Be- und Entladung" * Personalqualifikation
 Aufsicht und Führung
 Units: Anzahl des Personals für Aufsicht und Führung
- (14) Anzahl einwandfreier Lieferungen = SIMULTANEOUS
 (84.56 + ((84.56 * Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) * -0.08) + ((84.56 * Veränderungseffekt der Schnittstellentechnologien) * 0.08) + ((84.56 * Veränderungseffekt des Personalbedarfs) * 0.08) + ((84.56 * Veränderungseffekt der Personalqualifikation) * 0.08) + ((84.56 * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * 0.17) + ((84.56 * Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden) * 0.08) + ((84.56 * Veränderungseffekt des Stauaufkommens) * -0.17) + ((84.56 * Veränderungseffekt der Verkehrsunfälle) * -0.17) + ((84.56 * Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung) * -0.08), Hilfsvariable)
 Units: Anzahl einwandfreie Lieferungen in Mio
- (15) Energiekosten = (((129 * 0.1201) / 100) * Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung) + (((((129 * 0.1201) / 100) * Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung) * Veränderungseffekt des Stellplatzbedarfs) * -0.06)
 Units: Energiekosten für BEV in Euro

- (16) $\text{Energiekosten } o = (((129 * 0.1201) / 100) * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung})$
 Units: Energiekosten für BEV in Euro
- (17) $\text{Energiesteuer} = (129 / 100) * 0.0132 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung}$
 Units: Energiesteuer für BEV in Euro
- (18) $\text{Energiesteuer } o = (128 / 100) * 0.0132 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung}$
 Units: Energiesteuer für BEV in Euro
- (19) $\text{FINAL TIME} = 30$
 Units: Jahr
- (20) $\text{Fixe Kosten} = \text{Annuität} + \text{Energiesteuer} + \text{Versicherungskosten}$
 Units: Fixe Kosten für BEV in Euro
- (21) $\text{INITIAL TIME} = 0$
 Units: Jahr
- (22) $\text{Personalkosten} = \text{Durchschnittliches Jahresgehalt}$
 Units: Personalkosten für BEV in Euro
- (23) $\text{"Reparatur- und Wartungskosten } o" = (0.156 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung})$
 Units: Reparatur und Instandhaltungskosten für BEV in Euro
- (24) $\text{"Reparatur- und Wartungskosten"} = (0.156 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung}) + (((0.156 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung}) * \text{Veränderungseffekt des Stauaufkommens}) * 0.06) + (((0.156 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung}) * \text{Veränderungseffekt der Verkehrsunfälle}) * 0.12) + (((0.156 * \text{Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung}) * \text{Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten}) * 0.06)$
 Units: Reparatur und Instandhaltungskosten für BEV in Euro
- (25) $\text{Anfangsbestand der TCO eines BEV} = \text{Fixe Kosten } o + \text{Personalkosten } o + \text{Variable Kosten } o$
 Units: TCO für BEV in Euro
- (26) $\text{Annuität } o = \text{Fahrzeugkosten } o * ((1 + 0.02)^6) * (0.02) / (((1 + 0.02)^6) - 1)$
 Units: Annuität für BEV in Euro

- (27) Anschaffungskosten = 660000
Units: Antriebskosten für BEV in Euro
- (28) Anschaffungskosten o = 660000
Units: Antriebskosten für BEV in Euro
- (29) "Anzahl des Personals für Güter- und Warenumsschlag" =
"Personalbedarf zur Be- und Entladung" *
(1-Personalqualifikation Aufsicht und Führung)
Units: Anzahl des Personals für Güter- und Warenumsschlag
- (30) Anfangsbestand der Infrastrukturkosten = $1.767e + 09 +$
 $(7000 * \text{Anfangsbestand der Verkehrsunfälle}) + (5000 * 10000)$
Units: Infrastrukturkosten in Euro
- (31) Anfangsbestand der Personalkosten in der Warenübergabe =
 $((\text{Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und}$
 $\text{Führung} * 62500) + (\text{"Anfangsbestand des Personals für}$
 $\text{Güter- und Warenums Schlag"} * 37500)) / 8000$
Units: Personalkosten in Euro
- (32) Anfangsbestand fahrerloser Fahrzeuge = 10
Units: Anzahl Fahrerlose Fahrzeuge
- (33) Anfangsbestand manueller Fahrzeuge = 218454
Units: Anzahl Manuelle Fahrzeuge
- (34) Annuität = $\text{SIMULTANEOUS}(\text{Fahrzeugkosten} * ((1 + 0.02)^6) *$
 $(0.02) / (((1 + 0.02)^6) - 1), \text{Hilfsvariable})$
Units: Annuität für BEV in Euro
- (35) Ausgangsbasis der CO₂e aller Dieselfahrzeuge =
 $(\text{CO}_2\text{e eines Dieselfahrzeugs} * (93384 * \text{Anfangsbestand der}$
 $\text{Sattelzugmaschinen})) / 1e + 06$
Units: Emissionen in t CO₂e aller Diesel
- (36) Bestand der BEV = $\text{SIMULTANEOUS}(\text{Anfangsbestand}$
 $\text{der Sattelzugmaschinen} * ((\text{Marktdurchdringung fahrerloser}$
 $\text{Fahrzeuge} * 0.25) + (\text{Veränderungseffekt der Fahrzeug-}$
 $\text{fahrleistung} * 0.5) + (\text{Veränderungseffekt der Infrastruktur-}$
 $\text{kosten} * -0.25)), \text{Hilfsvariable})$
Units: Anzahl Batterieelektrische Fahrzeuge

- (37) Bestand der Dieselfahrzeuge = Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen * (1 - ((Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge * 0.25) + (Veränderungseffekt der Fahrzeug-fahrleistung * 0.5) + (Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten * -0.25)))
 Units: Anzahl Dieselfahrzeuge
- (38) Bestand fahrerloser Fahrzeuge = INTEG (Umwandlung, Anfangsbestand fahrerloser Fahrzeuge)
 Units: Anzahl Fahrerlose Fahrzeuge
- (39) Bestand manueller Fahrzeuge = INTEG (-Umwandlung, Anfangsbestand manueller Fahrzeuge)
 Units: Anzahl Manuelle Fahrzeuge
- (40) CO₂e aller BEV = CO₂e eines BEV * (93384 * Bestand der BEV)
 Units: Emissionen in g CO₂e
- (41) CO₂e aller Dieselfahrzeuge = CO₂e eines Dieselfahrzeugs * (93384 * Bestand der Dieselfahrzeuge)
 Units: Emissionen in g CO₂e aller Diesel
- (42) CO₂e eines BEV = 0
 Units: Emissionen in g CO₂e / km
- (43) CO₂e eines Dieselfahrzeugs = 877.1
 Units: Emissionen in g CO₂e / km
- (44) Durchschnittliches Jahresgehalt = 66124 + (66124 * Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden)
 Units: Durchschnittliches Jahresgehalt BEV in Euro
- (45) Durchschnittliches Jahresgehalt 0 = 66124
 Units: Durchschnittliches Jahresgehalt BEV in Euro
- (46) Effekt der Kaufsättigung
 ((0,0)-(10,10)], (0,0.05), (2,2.05), (4,4.05), (6,6.05))
 Units: Dmnl
- (47) Fahrzeugauslastung = IF THEN ELSE
 ((Genutzter Rauminhalt + ((Genutzter Rauminhalt * Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) * 0.4) + ((Genutzter Rauminhalt * Veränderungseffekt der Fahrzeug-fahrleistung) * 0.2) + ((Genutzter Rauminhalt *

Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * -0.2) +
 ((Genutzter Rauminhalt * Veränderungseffekt der
 TCO) * 0.2)) > 1,1, (Genutzter Rauminhalt + ((Genutzter Raum-
 inhalt * Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) *
 0.4) + ((Genutzter Rauminhalt * Veränderungseffekt der
 Fahrzeugfahrleistung) * 0.2) + ((Genutzter Rauminhalt *
 Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * -0.2) +
 ((Genutzter Rauminhalt * Veränderungseffekt der TCO) * 0.2)))
 Units: Auslastung des Rauminhalts in Prozent

(48) Fahrzeugfahrleistung = (Anfangsbestand der Fahrzeugfahr-
 leistung) + ((Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung *
 Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) * 0.23) +
 ((Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung * Veränderungseffekt
 der Lieferzuverlässigkeit) * 0.077) + ((Anfangsbestand der Fahr-
 zeugfahrleistung * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeu-
 ge) * 0.15) + ((Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung *
 Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden) * 0.077) +
 ((Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung * Verände-
 rungseffekt der TCO) * -0.077) + ((Anfangsbestand der
 Fahrzeugfahrleistung * Veränderungseffekt des Stauaufkom-
 mens) * -0.15) + ((Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung *
 Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung) * -0.15) +
 ((Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung * Veränderungseffekt
 der Infrastrukturkosten) * -0.077)

Units: Fahrzeugfahrleistung in km

(49) Fahrzeugkosten = Anschaffungskosten + Technologiekosten +
 Umrüstkosten für Warenübergabe
 Units: Fahrzeugkosten für BEV in Euro

(50) Fahrzeugkosten o = Anschaffungskosten o
 Units: Fahrzeugkosten für BEV in Euro

(51) Fixe Kosten o = Annuität o + Energiesteuer o +
 Versicherungskosten o
 Units: Fixe Kosten für BEV in Euro

- (52) Genutzte Fläche mit einem Sicherheitsabstand von 20 m =
SIMULTANEOUS (((16,5 + 20)*
Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen) / 1000)*
((Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung* -0.22) +
(Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung* 0.11) +
(Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge* 0.22) +
(Veränderungseffekt des Stauaufkommens* -0.22) +
(Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten* 0.22)),
Hilfsvariable)
Units: Genutzte Fläche in km
- (53) Genutzte Fläche mit einem Sicherheitsabstand von 50 m =
(((16.5 + 50)* (Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen)) / 1000)*
(1 - ((Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung* -0.22) +
(Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung* 0.11) +
(Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge* 0.22) +
(Veränderungseffekt des Stauaufkommens* -0.22) +
(Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten* 0.22)))
Units: Genutzte Fläche in km
- (54) Genutzter Rauminhalt = 224018 / Mögliche Transportleistung
Units: Auslastung des Rauminhalts in Prozent
- (55) Gesamtanzahl der Lieferungen = 105,702
Units: Anzahl Lieferungen in Mio
- (56) Hilfsvariable = 0
Units: Dmnl
- (57) Infrastrukturkosten = Kosten für Erhalt und Neubau +
Kosten für Stellplatzflächen + Kosten für Verkehrsunfälle +
Kosten für Vernetzungstechnologie + Kosten für Ladesäulen
Units: Infrastrukturkosten in Euro
- (58) Infrastrukturnutzung = (Genutzte Fläche mit einem
Sicherheitsabstand von 50 m + Genutzte Fläche mit einem
Sicherheitsabstand von 20 m)
Units: Genutzte Fläche in km
- (59) Kaufbereitschaft = (Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) +
(Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage* 0.22) +
(Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung* 0.22) +

(Veränderungseffekt der Schnittstellentechnologien * 0.11) +
 (Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden * -0.22) +
 (Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung * -0.11) +
 (Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten * -0.11)
 Units: Dmnl

(60) Kaufsättigung = Effekt der Kaufsättigung (Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge)

Units: Dmnl

(61) Kosten für die Warenübergabe = (Personalkosten in der Warenübergabe + Kosten für Schnittstellentechnologie + Kosten für Ladeinfrastruktur) + (((Personalkosten in der Warenübergabe + Kosten für Schnittstellentechnologie + Kosten für Ladeinfrastruktur) * Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) * 0.077) + (((Personalkosten in der Warenübergabe + Kosten für Schnittstellentechnologie + Kosten für Ladeinfrastruktur) * Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung) * 0.077) + (((Personalkosten in der Warenübergabe + Kosten für Schnittstellentechnologie + Kosten für Ladeinfrastruktur) * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * 0.154)

Units: Kosten für Warenübergabe in Euro

(62) Kosten für Erhalt und Neubau = $1.767e + 09 + ((1.767e + 09 * \text{Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung}) * 0.14) + ((1.767e + 09 * \text{Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung}) * -0.07) + ((1.767e + 09 * \text{"Veränderungseffekt der THG-Emissionen"}) * 0.07) + ((1.767e + 09 * \text{Veränderungseffekt des Stauaufkommens}) * 0.07)$

Units: Kosten für Erhalt und Neubau in Euro

(63) Kosten für Ladeinfrastruktur = $100000 * \text{Veränderungseffekt der Antriebstechnologie}$
 Units: Kosten für Ladeinfrastruktur in Euro

(64) Kosten für Ladesäulen = $1.2e + 09 * \text{Veränderungseffekt der Antriebstechnologie}$
 Units: Kosten für Ladesäulen in Euro

- (65) Kosten für Schnittstellentechnologie = $100000 * \text{Veränderungseffekt der Schnittstellentechnologien}$
 Units: Schnittstellentechnologiekosten Immobilie in Euro
- (66) Kosten für Stellplatzflächen = $(10000 * 5000) + ((10000 * 5000) * \text{Veränderungseffekt des Stellplatzbedarfs})$
 Units: Kosten in Euro pro Jahr
- (67) Kosten für Verkehrsunfälle = $7000 * \text{Verkehrsunfälle}$
 Units: Kosten in Euro pro Jahr
- (68) Kosten für Vernetzungstechnologie = $2.34e + 08 * \text{Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge}$
 Units: Kosten in Euro pro Jahr
- (69) Lieferzuverlässigkeit = $\text{Anzahl einwandfreier Lieferungen} / \text{Gesamtanzahl der Lieferungen}$
 Units: Lieferzuverlässigkeit in Prozent
- (70) Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge = $\text{Bestand fahrerloser Fahrzeuge} / (\text{Bestand manueller Fahrzeuge} + \text{Bestand fahrerloser Fahrzeuge})$
 Units: Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge in Prozent
- (71) Mögliche Transportleistung = 392407
 Units: Mögliche Transportleistung in Mio tkm
- (72) "Personalbedarf zur Be- und Entladung" = $(\text{Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung} + \text{"Anfangsbestand des Personals für Güter- und Warenums Schlag"}) + (((\text{Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung} + \text{"Anfangsbestand des Personals für Güter- und Warenums Schlag"}) * \text{Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage}) * 0.22) + (((\text{Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung} + \text{"Anfangsbestand des Personals für Güter- und Warenums Schlag"}) * \text{Veränderungseffekt der Schnittstellentechnologien}) * -0.33) + (((\text{Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung} + \text{"Anfangsbestand des Personals für Güter- und Warenums Schlag"}) * \text{Veränderungseffekt der Personalqualifikation}) * -0.11) + (((\text{Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung} + \text{"Anfangsbestand des Personals für Güter- und Warenums Schlag"}) * \text{Marktdurchdringung fahrerloser$

- Fahrzeuge) * 0.22) + (((Anfangsbestand des Personals für Aufsicht und Führung + "Anfangsbestand des Personals für Güter- und Warenumsschlag") * Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden) * -0.11)
 Units: Anzahl des Personals zur Be und Entladung
- (73) Personalkosten σ = Durchschnittliches Jahresgehalt σ
 Units: Personalkosten für BEV in Euro
- (74) Personalkosten in der Warenübergabe = (("Anzahl des Personals für Güter- und Warenumsschlag" * 37500) + (Anzahl des Personals für Aufsicht und Führung * 62500)) / 8000
 Units: Personalkosten zur Be und Entladung in Euro
- (75) Personalqualifikation Aufsicht und Führung = Anteil des Personals für Aufsicht und Führung + ((Anteil des Personals für Aufsicht und Führung * Veränderungseffekt der Schnittstellentechnologien) * 0.67) + ((Anteil des Personals für Aufsicht und Führung * Veränderungseffekt des Personalbedarfs) * -0.33)
 Units: Personalqualifikation in Prozent
- (76) SAVEPER = TIME STEP
 Units: Jahr [0,?]
- (77) Schnittstellentechnologien = SIMULTANEOUS (Anteil der Schnittstellentechnologien + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage) * 0.08) + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Veränderungseffekt der Lieferzuverlässigkeit) * 0.08) + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Veränderungseffekt des Personalbedarfs) * -0.17) + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Veränderungseffekt der Personalqualifikation) * 0.08) + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Veränderungseffekt der Kosten für die Warenübergabe) * 0.17) + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * 0.25) + ((Anteil der Schnittstellentechnologien * Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden) * -0.17),
 Hilfsvariable)
 Units: Automatisierungstechnologie in der Warenübergabe in Prozent

- (78) Stauaufkommen = SIMULTANEOUS (Anfangsbestand der Verkehrsstärke + ((Anfangsbestand der Verkehrsstärke * Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung) * 0.18) + ((Anfangsbestand der Verkehrsstärke * Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung) * -0.09) + ((Anfangsbestand der Verkehrsstärke * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * -0.18) + ((Anfangsbestand der Verkehrsstärke * Veränderungseffekt der Verkehrsunfälle) * 0.27) + ((Anfangsbestand der Verkehrsstärke * Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung) * 0.18) + ((Anfangsbestand der Verkehrsstärke * Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten) * -0.09), Hilfsvariable)
 Units: Anzahl Verkehrsteilnehmende pro Jahr pro km
- (79) Stellplatzbedarf = SIMULTANEOUS (Anfangsbestand der Stellplatzfläche + ((Anfangsbestand der Stellplatzfläche * Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung) * 0.14) + ((Anfangsbestand der Stellplatzfläche * Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung) * -0.14) + ((Anfangsbestand der Stellplatzfläche * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * -0.29) + ((Anfangsbestand der Stellplatzfläche * Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden) * 0.29) + ((Anfangsbestand der Stellplatzfläche * Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten) * 0.14), Hilfsvariable)
 Units: Stellfläche in km²
- (80) Straßentransportnachfrage = Anfangsbestand des Transportaufkommens + ((Anfangsbestand des Transportaufkommens * Veränderungseffekt der Lieferzuverlässigkeit) * 0.33) + ((Anfangsbestand des Transportaufkommens * Veränderungseffekt der TCO) * -0.33) + ((Anfangsbestand des Transportaufkommens * Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung) * -0.17) + ((Anfangsbestand des Transportaufkommens * Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten) * -0.17)
 Units: Transportaufkommen in Mio t

- (81) "Summe der THG-Emissionen" = (CO₂e aller BEV + CO₂e aller Dieselfahrzeuge)
 Units: Emissionen in g CO₂e
- (82) TCO eines BEV = (Fixe Kosten + Personalkosten + Variable Kosten) + (((Fixe Kosten + Personalkosten + Variable Kosten) * Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung) * 0.12) + (((Fixe Kosten + Personalkosten + Variable Kosten) * Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung) * -0.12)
 Units: TCO für BEV in Euro
- (83) Technologiekosten = (21588 * (Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge))
 Units: Technologiekosten für BEV in Euro
- (84) "THG-Emissionen" = ("Summe der THG-Emissionen" + (("Summe der THG-Emissionen" * Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung) * 0.27) + ("Summe der THG-Emissionen" * Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung) * -0.09) + (("Summe der THG-Emissionen" * Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge) * -0.09) + ("Summe der THG-Emissionen" * Veränderungseffekt des Stauaufkommens) * 0.18) + ("Summe der THG-Emissionen" * Veränderungseffekt des Stellplatzbedarfs) * -0.09) / 1e + 06
 Units: Emissionen in t CO₂e
- (85) TIME STEP = 1
 Units: Jahr [0,?]
- (86) Umrüstkosten für Warenübergabe = (5000 * (Marktdurchdringung fahrerloser Fahrzeuge))
 Units: Umrüstkosten für Warenübergabe in Euro
- (87) Umwandlung = Bestand manueller Fahrzeuge * Kaufbereitschaft * (1 - Kaufsättigung)
 Units: Fahrzeuge / Jahr
- (88) Variable Kosten = Energiekosten + "Reparatur- und Wartungskosten"
 Units: Variable Kosten für BEV in Euro

- (89) Variable Kosten $o = \text{Energiekosten } o + \text{"Reparatur- und Wartungskosten } o"$
 Units: Variable Kosten für BEV in Euro
- (90) Veränderungseffekt der Antriebstechnologie =
 SIMULTANEOUS ((Bestand der BEV / Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen), Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (91) Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden =
 SIMULTANEOUS ((Anzahl der Berufskraftfahrenden / Anfangsbestand der Berufskraftfahrende) - 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (92) Veränderungseffekt der Fahrzeugauslastung =
 (Fahrzeugauslastung / Genutzter Rauminhalt) - 1
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (93) Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung =
 SIMULTANEOUS ((Fahrzeugfahrleistung / (Anfangsbestand der Fahrzeugfahrleistung)) - 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (94) Veränderungseffekt der Infrastrukturkosten =
 SIMULTANEOUS ((Infrastrukturkosten / Anfangsbestand der Infrastrukturkosten) - 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (95) Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung =
 SIMULTANEOUS ((Infrastrukturnutzung / Verfügbare Autobahnkilometer) - 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (96) Veränderungseffekt der Kosten für die Warenübergabe =
 SIMULTANEOUS ((Kosten für die Warenübergabe / Anfangsbestand der Personalkosten in der Warenübergabe) - 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (97) Veränderungseffekt der Liefertreue =
 SIMULTANEOUS ((Liefertreue / 0.8) - 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent

- (98) Veränderungseffekt der Personalqualifikation =
 (Personalqualifikation Aufsicht und Führung /
 Anteil des Personals für Aufsicht und Führung) – 1
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (99) Veränderungseffekt der Schnittstellentechnologien =
 SIMULTANEOUS (((Schnittstellentechnologien /
 Anteil der Schnittstellentechnologien) – 1), Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (100) Veränderungseffekt der Straßentransportnachfrage =
 SIMULTANEOUS ((Straßentransportnachfrage /
 Anfangsbestand des Transportaufkommens) – 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (101) Veränderungseffekt der TCO = SIMULTANEOUS
 (((TCO eines BEV / (Anfangsbestand der TCO eines BEV) – 1)),
 Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (102) "Veränderungseffekt der THG-Emissionen" =
 ("THG-Emissionen" / Ausgangsbasis der CO₂e aller
 Dieselfahrzeuge) – 1
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (103) Veränderungseffekt der Verkehrsunfälle = SIMULTANEOUS
 ((Verkehrsunfälle / Anfangsbestand der Verkehrsunfälle) – 1,
 Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (104) Veränderungseffekt des Personalbedarfs = SIMULTANEOUS
 (("Personalbedarf zur Be- und Entladung" / ("Anfangsbestand des
 Personals für Güter- und Warenumschlag" + Anfangsbestand des
 Personals für Aufsicht und Führung)) – 1, Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (105) Veränderungseffekt des Stauaufkommens = SIMULTANEOUS
 ((Stauaufkommen / Anfangsbestand des Verkehrsstärke) – 1,
 Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent

- (106) Veränderungseffekt des Stellplatzbedarfs = SIMULTANEOUS
 ((Stellplatzbedarf / Anfangsbestand der Stellplatzfläche) - 1,
 Hilfsvariable)
 Units: Veränderungseffekt in Prozent
- (107) Verfügbare Autobahnkilometer = $((16.5 + 50) * \text{Anfangsbestand der Sattelzugmaschinen}) / 1000$
 Units: Verfügbare Autobahnkilometer in km
- (108) Verkehrsunfälle = SIMULTANEOUS (Anfangsbestand der
 Verkehrsunfälle + ((Anfangsbestand der Verkehrsunfälle *
 Veränderungseffekt der Fahrzeugfahrleistung) * 0.2) +
 ((Anfangsbestand der Verkehrsunfälle * Marktdurchdringung
 fahrerloser Fahrzeuge) * -0.3) + ((Anfangsbestand der Verkehrs-
 unfälle * Veränderungseffekt der Berufskraftfahrenden) * 0.1) +
 ((Anfangsbestand der Verkehrsunfälle * Veränderungseffekt des
 Stauaufkommens) * 0.2) + ((Anfangsbestand der Verkehrsunfälle *
 Veränderungseffekt der Infrastrukturnutzung) * 0.1) +
 ((Anfangsbestand der Verkehrsunfälle * Veränderungseffekt der
 Infrastrukturkosten) * -0.1), Hilfsvariable)
 Units: Anzahl Verkehrsunfälle
- (109) Versicherungskosten = $0.015 * \text{Anschaffungskosten}$
 Units: Versicherungskosten für BEV in Euro
- (110) Versicherungskosten o = $0.015 * \text{Anschaffungskosten o}$
 Units: Versicherungskosten für BEV in Euro

Die Idee eines fahrerlosen Fahrzeugs fasziniert die Menschen bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts. Zunächst waren die Fahrzeuge ferngesteuert. Dann setzte sich immer mehr die Idee des autonomen, sich selbst steuernden Fahrzeugs durch, das sich ohne menschliches Einwirken vom Start bis zum Ziel bewegt. Obwohl das fahrerlose Fahren Optimierungspotenziale für die Logistikbranche verspricht, werden in der bestehenden Literatur die Wirkungen im Logistiksystem bislang kaum berücksichtigt. Diese Arbeit hat zum Ziel, das Wirkungsgefüge des fahrerlosen Fahrens im Logistiksystem zu verstehen, um unerwünschte Wirkungen des fahrerlosen Fahrens zu reduzieren.

Basierend auf einer strukturierten Literaturanalyse wird ein dreistufiger Modellansatz, bestehend aus Wortmodell, Zukunftsmodell und Gestaltungsmodell, angewendet, der die Wirkungen sowohl qualifiziert als auch quantifiziert. Mithilfe eines eigens entwickelten Simulationsmodells wird die Wirkung des fahrerlosen Fahrens auf 17 Variablen im Logistiksystem ermittelt. Durch gezielte Anpassungen des Modells wird die Ableitung von Gestaltungsoptionen ermöglicht, mit denen die relevanten Akteure des Logistiksystems unerwünschte Wirkungen aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Perspektive reduzieren können.

