

Technische Universität Braunschweig

Institut für Verkehrssystemtechnik

Bachelorarbeit

zum Thema

Vergleichende wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes konventioneller und selbstfahrender Fahrzeugeinheiten im ÖPNV

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Betreuer: M.Sc. Kathrin Viergutz

Ausgabetermin: 22.Juli 2016

Abgabetermin: 22. Oktober 2016

Vorgelegt von:
Philipp Nikolaus Loos
Otto-Hahn-Weg 4
38302 Wolfenbüttel
Matrikel-Nr.: 4189963

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation der Arbeit	1
1.2 Stand der Forschung und Technik	2
1.3 Zielsetzung der Arbeit	4
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Motivation autonomes Fahren	6
2.1.1 Steigerung der Verkehrssicherheit	6
2.1.2 Steigerung der Energieeffizienz	8
2.1.3 Steigerung der Produktivität und Wertschöpfung	10
2.1.4 Erhöhung der Verfügbarkeit individueller Mobilität	11
2.2 Grundlagen des autonomen Fahrens	12
2.2.1 Stufen des autonomen Fahrens	12
2.2.2 Grundlagen Fahrerassistenzsysteme	15
2.2.2.1 Umfeldsensorik	16
2.2.2.2 Fahrerassistenzsysteme für autonomes Fahren	21
2.3 Beschreibung und Definition der Fahrzeugeinheiten	25
2.3.1 Beschreibung konventioneller Bus	28
2.3.1.1 Aufgaben des Fahrpersonals	29
2.3.2 Beschreibung autonomer Bus	30
2.4 Wirtschaftlichkeit	32
2.4.1 Methoden und Bewertungssystem	32
2.4.2 Sensitivitätsanalyse	33

2.4.3 Betriebskosten im ÖPNV	34
2.4.3.1 Rahmenbedingungen und Grundgrößen	34
2.4.3.2 Kapitalkosten	36
2.4.3.3 Personalkosten	37
2.4.3.4 Werkstattkosten	38
2.4.3.5 Kraftstoffkosten	39
2.4.3.6 Sonstige Kosten	40
3 Einfluss von autonomen Bussen auf die Betriebskosten	41
3.1 Kapitalkosten	41
3.2 Personalkosten	43
3.3 Werkstattkosten	45
3.4 Kraftstoffkosten	46
3.5 Sonstige Kosten	46
4 Entwicklung eines Vergleichsszenarios	47
4.1 Linie 422	48
4.2 Linie 420	50
4.3 Vergleich der Kostenbestandteile für das konventionelles und autonome System	51
4.3.1 Ergebnisse der Linie 422	52
4.3.2 Ergebnisse der Linie 420	61
5 Bewertung und Diskussion	69
5.1 Zusammenfassung	71
5.2 Ausblick	72
6 Literaturverzeichnis	74
Anhang	82
Eidesstattliche Erklärung	96

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
ACC	Adaptive Cruise Control
Aufl.	Auflage
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BRT	Bus Rapid Transit
bzw.	beziehungsweise
d	Tag
dGPS	Differential Global Positioning System
et al.	et alii
FAS	Fahrerassistenzsystem
f.	folgende
ff.	fortfolgende
Fz	Fahrzeug
ggf.	gegebenenfalls
GPS	Global Positioning System
h	Stunden
Hrsg.	Herausgeber
KOM	Kraftimnibus
LDWS	Lane Departure Warning System
LKAS	Lane Keep Assist System
LRR	Long Range Radar
M	Mitarbeiter
o.J.	ohne Jahresangabe
o.V.	ohne Verfasserangabe
S.	Seite
tsd.	tausend
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Mercedes-Benz Future Bus	3
Abbildung 2.1:	Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Personen in tsd. ..	7
Abbildung 2.2:	Stufen des automatisierten Fahrens	13
Abbildung 2.3:	MAN Lion´s City LE 12m	27
Abbildung 2.4:	MAN Lion´s City GL LE	28
Abbildung 4.1:	Jahresbetriebskosten der Linie 422 pro Fz-Km.....	57
Abbildung 4.2:	Kostenstruktur konventioneller Bus der Linie 422	58
Abbildung 4.3:	Kostenstruktur autonomer Bus der Linie 422	59
Abbildung 4.4:	Sensitivitätsanalyse der Anschaffungskosten Linie 422	60
Abbildung 4.5:	Jahresbetriebskosten der Linie 420 pro Fz-Km.....	65
Abbildung 4.6:	Kostenstruktur konventioneller Bus.....	66
Abbildung 4.7:	Kostenstruktur autonomer Bus	67
Abbildung 4.8:	Sensitivitätsanalyse der Anschaffungskosten Linie 420	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2:	Sensorik und FAS	24
Tabelle 2.3:	Kennzahlen verschiedener Verkehrsgebiete	35
Tabelle 4.1:	Annahmen für das Szenario	48
Tabelle 4.2:	Eigenschaften der Linie 422	49
Tabelle 4.3:	Eigenschaften der Linie 420	51
Tabelle 4.4:	Jahresbetriebskosten der Linie 422	52
Tabelle 4.5:	Kapitalkosten der Linie 422	54
Tabelle 4.6:	Personalkosten der Linie 422	55
Tabelle 4.7:	Werkstattkosten der Linie 422	56
Tabelle 4.8:	Kraftstoffkosten der Linie 422	56
Tabelle 4.9:	sonstige Kosten der Linie 422	57
Tabelle 4.10:	Jahresbetriebskosten der Linie 420	61
Tabelle 4.11:	Kapitalkosten der Linie 420	62
Tabelle 4.12:	Personalkosten der Linie 420	63
Tabelle 4.14:	Kraftstoffkosten der Linie 420	64
Tabelle 4.15:	sonstige Kosten der Linie 420	65

1 Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

Das autonome Fahren ist neben der Entwicklung alternativer Antriebe das größte Forschungsgebiet in der Automobilbranche, was auch der Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur Alexander Dobrindt mit folgender Aussage zur dieser Technologie unterstreicht: *„Das automatisierte und vernetzte Fahren ist die größte Mobilitätsrevolution seit der Erfindung des Autos. [...]“* (vgl. BMVI 2016).

Die Bedeutung dieser neuen Technologie liegt in den zahlreichen Vorteilen, die autonome Fahrzeuge bieten können.

Der Mensch als Fehlerquelle kann für Unfälle weitgehend ausgeschlossen werden, da menschliches Versagen zu etwa 92% der Grund für Verkehrsunfälle ist (vgl. Statistisches Bundesamt 2016b).

Ein weiterer Vorteil liegt in der Erschließung von Potentialen zur Kostenreduzierung, die mit der Automatisierung des Fahrbetriebes einhergehen. Durch vorausschauende Fahrweise kann der Kraftstoffverbrauch deutlich gesenkt werden. Die EU Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen für Personenkraftwagen sieht eine Reduzierung dieser Emissionen von 20 % bis 2020 vor (vgl. Europäische Union 2009). Autonome Fahrzeuge können damit durch ihren geringeren Kraftstoffverbrauch einen wesentlichen Beitrag zu diesen Zielen leisten.

Der Betrieb ohne Fahrer stellt ein weiteres Potential zur Senkung der Kosten dar. Für Verkehrsunternehmen im Nahverkehr oder Logistikunternehmen sind autonome Fahrzeuge daher von großem Interesse. Hohe Personalkosten für die Fahrer können durch fahrerlose Fahrzeuge signifikant reduziert werden. Gerade für Verkehrsunternehmen im ÖPNV, welche trotz Zuschüssen aus öffentlicher Hand eine preiswerte Nahverkehrsdienstleistung oft nicht wirtschaftlich anbieten können, eröffnet diese Technologie große Potentiale. Dem gegenüber stehen jedoch die deutlich höheren zu erwartenden Anschaffungskosten.

Dies alles wird Einfluss auf die Gewichtung der Kostenfaktoren und damit der Kostenstruktur für den Busverkehr im ÖPNV haben, was zwangsläufig zu neuen Betriebsprozessen und möglicherweise zu neuen Geschäftsmodellen führen wird.

1.2 Stand der Forschung und Technik

Inzwischen befinden sich in Serienfahrzeugen zahlreiche Fahrerassistenzsysteme, die einen teilautomatisierten Betrieb ermöglichen. Das System „Autopilot“ im Tesla Model S ist das System mit den umfangreichsten Funktionen, das auf Autobahnen ein teilautomatisiertes Fahren bereits heute ermöglicht. Nach Aktivierung des Systems hält das Tesla Model S selbstständig die Geschwindigkeit, den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und folgt dem Straßenverlauf (vgl. Tesla Motors 2016).

Auch in Bussen für den Fernverkehr haben sich Fahrerassistenzsysteme für das teilautomatisierte Fahren durchgesetzt. In aktuellen Fahrzeugen, wie beispielsweise dem Mercedes-Benz Travego sind eine Vielzahl unterstützender Systeme verfügbar. Nicht nur komfortfördernde Systeme wie eine Stop-and-Go Abstandsregelung, die ein selbständiges Abbremsen und Anfahren im stockenden Verkehr ermöglicht, sondern auch sicherheitsfördernde Systeme wie ein Spurverlassenswarner oder ein Notbremsassistent sind bereits erhältlich (vgl. Mercedes-Benz 2016).

Weder Hersteller von Nutzfahrzeugen noch von Automobilen bieten aktuell fahrerlose Fahrzeuge in der Serie an. Sie sind noch Bestandteil der Forschung. In der Entwicklung von autonomen Bussen hat sich der Hersteller Daimler Buses als Vorreiter etabliert. Mit der 2016 vorgestellten Studie Mercedes-Benz Future Bus (Abbildung 1) zeigt der Hersteller den aktuellen Stand seiner fahrerlosen Technologie. Der Future Bus fährt in Amsterdam autonom auf einer 20 km langen separaten Busspur (BRT, Bus Rapid Transit) bis zu 70 km/h schnell und kann selbstständig Zentimetergenau an Ampeln und Haltestellen anhalten. Auch das Öffnen und Schließen der Türen wird von dem Bus automatisch getä-

tigt. Ein Fahrer überwacht den Verkehr und das gesamte System und kann im Notfall eingreifen. Damit ist der Future Bus der weltweite erste Stadtbuss, der im realen Verkehr automatisiert fährt.



Abbildung 1: Mercedes-Benz Future Bus
Quelle: Mercedes-Benz

Möglich macht dies erst das von Mercedes entwickelte CityPilot System. Als CityPilot bezeichnet Daimler Buses das technische System, welches dem Future Bus ein teilautonomes Fahren auf einer BRT Strecke ermöglicht. Es verbindet die bereits in Serie verfügbaren einzelnen Fahrerassistenzsysteme ACC, Notbremsassistent, Spurhalteassistent, Spurwechselassistent und die Verkehrszeichenerkennung zu einem teilautonomen System. Für das CityPilot System benötigt der Future Bus eine Vielzahl an Sensoren. Für die eigene Positionserkennung nutzt das Fahrzeug ein satellitengestütztes dGPS-Ortungssystem sowie eine Spurkamera und vier Kameras zur globalen visuellen Lokalisierung. Dies ermöglicht eine exakte Positionserkennung.

Für die Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer sind vier Nahbereichsradarsensoren für die Fußgängererfassung mit einer Reichweite von 10m verbaut. Unterstützt werden sie zusätzlich durch Stereokameras, die eine Fußgänger- und Fahrzeugerkennung auf einer Distanz von 60m ermöglichen. Um Fahrzeuge auf eine größere Distanz zu detektieren, verfügt der Bus über ein Fernbe-

reichsradar mit einer Reichweite von 200m (vgl. Daimler AG o.J. und EvoBus GmbH o.J.).

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine wirtschaftliche Bewertung über den Einsatz autonomer Busse zu erstellen. Dafür werden die Jahresbetriebskosten anhand zweier existierender Buslinien ermittelt. Es wird ein konventioneller fahrergesteuerter Bus mit einem fahrerlosen Bus verglichen. Um Grundlagen für Annahmen und Prognosen der Kostenfaktoren eines fahrerlosen Busses treffen zu können, werden zunächst die Kostenbestandteile der Betriebskosten eines konventionellen Busses ermittelt.

Dieser Vergleich soll den Einfluss von autonomen Bussen auf die Kostenstrukturen für den Betrieb einer Busflotte im ÖPNV aufzeigen. Anhand dieser Ergebnisse werden Handlungsempfehlungen für die Planung und Betrieb fahrerloser Fahrzeugeinheiten abgeleitet.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus insgesamt fünf Kapiteln. Kapitel 1 beinhaltet eine Einleitung zu der Thematik und Kapitel 2 erläutert die theoretischen Grundlagen. Dabei werden zum einen die Motivation und die Technologie von autonomen Fahrzeugen dargestellt und zum anderen wirtschaftliche Grundlagen der jährlichen Betriebskosten eines Unternehmens im ÖPNV veranschaulicht. Der Einfluss von autonomen Bussen auf die einzelnen Kostenbestandteile wird in Kapitel 3 untersucht und erläutert.

Kapitel 4 beinhaltet ein Vergleichsszenario, indem die Eignung zweier Linien der Braunschweiger Verkehrs-GmbH hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit für eine autonome Busflotte untersucht wird. Dazu wird für beide Linien jeweils eine Auflistung der Kostenbestandteile für eine konventionelle und autonome Busflotte vorgestellt.

Es folgt eine Bewertung und Diskussion der Ergebnisse, um im Anschluss

Handlungsempfehlungen für die Planung autonomer Busflotten im ÖPNV geben zu können. Zum Schluss folgt ein Ausblick zum autonomen Fahren im ÖPNV.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Motivation autonomes Fahren

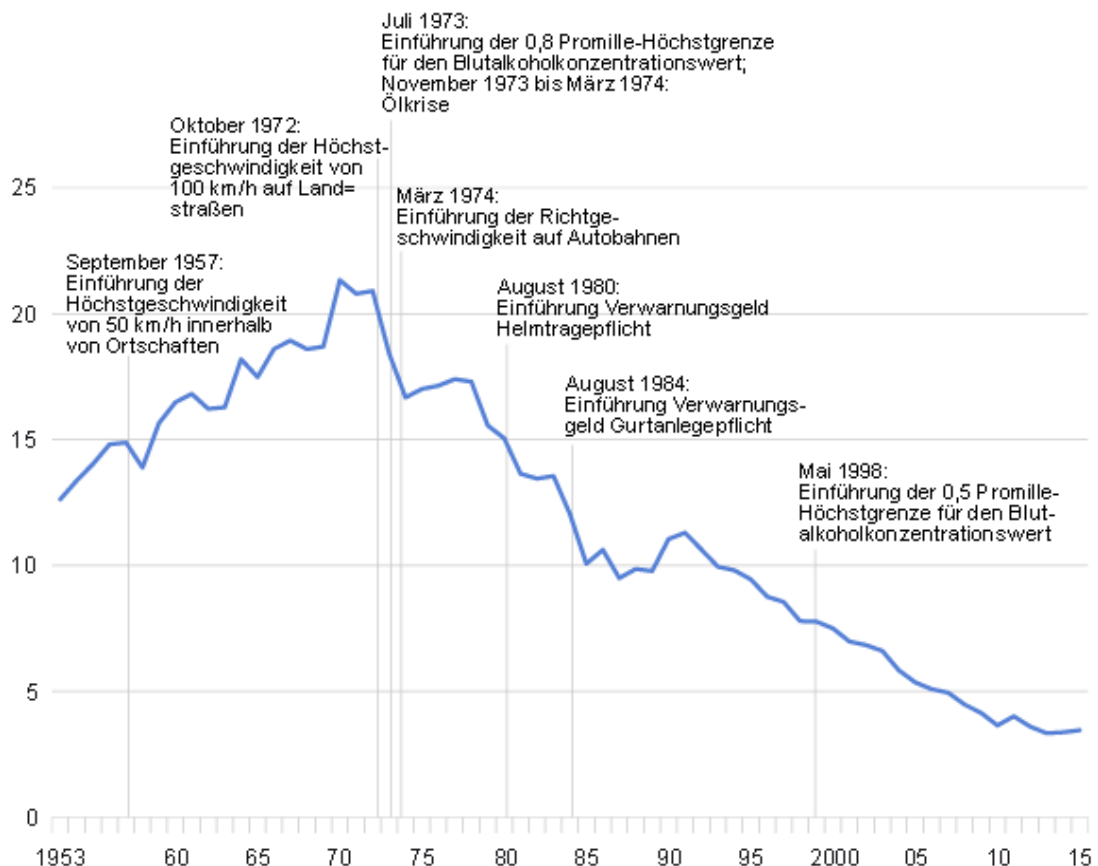
Autonomes Fahren ist in der Automobilbranche eines der größten Forschungsgebiete. Eine Vielzahl an Fahrerassistenzsystemen, welche Vorreiter für das autonome Fahren sind, wurden in den letzten Jahren bis zur Serienreife entwickelt. Die Motivation dieser Entwicklung sind die Potentiale, die Fahrerassistenzsysteme und letztlich auch das autonome Fahren bieten. Diese lassen sich in vier Kategorien einteilen, die hier folgend erläutert werden.

2.1.1 Steigerung der Verkehrssicherheit

Die Steigerung der Verkehrssicherheit ist ein Hauptargument für einen höheren Automatisierungsgrad im Straßenverkehr. Die Zahl der Verkehrsunfälle und getöteten Personen im Straßenverkehr ist trotz zunehmender Verkehrsleistung seit 1970 kontinuierlich gesunken. Trotzdem dokumentierte die Polizei 2015 über 2,5 Millionen Verkehrsunfälle auf deutschen Straßen. Darin waren 396.891 Personen verwickelt und 3459 verstarben (vgl. Statistisches Bundesamt 2016a). Die häufigste Unfallursache war dabei mit 92% das Fehlverhalten der Fahrzeugführer (vgl. Statistisches Bundesamt 2016b). Besonders gefährdet sind die „schwachen“ Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer, die etwa 25% der tödlich verunglückten Personen ausmachen.

Entwicklung der Zahl der im Straßenverkehr Getöteten

Tsd.



© Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2016

Abbildung 2.1: Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Personen in tsd.
Quelle: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

Fahrerassistenzsysteme können helfen, diese Zahlen zu reduzieren. In der Abbildung 2.1 ist ein deutlicher Rückgang der getöteten Personen im Straßenverkehr in den letzten 15 Jahren festzustellen. Um diesen Trend fortzusetzen, können Fahrerassistenzsysteme und autonome Fahrzeuge einen wichtigen Beitrag leisten. Mithilfe einer verstärkten Vernetzung der Verkehrsteilnehmer durch

Car-to-X Kommunikation und einer Vielzahl an Sensoren in automatisierten Fahrzeugen können Unfälle vermieden werden. Eine Studie des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) stellte 2011 fest, dass Fahrerassistenzsysteme (FAS) hohe theoretische Sicherheitspotentiale besitzen. Bei den Personenkraftwagen ermittelte die Studie Potentiale von 2% durch Totwinkelwarner und bis zu 45% durch Notbremssysteme bei Unfällen mit Personenschäden und Sachschäden über 15000€. Wie in der Tabelle 2.2 abgebildet, wurden auch für Busse Potentiale von 1% durch einen Spurverlassenswarner und bis zu 15% für einen Notbremsassistenten festgestellt (vgl. Hummel 2011).

FAS	Sicherheitspotential
Notbremsassistent	8,9%
Notbremsassistent (reagiert auf stehende Fahrzeuge)	15,1%
Abbiegeassistent für Radfahrer und Fußgänger	2,3%
Spurverlassenswarner	0,5%
Totwinkelwarner	3,8%

Tabelle 2.1: Sicherheitspotential von FAS bezogen auf alle Bussunfälle
Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Hummel 2011, S. 56

Eine Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen hin zu autonomen Fahrzeugen könnte noch weitere Sicherheitspotentiale eröffnen, da weiteres Fehlverhalten wie z.B. Fahren unter Alkoholeinfluss oder verkehrswidrige Straßenbenutzung ausgeschlossen werden können.

2.1.2 Steigerung der Energieeffizienz

Ein weiteres wichtiges Motiv für einen automatisierten Straßenverkehr und autonomes Fahren ist die potentielle Steigerung der Energieeffizienz und damit die Möglichkeit, die CO₂-Emissionen zu senken. Autonome und vernetzte Fahrzeuge sind in der Lage, durch eine vorausschauende Fahrweise ihren

Kraftstoffverbrauch und damit auch den Ausstoß von Schadstoffen zu reduzieren. Dies wird ermöglicht, indem die Fahrzeuge durch ihre Sensorik und Kommunikation mit anderen Fahrzeugen und Verkehrsanlagen eine optimale Strategie für das Bremsen und Beschleunigen entwickeln. Dadurch werden Beschleunigungs- und Bremsspitzenwerte vermieden, die häufig bei manueller Fahrzeugführung aufgrund von unaufmerksamer Fahrweise zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch führen (vgl. Winner et al. 2015, S. 1025).

Ein Anwendungsbeispiel dafür ist das so genannte Platooning von LKW bei dem mehrere Fahrzeuge autonom in sehr geringem Abstand hintereinander fahren. Möglich ist dies durch ein ACC System in Verbindung mit Car-2-Car Kommunikation. Durch die kontinuierliche Kommunikation zwischen den Fahrzeugen können die automatischen Bremssysteme schneller reagieren und innerhalb eines verkürzten Sicherheitsabstandes bremsen. Eine gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit und Ausnutzung des Windschattens des vorausfahrenden Fahrzeug erlauben Kraftstoffeinsparungen von bis zu 15 % ohne Einschränkung der Verkehrssicherheit (vgl. Meyer 2013). Zusätzlich kann dadurch der Verkehrsfluss erheblich gesteigert werden.

Das EU Projekt SARTRE untersuchte 2012 das Platooning von einem LKW und drei PKW auf einer spanischen Autobahn mit einer Geschwindigkeit von bis zu 90 km/h. Dabei konnte neben der Reduzierung des Energieverbrauchs eine Erhöhung der Fahrbahnapazität um den Faktor 4 festgestellt werden (Jootel 2012). Einen ähnlichen Effekt konnte Proff durch eine Simulation mit 16 Fahrzeugen auch im Stadtverkehr aufzeigen. Die Anzahl der passierenden Fahrzeuge verdoppelte sich sogar bei nicht kommunizierenden autonomen Fahrzeugen (vgl. Proff 2014, S. 274 ff.).

Durch einen besseren Verkehrsfluss können Staus und zäher Verkehr vermieden und somit auch der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden, da im Stop-and-Go-Verkehr der Verbrauch etwa doppelt so hoch ist wie im fließenden Verkehr bei 130 km/h (vgl. acatech 2015).

Ähnliche Potentiale ermittelte u.a. auch Becker, der von einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei automatisierten Fahren auf Autobahnen von 10 % bis

20 % ausgeht (vgl. Becker 2014).

Morgan Stanley erwartet sogar eine Steigerung der Energieeffizienz von bis zu 30% (vgl. Morgan Stanley 2015).

Weitere Potentiale können sich durch eine intelligente Routenwahl basierend auf der aktuellen Verkehrslage ergeben.

2.1.3 Steigerung der Produktivität und Wertschöpfung

Aus den Vorteilen und den beiden ersten Motiven bietet das autonome Fahren eine Perspektive, die volkswirtschaftliche Wertschöpfung und die Produktivität durch neue innovative Geschäftsmodelle zu steigern. Diese Tatsache ist besonders für Mobilitätsdienstleister von Interesse.

Die bereits genannten Effizienzsteigerungen führen neben dem positiven Einfluss auf den Schadstoffausstoß zu einer Reduzierung der Kraftstoffkosten, welche auf 10-30% prognostiziert werden. Damit lassen sich auch die Kraftstoffkosten im selben Umfang reduzieren und so auch die Betriebskosten senken.

Die gestiegene Verkehrssicherheit führt zu weniger Verkehrsunfällen und so auch zu geringeren Unfallkosten. Auf deutschen Straßen waren 2013 Unfallkosten in Höhe von geschätzten 32 Milliarden Euro entstanden (vgl. acatech 2015). Eine Vielzahl der Unfälle ließe sich vermeiden, da sie zu 92% auf ein Fehlverhalten des Fahrers zurückzuführen sind. Nach einem Bericht des Fraunhofer-Instituts lassen sich mit heutigen Systemen allerdings nur 34,2 bis 58,9% der Unfälle auf Autobahnen vermeiden, da diese Zahl an Unfällen innerhalb der heutigen Systemgrenzen für Witterung und Lichtverhältnisse stattfinden (vgl. Cacilo 2015, S.269). Gleichwohl entstehen dadurch geringere Unfallkosten, was sich auf die Versicherungsprämien von autonomen Fahrzeugen auswirkt und somit die Betriebskosten ebenfalls senken kann.

Im Jahr 2015 kam es auf deutschen Autobahnen zu einer Staulänge von insgesamt 1,1 Millionen km (vgl. Statista 2016). Steigende Verkehrsleistung und die zunehmende Anzahl an Fahrzeugen auf deutschen Straßen sind nur zwei

Gründe dafür. Seit 2007 leben erstmals mehr Menschen in der Stadt als auf dem Land (vgl. VDA 2015). Gerade im städtischen Verkehr sind die Folgen der Urbanisierung am deutlichsten zu erkennen. Durchschnittlich steht ein Autofahrer in Deutschland jährlich 38 Stunden im Stau. Im Großraum Stuttgart steigt die Zahl auf 73 Stunden jährlich (vgl. INRIX 2016). Eine Studie vom Center of Economics & Business Research (Cebr) ermittelte in Deutschland für 2013 Staukosten von 33,5 Milliarden \$ (25,6 Milliarden €, Kursdatum 01.07.2013). Diese Kosten sollen bis 2030 kumuliert auf 691,3 Milliarden \$ (529,2 Milliarden €, Kursdatum 01.07.2013) anwachsen (vgl. Cebr 2014, S. 5f). Autonome Fahrzeuge helfen, den Verkehrsfluss durch Kapazitätserhöhung bei gleicher Infrastruktur zu erhöhen und Staus durch weniger Unfälle zu vermeiden.

Die Zeit, die ein Autofahrer im Stau verbringt, könnte zudem effektiver genutzt werden, da die Fahraufgabe entfällt und die gewonnene Zeit für Arbeit oder Freizeit genutzt werden kann.

Weitere Potentiale für eine Steigerung der Wertschöpfung ergeben sich durch das Entstehen neuer Dienstleistungen und Märkte für innovative Mobilitätslösungen im Straßenverkehr. Der Trend des Car-Sharings könnte durch autonome Fahrzeuge weiter ausgebaut werden. Auch sind autonome Sammeltaxis oder Fahrzeuge für den ÖPNV, die ihre Kunden nach Bestellung per Smartphone App abholen, vorstellbar. Der Fahrdienst Uber testet bereits mit teilautonomen Fahrzeugen einen möglichen Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen für ihre Mobilitätsdienstleistung. Bisher sind jedoch noch ein Fahrer und eine weitere Person zum Protokollieren der Fahrt notwendig (vgl. Spiegel Online 2016). Die Entwicklung neuer Mobilitätslösungen bringt die Chance für traditionelle Automobilhersteller und Zulieferer sowie Anbietern von Software und Mobilitätsdiensten ihr Produktportfolio gemeinsam zu erweitern (vgl. acatech 2015).

2.1.4 Erhöhung der Verfügbarkeit individueller Mobilität

Trotz der zu erwartenden Landflucht in den nächsten Jahren, wird doch ein Teil der Bevölkerung im ländlichen Raum leben. Leere Busse auf ländlichen Linien

stehen einem wirtschaftlichen Einsatz im Wege. Dies führt zu einer weiteren Verschlechterung von Mobilität auf dem Land durch Reduzierung der Taktzeiten oder gar durch entfallen von Linien.

Gerade ältere Menschen oder Kinder werden dadurch in ihrer individuellen Mobilität eingeschränkt. Autonome Fahrzeuge können diesen Menschen helfen, ihre Mobilität zu erhöhen und am sozialen Leben teilzunehmen. Für Verkehrsunternehmen bieten autonome Kleinbusse die Möglichkeit, flexible Taktzeiten mit geringen Betriebskosten zu vereinen. Durch die geringeren Kosten können Verkehrsunternehmen die schlechte Infrastruktur in ländlichen Regionen verbessern. Autonome Fahrzeuge in Verbindung mit dem ÖPNV können durch eine gesteigerte individuelle Mobilität den Individualverkehr reduzieren und die Infrastruktur entlasten (vgl. acatech 2015).

2.2 Grundlagen des autonomen Fahrens

In dem folgenden Kapitel werden die Grundlagen des autonomen Fahrens erläutert. Zunächst wird eine Abgrenzung zu den verschiedenen Automatisierungsgraden vorgenommen. Im Anschluss folgt eine Einführung in die Grundlagen der Fahrerassistenzsysteme, in der die benötigte Umfeldsensorik und der Funktionsumfang einzelner Fahrerassistenzsysteme erläutert werden.

2.2.1 Stufen des autonomen Fahrens

Moderne Fahrzeuge besitzen heute schon eine Reihe von Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer beim Führen des Fahrzeuges helfen und die Sicherheit erhöhen. Diese Systeme unterstützen den Fahrer durch Informationen, Warnungen oder durch aktives Eingreifen in den Fahrbetrieb. Mit steigender Anzahl verschiedener Fahrerassistenzsysteme steigt auch der Grad der Automatisierung, da diese einzelne Fahraufgaben übernehmen und der Fahrer entlastet wird. Dieser Grad reicht von manuell geführten Fahrzeugen bis zu komplett fahrerlosen Fahrzeugen ohne Bedienmöglichkeiten für einen Fahrer. Um die verschiedenen Stufen der Automatisierung voneinander abzugrenzen, wurde vom

Verband der Automobilindustrie (VDA) eine einheitliche Abstufung der Automatisierung von Fahrzeugen ausgearbeitet. Diese basiert auf den etablierten Kategorisierungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen 2012) und den Automatisierungsstufen der Society of Automotive Engineers (SAE) (vgl. SAE J3016).

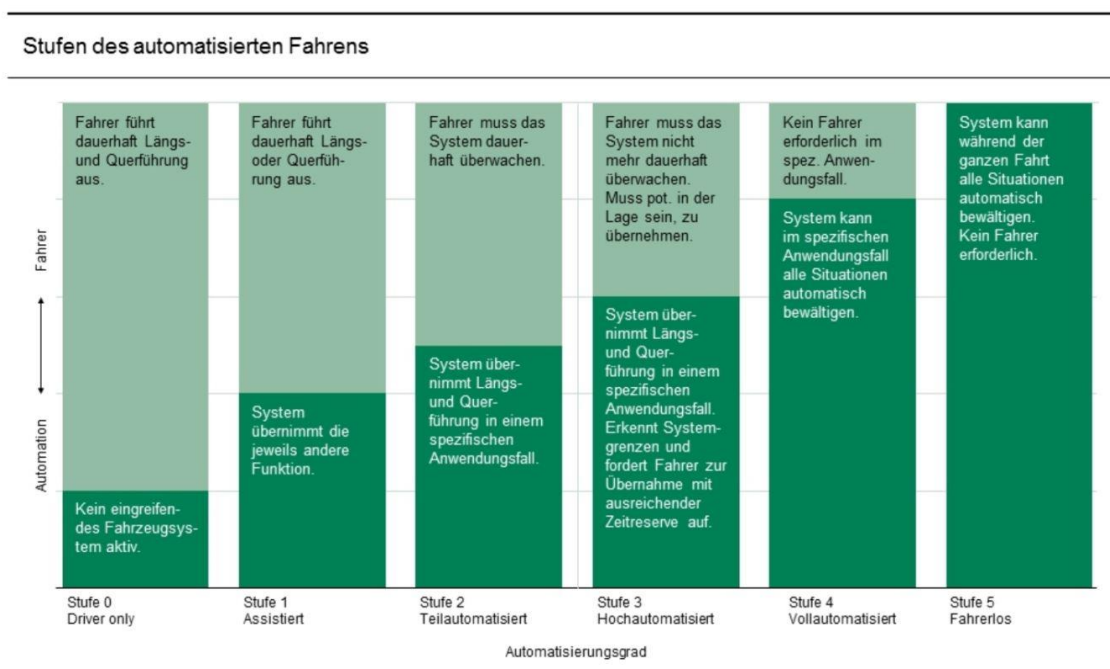


Abbildung 2.2: Stufen des automatisierten Fahrens
Quelle: VDA 2016

Dazu wurde eine Einteilung in sechs Stufen von 0 bis 5 vorgenommen. Innerhalb dieser sechs Stufen wird genau abgegrenzt, welche Aufgaben bzw. Anforderungen an einen Fahrer gestellt werden und welche Aufgaben von einem technischen System selbst übernommen werden (siehe Abbildung 2.2).

Stufe 0: Diese Stufe wird als „driver only“ bezeichnet. Der Fahrer muss dauerhaft die Längs- und Querführung ausüben. Die Längsführung bezeichnet in diesem Fall die Steuerung der Geschwindigkeit mithilfe des Gas- und Bremspedals. Die Querführung wird mit dem Lenkrad gesteuert. In der Stufe 0 gibt es keine eingreifenden Systeme. Es können jedoch warnende Systeme aktiv sein.

Stufe 1: In der Stufe 2 kann entweder die Längs- oder Querführung von einem System übernommen werden. Der Fahrer nimmt die jeweils andere Fahraufgabe dauerhaft wahr. Die Bezeichnung dieser Stufe ist „assistiert“.

Die Längsführung kann in Stufe 1 beispielsweise von dem System Adaptiv Cruise Control (ACC) übernommen werden. Ein Spurhalteassistent (LKAS) kann die Aufgabe der Querführung dauerhaft übernehmen.

Stufe 2: In Stufe 2, auch „teilautomatisiert“ genannt, werden Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall vom System übernommen. Der Fahrer muss lediglich das System dauerhaft überwachen und in der Lage sein, die Steuerung des Fahrzeugs zu übernehmen. Die spezifischen Anwendungsfälle werden durch Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen bestimmt.

Die Stufe 2 wird beispielsweise mit einem Stauassistenten erreicht. Dieser kombiniert die Systeme ACC und LKAS in einem spezifischen Anwendungsfall, wie z.B. in einem Stau und bis zu einer begrenzten Geschwindigkeit. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist der Parkassistent, welcher ein automatisches fahrerinitiiertes Ein- und Ausparken ermöglicht.

Stufe 3: In der Stufe 3, „hochautomatisiert“, muss der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen. Allerdings muss er potenziell in der Lage sein, die Fahraufgabe innerhalb einer Zeitreserve zu übernehmen.

Das System kann in Stufe 3 Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall übernehmen und erkennt selbst-

ständig Systemgrenzen, bei denen das System den Fahrer auffordert, das Führen des Fahrzeugs zu übernehmen.

Heutige Systeme sind technisch schon dazu in der Lage, jedoch müssen dafür rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Stufe 4: In der „vollautomatisierten“ Stufe 4 ist kein Fahrer mehr notwendig. Die komplette Fahraufgabe wird vom System in einem spezifischen Anwendungsfall übernommen.

Stufe 5: Die Stufe 5 wird auch „fahrerlos“ bezeichnet. Das Fahrzeug kann mithilfe seiner Systeme alle Fahraufgaben vollumfänglich und in jedem Anwendungsfall übernehmen. Ein Fahrer ist nicht notwendig. In fahrerlosen Fahrzeugen ist ein Eingreifen durch einen Fahrer nicht vorgesehen.

2.2.2 Grundlagen Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme lassen sich in die drei Kategorien A, B und C einteilen. (vgl. Winner et al. 2015, S.32-42).

Informierende Systeme werden der Kategorie A zugeteilt. Diese Systeme unterstützen den Fahrer bei der Fahrzeugsteuerung, indem sie informieren und warnen. Der Fahrer muss selbständig eine Handlung ausführen. Unterschieden wird zusätzlich, ob das System Informationen darstellt, die der Fahrer hätte selbst wahrnehmen können oder den Bereich der Wahrnehmung erweitert. Beispiele für Fahrerassistenzsysteme der Kategorie A sind Müdigkeitserkennung, Einparkhilfe, Verkehrszeichenerkennung und Reifendruckkontrollsysteme.

Die Kategorie B beschreibt kontinuierlich wirkende automatisierende Fahrerassistenzsysteme. Systeme der Kategorie B können Fahraufgaben, z. B. Längs- oder Querführung, selbstständig ausüben und den Fahrer entlasten. Der Auto-

omatisierungsgrad wurde durch die BAST- Projektgruppe bewertet (siehe 2.2.1). ACC und Spurhalteassistent sind Beispiele für die Kategorie B.

Systeme der Kategorie C sind eingreifende Notfallsysteme. Sie überwachen die Umgebung während der Fahrt und unterstützen den Fahrer in Situationen, in denen er entweder nicht oder nur zeitverzögert reagiert. Falls der Fahrer keine in der Situation angemessene Handlung durchführt, greift das System ein.

2.2.2.1 Umfeldsensorik

Damit Fahrerassistenzsysteme ihre Funktionen ausführen können, benötigen sie genaue Informationen über ihre Umwelt und der aktuellen Fahrsituation. Ein menschlicher Fahrer nutzt dazu seine Sinne Sehen, Hören und Tasten. Einem technischen System stehen diese Sinne nicht zur Verfügung. Daher benötigt ein Fahrerassistenzsystem eine Vielzahl an technischen Sensoren, die die Umgebung erfassen. Für ein autonomes Fahrzeug ist es zudem wichtig, dass die verschiedenen Sensoren miteinander verknüpft sind. Dadurch können die Nachteile, die einige Sensoren haben, ausglichen werden und genauere Messungen durchgeführt werden. Die Schwierigkeit für die Entwickler ist es, die komplexen Sensoren und Systeme miteinander zu verbinden und die gemessenen Daten aus Radar-, Lidar- und Kamerasensoren zu synchronisieren. In dem folgenden Kapitel werden die wichtigsten Sensoren und Systeme, die für ein autonomes Fahrzeug benötigt werden, kurz vorgestellt und ihre Funktionsweise erklärt.

Ultraschall

In der Automobilindustrie werden für Einparkhilfen zur Objekterkennung Ultranahbereichs-Sensoren in Ultraschalltechnik verwendet. Diese Art von Sensoren haben eine Reichweite von bis zu 4,5m (vgl. Braess 2013, S.932f). Gängige Ultraschallsensoren besitzen einen horizontalen Öffnungswinkel von 120° bis 140° und einen vertikalen Öffnungswinkel von 60° bis 70° und arbeiten in einem Frequenzbereich von 40 bis 50 kHz (vgl. Winner et al. 2015, S.247ff). Um einen großen Bereich abzudecken, sind Ultraschallsensoren im Front- und

Heckbereich, sowie teilweise an den Fahrzeugseiten verbaut.

Ein Nachteil dieser Technik ist, dass die hochfrequenten Schallwellen der Sensoren durch ebenfalls hochfrequente Ultraschallquellen aus der Umgebung gestört werden, die z.B. von Druckluftbremsen in Nutzfahrzeugen emittiert werden. Auch bei schlecht reflektierenden Oberflächen kann eine fehlerfreie Detektion nicht gewährleistet werden (vgl. Maurer et al. 2015, S.616).

Radar

Für Abstandmessungen in großen Distanzen werden üblicherweise Radarsensoren genutzt. Radar ist die Abkürzung für Radio Detection and Ranging.

Das System sendet gebündelte elektromagnetische Wellen aus, welche durch metallische oder reflektierende Materialien als Signalecho zurückgeworfen werden und in das Empfangsteil des Radarsensors treffen. Anhand der Laufzeit dieses Signales kann der Abstand zu dem Objekt gemessen werden.

Neben dem Abstand kann auch die Relativgeschwindigkeit zu vorausfahrenden Objekten ermittelt werden. Als Messmethode hierfür wird der Doppler-Effekt genutzt. Bei sich zum Radarsensor relativ bewegenden Objekten kommt es zu einer Frequenzverschiebung des Echos gegenüber dem ausgestrahlten Signal. Durch diese Frequenzverschiebung lässt sich die Relativgeschwindigkeit einfach und schnell berechnen. Bei den relevanten Geschwindigkeitsbereichen und einer Radarfrequenz von 76,5 GHz beträgt die Phasenverschiebung 510 Hz bei 1m/s Relativgeschwindigkeit.

Zusätzlich können als dritte Messgröße die Winkel des Radarobjektes bestimmt werden. Dafür sendet das System entweder mehrerer „Radarkeulen“ aus oder scannt einen Bereich mit einem einzelnen Radarstrahl ab (vgl. Reif 2010, S. 133ff.).

Radarsensoren werden in der Fahrzeugtechnik in zwei Gruppen eingeteilt.

Das so genannte Long Range Radar (LRR) arbeitet in einem Frequenzbereich von 76-77 GHz.

Die Entfernungsmessung funktioniert beim Long Range Radar zuverlässig bis

250m und bei hohen Geschwindigkeiten (vgl. Braess 2013, S. 933).

Nahbereichsradarsensoren oder auch Short Range Radar arbeiten mit 24Ghz. Dieses System sendet seine elektromagnetischen Wellen, im Gegensatz zu dem Long Range Radar, in sehr kurzen Impulsen aus und besitzt einen Messbereich von 0,25-50 m. Dieses System hat den Vorteil einer hohen Messgenauigkeit von wenigen Zentimetern bei einer Messentfernung von 1,5 m. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit, kurzen Reichweite und den kurzen Messzyklen wird das Short Range Radar für Pre-Crash Systeme eingesetzt (vgl. Reif 2010, S. 139). Pre-Crash-Systeme bereiten das Fahrzeug auf einen bevorstehenden Unfall vor, um die Folgen eines Unfalls abzumildern. Erkennt das System einen unumgänglichen Unfall, werden je nach Ausstattung verschiedene Sicherheitsmechanismen ausgeführt Dazu gehört beispielsweise eine Straffung der Sicherheitsgurte und die Sitzverstellung in eine sichere Sitzposition (vgl. Reif 2010, S. 187).

Lidar

Lidar ist die Abkürzung von Light Detection and Ranging und ist eine mit dem Radar verwandte Technik. Zur Ortung und Messung der Entfernung von Objekten nutzt Lidar jedoch im Vergleich zu Radartechnik keine Mikrowellen, sondern Laserstrahlen. Diese Laserstrahlen bestehen aus Ultraviolett-, Infrarot- oder Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts (vgl. Winner et al. 2015, S318ff). Im Automotivbereich werden meist Infrarotstrahlen mit einer Wellenlänge zwischen 800 und 1000nm genutzt (vgl. Braess 2013, S.933). Als übliches Messverfahren wird das Licht-Laufzeitverfahren genutzt. Damit lassen sich Entfernungen von Objekten und die Relativgeschwindigkeit zu diesen ermitteln. Neben der Ortung und Entfernungsmessung sind Lidar Sensoren in der Lage, einige Zusatzfunktionen darzustellen. Dazu gehören eine Sichtweitenmessung, Tag/Nacht-Erkennung, Erkennung des Verschmutzungsgrads der Sensoreinheit, Geschwindigkeitsermittlung, Fahrverhalten und Fahrzustandserkennung und Objektausdehnung (vgl. Winner et al. 2015, S. 329f.).

Kamera

Zur wichtigsten Sensortechnik für Fahrerassistenzsysteme haben sich Kamerasysteme entwickelt. Einzug in Kraftfahrzeuge haben Kamerasysteme mit der Einführung von Rückfahrkameras genommen. Im Gegensatz zu aktuellen Systemen dienen Rückfahrkameras nur zur Erfassung und Wiedergabe des Fahrzeugumfeldes in Echtzeit und vergrößern damit den Sichtbereich des Fahrers. Neuere Kamerasysteme können dagegen das Bildmaterial auswerten und Fahrbahnbegrenzungen, Gegenstände oder Verkehrsteilnehmer erkennen.

Im Frontbereich arbeitende Kamerasensoren werden als Frontview-Kameras bezeichnet. Sie sind entweder hinter der Windschutzscheibe oder im Kühlergrill verbaut und ermöglichen so ein großflächiges Blickfeld in Fahrtrichtung. Sie werden entweder in Monokamera oder in doppelter Ausführung als Stereokamera eingesetzt. Stereokameras erhöhen die Auflösung und den Sichtbereich um etwa 10-20% (vgl. Braess 2013, S. 942).

Für eine 360 Grad Ansicht werden Surround View-Kamerasysteme benötigt. Dafür werden je nach Größe des Fahrzeugs vier oder mehr Kameras rund um das Fahrzeug verbaut. Für ein großes Blickfeld sind die Kameras mit Weitwinkelobjektiven, auch Fisheye-Objektive genannt, ausgestattet. Die eingehenden Videosignale werden in einer Verarbeitungseinheit zusammengefügt und wiedergegeben. Diese Rundumsicht kann das Einparken für den Fahrer erleichtern oder bietet einem autonomen Fahrzeug die Möglichkeit, die Kamerabilder zu Objektdetektion zu nutzen.

Die meisten eingesetzten Kameras arbeiten im sichtbaren Spektralbereich und können damit in einem ähnlichen Umfang wie das menschliche Auge die Umwelt erfassen. Für den Einsatz bei Dunkelheit eignen sich herkömmliche Kamerasysteme aufgrund ihrer eingeschränkten Lichtempfindlichkeit nicht. Um auch bei schlechten Lichtverhältnissen Kamerasensorik einsetzen zu können, müssen daher Kameras für den infraroten Spektralbereich verbaut werden. Diese sind in der Lage, auch bei völliger Dunkelheit verwertbare Videoqualität zu liefern.

Die Anforderungen, die an die Kamerasysteme gestellt werden sind hoch. Sie

müssen in der Lage sein, Farben zu unterscheiden. Dies ist bei der Fahrzeugerkennung wichtig, um Frontscheinwerfer von Rücklichtern unterscheiden zu können. Außerdem lassen sich durch Farbunterschiede auch Fahrbahnmarkierungen erkennen und von andersfarbigen Markierungen in Baustellen unterscheiden. Besonders für die Verkehrszeichenerkennung ist eine hohe Auflösung von mehr als 15 Pixeln/Grad wichtig, damit Verkehrszeichen erkannt werden können. Zudem müssen durch die hohen Geschwindigkeiten auf Autobahnen kurze Belichtungszeiten von unter 30ms erreicht werden. (vgl. Winner et al. 2015, S. 347 ff.)

GPS

Für ein autonomes Fahrzeug ist es von großer Wichtigkeit, zu jedem Zeitpunkt Informationen über den Fahrzustand zu erhalten. Kameras und Radarsensoren helfen dem autonomen Fahrzeug, seine Umwelt zu wahrzunehmen. Für eine genau Ortung eignen sie sich jedoch nicht. Für die Positionsbestimmung wird das Ortungssystem GPS, Global Positioning System, genutzt. Dieses besteht aus 24 militärischen US-Satelliten, welche 50-mal pro Sekunde auf einer Frequenz von 1,57542 GHz spezielle Positions-, Identifikations- und Zeitsignale senden. Die sich im Fahrzeug befindlichen GPS- Empfangsmodule berechnen mittels der Laufzeiten von mindestens drei Satelliten eine geographische Position (vgl. Reif 2010, S. 193f.).

Die Genauigkeit eines solchen Systems beträgt etwa 3-5 m (vgl. Reif 2010, S. 194). Diese Genauigkeit reicht für Navigationsanwendungen aus. Allerdings ist bei fahrerlosen Fahrzeugen eine höhere Genauigkeit erforderlich, um sie sicher im Straßenverkehr zu bewegen. Um die Präzision zu erhöhen, wurde das Differential-GPS entwickelt. Das System wird durch eine ortsfeste lokale GPS-Basisstation erweitert, die Korrekturdaten der GPS-Signale im Abstand von 1 Sekunde an den GPS-Empfänger im Fahrzeug überträgt. Die Basisstation korrigiert die zeitliche Drift in den Satellitensignalen und steigert dadurch die Genauigkeit auf ± 2 cm (vgl. Winner et al. 2015, S. 210).

2.2.2.2 Fahrerassistenzsysteme für autonomes Fahren

Fahrerassistenzsysteme sind die Grundlage für autonome Fahrzeuge. Heute schon ermöglichen die vorgestellten Systeme in ihrer Kombination teilautomatisiertes Fahren. Um die Stufe des autonomen Fahrens zu erlangen, müssen die Vielzahl der bereits existierenden Systeme miteinander verknüpft werden, damit sich ein fahrerloses Fahrzeug sicher im Straßenverkehr bewegen kann. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Systeme vorgestellt und beschrieben, die ein autonomes Bussystem im ÖPNV benötigen könnte. Die Auswahl der System erfolgte auf Grundlage der in der Studie Future Bus von Daimler Buses genutzten Assistenzsysteme.

ACC

Die Abkürzung ACC steht für Adaptiv Cruise Control und bezeichnet eine adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung. Dieses System hat die Aufgabe, neben einer eingestellten Sollgeschwindigkeit auch den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu halten und bei Bedarf anzupassen. Falls das ACC ein langsameres vorausfahrendes oder einscherendes Fahrzeug erkennt, greift das System in Antrieb und Bremsen ein und reduziert die Geschwindigkeit, um den gesetzlich geforderten Mindestabstand einzuhalten.

Als Sensorik dienen dem ACC einerseits Radar oder Lidar Sensoren, die Fahrzeuge oder Objekte und deren Fahrspur in einem Abstand von etwa 200m erkennen. Andererseits benötigt das System auch Informationen über die eigene Fahrzeugbewegung, um beispielsweise Relativgeschwindigkeiten zu berechnen. Dazu werden die Signale der Sensoren des ESP (elektronisches Stabilitätsprogramm) genutzt. Zu diesen Sensoren zählen Drehratesensor, Lenkradwindsensor, Querschleunigungssensor und Raddrehzahlsensoren. Aus der Vielzahl an gewonnenen Daten berechnet ein ACC-Steuergerät Beschleunigungs- und Bremseingriffe und kann die Längsführung des Fahrzeugs übernehmen. Durch Ergänzung eines Notbremsassistenten in aktuelle ACC Systemen ist das Fahrzeug in der Lage, bis zum völligen Stillstand autonom zu verzögern. Diese

Funktion wird auch als „Follow-to-Stop“ Funktion bezeichnet. Auch ein selbstständiges Anfahren nach kurzem Stillstand, beispielsweise in einem Stau, ist mit einer „Stop-and-Go“-Funktion heute schon realisierbar (vgl. Reif 2010, S. 158ff.).

Notbremsassistent

Der Notbremsassistent unterstützt den Fahrer in der Gefahrensituation eines bevorstehenden Auffahrunfalls. Das System versucht zunächst, den Fahrer mittels eines Warnsignals auf die akute Gefahr aufmerksam zu machen und leitet bei einer ausbleibenden oder unzureichenden Reaktion des Fahrers eine Teil- oder Vollbremsung automatisch ein. Dadurch können Auffahrunfälle vermieden oder die Unfallfolgen aufgrund der Geschwindigkeitsreduktion gemildert werden.

Die Verkehrssituation wird dabei von bereits verbauter Sensorik, wie Radar- und Kamerasysteme, anderer Fahrerassistenzsysteme erfasst (vgl. Winner et al. 2015, S. 1024f.)

Das Ergebnis einer Studie weist modernen Notbremsassistenten ein Sicherheitspotential von bis zu 45% bei PKW und bis zu 15% für Busse aus (vgl. Hummel 2011). Damit hat dieses System den größten Einfluss auf die Unfallzahlen im Straßenverkehr.

Spurhalteassistent

Der Spurhalteassistent ist die Weiterentwicklung des Systems Spurverlassenswarnung. Die Aufgabe dieser Systeme ist die Erkennung der Fahrbahnmarkierung. Der Spurverlassenswarner (Lane Departure Warning System, kurz LDWS) ist ein Warnsystem und warnt den Fahrer beim Verlassen der Fahrspur durch akustische und/oder haptische Signale. Diese Funktion entlastet den Fahrer und hilft Unfälle durch Unachtsamkeit oder Sekundenschlaf zu vermeiden.

Moderne aktive Spurhalteassistenten (Lane Keep Assist System, kurz LKAS)

unterstützen den Fahrer zusätzlich durch Lenkeingriffe und Reduzierung der Lenkkräfte. Diese Lenkeingriffe können auch permanent erfolgen und ermöglichen in Verbindung mit einem ACC System ein automatisiertes Fahren (Winner et al. 2015, S. 950ff.).

Spurwechselassistent

Der Spurwechselassistent ist ein warnendes Fahrerassistenzsystem, welches die Fahrbahn bei einem Spurwechsel rückwärtig nach herannahenden Fahrzeugen überprüft. Diese Situation tritt ein, wenn der Fahrer, trotz eines Blickes in den Seitenspiegel, ein Fahrzeug im toten Winkel nicht erkennt. Die erste Warnung erfolgt dabei nur durch ein visuelles Signal im Außenspiegel, da diese Fahrsituation häufig auftritt. Das System erkennt einen beabsichtigten Spurwechseln durch die Betätigung des Blinkers. Falls ein beabsichtigter Spurwechsel durch Betätigung des Blinkers erkannt wird und die Fahrbahn nicht frei ist, erfolgt eine Warnung in einer zweiten Stufe. Diese eindringliche Warnung wird durch ein akustisches Signal oder durch eine Vibration im Lenkrad getätigt.

Ein aktiver Spurwechselassistent warnt nicht nur den Fahrer, sondern lenkt auch aktiv gegen den beabsichtigten Spurwechsel, um eine Kollision zu vermeiden.

In der aktuellsten Ausbaustufe dieses Systems wird ein automatischer Spurwechsel allein durch das Betätigen des Blinkers vom Fahrer eingeleitet. Die komplette Lenkbewegung für den Spurwechsel wird von dem System autonom vollzogen. Dieses Fahrerassistenzsystem wird auch als Überhol-Assistent bezeichnet und bietet eine wichtige Unterstützung für das automatisierte Fahren.

Zur Erkennung von Verkehrsteilnehmern werden Short Range Radarsensoren in dem hinteren Stoßfänger und nach hinten gerichtete Kameras genutzt (vgl. Reif 2014, S. 361).

Verkehrszeichenerkennung

Die Verkehrszeichenerkennung ist ein wichtiges System für ein autonomes System. Zwar können die auf der Fahrstrecke befindlichen Verkehrszeichen aus dem Navigationssystem entnommen werden, jedoch sind kurzzeitig aufgestellte Verkehrszeichen möglicherweise noch nicht in das Kartenmaterial eingepflegt. Außerdem bietet eine Verkehrszeichenerkennung eine Absicherung für die Daten aus dem Kartenmaterial.

Verkehrszeichenerkennungssysteme arbeiten mit Mono- oder Stereokameras, wie sie auch für andere Fahrerassistenzsysteme genutzt werden. Während der Fahrt sucht das System die Fahrbahn nach Objekten mit der äußeren Form von Verkehrsschildern ab. Wird ein Verkehrszeichen erkannt, hält das Kamerasystem solange den Fokus auf das mögliche Verkehrszeichen, bis dieses von dem Bildverarbeitungsrechner z.B. als Geschwindigkeitsbeschränkung interpretiert werden kann. Die Erkennung kann zur Visualisierung für den Fahrer im Cockpit dargestellt werden oder direkt an das ACC-System geleitet werden. Dieses passt die Geschwindigkeit ggf. an die neue Situation an. Die Verkehrszeichenerkennung funktioniert zuverlässig bis zu Geschwindigkeiten von 160km/h (vgl. Reif 2010, S. 207f).

Der von Mercedes-Benz vorgestellte Future Bus kann zudem Lichtsignalanlagen erkennen und auf sie reagieren (vgl. EvoBus GmbH o.J.).

bildbasierte FAS	radar- oder lidar-basierte FAS	technologie-übergreifende FAS
Spurverlassenswarnung	ACC	Notbremsassistent
Spurhalteassistent	Stauassistent	Spurwechselassistent
Verkehrszeichenerkennung	Kollisionswarnung	
Nachtsichtsystem		
Rückfahrkamera		
Frontkollisionswarnung		

Tabelle 2.2: Sensorik und FAS
Quelle: eigene Darstellung

In der Tabelle 2.2 ist eine Übersicht über die benötigte Sensorik für bestimmte Fahrerassistenzsysteme abgebildet. Es findet eine Einteilung in bildbasierte FAS, radar- oder lidarbasierte FAS und technologieübergreifende FAS statt.

2.3 Beschreibung und Definition der Fahrzeugeinheiten

Für den folgenden wirtschaftlichen Vergleich muss ein geeignetes Verkehrsmittel gefunden werden. Hierzu müssen die Art, Gefäßgröße und Ausstattung ausgewählt und definiert werden.

Als Verkehrsmittel bezeichnet man ein Fahrzeug, das der Beförderung von Personen oder Gütern dient. Dabei wird zwischen nicht motorisierten Fahrzeugen, wie einem Fahrrad, und motorisierten Fahrzeugen, wie Personenkraftwagen, Kraftomnibusse, Schienenverkehrsmittel, Schiffen und Flugzeugen differenziert (vgl. Schnieder 2015, S.8). Eine weitere Unterscheidung ist durch die Art des Transportgefäßes oder die Art des Antriebes möglich (Springer Gabler Verlag o.J.b).

Im vorliegenden Fall wird ein Kraftomnibus gewählt. Ein Kraftomnibus, kurz KOM, ist ein motorisiertes Landfahrzeug mit mehr als acht Sitzplätzen für Fahrgäste. Gemäß Anhang II der Richtlinie 70/156/EWG unterscheidet man die Klassen M2 und M3. Die Klassen unterscheiden sich nach dem zulässigen Gesamtgewicht. Fahrzeuge der Klasse M2 haben ein zulässiges Gesamtgewicht von bis zu fünf Tonnen, die Klasse M3 über fünf Tonnen.

Weiterhin werden nach der Richtlinie 2001/85/EG Kraftomnibusse, die mehr als 22 Personen befördern können, in drei Klassen unterteilt:

Klasse I:

Fahrzeuge mit Stehplätzen, die der Beförderung von Fahrgästen auf Strecken mit zahlreichen Haltestellen dienen.

Klasse II:

Fahrzeuge, die hauptsächlich zur Beförderung sitzender Fahrgäste gebaut und so ausgelegt

sind, dass die Beförderung stehender Fahrgäste im Gang und/oder in einem Bereich, der nicht größer ist als der Raum von zwei Sitzbänken, möglich ist.

Klasse III:

Fahrzeuge, die ausschließlich für die Beförderung sitzender Fahrgäste gebaut sind.

Zu beachten ist, dass ein Fahrzeug zu mehr als einer Klasse gehören kann. Es kann für jede Klasse genehmigt werden, der es entspricht.

Zur Klasse I gehören in Deutschland typische Stadtbusse. Sie können durch ihre hohe Anzahl an Stehplätzen im Vergleich zu Sitzplätzen eine größere Anzahl an Personen befördern. Dies geht jedoch zu Lasten des Komforts, was von Fahrgästen allerdings auf kurzen Strecken in Kauf genommen wird. Ein typischer Vertreter der Klasse II ist ein Überlandlinienbus. Hier findet sich eine bequemere Bestuhlung mit mehr Sitzplätzen, die den Komfort bei längeren Strecken erhöhen. Zur Klasse III gehören Reisebusse, die aufgrund ihrer Bestuhlung ausschließlich der Beförderung von sitzenden Fahrgästen dienen.

Für die wirtschaftliche Berechnung muss eine Gefäßgröße definiert werden. Die Größe und Bauform eines Busses ist von mehreren Faktoren abhängig. Zu den wichtigsten Faktoren gehört das Fahrgastaufkommen. Dieses entscheidet über die Fahrplatzkapazität des Fahrzeugs. Auf stark frequentierten Linien mit einem hohen Fahrgastaufkommen werden deshalb große Fahrzeuge, wie z.B. ein Einzelgelenkbus mit bis zu 150 Fahrgästen eingesetzt. Es können je nach Bauart und Ausführung des Busses auch bis zu 200 Fahrgäste bei Nutzung eines Doppelgelenkbussen transportiert werden (vgl. Schnieder 2015, S. 61ff.).

Auf den zu untersuchenden Linien werden zwei verschiedene Gefäßgrößen genutzt. Auf der Linie 422 verkehren überwiegend Solobusse mit einer Länge von 12m. Sie werden auch als Standardlinienbusse bezeichnet und sind für ein durchschnittliches Fahrgastaufkommen geeignet (vgl. Schnieder 2015, S. 62).

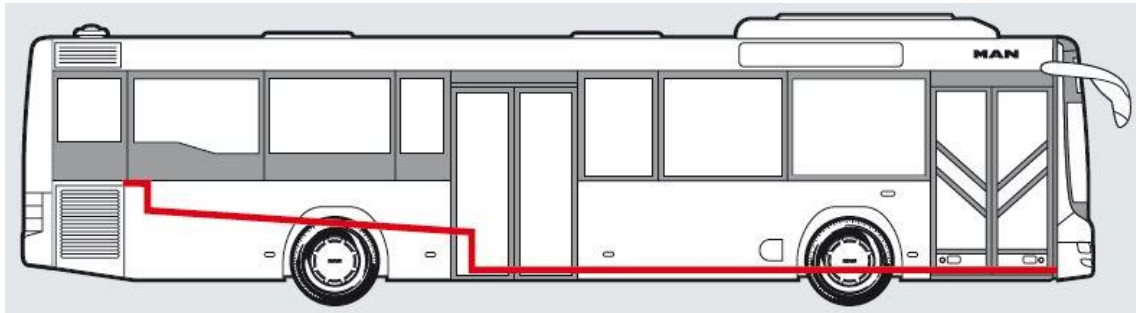


Abbildung 2.3: MAN Lion's City LE 12m
Quelle: MAN 2016

Exemplarisch ist in der Abbildung 2.3 der MAN Lion's City LE 12m abgebildet. Wie bei diesen Bustyp üblich, besitzt das Model zwei Ein- und Ausstiege und bietet 43 Sitz- und 46 Stehplätze (vgl. MAN 2016).

Als Antrieb dienen überwiegend Diesellaggregate, die im Heck des Fahrzeugs verbaut sind. Einige Hersteller bieten zudem alternative Antriebe mit Hybrid- oder Elektrobussen an.

Für die Linie 420 werden aufgrund des höheren Fahrgastaufkommens Einzelgelenkbusse genutzt. Dieser Bustyp weist eine Länge von bis zu 18,75 m auf und besteht aus zwei Teilen, die über ein Gelenk verbunden sind. Das Gelenk ermöglicht dabei trotz einer Länge von 18,75 m einem verhältnismäßig kleinen Wendekreis von 24,4 m (vgl. MAN 2016). Der Vorteil dieser Bauart ist die hohe Fahrgastkapazität, die pro Fahrzeug erreicht werden kann. Bauartbedingt entstehen aufgrund des zweiteiligen Aufbaus Wippbewegungen, die den Fahrgastkomfort verringern können (vgl. Schnieder 2015, S. 63).

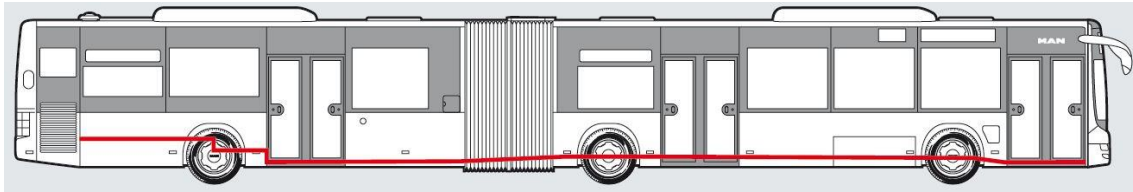


Abbildung 2.4: MAN Lion's City GL LE
Quelle: MAN 2016

Heute kommen überwiegend Stadtbusse mit Niederflurtechnik zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch einen durchgängigen Einstieg von 320-340 mm Millimetern mit einem ebenen und stufenlosen Bodenverlauf und ermöglichen so den einfachen Einstieg der Fahrgäste. Diese Bauweise ist unumgänglich, um die Barrierefreiheit im ÖPNV für Fahrgäste mit einer eingeschränkten Mobilität zu gewährleisten. Zudem besteht die Möglichkeit einer Fahrzeugabsenkung, welche die Einstiegshöhe weiter reduziert. Diese Funktion wird auch als Kneeling bezeichnet (vgl. VDV 2016).

Aufgrund der aufwendigeren Technik für Achsen und Motoreinbau sind Niederflurbusse mit 100% Niederflurböden sehr teuer. Eine Alternative dazu bieten Low-Entry-Busse, bei denen auf einen durchgehend niedrigen Fahrzeugboden verzichtet und nur der Vorderwagen mit Niederflurtechnik versehen wird. Der Hinterwagen ist bei einem allgemein niedrigen Höhenniveau über Stufen zu erreichen (vgl. Reinhardt 2012, S. 330). Low-Entry-Busse bieten demnach einen guten Kompromiss zwischen Fahrkomfort und Kosten.

2.3.1 Beschreibung konventioneller Bus

Der in dieser Arbeit verwendete konventionelle Bus orientiert sich an den aktuell am Markt verfügbaren fahrerbetrieben Stadtlinienbussen. Als Antrieb kommen konventionelle Dieselaggregate zum Einsatz. Die Gefäßgröße richtet sich nach dem Fahrgastaufkommen auf den zu untersuchenden Linien. Derzeit werden von der Braunschweiger Verkehrs-GmbH auf der Linie 422 12m Solobusse und auf der 420 Gelenkbusse genutzt. Beide Fahrzeuge verfügen über die Low-Entry Niederflurtechnik.

Die Ausstattung richtet sich nach den VDV Rahmenempfehlungen für Stadt-Niederflur-Linienbusse und enthält u.a. eine Motorabkapselung, Klimaanlage, Video-Überwachung, Fahrzielanzeiger, Fahrgast-Informationssystem und Sondernutzungsfläche für den Behindertentransport (vgl. VDV 2014).

Leuthart ermittelte die durchschnittlichen Anschaffungskosten auf 250.000 € für den 12m Solobus und 350.000 € für einen Gelenkbus (vgl. Leuthardt 2010).

2.3.1.1 Aufgaben des Fahrpersonals

Neben einem verkehrssicheren und fahrbereiten Bus wird für den Betrieb eines konventionellen Stadtbusses Fahrpersonal benötigt. Dieses hat neben der eigentlichen Fahraufgabe noch andere Aufgaben, die in diesem Kapitel dargestellt werden. Ein autonomer Bus dagegen muss entweder in der Lage sein, alle Aufgaben zu bewältigen oder die Aufgaben, die nicht bewältigt werden können, müssen anderweitig durch Personal erfüllt werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Tätigkeiten des Fahrpersonals genannt (vgl. Arbeitsamt der DG o.J.).

- Bus vor der Abfahrt kontrollieren
- Bus zu einem bestimmten Ziel fahren
- Fahrgäste ein- und aussteigen lassen und ggf. dabei helfen
- Verkauf von Fahrscheinen
- Kontrolle von Fahrscheinen
- Fahrzeug regelmäßig warten und reinigen
- Fahrt protokollieren
- Bei Pannen und Unfällen reagieren

Es lässt sich feststellen, dass zwei Aufgaben von einem autonomen Bus übernommen werden können. Zu diesen Aufgaben zählen das Fahren zu einem bestimmten Ziel und das Protokollieren der Fahrt.

Das Ein- und Aussteigenlassen der Fahrgäste durch ein automatischen Öffnen und Schließen der Türen stellt zunächst auch kein Problem dar. Allerdings kann

älteren Fahrgästen oder Rollstuhlfahrern nicht persönlich geholfen werden. Diese Tatsache kann zu einer Einschränkung für diese Personengruppe führen. Abhilfe schaffen technische Lösungen, die durch das Betätigen eines Knopfes automatisch eine Einstiegshilfe in Form einer Klapprampe ausfahren lassen. Dies ist notwendig, um den Restspalt zwischen Buseinstieg und Bürgersteig zu überbrücken und somit eine Barrierefreiheit nach dem §8 Abs.3 PBefG zu ermöglichen.

Der Verkauf von Fahrscheinen kann bei einem autonomen Bus über einen Fahrkartenautomat erfolgen, welcher sich entweder im Fahrzeug oder an den Haltestellen befindet und ist ohne zusätzliches Personal zu bewerkstelligen. Die Kontrolle der Fahrscheine kann allerdings nicht ohne den Einsatz von Personal erfolgen.

2.3.2 Beschreibung autonomer Bus

Derzeit gibt es keinen seriennahen Bus, der fahrerlos im Straßenverkehr fährt. Als Grundlage dieser Arbeit muss daher ein autonomer Bus beschrieben und in seinen Eigenschaften definiert werden.

Der zu beschreibende autonome Bus muss denselben Anforderungen genügen wie der im Kapitel 2.3.1 beschriebene konventionelle Bus. Dementsprechend sind die Fahrzeuge in Bezug auf die Gefäßgröße und Ausstattung identisch.

Der signifikante Unterschied ist die Steuerung der Fahrzeuge. Ein autonomer Bus muss mit einem technischen System ausgestattet sein, welches einen fahrerlosen Betrieb gemäß der Stufe 5 der VDA Automatisierungsstufen ermöglicht. In dieser Fahrstufe kann ein Fahrzeug alle Fahraufgaben vollumfänglich und jeden Anwendungsfall übernehmen. Es kann auf einen Fahrer verzichtet werden, ohne dass Einschränkungen im Betrieb oder der Sicherheit daraus resultieren.

Um dies zu ermöglichen, muss der fahrerlose Bus mit Sensorik und den dazugehörigen Fahrerassistenzsystemen ausgestattet sein. Als Vorlage dient die Studie Future Bus mit CityPilot von Mercedes-Benz.

Die im Future Bus verbaute Technik eignet sich bisher nur zu einem teilautonomen Fahren mit einem Fahrer. Nach Abschätzung von Rüdiger Kappel, Leiter Vertrieb Deutschland von Mercedes-Benz Omnibusse, ermöglicht die verbaute Technik aus technischer Sicht in Zukunft jedoch auch einen fahrerlosen Betrieb (siehe Anhang 1, persönliche Korrespondenz vom 25. August 2016). Bei Bedarf müssen die Funktionalitäten der Systeme für einen späteren fahrerlosen Einsatz im Straßenverkehr weiter verfeinert werden.

Der in dieser Arbeit genutzte Bus muss mit Sensorik zur Umfelderkennung ausgestattet werden. Dazu werden analog zum Future Bus 10 Kameras, darunter eine Stereokamera, ein Fernbereichs- und vier Nahbereichsradarsensoren benötigt. Zur Positionsbestimmung bedarf es neben den Kameras auch eines satellitengestütztes dGPS-Ortungssystem.

Durch den Entfall des Fahrers muss das Fahrzeug zusätzlich mit technischen Einrichtungen ausgestattet werden, welche bei einem fahrerbetrieoben Bus nicht notwendig wären.

Dazu gehört ein Fahrkartenverkaufssystem, bei dem die Fahrgäste ohne zusätzliches Personal Fahrscheine erwerben können. Dies kann über ein elektronisches Ticketsystem, wie dem bereits in der Praxis genutzten **((eTicket** System, geschehen. Dieses System arbeitet mit einem Kundenkonto, auf dem ein Guthaben geladen werden kann. Über Chipkarten, Geräte mit kontaktloser Chiptechnik (RFID) oder NFC-fähige Smartphones können Fahrscheine digital und bargeldlos erworben werden oder es wird durch Einchecken vor Fahrtbeginn und Auschecken bei Fahrtende über entsprechende Kontaktflächen der Fahrpreis ermittelt und entsprechend abgebucht (vgl. **((eTicket** Deutschland 2016).

Außerdem muss ein fahrerloser Bus ein barrierefreies Einsteigen körperlich eingeschränkter Fahrgäste ermöglichen. Aus diesem Grund benötigt der autonome Bus eine automatische Rampe, um einen Einstieg über den Restspalt zwischen Bordstein und Bus zu gewährleisten. Diese muss von den Fahrgästen

von außen bedienbar sein. Solche Systeme sind bereits verfügbar und werden teilweise auch in konventionellen Bussen verwendet.

2.4 Wirtschaftlichkeit

2.4.1 Methoden und Bewertungssystem

Die Investitionsrechnung ist eine Methode zur rationalen Beurteilung von Investitionsentscheidungen. Aus den Ergebnissen einer Investitionsrechnung lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten.

Dabei unterscheidet Carstensen zwischen der aufwendigeren, aber auch genaueren dynamischen Investitionsrechnung und der einfacheren statischen Investitionsrechnung (vgl. Carstensen 2008, S. 31 und S. 129).

Im Unterschied zu dem statischen Verfahren werden bei der dynamischen Investitionsrechnung die Barwerte der Investitionen den Barwerten der Einnahmen über mehrere Perioden gegenübergestellt. Da die Kontostände Berechnungsgrundlage für die Zinsen sind, ist der Zeitpunkt der Zahlungen exakt darzustellen. Aufgrund der vielen benötigten Daten ist eine dynamische Berechnung deutlich aufwendiger.

Die statische Investitionsrechnung hingegen nutzt eine einfache Kosten- und Erlösrechnung. Anstelle der Betrachtung des genauen zeitlichen Anfalls der Kosten und Erlöse, wird eine repräsentative Durchschnittsperiode berechnet und diese auf eine gegebene Laufzeit angewendet. Die statische Berechnung hat Vorteile hinsichtlich der Übersichtlichkeit der Rechnung und der geringen Anzahl an benötigten Werten und wird daher in dieser Arbeit genutzt.

Innerhalb der statischen Investitionsrechnung gibt es vier verschiedene Berechnungsmethoden. Dies sind die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsvergleichsrechnung und die statische Amortisationszeit.

Bei der **Kostenvergleichsrechnung** werden zur Berechnung nur die Investitionskosten berücksichtigt. Die Vergleichsrechnung dient dazu, zwei oder mehrerer Vorhaben miteinander zu vergleichen. Da angenommen wird, dass die Er-

träge identisch sind, werden diese nicht mit einbezogen. Hieraus ergibt sich der Nachteil, dass sich keine Break-even Mengen berechnen lassen.

Die **Gewinnvergleichsrechnung** ermöglicht durch Gegenüberstellung von Investitionen und Erlösen eine Aussage über die Break-even Menge eines Vorhabens.

Für die **Rentabilitätsvergleichsrechnung** wird ein Quotient aus einer Erfolgs- und einer Kapitalgröße gebildet und verglichen. Zum Beispiel wird der Gewinn mit dem gebundenen Kapital ins Verhältnis gesetzt. Dieser Quotient wird ROI (Return on Investment) genannt und gibt an, wieviel Gewinn je investiertem Kapital in der betrachteten Periode erwirtschaftet wurde.

Die **Amortisationsrechnung** dient zur Ermittlung der Zeit, die benötigt wird, um die getätigten Investitionen durch die Gewinne ausgleichen zu können (vgl. Carstensen 2008, S. 129ff.).

Für die Berechnung innerhalb dieser Arbeit wird eine statische Investitionsrechnung mit einer Kostenvergleichsrechnung angewendet. Mit dieser Methode können die wirtschaftlichen Unterschiede zwischen einem fahrerlosen und fahrbetriebenen Bussystem auf Basis einer Jahresbetriebskostenrechnung dargestellt werden.

2.4.2 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse dient der „Überprüfung einer Rangfolge von Planungsalternativen in einem Planungsmodell auf ihre Robustheit gegenüber Änderungen einzelner Parameterwerte oder Gruppen von Parameterwerten“ (Springer Gabler Verlag o.J.). Sie wird als ergänzende Methode für betriebliche Investitionsentscheidungen genutzt, um auch unter Unsicherheit der Parameter das Ergebnis von Strategiealternativen zu ermitteln. Dafür werden für einen bestimmten Parameter verschiedene Werte angenommen, welche sich beispielsweise für ein Minimal- oder Maximalszenario ergeben. Bei der Analyse wird nun der Einfluss dieser angenommenen Werte auf das Ergebnis untersucht. Treten dabei bei realistischen Annahmen große Änderungen der Ergebnisse auf, be-

sitzt dieser Parameter großen Einfluss und damit auch ein hohes Risiko bei Unsicherheit. Weichen jedoch die Ergebnisse bei unterschiedlichen Annahmen nicht wesentlich voneinander ab, ist der Einfluss dieses Parameters gering und kann auch bei großer Unsicherheit als wenig risikobehaftet eingestuft werden (vgl. Hungenberg 2012, S.310 ff.).

2.4.3 Betriebskosten im ÖPNV

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Kostenbestandteile eines Unternehmens im ÖPNV erläutert. Die Kosten wurden in fünf Bestandteile aufgeteilt, die in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen und Grundgrößen stehen.

2.4.3.1 Rahmenbedingungen und Grundgrößen

Für eine wirtschaftliche Betrachtung des Busverkehrs eines Verkehrsunternehmens ist es notwendig, eine Differenzierung bezüglich der Einsatzbereiche der Fahrzeuge zu tätigen. Grund dafür sind die erheblichen Unterschiede der Kostenstrukturen der Fahrzeuge, die durch den Einsatz in verschiedenen Verkehrsgebieten entstehen. Die Tabelle 2.3 zeigt die wichtigsten Kennzahlen und Grundgrößen in Abhängigkeit des Verkehrsgebietes. Die Werte basieren auf Statistiken des VDV, des Bundesverbandes Deutscher Omnibusunternehmer, des Statistischen Bundesamtes und Unternehmensberichte verschiedener deutscher Verkehrsunternehmen und wurden von Leuthardt zusammengetragen (vgl. Leuthardt 2005). Diese sind die Grundlage für diese Arbeit.

	Dimension	Verkehrsgebiet			
		Ballungs- raum	Ober- zentrum	Mittel- zentrum	Region
Einwohner	Anzahl	> 500.000	> 200.000	> 40.000	> 1.000.000
Anzahl Fahrzeuge	Anzahl	>200	>100	>50	>300
mittlere Reiseweite	km/F	4,5	4,5	4,0	11,0
Voll-Verkehrstage pro Jahr	d/a	320	300	290	275
Betriebsstunden pro Tag	h/d	20	18	16	14
durchschn. Geschwindigkeit	km/h	16,0	17,0	18,0	32,0
durchschn. Haltestellenabstand	m	450	450	450	1200
Jahresfahrleistung pro Fahrzeug	km/(Fz*a)	65.000	57.000	50.000	75000
Fahrer pro Fahrzeug	MFz	3,0	2,8	2,4	2,0
Personalkosten pro Mitarbeiter u. Jahr	€/(M*a)	45.000	42.000	39.000	35.000
Anteil Schülerverkehr	%	20	25	35	75

Tabelle 2.3: Kennzahlen verschiedener Verkehrsgebiete

Quelle: eigene Darstellung, in Anlehnung an Leuthardt 2005

Für eine verlässliche Einordnung des Verkehrsaufkommens in verschiedenen Verkehrsgebieten ist die Kennzahl der **mittleren Reiseweite** eine wichtige Grundgröße. Sie lässt in Verbindung mit der **durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit** und des **durchschnittlichen Haltestellenabstands** Rückschlüsse auf das Nutzungsverhalten der Fahrgäste zu. Im urbanen Verkehr beträgt die durchschnittliche Reiseweite meist 4 km bis 5 km. In Einzelfällen sind auch kürzere oder längere Reiseweiten von 3 km oder 6 km zu beobachten. Deutliche Unterschiede sind im regionalen Verkehr zu erkennen. Mit einer höheren durchschnittlichen Reiseweite von 10 km geht auch ein Anstieg der mittleren Reisegeschwindigkeit auf 32,0 km/h einher. Eine höhere Reisegeschwindigkeit hat einen größeren Einfluss auf die anfallenden Kraftstoffkosten, da eine höhere Reisegeschwindigkeit aufgrund weniger Stop-and-Go-Phasen Kraftstoffersparungen ermöglichen (vgl. Leuthardt 2005).

Die Anzahl der **Voll-Verkehrstage** beschreibt die Anzahl der Verkehrstage mit der vollen Betriebsleistung an normalen Werktagen. Dafür wird die Verkehrsleistung an Sonn- und Feiertagen zu einer äquivalenten Verkehrsleistung wie an Werktagen summiert. Diese Kennziffer sowie die Anzahl der **Betriebsstunden pro Tag** sind abhängig von der Größe des Verkehrsgebiets. Im städtischen Verkehr sind diese höher als im regionalen Verkehr. Zudem steigen die Kennziffern mit der Größe der Stadt. Dies ist auf den erhöhten Fahrbetrieb in den

Abend- und Nachtstunden im Vergleich zu kleineren Städten zurückzuführen.

Je mehr Voll-Verkehrstage und damit Betriebsstunden anfallen, desto höher ist auch die **Jahresfahrleistung** der Busse. Im Stadtverkehr liegt diese meist zwischen 50.000 und 65.000 km. In Folge dieser Unterschiede steigt auch die Anzahl des benötigten Fahrpersonals mit den gefahrenen Kilometern und den damit verbundenen längeren Fahrzeiten.

Im Regionalverkehr bedarf es trotz höherer Jahresfahrleistungen weniger Fahrpersonal, wegen der deutlich höheren durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit von 32 km/h (vgl. Leuthardt 2005).

2.4.3.2 Kapitalkosten

Die jährlich anfallenden Kapitalkosten setzen sich aus den zwei Kostenelementen kalkulatorische Abschreibungen und kalkulatorische Zinsen zusammen (vgl. Leuthardt 2005).

Kalkulatorische Abschreibungen beschreiben die Wertminderung, die Betriebsmittel aufgrund von Abnutzung, Verschleiß und Alterswertminderung über ihre Nutzungsdauer erfahren. Abschreibungen werden genutzt, um die aktuellen Werteverhältnisse bei der Bilanzrechnung zu ermitteln.

Die jährliche Abschreibung berechnet sich aus dem Kaufpreis, der Nutzungsdauer und dem Restwert, den das Fahrzeug nach der Nutzung besitzt. Als Abschreibungsverfahren wird in dieser Berechnung die lineare Abschreibung genutzt. Diese wird mit der folgenden Formel berechnet (vgl. Schwenkert und Stry 2016, S. 158).

$$A_T = \frac{K_0 - K_n}{n}, A_T = \text{const.}$$

mit: A_T : Abschreibungsbetrag per Periode,
 K_0 : Anschaffungskosten,
 K_n : Restwert,
 n : Nutzungsdauer.

Der Restwert entspricht dem Verkaufserlös auf dem Gebrauchtwagenmarkt für Omnibusse. Je nach Nachfrage können die Restwerte verschiedener Gefäßgrößen variieren. Solobusse sind international gefragter und erreichen die höchsten Restwerte aller Busgrößen.

Als kalkulatorische Zinsen oder Kapitalverzinsung werden Kosten beschrieben, die einem Unternehmen durch Einsatz vom Fremdkapital oder Eigenkapital entstehen. Bei einer Fremdfinanzierung entsprechen die kalkulatorischen Zinsen den Zinskosten, die sich durch das Darlehen ergeben. Bei mit Eigenkapital finanzierten Investitionen werden keine direkten Zinskosten generiert. Allerdings entgehen dem Unternehmen mögliche Erlöse, die mit dem gebundenen Kapital am Kapitalmarkt hätten erzielt werden können. Der entgangene Nutzen wird auch als Opportunitätskosten bezeichnet (vgl. Töpfer 2007, S. 973). Die Formel für die Kapitalverzinsung ergibt sich aus der Multiplikation des durchschnittlichen gebundenen Kapitals mit der durchschnittlichen Verzinsung (vgl. Schwinn und Südkamp 1993, S. 1013).

$$A = \left[(B - C) * \frac{(n + 1)}{2n} + C \right] * j$$

mit: A : kalkulatorische Zinskosten,
B : Kaufpreis,
C : Restwert,
n : Nutzungsdauer,
j : durchschnittliche Verzinsung.

2.4.3.3 Personalkosten

Die Personalkosten lassen sich im Wesentlichen aus der Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter und dem Jahreseinkommen inklusive aller Personalnebenkosten

berechnen. Um den Personalaufwand genau bestimmen zu können, wird der Personaleinsatz nach verschiedenen Personalarten differenziert.

In dieser wirtschaftlichen Betrachtung wird nach fünf Personalarten unterschieden (vgl. Leuthardt 2010):

- Fahrpersonal
- Kontrollpersonal
- Werkstattpersonal
- Betriebshofpersonal
- Verwaltungspersonal

Zur Vereinfachung wird bei der Berechnung ein durchschnittliches Jahreseinkommen für alle Personalgruppen gebildet. Dieses beläuft sich auf 1700 Brutto-Arbeitsstunden pro Mitarbeiter und Jahr. Nach Abzug von 30 Urlaubstagen und einer Woche durch krankheitsbedingten Ausfall ergeben sich 1550 Netto-Arbeitsstunden pro Mitarbeiter und Jahr. Bei einem internen Stundensatz von 30 € pro Arbeitsstunde ergeben sich daraus durchschnittliche Personalkosten in Höhe von 46.500 € pro Mitarbeiter und Jahr (vgl. Leuthardt 2008).

Bei der Einsatzplanung der einzelnen Personalgruppen und der anschließenden Aufteilung auf die betriebenen Fahrzeuge kann es geschehen, dass sich keine vollen Mitarbeiterzahlen ergeben. Diese Tatsache ist vor allem bei Personalgruppen zu beobachten, die für mehr als ein Fahrzeug zuständig sind wie z.B. das Kontroll- oder Verwaltungspersonal.

Die Kosten für das Werkstattpersonal sind in dem Kostenblock Personal erwähnt, werden aber in der späteren Berechnung zu den Werkstattkosten gerechnet, da diese Kosten ansonsten in zwei Kostenbestandteilen zum Tragen kommen.

2.4.3.4 Werkstattkosten

Kosten, die durch die Erhaltung der Betriebsfähigkeit der Fahrzeuge entstehen, werden den Werkstattkosten zugeteilt. Diese Kosten werden von der Jahres-

laufleistung, den vorgeschriebenen Wartungsintervallen, den gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzeuguntersuchungen und unplanmäßigen Defekten und Unfällen bestimmt. Für die planmäßigen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen werden von den Herstellern umfassende Pläne erstellt, mithilfe derer sich der notwendige Arbeits- und Materialaufwand bestimmen lassen.

Die Werkstattkosten setzen sich aus den Kostenelementen Werkstattpersonalkosten, Materialkosten, Reifenkosten, Kosten für Schmierstoffe, Abschreibungen der Werkstatteinrichtung und Fremdleistungen zusammen.

Die Werkstattpersonalkosten berechnen sich, wie in Kapitel 2.4.3.3 beschrieben, aus einem internen Stundensatz und der pro Fahrzeug jährlich benötigten Anzahl an Werkstattpersonal. Die Werkstatteinrichtung unterliegt wie alle anderen Sachgüter eines Unternehmens einer jährlichen Abschreibung. Die für die Wartung benötigten Materialien und Ersatzteile sind als Materialkosten zusammen gefasst. Die Höhe der Materialkosten lässt sich aus dem vom Hersteller gegebenen Wartungsplan und der Nutzungsdauer kalkulieren. Bei einer Nutzungsdauer von 12 Jahren wird zudem ein Austausch des Getriebes eingeplant.

Da einige Wartungsarbeiten mit einem hohen Spezialisierungsgrad nicht in der eigenen Betriebswerkstatt geleistet werden können, wie z.B. bei Wartungen an der Fahrzeugelektronik oder Klimaanlage, müssen Fachfirmen beauftragt werden. Diese Kosten werden im Kostenelement Fremdleistungen berücksichtigt (vgl. Leuthardt 2005).

2.4.3.5 Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten für ein Fahrzeug sind von den drei Parametern Fahrleistung, Verbrauch der Fahrzeuge und aktuelle Kosten für Diesel abhängig. Berechnet werden die Kraftstoffkosten mit der allgemeinen Formel:

$$E = JFL * B_H * DK$$

mit: E : Kraftstoffkosten in €,
JFL : Jahresfahrleistung in km pro Fahrzeug und Jahr,
B_H : absoluter Kraftstoffverbrauch in Liter pro 100 km,
DK : Dieselposten in € pro Liter

Als Fahrleistung wurde hier die Jahresfahrleistung gewählt, da alle Kosten innerhalb dieser Arbeit auf ein Jahr normiert sind.

2.4.3.6 Sonstige Kosten

Unter sonstigen Kosten werden u.a. Kosten zusammengefasst, die zur Führung des Unternehmens notwendig sind. Dazu gehören Kosten für Büroaufwendungen, Post, Telefon, Strom, Wasser, Werbung Dienstkleidung, Mieten, Gebäudeabschreibungen, Reisekosten und Fort- und Weiterbildungen. Da diese Kosten nicht einzelnen Fahrzeugen zugeordnet werden können, werden sämtliche dieser allgemeinen Verwaltungskosten addiert und auf die Anzahl der Fahrzeuge pauschal umgelegt.

Darüber hinaus sind in den sonstigen Kosten der Aufwand für Versicherungen und Steuern enthalten (vgl. Leuthardt 2005).

3 Einfluss von autonomen Bussen auf die Betriebskosten

In diesem Kapitel werden Unterschiede zwischen autonomen und konventionellen Bussen bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit beschrieben. Im Vergleich zu konventionellen Bussen zeichnen sich autonome Busse in Zukunft durch Eigenschaften aus, die sich wesentlich auf ihre Betriebskosten auswirken. Die Annahmen für die veränderte Kostenstruktur beruhen überwiegend auf veröffentlichten Studien. Ergänzt werden diese durch eigene Annahmen, da viele Faktoren bisher noch nicht wissenschaftlich erarbeitet sind oder aufgrund fehlender Erfahrungswerte der Hersteller und Verkehrsunternehmen noch nicht existieren.

3.1 Kapitalkosten

Wie in Kapitel 2.4.3.2 erläutert, bestimmen die Anschaffungskosten der Fahrzeuge maßgeblich die Kapitalkosten. Es ist davon auszugehen, dass der Kaufpreis eines autonomen Busses deutlich über dem eines konventionellen Busses heute und auch zukünftig liegen wird. Dies liegt zum einen an den erhöhten Einzelkosten der verbauten Fahrerassistenzsysteme und zum anderen an den hohen Entwicklungskosten der Hersteller.

Um die Anschaffungskosten eines autonomen Busses zu bewerten, genügt es nicht, eine einfache Aufstellung der Kosten für die einzelnen Bauteile zu erstellen. Die Kosten für die benötigten zusätzlichen Baugruppen sind verglichen mit den Anschaffungskosten eines konventionellen 12m Solobusses von 250.000 € gering (vgl. Leuthardt 2010). Volvo beziffert die zusätzlichen Kosten für ein autonomes Automobil auf 15.000 € (vgl. Pankow 2016). Einen größeren Einfluss auf den Verkaufspreis werden daher die Entwicklungskosten der Hersteller haben. Diese sind allerdings ohne Zugriff auf herstellerinterne Daten nicht ermittelbar. Es ist darüber hinaus mit zusätzlichen Prüf- und Zulassungskosten zu rechnen, die aufgrund fehlender Gesetzesgrundlage noch nicht bewertbar sind.

Eine belastbare Aussage über die Anschaffungskosten ist daher zum derzeitigen Zeitpunkt nicht möglich.

Um dennoch Anschaffungskosten für die Verkehrsunternehmen ermitteln zu können, wird im Folgenden diskutiert, wie die Preiskalkulation oder Preisfindung der Hersteller erfolgen könnte.

Es ist denkbar, dass die Hersteller ihre Verkaufspreise nicht nach einer einfachen Zuschlagskalkulation durch Bestimmung der Selbstkosten plus Gewinnzuschlag ermitteln (vgl. Hering 2014, S. 3). Wahrscheinlicher ist eine nachfrageorientierte Preiskalkulation. Bei dieser Preiskalkulation wird ein Preis primär nach der Preiszahlungsbereitschaft des Kunden ermittelt. Dadurch lassen sich Gewinnpotentiale ausschöpfen, ohne die Kaufentscheidung negativ zu beeinflussen (vgl. Hartmann 2006, S. 155). Die Selbstkosten müssen dabei in jeden Fall von dem ermittelten Preis gedeckt sein.

Die Zahlungsbereitschaft eines gewinnorientierten Verkehrsunternehmens für einen fahrerlosen Bus wird daher von den erreichbaren Kosteneinsparungen abhängen. Damit sich ein Unternehmen für die Einführung autonomer Busse entscheidet, muss eine erhebliche Kostenreduzierung möglich sein. Eine relativ geringe Einsparung von unter 10% bietet einem Unternehmen nicht genug Anreiz, um in eine neue Technologie zu investieren. Als Basis der folgenden Berechnung dient daher eine angenommene Einsparung der Betriebskosten von 20%.

Die Berechnung der Anschaffungskosten leiten sich daher wie folgt ab:

Die Ausgangsbasis bilden die Jahresbetriebskosten für einen konventionellen Bus auf den Linien 422 und 420. Diese um 20% reduziert, ergeben die Ziel-Jahresbetriebskosten für einen fahrerlosen Bus. Nach Abzug der Personal-, Werkstatt-, Kraftstoff- und sonstiger Kosten verbleiben die Kapitalkosten. Aus diesen lassen sich die Anschaffungskosten, unter der Annahme einer Gesamtkosteneinsparung von 20%, rückwärts berechnen. Der ermittelte Wert ergibt die maximalen Anschaffungskosten unter der Bedingung, dass eine 20%ige Ein-

sparung weiterhin möglich ist. Höhere Anschaffungskosten führen zu einer geringeren Betriebskosteneinsparung, niedrigere Anschaffungskosten entsprechend zu einer weiteren Reduzierung der Betriebskosten.

3.2 Personalkosten

Der größte Anteil der Betriebskosten eines konventionellen Busses sind die Personalkosten. Die Reduzierung dieser Personalkosten stellt neben der Erhöhung der Sicherheit den größten Vorteil bei der Einführung autonomer Busse dar.

Der Hauptanteil der Kostenreduzierung der Personalkosten ist auf den Entfall des Fahrpersonals zurückzuführen. Auf das Fahrpersonal entfallen 75% der Personalkosten. Eine genaue Aufstellung des Personalbedarfs ist in der Tabelle 4.6 auf der Seite 55 abgebildet.

Ein autonomer Bus ist in der Lage, viele Aufgaben eines Fahrers auszuführen. Wie in Kapitel 2.3.1.1 beschrieben, kann ein fahrerloser Bus die Fahraufgabe und das Protokollieren der Fahrt übernehmen. Der Fahrscheinverkauf und das barrierefreie Einsteigen körperlich eingeschränkter Fahrgäste können mit Fahrkartenautomaten und einer automatischen Klapprampe gewährleistet werden.

Darüberhinausgehende Aufgaben des Fahrpersonals müssen von den übrigen vorhandenen Personalgruppen des Verkehrsunternehmens ausgeführt werden und erhöhen folglich den Aufwand.

Neben dem Verkauf der Fahrscheine gehört auch die Fahrscheinkontrolle zu den Aufgaben des Fahrpersonals. Unterstützt werden sie dabei vom Kontrollpersonal. Dieses steigt in unregelmäßigen Abständen in die Busse zu und kontrolliert die Fahrscheine der Fahrgäste, um der Beförderungerschleichung entgegenzuwirken. Bei einem fahrerlosen Bus muss häufiger kontrolliert werden. Gegenüber einem konventionellen Bus, wird bei einem autonomen Bus daher eine Erhöhung von 0,03 auf 0,1 Kontrolleuren pro Bus angenommen.

Für einen autonomen Bus ist andererseits eine Reduzierung des Werkstattpersonals von 10% berücksichtigt, wegen des geringeren Verschleißes. Die Veränderung des Bedarfs an Werkstattpersonal ist im Kapitel 3.3 genauer beschrieben

Vor der Abfahrt muss das Fahrzeug einer gründlichen Sichtkontrolle unterzogen werden. Dabei ist das Fahrzeug auf sichtbare Schäden zu untersuchen. Besondere Aufmerksamkeit erfordern die sicherheitsrelevanten Bauteile wie Bremsen, Lenkung, Motor und Räder.

Dieser zusätzliche Aufwand kann bei einem autonomen Bus vom Betriebshofpersonal übernommen werden. Die Sichtkontrolle der konventionellen Fahrzeuge erfolgt mehrmals täglich durch das Fahrpersonal. Das Fahrpersonal kann im Gegensatz zu einem autonomen Bus durch den Fahreindruck während der Fahrt einen Mangel am Fahrzeug feststellen und dies dem Betriebshof- oder Wartungspersonal mitteilen. Ohne diesen subjektiven Fahreindruck muss jedes Bauteil besonders geprüft werden. Sowohl die weiterhin notwendigen Sichtkontrollen, als auch intensivere Prüfung erfordern zusätzlichen Personalaufwand, der durch das Betriebshofpersonal auch außerhalb des Betriebshofes abgedeckt werden muss, beispielsweise durch regelmäßige Kontrollen an der Endstation der Buslinie. Für die Berechnung wird daher der Aufwand des Betriebshofpersonals pro Fahrzeug von 0,05 auf 0,1 verdoppelt.

Eine wichtige Aufgabe des Fahrpersonals ist das Reagieren bei Pannen und Unfällen. Bei einem Unfall oder Defekt sichert der Fahrzeugführer das Fahrzeug ab und kann bei Bedarf einen Notruf absetzen. Für diese Aufgabe ist bei einem fahrerlosen Bus zusätzliche Kapazität von Verwaltungspersonal in einer Leitzentrale notwendig. Die Aufgabe besteht darin, über Videoüberwachung eine Betriebsstörung festzustellen und die notwendigen Maßnahmen einzuleiten. Dies führt zu einer angenommen Erhöhung des Verwaltungspersonals um 0,3 pro Fahrzeug. Damit ist eine Person zur Überwachung von etwa drei Bussen zuständig.

3.3 Werkstattkosten

Die Werkstattkosten sind abhängig von der Fahrleistung, der Beanspruchung des Fahrzeugs im Betrieb und der Komplexität des Fahrzeuges. Die Beanspruchung steht dabei in einem engen Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch. Ein hoher Kraftstoffverbrauch bei Linienbussen ergibt sich durch häufiges Beschleunigen und Abbremsen innerhalb kurzer Distanzen. Dies ist charakteristisch für Stadtbusse im schweren Stadtverkehr. Folge dieser Fahrweise ist ein hoher Verschleiß der genutzten Technik. Besonders Bremsen, Reifen, Motor und Getriebe sind von diesen kurzen aber häufigen Belastungen betroffen. Diese Bauteile sind maßgeblich für die Werkstattkosten verantwortlich. Durch die vorausschauende Fahrweise eines autonomen Busses ist eine Senkung dieser Kosten möglich. Im Kapitel 3.4 wird der Einfluss von autonomen Fahrzeugen auf den Kraftstoffverbrauch erläutert. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Verschleiß und Kraftstoffverbrauch werden die entsprechenden Annahmen für die verschleißbedingten Wartungskosten getroffen und um 10% reduziert. Dies betrifft sowohl die Material-, Reifen- und Ölkosten, als auch die Abschreibungen für die Werkstatteinrichtung. Aufgrund dieser Reduzierung ist auch von einer Reduzierung des Werkstattpersonals um 10%. auszugehen.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Fahrzeugreparatur sind Fremdleistungen, die gesondert betrachtet werden. Fremdleistungen fallen bei der Wartung und Instandsetzung von komplexen Bauteilen an. Dazu zählen auch die in Zukunft in autonomen Bussen verbaute Sensorik und die Steuergeräte. Die notwendigen Arbeiten an diesen Bauteilen erfolgen durch Spezialfirmen, die die benötigten technischen Mittel und das Fachwissen besitzen. Außerdem ist zu erwarten, dass erhöhte Kosten für die Hauptuntersuchung der autonomen Fahrzeuge anfallen. Es wird daher eine Verdopplung der Kosten für Fremdleistungen angenommen.

3.4 Kraftstoffkosten

Die Berechnung der Kraftstoffkosten wird im Kapitel 2.4.3.5 erläutert. Die Kosten für einen Liter Diesel und die Fahrleistung können durch ein autonomes System nicht beeinflusst werden. Der durchschnittliche Verbrauch ist allerdings bei jedem Fahrzeugtyp unterschiedlich. Es ist davon auszugehen, dass durch autonomes Fahren eine Verbrauchsreduzierung erreicht werden kann. Wie einige Studien bereits festgestellt haben, liegt das Einsparpotential zwischen 10-30 % je nach Fahrbetrieb (siehe Kapitel 2.1.2). Die Reduzierung wird durch ein gleichmäßigeres Fahren mit geringen Abstand und einem höheren Verkehrsfluss erreicht, womit sich Stauzeiten und Stop-and-Go Zeiten reduzieren lassen. Für die Berechnung wird daher ein Verbrauchsvorteil von 10% für den autonomen Bus gegenüber einen fahrerbetriebenen Bus angenommen.

3.5 Sonstige Kosten

Die sonstigen Kosten sind nur im geringen Maße von der Technik und Betriebsweise eines Busses abhängig. Die Gebäudeabschreibung und die Betriebskosten für das Unternehmen werden nicht verändert. Einzig diese Versicherung könnte für einen fahrerlosen Bus geringer ausfallen. Grund für die Annahme ist die Reduzierung der Unfälle durch einen autonomen Bus. Da sich 92% der Unfälle auf menschliches Fehlverhalten zurückführen lassen, ergab eine Untersuchung des US-amerikanischen KFZ-Versicherers Metromile einen Rückgang des Versicherungsaufwands bei einem flächendeckenden Einsatz von autonomen Automobilen um 80% (vgl. Metromile 2015).

Für die Berechnung innerhalb dieser Arbeit wird allerdings nur ein Rückgang um 50% der Versicherungskosten angenommen, da sich die von Metromile genannte Reduktion auf ein Idealszenario mit einem flächendeckenden Einsatz fahrerloser Fahrzeuge bezieht und dieser in naher Zukunft nicht erwartet werden kann. Je größer die Anzahl autonomer Fahrzeuge im Straßenverkehr ist, desto höher ist auch das Unfallvermeidungspotential.

4 Entwicklung eines Vergleichsszenarios

Als Grundlage für ein Vergleichsszenario zwischen einem konventionellen und einem autonom fahrenden Bus dienen die Einsatzbedingungen der Busse zweier Linien der Braunschweiger Verkehrs-GmbH.

Die Stadt Braunschweig hat insgesamt 252.768 Einwohner (Meldeamt, Stand: 31.12.2015) auf einer Fläche von 192,1 km². Damit ist Braunschweig nach Hannover die größte Stadt Niedersachsens. Der ÖPNV wird von der Braunschweiger Verkehrs-GmbH betrieben. Mit einem Fahrgastaufkommen von ca. 39,4 Millionen und 1.652 Haltepunkte ist sie ein wichtiger Teil des Verkehrssystems der Stadt Braunschweig.

Der Verkehrsbetrieb unterhält 5 Stadtbahnlinien, welche ein Streckennetz von 51,1 km befahren und dabei jährlich 2,5 Millionen km zurücklegen. Zum Einsatz kommen dabei 50 Triebwagen.

Für den Busverkehr werden 36 Buslinien mit einer Gesamtlänge von 435 km genutzt. Dafür stehen 148 Busse (64 Solobusse und 84 Gelenkbusse) mit Niederflurtechnik zur Verfügung. Diese fahren jährlich 7,5 Millionen km (vgl. Braunschweiger Verkehrs-GmbH 2016).

Um eine realistische und belastbare Abschätzung über die Wirtschaftlichkeit von autonomem Bus treffen zu können, werden in dem gewählten Beispielszenario nicht nur einzelne Busse und Fahrten, sondern der Betrieb zweier Linien untersucht. In dem gewählten Szenario soll der Betrieb der Linien 422 und 420 der Braunschweiger Verkehrs-GmbH jeweils mit neu angeschafften konventionellen und autonomen Bussen abgebildet werden.

Die Berechnung erfolgt auf Basis einer vollständigen Umstellung auf autonome Busse ohne Mischbetrieb. Die anzuschaffenden Busse entsprechen denen in Kapitel 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen.

Annahmen für das Szenario		
	Dimension	
Nutzungsdauer in Jahren	a	12
durchschnittliche Verzinsung	%	5,00%
durchschnittliche Personalkosten	€/M	46.500,00 €
Kraftstoffkosten pro Liter	€/L	1,00 €

Tabelle 4.1: Annahmen für das Szenario
Quelle: eigene Darstellung

Anhand der Tabelle 4.1 lassen sich die übrigen Annahmen für das Szenario ablesen. Die übliche Nutzungsdauer von Stadtbussen beträgt durchschnittlich 12 Jahre und wird der Berechnung zugrunde gelegt. Für die Berechnung der Zinskosten wird von einer durchschnittlichen Verzinsung von 5% ausgegangen. Wie in Kapitel 2.4.3.3 beschrieben, stellen die durchschnittlichen jährlichen Personalkosten pro Mitarbeiter von 46.500 € einen Mittelwert aller Personalgruppen dar.

Die Kraftstoffkosten pro Liter Diesel sind auf 1,00 €/L festgelegt. Innerhalb der Nutzungsdauer kann es zu Schwankungen kommen, die jedoch nicht betrachtet werden. Beide Bussysteme werden mit dem gleichen Kraftstoff betrieben. Damit sind Unterschiede in den Faktorkosten ausgeschlossen.

4.1 Linie 422

Die Linie 422 verbindet den nordwestlich gelegenen Stadtteil Lehdorf über das Zentrum Braunschweigs mit dem südlichen Stadtteil Bebelhof. Sie bewegt sich dabei ausschließlich im leichten städtischen Verkehr.

Aufgrund einer Sperrung des Messewegs gilt derzeit ein Sonderfahrplan für die Linie 422. Der Fahrplan und Streckenverlauf sind im Anhang zu finden. Auf Grundlage dieses Fahrplanes weist die Linie 422 folgende, in der Tabelle 4.2 abgebildete, Eigenschaften auf.

Eigenschaften der Linie 422	
Streckenlänge	12,8 km
Fahrzeit	37 min
Takt (Durchschnitt)	30 min
Anzahl der Haltestellen	32
durchschnittlicher Haltestellenabstand	400m
durchschnittliche Geschwindigkeit	20,8 km/h
Wendezeit	12 min
Umlaufzeit	98 min
Anzahl aller Fahrten pro Tag(Hin- und Rückweg)	70 Fahrten
Fahrleistung pro Tag	896 km
Anzahl der Busse	4
Jahresfahrleistung pro Fahrzeug	58.240 km
Jahresfahrleistung Gesamt	232.960 km

Tabelle 4.2: Eigenschaften der Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Die **Streckenlänge** ergibt sich aus der ersten Haltestelle und der Endhaltestelle, welche mithilfe von digitalem Kartenmaterial gemessen wurde.

Die **Fahrzeit**, **Anzahl der Haltestellen** und die **Fahrten pro Tag** können anhand des Fahrplans abgelesen werden. Aus Gründen der Vereinfachung werden für die Berechnung nur die Voll-Verkehrstage von Montag bis Freitag bewertet. Es ist festzustellen, dass die erste und letzte Fahrt jeweils nur die halbe Strecke abdeckt. Sie wurden zu einer vollständigen Fahrt addiert.

Der **durchschnittliche Haltestellenabstand** ergibt sich durch die Division der Streckenlänge durch die Anzahl der Haltestellen in Fahrtrichtung. Analog wurde auch die **durchschnittliche Geschwindigkeit** mittels einer Division der Streckenlänge und der Fahrtzeit berechnet.

Die **Wendezeit** beschreibt die Zeit zwischen der Ankunft und der Abfahrt des Fahrzeuges. Sie enthält Pausenzeiten, Pufferzeiten an Endhaltestellen und die Synchronisationszeit. Nicht enthalten sind die Übergangsfahrzeiten an den Endhaltestellen, die zum eigentlichen Wenden des Fahrzeugs in die neue Fahrtrichtung benötigt werden (vgl. Schnieder 2015, S. 82 ff.). Die hier angege-

benen 12 min Wendezeit enthalten in dieser Berechnung allerdings eine Pausenzeit von 10 Minuten für den Fahrer und 2 Minuten für das Wenden und Vorbereiten des Fahrzeuges.

Die **Umlaufzeit** setzt sich aus den Fahrzeiten und den Wendezeiten für die Hin- und Rückfahrt zusammen.

Durch die Multiplikation der Streckenlänge mit der Anzahl der Fahrten erhält man die **Fahrleistung pro Tag**.

Zur Berechnung der **Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge**, werden die Umlaufzeit und die Taktzeit benötigt. Die **Taktzeit** kann anhand des Fahrplans abgelesen werden und wurde auf die im Fahrplan vorherrschende Zeit festgelegt. Die Anzahl ergibt sich letztlich aus einer Division der Umlaufzeit durch die Taktzeit. Der sich daraus ergebende Wert muss auf ganze Fahrzeuge aufgerundet werden, da er nur eine Mindestzahl an Busse angibt.

Die Eigenschaften, die die Linie 422 besitzt, decken sich mit den von Leuthardt ermittelten Werten für ein Oberzentrum als Verkehrsgebiet, welche in Kapitel 2.4.3.1 erläutert wurden.

4.2 Linie 420

Die Linie 420 verbindet die Stadt Braunschweig mit der Kleinstadt Wolfenbüttel, die 38.909 (Meldeamt, Stand: 30.06.2016) Einwohner im Stadtgebiet zählt. Sie bildet eine Alternative zu der stündlich fahrenden Zugverbindung. Die Strecke beginnt am Braunschweiger Rathaus und führt über den Hauptbahnhof Braunschweigs zum Bahnhof in Wolfenbüttel. Dabei verkehrt sie im leichten Stadtverkehr, auf einem kurzen Stück Autobahn und Landstraße.

Die Fahrdaten dieser Linie wurden, wie in bei der bereits vorgestellten Linie 422, auf Basis des Fahrplans, welcher im Anhang zu finden ist, ermittelt und sind in der Tabelle 4.3 aufgeführt.

Eigenschaften der Linie 420	
Streckenlänge	13,6 km
Fahrzeit	31 min
Takt (Durchschnitt)	15 min
Anzahl der Haltestellen	17
durchschnittlicher Haltestellenabstand	800m
durchschnittliche Geschwindigkeit	26,32 km/h
Wendezeit	7 min
Umlaufzeit	76 min
Anzahl aller Fahrten pro Tag (Hin- und Rückweg)	116 Fahrten
Fahrleistung pro Tag	2257,6 km
Anzahl der Busse	6
Jahresfahrleistung pro Fahrzeug	97.829 km
Jahresfahrleistung Gesamt	586.974 km

Tabelle 4.3: Eigenschaften der Linie 420
Quelle: eigene Darstellung

Im Vergleich zur Linie 422 weist die Linie 420 ein anderes Fahrprofil auf. Erwähnenswert sind hier die hohe Durchschnittsgeschwindigkeit, der große Haltestellenabstand und die hohe Fahrleistung der Linie. Grund dafür ist der hohe Anteil an außerörtlicher Fahrstrecke von 6,5 km. Hier erreichen die Fahrzeuge Geschwindigkeiten von 80-100 km/h. Auch der Haltestellenabstand vergrößert sich, da auf den 6,5 km nur eine Haltestelle angefahren wird.

4.3 Vergleich der Kostenbestandteile für das konventionelles und autonome System

In diesem Kapitel werden nun die einzelnen Kostenbestandteile mit ihren Kostenelementen für die beiden Linien 422 und 420 jeweils für eine konventionelle und eine autonome Busflotte aufgezeigt. Aus der Summe der Kostenbestandteile ergeben sich dann die Jahresbetriebskosten. Die Kosten für die konventionelle Flotte sind den Berechnungen von Leuthardt entnommen (vgl. Leuthardt

2010). Die in Kapitel 3 getroffenen Annahmen ergeben die Werte für den autonomen Bus.

4.3.1 Ergebnisse der Linie 422

Jahresbetriebskosten Linie 422				
		Dimension	konventionell	autonom
1.	Fahrzeugabschreibung	€/a	75.000,00 €	279.141,00 €
2.	Kapitalverzinsung	€/a	29.375,00 €	109.330,23 €
3.	Personalkosten	€/a	703.080,00 €	223.200,00 €
4.	Werkstattkosten	€/a	59.040,00 €	60.820,00 €
5.	Kraftstoffkosten	€/a	104.599,04 €	93.184,00 €
6.	sonstige Kosten	€/a	76.000,00 €	72.000,00 €
7.	Jahresbetriebskosten	€/a	1.047.094,04 €	837.675,23 €
8.	Jahresfahrleistung der Linie	km/a	232.960	232.960
9.	Kosten pro Fz-Km	km/a	4,49 €	3,60 €

Tabelle 4.4: Jahresbetriebskosten der Linie 422

Quelle: eigene Darstellung

Die Anschaffungskosten für einen autonomen Bus wurden, nach dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Vorgehen, ermittelt. Zunächst wurden durch Addition der Kostenbestandteile für die konventionelle Busflotte die Jahresbetriebskosten berechnet. Aufgrund der Annahme eines angestrebten Einsparpotentials von 20% auf die Jahresbetriebskosten der konventionellen Linie, wurden die Jahresbetriebskosten einer autonomen Flotte auf den Zielwert der Jahresbetriebskosten, Tabelle 4.4 Position 7, festgelegt.

Ausgehend von diesen Jahresbetriebskosten wurden auf Basis der Annahmen in Kapitel 3 die bekannten Kostenbestandteile der autonomen Flotte subtrahiert. Daraus ergeben sich die Kapitalkosten der autonomen Flotte, die unter einer 20%igen Einsparung maximal anfallen dürfen. Die Kapitalkosten setzen sich wiederum aus der Summe der in Kapitel 2.4.3.2 beschriebenen Kosten für die Fahrzeugabschreibung (Position 1) und Kapitalverzinsung (Position 2) zusammen. Die Formel für die gesamten jährlichen Kapitalkosten lautet wie folgt:

$$K = A_T + A$$

mit: K : Kapitalkosten,
 A_T : Abschreibungsbetrag per Periode (Fahrzeugabschreibung)
 A : kalkulatorische Zinskosten (Kapitalverzinsung)

Durch Einsetzen der jeweiligen Formel für Abschreibungsbetrag per Periode und der Formel für kalkulatorische Zinskosten ergibt sich folgender Gleichung:

$$K = \frac{K_0 - K_n}{n} + \left[(B - C) * \frac{(n + 1)}{2n} + C \right] * j, \text{ mit } K_0 = B, K_n = C, C = B * p$$

mit: K_0 : Anschaffungskosten,
 K_n : Restwert absolut,
 B : Kaufpreis,
 C : Restwert absolut,
 n : Nutzungsdauer,
 j : durchschnittliche Verzinsung,
 p : Restwert in Prozent.

Den Restwert ermittelte Leuthardt mit 10% für einen 12m Solobus nach 12 Jahren Betriebsdauer.

Durch Einsetzen der Werte und Auflösen nach der Variable B erhält man die Anschaffungskosten der Flotte unter den gegebenen Bedingung und Annahmen einer 20%igen Kostenreduzierung:

$$B = \frac{K * n}{0,025 * n * (1 + p) + 1,025 * (1 - p)}$$

Die Anschaffungskosten für einen einzelnen autonomen Bus erhält man durch die Division der Anschaffungskosten für die Flotte durch die Anzahl der benötigten Busse. Daraus ergibt sich ein Wert für die Anschaffungskosten eines autonomen Busses in Höhe von maximal 930.470,01 €, unter der Bedingung einer 20%igen Gesamteinsparung.

1. Kapitalkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
1.1	Kaufpreis pro Fahrzeug netto	€/Fz	250.000,00 €	930.470,01 €
1.2	Anzahl an benötigten Fahrzeugen	Fz	4	4
1.3	Kaufpreis Flotte	€	1.000.000,00 €	3.721.880,04 €
1.4	Nutzungsdauer in Jahren	a	12	12
1.5	Restwert in Prozent	%	10,00%	10,00%
1.6	Restwert absolut	€	100.000,00 €	372.188,00 €
1.7	durchschnittliche Verzinsung	%	5,00%	5,00%
1.8	Fahrzeugabschreibung	€/a	75.000,00 €	279.141,00 €
1.9	Kapitalverzinsung	€/a	29.375,00 €	109.330,23 €
1.10	Kapitalkosten pro Jahr	€/a	104.375,00 €	388.471,23 €
1.11	Jahresfahrleistung der Linie	km/a	232.960	232.960
1.12	Kapitalkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,45 €	1,67 €

Tabelle 4.5: Kapitalkosten der Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Anhand der Tabelle 4.5 wird deutlich, dass sich die Kapitalkosten einer autonomen Flotte wesentlich von denen einer konventionellen unterscheiden. Die Kapitalkosten erhöhen sich um den Faktor 3,7 auf 388.471,23 €. Verantwortlich für den Anstieg sind die hohen Anschaffungskosten, die zum einen die jährlichen Abschreibungen, als auch die Kapitalverzinsung stark erhöhen.

2. Personalkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
2.1	Fahrpersonal pro Fz	M/Fz	3	0
2.2	Kontrollpersonal pro Fz	M/Fz	0,03	0,1
2.3	Werkstattpersonal pro Fz	M/Fz	0	0
2.4	Betriebshofpersonal pro Fz	M/Fz	0,05	0,1
2.5	Verwaltungspersonal pro Fz	M/Fz	0,7	1
2.6	Gesamtpersonal pro Fz	M/Fz	3,78	1,2
2.7	Gesamtpersonal	M/Linie	15,12	4,8
2.8	durchschnittliches Jahresgehalt	€/(M*a)	46.500,00 €	46.500,00 €
2.9	Personalkosten pro Jahr	€/a	703.080,00 €	223.200,00 €
2.10	Jahresfahrleistung der Linie	km/a	232.960	232.960
2.11	Personalkosten pro Fz-Km	km/(Fz*a)	3,02 €	0,96 €

Tabelle 4.6: Personalkosten der Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Die Personalkosten für die beiden Busflotten der Linie 422 sind in der Tabelle 4.6 abgebildet. Der Personalaufwand ergibt sich aus den in Kapitel 3.2 getroffenen Annahmen. Circa 80% der Personalkosten pro Fahrzeug entfallen bei den konventionellen Bussen auf das Fahrpersonal. Dieses ist damit der größte Treiber der Personalkosten. Durch die Einsparung des Fahrpersonals und der absolut gesehenen geringen Erhöhung des restlichen Personals, ergibt sich ein Gesamtpersonalaufwand pro autonomen Bus von 1,2 Mitarbeiter. Insgesamt sinkt der Personalaufwand auf 32% gegenüber der konventionellen Flotte.

Der Aufwand für das Werkstattpersonal ist hier bei beiden Flotten mit 0 angegeben, da dieser in den Werkstattkosten erfasst wird.

3. Werkstattkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
3.1	Werkstattpersonal pro Fahrzeug	M/Fz	0,14	0,12
3.2	durchschnittliches Jahresgehalt	€/(M*a)	46.500,00 €	46.500,00 €
3.3	Werkstattpersonalkosten	€/(Fz*a)	6.510,00 €	5.580,00 €
3.4	Abschreibung Werkstatteinrichtung	€/(Fz*a)	500,00 €	450,00 €
3.5	Materialkosten	€/(Fz*a)	3.500,00 €	3.150,00 €
3.6	Reifenkosten	€/(Fz*a)	2.000,00 €	1.800,00 €
3.7	Ölkosten	€/(Fz*a)	250,00 €	225,00 €
3.8	Fremdleistungen Fahrzeugreparatur	€/(Fz*a)	2.000,00 €	4.000,00 €
3.9	Werkstattkosten pro Fz und Jahr	€/(Fz*a)	14.760,00 €	15.205,00 €
3.10	Werkstattkosten pro Jahr	€/a	59.040,00 €	60.820,00 €
3.11	Jahresfahrleistung der Linie	km/a	232.960	232.960
3.12	Werkstattkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,25 €	0,26 €

Tabelle 4.7: Werkstattkosten der Linie 422

Quelle: eigene Darstellung

Die Werkstattkosten, welche in der Tabelle 4.7 abgebildet sind, weisen bei den Betriebskosten eine sehr geringe Differenz auf. Die Einsparungen von Material und Personal durch die verschleißarme Fahrweise eines autonomen Busses werden von den zusätzlichen Kosten für Fremdleistungen wieder aufgezehrt und führen zu einem Kostennachteil für die autonome Busflotte von 1.780 € pro Jahr bzw. ca. 3 %.

4. Kraftstoffkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
4.1	Kraftstoffkosten pro Liter	€/L	1,00 €	1,00 €
4.2	Verbrauch Diesel pro 100 km	l/100 km	44,9	40
4.3	Jahresfahrleistung der Linie	km/a	232.960	232.960
4.4	Kraftstoffkosten pro Jahr	€/a	104.599,04 €	93.184,00 €
4.5	Kraftstoffkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,45 €	0,40 €

Tabelle 4.8: Kraftstoffkosten der Linie 422

Quelle: eigene Darstellung

Die Kraftstoffkosten in Tabelle 4.8 fallen bei autonomem Betrieb um 10 % geringer aus. Es ergibt sich daraus ein absoluter Wert von 11.415,04 €.

5. sonstige Kosten				
		Dimension	konventionell	autonom
5.1	Versicherung	€/(Fz*a)	2.000,00 €	1.000,00 €
5.2	Gebäudeabschreibung	€/(Fz*a)	2.000,00 €	2.000,00 €
5.3	Betriebskosten Unternehmen	€/(Fz*a)	15.000,00 €	15.000,00 €
5.4	sonstige Gesamtkosten pro Fahrzeug	€/(Fz*a)	19.000,00 €	18.000,00 €
5.5	sonstige Gesamtkosten	€/a	76.000,00 €	72.000,00 €
5.6	Jahresfahrleistung der Linie	km/a	232.960	232.960
5.7	sonstige Kosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,33 €	0,31 €

Tabelle 4.9: sonstige Kosten der Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Die sonstigen Kosten in der Tabelle 4.9 setzen sich mit Ausnahme der Versicherung aus fahrzeugunabhängigen Faktoren zusammen. Die Differenz von 4000 € der sonstigen Kosten im Vergleich der beiden Flotten entsteht durch die reduzierten Versicherungskosten.

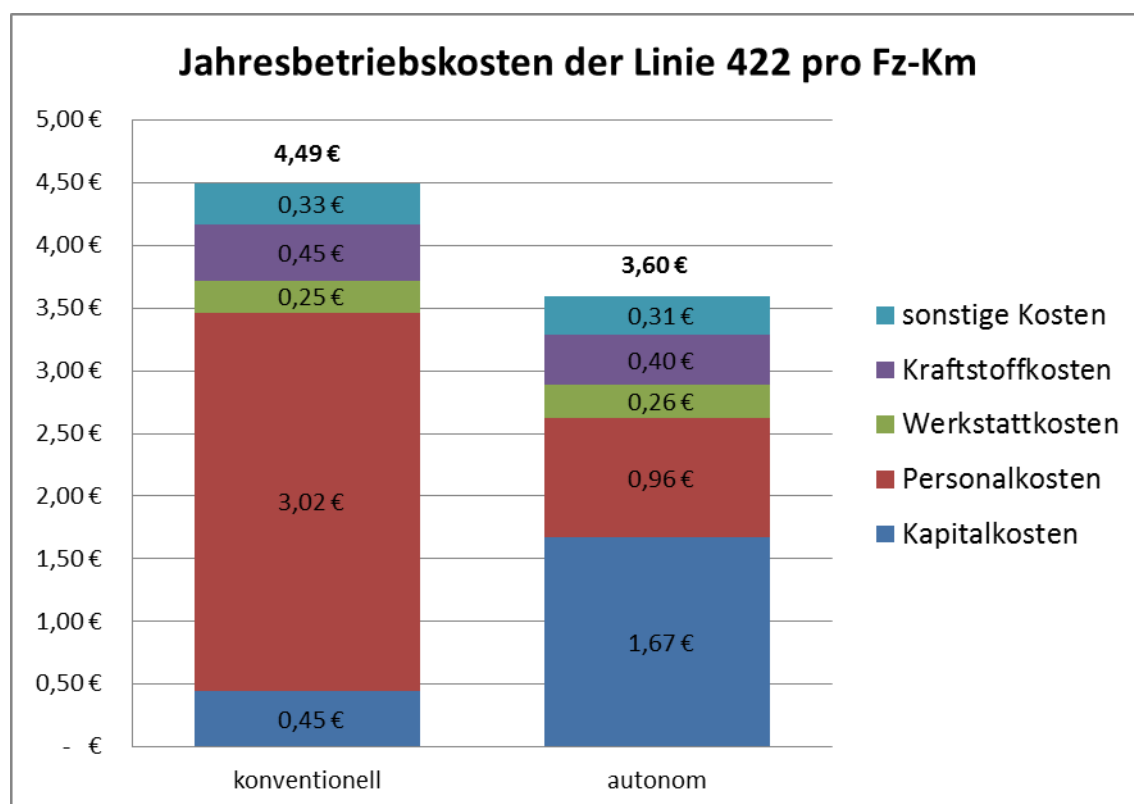


Abbildung 4.1: Jahresbetriebskosten der Linie 422 pro Fz-Km
Quelle: eigene Darstellung

Insgesamt ergeben sich Jahresbetriebskosten pro Fahrzeugkilometer von 4,49 € für die konventionellen Flotte und 3,60 € für die autonome. Anhand der Abbildung 4.1 lassen sich die einzelnen Kostenbestandteile und ihren absoluten Anteil an den Kilometerkosten ablesen.

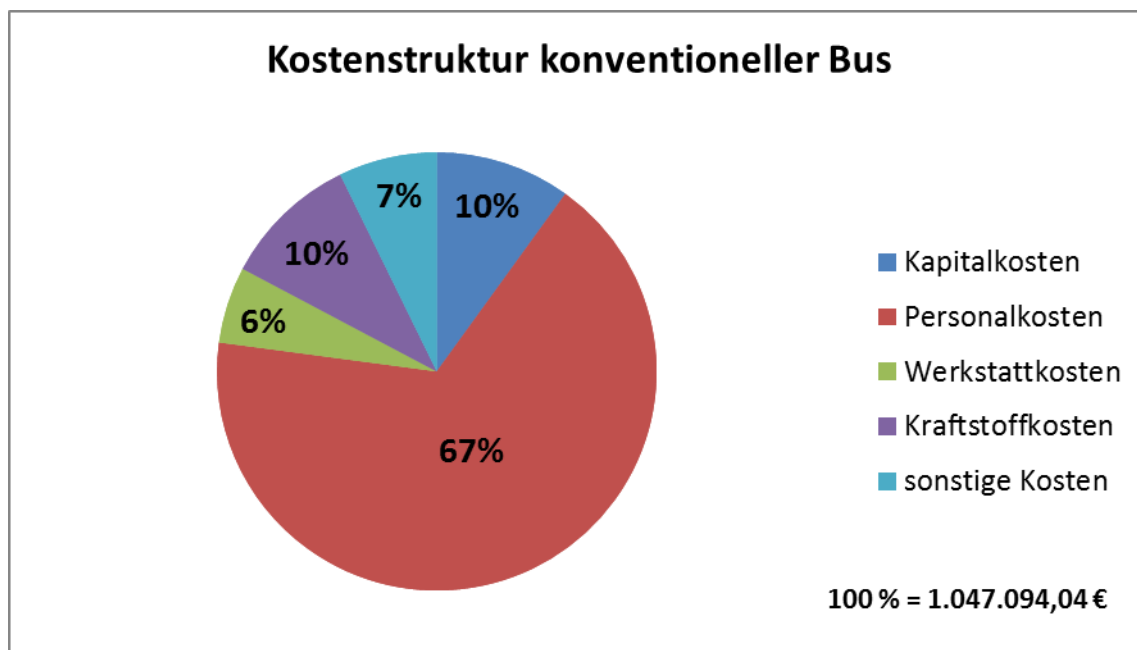


Abbildung 4.2: Kostenstruktur konventioneller Bus der Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 4.2 zeigt den relativen Anteil der Kostenbestandteile an den Jahresbetriebskosten des konventionellen Busses. Hier wird deutlich, dass die Personalkosten mit 67% den größten Anteil der Jahresbetriebskosten ausmachen. Die Kapital- und Kraftstoffkosten haben jeweils einen Anteil von 10 %. Dagegen haben die sonstigen Kosten und Werkstattkosten mit 7 % bzw. 6 % den geringsten Einfluss auf die Jahresbetriebskosten.

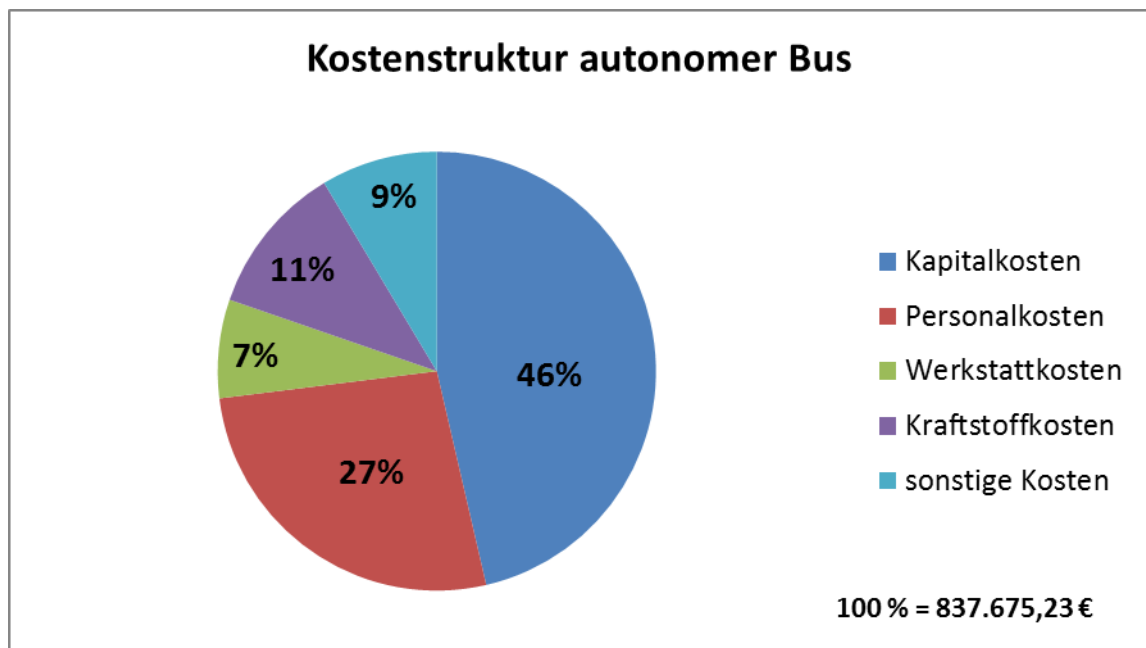


Abbildung 4.3: Kostenstruktur autonomer Bus der Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Die Kostenstruktur des autonomen Busses der Linie 422 ist in der Abbildung 4.3 dargestellt. Mit 46 % sind hier die Kapitalkosten der größte Kostenfaktor. Die Personalkosten haben einen Anteil von 27 % an den Jahresbetriebskosten der autonomen Flotte. Die Kraftstoff-, Werkstatt- und sonstigen Kosten sind auf einem ähnlichen relativen Niveau von 11%, 7 % und 9 %, wie bei der konventionellen Flotte.

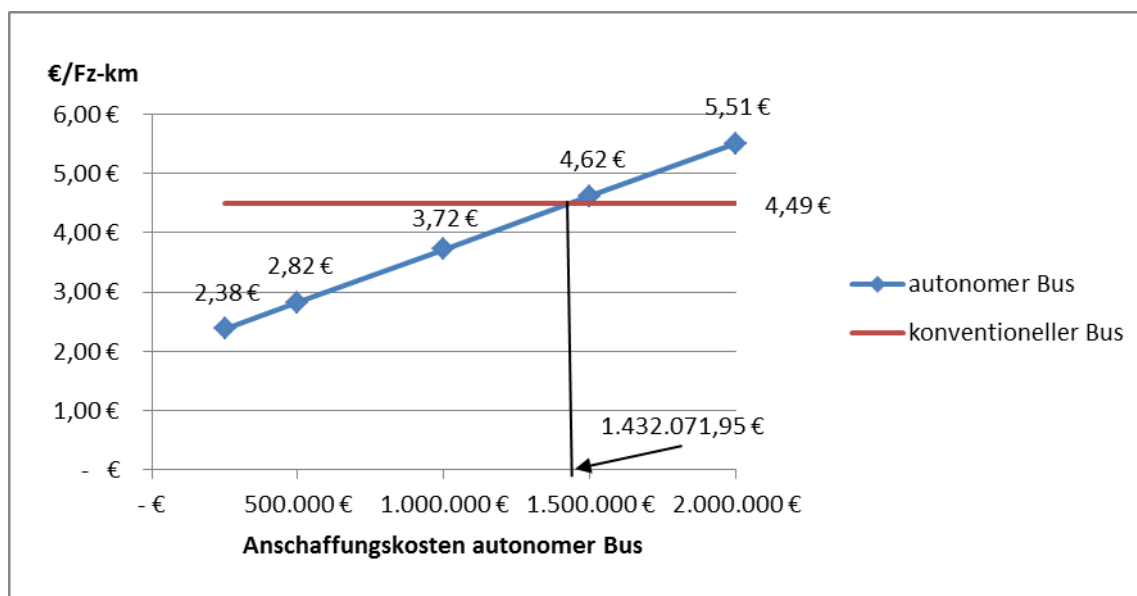


Abbildung 4.4: Sensitivitätsanalyse der Anschaffungskosten Linie 422
Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 4.4 zeigt eine Sensitivitätsanalyse der Anschaffungskosten von autonomen Bussen. Die Analysen beziehen sich auf die für die Linie 422 ermittelten Werte. Auf der Y-Achse sind die Kosten je Fahrzeugkilometer und auf der X-Achse die Anschaffungskosten für einen autonomen Bus abgebildet. Die auf dem Wert 4,49 € verlaufende Konstante gibt die Fahrzeugkilometerkosten der konventionellen Busse an.

Es wurden die Kilometerkosten für unterschiedliche Anschaffungskosten von einem autonomen Bus zwischen 250.000 € und 2.000.000 € berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass bei jeder Erhöhung der Anschaffungskosten um 500.000 € die Fahrzeugkilometerkosten um 0,90 €/km steigen. Eine Verdoppelung der Anschaffungskosten gegenüber einem konventionellen Busses auf 500.000 € führt demnach lediglich zu einer Erhöhung der Fahrzeugkilometerkosten von 0,45 €/km bei einer verbleibenden Einsparung von 1,67 €/km bzw. 37,2 %.

Identische Kilometerkosten von 4,49 €/km bei beiden Flotten ergeben sich bei Anschaffungskosten von 1.432.071,95 € für einen autonomen Bus der Linie 422.

4.3.2 Ergebnisse der Linie 420

Jahresbetriebskosten Linie 420				
		Dimension	konventionell	autonom
1.	Fahrzeugabschreibung	€/a	162.750,00 €	432.710,05 €
2.	Kapitalverzinsung	€/a	60.243,75 €	160.172,51 €
3.	Personalkosten	€/a	1.060.200,00 €	340.380,00 €
4.	Werkstattkosten	€/a	177.795,00 €	183.510,00 €
5.	Kraftstoffkosten	€/a	352.184,40 €	316.965,96 €
6.	sonstige Kosten	€/a	114.000,00 €	108.000,00 €
7.	Jahresbetriebskosten	€/a	1.927.173,15 €	1.541.738,52 €
8.	Jahreslaufleistung der Linie	km/a	586.974	586.974
9.	Kosten pro Fz-Km	km/a	3,28 €	2,63 €

Tabelle 4.10: Jahresbetriebskosten der Linie 420

Quelle: eigene Darstellung

Die Anschaffungskosten wurden nach demselben Verfahren, wie in Kapitel 4.3.1 erläutert, berechnet.

Mit der Formel und dem Einsetzen der Werte ergaben sich die maximalen Anschaffungskosten von 930.559,25 € für einen autonomen Bus, um die angenommenen Einsparung von 20 % auf die Jahresbetriebskosten zu erreichen. Dieser Wert ist fast identisch mit dem Wert für die Linie 422 aufgrund der geringen Unterschiede in den Wartungs- und Kraftstoffkosten.

Die Jahresbetriebskosten der Linie 420 sind in der Tabelle 4.10 dargestellt. Insgesamt fallen die Kosten je Fahrzeugkilometer im Vergleich zur Linie 422 geringer aus. Dies ist auf die deutlich höhere Jahresfahrleistung pro Bus zurückzuführen.

1. Kapitalkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
1.1	Kaufpreis pro Fahrzeug netto	€/Fz	350.000,00 €	930.559,25 €
1.2	Anzahl an benötigten Fahrzeugen	Fz	6	6
1.3	Kaufpreis Flotte	€	2.100.000,00 €	5.583.355,50 €
1.4	Nutzungsdauer in Jahren	a	12	12
1.5	Restwert in Prozent	%	7,00%	7,00%
1.6	Restwert absolut	€	147.000,00 €	390.834,89 €
1.7	durchschnittliche Verzinsung	%	5,00%	5,00%
1.8	Fahrzeugabschreibung	€/a	162.750,00 €	432.710,05 €
1.9	Kapitalverzinsung	€/a	60.243,75 €	160.172,51 €
1.10	Kapitalkosten pro Jahr	€/a	222.993,75 €	592.882,56 €
1.11	Jahreslaufleistung der Linie	km/a	586.974	586.974
1.12	Kapitalkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,38 €	1,01 €

Tabelle 4.11: Kapitalkosten der Linie 420

Quelle: eigene Darstellung

Bei der Linie 420 sind die Kapitalkosten, ebenso wie bei der Linie 422, geringer für die konventionelle Flotte. Sie sind in der Tabelle 4.11 abgebildet. Aufgrund der deutlich geringen Anschaffungskosten fallen sie um 62% geringer aus.

Die Kapitalkosten der autonomen Flotte liegen hier um den Faktor 2,66 über denen der konventionellen Flotte. Der geringere Wert gegenüber der Linie 422 resultiert aus den höheren Anschaffungskosten für Gelenkbusse, während die Betriebskosten annähernd gleich geblieben sind. Da die Berechnung als Zielsetzung eine Einsparung der Betriebskosten von 20 % vorgibt, bleibt der maximale Anschaffungspreis der autonomen Busse annähernd gleich.

2. Personalkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
2.1	Fahrpersonal pro Fz	M/Fz	3	0
2.2	Kontrollpersonal pro Fz	M/Fz	0,03	0,1
2.3	Werkstattpersonal pro Fz	M/Fz	0	0
2.4	Betriebshofpersonal pro Fz	M/Fz	0,05	0,1
2.5	Verwaltungspersonal pro Fz	M/Fz	0,72	1,02
2.6	Gesamtpersonal pro Fz	M/Fz	3,8	1,22
2.7	Gesamtpersonal der Linie	M/Linie	22,8	7,32
2.8	durchschnittliches Jahresgehalt	€/(M*a)	46.500,00 €	46.500,00 €
2.9	Personalkosten pro Jahr	€/a	1.060.200,00 €	340.380,00 €
2.10	Jahreslaufleistung der Linie	km/a	586.974	586.974
2.11	Personalkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	1,81 €	0,58 €

Tabelle 4.12: Personalkosten der Linie 420

Quelle: eigene Darstellung

Die Kosten für das Werkstattpersonal sind hier mit 0 angesetzt, da sie in der Tabelle 4.13 in den Werkstattkosten verrechnet sind.

Die Personalkosten für die Linie 420 sind höher, weil mehr Fahrzeuge eingesetzt werden und sich bei Gelenkbussen ein geringfügiger Mehraufwand des Verwaltungspersonals von 0,02 Mitarbeiter pro Fahrzeug nach Leuthadt ergeben.

3. Werkstattkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
3.1	Werkstattpersonal pro Fahrzeug	M/Fz	0,17	0,15
3.2	durchschnittliches Jahresgehalt	€/(M*a)	46.500,00 €	46.500,00 €
3.3	Werkstattpersonalkosten	€/(Fz*a)	7.905,00 €	6.975,00 €
3.4	Abschreibung Werkstatteinrichtung	€/(Fz*a)	600,00 €	540,00 €
3.5	Materialkosten	€/(Fz*a)	6.000,00 €	5.400,00 €
3.6	Reifenkosten	€/(Fz*a)	2.500,00 €	2.250,00 €
3.7	Ölkosten	€/(Fz*a)	250,00 €	225,00 €
3.8	Fremdleistungen Fahrzeugreparatur	€/(Fz*a)	2.500,00 €	5.000,00 €
3.9	Werkstattkosten pro Fz und Jahr	€/(Fz*a)	19.755,00 €	20.390,00 €
3.10	Werkstattkosten pro Jahr*1,5	€/a	177.795,00 €	183.510,00 €
3.11	Jahreslaufleistung der Linie	km/a	586.974	586.974
3.12	Werkstattkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,30 €	0,31 €

Tabelle 4.13: Werkstattkosten der Linie 420

Quelle: eigene Darstellung

Die einzelnen Kosten für die Werkstattkosten sind in der Tabelle 4.13 abgebildet und basieren nach Leuthardts Berechnungen auf einer Jahresfahrleistung von 60.000 km. Die Busse der Linie 420 fahren allerdings nach den Annahmen in Kapitel 4.2 ca. 98.000 km. Aus diesem Grund wurden nach der Addition der einzelnen Kosten die gesamten laufleistungsabhängigen Werkstattkosten um den Faktor 1,5 vergrößert, um der höheren Fahrleistung gerecht zu werden.

Aufgrund der komplexen Gelenkkonstruktion bei Gelenkbussen sind die Kosten für das Werkstattpersonal wie auch die Materialkosten und die Fremdleistungen höher als bei den Solobussen der Linie 422. Zusätzlich werden bei einem dreiachsigen Gelenkbus mehr Räder benötigt, was zu höheren Reifenkosten führt.

Die Unterschiede zwischen der konventionellen und der autonomen Flotte sind sehr gering und unterscheiden sich bei den Werkstattkosten pro Fahrzeugkilometer um lediglich 0,01 €/km.

4. Kraftstoffkosten				
		Dimension	konventionell	autonom
4.1	Kraftstoffkosten pro Liter	€/L	1,00 €	1,00 €
4.2	Verbrauch Diesel pro 100 km	l/100 km	60	54
4.3	Jahreslaufleistung der Linie	km/a	586.974	586.974
4.4	Kraftstoffkosten pro Jahr	€/a	352.184,40 €	316.965,96 €
4.5	Kraftstoffkosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,60 €	0,54 €

Tabelle 4.14: Kraftstoffkosten der Linie 420

Quelle: eigene Darstellung

Die Kraftstoffkosten sind, wie bereits bei der Linie 422 erläutert und in der Tabelle 4.14 erkennbar, bei der autonomen Flotte um 10 % reduziert.

5. sonstige Kosten				
		Dimension	konventionell	autonom
5.1	Versicherung	€/(Fz*a)	2.000,00 €	1.000,00 €
5.2	Gebäudeabschreibung	€/(Fz*a)	2.000,00 €	2.000,00 €
5.3	Betriebskosten Unternehmen	€/(Fz*a)	15.000,00 €	15.000,00 €
5.4	sonstige Gesamtkosten pro Fahrzeug	€/Fz	19.000,00 €	18.000,00 €
5.5	sonstige Gesamtkosten	€/a	114.000,00 €	108.000,00 €
5.6	Jahreslaufleistung der Linie	km/a	586.974	586.974
5.7	sonstige Kosten pro Fz-Km	€/Fz-Km	0,19 €	0,18 €

Tabelle 4.15: sonstige Kosten der Linie 420

Quelle: eigene Darstellung

Die Tabelle 4.15 zeigt die sonstigen Kosten der Linie 420. Die sonstigen Kosten unterscheiden sich nur bei den Versicherungskosten. Die Differenz beträgt 6000 € bzw. 5 % zugunsten der konventionellen Flotte.

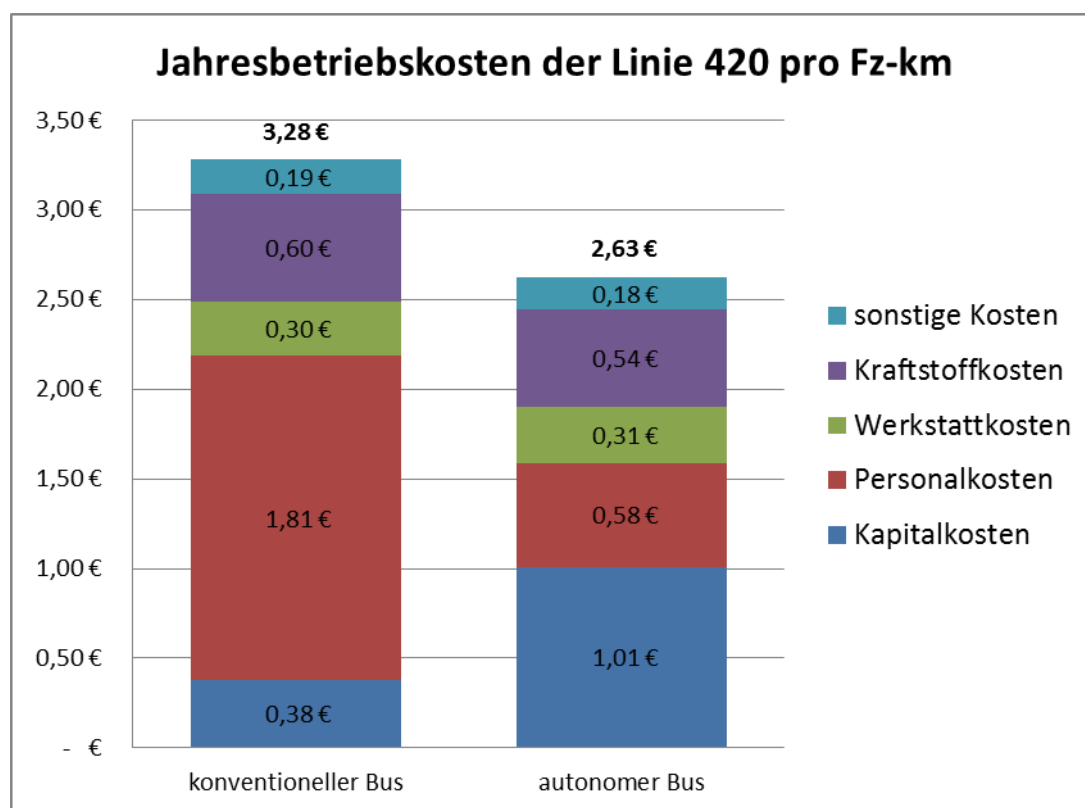


Abbildung 4.5:

Jahresbetriebskosten der Linie 420 pro Fz-Km

Quelle:

eigene Darstellung

Für die Linie 420 ergaben sich aus den Jahresbetriebskosten und der Jahresfahrleistung Kilometerkosten von 3,28 € für einen konventionellen Bus und 2,63 € für einen autonomen. Die Zusammensetzung dieser Kosten ist in der Abbildung 4.5 dargestellt.

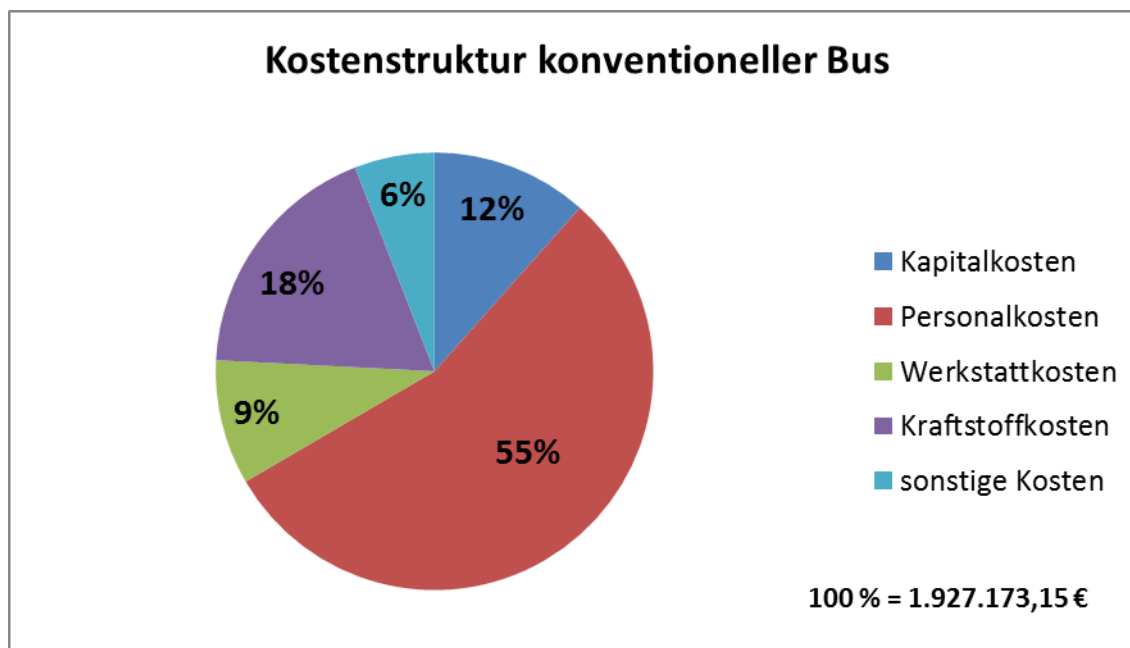


Abbildung 4.6: Kostenstruktur konventioneller Bus
Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 4.6 zeigt die Kostenstruktur der konventionellen Busse. Die Personalkosten stellen bei der Linie 420 mit 55 % den größten Anteil an den Jahresbetriebskosten gefolgt von den Kraftstoffkosten mit 18 % dar. Letztere sind im Vergleich zur Linie 422 höher, da auf dieser Linie Gelenkbusse mit einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 60 l/100km und einer hohen Jahresfahrleistung fahren, wodurch sich der relative Anteil der übrigen Kosten verringert.

Grundsätzlich ergibt sich eine ähnliche Kostenstruktur wie bei der Linie 422.

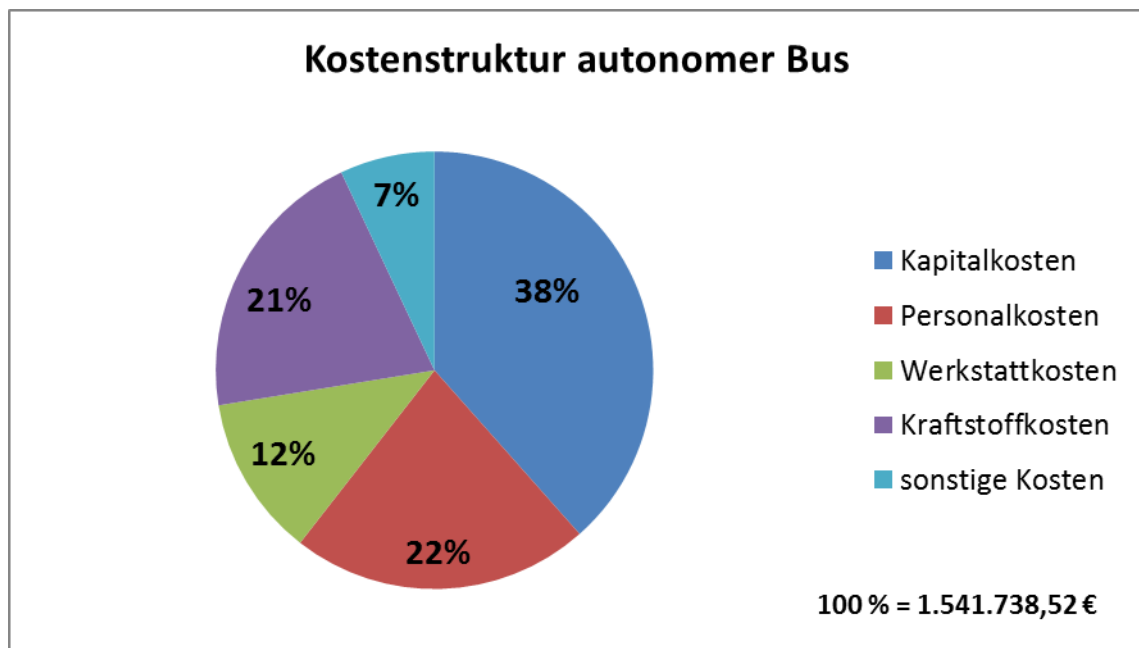


Abbildung 4.7: Kostenstruktur autonomer Bus
Quelle: eigene Darstellung

Die Kostenstruktur der autonomen Flotte ist in der Abbildung 4.7 abgebildet. Es ist festzustellen, dass hier die Kapitalkosten der wesentliche Kostenfaktor mit 38 % sind. Der prozentuale Anteil der Personalkosten an den Gesamtkosten hat sich um 33 Prozentpunkte auf 22 % gegenüber der konventionellen Flotte reduziert.

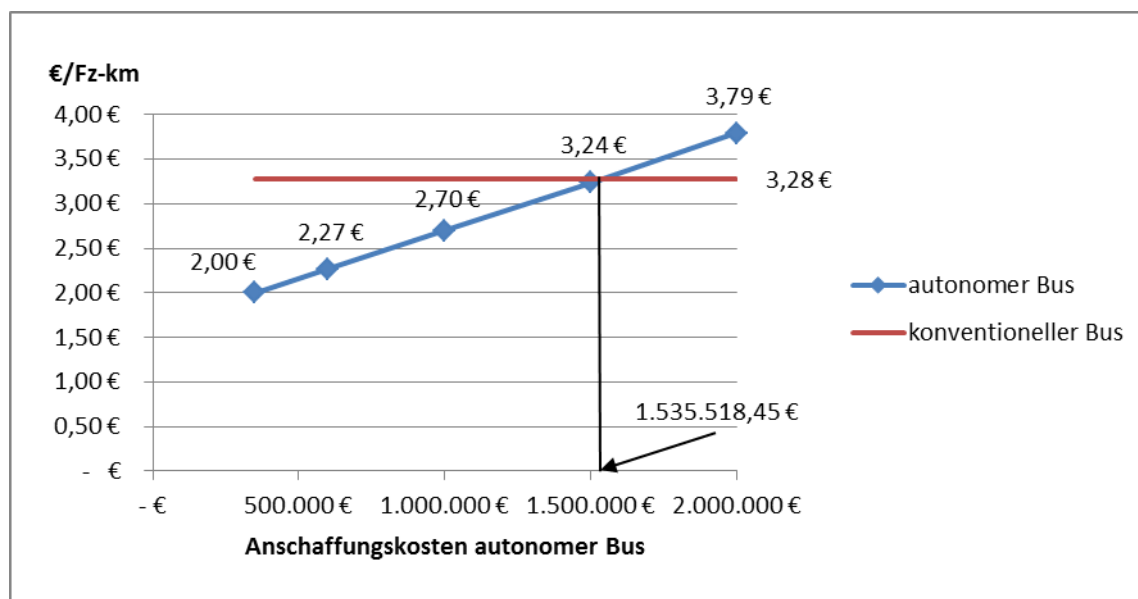


Abbildung 4.8: Sensitivitätsanalyse der Anschaffungskosten Linie 420
Quelle: eigene Darstellung

Die Sensitivitätsanalyse der Linie 420 bezüglich der Anschaffungskosten eines autonomen Busses ist in der Abbildung 4.8 dargestellt. Die Fahrzeugkilometerkosten eines konventionellen Busses auf der Linie 420 sind durch die Konstanten mit 3,28 € abgebildet. Für die Analyse wurden die Fahrzeugkilometerkosten der autonomen Flotte unter der Veränderung der Anschaffungskosten ermittelt. Dabei wurden Anschaffungskosten zwischen 350.000 € und 2.000.000 € untersucht. Ein Anstieg der Anschaffungskosten um 500.000 € führt zu einer Erhöhung der Fahrzeugkilometerkosten von 0,54 €/km. Beispielsweise ergeben sich bei einer Erhöhung der Anschaffungskosten um 250.000 €, wie bei schon bei Linie 422 angenommen, bei daraus resultieren Gesamtkosten von 600.000 € entsprechend Kosten pro Fahrzeugkilometer von 2,27 €. Damit wäre ein autonomer Bus auf der Linie 420 immer noch um 1,01 €/km bzw. 31 % pro Fahrzeugkilometer günstiger als ein konventioneller Bus.

Erst bei einem Preis von 1.535.518,45 € ergeben sich aufgrund der hohen Kapitalkosten gleiche Fahrzeugkilometerkosten wie bei einem konventionellen Bus. Dies würde einer Erhöhung der Anschaffungskosten für einen Bus um mehr als das Vierfache bedeuten.

5 Bewertung und Diskussion

Die Ergebnisse dieser Arbeit geben einen Einblick in die mögliche Kostenstruktur und den Einfluss eines fahrerlosen Busses auf die Betriebskosten. Es wurde festgestellt, dass die Auswirkungen eines autonomen Busses jeden Kostenbestandteil der Jahresbetriebskosten betreffen. Den größten Einfluss haben autonome Busse auf Kapital- und Personalkosten. Diese ändern sich zum einen wegen der hohen zu erwartenden Anschaffungskosten eines solchen autonomen Busses und zum anderen wegen der veränderten Personalstruktur mit geringerem Personalaufwand. Die anderen Kostenbestandteile, wie Werkstatt-, Kraftstoff- und sonstige Kosten werden zwar durch den Betrieb von fahrerlosen Bussen in ihrer Höhe verändert, jedoch ist der Einfluss verglichen zu den Veränderungen der Kapital- und Personalkosten sehr gering.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass sich durch die starke Reduzierung des Personalaufwandes, trotz der erheblich höheren Anschaffungskosten von autonomen Bussen, wirtschaftliche Vorteile ergeben.

Dies erschließt den Verkehrsunternehmen zum einen ein großes Potential zur Betriebskostensenkung und zum anderen den Herstellern hohe Verkaufsmargen, aufgrund einer möglichen nachfrageorientierten Preiskalkulation.

Eine der Herausforderungen bei dieser Arbeit war das Abschätzen der Kostenbestandteile für einen autonomen Bus. Diese Werte konnten nur auf Basis von Studien zu autonomen Fahrzeugen und eigenen Annahmen bestimmt werden. Genauere Daten sind bisher nicht verfügbar, da sich autonome Busse und generell autonome Fahrzeuge für den Straßenverkehr bisher noch in der Entwicklung bzw. sich in einem Prototypenstatus befinden. Die endgültig anfallenden Betriebskosten können daher erst in Zukunft durch Feldversuche auf Teststrecken mit seriennahen Fahrzeugen ermittelt werden. Ebenso ist zum heutigen Zeitpunkt sehr schwer vorausszusagen auf welchem Preis- bzw. Kostenniveau sich die Preise bzw. Betriebskosten autonomer Busse einpendeln werden. Dies wird auch sehr stark von den produzierten Stückzahlen abhängen.

Die in dieser Arbeit ermittelten und verwendeten Werte geben daher den aktuellen Erkenntnisstand wieder und können durchaus als Abschätzung der Betriebskosten für autonome Busse im Vergleich zu konventionellen Bussen herangezogen werden.

Wie bereits erläutert, sind die Anschaffungskosten eines autonomen Busses zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht exakt bewertbar. Da diese jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Betriebskosten eines Busses haben, wurde für die Bestimmung der Anschaffungskosten daher eine Rückwärtskalkulation mit der Annahme einer Gesamtersparnis von 20% gegenüber dem Betrieb mit konventionellen Bussen verwendet. Dadurch ließen sich die maximal anfallenden Anschaffungskosten für einen autonomen Bus festlegen und damit eine Jahresbetriebskostenrechnung durchführen. Dies ist bei der Betrachtung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die ermittelten Kosten für die konventionellen Busse basieren auf Daten für ein durchschnittliches Verkehrsunternehmen und beruhen auf den Arbeiten von Leuthardt. Für eine exakte Betrachtung sollten die in einem bestimmten Verkehrsunternehmen tatsächlich anfallenden Kosten verwendet werden, welche im vorliegenden Fall der Braunschweiger Verkehrs-GmbH nicht zur Verfügung standen. Das Ergebnis wird sich dadurch quantitativ teilweise ändern, aber qualitativ ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine Bestätigung der Ergebnisse zu erwarten.

Aus den Ergebnissen der wirtschaftlichen Analyse lassen sich mehrere Handlungsempfehlungen für die Planung und den Betrieb von autonomen Bussen ableiten.

Aufgrund des starken Einflusses der Kapitalkosten muss ein Verkehrsunternehmen besonders die Anschaffungskosten eines autonomen Busses betrachten. Diese sind für die Jahresbetriebskosten entscheidend. Darüber hinaus fordern die hohen Anschaffungskosten möglicherweise neue Strategien des Kapitaleinsatzes und der Kapitalbeschaffung, um die Zinskosten bei den hohen

Summen für die Anschaffung einer autonomen Flotte niedrig zu halten.

Des Weiteren konnte in dieser Arbeit festgestellt werden, dass für den Betrieb von autonomen Bussen zwar auf einen Fahrer verzichtet werden kann, aber dafür der Personalaufwand in anderen Personalgruppen steigen wird. Daher müssen neue Strukturen in den Betriebsabläufen insbesondere hinsichtlich der Personaleinsatzplanung von den Verkehrsunternehmen entwickelt werden.

5.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht den Einsatz von autonomen Bussen im Vergleich zu fahrgesteuerten Bussen auf zwei Linien der Braunschweiger Verkehrs-GmbH im Hinblick auf ihre Betriebskosten.

Dazu wurden die einzelnen Kostenbestandteile für jedes System ermittelt. Da noch keine genauen Zahlen für den Betrieb autonomer Busse verfügbar sind, dienten Studien zum autonomen Fahren als Basis für die Annahmen zu den Kosten. Während für die Betriebskosten nachvollziehbare Werte ermittelt werden konnten, ergaben sich für die Anschaffungskosten der Fahrzeuge keine ausreichend gesicherten Werte. Dies betrifft sowohl die Werte in der Einführungsphase sowie Werte einer späteren Serienfertigung. Um dennoch zu aussagefähigen Ergebnissen zu gelangen, wurde die Annahme getroffen, dass eine Umstellung der Verkehrsbetriebe auf autonomen Betrieb erst dann erfolgen wird, wenn die Gesamtbetriebskosten erheblich gesenkt werden können. Eine Kostenreduzierung von 20% sollte dafür einen ausreichenden Anreiz bieten. Auf Basis dieser Annahme war es nun möglich, einen maximalen Anschaffungspreis zu definieren, um das gesetzte Einsparungsziel zu erreichen und eine Jahresbetriebskostenrechnung beider Betriebsarten zu ermöglichen und miteinander zu vergleichen.

Als erstes Ergebnis stand fest, dass die wesentlichen Kostentreiber im Busbetrieb die Kapital- und Personalkosten sind. Während bei den konventionellen Bussen die Personalkosten ein höheres Gewicht gegenüber den Kapitalkosten aufwiesen, sind bei den autonomen Bussen die Kapitalkosten für den größten

Anteil der Jahresbetriebskosten verantwortlich.

Aus der Kostenrechnung ergab sich nun, dass sich durch die signifikanten Einsparungen bei Personal- und Betriebskosten im autonomen Betrieb selbst bei einer Erhöhung des Anschaffungspreises eines Busses um den Faktor 2,6 (Linie 420) bzw. 3,7 (Linie 422) eine Einsparung von 20 % möglich ist. Die Reduzierung wurde durch eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Einflusses der Anschaffungskosten auf die Fahrzeugkilometerkosten ergänzt. Dabei zeigt sich eine große Bandbreite innerhalb derer sich eine Umstellung positiv auf die Reduzierung der Betriebskosten auswirkt.

Falls es gelingt, die Anschaffungskosten in der späteren Serie weiter zu reduzieren, sind weitere Einsparungen im Betrieb möglich.

Die Kosten für Prüf- und Zulassungsverfahren konnten nicht direkt bewertet werden, da die rechtlichen Grundlagen dafür erst geschaffen werden müssen. Die Aufwendungen für diese Verfahren zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes autonomer Busse werden deutlich höher sein als bei konventionellen Bussen und somit erhebliche Auswirkungen auf die zukünftigen Anschaffungskosten für autonome Busse haben.

5.2 Ausblick

Autonomes Fahren bietet in Zukunft auch Verkehrsunternehmen das Potential, ihre Betriebskosten zu senken. Neben der Reduzierung der Betriebskosten könnten autonome Busse auch Verkehrsunternehmen helfen, umfangreichere Mobilitätsdienstleistungen anzubieten. Derzeit können gerade im ländlichen Raum viele Linien aufgrund eines geringen Fahrgastaufkommens nicht wirtschaftlich betrieben werden, weil die Kosten für Fahrpersonal und für den Betrieb von großen Bussen die Einnahmen bei geringen Fahrgastaufkommen weit übersteigen. Diesem Problem können autonome Busse mit angepassten Gefäßgrößen Abhilfe verschaffen. Gleichzeitig bietet die neue Technologie den Busherstellern die Chance, sich am Markt zu differenzieren und über die Preis-

gestaltung einen großen Einfluss auf das mögliche Einsparpotential autonomer Busse für die Verkehrsunternehmen auszuüben.

Der Stand der Technik zeigt, dass heute schon in begrenzten Anwendungsfällen, wie Autobahnfahrten, ein sicheres Betreiben von teilautomatisierten Fahrzeugen möglich ist. Für fahrerlose Fahrzeuge muss die vorhandene Technik weiterentwickelt werden, damit die Fahrzeuge sich unabhängig von Licht- und Wetterverhältnissen in jeder Verkehrssituation fehlerfrei fortbewegen können. In naher Zukunft werden auch komplett fahrerlose Fahrzeuge ihren Weg auf die Straßen finden.

Das größere Hindernis für das fahrerlose Fahren ist die ungeklärte Rechtslage. Die bisherigen Gesetze basieren auf dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968. Dieser internationale Vertrag schreibt vor: *„Jeder Führer muß dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.“* (Bundesgesetzblatt 11.10.1977, S. 821). Dieses Gesetz steht dem Einsatz fahrerlosen Fahrzeugen im Wege. Im März 2013 überarbeiteten die Vereinten Nationen das Wiener Übereinkommen dahingehend, dass nun auch Fahrerassistenzsysteme, welche die Führung des Fahrzeuges beeinflussen, zulässig sind, wenn der Fahrer stets in der Lage ist, die Systeme zu übersteuern oder auszuschalten (vgl. United Nations).

Erst eine neue Gesetzgebung und die daraus resultierenden Prüf- und Zulassungsverfahren werden letztlich das autonome Fahren auf öffentlichen Straßen ermöglichen. Dann kann autonomes Fahren neben dem zusätzlichen Zeit- und Komfortgewinn, auch zur Lösung aktueller Verkehrsprobleme beitragen.

6 Literaturverzeichnis

((eTicket Deutschland (2016): Das ((eTicke t- so funktioniert. Online verfügbar unter <http://fahrgaeste.eticket-deutschland.de/das-eticket-so-funktioniert/>, zuletzt geprüft am 01.10.2016.

acatech (Hg.) (2015): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München: Utz (acatech Position).

Arbeitsamt der DG (o.J.): Berufsorientierung Busfahrer/in. Online verfügbar unter http://www.adg.be/desktopdefault.aspx/tabid-1999/3652_read-32445/3, zuletzt geprüft am 30.08.2016.

SAE J3016, 2014: Automated Driving.

Becker, Jan. et al. (2014): Bosch's Vision and Roadmap Toward Fully Autonomous Driving. In: Gereon Meyer und Sven Beiker (Hg.): Road Vehicle Automation. Cham, s.l.: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mobility), S. 49–59.

BMVI (2016): Bundeskabinett beschließt Umsetzung des Wiener Übereinkommens. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2016/044-dobrindt-automatisiertes-fahren.html>, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Braess, Hans-Hermann (Hg.) (2013): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 50 Tabellen. 7., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch).

Braunschweiger Verkehrs-GmbH (2016): Zahlen, Daten, Informationen. Online verfügbar unter http://www.verkehr-bs.de/fileadmin/user_upload/downloads/Flyer/BSVG-Flyer_Wissenswert_11-15_online.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2016.

Bundesanstalt für Straßenwesen (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Bergisch Gladbach.

Bundesgesetzblatt (11.10.1977): Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen, http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl277s0809.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl277s0809.pdf%27%5D__1476975818037, zuletzt geprüft am 12.10.2016.

Cacilo, Andrej et al. (2015): Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen- Industriepolitische Schlussfolgerungen. Hg. v. FraFraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation.

Carstensen, Peter (2008): Investitionsrechnung kompakt. Eine anwendungsorientierte Einführung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-9914-6>.

Cebr (2014): The future economic and environmental costs of gridlock in 2030. Online verfügbar unter http://inrix.com/wp-content/uploads/2015/08/Whitepaper_Cebr-Cost-of-Congestion.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2016.

Daimler AG (o.J.): Der Mercedes-Benz Future Bus. Online verfügbar unter <https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/future-bus.html>, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Europäische Union (2009): Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen. Online verfügbar unter <http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu->

im-

port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2016.

EvoBus GmbH (o.J.): Die Technik des Future Bus. Online verfügbar unter <https://www.evobus.com/layer/die-technik-des-future-bus/>, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Hartmann, Michaela (2006): Preismanagement im Einzelhandel. 1. Aufl. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=749002>.

Hering, Ekbert (2014): Kalkulation für Ingenieure. Wiesbaden: Springer (essentials). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05199-0>.

Hummel, Thomas (2011): Fahrerassistenzsysteme. Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der deutschen Versicherer. Berlin: GDV (Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V FS, Fahrzeugsicherheit / Unfallforschung der Versicherer, 03). Online verfügbar unter http://www340.admin3.yco.de/sites/default/files/tx_udvpublications/FB_Nr12_FS_03_FAS.pdf, zuletzt geprüft am 17.10.2016.

Hungenberg, Harald (2012): Strategisches Management in Unternehmen. Ziele - Prozesse - Verfahren. 7. Aufl. 2012. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-3841-1>.

INRIX (2016): INRIX 2015 Traffic Scorecard. Deutschlands Staukarte. Online verfügbar unter <http://inrix.com/wp-content/uploads/2016/03/German-INRIX-Traffic-Scorecard-Infographic-FINAL.pdf>, zuletzt geprüft am 12.09.2016.

Jootel, P. (2012): SARTRE. Project Final Report. Online verfügbar unter http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_Final-Report.pdf, zuletzt geprüft am 08.09.2016.

Leuthardt, Helmut (2005): Betriebskosten von Linienbussen im systematischen Vergleich. In: *Der Nahverkehr* (11).

Leuthardt, Helmut (2008): Betriebswirtschaftlich optimale Nutzungsdauer von Linienbussen. Wie die betriebliche Nutzungsdauer die Betriebskosten eines Standardbusses beeinflusst. In: *Der Nahverkehr*.

Leuthardt, Helmut (2010): Die Wirtschaftlichkeit von Gelenkbussen und Buszügen. In: *Der Nahverkehr*.

MAN (2016): MAN Lion's City. Online verfügbar unter http://www.bus.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/Lions_City.pdf, zuletzt geprüft am 28.09.2016.

Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (2015): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9>.

Mercedes-Benz: Future Bus. Online verfügbar unter http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/bus/home/buses_world/update/news_2016/mercedes_future_bus.0002.html, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Mercedes-Benz (2016): Travego Generation EU VI. Online verfügbar unter http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/bus/home/new_buses/models/touring_coaches/Travego_edition_1/facts/safety/safe_driving.html, zuletzt geprüft am 01.10.2016.

Metromile (2015): Self-Driving Cars & The Future of Car Insurance. Online verfügbar unter <https://www.metromile.com/blog/self-driving-car-insurance/>, zuletzt geprüft am 28.09.2016.

Meyer, Gereon (2013): Herausforderungen und Chancen der Automatisierung von Straßenfahrzeugen. Konferenzbericht. VDI/VDE-IT.

Morgan Stanley (2015): A Huge Breakthrough in Fuel Economy (Green Cars Journal's). Online verfügbar unter <http://carsofchange.com/perspectives/huge-breakthrough-fuel-economy/>, zuletzt geprüft am 08.09.2016.

Pankow, Gabriel (2016): Volvo: Autonomes Fahren macht Autos wesentlich teurer. Online verfügbar unter <https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/fahrzeugtechnik/volvo-autonomes-fahren-macht-autos-wesentlich-teurer-109.html>, zuletzt geprüft am 01.10.2016.

Proff, Heike (Hg.) (2014): Radikale Innovationen in der Mobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte ; [5. Wissenschaftsforum Mobilität "Radical Innovations in Mobility"]. Wissenschaftsforum Mobilität; Wissenschaftsforum Mobilität "Radical Innovations in Mobility" 5 (Duisburg). Wiesbaden: Springer Gabler (Springer-Gabler Research).

Reif, Konrad (Hg.) (2010): Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Bosch-Fachinformation Automobil).

Reif, Konrad (2014): Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure. 5., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ-MTZ-Fachbuch).

Reinhardt, Winfried (2012): Öffentlicher Personennahverkehr. Technik - rechtliche und betriebswirtschaftliche Grundlagen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden (Praxis). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8234-9>.

Schnieder, Lars (2015): Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Ziele, Methoden, Konzepte. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Schwenkert, Rainer; Stry, Yvonne (2016): Finanzmathematik kompakt. Für Studierende und Praktiker. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49692-3>.

Schwinn, Rolf; Südkamp, Andreas (1993): Betriebswirtschaftslehre. München: Oldenbourg.

Spiegel Online (2016): Fahrdienst Uber testet selbstfahrende Autos. Online verfügbar unter <http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/fahrdienst-uber-testet-selbstfahrende-autos-in-pittsburgh-a-1108353.html>, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Springer Gabler Verlag (Hg.) (o.J.a): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Sensitivitätsanalyse. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13847/sensitivitaetsanalyse-v7.html>, zuletzt geprüft am 08.10.2016.

Springer Gabler Verlag (Hg.) (o.J.b): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Verkehrsmittel. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/79119/verkehrsmittel-v6.html>, zuletzt geprüft am 20.09.2016.

Statista (2016): Gesamte Stauflänge auf Autobahnen in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2015. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/200201/umfrage/gesamte-staulaenge-auf-autobahnen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 12.09.2016.

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2016a): Unfallbilanz 2015. Pressemitteilung vom 12. Juli 2016. Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2016b): Unfallursachen. Fehlverhalten der Fahrzeugführer bei Unfällen mit Personenschäden. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/FehlverhaltenFahrzeugfuehrer.html>, zuletzt geprüft am 06.09.2016.

Tesla Motors (2016): Model S Software Version 7.0. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_DE/presskit/autopilot, zuletzt aktualisiert am 20.09.2016.

Töpfer, Armin (2007): Betriebswirtschaftslehre. Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen. 2., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49395-2>.

United Nations: Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety. Online verfügbar unter <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp1/ECE-TRANS-WP1-145e.pdf>.

VDA (2015): Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. In: *VDA Magazin*.

VDA (2016): Automatisiertes Fahren. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html>, zuletzt aktualisiert am 05.08.2016, zuletzt geprüft am 06.08.2016.

VDV (2014): Rahmenempfehlung für Stadt-Niederflur-Linienbusse.

VDV (2016): Niederflurtechnik. Online verfügbar unter <http://www.mobilwissen.de/Technik-und-Innovation/Niederflurtechnik>, zuletzt geprüft am 15.09.2016.

Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hg.) (2015): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch). Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=961554>.

Anhang

Verzeichnis

Anhang 1:	Korrespondenz mit Herrn Kappel.....	83
Anhang 2:	Fahrplan der Linie 422 ab dem 17.10.2016	86
Anhang 3:	Streckenverlauf der Linie 422	88
Anhang 4:	Fahrplan der Linie 420 ab dem 17.10.2016	89
Anhang 5:	Streckenverlauf der Linie 422	93
Anhang 6:	Aufgabenstellung.....	94

Anhang 1: Korrespondenz mit Herrn Kappel

GMX - AW: Ihre Anfrage

<https://3c.gmx.net/mail/client/mail/print.jsessionid=C218CE18F529F3431D72B84C9A36BDD...>**GMX** FreeMail**AW: Ihre Anfrage**

Von: ruediger.kappel@daimler.com
An: philipp.loos91@gmx.de
Datum: 25.08.2016 14:16:24

Sehr geehrter Herr Loos,

ich versuche mal ein paar Antworten zu geben, bitte sehen Sie unten
mein Ergänzungen.

Viel Erfolg!

Mit freundlichen Grüßen/Kind regards

Rüdiger Kappel

Mercedes-Benz Omnibusse
Leiter Vertrieb Deutschland
Daimler Buses
EvoBus GmbH

Tel.: +49 621 740 2801
Mobil: +49 151 586 09009
PC-Fax: +49 711 17 79073458

1 von 6

18.10.2016 19:12

GMX - AW: Ihre Anfrage

<https://3c.gmx.net/mail/client/mail/print.jsessionid=C218CE18F529F3431D72B84C9A36BDD...>

meet us on the internet: <http://www.evobus.com>

EvoBus GmbH

Sitz und Registergericht/Domicile and Court of Registry: Mercedesstraße 127/6, 70327 Stuttgart; Amtsgericht Stuttgart

HRB-Nr./Commercial Register No.: 17316 - Steuernummer 99011/13131 - USt-ID DE 14 70 32 272

Geschäftsführer/Managing Directors: Hartmut Schick (Vorsitzender), Ulrich Bastert, Steffen Hoffmann, Lutz Wittig, Marcus Nicolai, Gustav Tuschen

Vorsitzender des Aufsichtsrats/Chairman of the Supervisory Board: Wolfgang Bernhard

Von: Philipp Loos [mailto:philipp.loos91@gmx.de]
Gesendet: Mittwoch, 24. August 2016 17:47
An: Kappel, Ruediger (EVOMA)
Betreff: Aw: Ihre Anfrage

Sehr geehrter Herr Kappel,

vielen Dank für Ihre schnelle Rückmeldung.

Mir ist bewusst, dass in diesem Entwicklungsstand dieser zukunftsweisenden Technologie keine genaueren Informationen heraus geben können.
Da Sie in diesem Thema sicher einiges an Wissen haben, würde ich Ihnen gerne trotzdem ein paar Fragen stellen.

In meiner Thesis soll eine wirtschaftliche Analyse zwischen einem konventionellen und einem autonomen 12m Standardbus mit Dieselantrieb erstellt werden. Ein wichtiger Faktor sind natürlich die Anschaffungskosten der beiden Fahrzeuge. Leider habe ich bisher keinen validen Ansatz zur Abschätzung der Kosten für einen solchen

2 von 6

18.10.2016 19:12

GMX - AW: Ihre Anfrage

<https://3c.gmx.net/mail/client/mail/print.jsessionid=C218CE18F529F3431D72B84C9A36BDD..>

autonomen Bus. Könnten Sie mir eine Abschätzung nennen in welchen Rahmen sich ein solches System bewegen würde? Sind es +50% auf einen konventionellen Bus oder kostet die verbaute Technik mit Sensoren und Steuerelektronik eventuell nur 50.000€? Es geht mir dabei nur um eine grobe Einschätzung, da ich bisher ca. 250.000€ für den konventionellen Bus veranschlage und ich

Wir können aktuell keine Angaben zu Preisen machen, da auch die zu erwartenden Stückzahlen nicht abschätzbar sind. Das ist relevant zur Umlage der Fixkosten.

Wir befinden uns absolut im Prototypenbereich.

Welche zusätzlichen Maßnahmen oder Technologien würde der Future Bus benötigen um komplett fahrerlos zu fahren? Gehen ich richtig der Annahme, dass die vorhandene Technik hypothetisch ausreicht einen fahrerlosen Betrieb zu ermöglichen?

Die Technik würde dies sicher relativ bald ermöglichen. Es müssen aber die gesetzlichen Rahmenbedingungen hierzu geschaffen werden,

es geht dann auch um Lenk und Ruhezeiten, Notfallszenarien, Vorrangregelungen etc.. Aus diesen Gründen wird es m.E. noch dauern, bis

ein Einsatz ohne Fahrer auch gesetzlich möglich ist.

Eine weitere interessante Frage wäre, wie hoch die erwartete Kraftstoffeinsparung im Stadtbetrieb eines autonomen Busses ist. Ich konnte einige Studien finden, die Einsparungen im Bereich zwischen 10-20% prognostizieren.

Die Einsparungen sind heute schon erkennbar, allerdings fehlen uns belastbare Daten aus dem Realbetrieb. Sicher kann man sagen, das aufgrund effizienterem

Fahren Einsparungen möglich sind. Die aber wahrscheinlich je nach Topographie und Einsatz unterschiedlich ausfallen werden.

Gibt es eine Abschätzung über einen zusätzlichen Wartungsaufwand für die Sensoren und Regelungselektronik des Systems? Bisher gehe ich davon aus, dass die Sensorik selbstständig Fehler meldet und nur ein erhöhter Aufwand durch regelmäßige Sichtkontrolle und Reinigung der Sensoren auftritt. Allerdings würde ich insgesamt von geringen Wartungskosten ausgehen, da z.B. der Future Bus laut Presseinformationen einen

3 von 6

18.10.2016 19:12

GMX - AW: Ihre Anfrage

<https://3c.gmx.net/mail/client/mail/print.jsessionid=C218CE18F529F3431D72B84C9A36BDD..>

höheren Fahrkomfort aufweist und damit auch materialschonender fährt (auch bezüglich Reifenverschleiß und weniger Bordsteinkontakte durch Fahrfehler).

Das kann auch nur der Serieneinsatz zeigen, ist momentan zu früh.

Ich habe vollstes Verständnis, falls Sie die Fragen nicht beantworten können, würde mich aber dennoch über einige Antworten sehr freuen.

Vielen Dank im Voraus.

Mit freundlichen Grüßen

Philipp Loos

Gesendet: Dienstag, 16. August 2016 um 08:43 Uhr
Von: ruediger.kappel@daimler.com
An: philipp.loos91@gmx.de
Cc: stephan.fittkau@daimler.com, Angelika.Dimler@daimler.com
Betreff: Ihre Anfrage

Sehr geehrter Herr Loos,

vielen Dank für Ihr Interesse an unserem Future Bus.

Wir sind damit einen deutlichen Schritt in Richtung zukünftige

Beförderungsmöglichkeiten im ÖPNV gegangen.

Gerne können Sie mir Ihre Fragen senden, ich befürchte aber,

dass wir vieles unbeantwortet lassen müssen.

4 von 6

18.10.2016 19:12

GMX - AW: Ihre Anfrage

<https://3c.gmx.net/mail/client/mail/print.jsessionid=C218CE18F529F3431D72B84C9A36BDD...>

Alle Informationen, die wir veröffentlichen können, liegen der Fachpresse
vor bzw. sind im Internet abrufbar.

Da wir uns im einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden, können
und möchten wir keine detaillierten Informationen weitergeben.

Das beinhaltet auch Preise, Laufleistungen, Service, Technik etc..

Bitte um Ihr Verständnis und viel Erfolg bei Ihrer Bachelorarbeit!

Mit freundlichen Grüßen Kind regards

Rüdiger Kappel

Mercedes-Benz Omnibusse
Leiter Vertrieb Deutschland
Daimler Buses
EvoBus GmbH

Tel: +49 621 740 2801
Mobil: +49 151 586 09009
PC-Fax: +49 711 17 79073458

meet us on the internet: <http://www.evobus.com>

EvoBus GmbH

Sitz und Registergericht Domicile and Court of Registry: Mercedesstraße 127/6, 70327 Stuttgart; Amtsgericht Stuttgart

HRB-Nr./Commercial Register No.: 17316 - Steuernummer 99011/13131 - USt-ID DE 14 70 32 272

Geschäftsführer/Managing Directors: Hartmut Schick (Vorsitzender), Ulrich Elstert, Steffen Hoffmann, Lutz Wittig, Marcus Nicolai, Gustav Tuschon

Vorsitzender des Aufsichtsrats/Chairman of the Supervisory Board: Wolfgang Bernhard

5 von 6

18.10.2016 19:12

GMX - AW: Ihre Anfrage

<https://3c.gmx.net/mail/client/mail/print.jsessionid=C218CE18F529F3431D72B84C9A36BDD...>



If you are not the addressee, please inform us immediately that you have received this e-mail by mistake, and
delete it. We thank you for your support.

If you are not the addressee, please inform us immediately that you have received this e-mail by mistake, and delete
it. We thank you for your support.

6 von 6

18.10.2016 19:12

Anhang 2: Fahrplan der Linie 422 ab dem 17.10.2016

<div> <div>Bus 422</div> <div>Bebelhof - Stadtpark - Rathaus - Lehnndorf</div> <div>--- Sperrung Messeweg ---</div> <div>   </div> </div>											
aktueller Fahrplan gültig ab 17.10.2016											
Montags-freitags											
VERKEHRSHINWEIS											
Bebelhof	5.58	6.28	6.58	7.14	7.28	7.58	alle	19.28	—	—	
Zivildienstschule	5.59	6.29	6.59	7.15	7.29	7.59	30	19.29	—	—	
Hauptbahnhof Süd	6.00	6.30	7.00	7.16	7.30	8.00	Min	19.30	—	—	
Ackerstraße	6.02	6.32	7.02	7.18	7.32	8.02		19.32	—	—	
Marienstift	6.03	6.33	7.03	7.19	7.33	8.03		19.33	—	—	
Korffesstraße	6.04	6.34	7.04	7.20	7.34	8.04		19.34	—	—	
Herzogin-Elisabeth-Straße	6.05	6.35	7.05	7.21	7.35	8.05		19.35	—	—	
Prinz-Albrecht-Park	6.06	6.36	7.06	7.22	7.36	8.06		19.36	—	—	
Nussbergstraße	6.07	6.37	7.07	7.23	7.37	8.07		19.37	—	—	
Stadtpark	6.09	6.39	7.09	7.25	7.39	8.09		19.39	—	—	
Jasperallee	6.11	6.41	7.11	7.27	7.41	8.11		19.41	—	—	
Kasernenstraße	6.12	6.42	7.12	7.28	7.42	8.12		19.42	—	—	
Staatstheater	6.13	6.43	7.13	7.29	7.43	8.13		19.43	—	—	
Rathaus	an	6.15	6.45	7.15	7.31	7.45	8.15	19.45	—	—	
Rathaus	ab	6.15	6.45	7.15	7.31	7.45	8.15	19.45	20.00	20.30	
Packhof	6.16	6.46	7.16	7.32	7.46	8.16		19.46	20.01	20.31	
Hintern Brüdern	6.17	6.47	7.17	7.33	7.47	8.17		19.47	20.02	20.32	
Altstadtmarkt	6.18	6.48	7.18	7.34	7.48	8.18		19.48	20.03	20.33	
Güldenstraße	6.19	6.49	7.19	7.35	7.49	8.19		19.49	20.04	20.34	
Goslarische Straße	6.20	6.50	7.20	—	7.50	8.20		19.50	20.05	20.35	
Tuckermannstraße	6.21	6.51	7.21	—	7.51	8.21		19.51	20.06	20.36	
Maienstraße	6.23	6.53	7.23	—	7.53	8.23		19.53	20.08	20.38	
Kälberwiese	6.24	6.54	7.24	—	7.54	8.24		19.54	20.09	20.39	
Rudolfplatz	6.25	6.55	7.25	—	7.55	8.25		19.55	20.10	20.40	
Hermannstraße	6.27	6.57	7.27	—	7.57	8.27		19.57	20.11	20.41	
Julius-Konegen-Straße	6.28	6.58	7.28	—	7.58	8.28		19.58	20.12	20.42	
Aussigstraße	6.30	7.00	7.30	—	8.00	8.30		20.00	20.13	20.43	
Trierstraße	6.31	7.01	7.31	—	8.01	8.31		20.01	20.14	20.44	
St.-Wendel-Straße	6.32	7.02	7.32	—	8.02	8.32		20.02	20.15	20.45	
Saarpfatz	6.34	7.04	7.34	—	8.04	8.34		20.04	20.16	20.46	
Neunkirchener Straße	6.37	7.07	7.37	—	8.07	8.37		20.07	20.19	20.49	
Samstags											
Bebelhof	—	—	—	—	9.28	9.58	alle	18.28	—	—	
Zivildienstschule	—	—	—	—	9.29	9.59	30	18.29	—	—	
Hauptbahnhof Süd	—	—	—	—	9.30	10.00	Min	18.30	—	—	
Ackerstraße	—	—	—	—	9.32	10.02		18.32	—	—	
Marienstift	—	—	—	—	9.33	10.03		18.33	—	—	
Korffesstraße	—	—	—	—	9.34	10.04		18.34	—	—	
Herzogin-Elisabeth-Straße	—	—	—	—	9.35	10.05		18.35	—	—	
Prinz-Albrecht-Park	—	—	—	—	9.36	10.06		18.36	—	—	
Nussbergstraße	—	—	—	—	9.37	10.07		18.37	—	—	
Stadtpark	—	—	—	—	9.39	10.09		18.39	—	—	
Jasperallee	—	—	—	—	9.41	10.11		18.41	—	—	
Kasernenstraße	—	—	—	—	9.42	10.12		18.42	—	—	
Staatstheater	—	—	—	—	9.43	10.13		18.43	—	—	
Rathaus	an	—	—	—	9.45	10.15		18.45	—	—	
Rathaus	ab	8.00	8.30	9.00	9.15	9.45	10.15	18.45	19.00	19.30	
Packhof	8.01	8.31	9.01	9.16	9.46	10.16		18.46	19.01	19.31	
Hintern Brüdern	8.02	8.32	9.02	9.17	9.47	10.17		18.47	19.02	19.32	
Altstadtmarkt	8.03	8.33	9.03	9.18	9.48	10.18		18.48	19.03	19.33	
Güldenstraße	8.04	8.34	9.04	9.19	9.49	10.19		18.49	19.04	19.34	
Goslarische Straße	8.05	8.35	9.05	9.20	9.50	10.20		18.50	19.05	19.35	
Tuckermannstraße	8.06	8.36	9.06	9.21	9.51	10.21		18.51	19.06	19.36	
Maienstraße	8.08	8.38	9.08	9.23	9.53	10.23		18.53	19.08	19.38	
Kälberwiese	8.09	8.39	9.09	9.24	9.54	10.24		18.54	19.09	19.39	
Rudolfplatz	8.10	8.40	9.10	9.25	9.55	10.25		18.55	19.10	19.40	
Hermannstraße	8.11	8.41	9.11	9.27	9.57	10.27		18.57	19.11	19.41	
Julius-Konegen-Straße	8.12	8.42	9.12	9.28	9.58	10.28		18.58	19.12	19.42	
Aussigstraße	8.13	8.43	9.13	9.30	10.00	10.30		19.00	19.13	19.43	
Trierstraße	8.14	8.44	9.14	9.31	10.01	10.31		19.01	19.14	19.44	
St.-Wendel-Straße	8.15	8.45	9.15	9.32	10.02	10.32		19.02	19.15	19.45	
Saarpfatz	8.16	8.46	9.16	9.34	10.04	10.34		19.04	19.16	19.46	
Neunkirchener Straße	8.19	8.49	9.19	9.37	10.07	10.37		19.07	19.19	19.49	
Sonn- und feiertags											
Stadtpark	9.21	9.51	—	—	19.21	—	—	—	—	—	
Jasperallee	9.23	9.53	—	—	19.23	—	—	—	—	—	
Kasernenstraße	9.24	9.54	—	—	19.24	—	—	—	—	—	
Staatstheater	9.25	9.55	—	—	19.25	—	—	—	—	—	
Rathaus	an	9.27	9.57	—	19.27	—	—	—	—	—	
Rathaus	ab	9.30	10.00	—	19.30	—	—	—	—	—	
Packhof	9.31	10.01	—	—	19.31	—	—	—	—	—	
Hintern Brüdern	9.32	10.02	—	—	19.32	—	—	—	—	—	
Altstadtmarkt	9.33	10.03	—	—	19.33	—	—	—	—	—	
Güldenstraße	9.34	10.04	—	—	19.34	—	—	—	—	—	
Goslarische Straße	9.35	10.05	—	—	19.35	—	—	—	—	—	
Tuckermannstraße	9.36	10.06	—	—	19.36	—	—	—	—	—	
Maienstraße	9.38	10.08	—	—	19.38	—	—	—	—	—	
Kälberwiese	9.39	10.09	—	—	19.39	—	—	—	—	—	
Rudolfplatz	9.40	10.10	—	—	19.40	—	—	—	—	—	
Hermannstraße	9.41	10.11	—	—	19.41	—	—	—	—	—	
Julius-Konegen-Straße	9.42	10.12	—	—	19.42	—	—	—	—	—	
Aussigstraße	9.43	10.13	—	—	19.43	—	—	—	—	—	
Trierstraße	9.44	10.14	—	—	19.44	—	—	—	—	—	
St.-Wendel-Straße	9.45	10.15	—	—	19.45	—	—	—	—	—	
Saarpfatz	9.46	10.16	—	—	19.46	—	—	—	—	—	
Neunkirchener Straße	9.49	10.19	—	—	19.49	—	—	—	—	—	

S = nur an Schultagen, am ersten und letzten Schultag nach Bedarf der Schulen

Bus 422

Lehndorf - Rathaus - Stadtpark - Bebelhof

--- Sperrung Messweg ---



aktueller Fahrplan gültig ab 17.10.2016

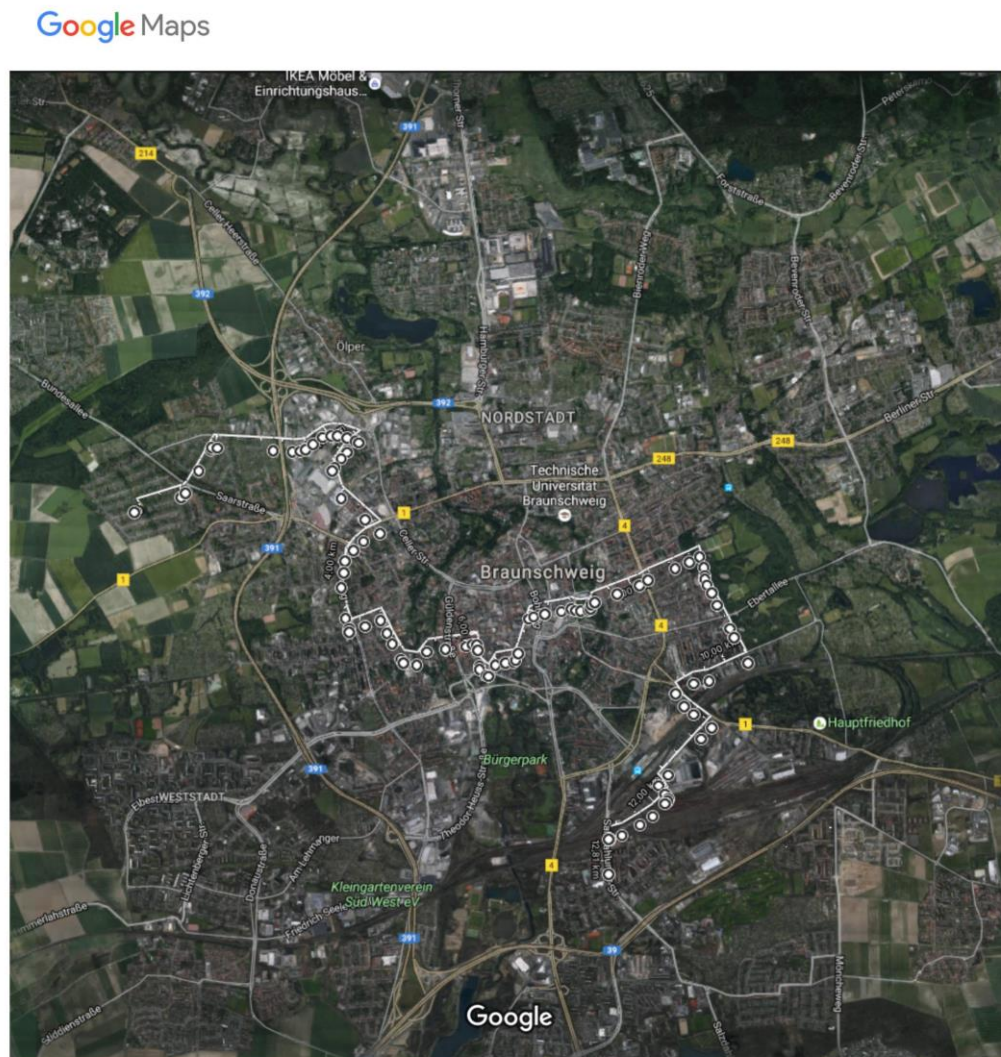
Montags-freitags										
Neunkirchener Straße	—	5.06	5.36	6.01	6.31	alle	19.01	19.36		
Saarplatz	—	5.08	5.38	6.03	6.33	30	19.03	19.38		
St.-Wendel-Straße	—	5.09	5.39	6.04	6.34	Min	19.04	19.39		
Trierstraße	—	5.10	5.40	6.05	6.35		19.05	19.40		
Aussigstraße	—	5.11	5.41	6.06	6.36		19.06	19.41		
Julius-Konegen-Straße	—	5.12	5.42	6.07	6.37		19.07	19.42		
Hermannstraße	—	5.13	5.43	6.08	6.38		19.08	19.43		
Rudolfplatz	—	5.15	5.45	6.10	6.40		19.10	19.45		
Kälberwiese	—	5.16	5.46	6.11	6.41		19.11	19.46		
Maienstraße	—	5.17	5.47	6.13	6.43		19.13	19.47		
Tuckermannstraße	—	5.18	5.48	6.14	6.44		19.14	19.48		
Goslarsche Straße	—	5.20	5.50	6.16	6.46		19.16	19.50		
Güldenstraße	—	5.21	5.51	6.17	6.47		19.17	19.51		
Altstadtmarkt	—	5.22	5.52	6.18	6.48		19.18	19.52		
Friedrich-Wilhelm-Platz	—	5.23	5.53	6.20	6.50		19.20	19.53		
Friedrich-Wilhelm-Straße	—	5.24	5.54	6.21	6.51		19.21	19.54		
Münzstraße	—	5.25	5.55	6.22	6.52		19.22	19.55		
Rathaus	an	5.27	5.57	6.25	6.55		19.25	19.57		
Rathaus	ab	5.00	5.30	6.00	6.25		19.25	—		
Staatstheater	—	5.01	5.31	6.01	6.26		19.26	—		
Kasernenstraße	—	5.02	5.32	6.02	6.27		19.27	—		
Jasperallee	—	5.03	5.33	6.03	6.28		19.28	—		
Stadtpark	—	5.04	5.34	6.04	6.29		19.29	—		
Nussbergstraße	—	5.05	5.35	6.05	6.30		19.30	—		
Prinz-Albrecht-Park	—	5.05	5.35	6.05	6.31		19.31	—		
Herzogin-Elisabeth-Straße	—	5.06	5.36	6.06	6.32		19.32	—		
Korfesstraße	—	5.07	5.37	6.07	6.33		19.33	—		
Marienstift	—	5.08	5.38	6.08	6.34		19.34	—		
Ackerstraße	—	5.09	5.39	6.09	6.35		19.35	—		
Hauptbahnhof Süd	—	5.10	5.40	6.10	6.36		19.36	—		
Zivildienstschule	—	5.11	5.41	6.11	6.37		19.37	—		
Bebelhof	—	5.13	5.43	6.13	6.40		19.40	—		

Samstags										
Neunkirchener Straße	7.06	7.36	8.06	8.36	9.03	9.33	alle	18.03	18.36	19.06
Saarplatz	7.08	7.38	8.08	8.38	9.05	9.35	30	18.05	18.38	19.08
St.-Wendel-Straße	7.09	7.39	8.09	8.39	9.06	9.36	Min	18.06	18.39	19.09
Trierstraße	7.10	7.40	8.10	8.40	9.07	9.37		18.07	18.40	19.10
Aussigstraße	7.11	7.41	8.11	8.41	9.08	9.38		18.08	18.41	19.11
Julius-Konegen-Straße	7.12	7.42	8.12	8.42	9.09	9.39		18.09	18.42	19.12
Hermannstraße	7.13	7.43	8.13	8.43	9.10	9.40		18.10	18.43	19.13
Rudolfplatz	7.15	7.45	8.15	8.45	9.12	9.42		18.12	18.45	19.15
Kälberwiese	7.16	7.46	8.16	8.46	9.13	9.43		18.13	18.46	19.16
Maienstraße	7.17	7.47	8.17	8.47	9.14	9.44		18.14	18.47	19.17
Tuckermannstraße	7.18	7.48	8.18	8.48	9.15	9.45		18.15	18.48	19.18
Goslarsche Straße	7.20	7.50	8.20	8.50	9.17	9.47		18.17	18.50	19.20
Güldenstraße	7.21	7.51	8.21	8.51	9.18	9.48		18.18	18.51	19.21
Altstadtmarkt	7.22	7.52	8.22	8.52	9.19	9.49		18.19	18.52	19.22
Friedrich-Wilhelm-Platz	7.23	7.53	8.23	8.53	9.21	9.51		18.21	18.53	19.23
Friedrich-Wilhelm-Straße	7.24	7.54	8.24	8.54	9.22	9.52		18.22	18.54	19.24
Münzstraße	7.25	7.55	8.25	8.55	9.23	9.53		18.23	18.55	19.25
Rathaus	an	7.27	7.57	8.27	8.57	9.25	9.55	18.25	18.57	19.27
Rathaus	ab	—	—	—	—	9.25	9.55	18.25	19.00	—
Staatstheater	—	—	—	—	—	9.26	9.56	18.26	19.01	—
Kasernenstraße	—	—	—	—	—	9.27	9.57	18.27	19.02	—
Jasperallee	—	—	—	—	—	9.28	9.58	18.28	19.03	—
Stadtpark	—	—	—	—	—	9.29	9.59	18.29	19.04	—
Nussbergstraße	—	—	—	—	—	9.30	10.00	18.30	19.05	—
Prinz-Albrecht-Park	—	—	—	—	—	9.31	10.01	18.31	19.05	—
Herzogin-Elisabeth-Straße	—	—	—	—	—	9.32	10.02	18.32	19.06	—
Korfesstraße	—	—	—	—	—	9.33	10.03	18.33	19.07	—
Marienstift	—	—	—	—	—	9.34	10.04	18.34	19.08	—
Ackerstraße	—	—	—	—	—	9.35	10.05	18.35	19.09	—
Hauptbahnhof Süd	—	—	—	—	—	9.36	10.06	18.36	19.10	—
Zivildienstschule	—	—	—	—	—	9.37	10.07	18.37	19.11	—
Bebelhof	—	—	—	—	—	9.40	10.10	18.40	19.13	—

Sonn- und feiertags										
Neunkirchener Straße	9.06	9.36	alle	19.06						
Saarplatz	9.08	9.38	30	19.08						
St.-Wendel-Straße	9.09	9.39	Min	19.09						
Trierstraße	9.10	9.40		19.10						
Aussigstraße	9.11	9.41		19.11						
Julius-Konegen-Straße	9.12	9.42		19.12						
Hermannstraße	9.13	9.43		19.13						
Rudolfplatz	9.15	9.45		19.15						
Kälberwiese	9.16	9.46		19.16						
Maienstraße	9.17	9.47		19.17						
Tuckermannstraße	9.18	9.48		19.18						
Goslarsche Straße	9.20	9.50		19.20						
Güldenstraße	9.21	9.51		19.21						
Altstadtmarkt	9.22	9.52		19.22						
Friedrich-Wilhelm-Platz	9.23	9.53		19.23						
Friedrich-Wilhelm-Straße	9.24	9.54		19.24						
Münzstraße	9.25	9.55		19.25						
Rathaus	an	9.27	9.57	19.27						
Rathaus	ab	9.30	10.00	19.30						
Staatstheater	—	9.31	10.01	19.31						
Kasernenstraße	—	9.32	10.02	19.32						
Jasperallee	—	9.33	10.03	19.33						
Stadtpark	—	9.34	10.04	19.34						

Abhang 3: Streckenverlauf der Linie 422

Google Maps

<https://www.google.de/maps/@52.268244,10.5223745,9051m/data=!3m...>

Bilder © 2016 Google, Kartendaten © 2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google 1 km

Entfernung messen
Entfernung gesamt: 12,81 km (7,96 mi)

Anhang 4: Fahrplan der Linie 420 ab dem 17.10.2016

R

420

BS Rathaus - BS Hauptbahnhof - WF Bahnhof

aktueller Fahrplan gültig ab 17.10.2016

Montags-freitags

Braunschweig Rathaus	—	—	—	6.35	6.50	7.05	7.20	7.35	7.50	alle	19.05	19.35	20.15	21.01	22.01
- Schloss	—	—	—	6.36	6.51	7.06	7.21	7.36	7.51	15	19.06	19.36	20.16	21.02	22.02
- John-F.-Kennedy-Platz	—	—	—	6.38	6.53	7.08	7.23	7.38	7.53	Min	19.08	19.38	20.18	21.04	22.04
- Campestraße	—	—	—	6.39	6.54	7.09	7.24	7.39	7.54		19.09	19.39	20.19	21.05	22.05
- Hauptbahnhof	5.25	5.55	6.12	6.42	6.57	7.12	7.27	7.42	7.57		19.12	19.42	20.21	21.07	22.07
- Bürgerpark	5.27	5.57	6.14	6.44	6.59	7.14	7.29	7.44	7.59		19.14	19.44	20.23	21.09	22.09
- Richmondweg	5.28	5.58	6.15	6.45	7.00	7.15	7.30	7.45	8.00		19.15	19.45	20.24	21.10	22.10
- Wolfenbüttel Sternhaus	5.35	6.05	6.22	6.52	7.07	7.22	7.37	7.52	8.07		19.22	19.52	20.31	21.17	22.17
- Forstweg	5.36	6.06	6.23	6.53	7.08	7.23	7.38	7.53	8.08		19.23	19.53	20.32	21.18	22.18
- Klinikum	5.37	6.07	6.24	6.54	7.09	7.24	7.39	7.54	8.09		19.24	19.54	20.32	21.18	22.18
- Mittelweg	5.38	6.08	6.25	6.55	7.10	7.25	7.40	7.55	8.10		19.25	19.55	20.33	21.19	22.19
- Ungerstraße	5.39	6.09	6.26	6.56	7.11	7.26	7.41	7.56	8.11		19.26	19.56	20.34	21.20	22.20
- Campestraße	5.40	6.10	6.27	6.57	7.12	7.27	7.42	7.57	8.12		19.27	19.57	20.35	21.21	22.21
- Breite Herzogstraße	5.42	6.12	6.29	6.59	7.14	7.29	7.44	7.59	8.14		19.29	19.59	20.37	21.23	22.23
- Kommarkt	5.44	6.14	6.31	7.01	7.16	7.31	7.46	8.01	8.16		19.31	20.01	20.39	21.25	22.25
- Bahnhofstraße	5.46	6.16	6.33	7.03	7.18	7.33	7.48	8.03	8.18		19.33	20.03	—	—	—
- Bahnhof	5.49	6.19	6.36	7.06	7.21	7.36	7.51	8.06	8.21		19.36	20.06	—	—	—

Montags-freitags

VERKEHRSHINWEIS

Braunschweig Rathaus	23.01	0.01	Fr	Fr	Fr										
- Schloss	23.02	0.02	1.12	2.22	3.32										
- John-F.-Kennedy-Platz	23.04	0.04	1.14	2.24	3.34										
- Campestraße	23.05	0.05	1.15	2.25	3.35										
- Hauptbahnhof	23.07	0.07	1.17	2.27	3.37										
- Bürgerpark	23.09	0.09	1.19	2.29	3.39										
- Richmondweg	23.10	0.10	1.20	2.30	3.40										
- Wolfenbüttel Sternhaus	23.17	0.17	1.27	2.37	3.47										
- Forstweg	23.18	0.18	1.28	2.38	3.48										
- Klinikum	23.18	0.18	1.28	2.38	3.48										
- Mittelweg	23.19	0.19	1.29	2.39	3.49										
- Ungerstraße	23.20	0.20	1.30	2.40	3.50										
- Campestraße	23.21	0.21	1.31	2.41	3.51										
- Breite Herzogstraße	23.23	0.23	1.33	2.43	3.53										
- Kommarkt	23.25	0.25	1.35	2.45	3.55										
- Bahnhofstraße	23.26	0.26	1.36	2.46	3.56										
- Bahnhof	23.28	0.28	1.38	2.48	3.58										

Samstags

Braunschweig Rathaus	5.01	alle	8.01	9.05	9.35	10.05	10.35	alle	17.20	17.50	18.20	18.50	19.15	20.15	21.01
- Schloss	5.02	60	8.02	9.06	9.36	10.06	10.36	15	17.21	17.51	18.21	18.51	19.16	20.16	21.02
- John-F.-Kennedy-Platz	5.04	Min	8.04	9.08	9.38	10.08	10.38	Min	17.23	17.53	18.23	18.53	19.18	20.18	21.04
- Campestraße	5.05		8.05	9.09	9.39	10.09	10.39		17.24	17.54	18.24	18.54	19.19	20.19	21.05
- Hauptbahnhof	5.07		8.07	9.12	9.42	10.12	10.42		17.27	17.57	18.27	18.57	19.21	20.21	21.07
- Bürgerpark	5.09		8.09	9.14	9.44	10.14	10.44		17.29	17.59	18.29	18.59	19.23	20.23	21.09
- Richmondweg	5.10		8.10	9.15	9.45	10.15	10.45		17.30	18.00	18.30	19.00	19.24	20.24	21.10
- Wolfenbüttel Sternhaus	5.17		8.17	9.22	9.52	10.22	10.52		17.37	18.07	18.37	19.07	19.31	20.31	21.17
- Forstweg	5.18		8.18	9.23	9.53	10.23	10.53		17.38	18.08	18.38	19.08	19.32	20.32	21.18
- Klinikum	5.18		8.18	9.24	9.54	10.24	10.54		17.39	18.09	18.39	19.09	19.32	20.32	21.18
- Mittelweg	5.19		8.19	9.25	9.55	10.25	10.55		17.40	18.10	18.40	19.10	19.33	20.33	21.19
- Ungerstraße	5.20		8.20	9.26	9.56	10.26	10.56		17.41	18.11	18.41	19.11	19.34	20.34	21.20
- Campestraße	5.21		8.21	9.27	9.57	10.27	10.57		17.42	18.12	18.42	19.12	19.35	20.35	21.21
- Breite Herzogstraße	5.23		8.23	9.29	9.59	10.29	10.59		17.44	18.14	18.44	19.14	19.37	20.37	21.23
- Kommarkt	5.25		8.25	9.31	10.01	10.31	11.01		17.46	18.16	18.46	19.16	19.39	20.39	21.25
- Bahnhofstraße	—		—	9.33	10.03	10.33	11.03		17.48	18.18	18.48	19.18	—	—	—
- Bahnhof	—		—	9.36	10.06	10.36	11.06		17.51	18.21	18.51	19.21	—	—	—

Samstags

Braunschweig Rathaus	22.01	23.01	0.01	1.11	2.21	3.31									
- Schloss	22.02	23.02	0.02	1.12	2.22	3.32									
- John-F.-Kennedy-Platz	22.04	23.04	0.04	1.14	2.24	3.34									
- Campestraße	22.05	23.05	0.05	1.15	2.25	3.35									
- Hauptbahnhof	22.07	23.07	0.07	1.17	2.27	3.37									
- Bürgerpark	22.09	23.09	0.09	1.19	2.29	3.39									
- Richmondweg	22.10	23.10	0.10	1.20	2.30	3.40									
- Wolfenbüttel Sternhaus	22.17	23.17	0.17	1.27	2.37	3.47									
- Forstweg	22.18	23.18	0.18	1.28	2.38	3.48									
- Klinikum	22.18	23.18	0.18	1.28	2.38	3.48									
- Mittelweg	22.19	23.19	0.19	1.29	2.39	3.49									
- Ungerstraße	22.20	23.20	0.20	1.30	2.40	3.50									
- Campestraße	22.21	23.21	0.21	1.31	2.41	3.51									
- Breite Herzogstraße	22.23	23.23	0.23	1.33	2.43	3.53									
- Kommarkt	22.25	23.25	0.25	1.35	2.45	3.55									
- Bahnhofstraße	—	23.26	0.26	1.36	2.46	3.56									
- Bahnhof	—	23.28	0.28	1.38	2.48	3.58									

Fr = nur freitags

**420****BS Rathaus - BS Hauptbahnhof - WF Bahnhof**

Sonn- und feiertags									
Braunschweig Rathaus	—	—	—	9.01	alle	22.01	23.01	0.01	
- Schloss	—	—	—	9.02	60	22.02	23.02	0.02	
- John-F.-Kennedy-Platz	—	—	—	9.04	Min	22.04	23.04	0.04	
- Campestraße	—	—	—	9.05		22.05	23.05	0.05	
- Hauptbahnhof	6.10	7.10	8.10	9.07		22.07	23.07	0.07	
- Bürgerpark	6.12	7.12	8.12	9.09		22.09	23.09	0.09	
- Richmondweg	6.13	7.13	8.13	9.10		22.10	23.10	0.10	
- Wolfenbüttel Sternhaus	6.20	7.20	8.20	9.17		22.17	23.17	0.17	
- Forstweg	6.21	7.21	8.21	9.18		22.18	23.18	0.18	
- Klinikum	6.21	7.21	8.21	9.18		22.18	23.18	0.18	
- Mittelweg	6.22	7.22	8.22	9.19		22.19	23.19	0.19	
- Ungerstraße	6.23	7.23	8.23	9.20		22.20	23.20	0.20	
- Campestraße	6.24	7.24	8.24	9.21		22.21	23.21	0.21	
- Breite Herzogstraße	6.26	7.26	8.26	9.23		22.23	23.23	0.23	
- Kornmarkt	6.28	7.28	8.28	9.25		22.25	23.25	0.25	
- Bahnhofstraße	—	—	—	—		—	23.26	0.26	
- Bahnhof	—	—	—	—		—	23.28	0.28	



WF Bahnhof - BS Hauptbahnhof - BS Rathaus



aktueller Fahrplan gültig ab 17.10.2016

Montags-freitags															
Wolfenbüttel Bahnhof	4.40	5.20	5.43	5.58	6.13	6.28	6.43	6.58	alle	18.13	18.43	19.13	—	—	—
- Bahnhofstraße	4.41	5.21	5.44	5.59	6.14	6.29	6.44	6.59	15	18.14	18.44	19.14	—	—	—
- Kommarkt	4.42	5.22	5.46	6.01	6.16	6.31	6.46	7.01	Min	18.16	18.46	19.16	19.46	20.31	21.31
- Breite Herzogstraße	4.44	5.24	5.48	6.03	6.18	6.33	6.48	7.03		18.18	18.48	19.18	19.48	20.33	21.33
- Campestraße	4.45	5.25	5.50	6.05	6.20	6.35	6.50	7.05		18.20	18.50	19.20	19.49	20.34	21.34
- Ungerstraße	4.46	5.26	5.51	6.06	6.21	6.36	6.51	7.06		18.21	18.51	19.21	19.50	20.35	21.35
- Mittelweg	4.47	5.27	5.52	6.07	6.22	6.37	6.52	7.07		18.22	18.52	19.22	19.51	20.36	21.36
- Klinikum	4.48	5.28	5.53	6.08	6.23	6.38	6.53	7.08		18.23	18.53	19.23	19.52	20.37	21.37
- Forstweg	4.49	5.29	5.54	6.09	6.24	6.39	6.54	7.09		18.24	18.54	19.24	19.53	20.38	21.38
- Sternhaus	4.50	5.30	5.55	6.10	6.25	6.40	6.55	7.10		18.25	18.55	19.25	19.54	20.39	21.39
Braunschweig Richmondweg	4.56	5.36	6.01	6.16	6.31	6.46	7.01	7.16		18.31	19.01	19.31	20.00	20.45	21.45
- Bürgerpark	4.58	5.38	6.03	6.18	6.33	6.48	7.03	7.18		18.33	19.03	19.33	20.02	20.47	21.47
- Hauptbahnhof	5.00	5.40	6.06	6.21	6.36	6.51	7.06	7.21		18.36	19.06	19.36	20.04	20.49	21.49
- Campestraße	—	—	6.07	6.22	6.37	6.52	7.07	7.22		18.37	19.07	19.37	20.05	20.50	21.50
- John-F.-Kennedy-Platz	—	—	6.09	6.24	6.39	6.54	7.09	7.24		18.39	19.09	19.39	20.07	20.52	21.52
- Schloss	—	—	6.11	6.26	6.41	6.56	7.11	7.26		18.41	19.11	19.41	20.09	20.54	21.54
- Rathaus	—	—	6.14	6.29	6.44	6.59	7.14	7.29		18.44	19.14	19.44	20.12	20.57	21.57

Montags-freitags															
VERKEHRSHINWEIS	—	—	Fr	Fr	Fr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Wolfenbüttel Bahnhof	—	23.29	0.39	1.49	2.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Bahnhofstraße	—	23.30	0.40	1.50	3.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Kommarkt	22.31	23.31	0.41	1.51	3.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Breite Herzogstraße	22.33	23.33	0.43	1.53	3.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Campestraße	22.34	23.34	0.44	1.54	3.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Ungerstraße	22.35	23.35	0.45	1.55	3.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Mittelweg	22.36	23.36	0.46	1.56	3.06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Klinikum	22.37	23.37	0.47	1.57	3.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Forstweg	22.38	23.38	0.48	1.58	3.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Sternhaus	22.39	23.39	0.49	1.59	3.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Braunschweig Richmondweg	22.45	23.45	0.55	2.05	3.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Bürgerpark	22.47	23.47	0.57	2.07	3.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Hauptbahnhof	22.49	23.49	0.59	2.09	3.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Campestraße	22.50	23.50	1.00	2.10	3.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- John-F.-Kennedy-Platz	22.52	23.52	1.02	2.12	3.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Schloss	22.54	23.54	1.04	2.14	3.24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
- Rathaus	22.57	23.57	1.07	2.17	3.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Samstags															
Wolfenbüttel Bahnhof	—	—	—	8.13	alle	10.13	10.28	10.43	10.58	11.13	alle	16.13	alle	18.13	—
- Bahnhofstraße	—	—	—	8.14	Min	10.14	10.29	10.44	10.59	11.14	15	16.14	30	18.14	—
- Kommarkt	4.31	alle	7.31	8.16	Min	10.16	10.31	10.46	11.01	11.16	Min	16.16	Min	18.16	18.46
- Breite Herzogstraße	4.33	60	7.33	8.18		10.18	10.33	10.48	11.03	11.18		16.18		18.18	18.48
- Campestraße	4.34	Min	7.34	8.20		10.20	10.35	10.50	11.05	11.20		16.20		18.20	18.49
- Ungerstraße	4.35		7.35	8.21		10.21	10.36	10.51	11.06	11.21		16.21		18.21	18.50
- Mittelweg	4.36		7.36	8.22		10.22	10.37	10.52	11.07	11.22		16.22		18.22	18.51
- Klinikum	4.37		7.37	8.23		10.23	10.38	10.53	11.08	11.23		16.23		18.23	18.52
- Forstweg	4.38		7.38	8.24		10.24	10.39	10.54	11.09	11.24		16.24		18.24	18.53
- Sternhaus	4.39		7.39	8.25		10.25	10.40	10.55	11.10	11.25		16.25		18.25	18.54
Braunschweig Richmondweg	4.45		7.45	8.31		10.31	10.46	11.01	11.16	11.31		16.31		18.31	19.00
- Bürgerpark	4.47		7.47	8.33		10.33	10.48	11.03	11.18	11.33		16.33		18.33	19.02
- Hauptbahnhof	4.49		7.49	8.36		10.36	10.51	11.06	11.21	11.36		16.36		18.36	19.04
- Campestraße	4.50		7.50	8.37		10.37	10.52	11.07	11.22	11.37		16.37		18.37	19.05
- John-F.-Kennedy-Platz	4.52		7.52	8.39		10.39	10.54	11.09	11.24	11.39		16.39		18.39	19.07
- Schloss	4.54		7.54	8.41		10.41	10.56	11.11	11.26	11.41		16.41		18.41	19.09
- Rathaus	4.57		7.57	8.44		10.44	10.59	11.14	11.29	11.44		16.44		18.44	19.12

Samstags															
Wolfenbüttel Bahnhof	—	—	—	—	23.29	0.39	1.49	2.59	—	—	—	—	—	—	—
- Bahnhofstraße	—	—	—	—	23.30	0.40	1.50	3.00	—	—	—	—	—	—	—
- Kommarkt	19.46	20.31	21.31	22.31	23.31	0.41	1.51	3.01	—	—	—	—	—	—	—
- Breite Herzogstraße	19.48	20.33	21.33	22.33	23.33	0.43	1.53	3.03	—	—	—	—	—	—	—
- Campestraße	19.49	20.34	21.34	22.34	23.34	0.44	1.54	3.04	—	—	—	—	—	—	—
- Ungerstraße	19.50	20.35	21.35	22.35	23.35	0.45	1.55	3.05	—	—	—	—	—	—	—
- Mittelweg	19.51	20.36	21.36	22.36	23.36	0.46	1.56	3.06	—	—	—	—	—	—	—
- Klinikum	19.52	20.37	21.37	22.37	23.37	0.47	1.57	3.07	—	—	—	—	—	—	—
- Forstweg	19.53	20.38	21.38	22.38	23.38	0.48	1.58	3.08	—	—	—	—	—	—	—
- Sternhaus	19.54	20.39	21.39	22.39	23.39	0.49	1.59	3.09	—	—	—	—	—	—	—
Braunschweig Richmondweg	20.00	20.45	21.45	22.45	23.45	0.55	2.05	3.15	—	—	—	—	—	—	—
- Bürgerpark	20.02	20.47	21.47	22.47	23.47	0.57	2.07	3.17	—	—	—	—	—	—	—
- Hauptbahnhof	20.04	20.49	21.49	22.49	23.49	0.59	2.09	3.19	—	—	—	—	—	—	—
- Campestraße	20.05	20.50	21.50	22.50	23.50	1.00	2.10	3.20	—	—	—	—	—	—	—
- John-F.-Kennedy-Platz	20.07	20.52	21.52	22.52	23.52	1.02	2.12	3.22	—	—	—	—	—	—	—
- Schloss	20.09	20.54	21.54	22.54	23.54	1.04	2.14	3.24	—	—	—	—	—	—	—
- Rathaus	20.12	20.57	21.57	22.57	23.57	1.07	2.17	3.27	—	—	—	—	—	—	—

Fr = nur freitags

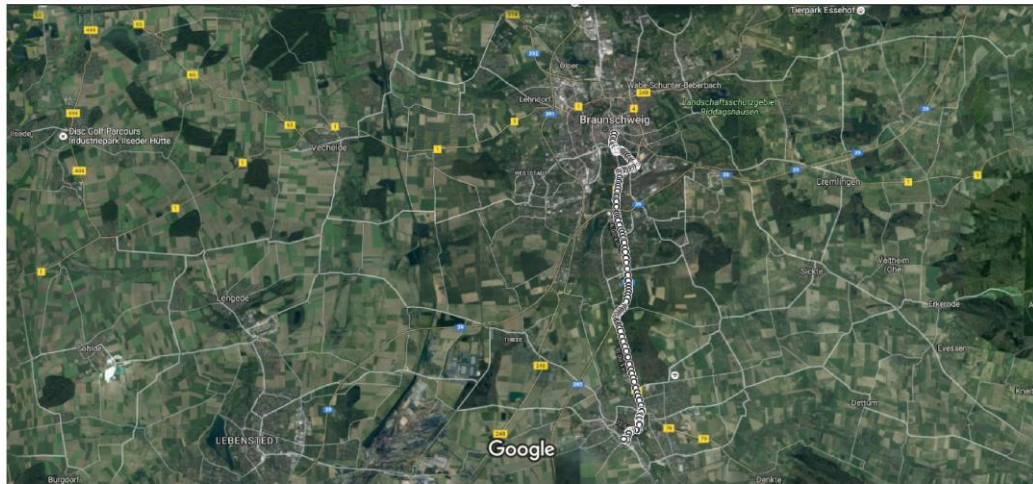
<div>  420 </div> <div>WF Bahnhof - BS Hauptbahnhof - BS Rathaus</div> <div>←</div>						
Sonn- und feiertags						
Wolfenbüttel Bahnhof	—	—	—	—	23.29	
- Bahnhofstraße	—	—	—	—	23.30	
- Kornmarkt	6.29	7.29	8.31	alle	22.31	23.31
- Breite Herzogstraße	6.31	7.31	8.33	60	22.33	23.33
- Campestraße	6.32	7.32	8.34	Min	22.34	23.34
- Ungerstraße	6.33	7.33	8.35		22.35	23.35
- Mittelweg	6.34	7.34	8.36		22.36	23.36
- Klinikum	6.35	7.35	8.37		22.37	23.37
- Forstweg	6.36	7.36	8.38		22.38	23.38
- Sternhaus	6.37	7.37	8.39		22.39	23.39
Braunschweig Richmondweg	6.43	7.43	8.45		22.45	23.45
- Bürgerpark	6.45	7.45	8.47		22.47	23.47
- Hauptbahnhof	6.47	7.47	8.49		22.49	23.49
- Campestraße	—	—	8.50		22.50	23.50
- John-F.-Kennedy-Platz	—	—	8.52		22.52	23.52
- Schloss	—	—	8.54		22.54	23.54
- Rathaus	—	—	8.57		22.57	23.57

Anhang 5: Streckenverlauf der Linie 422

Google Maps

<https://www.google.de/maps/@52.2249522,10.4747917,18337m/data=!3m1!1e3>

Google Maps



Bilder © 2016 GeoBasis-DE/BKG, Google, DigitalGlobe, AeroWest, Kartendaten © 2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google 2 km

Entfernung messen
Entfernung gesamt: 13,58 km (8,44 mi)

Anhang 6: Aufgabenstellung

Aufgabenstellung für eine
BACHELORARBEIT



Institut für Verkehrssystemtechnik
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

M.Sc. Kathrin Viergutz
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
Telefon: +49 (0)531 295 – 3428
Telefax: +49 (0)531 295 – 3402
E-Mail: kathrin.viergutz@dlr.de
Internet: www.dlr.de/ts

Bearbeiterin: cand. B.Sc. Philipp Loos
Matrikelnummer: 4189963
Fachbereich: Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau
Betreuer (Uni): Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
Betreuer (DLR): M.Sc. Kathrin Viergutz, DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik

Thema: Vergleichende wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes konventioneller und selbstfahrender Fahrzeugeinheiten im ÖPNV

Die Führung von konventionellen Bussen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) erfolgt durch speziell ausgebildetes Fahrpersonal. Wie auch im Individualverkehr besteht beim ÖPNV der Trend zur Automatisierung. Dies beinhaltet zunächst die Einbindung von Fahrerassistenzsystemen. In langfristiger Betrachtung kann zur Bedienung des Verkehrsnetzes der Einsatz hochautomatisierter Fahrzeugeinheiten erfolgen bis hin zur Übernahme der gesamten Fahrzeugsteuerung durch autonome Systeme.

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, wie sich der Einsatz autonom betriebener Fahrzeugeinheiten auf die Wirtschaftlichkeit eines ÖPNV-Systems auswirkt. Die Vergleichbarkeit der ÖPNV-Systeme soll mithilfe von Szenarien hergestellt werden, durch welche gebündelte Anwendungsfälle beschrieben, berechnet und bewertet werden.

Herr Loos hat die Aufgabe, zunächst geeignete Automatisierungsgrade zu identifizieren und zu beschreiben. Dabei sollen insbesondere die Automatisierungsgrade „Driver only“ und „Fahrerlos“ Betrachtung finden. Daraufhin sollen die für die Bewertung geeigneten Szenarien des Bedienerkonzepts definiert werden, anhand derer die Wirtschaftlichkeit der identifizierten Automatisierungsgrade bewertet und vergleichend dargestellt werden. Dadurch sollen Stärken und Schwächen des fahrerlosen und fahrer gesteuerten Betriebs aus betriebswirtschaftlicher Sicht herausgearbeitet und dargestellt werden. Auf Basis dieser Bewertung sollen möglichst detaillierte Vorschläge zur Konkretisierung des Grundgedankens eines öffentlichen Verkehrssystems mit unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten ausgearbeitet werden.

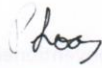
Die Aufgabe von Herrn Loos umfasst im Einzelnen:

- Einarbeitung in die Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens und Auswahl der betrachteten Automatisierungsgrade,
- Entwicklung von Szenarien zur Abbildung maßgeblicher Kostenelemente im Zeitverlauf,
- wirtschaftliche Betrachtung der identifizierten Szenarien im fahrer gesteuerten sowie fahrerlosen Betrieb,

- anschauliche Darstellung des Bewertungsergebnisses (beinhaltet Darstellung von Zwischenergebnissen sowie der Bewertungskriterien),
- Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse sowie Interpretation.

Eine durch Betreuung des DLR Instituts für Verkehrssystemtechnik angefertigte studentische Arbeit darf nur nach Rücksprache mit dem Institut vom Studenten an Dritte weitergegeben oder veröffentlicht werden. Dies gilt insbesondere auch für so genannte Internetbörsen für studentische Arbeiten.

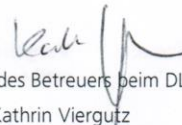
Über die Ergebnisse der Arbeit darf nur nach Rücksprache mit dem DLR Instituts für Verkehrssystemtechnik verfügt werden. Die Arbeit bleibt Eigentum des Instituts.



Unterschrift des Bearbeiters
Philipp Loos



- des Betreuers der Universität
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer



- des Betreuers beim DLR
Kathrin Viergutz

Datum der Ausgabe:

Datum der Abgabe:

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit, *Vergleichende wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes konventioneller und selbstfahrender Fahrzeugeinheiten im ÖPNV* selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe, und dass ich alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng angelehnten Ausführungen meiner Arbeit besonders gekennzeichnet und die Quellen zitiert habe.

Braunschweig, den 21. Oktober 2016_____

(Unterschrift)