

Masterarbeit

Entwicklung einer Methodik zur Bewertung bestehender Infrastruktur hinsichtlich der Nutzbarkeit für autonome Busse als Zubringer zum SPNV

Frederic Schmidt B. Sc.

Projektleiter: Dipl.Ing. Eva-Maria Knoch, Teilinstitut Fahrzeugtechnik
M.Sc: Tim Hilgert, Institut für Verkehrswesen

Nr.: 19-F-0022

Karlsruhe, April 2019

Masterarbeit

Herrn Frederic Schmidt B. Sc.

Matr.-Nr.:1970178

Entwicklung einer Methodik zur Bewertung bestehender Infrastruktur hinsichtlich der Nutzbarkeit für autonome Busse als Zubringer zum SPNV

Aufgabenstellung

Autonom fahrende Busse bieten ein hohes Potential für den zukünftigen ÖPNV. Gleichzeitig haben automatisierte und autonome Fahrzeuge andere häufig höhere Anforderungen an die Verkehrs- und IT-Infrastruktur als bisherige Fahrzeuge. Um automatisierte und autonome Busse im ÖPNV flächendeckend einzusetzen muss die bestehende Infrastruktur entsprechend modernisiert und an die neuen Bedarfe angepasst werden. Diese Arbeit soll dabei unterstützen die Bedarfe zu spezifizieren und die bestehende Infrastruktur zu analysieren und zu bewerten. Dies ermöglicht entsprechend Schwachstellen aufzudecken und diese zu beheben.

Die Arbeit gliedert sich in folgende Teilaufgaben:

- Recherche zum Stand der Technik
- Einarbeitung in das Themenfeld autonomes Fahren
- Definition der Anforderungen an die Verkehrs- und IT-Infrastruktur
- Begründete Auswahl von zwei verschiedenen Modellregionen
- Entwicklung und Bewertung geeigneter Methoden zur Analyse der Infrastruktur
- Analyse der aktuellen Infrastruktur der Modellregionen mit Hilfe mindestens einer vorher ausgewählten Methodik

Hiermit wird die Vollständigkeit der Aufgabenstellung bestätigt. Mit ihrer/seiner Unterschrift nimmt die/der Studierende die Aufgabenstellung an und bearbeitet diese im nachstehend durch den Aus- und spätesten Abgabetag definierten Bearbeitungszeitraum. Die jeweils gültige Fassung der Studien- und Prüfungsordnung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) regelt das Verfahren insbesondere bei absehbarer Überschreitung des Bearbeitungszeitraums.

Ausgabetag: 23.11.2018

geplanter Abgabetag: 22.05.2019
tatsächlicher Abgabetag: _____

Betreuer:

Forschungsgruppenleiter oder
Betreuer aus der Fakultät des Bearbeiters:

(Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin)

(Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch)

Bearbeiter:

Projektleiter am KIT (Doktorand):

(Frederic Schmidt B. Sc.)

(Dipl.Ing. Eva-Maria Knoch)

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Des Weiteren habe ich die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des Karlsruher Instituts für Technologie zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der aktuell gültigen Fassung beachtet.

Frederic Schmidt

Karlsruhe, den 17. April 2019

Inhaltsverzeichnis

Erklärung.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Kurzfassung.....	X
Abstract.....	XI
1 Einleitung	1
2 Untersuchungsgegenstand und Begriffsabgrenzung	3
2.1 Methode und Methodik	3
2.2 Kamera und Sensor.....	3
2.3 Infrastruktur	7
2.3.1 Verkehrsinfrastruktur	7
2.3.2 IT-Infrastruktur	8
2.4 Autonomer Bus	9
2.4.1 Autonom.....	9
2.4.2 Bus	10
2.4.3 Betriebsformen.....	11
3 Grundlagen autonomer Busse	14
3.1 Stand der Technik.....	14
3.2 Trends	16
3.2.1 Übernahme menschlicher Aufgaben	16
3.2.2 Elektromobilität im Umweltverbund	17
3.2.3 Kooperative Echtzeitkommunikation	17
3.2.4 Intelligente Straßeninfrastruktur	19
4 Infrastrukturelle Anforderungen autonomer Busse	20
4.1 Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur	20
4.1.1 Ausbau der Ladeinfrastruktur	20
4.1.2 Umgestaltung des Straßenraums.....	28
4.1.3 Veränderungen der Straßenausstattung	32
4.1.4 Erweiterung der Verkehrsleitzentralen	41
4.2 Anforderungen an die IT-Infrastruktur	44
4.2.1 Etablierung von cloudbasierten Plattformen	44
4.2.2 Erweiterung der Übertragungstechnik.....	51
4.2.3 Vorantreiben der IT-Schnittstellen-Standardisierung	58
4.2.4 Erfüllung der IT-Sicherheitsanforderungen	59

4.2.5	Sicherstellung der Gesamtsystemfunktionalität durch Vorab-Tests.....	63
5	Entwicklung einer Methode zur Infrastrukturbewertung	66
5.1	Herleitung der Methode 1 – abgewandelte Nutzwertanalyse	67
5.2	Herleitung der Methode 2 – angepasstes Flussdiagramm	69
5.3	Methodenabwägung und Wahl der Methode	71
6	Autonome Busse als Zubringer zum SPNV	73
6.1	Status Quo	73
6.2	Vorteile autonomer Busse gegenüber herkömmlichen Angeboten	74
6.3	Vorstellung Modellregionen	75
6.3.1	Modellregion Leonberg	75
6.3.2	Modellregion Böblingen	86
6.4	Exemplarische Methodenanwendung	97
6.4.1	Bewertung der Modellregion Leonberg	103
6.4.2	Bewertung der Modellregion Böblingen	107
6.5	Bewertung der Methode	112
6.6	Handlungsempfehlung	115
7	Fazit und Ausblick	117
8	Quellenverzeichnis	120
8.1	Literaturverzeichnis.....	120
8.2	Kontaktierungsverzeichnis.....	132
Anhang A	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Umfeldsensorik [102]	4
Abbildung 2: Einteilung Straßenverkehrsinfrastruktur [106]	8
Abbildung 3: Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens nach VDA [136]	9
Abbildung 4: Betriebsform Linienbetrieb [107]	11
Abbildung 5: Betriebsform Tourenbetrieb [107]	12
Abbildung 6: Betriebsform Richtungsbandbetrieb [107]	12
Abbildung 7: Betriebsform Flächenbetrieb [107]	13
Abbildung 8: Strategie 1 - Nachtladen und Ganztageinsatz ohne Zwischenladen [38]	22
Abbildung 9: Strategie 2 - Nachtladen und Gelegenheitsladen in Fahrpausen und an Endhaltestellen [38]	23
Abbildung 10: Strategie 3 - Nachtladen und Unterwegsladen beim Fahrgastwechsel an Haltestellen und Endhaltestellen [38]	24
Abbildung 11: Baulich getrenntes Bus Rapid Transit-System [29]	30
Abbildung 12: Abmarkierter Busfahrstreifen [151]	30
Abbildung 13: RSU mit Antennenträger des DLR [33]	33
Abbildung 14: Leitsysteme für Sonderinfrastruktur [109]	36
Abbildung 15: Direkte Belegungserfassung Parkleitsystem [10]	36
Abbildung 16: Indirekte Belegungserfassung Parkleitsystem [10]	37
Abbildung 17: Beschilderung und Rüttelschwelle im Testfeld Bad Birnbach [31]	41
Abbildung 18: Die Cloud als Datendrehscheibe [mit Änderungen entnommen aus 71]	46
Abbildung 19: Entwicklung der Datenraten verschiedener Mobilfunkstandards [mit Änderungen entnommen aus 148]	53
Abbildung 20: Nicht-sicherheitsrelevante V2X-Anwendungsfälle [mit Änderungen entnommen aus 5]	56
Abbildung 21: Messergebnis von RSU-Reichweiten an einer Forschungskreuzung [49]	64
Abbildung 22: Muster einer Nutzwertanalyse [mit Änderungen entnommen aus 21]	67
Abbildung 23: Exemplarischer Entscheidungsbaum (eigene Darstellung aus lucidchart.com)	70
Abbildung 24: Exemplarisches Flussdiagramm (eigene Aufnahme aus lucidchart.com)	72
Abbildung 25: Routenverlauf Modellregion Leonberg (Quelle: Google Maps)	76
Abbildung 26: Haltestellensituation Eltingen Leo-Center (eigene Aufnahme)	77
Abbildung 27: Wendemöglichkeit Höhe Neuköllner Str. (eigene Aufnahme)	78
Abbildung 28: Wohngebiet im Gebiet Steinstraße (eigene Aufnahme)	79
Abbildung 29: Einbiegesituation von Steinstraße auf Eltinger Straße (eigene Aufnahme)	80

Abbildung 30: Eltinger Straße mit verbogenen Verkehrszeichen und lückenhafter Beschilderung (eigene Aufnahme)	81
Abbildung 31: Fahrbahnbelagwechsel im Altstadtbereich (eigene Aufnahme)	82
Abbildung 32: Grabenstraße mit Haltestellensituation Leonberg Altstadt (eigene Aufnahme)	83
Abbildung 33: Abknickende Vorfahrtstraße Grabenstraße - Eltinger Straße (eigene Aufnahme)	84
Abbildung 34: Vierspurige Eltinger Straße (eigene Aufnahme).....	85
Abbildung 35: Zwei Bestandshaltestellen unterschiedlichen Baustandards (eigene Aufnahme)	86
Abbildung 36: verkürzter Linienverlauf Ruftaxi 766 Böblingen – Dätzingen (Quelle: VVS)....	87
Abbildung 37: Haltestellensituation Böblingen ZOB (Quelle: Google Street View)	88
Abbildung 38: Regelquerschnitt B464 (Quelle: Google Street View)	89
Abbildung 39: Calwer Straße / L1182 (eigene Aufnahme).....	90
Abbildung 40: Darmsheimer Tunnel (eigene Aufnahme)	91
Abbildung 41: Bestandshaltestelle Löchlesberg (eigene Aufnahme).....	92
Abbildung 42: Dätzinger Straße (eigene Aufnahme).....	93
Abbildung 43: Haltestelle Kapellenberg (eigene Aufnahme).....	94
Abbildung 44: Verengter Fahrbahnbereich Dätzinger Straße (Quelle: Google Street View) .	95
Abbildung 45: Bestandshaltestelle Döffingen Rathaus (eigene Aufnahme)	96
Abbildung 46: Kommentierung der erarbeiteten Methode "Flussdiagramm" (eigene Darstellung)	102

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	= 3rd Generation Partnership Project
ABB	= Asea Brown Boveri
AC	= Alternating Current (Wechselstrom oder Wechselspannung)
AIM	= Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
ALT	= Anruflinientaxi
AST	= Anrufsammeltaxi
BAB	= Bundesautobahn(en)
BAST	= Bundesanstalt für Straßenwesen
BMZ	= Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BRT	= Bus Rapid Transit
bzw	= beziehungsweise
CAM	= Cooperative Awareness Message
CCS	= Combined Charging System
C-ITS	= Cooperative Intelligent Transport Systems
C2C	= Car-to-Car-Kommunikation
C2I	= Car-to-Infrastructure-Kommunikation
C2X	= Car-to-X-Kommunikation
DC	= Direct Current (Gleichstrom oder Gleichspannung)
DAB	= Digital Audio Broadcasting
DLR	= Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DSGVO	= Datenschutzgrundverordnung
DSRC	= Dedicated Short Range Communication
DTA	= Digitales Testfeld Autobahn
FAST	= Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Teilinstitut Fahrzeugtechnik (KIT)
FGSV	= Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FCD	= Floating Car Data
Fzg	= Fahrzeug(e)
GHz	= Gigahertz
GPS	= Global Positioning System
IEC	= International Electrotechnical Commission
IEEE	= Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	= Informations- und Kommunikationstechnik
IP	= Ingress Protection
ITS	= Intelligente Transportsysteme/ Intelligent Transport Systems

IV	= Individualverkehr
KIT	= Karlsruher Institut für Technologie
Kfz	= Kraftfahrzeug(e)
KOM	= Kraftomnibus
LADAR	= Laser Detection And Ranging
LIDAR	= Light Detection And Ranging
LSA	= Lichtsignalanlage (Ampel)
LTE	= Long Term Evolution
MDM	= Mobilitätsdatenmarktplatz
MIV	= Motorisierter Individualverkehr
MVI	= Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg
NWA	= Nutzwertanalyse
OCIT	= Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems
OCPP	= Open Charge Point Protocol
ÖPNV	= Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	= Öffentlicher Verkehr
Pkw	= Personenkraftwagen
RAA	= Richtlinie für die Anlage von Autobahnen
RADAR	= Radio Detection and Ranging
RAL	= Richtlinie für die Anlage von Landstraßen
RAS	= Richtlinie für die Anlage von Straßen
RDS	= Radio Data System
S21	= Stuttgart 21
SchuKo	= Schutzkontakt
SLAM	= Simultaneous Localization and Mapping
SPNV	= Schienenpersonennahverkehr
TAF BW	= Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg
TMC	= Traffic Message Channel
UKW	= Ultrakurzwelle
VBA	= Verkehrsbeeinflussungsanlage
VDA	= Verband der Automobilindustrie
VDV	= Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VRS	= Verband Region Stuttgart
VVS	= Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart
V2I	= Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation

V2V	= Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation
V2X	= Vehicle-to-X-Kommunikation
WLAN	= Wireless Local Area Network
WVZ	= Wechselerkehrszeichen
ZOB	= Zentraler Omnibusbahnhof

Kurzfassung

In der Ausarbeitung werden kurz- bis langfristige Anforderungen in Bereichen der Verkehrs- und IT-Infrastruktur betrachtet und in einzelne Themenfelder untergliedert:

Bei der Ladeinfrastruktur handelt es sich stets um Abwägungen in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten. Statt der heute häufig verwendeten manuell gesteuerten Plug-In-Ladeinfrastruktur muss in Zukunft je nach Netz-Zugänglichkeit auf konduktive oder induktive Ladeinfrastruktur gesetzt werden.

Die Straßenausstattung wird sich durch den Einbau von Sensorik weiterentwickeln. Die Ausarbeitung betrachtet konkrete Ausstattungselemente. Der Modernisierung und regelmäßigen Instandhaltung ist künftig ein hoher Stellenwert beizumessen. Verkehrszeichen müssen wie IT-Schnittstellen standardisiert werden.

Informationstechnische Anforderungen bestehen in der verstärkten Etablierung von Verkehrsleitzentralen. Die häufig cloudbasierten Dienste müssen IT-Sicherheitsziele berücksichtigen um Cyber-Angriffe abzuwehren.

Zudem bedarf es einem veränderten Umgang mit Open Data. Die Mitarbeiter sind zu schulen und im weiteren Umgang mit Open Data zu sensibilisieren. Die Weitergabe oder Veröffentlichung von Daten darf nicht weiterhin als Wettbewerbsnachteil gesehen werden.

Nicht zuletzt wird sich die Übertragungstechnik rasant entwickeln. Es steht die Grundsatzentscheidung an, ob Mobilfunk- oder WLAN-basierte Verfahren zum Einsatz kommen. Bei mobilfunkbasierten Ansätzen im 5G-Standard bedarf es Glasfaseranbindungen, da heutige Kupferdrahtnetze die enormen Datenübertragungsraten künftig nicht mehr unterstützen.

Ergebnis dieser Arbeit ist eine Flussdiagramm-Methodik, die themenfeldspezifische Kriterien abfragt und je Themenfeld Teilergebnisse entwickelt. Die Methodik wird an zwei gewählten Modellregionen auf deren Sinnhaftigkeit überprüft und stellt bewusst hohe Anforderungen. Beide Regionen sind grundsätzlich für den Einsatz autonomer Busse geeignet sind, weisen jedoch Entwicklungspotentiale und Aufholbedarf zugleich auf.

Abstract

Development of a methodology in order to evaluate the existing infrastructure for the use of autonomous buses as feeder to the suburban rail network

The elaboration shows short-term and long-term requirements of the transport infrastructure and the IT infrastructure facing the fast growing amount of autonomous driven buses in Germany. The text is divided into several aspects.

Regarding the charging infrastructure the responsible must take local conditions into consideration. nowadays plug-in infrastructure can often be found at the model regions. But in the near future autonomous buses must consistently fall back on autonomous charging infrastructure if the buses itself operate autonomously as well. A decision between inductive and conductive supply depending on access to power supply network needs to be done.

The streets equipment will develop, too. Examples are given in the elaboration. In the near future the local building yards must intensify the maintenance of roads such as standardization of traffic signs and it processes.

In addition to that traffic centres will be required in order to control local traffic. These centres often operate with cloud services. Cloud services have to ensure IT security.

The dealing with open data and the attitude facing open data must change. Employees should pass a training at first. The publication of public data should not be seen as competitive disadvantage any longer.

Further on, one have to decide about transmission technology. Wifi-based and cellular-based communications are worthy of consideration. The latter is in combination with 5G dependent on powerful glass fibre connections.

The result of this elaboration consists of several flow charts with specific questions regarding subject matter. Each sheet leads to a partial result. The methodology (with willful high requirements) is applied in the example of two model regions. Both are more or less suited to autonomous bus operations but need to be developed due to technical deficits.

1 Einleitung

In einigen deutschen Städten finden sich seit 2018 Testfelder mit autonomen Bussen: der erste in Deutschland autonom verkehrende Bus hat das Premieren-Betriebsjahr im niederbayerischen Bad Birnbach unfallfrei überstanden. Mit rund 20.000 Fahrgästen und einer maximalen Geschwindigkeit von 15 km/h war das Projekt unter Federführung von ioki, einem Tochterunternehmen der Deutschen Bahn, ein Erfolg. Das Startup des Konzerns widmet sich autonomem Fahren auf der Straße und On-Demand-Mobilität [Vgl. 69].

Autonome Busse sollen künftig den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) stärken, indem sie die heutige Anschlusssituation zwischen Bahnhof und Haustüre verbessern. Auf dieser so genannten „letzten Meile“ können autonome Busse zeitlich und räumlich flexibel agieren und das ÖPNV-System, zum Beispiel im ländlichen Raum, sinnvoll ergänzen.

Auch in einem Testfeld in Lahr umfassen die heutigen bedienten Rundkurse nur wenige Kilometer bei einer Geschwindigkeit im niedrigen zweistelligen Bereich. Die Evolution wird jedoch mit jedem weiteren Versuchsfeld fortschreiten, sodass sich Beförderungsgeschwindigkeit, Beförderungskapazität, Beförderungsweite und Komplexität der Strecken stetig erhöhen werden und Einsätze auch im städtischen Bereich möglich werden [Vgl. 14].

Angesichts der vielerorts diskutierten Testeinsätze ist die Überlegung nach einer systematischen Vorgehensweise zur Bewertung der Bestandsinfrastruktur hinsichtlich Betrieb autonomer Busse unumgänglich.

Nicht jede betrachtete Infrastruktur ist prädestiniert für den Betrieb von autonomen Bussen. Gerne beschränkt man sich bei der politisch-öffentlichen Entscheidungsfindung auf die Beurteilung fahrzeugtechnischer und finanzieller Fragestellungen. Die vorliegende Arbeit soll eine Methodik entwickeln, bestehende Infrastruktur hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz von autonomen Bussen zu prüfen und dabei infrastrukturelle Aspekte zu betrachten. Infrastruktur erscheint immer noch wie ein passiver Teil der Mobilitätslandschaft, der aus etlichen Verkehrszeichen, verschiedenen Straßenbelägen oder statischen Fahrbahnmarkierungen besteht. Dies wird sich ändern: die Vereinigung der bayerischen Wirtschaft e.V. bemerkt in einem Positionspapier, dass die Anforderungen an die Infrastruktur mit höherem Grad an Automatisierung steigen werden und sich Selbige von einer ursprünglichen Randerscheinung mit unterstützender Funktion hin zu einer notwendigen Bedingung entwickelt und somit keinesfalls zum limitierenden Faktor werden darf [Vgl. 138].

Autonome Fahrzeuge werden technische, rechtliche, ethische, gesellschaftliche, stadtplanerische und weitere Auswirkungen haben. Die Arbeit wird sich jedoch nicht mit den Auswirkungen, sondern mit den Anforderungen an die bestehende Infrastruktur beschäftigen und ist wie ein Lastenheft anzusehen. Ebenso wird die technische Spezifizierung, also das

Aufzeigen der konkreten Umsetzung mit Lösungswegen nicht Teil des Dokuments sein. Die vorliegenden Inhalte zum Stand der Technik und aller weiteren Aspekte zum Themenfeld des autonomen Fahrens sind Ergebnis einer intensiven Literaturrecherche und erstrecken sich hauptsächlich auf Online-Quellen. Nach einer breit angelegten Ansammlung von Quellen wurden diese hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für Belange des Fahrens mit autonomen Bussen analysiert, gefiltert, aufbereitet und strukturiert. Gestützt werden die Inhalte durch eine praxisnahe Befragung eines Beauftragten für ein autonomes Testfeld in Bad Birnbach. Aus den gewonnenen Erkenntnissen konnten Anforderungen an die Verkehrs- und IT-Infrastruktur definiert werden. Nach Abwägung zweier möglicher Herangehensweisen wird die erarbeitete Methodik an zwei Modellfeldern angewandt und im Anschluss bewertet.

Konkret wird im Anschluss an diese Einleitung der Untersuchungsgegenstand in Kapitel 2 spezifiziert. Dazu werden wichtige Begriffe voneinander abgegrenzt. Kapitel 3 beschäftigt sich zunächst mit dem heutigen Stand der Technik und darüber hinaus mit übergeordneten Trends, die auf die großen Eckpunkte dieser Ausarbeitung hinarbeiten. Das darauffolgende Kapitel stellt den Hauptteil dar, da die verkehrs- und informationstechnischen Aspekte infrastruktureller Anforderungen untersucht werden.

Im Anschluss an den Hauptteil wird sich Abschnitt 5 mit zwei Vorgehensweisen zur Bewertung bestehender Infrastruktur hinsichtlich der genannten Anforderungen aus dem vorigen Kapitel befassen. Der Praxisteil in Abschnitt 6 begutachtet die heutige Situation von Anschlussmobilität, die künftig mithilfe autonomer Busse verbessert werden soll. Anhand zweier ausgewählter Modellregionen wird eine der zwei Vorgehensweisen methodisch angewandt. Im vorletzten Schritt wird eine Handlungsempfehlung ausgesprochen.

Die Ausarbeitung wird mit einem kurzen Resümee abgeschlossen.

2 Untersuchungsgegenstand und Begriffsabgrenzung

Insbesondere durch die hohe Forschungstätigkeit der deutschen Autobauer und durch die Bedeutung Deutschlands als Automobilherstellungs- und Zuliefererstandort findet sich Literatur zu autonomen Fahrzeugen vornehmlich in Bezug auf Personenkraftwagen (Pkw). Für die folgenden Kapitel stellt der Überhang an Informationen aus dem Automobilsektor kein Problem dar, da sich deren infrastrukturellen Anforderungen in weiten Teilen mit denen von autonomen Bussen ähneln. Besonders im Praxisteil des Kapitels 6 werden die Sektoren jedoch getrennt betrachtet und der Schwerpunkt auf autonome Busse gelegt.

Die nun folgenden Unterkapitel sollen dazu dienen, ein einheitliches Verständnis der verwendeten Begrifflichkeiten herzustellen und gleichzeitig den Untersuchungsrahmen abzugrenzen.

2.1 Methode und Methodik

Laut Aufgabenstellung beschäftigt sich die Ausarbeitung mit der Entwicklung einer Methodik. Methodik beschreibt die Gesamtheit der Techniken der wissenschaftlichen Vorgehensweisen und ist als Überbegriff zu verstehen. Im Gegensatz dazu geht es bei der Methode um eine konkretere Anwendungsebene, die Themen der Datenerhebung und -analyse aufgreift. Oftmals werden Methodik und die konkreten Methoden nicht unterschieden [Vgl. 45].

Im Folgenden wird jedoch nur noch von der Entwicklung einer Methode gesprochen.

Eine Methode ist die Grundlage für planmäßiges Handeln und ein Verfahren, das auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet ist wie die Beurteilung bestehender Infrastruktur für den künftigen Einsatz autonomer Busse. Sie kann in einem späteren Bearbeitungsschritt als Entscheidungsgrundlage genutzt werden und ist vom Werkzeug abzugrenzen, da sie die Art und Weise beschreibt, in welcher Werkzeuge eingesetzt werden sollen und gegebenenfalls in welcher Reihenfolge [Vgl. 108]. Der Duden umschreibt Methode kurz mit der festgelegten Art eines Vorgehens [Vgl. 39].

2.2 Kamera und Sensor

Diese beiden Begriffe finden sich in den meisten Dokumenten zu autonomen Fahrzeugen, werden jedoch in der Literatur nicht oder nur unzureichend voneinander abgegrenzt. Kameras sind der Sensorik zuzurechnen [Vgl. 71], verfügen jedoch im Vergleich zu Sensoren ergänzend über eine Bilderkennungssoftware zur Verwertung der erhobenen Daten.

Ein Sensor ermittelt als Input-Größe eine physikalische oder chemische Größe und wandelt sie in ein analoges elektrisches Signal, eine elektrische Spannung, um [Vgl. 67]. Die Sensoren sind im übertragenen Sinne vergleichbar mit den menschlichen Sinnesorganen [Vgl. 117].

Dahingegen handelt es sich bei einer Kamera um ein fototechnisches Gerät, das statische oder bewegte Bilder auf einem Speichermedium aufzeichnet oder über eine Schnittstelle in ein Netzwerk übermittelt [Vgl. 129].

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick der verschiedenen Sensoren, die sich in der künftigen Verkehrsinfrastruktur finden werden:

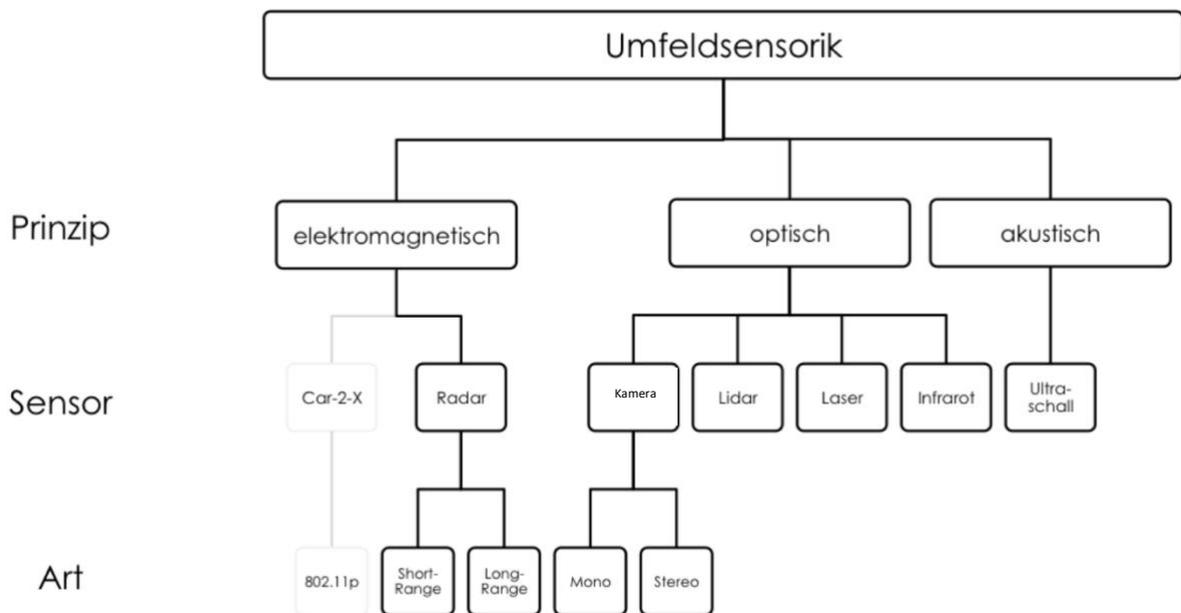


Abbildung 1: Übersicht Umfeldsensorik [102]

Die Einteilung von Sensoren kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, gemäß Abbildung 1 beispielweise nach physikalischen Wirkprinzipien.

- **Radar** funktioniert nach dem elektromagnetischen Prinzip. In der Praxis finden sich das Short-Range-Radar (24 GHz-Spektrum, z.B. für Parksensoren) und das Long-Range-Radar (77 GHz-Spektrum, z.B. adaptive Geschwindigkeitsregelung). An Bedeutung gewinnt zunehmend das 77 Ghz-Radar. Zur Berechnung von Entfernung und Geschwindigkeit eines Gegenstands werden von der Basis elektromagnetische Wellen ausgesendet, die am Zielobjekt reflektiert werden und beim ursprünglichen Sender interpretiert werden können. Die Reflektionsfähigkeit ist materialabhängig. Durch die schlechten Reflektionseigenschaften von Menschen eignet sich Radar für die Erkennung von Fußgängern und Radfahrern nur eingeschränkt. Menschliche Objekte können sich zu nah an der Basis oder außerhalb des Öffnungswinkels befinden [Vgl. 102].

Die Laufzeit der Welle und der Frequenzunterschied der zurückkommenden Welle geben dann Auskunft über Geschwindigkeit und Abstand des gemessenen Objekts. Je

schneller die Wellen zurückkommen, desto näher ist das Objekt. Zur Steigerung des Betrachtungswinkels des Radars werden mehrere Antennen halbmondförmig in einem Array gebündelt. Radar funktioniert im Gegensatz zu optischen Systemen bei fast allen Witterungen, durchstrahlt auch Kunststoffe und kann ästhetisch hinter Abdeckungen angebracht werden [Vgl. 36], [Vgl. 102], [Vgl. 142]. Nachteilig sind die Kosten, die Abmessungen der Radarsysteme und deren Leistungsbedarf [Vgl. 102].

Short-Range-Radar (24 Ghz-Spektrum) eignet sich aufgrund spezifischer Vorteile im Bereich der Verkehrsüberwachung. Radar eignet sich prinzipiell zur Messung der Position und der Geschwindigkeit von Objekten im Sichtbereich und umfasst einen Erfassungsbereich von circa 50 Metern [Vgl. 78].

Long-Range-Radar (77 Ghz-Spektrum) verfügt über geringere Wellenlängen als das 24 Ghz-Spektrum (die Wellenlänge ist Kehrwert der Frequenz). Kleinere Wellenlängen haben bedeutsame Vorteile: Genauigkeit und Auflösung von Geschwindigkeitsmessungen werden erhöht, sodass dreifach höhere Geschwindigkeiten erfasst werden können. Das Antennen-Array ist nur ein Drittel so groß, da die Wellenlänge auch nur ein Drittel beträgt. Durch die Abmaße in x- und y-Richtung misst die 77Ghz-Antenne nur ein Neuntel der 24 Ghz-Antenne [Vgl. 19]. Darüber hinaus können Menschen präzise detektiert werden. Ein klassisches Beispiel für zuverlässige Erkennung durch Millimeterwellen findet sich auf den Flughäfen: die Körperscanner mit Terahertz-Strahlung [Vgl. 150].

Bei der Entwicklung eines Radarsystems für eine Verkehrsüberwachungs-Anwendung wird zunächst die Geometrie der Szenerie, der Erfassungsbereich in horizontaler und vertikaler Richtung sowie die interessierenden Entfernungen betrachtet.

In der Kreuzungsüberwachung lassen sich die Entfernung und Geschwindigkeit von Fahrzeugen und Fußgängern ebenso feststellen wie die benutzte Fahrspur - auch bei widrigen Wetterverhältnissen wie Rauch, Nebel und Staub. Die Millimeterwellen-Radarsensoren eignen sich für Außeneinsätzen bei wechselnden Umgebungsbedingungen.

Das 77-GHz-Radarsystem kann problemlos Objekte bis 300 km/h und z.B. Fahrzeuge, in Entfernungen von 150 m und mehr detektieren. Dies erweist sich als praktisch für mittig über der Fahrbahn montierte Verkehrssensoren, da die Winkel von Fahrzeugen auf mehreren Fahrspuren bei großer Distanz nur wenig voneinander abweichen. Mit anderen Antennenkonstruktionen lässt sich der Erfassungsbereich dagegen absichtlich einschränken, um die Richtwirkung und damit die Reichweite zu erhöhen. Der Öffnungswinkel der Antennen liegt in Abhängigkeit der Straßengeometrie zwischen 20° und 100° [Vgl. 40].

In verkehrlichen Anwendungen bietet das 77-GHz-Frequenzband eine Bandbreite zur Frequenzmodulation von bis zu 1 GHz, im 24-GHz-Band ist die Bandbreite dagegen auf 200 MHz beschränkt. Das Resultat ist eine verbesserte Entfernungsauflösung – mit 15 cm fünfmal besser als der mit 24-GHz-Radarsystemen mögliche Wert. Daher wird das 77 GHz-Spektrum auch als Long-Range-Radar bezeichnet.

- **Kameras** dominieren in den heutigen Automatisierungsstufen die fahrzeugseitige Sensorausstattung und werden für die Infrastruktur ebenso bedeutsam sein.

Der in Kameras eingesetzte Bildverarbeitungsprozessor erfasst die vom Bildsensor aufgenommenen Daten und analysiert sie, um das Verkehrsverhalten zu ermitteln. Die Daten werden an Verkehrsleitzentralen übermittelt. Optische Systeme sind anfällig gegen Falscherkennung bei wechselnden Umgebungsbedingungen, denn Tag-Nacht-Zyklen, Schatten oder unterschiedliche Wetterverhältnisse beeinflussen die Bildverarbeitung. Diese Herausforderungen machen die Verwendung komplexer Signalverarbeitungstechniken und Algorithmen erforderlich [Vgl. 40].

Zum Einsatz kommen Mono-Kameras (eine Linse) oder Stereo-Kameras (zwei Linsen).

- **Monokameras** liefern ein klassisches zweidimensionales Bild in Graustufen. Dieses Abbild wird auf Kanten untersucht, die auf vordefinierte Objekte (Fahrbahnmarkierung, Mensch, Haus) zurückschließen lässt. Die zweidimensionale Darstellung hat die dreidimensionale Realität um eine Dimension reduziert: die Tiefe fehlt, die zur Beurteilung von Abstand oder Fahrzeugbreite benötigt wird. Zur Abstandsbewertung müssen weitere Sensordaten verwendet werden. Videosensorik reagiert schnell auf Änderungen in der Bildfläche und sind günstig.
 - **Stereokameras** sind die Weiterentwicklung von Monokameras und unterstützen dreidimensionale Ansichten. Dazu müssen die Kameras in festem vordefiniertem Abstand zueinander sein, um auf die dritte Dimension schließen zu können. Hochauflösende Kameras mit Nachsichtfunktion sind für die sichere Verkehrsabwicklung wichtig, da nicht-autonom agierende Fußgänger oder Radfahrer durch die autonomen Fahrzeuge auch nachts zuverlässig detektiert werden müssen. Stereokameras sind hochpreisig, weswegen sich derzeit vornehmlich Monokameras am Markt finden und durch andere Sensortechnik erweitert werden, um selbigen Informationsgehalt zu erlangen [Vgl. 36], [Vgl. 102].
- **Lidar** (Light Detection and Ranging), auch teilweise Ladar genannt (Laser Detection and Ranging), arbeitet nach optischen Prinzipien und ähnelt sich dabei dem Kerngedanken des Radars. Eine Basis versendet nicht sichtbare Lichtwellen fest definierter Wellenlänge in Form von Laserstrahlen und interpretiert bei Rückankunft

anhand der Rückstrahlcharakteristik Geschwindigkeit und Entfernung des Objekts. Dies erfolgt wie beim Radar über die Laufzeit und im speziellen Lidar-Fall über die Rückrechnung der Lichtgeschwindigkeit, da es sich um ein optisches System handelt. Dem günstigen Preis der Lidar-Technik stehen die allgemeinen Nachteile optischer Systeme entgegen: Witterungsbedingungen (tiefstehende Sonne, Nebel u.a) haben erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse [Vgl. 36], [Vgl. 102].

- **Laser** arbeiten nach dem Lidar-Prinzip, verfügen jedoch über eine Diode und einen rotierenden Spiegel, der Laserstrahlen bewegt. Dieses bewegliche Teil deckt einen größeren Bereich ab und liefert ein genaueres Umgebungsbild durch sehr gute Auflösung bei Entfernung und Winkel. Die Lasertechnik rangiert preislich im fünfstelligen Bereich und ist deutlich teurer als Lidar-Sensoren. Nachteilig sind ferner der notwendige Bauraum für den rotierenden Spiegel und die bei Lidar bereits beschriebenen Nachteile optischer Systeme. Sobald es 360°-Lidarsensorik gibt, die ohne bewegliche Teile und mit kleinerem Bauraum als laserbasierte Technik zurechtkommt, wird sich die kostengünstigere Lidar-Technik weiter durchsetzen. Lasertechnik wird infrastruktur- und fahrzeugseitig auch in Zukunft durch die hohen Kosten eine Einzelfalllösung darstellen [Vgl. 36], [Vgl. 102].
- Bei **Infrarot** handelt es sich ebenfalls um ein optisches System, das ein für Menschen unsichtbares Licht im infraroten Spektrum aussendet. Es eignet sich für Anwendungen zur Nachtsichtunterstützung, um Defizite der Kamera- oder menschlichen Wahrnehmung zu reduzieren [Vgl. 36], [Vgl. 102].
- **Ultraschall** ist ein akustisches System und hat eine geringe Reichweite im zweistelligen Meterbereich. Es eignet sich für fahrzeugseitige Anwendungen wie Parkabstandssensoren, aber weniger für infrastrukturseitige Aufgaben, die ggf. höhere Distanzen überwinden müssen [Vgl. 36], [Vgl. 102].

Der Überblick zeigt auf, dass Sensordaten fusioniert werden müssen, um die spezifischen Nachteile zu reduzieren und eine bestmögliche Umfeldwahrnehmung zu generieren.

2.3 Infrastruktur

Der Begriff wird in dieser Arbeit bezogen auf Verkehr und Informationstechnik verwendet und wird somit separat betrachtet.

2.3.1 Verkehrsinfrastruktur

Im weiteren Sinne können die materiellen, institutionellen und personellen Erfordernisse, die dem Transport von Personen, Gütern oder Nachrichten dienen, als Verkehrsinfrastruktur verstanden werden.

Im engeren Sinne handelt es sich um ortsfeste Anlagen, die aus den Verkehrswegen und deren An- und Verknüpfungspunkten bestehen. Sie können in linienförmige Elemente (Verkehrsnetze wie zum Beispiel Straßen) und punktförmige Elemente (Knoten-, Umstiegspunkte) unterschieden werden. Autonome Busse verkehren im Straßenverkehr, sodass die Verkehrsinfrastruktur im noch engeren Sinne als Straßenverkehrsinfrastruktur zu verstehen ist.

Die Bereitstellung der Straßenverkehrsinfrastruktur obliegt in Deutschland im Regelfall der öffentlichen Hand [Vgl. 119].

Die Fachzeitschrift Straßenverkehrstechnik unterteilt die Straßenverkehrsinfrastruktur wie folgt [Vgl. 106]:

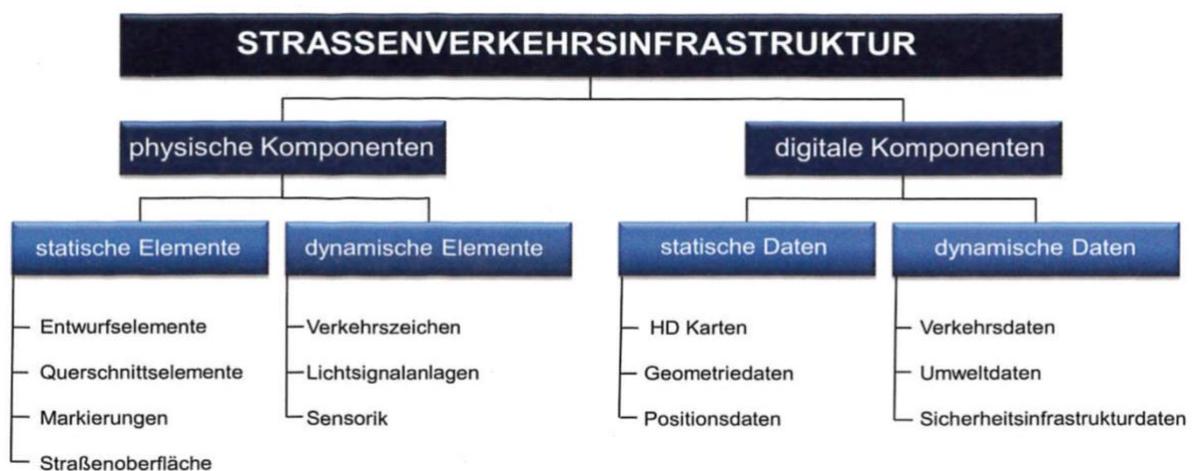


Abbildung 2: Einteilung Straßenverkehrsinfrastruktur [106]

In der Ausarbeitung wird von dieser Struktur geringfügig abgewichen: die physischen Komponenten bilden den Kernbestandteil der betrachteten Verkehrsinfrastruktur in Kapitel 4. Dahingegen stellen die digitalen Komponenten einen Bestandteil der IT-Infrastruktur dar.

2.3.2 IT-Infrastruktur

Der Begriff ist nicht einheitlich in der Literatur definiert, da bereits die Definition der Infrastruktur Freiheitsgrade birgt.

Unter der IT-Infrastruktur wird in der Ausarbeitung der Begriff der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) verstanden, der informationstechnische und kommunikationstechnische Aspekte aufgreift. Nach Auffassung des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) umfassen IKT diejenigen technischen Geräte und Einrichtungen, die Informationen aller Art digital umsetzen, verarbeiten, speichern und übertragen können. Dazu gehören unter anderem Sprachtelefonie, Datenkommunikation und Computer. Kommunikation und Datenaustausch können drahtgebunden oder drahtlos erfolgen [Vgl. 25]. Allgemeiner können unter informationstechnischer Infrastruktur auch

Einrichtungen zur Kommunikation, Datenhaltung und Datenverarbeitung verstanden werden [Vgl. 10]. Technisch sind der IT-Infrastruktur Hardware, Software und die baulichen Einrichtungen zuzurechnen [Vgl. 105].

2.4 Autonomer Bus

Für den Begriff des autonomen Busses werden zunächst beide Wortteile getrennt betrachtet. Die Betrachtung um die Definition möglicher Betriebsformen ergänzt.

2.4.1 Autonom

Der Verband der Automobilindustrie (VDA) hat durch die Festlegung von fünf aufeinander aufbauenden Stufen bis zum automatisierten Fahren einen Standard gesetzt, auf den sich die meisten fachwissenschaftlichen Texte und auch die vorliegende Arbeit beziehen wird.

Autonom ist im Folgenden stets der Automatisierungsgrad 5 nach VDA, der in den folgenden Kapiteln als anzustrebender Zielzustand zu verstehen ist. Dennoch werden infrastrukturelle Anforderungen aus Kapitel 4 häufig auch die vorgelagerten Stufen 3 und 4 betreffen, da die Infrastruktur auf dem Weg zur höchsten Stufe die vorigen Stufen durchläuft und ein Überspringen einzelner Stufen wegen des Mischverkehrs mit klassischen Fahrzeugen diskriminierungsfrei auf den Straßen abgewickelt werden muss.

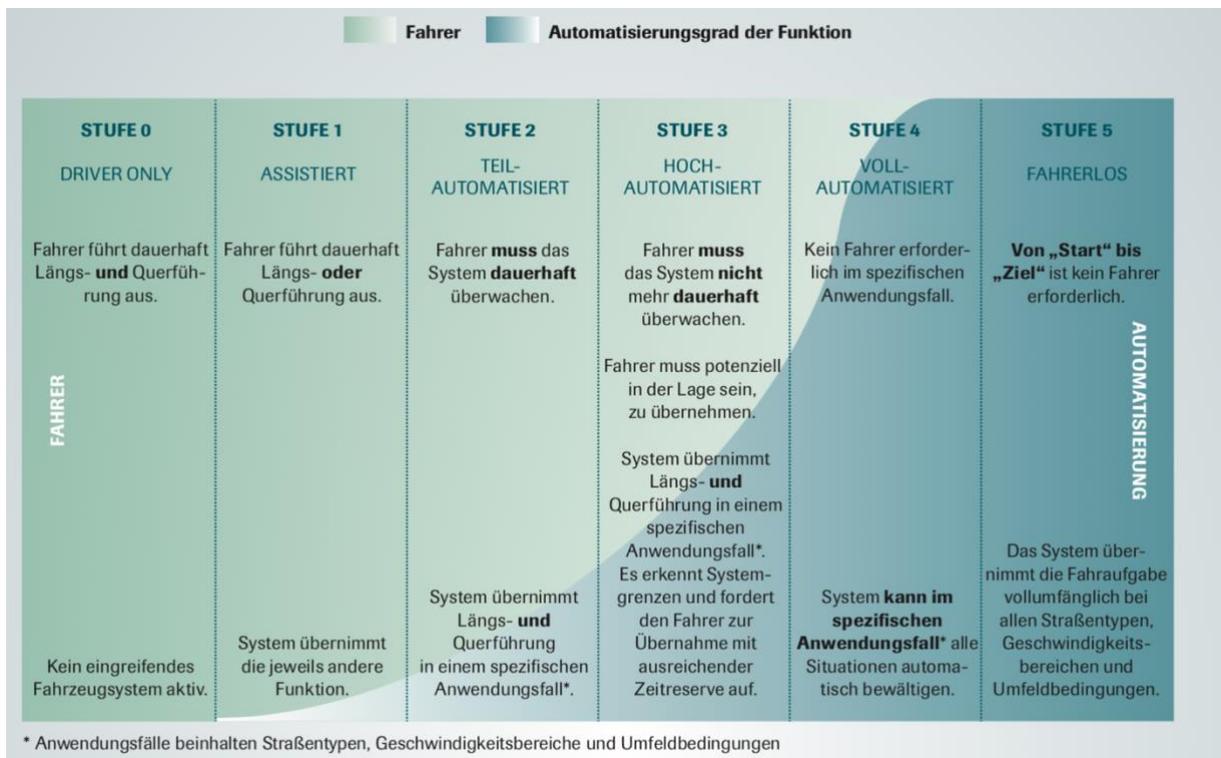


Abbildung 3: Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens nach VDA [136]

In der Stufe 0 gab es keine automatisierten Fahrfunktionen. Der Fahrer bestimmte alleine über Quer- und Längsbewegungen und konnte auf keine der heute bekannten Assistenzsysteme zurückgreifen.

In der ersten Stufe kann ein System entweder Längs- oder Querführung übernehmen, sodass sich der Fahrer auf die jeweils andere Handlung konzentrieren kann. Heute als Sonderausstattung verfügbare Geschwindigkeitsregelungen übernehmen die Längsführung des Fahrzeugs, sodass der Fahrer nur noch Querbewegungen ausführt.

Die darauffolgende Stufe 2 wird als teilautomatisiert bezeichnet, da das System Längs- und Querführung für einen bestimmten Anwendungsfall übernimmt. Nach dessen Aktivierung übernimmt es die Führung des Fahrzeugs auf der Autobahn. Dennoch muss der Fahrer stets das Fahrverhalten kontrollieren und jederzeit die Steuerung übernehmen können. Dies entspricht dem heutigen Entwicklungsstand.

In Stufe 3 erkennt das Fahrzeug selbst, ob die Assistenzsysteme unter den aktuellen Rahmenbedingungen agieren können. Falls nein, wird der Fahrer aufgefordert, die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen, der jedoch im Gegensatz zur vorigen Stufe nicht mehr dauerhaft das Fahrgeschehen überwachen muss.

Ab Stufe 4 kann man die komplette Fahraufgabe in spezifischen Anwendungsfällen an das System übergeben. Die Anwendungsfälle sind charakterisiert durch eine bestimmte Kombination aus Straßentyp, Geschwindigkeitsbereich und weiteren Umfeldbedingungen.

Die letzte Entwicklungsstufe, Automatisierungsgrad 5, wird autonom bezeichnet. Das Fahrzeug kann vollumfänglich auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und unter allen Umfeldbedingungen die Fahraufgabe vollständig allein, also fahrerlos, durchführen [Vgl. 136].

2.4.2 Bus

Das geläufige Kurzwort für Omnibus ist das in dieser Ausarbeitung durchgängig verwendete Wort Bus. Im rechtlich-gesetzlichen Kontext findet sich häufig die Bezeichnung Kraftomnibus (KOM). Es handelt sich stets um ein motorisch, also auch elektromotorisch, angetriebenes Landfahrzeug zur Personenbeförderung mit mindestens vier Rädern [Vgl. 95]. Es werden gemäß Anhang II der Richtlinie 70/156/EWG folgende Klassen unterschieden [60]:

- M1: Fahrzeuge mit höchstens acht Sitzplätzen zuzüglich Fahrersitz.
- M2: Fahrzeuge mit mehr als acht Sitzplätzen zuzüglich Fahrersitz mit einem Gesamtgewicht von weniger als 5t.
- M3: Fahrzeuge mit mehr als acht Sitzplätzen zuzüglich Fahrersitz mit einem Gesamtgewicht von mehr als 5t. Dazu zählen die meisten KOM in Deutschland.

Die derzeitigen autonom-vernetzten Testfelder werden größtenteils durch Fahrzeuge der Klasse M1 der Hersteller Local Motors (Test in Berlin u.a), EasyMile (Test in Lahr u.a) oder Navya (Test in Mainz u.a) betrieben und können je nach Modell sechs bis acht Passagiere befördern [Vgl.[14], [103], [144]. Ausnahme bildet der Mercedes-Benz Future Bus, ein Standard-KOM der Klasse M3, der testweise in Amsterdam verkehrt und bei entsprechender Bestuhlung über Sitzplatzkapazitäten verfügt, die einem heutigen Stadtbus gleichzusetzen sind [Vgl. 44]. Im Fokus der Recherchen stehen die kleineren Fahrzeuge für sechs bis acht Passagiere der Klasse M1, da sie sich im ersten Stadium ideal für den Zubringer zum Schienenpersonennahverkehr (SPNV) eignen. Vereinzelt werden jedoch Aspekte des Busses der Klasse M3 aufgegriffen.

2.4.3 Betriebsformen

Busse im ÖPNV verkehren nicht mehr nur als klassische Linienbusse, da es sich dabei um ein starres Angebot mit fest zugewiesenen Haltestellen handelt. Vielerorts finden sich in Deutschland jedoch nachfrageschwache bzw. nachfragekomplexe (durch Teilzeit, Schichtarbeit, flexible Arbeitszeiten u.a) Gebiete. Die dort vorherrschenden kleinen und schwankenden Fahrgastströme können schwieriger in wenige Fahrten mit großen Fahrzeugen räumlich und zeitlich gebündelt werden. Es werden im Folgenden vier Betriebsformen unterschieden, die sich in der Praxis auch in gemischter Ausprägung finden [Vgl. 107]:

1. **Linienbetrieb**

Diese Betriebsform hat das höchste Maß an räumlicher Bündelung und ist weiterhin am häufigsten vorzufinden. Die Bedienung erfolgt unabhängig des tatsächlichen Bedarfs und orientiert sich an einem vorher kommunizierten Aushangfahrplan.



- festbediente Haltestelle
- bedarfsabhängig bediente Haltestelle

Abbildung 4: Betriebsform Linienbetrieb [107]

2. **Tourenbetrieb**

Es handelt sich um eine Sonderform des Linienbetriebs, da die Haltestellen keinem

Linienraster folgen, sondern flächig verteilt sind. Auch hier werden die Haltestellen wie beim Linienbetrieb in einer festen Reihenfolge abgefahren. Durch die hohen Umwege gegenüber des klassischen Linienbetriebs entstehen Mehrkosten für das Verkehrsunternehmen (bzw. den Aufgabenträger), sodass sich diese Betriebsform in der Praxis selten findet oder in Kombination mit dem Linienbetrieb umgesetzt wird.

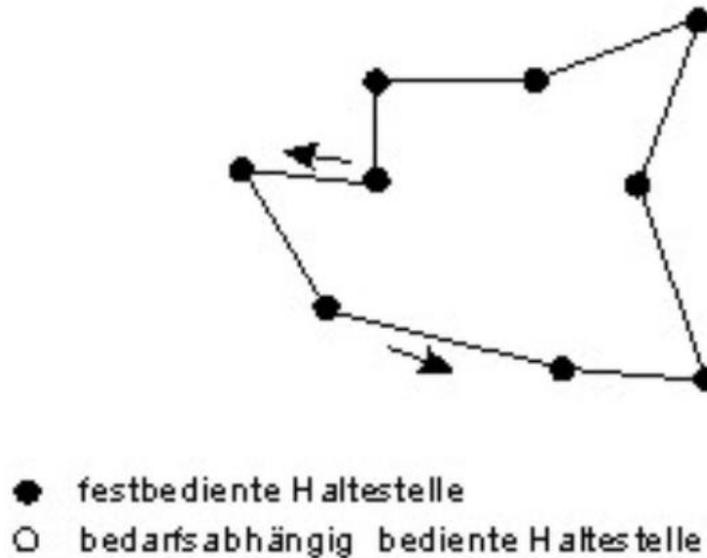


Abbildung 5: Betriebsform Tourenbetrieb [107]

3. Richtungsband-/Sektorenbetrieb

Die eingangs erwähnte und von ioki verfolgte „On-Demand-Mobilität“ kann dieser Betriebsform zugerechnet werden. Diese Betriebsform erschließt einen Korridor bzw. Sektor. Die fest bedienten Anfangs- und Endhaltestellen werden durch dazwischenliegende Zwischenhaltestellen ergänzt, die jedoch nur im Bedarfsfall bedient werden. Die Fahrzeuge verkehren fahrplangebunden.

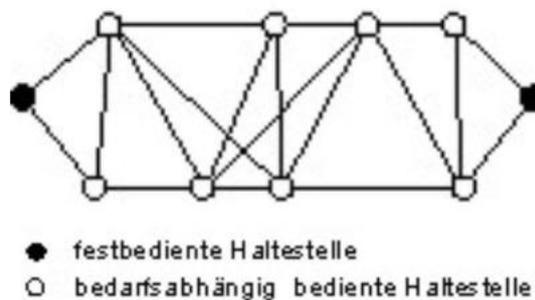


Abbildung 6: Betriebsform Richtungsbandbetrieb [107]

4. Flächenbetrieb

Die „On-Demand-Mobilität“ kann auch dieser Betriebsform zugerechnet werden. Es handelt sich bei dieser Form um die schwächste räumliche Bündelung der Nachfrage.

Die Zugangspunkte befinden sich in einem definierten Raum. Eine Haustürbedienung ist somit denkbar. Lediglich die Anfangshaltestelle ist fest definiert. Der Betrieb erfolgt vollkommen bedarfsgesteuert und folgt keiner festen Reihenfolge beim Abfahren der Haltestellen. Die Fahrzeuge können, müssen aber nicht, nur im Rahmen von fest definierten Betriebszeiten verkehren.

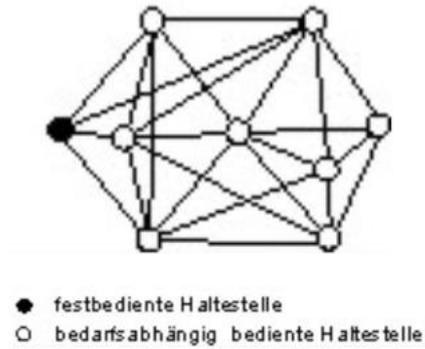


Abbildung 7: Betriebsform Flächenbetrieb [107]

3 Grundlagen autonomer Busse

Kapitel 3 wirft einen Blick auf die aktuelle technische Entwicklung bei autonomen Bussen und thematisiert im Anschluss Trends, die Einfluss auf die infrastrukturellen Anforderungen im darauffolgenden Kapitel haben.

3.1 Stand der Technik

Die heutigen Fahrzeuge verkehren unter vereinfachten Umgebungsbedingungen und müssen weitere Evolutionsschritte durchlaufen, um die fünfte VDA-Stufe der Autonomie zu erlangen. Fahrzeuge der betrachteten Größenklasse M1 orientieren sich mithilfe von Kameras und Laserscanner. Zunächst werden Umgebungsdaten (z.B Haltestellen) in den Bordcomputer eingelesen. Dadurch sind die Streckencharakteristika initial registriert. Die Sensoren können somit auf Hindernisse reagieren, da stets ein Abgleich zwischen initialem Referenzbild und dem Live-Bild erfolgt. Bei Abweichungen bremst das Fahrzeug automatisch [Vgl. 69], [Vgl. 103].

Lasersensoren in autonomen Bussen stellen bei fehlendem GPS-Signal sicher, dass die Fahrspur gehalten wird. Dazu wird die sogenannte **SLAM**-Technik (Simultaneous Localization and Mapping bzw. Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung) genutzt. Das in SLAM enthaltene Wort **Lokalisierung** beschreibt die exakte Positionsbestimmung relativ zu einer Karte. Das automatische Erstellen von Karten wird als **Mapping** bezeichnet und ist ohne die Disziplin der Lokalisierung kaum möglich. Es gibt mehrere Verfahren die Lokalisierung und Mapping gleichzeitig durchführen: diese Verfahren werden unter dem Begriff SLAM zusammengefasst und stellen ein eigenes Forschungsthema dar, das in dieser Ausarbeitung nicht thematisiert wird [Vgl. 52], [Vgl. 100].

Die in Deutschland im Einsatz befindlichen autonomen Fahrzeuge aller Hersteller verkehren mit elektromotorischem Antrieb. Die sich daraus ergebenden Anforderungen werden in Kapitel 4.1.1 analysiert. Das in Mainz verkehrende Modell des französischen Unternehmens Navya verfügt über eine elektrische Maschine mit einer Leistung von 15 Kilowatt (kW) mit Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator. Die Kapazität beträgt 30 Kilowattstunden (kWh), sodass am flachen Mainzer Rheinufer rund neun Stunden Einsatzdauer möglich sind [Vgl. 144]. Ähnliche technische Daten finden sich für Konkurrenzmodelle wie den EasyMile EZ10 [Vgl. 149].

In Kapitel 2.4.2 wurde festgelegt, dass die autonomen Stadtbusse der Klasse M3 wie der Mercedes-Benz Future Bus nicht Hauptbestandteil der Arbeit werden. Dennoch wird ein Einblick in den Stand der Technik gegeben, da sich Schnittmengen mit den Fahrzeugen der Klasse M1 ergeben.

Mercedes-Benz sieht im städtischen Verkehr besondere Herausforderungen: neben der Erkennung von Lichtsignalanlagen (LSA) müssen nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer wie

Radfahrer und Fußgänger erkannt werden. Das Fahren über lichtsignalgesteuerte Kreuzungen, das Fahren bei widrigen Wetterbedingungen, bei Nacht, im Tunnel stellen insbesondere die optischen Systeme wie Kameras vor besondere Herausforderungen. Gleichzeitig muss die Fahrspur präzise gehalten werden, die An- und Abfahrt von Haltestellen für mobilitätseingeschränkte Fahrgäste zentimetergenau erfolgen, und die Passagierabfertigung an lichtschrangesteuerten Fahrgasttüren sicher abgewickelt werden [Vgl. 46].

Der in Amsterdam verkehrende Mercedes-Benz Future Bus ist für städtisches autonomes Fahren entwickelt worden. Er verfügt über einen sogenannten CityPilot, der das teilautomatisierte Fahren auf sogenannten Bus Rapid Transit (BRT) -Strecken unterstützt. BRT sind Verkehrswege, die exklusiv Bussen zur Verfügung stehen. Die gut markierten, vom restlichen Verkehr separierten Strecken eignen sich besonders für erste Tests mit autonomen Bussen [Vgl. 46].

Der Future Bus verfügt über zehn Kameras, darunter eine Stereokamera, die 3D-Sicht ermöglicht, zwei Kameras, die die Seitenspiegel ersetzen, und weitere Kameras für die Spurerkennung. Radarsensoren an der Busfront erfassen den Bereich zwischen 10 cm und 200 m vor dem Fahrzeug. Der Bus steht über WLAN in stetem Informationsaustausch mit der Infrastruktur. Außerdem verfügt der Bus über eine elektrisch angesteuerte Servotwin-Lenkung, mit der Lenkmanöver noch genauer möglich sind. Die Fahrspur kann dadurch besser gehalten werden und im Gegensatz zu den kleineren M1-Modellen von Navya, Local Motors und EasyMile wird eine Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h erreicht was einen wesentlichen Vorteil gegenüber den hier betrachteten, kleineren Fahrzeuggrößen darstellt.

Das Heranfahen an eine Haltestelle erfolgt präzise: während des Bremsens hält der Bus seine Spur mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimeter. Die Türen öffnen und schließen im Anschluss mittels Lichtschranken automatisch. Sollten Hindernisse auf der Fahrbahn sein, werden diese von den Radarsensoren und der Stereokamera erkannt, sodass eine Bremsung eingeleitet wird.

Die Fahrzeugposition kann durch das Erkennen sogenannter Wegmarken entlang der Route exakt bestimmt werden [Vgl. 44]. Wegen des in Tunneln nicht immer vorhandenen GPS-Empfangs, erfassen die Radarsensoren und Kameras den Abstand zu den Tunnelwänden. Durch das Vehicle-to-Infrastructure-System (V2I) steht der Bus per WLAN mit der Infrastruktur in Kontakt. Lichtsignalanlagen erhalten im Voraus bereits die Position des Busses und können die Grünphasen entsprechend anpassen. Sollte dies nicht möglich sein, kann der Bus zur Verringerung seiner Geschwindigkeit aufgefordert werden. Ohne WLAN-Signal kann auf Ampelsignale immer noch über die Frontkameras reagiert werden [Vgl. 46].

Mit Blick auf die in Kapitel 2.4.1 erwähnten Automatisierungsstufen nach VDA rangiert der Mercedes-Benz Future Bus auf Stufe 2 (teilautomatisiert). Das System hält die Spur und beherrscht die Längsführung auf Basis vernetzter Assistenzsysteme [Vgl. 44].

Mit jedem weiteren Testfeld wird die Projektkomplexität durch höhere Geschwindigkeiten und Fahren in unübersichtlichen Situationen sukzessive erhöht. Anhand der Ausführungen wird klar, dass Sensoren derzeit fast nur fahrzeugseitig verbaut werden. Infrastrukturseitig werden für die Tests nur punktuell Änderungen vorgenommen. Bei der Recherche zu den „kleinen“ autonomen Bussen, die 2018 in Berlin, Lahr, Mainz oder Bad Birnbach eingesetzt wurden, konnten keine Informationen zur Anpassung der Infrastruktur (Lichtsignalanlagen, Fahrbahn oder Ähnliches) gefunden werden. Mit der weiteren Evolution der Fahrzeuge wird ein Involvieren der Infrastruktur jedoch unumgänglich, weswegen die Bewertung der Bestandsinfrastruktur hinsichtlich ihrer späteren Eignung für autonome Busse im Folgenden von zentraler Bedeutung ist.

3.2 Trends

Die Trends stellen Beobachtungen im Rahmen der Literaturrecherche dar. Sie können als Hypothesen verstanden werden, die in Kapitel 4 in konkrete Anforderungen an die Infrastruktur übertragen werden.

3.2.1 Übernahme menschlicher Aufgaben

Sukzessive sollen mehr Funktionen des Busfahrers durch technische Assistenzsysteme übernommen werden. Die Systeme müssen im Umkehrschluss den Menschen mindestens gleichwertig ersetzen, um ein besseres Sicherheitsniveau auf den Straßen zu erreichen.

Einschlafen am Steuer, Auffahrunfälle, Falschfahrer auf Straßen, Verstöße gegen Lenk- und Ruhezeiten, das Fordern nach mehr Pausen zwischen einzelnen Umläufen sollen fortan der Vergangenheit angehören.

Menschliche Funktionen müssen durch technische Systeme imitiert werden [Vgl. 117]. Das menschliche Auge passt sich unterschiedlichen Wettersituationen an, agiert bei Nebel genauso wie bei Gegenlicht. Es ermöglicht die Orientierung im Raum. Darüber hinaus muss der menschliche Verstand mittels künstlicher Intelligenz substituiert werden: die Einschätzung sämtlicher Fahr- und Gefahrensituationen obliegt künftig einer Maschine. Sie muss das Fahrzeug ebenso wie ein Mensch am Fahren hindern, wenn Sichtbedingungen oder klimatische Bedingungen die Fahrt nicht zulassen. Sie ist verantwortlich für kooperatives und vorausschauendes Fahren. Keine Vollbremsung einzuleiten, wenn ein Fahrzeug in den Sicherheitsabstand wechselt oder eine Rettungsgasse bilden, wenn sich ein Einsatzfahrzeug mit Blaulicht (optische Sensoren) oder mit Martinshorn (akustische Sensoren) nähert – all das erfordert Entwicklungsarbeit.

3.2.2 Elektromobilität im Umweltverbund

Fuß- und Radverkehr, CarSharing-Fahrzeuge, Bahn und Bus, und damit auch autonome Busse, bilden gemeinsam den sogenannten Umweltverbund. Dieser folgt als Alternative zum motorisierten Individualverkehr (MIV) dem Leitbild der nachhaltigen Mobilität [Vgl. 96]. Das Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (MVI) zitiert bei nachhaltiger Mobilität die Ziele der Landesregierung: bis zur Mitte des Jahrhunderts soll die Mobilität im Land Baden-Württemberg weitgehend auf erneuerbare Energien umgestellt sein. Chancen der technologischen Entwicklung werden ergriffen und neue Mobilitätsformen gefördert. Neue Mobilitätsformen sind umwelt- und klimaverträglich abzubilden [Vgl. 94].

Autonome Busse können durch ihre hohen Laufleistungen zur Reduktion von Treibhausgasen beitragen. Da Busverkehre durch die öffentliche Hand finanziert werden, sind die Ziele der Landesregierung für Betreiber von Busflotten relevant. Zudem geht der Einsatz autonomer Busse mit Elektromobilität einher (oder alternativer Technologien wie Wasserstoffantrieb. Diese werden nicht Bestandteil der Betrachtung sein).

Es ist somit strategische Aufgabe, eine geeignete Ladeinfrastruktur zu etablieren, um die gesetzten Umweltziele zu unterstützen. Fahrzeugseitige Aspekte der Elektromobilität bleiben in dieser Ausarbeitung weitestgehend unbeachtet.

3.2.3 Kooperative Echtzeitkommunikation

Die Kommunikation für autonomes Fahren erfolgt künftig kooperativ und in Echtzeit.

Zunächst stellt sich die Frage, was hinter der **Kommunikation** steckt, die für den Anwendungsfall spezifiziert werden muss: Vehicle-to-X-Kommunikation (**V2X**), oftmals auch als Car-to-X-Kommunikation (**C2X**) bezeichnet, ist der Überbegriff für die künftige Kommunikation von Fahrzeugen mit ihrer Umgebung, der sich in zwei Unterbegriffe aufteilt [Vgl. 51]:

- **V2V**, Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation. Sie beschreibt die Kommunikation von Fahrzeugen untereinander und findet sich in der Literatur auch als C2C, der sogenannten Car-to-Car-Kommunikation wider.
- **V2I**, Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation. Sie beschreibt die Kommunikation von Fahrzeugen mit der Infrastruktur und umgekehrt und ist für diese Ausarbeitung von zentraler Bedeutung. In der Literatur findet sich der gleichbedeutende Begriff I2V, I2C bzw. C2I.

Im weiteren Verlauf werden die Begriffe V2X, V2V und V2I verwendet.

Durch die Intensivierung von V2X werden Fahrzeuge vernetzter denn je zuvor. Sie erzeugen höhere Datenvolumina und erfordern eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit. Infrastrukturseitig müssen dazu Vorkehrungen getroffen werden [Vgl. 17]. Dies ist auch auf die neue Bidirektionalität der Kommunikation zurückzuführen: Fahrzeuge sind nicht mehr nur

klassische unidirektionale Empfänger von Informationen, denn künftig werden sowohl Infrastruktur als auch Fahrzeuge zu Sendern und Empfängern von Informationen. Die Kommunikation wird bidirektional und stellt Anforderungen an die informationstechnische Infrastruktur.

Die Kommunikation für autonomes Fahren erfolgt künftig **kooperativ** und in Echtzeit. Aber was steckt im Wort kooperativ?

Für kreuzende Verkehrsströme ohne LSA-Regelung benötigen autonome Fahrzeuge, insbesondere autonome Busse mit Bevorrechtigung, die Fähigkeit der Kommunikation untereinander und mit der Infrastruktur. Die Antizipation von Manövern und die daraus folgenden Reaktionen wirken sich auf den Fahrkomfort aus, der stehenden Fahrgästen im Stadtverkehr geboten werden muss [Vgl. 89]:

Kooperation erfolgt beim gegenseitigen Warnen vor Baustellen, vor Einsatzfahrzeugen, Unfällen, bei Fahrmanövern Dritter oder dem Ansteuern von LSA [Vgl. 22]. Ein kooperatives Verhalten im Verkehr wird durch eine kontinuierliche Interaktion der beteiligten Elemente ermöglicht [Vgl. 71]. Dazu bedarf es entsprechender Übertragungstechnik, die eine infrastrukturelle Anforderung darstellt.

Die Kommunikation für autonomes Fahren erfolgt künftig kooperativ und **in Echtzeit**.

Letzteres impliziert, dass Kommunikation insbesondere bei sicherheitsrelevanten Informationen schnellstmöglich zu erfolgen hat. Eine Definition der Echtzeit findet sich in DIN 44300 des Deutschen Instituts für Normung. Unter Echtzeit (real time) versteht man den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen [Vgl. 104]. Akzeptable Verzögerungszeiten, sogenannte Latenzzeiten [Vgl. 17], hängen von der Sicherheitsrelevanz ab. Warnung vor bevorstehenden Zusammenstößen sollten die Latenzzeit von 50 ms nicht überschreiten. Infrastrukturseitige Informationen zum Verkehrszustand (Stau, Stop & Go), zu Baustellen, zu Geschwindigkeitsbegrenzungen oder City Maut-Stationen können Latenzzeiten bis zu 500 ms aufweisen [Vgl. 5].

In Echtzeit agierende Systeme werden taktile bezeichnet und stellen durch nahezu verzögerungsfreie Übermittlung den Zielzustand für autonomes Fahren dar. Forscher des Fraunhofer-Instituts bezeichnen Systeme als taktile, wenn die Latenzzeit bei rund 1 ms liegt [Vgl. 16]. Die Übertragungstechniken müssen hinsichtlich ihrer Übertragungsrates und der Übertragungszuverlässigkeit klassifiziert und kombiniert werden.

Es ist erforderlich, dass sich die Ausarbeitung mit der Übertragungstechnik der kommenden Jahre auseinandersetzt, um daraus die infrastrukturellen Anforderungen ableiten zu können.

3.2.4 Intelligente Straßeninfrastruktur

Die Digitalisierung der Straßen vollzieht sich langsam. Vielerorts finden sich inzwischen Vorboten der Digitalisierung wie digitale Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA), dynamische Parkleitsysteme oder modernisierte Wechselverkehrszeichen (WVZ). Von einer Innovation bis zur Implementierung selbigen Produkts im Verkehrsbereich vergehen bis zu 30 Jahre, da die Erprobung unter realen Witterungsbedingungen Zeit in Anspruch nimmt. Straßenbau ist konservativ [Vgl. 72].

Unterdessen vollzieht sich die digitale Evolution fahrzeugseitig. Während Entwicklungszyklen bei vernetzten, autonomen Fahrzeugen rund 18 Monate dauern, ist das Straßennetz einige Jahrzehnte alt [Vgl. 126]. Fahrzeuge wie der EasyMile EZ10 sind mit mehreren Kameras, Lidar-Systemen oder GPS-Komponenten (Global Positioning System) ausgestattet, um vorübergehend auch ohne infrastrukturseitige Unterstützung autonomes Fahren zu ermöglichen. Derzeit sind die Geschwindigkeiten dieser Fahrzeugmodelle bekanntermaßen reduziert [Vgl. 149].

Mit steigendem Automatisierungsgrad wird Verkehrsinfrastruktur von einer unterstützenden Rahmenbedingung zu einer notwendigen Bedingung für autonomes Fahren [Vgl. 138].

Infrastruktur wird intelligenter, indem Sensoren an Elementen der Straßenausstattung verbaut werden, die beispielsweise der Verkehrsüberwachung dienen. In die Fahrbahn eingelassene Leuchtdioden leisten genauso wie Straßenlaternen mit adaptiver Ausleuchtung ihren Beitrag zur Weiterentwicklung der Straße von morgen. Und grundsätzlich Elemente, die der V2X-Kommunikation dienen oder helfen [Vgl. 118].

Einige Elemente liefern mittelfristig sicherheitsrelevante Informationen, sodass deren Funktionsfähigkeit und Resistenz gegenüber Cyberangriffen oder klassischem Vandalismus betrachtet werden muss. Grundvoraussetzung ist deren zuverlässige Instandhaltung. Straßeninstandhaltung erfolgt heutzutage individuell durch Erfassung und Beurteilung eines sogenannten Zustandswerts. Erst nach Unterschreiten eines Zustandswertes und unter Berücksichtigung der Zustandsprognose bis zur nächsten Überprüfung selbigen Abschnitts, werden Maßnahmen ausgewählt und ergriffen [Vgl. 47]. In Baden-Württemberg werden die netzweiten Zustandserfassungen für Bundesautobahnen (BAB), sowie Bundes- und Landesstraßen alle vier Jahre durchgeführt [Vgl. 110]. In Anbetracht der sicherheitsrelevanten Dimension reicht eine Überprüfung im 4-Jahres-Rhythmus nicht aus.

Die Ausführungen zeigen auf, dass sich der Straßenraum im Allgemeinen und die Straßenausstattung im Speziellen weiterentwickeln müssen. Komplexe und neuartige Elemente bedingen gleichzeitig eine regelmäßiger Instandhaltung als heute, denn mehr Technik in Straßen bedingt mehr Instandhaltung.

4 Infrastrukturelle Anforderungen autonomer Busse

In dieser Arbeit werden die verkehrs- und informationstechnischen infrastrukturellen Anforderungen analysiert, die auch für Testfelder des autonomen Fahrens relevant sind. Eines davon findet sich in Baden-Württemberg. Im Rahmen des Forschungsförderprogramms Smart Mobility des Landes Baden-Württemberg sollen einige Fragen auf dem „Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg“ (TAF BW) praxisnah geklärt werden [Vgl. 13]. Untersuchungen zur Eignung der Bestandsinfrastruktur sind wichtig, da eine betriebswirtschaftliche Betrachtungsweise oder das Beschränken auf eine Auswertung von Nachfragedaten keine vollumfänglichen Rückschlüsse über die Realisierbarkeit autonomer Buskonzepte erlauben.

4.1 Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur

Eine Herausforderung wird darin bestehen, Verkehrsinfrastruktur über eine lange Übergangszeit für Mensch und Maschine verständlich zu gestalten. Sie muss in der Übergangszeit einen Spagat vollziehen: diskriminierungsfrei muss sie über Jahre hinweg beiden Nutzergruppen, also Mensch und Maschine, gerecht werden und einen sicheren Ablauf des Verkehrs ermöglichen. Die Übergangszeit ist durch klassische Fahrzeuge im manuellen Betrieb (VDA-Stufen 0 und 1), sowie durch assistierte bis vollautomatisierte Fahrzeuge (VDA-Stufen 2, 3 und 4) und autonome Fahrzeuge (VDA-Stufe 5) gekennzeichnet.

Menschen arbeiten über ihre Sinnesorgane, technische Systeme über Sensoren [Vgl. 126]. Bei der Transformation der Verkehrsinfrastruktur ist zu beachten, dass die damit verbundenen Planungen komplex sind, die Neu- und Umgestaltungen hohe Investitionen erfordern und die Entscheidungen für lange Zeit bindend sind. Somit müssen neue Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur gut überlegt sein und zum richtigen Zeitpunkt in die Planungen eingebracht werden.

4.1.1 Ausbau der Ladeinfrastruktur

Die Akkumulatoren der Elektrofahrzeuge verfügen über geringere Energiedichten als Treibstoffspeicher verbrennungsmotorischer Fahrzeuge, was häufigere und längere Ladevorgangszeiten mit sich bringt, wenn die gleichen Reichweiten erzielt werden sollen [Vgl. 114].

Elektroladesäulen sind in aller Munde und sind für einen regulären Betrieb autonomer Busse in der Langfristsicht dennoch ungeeignet: Je weniger Leistung die Quelle hat, desto länger dauert das Laden. Die Haushaltssteckdose, im Folgenden als Schutzkontakt-Steckdose (Schuko-Steckdose) bezeichnet, führt maximal 16 A bei einer Nennspannung von 230 V. Sie bietet nur eine geringe Ladeleistung in Höhe von 3,68 kW, sodass diese das schnelle Laden großer Akkumulatoren nicht unterstützt. Ohne schnelle Ladung müssen im täglichen

Fahrzeugumlauf unproduktive Zeiten für die Zwischenladung eingeplant werden – die Betriebszeiten müssen eingeschränkt werden und sind nicht mit der Verfügbarkeit verbrennungsmotorischer Fahrzeuge vergleichbar.

Sofern die autonomen Busse die höheren Ladeleistungen verarbeiten können und die zur Verfügung stehende Ladezeit begrenzt ist, sollten die Ladeleistungen für Nutzfahrzeuge möglichst hoch sein. Ladesäulen für Nutzfahrzeuge liefern Ladeleistungen bis zu 750 kW, eine öffentliche Pkw-Ladesäule bis zu 50 kW und die Schuko-Steckdose lediglich knapp 4 kW bei Vernachlässigung von Verlusten [Vgl. 42].

Für die Berechnung der erforderlichen Ladezeit (h) werden die fahrzeugseitige Akkumulatorkapazität (kWh) und die seitens Ladeinfrastruktur zur Verfügung stehende Leistung (kW) benötigt:

$$\text{Ladezeit (min)} = \frac{\text{fahrzeugseitige Akkumulatorkapazität (kWh)}}{\text{infrastrukturseitige Ladeleistung (kW)} * \text{Wirkungsgrad (-)}} * 60 \frac{\text{min}}{\text{h}}$$

Der Easymile EZ10 verfügt über eine Akkukapazität von 8 kWh. Die Akkukapazität von 8 kWh ist gering, sodass die Fahrzeugreichweite eingeschränkt, das Laden jedoch in annehmbarer Zeit möglich ist [149]. Der baden-württembergische Energieversorger EnBW bietet derzeit Pkw-Schnellladestationen mit Ladeleistungen bis zu 43 kW (bei Laden mit Wechselspannung, z.B. für die Easymile EZ10 Drehstrom-Asynchronmaschine) an [41]. Die Ladezeit beträgt an solch einer Schnellladestation unter Vernachlässigung von Verlusten rund 12 Minuten. Das Errichten oder Nutzen der Schnellladeinfrastruktur ist daher dem Nutzen von Schuko-Steckdosen theoretisch vorzuziehen, auch wenn auf Letztere in deutschen Testfeldern im Anfangsstadium gerne zurückgegriffen wird, um Kosten zu senken und nicht auf öffentliche, ggf. durch Dritte belegte Ladeinfrastruktur, zurückgreifen zu müssen (2019a).

An einer Schuko-Steckdose beträgt die Ladedauer zwar knapp über zwei Stunden, dennoch entschied sich Bad Birnbach dafür (2019a).

Mit neuen Fahrzeuggenerationen wird in Analogie zur Entwicklung auf dem Automobilmarkt deren Akkukapazität steigen, was eine höhere Reichweite aber auch höhere Ladezeiten mit sich bringt.

Der spezifische Energieverbrauch und die damit verbundene Häufigkeit der Ladevorgänge ergibt sich aus einer im Voraus zu betrachtenden Energiebilanzrechnung. Der spezifische Energieverbrauch richtet sich nach Busgröße, mittlerer Beförderungsgeschwindigkeit, mittlerem Haltestellenabstand, Streckenlänge, Verkehrsbeeinflussungen, Bevorrechtigungen der Busse im Straßenverkehr, klimatischen Bedingungen, Topographie, Energiespeichergöße, Ladestrategie und der Entfernung zur nächsten planmäßigen Ladeinfrastruktur [Vgl. 116].

Ideale Einsatzbedingungen wären demnach ein mitteleuropäisches, gemäßigtes Klima im Flachland auf einem möglichst kleinen Bedienungsgebiet.

Realistische Einsatzbedingungen sind jedoch ein Klima, das Fahrgastklimatisierung erfordert (heiße Sommer, kalte Winter) oder regelmäßiger Stop&Go-Verkehr aufgrund undurchgängiger Bus-Bevorrechtigung und anspruchsvoller Topographie oder selbst Gegenwind im Flachland.

Die Frage nach der Ladeinfrastruktur für autonome Elektrobusse ist eng mit der **Ladestrategie** verknüpft. Sie gibt Aufschluss über die zur Verfügung stehende Ladezeit und die notwendige Ladeleistung. Dabei werden die **Langsam- und die Schnellladung** unterschieden [Vgl. 38]. Aufgrund der begrenzten Reichweite autonomer Elektrobusse muss die Strategie zur Wiederaufladung im Voraus betrachtet werden. Das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme unterscheidet drei Nachladestrategien [Vgl. 38]:

1. Aufladen in Betriebspausen (im Regelfall nachts)
2. Aufladen in Betriebspausen (im Regelfall nachts) und Gelegenheitsladen an Endhaltestellen oder Haltestellen mit längerem Aufenthalt
3. Aufladen in Betriebspausen (im Regelfall nachts) und Unterwegsladen an beliebigen Haltestellen und Endhaltestellen

Zunächst wird Strategie 1 betrachtet.

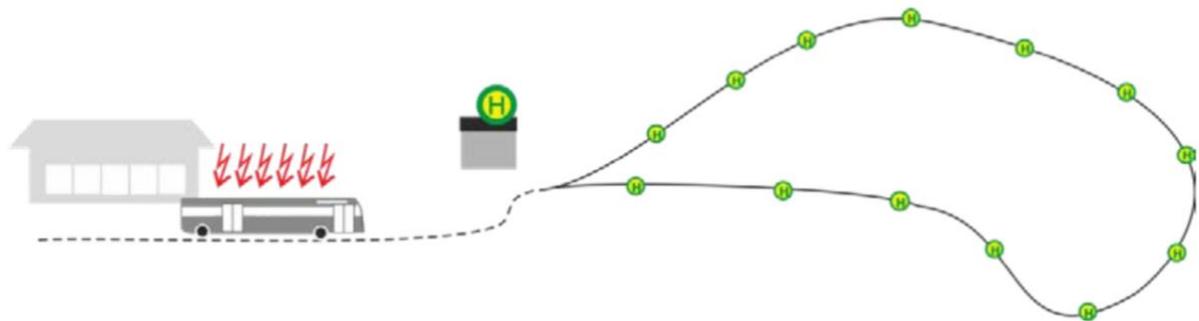


Abbildung 8: Strategie 1 - Nachtladen und Ganztageseinsatz ohne Zwischenladen [38]

Der Bus verkehrt tagsüber ohne Zwischenladung, sodass Ladeinfrastruktur nur an einem Punkt, im Regelfall auf einem Betriebshof, vorgehalten werden muss. Die Energiespeicher des Fahrzeugs können langsam und schonend über Nacht mit geringer Ladeleistung aufgeladen werden. Die untertägige Reichweite ist aufgrund der begrenzten Ladevorgänge und der derzeit begrenzten Akkukapazität gering. Die Elektrobusse (bei heutigem Stand der Technik) können demzufolge nicht die Laufleistungen und nicht die Umläufe von heutigen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen realisieren.

Ladestrategie 1 ist durch den geringen Aufwand für Infrastrukturanpassung vergleichsweise kostengünstig, da auf einfache, manuelle steckerbasierte Ladevorgänge zurückgegriffen wird. Ungeachtet der vorher einzulernenden Strecke kann das Fahrzeug jedoch neben einem regulären Linienbetrieb auch kurzfristig geänderte Routen realisieren, da die Fahrzeuge nicht mit Zwischenladung in der Umlaufplanung berücksichtigt werden müssen. Heutige Testfelder wie in Bad Birnbach, Lahr oder Mainz verfolgen Ladestrategie 1. Verkehrsunternehmen müssen jedoch mittelfristig einen gleichwertigen Ersatz ihres heutigen Angebots anstreben, sodass Umlauflängen vergleichbar mit verbrennungsmotorischen Umläufen sein müssen. Ladestrategie 1 scheint daher nur kurzfristig, also für „die ersten“ Testfelder praktikabel.

Ladestrategie 2:

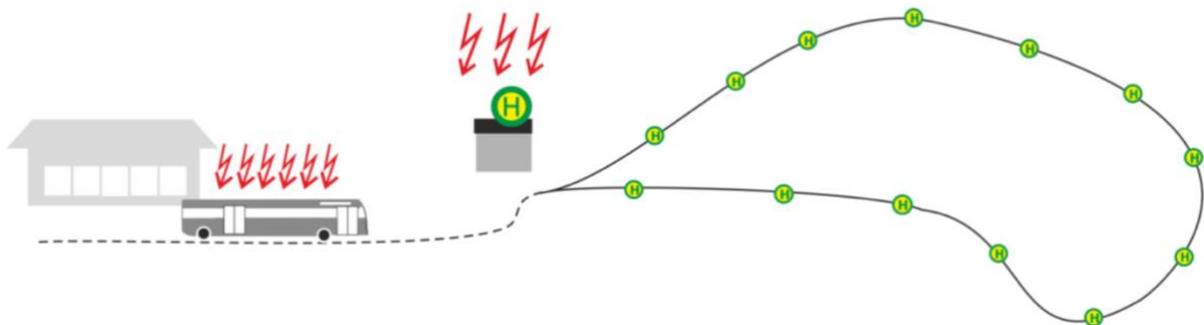


Abbildung 9: Strategie 2 - Nachtladen und Gelegenheitsladen in Fahrpausen und an Endhaltestellen [38]

Die zweite Strategie sieht zusätzlich auch Ladevorgänge an Endhaltestellen oder an Haltestellen mit Wartezeit vor. Bei entsprechender Auslegung des Energiespeichers kann die untertägige Reichweite des Busses deutlich erhöht werden. Fahrzeugseitig können wegen der häufigeren Teilladung kleinere Energiespeicher verbaut werden. Topographisch anspruchsvollere Routenverläufe werden für Elektrobusse möglich. Der Einsatz ist mit einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug vergleichbar. Die Integration von Ladeinfrastruktur in den öffentlichen Straßenraum stellt eine finanzielle und bauliche Hürde dar. Weiterer Nachteil ist, dass planmäßige und für die Aufladung relevante Haltestellenaufenthaltszeiten auch im Verspätungsfall nicht reduziert werden können, da die Aufenthaltszeiten für eine Teilladung des Fahrzeugs unumgänglich genutzt werden müssen.

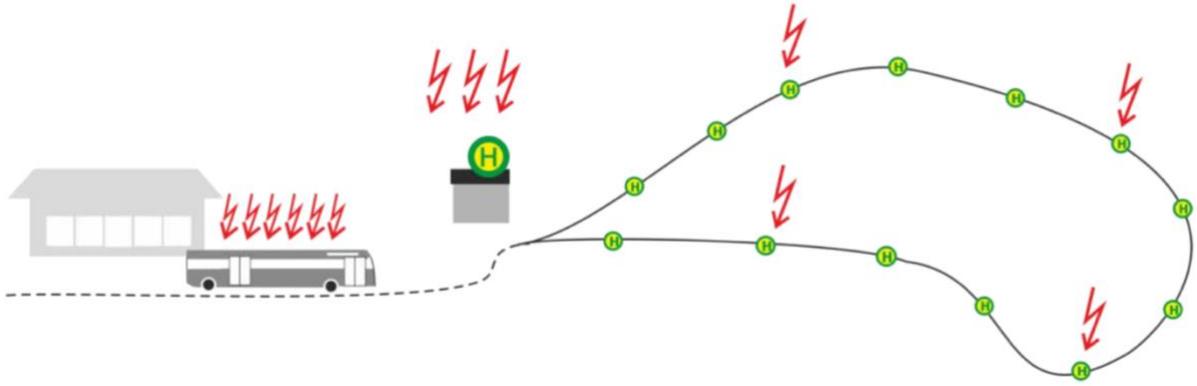


Abbildung 10: Strategie 3 - Nachtladen und Unterwegsladen beim Fahrgastwechsel an Haltestellen und Endhaltestellen [38]

Die dritte Strategie sieht zusätzlich auch Energiezuführung an Unterwegshaltestellen vor, auch bei planmäßig kurzer Aufenthaltszeit. Die fahrzeugseitigen Energiespeicher können noch kleiner als bei der zweiten Ladestrategie dimensioniert werden. Gesunkene Kosten aufgrund kleinerer Energiespeicher stehen gestiegenen Kosten für die Ladeinfrastruktur an weiteren Haltestellen gegenüber. Die Ladeleistung muss wegen der kurzen durchschnittlichen Haltestellenverweildauer hoch sein. Da die Busse auf die Unterwegsladung angewiesen sind, können sie nicht lange vom Regellinienweg abweichen. Baustellen, die einen längeren Umweg erfordern, bedürfen daher der besonderen Vorplanung. Ladestrategie 3 wird derzeit auf einem Braunschweiger Testfeld realisiert. Dort verkehren (manuelle) Busse, die an drei induktiven Ladestationen aufgeladen werden: im Busdepot, an einer Unterwegshaltestelle und an einer Endhaltestelle [Vgl. 18]. Wünschenswert wäre Ladestrategie 3 mit dem dichten Netz an Ladeinfrastruktur, das einen hochflexiblen Betrieb der Fahrzeuge ermöglicht. In Anbetracht der hohen Investitionskosten ist Ladestrategie 2 in der künftigen Umsetzung jedoch realistischer.

Neben der Ladestrategie muss die konkrete technische Abwicklung des Ladevorgangs betrachtet werden, die sogenannte **Ladeform**: Es existieren zwei Ladeformen, die sich in die sog. Steckerladung sowie die Ladung mit automatisierten Systemen unterscheiden [Vgl. 38]:

1. Steckerbasierte Ladesysteme

Laden über einen Stecker, auch Plugin-Ladesystem genannt, unterstützt geringe Ladeleistungen bis circa 150 kW und eignet sich damit für den Einsatz auf Betriebshöfen, wo die Busse langsam über Nacht geladen werden (vorrangig Ladestrategie 1). So greift auch das Testfeld in Bad Birnbach auf den steckerbasierten 230 V- Standard-SchuKo-Lösungsansatz zurück (2019a).

Das PlugIn-Laden eignet sich in der Kurzfristsicht bzw. für Städte ohne ausgeprägte Ladeinfrastruktur wie z.B. 750V DC-Oberleitungen. Die eigentliche Ladetechnik ist in Ladesäulen (Offboard-Lösung) oder im Fahrzeug (Onboard-Lösung) untergebracht. PlugIn-Lösungen von Siemens unterstützen den Ladestandard für Elektrofahrzeuge Combined Charging System (CCS), der Steckerform und Ladeverfahren nach IEC 62196 vorgibt. Siemens weist bei seinen PlugIn-Lösungen auf die Kompatibilität mit dem Open Charge Point Protocol hin, einem standardisierten Kommunikationsprotokoll zwischen Ladesäule und Hintergrund-Managementsystem. Heutige Modelle wie der EasyMile EZ10 verfügen über steckerbasierte Lösungen [Vgl. 116], [Vgl. 147].

Kurzfristig muss die Infrastruktur steckerbasiertes Laden unterstützen, da sie in allen autonomen Kleinbussen zum Einsatz kommt. Da es sich aber um einen manuellen, menschlich geführten, Ladevorgang handelt, kann es sich dabei auch unter Berücksichtigung der geringen Ladeleistungen und der damit erhöhten Aufladezeit lediglich um ein Übergangsmodell handeln. Vielmehr sollte nach Möglichkeit direkt in automatisierte Ladesysteme investiert werden, die die betriebliche Flexibilität erhöhen und ein konsequenter Schritt in Richtung „autonomes Fahren“ darstellen, da nicht nur das Fahren des Fahrzeugs sondern auch der Ladevorgang selbst autonom erfolgen können.

2. Automatisierte Ladesysteme

Massenmarktaugliche autonome Fahrzeuge können nicht weiterhin auf manuelle Ladevorgänge angewiesen sein, weswegen PlugIn-Systeme nur einen Übergangszustand darstellen. Unterschieden werden konduktive und induktive automatisierte Ladesysteme.

- **Konduktive Ladesysteme**

Die Kontaktherstellung zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur erfolgt über einen Kontaktkopf und unterstützt Ladeleistungen bis circa 750 kW. Die Schwinge ist entweder auf dem Fahrzeugdach montiert und fährt an den Lademast (bottom-up) oder die Schwinge ist am Lademast montiert und senkt sich in Richtung Fahrzeugdach (top-down).

Top-Down-Pantographen unterstützen laut Siemens mit bis zu 600 kW die größten Ladeleistungen, bedürfen aber mehr Technik auf dem Fahrzeug: neben Kontaktschienen müssen eine WLAN-fähige Antenne, sowie Schalt- und Steueranlagen verbaut werden. Das Verfahren funktioniert herstellerübergreifend und die Drahtloskommunikation über den Standard WLAN IEEE 802.11a. Der netzseitige Anschluss erfolgt zwischen 400V AC und 20 kV AC bei einer Frequenz von jeweils 50 Hz [Vgl. 116].

Bottom-Up-Pantograph bieten sich in Städten mit bestehenden Gleichspannungsleitungen an. Es handelt sich dabei klassischerweise um Oberleitungen für Straßenbahnen, die punktuell zum Beispiel an Endhaltestellen erweitert werden und unter die der Bus mit seinem Stromabnehmer fahren und Energie beziehen kann. Die Ladeleistungen für Bottom-Up-Verfahren liegt laut Siemens bei circa 120 kW. Der netzseitige Anschluss erfolgt über Oberleitungen von z.B. Straßenbahnen, die in Deutschland im Regelfall über 750V DC verfügen [Vgl. 116].

Konduktive Ladesysteme finden sich aufgrund des aufwändigen Aufbaus vornehmlich bei M3-Bussen und derzeit nicht in der betrachteten M1-Größenklasse autonom fahrender Kleinbusse. Asea Brown Boveri (ABB) gibt an, dass deren konduktive Ladestationen für verschiedene Fahrzeugmarken und Fahrzeugtypen einsetzbar sind und auf dem internationalen Standard IEC 61851-23 basieren [Vgl. 1].

- **Induktive Ladesysteme**

Induktive Energieübertragung steht für kontaktloses Laden. Eine physische Verbindung des Fahrzeugs zum Stromnetz ist nicht nötig, da magnetische Felder genutzt werden. Die straßenseitig im Fahrbahnbelag verbauten Spulen erzeugen als sogenannte Primärspule magnetische Felder und induzieren eine Spannung in der fahrzeugseitigen Sekundärspule; sie erzeugen also Strom. Die infrastrukturseitige Einheit wird im Regelfall als kompakte, standardisierte Einheit verkauft. In der Literatur wird sie als „Ladepad“ oder „Ladeplatte“ bezeichnet. Diese in die Fahrbahndecke zu integrierende Einheit baut das elektromagnetische Feld auf und beinhaltet somit die Spule, sowie eine Vorrichtung zur Fahrzeugerkennung. Weiterhin sind infrastrukturseitig die Leistungselektronik, die Kühleinheit (zur Kühlung der Leistungselektronik), ein Leistungsschalter (kann die Stromversorgung im Notfall unter Last abschalten) und die Spannungsquelle oder die Zuleitung zur Spannungsquelle notwendig.

Im vorliegenden Praxisbeispiel ist die Spannungsquelle die Gleichspannungsversorgung der benachbarten Straßenbahnlinie [Vgl. 18]. Durch die in diesem Fall zutreffende Speisung der Ladeeinrichtung mit Gleichspannung, muss ein Wechselrichter (Leistungselektronik)

zwischengeschaltet werden, da die induktive Energieübertragung mit Wechselspannung erfolgt.

Der Netzanschluss kann wahlweise mit 400V AC 50 Hz oder z.B. 750V DC erfolgen. In Braunschweig speist die benachbarte Straßenbahnlinie lokalspezifische 600V DC [Vgl. 18].

Die Leistungsübertragung ist geringer als beim konduktiven Laden und beträgt derzeit maximal circa 200 kW. Bereits seit 2014 können in Braunschweig Elektrobusse per induktiver Schnellladung mit 200 kW Ladeleistung aufgeladen werden [Vgl. 120].

Im Gegensatz zu den konduktiven Ladesystemen muss bei der Berechnung der erforderlichen Ladezeit der Wirkungsgrad berücksichtigt werden, der unter anderem vom Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärspule abhängig ist [Vgl. 38]. Das Braunschweiger Projekt senkt die Sekundärspule temporär in Form eines „Energieaufnahmesystems“ während des Ladevorgangs ab, um den Luftspalt zu minimieren. Die Übertragungseffizienz wird seitens Bombardier mit mehr als 90% beziffert. Mit einer Akkukapazität von 60 kWh beim Solo-Standardbus und einer Ladeleistung von 200 kW ergibt sich bei einem Wirkungsgrad von rund 90% eine Ladezeit von lediglich 20 Minuten [Vgl. 120]. Bei den in dieser Ausarbeitung betrachteten kleineren autonomen Bussen mit einer Akkukapazität von 8 kWh würden sich Ladezeiten von drei Minuten ergeben, sofern das Fahrzeug mit diesen Ladeströmen operieren kann. Je höher das Spannungsniveau, desto geringer die Ladeströme und damit kleiner die stromzuführenden Kabelzuleitungen.

Der Vorteil des induktiven Ladens liegt bei der Unabhängigkeit der Wetterlage und der sukzessiven, schubweisen Wiederaufladung der Akkus, die im Gegensatz zur Schnellladung akkuschonend sein soll [Vgl. 87], [Vgl. 114]. Zudem lässt sich die gesamte Ladeinfrastruktur stadtplanerisch unauffällig in das Straßenbild integrieren [Vgl. 18].

Die elektromagnetische Verträglichkeit, nicht zuletzt im Interesse von Mensch und Tier, muss gewährleistet sein. In Braunschweig werden alle gültigen deutschen Grenzwerte eingehalten [Vgl. 18]. Auch die neue Generation des EasyMile-Kleinbusses unterstützt induktives Laden [Vgl. 30].

Heute werden Elektrobusse in Kombination mit der zugehörigen Ladetechnik aus einer Hand beschafft, um ein reibungsloses Funktionieren der Komponenten untereinander sicherstellen zu können. Um betrieblich unabhängig von einzelnen Herstellern agieren zu können, müssen Normungsaufträge an die Europäische Kommission vergeben werden. Für Standardisierung bedarf es einer kritischen Masse an Elektrobussen [Vgl. 40]. Die Marktdurchdringung ist dafür heute noch nicht ausreichend groß [Vgl. 38]. Standardisiert werden müssen folgende Komponenten:

- Physikalische Schnittstelle Fahrzeug-Ladeinfrastruktur
- Kommunikationsprotokoll Ladestation-Batteriebusse
- Ladesteuerung (Bereitstellung Ladestrom und Ladespannung)
- Verhältnis Spannungsniveau zu Ladeleistung

Bislang unbeachtet blieb zudem die Betriebsform autonomer Busse. Die vorhergehenden Ausführungen beruhen auf dem Festhalten an der klassischen Art des Linienbetriebs [Vgl. 48]. Bedarfsgerechter Richtungsband- oder Flächenbetrieb benötigt jedoch weiterhin Fixpunkte für die zugesicherte Nachladung der Fahrzeugenergiespeicher. Um die Komplexität der Ausarbeitung zu begrenzen, wird im Folgenden vom klassischen Linienbetrieb ausgegangen.

Um manuelle oder störanfällige Vorgänge zu reduzieren, sollten mittel- bis langfristig automatisierte Ladesysteme zum Einsatz kommen, auch auf dem Betriebshof.

In der hier untersuchten M1-Busgrößenklasse ist derzeit noch das steckerbasierte Laden vorherrschend, da die Fahrzeuge unter den soeben genannten Idealbedingungen verkehren. Die Nachfolgermodelle unterstützen aber bereits induktives und damit automatisiertes Laden. Das bedarf Anpassungen an der Ladeinfrastruktur.

4.1.2 Umgestaltung des Straßenraums

Auf den ersten Blick ähneln sich Kapitel 4.1.2 und 4.1.3. Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit den veränderten Anforderungen der Verkehrsteilnehmer an die Infrastruktur, wohingegen es sich beim Einsatz intelligenter Straßenausstattung im darauffolgenden Kapitel jedoch um konkrete Ausstattungselemente der Straßen handelt.

Dabei ergibt sich bei der „Straße von morgen“ Gestaltungsspielraum, da sie im Rahmen der Ertüchtigung für autonomes Fahren modernisiert werden muss.

Auf der Konferenz South by Southwest im Jahre 2018 diskutierten Experten über die Verkehrsumgebung der Zukunft. Potentiale für den Straßenraum sieht man dort, weil autonome Fahrzeuge mit schmalere Fahrbahnen zurechtkommen werden [Vgl. 126].

Straßeninfrastruktur wird in Deutschland durch die öffentliche Hand finanziert (ausgenommen vereinzelte Public-Private-Partnership-Projekte) und muss daher auch in Zukunft finanziell

abbildbar sein. Der fundamentale Wandel der Infrastruktur wird wegen der baulichen und finanziellen Dimension über Jahrzehnte und in kleinen Schritten erfolgen.

Fraglich ist, wie die Infrastruktur im Stadium des Übergangs von „manuellem“ zu autonomem Fahren genutzt wird. Autonome Busse könnten wie konventionelle Busse Sonderfahrstreifen in den größeren Städten nutzen, sofern sie rechtlich weiterhin dem Öffentlichen Personennahverkehr zugerechnet werden (die kleinen Transportgefäße und die individuellen Fahrtrouten stellen eine Mischung aus Individual- und öffentlichem Verkehr dar). Andernfalls könnte für sie die allgemein diskutierte Bevorrechtigung von Elektrofahrzeugen gelten, die derzeit auch für die Landeshauptstadt Stuttgart erörtert wird [Vgl. 128].

Auch wäre denkbar, gezielt bestehende Fahrstreifen in neue Sonderfahrstreifen für autonome Fahrzeuge umzuwidmen. Dazu bedarf es aber einer kritischen Masse an autonomen Fahrzeugen, dass solch ein Szenario Realität wird [Vgl. 12]. Durch die zuverlässige Markierung solcher Sonderfahrstreifen könnten sich die Sensoren der autonomen Busse in allen drei „Sonderfahrstreifen-Szenarien“ besser orientieren ohne durch manuell gesteuerte Fahrzeuge blockiert zu werden.

Besonders vorteilhaft gestaltet sich die Lage bereits heute in Amsterdam: die Stadt verfügt im Gegensatz zu deutschen Städten bereits heute über die sogenannte BRT-Infrastruktur, die über die in Deutschland bekannten markierten Sonderfahrstreifen (Abbildung 12) hinaus geht. BRT stellt eine bauliche Trennung zum restlichen MIV dar und begünstigt somit den Einsatz autonomer Busse wie in Abbildung 11 ersichtlich. Dabei verkehren die Busse durchgehend auf separat geführten Fahrstreifen [Vgl. 46]. Bei deutschen Sonderfahrstreifen handelt es sich im Regelfall lediglich um einen Fahrstreifen mit durchgezogener Fahrstreifenbegrenzungslinie. Kurz- bis mittelfristig sind separate oder sehr gut markierte (Sonder-)Fahrstreifen für den Betrieb autonomer Busse sinnvoll. Langfristig wird der autonome Fahrbetrieb jedoch per digitaler Spurführung möglich sein, sodass das heutige Muss-Kriterium zum Kann-Kriterium der Zukunft konvertiert. Die durchgängige Fahrbahnmarkierung ist kurzfristig unabdingbar, eine separate Führung auf abmarkierten Sonderfahrstreifen wünschenswert. Kurzfristig kaum umsetzbar, wenn nicht bereits vorhanden, ist die gesonderte BRT-Infrastruktur. Sie stellt bestenfalls langfristig eine wünschenswerte Komponente in deutschen Städten dar. Langfristig wird man auf diese Vorkehrungen jedoch verzichten können, unabhängig von der allgemein gegebenen Sinnhaftigkeit der Bevorrechtigung des ÖV in großen Städten.



Abbildung 11: Baulich getrenntes Bus Rapid Transit-System [29]



Abbildung 12: Abmarkierter Busfahrstreifen [151]

Die sukzessive Modernisierung der Fahrbahndecken sollte unter anderem dazu genutzt werden, Ladeinfrastruktur (Kapitel 4.1.1) auszubauen, in dem ausreichend dimensionierte stromzuführende Kabel verlegt werden. Dies betrifft insbesondere die induktive Ladeform. Darüber hinaus können bei der Modernisierung Sensoren verbaut werden, die den Verkehrsteilnehmern (Mensch und Maschine) mehr Informationen zur Verfügung stellen [Vgl. 12].

Bei der Bewertung der Bestandsinfrastruktur muss unterschieden werden: eine vor Kurzem sanierte Fahrbahn bietet mit neuer, schlaglochfreier Fahrbahn und neuen dazugehörigen Markierungen zwar einen sehr guten baulichen Zustand, allerdings ist für die nächsten Jahre das fahrbahnseitige Integrieren von Sensoren oder Ladeinfrastruktur nicht möglich, sofern bei der Fahrbahnsanierung nicht bereits diese Aspekte des autonomen Fahrens berücksichtigt

wurden. Wohingegen der Straßenoberbau bei Asphaltbauweise (Gussasphalt) durchschnittlich alle 30 Jahre (Herstelleraussage. Praxiswerte können gemäß örtlichen Rahmenbedingungen wie Baugrundbeschaffenheit oder durchschnittlicher täglicher Verkehrsstärke deutlich niedriger sein) [Vgl. 58] erneuert wird, beträgt die mittlere Fahrzeugentwicklungsdauer lediglich 5-7 Jahre [Vgl. 71]. Software- und Sensorkomponenten erneuern sich nochmals schneller. Unter Vernachlässigung der vorgelagerten teils jahrelangen Planungsprozesse kann ein sanierter Straßenoberbau mit einer Liegedauer von bis zu 30 Jahren maximal den Stand der Fahrzeugforschung abbilden, der fahrzeugseitig jedoch frühestens nach sieben Jahren auf die Straßen kommt.

Für die spätere Bewertungsmethode wird unter vereinfachten Annahmen davon ausgegangen, dass in eine in fünf oder mehr Jahren anstehende Fahrbahnsanierung planerisch soweit eingegriffen werden kann, dass punktuell Sensoren oder Ladeinfrastruktur nachgeplant werden können, um den künftigen Ansprüchen für das autonome Fahren gerecht zu werden. Dies stellt den Idealzustand dar, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass bereits heute die Aspekte des autonomen Fahrens bei der Fahrbahnsanierung bedacht werden. Somit ist der Idealfall, dass die Planung vorliegt aber noch beeinflusst werden kann. Auch das britische Ingenieurbüro Arup hat eine wegweisende Idee, wie der Straßenraum der Zukunft aussehen kann: Leuchtdioden, sogenannte FlexKerbs, teilen den Straßenraum über verschiedene Nutzerfarben flexibel zu. Je nach Bedarf können den Verkehrsteilnehmern unterschiedliche Spuren zugewiesen werden: Im Falle eines Smog-Alarmes werden den Verkehrsmitteln des Umweltverbands mehr Spuren zugeteilt, im Falle der morgendlichen Rush-Hour stadteinwärts können kurzfristig stadtauswärts Spuren des Individualverkehrs als Stadteinwärtsspur umgewidmet werden. Dazu werden Sensoren benötigt, die aktuelle Fahrzeugströme erfassen und Dioden, die ihre Farbe ändern [Vgl. 11].

Ein anderes Unternehmen, das amerikanische Startup Integrated Roadways, hat das sogenannte Smart Pavement-System entwickelt. Vorgefertigte Betonmodule enthalten verschiedene Sensoren, die unter anderem Geschwindigkeit, Position oder Gewicht eines Fahrzeugs erfassen. Die Navigation und Verortung soll dadurch verbessert werden. Es bestehen hier jedoch offene Fragen beim Datenschutz [Vgl. 135], [Vgl. 143]. Integrated Roadways beziffert um 95 Prozent niedriger ausfallende Baukosten als bei herkömmlichen Straßen. Die Gesamtbetriebskosten sollen um 80 Prozent sinken. Die Haltbarkeit von Betonstraßen ist höher als die von Asphaltstraßen. Im Falle der Fertigbetonteile soll die Haltbarkeit viermal länger als die einer Asphaltstraße sein [Vgl. 9].

Die Zukunft des autonomen Fahrens sehen vorantreibende Akteure auf den jeweiligen Konferenzen unterschiedlich. Wohingegen ein Automobilist die schmalere Fahrbahnen und wegfallenden Parkplätze durch höhere Effizienz vermutlich weiteren Fahrspuren für autonome Fahrzeuge widmet, sehen Stadtplaner in der effizienteren Nutzung des Straßenraums

Potential für die Rückgewinnung öffentlicher Räume. Die öffentliche Hand muss diesen Interessenskonflikt erkennen und Rahmenbedingungen setzen, um einen gesamtgesellschaftlichen Wohlfahrtsverlust zu verhindern, der durch die nochmals erhebliche Ausweitung des Individualverkehrs einhergehen kann.

Auch mit Blick auf hohe Investitionskosten der aufgezeigten Ideen, liegt das Augenmerk dieser Ausarbeitung nicht auf visionären Ansätzen der Straße der Zukunft, sondern muss sich mit der gegenwartsnahen Straßenausstattung des folgenden Kapitels auseinandersetzen.

4.1.3 Veränderungen der Straßenausstattung

Bislang erfassen und verarbeiten die menschlichen Sinnesorgane die Informationen am Rande der Straße. Die Fahrzeugsysteme in den heutigen Automatisierungsstufen 2 und 3 nach VDA funktionieren mit Kameras oder Radar. Für selbstfahrende Autos sei dies jedoch nicht sicher genug: unter der Überschrift „Daten ersetzen Kameras“ erläutert Siemens, dass sicherheitsrelevante Informationen von Verkehrszeichen, die derzeit noch von Menschen oder Kameras erfasst werden, künftig per Datenübertragung auf das Fahrzeug gelangen müssen. Die Daten müssen dafür so aufbereitet werden, dass Fahrzeuge diese problemlos verarbeiten und bewerten können. Dieses entstehende V2I-Netz ermöglicht, Fahrzeuge über Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbote oder andere bislang über Sinnesorgane und Kameras wahrgenommen Inhalte zu informieren. Intelligente Straßenausstattung stellt diese Daten bereit [Vgl. 77].

Zur Straßenausstattung gehören Verkehrszeichen, Wegweiser, Fahrbahnmarkierungen, Fahrzeugrückhaltesysteme, Lichtzeichenanlagen und Straßenbeleuchtung [Vgl. 57]. Deren Entwicklung von einem rein passiven zu einem aktiven Ausstattungselement wird durch die Integration von Sensorik ermöglicht.

Sensoren können oberirdisch in die Straßenausstattung integriert werden oder unterirdisch in die Fahrbahndecke. Der Einbau in die Fahrbahndecke erfolgt unter Beeinträchtigung des Straßenverkehrs und erfordert Instandhaltung.

Anforderungen an die verbauten Sensoren sind [Vgl. 78]:

- Messung von Position, Geschwindigkeit und Richtung der Verkehrsobjekte. Belastbare Verkehrsdaten setzen Informationen über Position, Geschwindigkeit und Richtung des Verkehrs voraus. Für autonome Busse wird durch Kenntnis dieser Parameter eine zeitlich zutreffende Bevorrechtigung an LSA möglich.
- Funktionsfähigkeit des Sensors unter allen Wetterbedingungen. Ungünstige Situationen wie Dunkelheit, Gegenlicht, Regen, Schnee, Nebel und Staub dürfen nicht zum Systemausfall führen. Eine entsprechende IP-Schutzklasse zur Sicherung von Soft- und Hardware ist vorzusehen. Sie bezeichnet die Hardware-Resistenz gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit oder Schmutz. Die Schutzklasse ist zweistellig; die erste Ziffer beschreibt

den Schutz vor festen Stoffen, die zweite Ziffer den Schutz vor Wasser und ist daher im Verkehrskontext aufgrund des häufigen Tropf-, Spritz-, Strahlwassers am Straßenrand besonders wichtig [Vgl. 28].

- Detektion schneller Objekte über große Entfernungen und breiten Winkel. Je besser ein Sensor das Verkehrsgeschehen vorhersagt, desto frühzeitiger kann im Verkehrsmanagement agiert werden. Fahrzeuge müssen vor der Kreuzung und auch bei hohen Geschwindigkeiten registriert werden. Sensoren müssen unter Umständen mehrere Fahrspuren abdecken, sodass der Öffnungswinkel ausreichend groß sein muss.
- Genauigkeit der Messtechnik. Erst wenn exakte Informationen über die genutzte Fahrspur, die Distanz zum Sensor und die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs vorliegen, kann das System optimiert werden.

Sogenannte Road Side Units (RSU) verteilen die in oder entlang der Infrastruktur gewonnenen Sensordaten anschließend im V2I-Netz und ermöglichen damit Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Infrastruktur [Vgl. 15]. Das Gegenstück zur infrastrukturseitigen RSU ist die fahrzeugseitige On-Board-Unit (OBU), auf die im Weiteren nicht eingegangen wird [Vgl. 59]. RSU senden Daten unterschiedlicher Sensortypen, die ein in sich konsistentes Abbild liefern müssen [Vgl. 112]. Die spezifischen Vor- und Nachteile der einzelnen Sensoren werden durch Datenfusion optimiert. Die Aussagequalität übersteigt somit den heute einfachsten Anwendungsfall der Induktionsschleife um ein Vielfaches.



Abbildung 13: RSU mit Antennenträger des DLR [33]

RSU (Abbildung 13) sind das Bindeglied zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur und sind der Basisdienst aller kooperativen Anwendungen auf der Infrastrukturseite. Sie sind einerseits Infrastrukturkomponenten, die Informationen der Verkehrsinfrastruktur, insbesondere LSA,

empfangen, verarbeiten und den Verkehrsteilnehmern übermitteln und andererseits sind RSU eine Recheneinheit, auf der Applikationen ausgeführt werden. RSU sind somit eine dezentrale Infrastruktureinheit, die die Interaktion zwischen den Elementen ermöglicht. Das bringt nicht nur fahrzeugseitig neue Assistenzfunktionen, sondern vor allen Dingen infrastrukturseitig eine bislang nicht erreichte Regelungs- und Informationstiefe mit sich [Vgl. 49].

Dazu müssen RSU Netzwerkzugang haben [Vgl. 6]. Es handelt sich bei RSU um Funkmodule, die wie die Sensorik an der Straßenausstattung angebracht sind. Jede Einheit ist Sender und Empfänger gleichzeitig. Sie sendet Informationen (z.B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, Glatteis- oder Stauwarnungen) an Fahrzeuge und empfängt Informationen von Fahrzeugen, Umweltdetektoren oder einer Verkehrsleitzentrale [Vgl. 115], [Vgl. 33], [Vgl. 34].

In der kurzfristigeren Sicht ergeben sich zunächst andere Anforderungen. Nach initialer Einspeicherung der vom autonomen Fahrzeug abzufahrenden Route muss sich das Fahrzeug ausfallsicher orientieren können – auch im Falle plötzlich fehlender GPS-Abdeckung. Auf der A 9 gibt es dazu sogenannte Landmarken. Die maschinenlesbaren Schilder ähneln Piktogrammen oder QR-Codes, anhand derer die Fahrzeugortung verbessert wird.

Auch in Bad Birnbach hat man in der Stadt zwei Orientierungstafeln installiert, um die Sicherheit und Ortungsgenauigkeit zu erhöhen. Ein Abgleich der zurückgelegten Strecke erfolgt zudem über Messung der Raddrehzahl unter Berücksichtigung des Radumfangs (2019a).

Der Konzern 3M plant, Straßenausstattung systematisch mit solch maschinenlesbaren Elementen zu versehen. Zudem erhöht dies die Sicherheit, ohne dabei Strom, aufwendige Elektronik oder GPS-Abdeckung zu benötigen [Vgl. 12], [Vgl. 73], [Vgl. 97]. Maschinenlesbare Schilder wie die Landmarken sind für den unmittelbaren Betrieb der ersten autonomen Bus-Testfelder nicht zwingend notwendig. Als Rückfallebene sollten sie perspektivisch jedoch vorgesehen werden.

Landmarken dienen als spätere Grundlage für hochgenaue digitale Karten, die über einen hohen Informationsgehalt mit einer Exaktheit von circa zehn Zentimetern verfügen. Autonome Fahrzeuge werden nicht nur auf neuartige Sensorinformationen der Infrastruktur zurückgreifen, sondern auch auf Informationen aus digitalen Karten. Die Nachteile heutiger Navigationskarten und Sensoren werden mit solch hochgenauen digitalen Karten eliminiert. Live-Events, die eine „statisch“ erfasste Referenzkarte nicht enthält, werden durch Sensoren kurzfristig erfasst. Und die begrenzte Sensor-„Sichtweite“, insbesondere bei großen Hindernissen, wird durch digitale Karten wettgemacht. In Gesamtheit ergänzen sich hochauflösende digitale Referenzkarten und Sensoren ideal [Vgl. 12], [Vgl. 73], [Vgl. 97].

Im Folgenden sollen ausgewählte Anwendungsbeispiele gezeigt werden, die verdeutlichen wie Sensoren die Straßenausstattung revolutionieren:

- Verbesserte Sicht durch Straßenlaternen

Autonomen Fahrzeugen soll die Abwicklung unübersichtlicher Verkehrssituationen erleichtert werden, indem in einem Ulmer Projekt Laternenmasten mit Kameras und Lidar-Sensoren ausgestattet werden und durch jeweils drei Behelfsmasten ergänzt werden, die Referenzmessungen durchführen. Die Sensoren an den Laternenmasten erkennen Objekte, sind über ein Testmobilfunknetz angebunden und liefern die Informationen an eine Datensammelstelle [Vgl. 76].

Parallel dazu untersucht das DLR sicherheitskritische Interaktionssituationen von motorisiertem und nicht-motorisiertem Verkehr, die im Öffentlichen Verkehr häufig zwischen Fußgängern und Bussen auftreten, mithilfe von Sensoren zu erkennen [Vgl. 32]. Das DLR setzt auf den Forschungskreuzungen dazu Monokameras, Stereokameras und Radarsensoren ein.

Die intelligente Straßenlaterne ist insbesondere von Interesse, wenn autonome Busse künftig auch nachts verkehren. Zum heutigen Zeitpunkt ist deren Implementierung jedoch nicht zwingend nötig. Vielmehr können die heutigen fahrzeugseitigen Kamerasysteme kurzfristig durch eine gleichbleibende, zuverlässige Ausleuchtung unterstützt werden. Langfristig sind intelligente Straßenlaternen allerdings vorteilhaft.

- Parkleitsysteme für autonome Busse an komplexen Infrastrukturhubs (Umsteigepunkten, Betriebshöfe u.a.)

Um das Fahrzeug auch autonom an freie Parkplätze zu leiten und Parksuchverkehr zu reduzieren, muss der Bus in Umsteigehubs oder auf Betriebshöfen technisch unterstützt werden.

Insbesondere bei fehlender Fahrbahnmarkierung (Kapitel 4.1.2) und möglicherweise kreuzendem Verkehr erschwert sich die Orientierung für autonome Fahrzeuge. Ein Feldversuch an Mautstationen (Abbildung 14) hat aufgezeigt, dass für solche Sonderinfrastrukturen (auch Busbetriebshöfe, Umsteigehubs) spezifische Kommunikationsprotokolle benötigt werden. Bis 500 Meter vor dem Sonderobjekt agiert das Fahrzeug autonom. Erst mit Eintritt in den RSU-Empfangsbereich (orange) operiert ein RSU-basiertes Leitsystem, welches das Fahrzeug über eine zuvor aufgezeichnete Spur durch die Infrastruktur lotst und mittels RSU-Antenne überwacht. Dieses RSU-Leitsystem unterstützt das Fahrzeug auch nach Verlassen der Sonderinfrastruktur im 500m-Radius bzw. bis zur nächsten regulären Fahrbahnmarkierung. Schranken können durch Bevorrechtigungsmodule wie bei der heutigen LSA-ÖV-Bevorrechtigung betätigt werden [Vgl. 109].

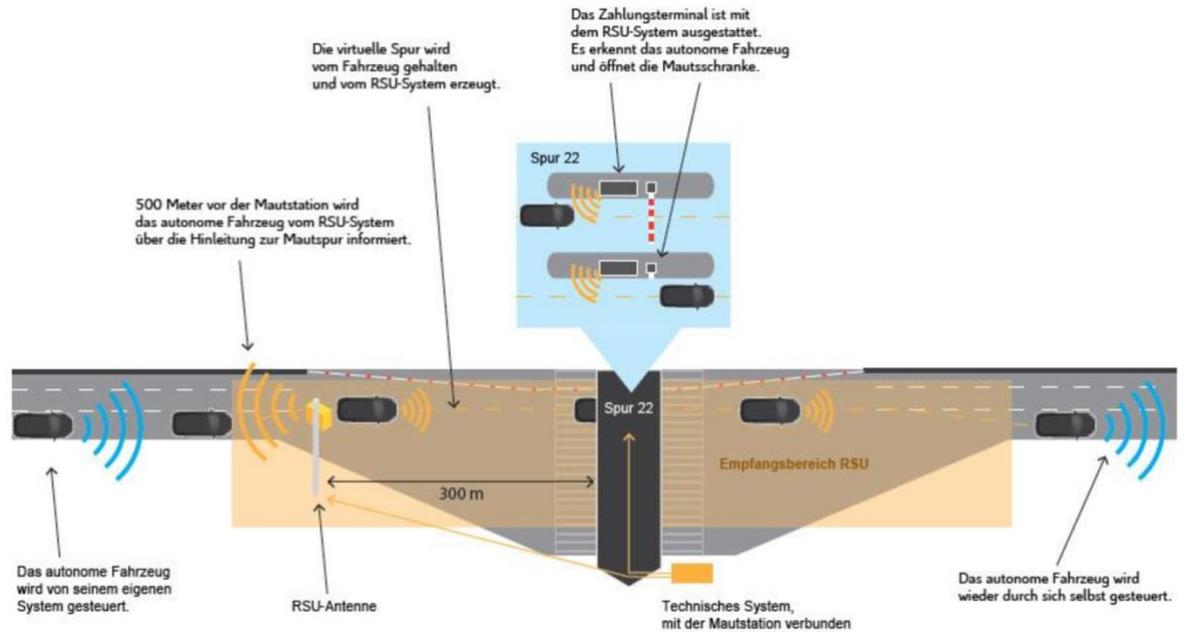


Abbildung 14: Leitsysteme für Sonderinfrastruktur [109]

Mit Blick auf die Parkleitsysteme unterscheidet man die direkte und die indirekte Belegungserfassung. Bei der direkten Erfassung wird jeder Standplatz einzeln mit Sensoren ausgestattet. Eine Belegungskontrolle der einzelnen Standplätze ist ohne Weiteres möglich (vgl. Abbildung 15)

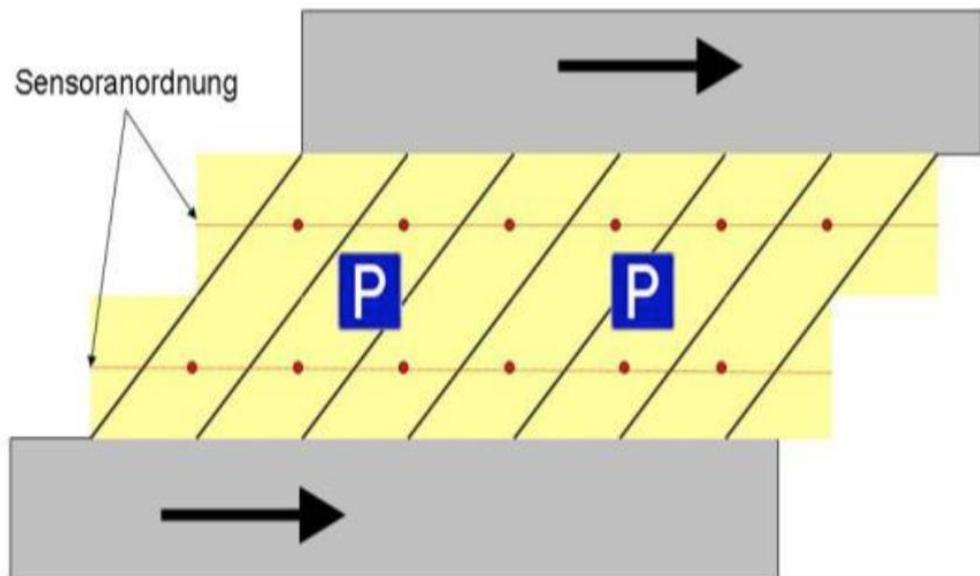


Abbildung 15: Direkte Belegungserfassung Parkleitsystem [10]

Die indirekte Belegungserfassung (vgl. Abbildung 16) umfasst weniger Sensoren, da lediglich der Saldo aus einfahrenden und ausfahrenden Fahrzeugen gebildet wird.

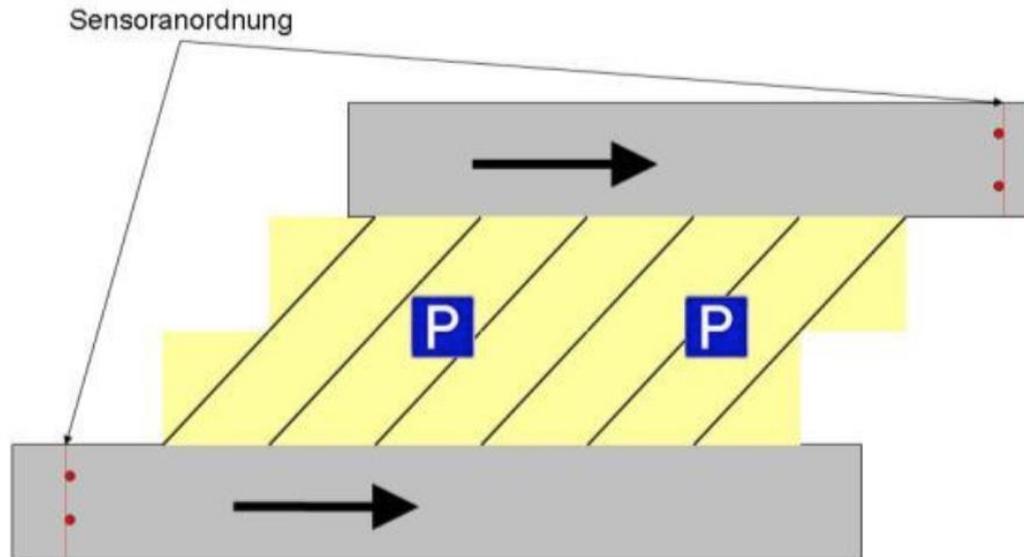


Abbildung 16: Indirekte Belegungserfassung Parkleitsystem [10]

Es können Aussagen über die Parkplatzverfügbarkeit getroffen werden, nicht aber über deren Lage im Betrachtungsraum [Vgl. 10].

Dieses Fallbeispiel ist spätestens von Relevanz, sobald die autonomen Busse in den regulären Betrieb eines Verkehrsunternehmens übernommen werden und Teil des normalen Betriebshofs sind, auf dem Schrankenberechtigungen für die Busse vergeben werden und diese sich selbstständig Parkplätze suchen müssen. Kurzfristig sind keine gesonderten Vorkehrungen zu treffen – die Fahrzeuge der Testfelder verkehren auf fest einprogrammierten Routen, die solche Sonderinfrastrukturen im Regelfall nicht beinhalten bzw. deren Passage im Rahmen der Vorplanung planerisch ausgeschlossen wird. Im Umkehrschluss sollte bei der Etablierung neuer Testfelder darauf geachtet werden, dass Sonderinfrastruktur nicht bedient wird und dafür gesonderte Systeme notwendig sind. Mittel- bis langfristig sind solche Leitsysteme unumgänglich, kurzfristig lediglich wünschenswert.

Neben der Ausstattung der Straßen mit Sensorik müssen konkrete Anforderungen der Verkehrsinfrastruktur und deren direkte Umgebung erfüllt sein:

- Die Straßenausstattung muss im Bedarfsfall schnell und flexibel implementiert und finanziert werden. Ein eigener Baubetriebshof, kurze Dienstwege durch die eigene Baulastträgerschaft (bei Gemeindestraßen zutreffend, da die Gemeinde für die Finanzierung selbiger zuständig ist) und ein verlässlicher Gemeindehaushalt bei unterdurchschnittlicher kommunaler Schuldenlast erleichtern die Umsetzung eines autonomen Bustestfelds.

- Die Straßenausstattung muss künftig häufiger gewartet, inspiziert und instandgehalten werden. Durchgängigkeit, Standardisierung und Konsistenz müssen regelmäßig geprüft werden: das Fehlen von Schildern, doppelte oder gar widersprüchliche Informationen und unterschiedliche Beschilderungsstandards erschweren das autonome Fahren und führen im heutigen Falle noch zum Systemausfall, sodass der menschliche Fahrer eingreifen muss.

Die Nutz- und Lesbarkeit für Mensch und Maschine muss insbesondere im Übergangsstadium gewährleistet sein. Der Fahrbahndeckenzustand muss kontinuierlich begutachtet werden. Fehlerhafte Fahrbahnmarkierungen sind schnell zu erkennen und auszubessern. Nicht zuletzt muss die Infrastruktur wegen der Gefahr externer Angriffe (Vandalismus und Manipulation) überprüft werden [Vgl. 126], [Vgl. 138]. Lokale Schwerpunkte, die in der Vergangenheit durch Vandalismus auffielen, sind im Testfeldbetrieb zu vermeiden. (Neben dem Schutz vor Angriffen auf die Infrastruktur können auf diese Weise auch die Fahrzeuge vor Angriffen geschützt werden. Eine nächtliche Unterbringung der Fahrzeuge in geschlossenen Hallen ist empfehlenswert.)

Eine intakte Straßenausstattung ist insbesondere kurzfristig für die heutigen Testfelder relevant, da die kamerabasiert agierenden Fahrzeuge auf eine intakte Umgebung angewiesen sind. Auch langfristig ist eine häufige Überprüfung der Infrastruktur unabdingbar.

- Die Straßenführung sollte standardisierten Grundsätzen entsprechen: die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) veröffentlicht diese beispielsweise in den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), in den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) oder in den Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) und definiert dort jeweils gültige bundeseinheitliche Regelquerschnitte (RQ) von Fahrbahnen.
- Die Fahrgeschwindigkeiten der autonomen Busse und des klassischen Verkehrs sollten nicht zu stark differieren, um Unfälle zu vermeiden. Wohingegen innerorts mit Bestandsgeschwindigkeiten von 30 – 50 km/h und autonomen Fahrgeschwindigkeiten von 15 – 30 km/h kaum Differenzen auftreten, sind die Geschwindigkeitsdifferenzen außerorts höher. Aus Bad Birnbacher Sicht ist eine Anpassung der Maximalgeschwindigkeit auf beispielsweise 30 km/h sinnvoll (2019a).
- Die Straßenausstattung, insbesondere LSA, müssen konsequent modernisiert werden [Vgl. 138]. Die LSA besteht neben dem direkt ersichtlichen Signalgeber und der Sensorik (Taster und Induktionsschleifen) auch aus Steuergerät und

Verkehrsrechner. Letztere weisen heute noch ein hohes durchschnittliches Alter von bis zu 25 Jahren auf und stammen aus einer aus informationstechnischer Sicht überholten Ära. Sie sind nicht netzwerkfähig oder in der Lage, verkehrsabhängig Grünphasen zuzuteilen bzw. dezentral Öffentlichen Verkehr zu bevorzugen [Vgl. 50], [Vgl. 121]. LSA müssen für OCIT-Schnittstellen (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) ertüchtigt werden, die eine standardisierte Verbindung zwischen zentralen und dezentralen Komponenten darstellt. Mit OCIT werden bislang Schnittstellen definiert, die Systemarchitektur, Regeln, Protokolle und Funktionen betreffen [Vgl. 99].

LSA sind kostenintensiv und werden sukzessive umgerüstet. Erste umgerüstete LSA mit modernen Verkehrsrechnern sind in der kurzfristigen Sicht vorteilhaft, deuten auf eine positive Veränderungsbereitschaft hin, lassen sich gut in moderne Verkehrsleitzentralen zwecks Verkehrssteuerung einbinden, sind aber nicht zwingend notwendig. Langfristig sollte gar unabhängig vom autonomen Fahren eine modernisierte LSA-Infrastruktur angestrebt werden. Bevorzugen von Fahrzeugen des Öffentlichen Verkehrs und flexible bzw. nachfrageangepasste Grünphasenzuteilungen werden somit möglich.

- Durchgehende, wenn möglich reflektierende und kontrastreiche Fahrbahnmarkierungen, sodass fahrzeugseitige Systeme in ihrer Umfeldwahrnehmung unterstützt werden [Vgl. 138]. Reguläre Fahrbahnbegrenzungslinien sind in Deutschland standardmäßig weiß, im Baustellenbereich gelb. Beton bietet mit hellgrau einen schwächeren Kontrast als der dunkelgraue Asphalt. Pflasteroberbau ist für den Einsatz autonomer Busse zwar prinzipiell geeignet (2019a), hat jedoch lärmtechnische Nachteile und bietet im Vergleich den schlechtesten Kontrast zu den Fahrbahnmarkierungen.

Kurzfristig ist die Durchgängigkeit unabdingbar und die Reflektierfähigkeit wünschenswert. Auf die Durchgängigkeit ist insbesondere in verkehrsberuhigten Bereichen zu achten, in denen heutzutage stadtplanerisch Fußgängerwege und Straßenwege gestalterisch ineinanderfließen und optisch bewusst schwer voneinander zu differenzieren sind, um die Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer zu reduzieren. In diesem Falle muss nach Bad Birnbacher Erfahrung z.B. eine gelbe Baustellenfahrbahnmarkierung angebracht werden, um die Eindeutigkeit der Situation für die Fahrzeugsensorik herzustellen (2019a).

In Bezug auf kontrast- und reflektionsreiche Fahrbahnbeläge bietet Asphalt eine bessere Kamerawahrnehmbarkeit. Langfristig werden hochgenaue digitale Karten, GPS und 5G-Internet dazu führen, dass die Fahrbahnmarkierung nicht mehr zwingend vorhanden sein muss. Dann kann perspektivisch auf „digitalen Spuren“ gefahren werden [Vgl. 106].

- Durch die herstellerabhängige Fahrzeughöhe von rund 2,70-2,80m (Maximalhöhe nach §32 Abs. 2 S.1 StVZO beträgt 4,00m) muss die Durchfahrtshöhe in Unterführungen, also beispielsweise unter Brücken, mindestens 3,20m betragen. Unter Umständen muss somit eine vorhandene Fahrbahn tiefergelegt werden oder eine Alternativroute ohne Unterführung gewählt werden (2019a).
- Im Bad Birnbacher Testfeld musste zudem auf Hilfs- und Leitlinien in Kreuzungsbereichen für die autonomen Busse geachtet werden (2019a). Dabei handelt es sich um eine kurz- bis mittelfristige Anforderung, da die Fahrzeuge langfristig digitalen Spuren folgen.
- Reflektierende Schutzeinrichtungen (Fahrzeugrückhaltesysteme, Leitpfosten u.a) [Vgl. 23]. Kurzfristig wird die Infrastruktur standardmäßig keine reflektierenden Schutzeinrichtungen enthalten. Dennoch ist die Erprobung einzelner Komponenten wünschenswert. Langfristig sollten die Schutzeinrichtungen den genannten Anforderungen entsprechen.
- Verkehrszeichen mit optimierter Positionierung: frontale Positionierung zur Fahrbahn, im hindernisfreien Sichtfeld von der Fahrbahn aus gesehen, schmutzabweisende Oberflächen und mit Abstand zu Grünbewuchs [Vgl. 138]. Deren Einhaltung, Instandhaltung und Überprüfung muss in regelmäßigen Abständen erfolgen.
Diese Anforderung muss kurzfristig zwingend umgesetzt sein.
- Ausreichend große Quer- bzw. Längsparkplätze an den Seiten, sofern diese vorhanden sind. „Wildparker“ und über die Parkmarkierung abgestellte Fahrzeuge bringen autonome Fahrzeuge der aktuellen Entwicklungsstufe nach Bad Birnbacher Erfahrungswerten zum Stillstand, da diese die parkenden Fahrzeuge als Hindernis registrieren (2019a).
- Ebenheit der Fahrbahnoberfläche sicherstellen, insbesondere Schlaglöchern beseitigen. Ansonsten detektieren Sensoren Gefahrenstellen, die das Fahrzeug umgehend zum Stillstand bringen. Die intakte Fahrbahndecke hat darüber hinaus lärmtechnische Vorteile, da Reifen und Stoßgeräusche reduziert werden [Vgl. 138]. Die Instandhaltung kleinerer Schäden ist bei Asphaltbauweise im Allgemeinen schneller als bei Beton, insbesondere wenn

Gussasphalt verwendet wird. Die Fahrbahn kann in kürzester Zeit nach den Ausbesserungsarbeiten wieder freigegeben werden.

Ausgebesserte Stellen stellen gemäß Expertenaussage im Bad Birnbacher Testfeld kein Probleme dar (2019a).

- Aufstellen von Warnbeschilderung, die auf den Betrieb von autonomen Fahrzeugen hinweist und die übrigen Verkehrsteilnehmer zur Wachsamkeit aufruft (2019a). Unterstützend können die im folgenden Bild in schwarz-gelb ersichtlichen sogenannte Rüttelschwellen angebracht werden, die die Geschwindigkeit des restlichen Individualverkehrs auf das gewünschte Maß reduziert [Vgl. 31]:



Abbildung 17: Beschilderung und Rüttelschwelle im Testfeld Bad Birnbach [31]

- Wildfangzäune an anbaufreien Straßen (abseits von Wohnbebauung), um abrupte Manöver durch querendes Wild zu vermeiden und die Komplexität der Verkehrssituationen zu reduzieren [Vgl. 138].
Die Zäune sind kurzfristig zu installieren, falls es sich um eine anbaufreie Straße handelt.

4.1.4 Erweiterung der Verkehrsleitzentralen

Heutige Verkehrsleitzentralen wie die Integrierte Verkehrsleitzentrale (IVLZ) in Stuttgart können steuernd in den Verkehrsablauf eingreifen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit

Fragestellungen des Verkehrsmanagements [Vgl. 122]. Die informationstechnische Sicht auf IVLZ findet sich in Kapitel 4.2.1.

Die IVLZ informiert über Rundfunk, greift im Individual- und im Öffentlichen Verkehr in LSA-Steuerungen ein, hat Zugriff auf digitale Wegweiser und digitale Parkleitsysteme. Damit kann aktiv auf den Verkehr Einfluss genommen werden [Vgl. 122].

Durch die räumliche Nähe verschiedener Akteure in solch einer integrierten Zentrale ist eine schnelle Kommunikation möglich, sodass Probleme auch im Voraus erkannt und gelöst werden können.

In der Stuttgarter IVLZ sitzen mehrere Partner unter einem Dach: das Amt für öffentliche Ordnung der Stadt Stuttgart, das Stuttgarter Tiefbauamt, die Stuttgarter Straßenbahnen AG und das Polizeipräsidium Stuttgart. Darüber hinaus finden sich die Leitstelle von Feuerwehr und Rettungsdienst sowie der Führungs- und Verwaltungsstab der Landeshauptstadt in dem Gebäude [Vgl. 123].

Wie sieht aber die Rolle einer IVLZ aus, wenn autonome Fahrzeuge, darunter auch autonome Busse, das Stadtbild verändern?

Städte und Autobahndirektionen werden auch weiterhin die Daten erheben, verwalten und Verkehrsströme lenken wollen, da es sich dabei um hoheitliche Aufgaben der öffentlichen Hand handelt. Verkehrsunternehmen werden sich intensiv beteiligen müssen, um den Anschluss sinnbildlich nicht zu verpassen und ihr Angebot attraktiv halten zu können [Vgl. 77]. Parallel zur Automatisierung des Fahrbetriebs von Bussen werden vermutlich neue Arbeitsplätze entstehen, die der Überwachung autonomer Fahrzeuge, zumindest autonomer Busse, dienen. Dennoch ist unklar, ob rechtliche Vorgaben eine menschliche Rückfallebene erfordern werden und ob autonome Busse dem IV oder dem ÖV zugerechnet werden. Eine menschliche Rückfallebene durch Überwachungszentralen wie heutige IVLZ ist zu prüfen [Vgl. 90]:

Die Situationen, in denen ein autonomes Fahrzeug auf externe zentrale Informationen zugreift, erfordern auch in einigen Jahren noch einen menschlichen Gegenpart auf Infrastrukturseite, der über eine Verkehrsleitzentrale aggregierte Informationen kontrolliert [Vgl. 138]. Künftig wird es sich dabei um ein breiteres und verändertes Aufgabenspektrum handeln. Die IVLZ ist prädestiniert, die Funktion einer neutralen Datendrehscheibe im Sinne des Kapitels 4.2.1 zu übernehmen.

Über die Notwendigkeit von Verkehrsleitzentralen in der Zukunft sind sich die Literaturquellen im Allgemeinen nicht einig [Vgl. 17] – sie können bedeutungslos werden, wenn Fahrzeuge selbststeuernd auf keine externen Informationsquellen mehr angewiesen sind. Sie können bei selbiger Argumentationskette weiterhin bedeutsam sein, weil die selbststeuernden Fahrzeuge kontrolliert werden müssen. Unabhängig davon werden Verkehrszentralen weiterhin von

Bedeutung sein, wenn die Politik deren strategische Bedeutung, insbesondere bei der Wahrung hoheitlicher Aufgaben, erkennt. Dazu muss sich die Politik kontinuierlich und rechtzeitig in Entscheidungsprozesse einbringen und Rahmenbedingungen setzen, sodass der Markt nicht Dritten überlassen wird.

Zwei einfache Gedankenspiele zeigen, dass das Setzen von Rahmenbedingungen durch die öffentliche Hand wichtig ist, da rein privatwirtschaftlich getriebene Ansätze zu gesellschaftlich unerwünschten Effekten führen können:

1. Nach individuellen Gesichtspunkten möchte jeder Verkehrsteilnehmer unter Zuhilfenahme eines Navigationssystems schnellstmöglich an sein Ziel gelangen. Durch die Integration von Echtzeitdaten können Baustellen und Staus umfahren werden, indem Navigationssysteme (vermeintliche) Abkürzungen mitten durch Wohngebiete und sensible Innenstadtbereiche vorschlagen, die nach kurzer Zeit überlastet sind. Gesellschaftlich und volkswirtschaftlich ist dieser Effekt unerwünscht. In einer Studie wurde die Routenplanung einer Taxiflotte einer Verkehrsleitzentrale überlassen. Ergebnis: im Durchschnitt verbrachten alle Teilnehmer weniger Zeit im Fahrzeug. Die zuverlässige Steuerung der Fahrzeuge dürfte künftiger einfacher werden, da autonome Fahrzeuge den infrastrukturseitigen Empfehlungen (Nutzen der Alternativroute oder Verbleiben auf der aktuellen Straße) folgen werden. Der Befolgungsgrad heutiger zur Verfügung gestellter Informationen durch den Menschen über dynamische Wechselwegweiser ist hingegen gering. Dieses Beispiel zeigt auf, dass die öffentliche Hand die Verkehrssteuerung keinen privaten Anbietern (z.B. Google, Apple, Tesla o.ä.) überlassen darf, sondern durch hoheitliche und damit neutrale Verkehrsleitzentralen Rahmenbedingungen setzen muss, um ein gesamtgesellschaftliches Optimum zu erreichen [Vgl. 111].
2. Autonomes Fahren ermöglicht es, die Reisezeit für private Zwecke zu nutzen. Bislang war dieses Alleinstellungsmerkmal dem Öffentlichen Verkehr vorbehalten. Chauffeurdienstleistungen werden künftig durch den Entfall eines Chauffeurs beim autonomen Fahren für die gesamte Gesellschaft erschwinglich [Vgl. 77]. Das stressfreiere Vorankommen von A nach B führt zu mehr, also induziertem Verkehr im Individualverkehr und stellt die Sinnhaftigkeit des bisherigen Öffentlichen Verkehrs infrage. Ohne Bekenntnis der Politik zum Öffentlichen Verkehr könnte dieser in Zukunft überflüssig werden, da dessen Kernvorteil durch den Individualverkehr adaptiert wird. Die Folge könnten privatwirtschaftlich organisierte autonome Fahrzeugflotten sein, die das Stadtbild beherrschen und zu einem deutlichen Zuwachs des Straßenverkehrs führen. Fahrzeugbesetzungsgrade unter 1,0 – noch niedriger als heute – wären möglich. Ältere Menschen oder führerscheinlose Gruppen wie Kinder könnten sich autonome Fahrzeuge vor die Haustüre bestellen. Zwei von vier Wegen würden als

Zubringerdienst demnach als Leerfahrt durchgeführt, sofern in der Zukunft keine erhöhte Bereitschaft zu Sharing besteht. Daher ist es unabdingbar, dass selbstfahrende Fahrzeuge auch im Öffentlichen Verkehr erprobt und rechtzeitig eingesetzt werden, um einem Verkehrsinfarkt vorbeugen zu können [Vgl. 77].

Durch Anreizsetzung und Kontrollmechanismen der öffentlichen Hand kann das unkontrollierte Wachstum autonomer Fahrzeugflotten vermieden werden: beispielsweise mittels einer IVLZ.

Es ist ersichtlich, dass die Entwicklung bei autonomen Fahrzeugen ohne politische Rahmenbedingungen durch die Privatwirtschaft gelenkt wird. Wenn die öffentliche Hand auch weiterhin ihren hoheitlichen Überwachungs- und Ordnungsaufgaben auf öffentlichen Straßen [Vgl. 153] nachkommen will, müssen die IVLZ wie die Verkehrsleitzentrale in Dresden modernisiert werden und neue Schnittstellen unterstützt werden, sodass mit der rasanten Entwicklung am Fahrzeugmarkt Schritt gehalten werden kann. Wie in Kapitel 4.1.3 ausführlich beschrieben, wird die Infrastruktur beispielsweise perspektivisch über mehr netzwerkfähige Komponenten, z.B. RSU, verfügen, die infrastrukturseitig ebenso auf die Weiterentwicklung der IVLZ angewiesen sind.

4.2 Anforderungen an die IT-Infrastruktur

Die Herausforderung des autonomen Fahrens besteht nicht nur in der Sammlung großer Datenmengen, sondern auch in deren sinnvoller Verarbeitung, Filterung und dem Austausch dieser Informationen. Es bedarf schnellerer, noch zuverlässigerer Übertragungstechnik und einer schnelleren Anbindung der infrastrukturseitigen Backend-Systeme. Darüber hinaus müssen sicherheitsrelevante Anforderungen erfüllt werden.

Im Gegensatz zur Verkehrsinfrastruktur entwickelt sich die Informationstechnik schnell. Die IT-Infrastruktur hat jedoch weiterhin die Charakteristika der Infrastruktur, weswegen Entscheidungen weitreichender Natur sind: sie sind teuer, über längere Zeit bindend und in ihrer Vorbereitung komplex. Gute Gründe, sich mit den Anforderungen der IT-Infrastruktur in Kapitel 4.2 auseinanderzusetzen.

4.2.1 Etablierung von cloudbasierten Plattformen

Neben den verschiedenen Bestrebungen mehr Sensorik in Fahrzeuge und neuerdings auch in Infrastruktur zu integrieren, kommen Informationstechnik und intelligenter Datenverarbeitung besondere Bedeutung zu [Vgl. 73].

Die in diesem Kapitel betrachteten Plattformen dienen der Verarbeitung der empfangenen Rohdaten. Verarbeitende Schritte stellen beispielsweise die Speicherung, die Filterung, die Fusionierung und anschließende Umstrukturierung der Daten dar. Denn große Datenmengen führen nicht automatisch zu sehr guten Ergebnissen sondern erst, wenn sie passend

verarbeitet werden indem die Informationen strukturiert und deren Dichte auf das notwendige Maß reduziert werden [Vgl. 113].

Unter einer in der Überschrift genannten cloudbasierten Plattform, auch unter dem Oberbegriff Cloud Computing zu finden, wird ein internetbasierter, ggf. über mehrere Standorte verteilter Server verstanden. Dieser stellt IT-Infrastruktur wie Rechenleistung oder Speicherplatz zentral zur Verfügung und vermeidet somit viele dezentrale, also lokale Elemente. Um keinen Unterschied beim Prozessablauf zwischen dezentral und zentral bereitgestellten Diensten zu merken, muss die Datenübertragung hohe Bandbreiten unterstützen [Vgl. 93]. Näheres dazu findet sich im folgenden Kapitel 4.2.2.

Der Betrieb der komplexen IT-Systemlandschaft mit all seinen oben beschriebenen notwendigen Verarbeitungsschritten erfordert eine hohe Rechenleistung, die in (dezentralen) Fahrzeugen begrenzt und in einer (zentralen) Cloud deutlich höher ist [Vgl. 71]. Allgemeiner formuliert bedarf es leistungsfähigster Soft- und Hardware, um Prozesse abzuwickeln, die beim manuellen Fahren bislang nebensächlich erschienen [Vgl. 124], [Vgl. 113].

Die Anforderungen für die verarbeitende Infrastruktur in puncto Rechenleistung oder Übertragungsgeschwindigkeit sind hoch: die Sensordaten aus fahrzeug- und infrastrukturseitigen Quellen müssen in Millisekunden aufgenommen, verarbeitet und verteilt werden. Die Fahrzeuge konstruieren daraus ein Umgebungsmodell, das über die Ausführung von Fahrmanövern entscheidet [Vgl. 76]. Die Daten werden kontinuierlich und dynamisch erhoben, da die Fahrzeuge und die Infrastruktur permanent veränderten Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind, die aus verschiedenen Sensordaten zu interpretieren und zu „verstehen“ sind [Vgl. 73].

Neben der Sicherstellung von IT-Sicherheitsaspekten müssen zentrale Systeme eine hohe Verfügbarkeit ausweisen. Diesen Anforderungen kommt bei zentralen Systemen eine Sonderrolle zu, da der Ausfall eines zentralen Systems Auswirkungen auf das gesamte Umfeld hat und der Ausfall eines dezentralen Elements lediglich lokale Auswirkungen [Vgl. 71].

Verallgemeinert stellt die Cloud das Zentrum der IT-Landschaft, im Anwendungsfall das sogenannte zentrale Backend-System dar. Das Backend-System ist Datendrehscheibe und steht in Interaktion mit anderen Datenquellen. Dazu zählen Content-Provider, die Infrastrukturinformationen bereitstellen bzw. austauschen. Das Hauptaugenmerk dieser Ausarbeitung liegt auf der Infrastrukturinformationen dieser Content-Provider. Deren Weiterentwicklung ist kontinuierlich voranzutreiben. Die anderen in Abbildung 18 genannten Quellen (Frontends) wie fahrzeugseitige Quellen, Smartphone-Apps oder Web-Portale werden in dieser Ausarbeitung nicht weiter betrachtet [Vgl. 71].

Abbildung 18 zeigt die fahrzeugherstellerseitige Sicht auf die IT-Infrastruktur, die einen guten Einblick in die Struktur und Wichtigkeit der IT-Systemlandschaft gibt.



Abbildung 18: Die Cloud als Datendrehzscheibe [mit Änderungen entnommen aus 71]

Content-Providerdienste spielen beispielsweise beim Bereitstellen von **hochgenauen digitalen Karten** eine wichtige Rolle: Endnutzern können bereits heute auf Kartenmaterialien aus einem zentralen Rechner zugreifen. Diese zentralen Systeme werden in Zukunft durch die Verschmelzung von fahrzeugseitigen und infrastrukturseitigen Daten hohe Aktualität und maximale Informationsdichte bieten. Die aggregierten, selektierten Daten werden in

kompakten Bündeln an Fahrzeuge gesendet. Durch Bereitstellung der geometrischen Bestandsdaten kann das Datenvolumen reduziert werden [Vgl. 106], [Vgl. 138].

Diese neutralen Zentralplattformen müssen hochgenaue, fahrspurbezogene digitale Karten enthalten, die die vorhandene Infrastruktur aktuell abbilden und das heutige Qualitätsmaß übersteigen. Heutzutage sind tagesaktuelle Baustellen nicht durch das abgerufene Kartenmaterial abgebildet, da die Kartendaten nur in mehrjährigen Zyklen im Rahmen von Gebietsüberflügen erhoben werden. Die zentral gesteuerten hochgenauen digitalen Karten werden hingegen tagesaktuelle Baustellen und weitere Informationen enthalten [Vgl. 138].

Die Baulastträger verfügen heutzutage aufgrund mangelnder deutschlandweiter Vorgaben über keine einheitlichen digitalen geometrischen Daten oder raumcharakteristische Daten ihres Zuständigkeitsgebiets, sodass Daten nur schwer über vereinheitlichte Schnittstellen ausgetauscht werden können. Unabhängig davon beginnt die Industrie mit der Er- und Bereitstellung solcher hochauflösender Karten [Vgl. 106].

Im Falle eines Ulmer Pilotprojekts besteht die dafür notwendige verarbeitende Infrastruktur aus einem sogenannten lokalen Multi-Access-Edge Computing-Server, der über das 4G-Mobilfunknetz mit Infrastruktur- und Fahrzeugsensorik vernetzt ist. Sensordaten werden fusioniert und mit Daten hochgenauer digitaler Karten aus einem Cloudserver abgeglichen. In Überlappung ergibt sich ein Umgebungsmodell, das dem Fahrzeug in Millisekunden übermittelt wird [Vgl. 76].

Diese cloudbasierten hochgenauen digitalen Karten sind notwendig, da sämtliche Fahrzeugentscheidungen auf Basis der genauen aktuellen Position getroffen werden. Satellitengestützte Verfahren wie das heute eingesetzte GPS liefern mit einer Varianz von mehreren Metern keine ausreichend genaue Daten zur Positionsbestimmung, insbesondere in Häuserschluchten, Fußgängerzonen, Parkhäusern, Tunneln oder anderen Bereichen schlechter GPS-Abdeckung. In Häuserschluchten führen beispielsweise Reflektionen des Signals zur Vortäuschung eines falschen Standorts – fatal für autonome Fahrzeuge und deren ortungsbasierte Einleitung von Fahrmanövern. Ein Vorab-Test der lokalen GPS-Abdeckung ist zwingend erforderlich. Dies kann bequem über eine Applikation auf jedem Smartphone überprüft werden: dort werden die am Himmel sichtbaren Satelliten und damit die GPS-Empfangsqualität ermittelt [Vgl. 53], [Vgl. 70]. Der GPS-Empfang kann durch verschiedene Effekte gestört sein:

- Störungen im „Nahbereich“ durch magnetische Störungen [Vgl. 82]:
 - Illegaler Funk
 - Illegale Telemetrie
 - Jamming
- Störungen im „Nahbereich“ durch fehlerhafte Antenneninstallation [Vgl. 82], [Vgl. 70]:
 - Anbau innen

- Position zu tief
- Position im Schatten anderen Bauteile/-werke, sodass keine freie Sichtverbindung zwischen GPS-Antenne und Satelliten existiert
- Nähe zu anderen Antennen

Es können weitere Fehler wie Satellitenfehler, atmosphärische Fehler (Eis, Nebel u.a), Signalreflektionen (an der Erdoberfläche oder in Häuserschluchten u.a), Uhrenfehler beim Empfänger oder Transformationsfehler auftreten. Die Satellitenfehler können jedoch durch Korrektursysteme wie geostationäre Satelliten, die ihre Position zur Erde nicht ändern und Korrektursignale senden können, reduziert. Damit erreichen alle erdnahen Endgeräte Genauigkeiten von wenigen Metern [Vgl. 85].

Da Maschinen mehr Informationen als Menschen gleichzeitig verarbeiten können, werden hochgenaue digitale Karten für autonomes Fahren auch über mehr Informationen verfügen. Es werden Informationen über Spurverläufe, Fahrbahnbreiten, Verkehrszeichenstandorte oder LSA verfügbar sein [Vgl. 73]. Die enorme Datendichte produziert ein dreidimensionales Abbild der Welt, das mit den klassischen Karten nichts mehr zu tun hat. Darüber hinaus aktualisieren die Fahrzeuge die Karten im Rahmen des Regelbetriebs kontinuierlich, da abweichende Daten in der Realität in die Karte zurückgesendet werden. Nach der initialen Erfassung der Strecke verbessern autonome Fahrzeuge Kartendaten also selbstständig; durch den Entfall manueller Nacharbeit scheint dieser Lösungsansatz praxistauglich [Vgl. 113].

Im Fahrzeugverbund ergeben sich damit entscheidende Vorteile: die Fahrzeugsoftware gleicht kartografische Angaben mit dynamischen Live-Informationen ab und kann virtuell den Straßenverlauf einige Hunderte Meter bis Kilometer vorhersagen [Vgl. 125]. Dies verringert das Unfallrisiko.

Neben dem Content-Providing von hochgenauen digitalen Karten handelt es sich bei der Bereitstellung von **Verkehrsinformationen auf dem Mobilitätsdatenmarktplatz** um einen weiteren Anwendungsfall.

Für autonomes Fahren ist eine Steigerung der Qualität der Verkehrsinformationen nötig. Die Anforderungen an Verkehrsinformationen umfassen Integrität, Aktualität und Genauigkeit. Spätestens im Stadium des vollautomatisierten Fahrens müssen digitale Verkehrsinformationen übergreifend vernetzt sein [Vgl. 138]. Privatwirtschaftlich getriebene Plattformen können die Anforderungen an Verkehrsinformationen durch ihr wettbewerbles Interesse nicht sicherstellen. Dazu bedarf es einer herstellerunabhängigen, neutralen Plattform.

Verkehrsinformationen sind u.a Geschwindigkeitsbegrenzungen, Stauinformationen, Baustellen, temporäre Seitenstreifenfreigabe, Wetterdaten wie Eisglätte, LSA-Grünphasenverteilung oder WVZ-Informationen [Vgl. 138].

Im Rahmen des Digitalen Testfelds Autobahn (DTA) werden auf dem sogenannten Mobilitätsdatenmarkt (MDM) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Mobilitätsdaten für die Nutzer des Testfelds aufbereitet und für alle Teilnehmer verfügbar gemacht [Vgl. 23]. Es handelt sich beim MDM um ein zentrales Online-Portal, das Zugang für die öffentliche Hand und private Dienstleister bietet und neue Möglichkeiten für das Verkehrsmanagement eröffnet [Vgl. 24].

Open Data sollten dort durch neutrale Institutionen ohne Gewinnerzielungsabsicht bereitgestellt werden. Informationen müssen standardisiert und diskriminierungsfrei – also ohne Nutzergruppen zu benachteiligen - zur Verfügung gestellt werden. Die genannten Charakteristika prädestinieren die öffentliche Hand zur Übernahme solcher Funktionen.

Die BASt ist für Deutschland inzwischen die sogenannte „Nationale Stelle für Verkehrsdaten“. Sie soll im Sinne des EU-Rechts als unabhängige, unparteiische Stelle für digitale Verkehrsinformationen dienen und dabei prüfen und beurteilen, ob MDM-Datenlieferanten wie Straßenbauverwaltungen, Länder, Kommunen oder Dritte geforderte Spezifikationen und damit die geforderte Kompatibilität einhalten, um standardisierten Datenaustausch von Echtzeit-Verkehrsinformationen oder sicherheitsrelevanten Verkehrsmeldungen zu ermöglichen [Vgl. 20], [Vgl. 92].

Durch Open Data-Plattformen wie dem MDM verbessern sich die Rahmenbedingungen: der Aufwand für Schnittstellendefinition sinkt, da keine proprietären Schnittstellen für jeden Einzelfall entwickelt werden müssen. Über eine große Plattform kann ein einheitlich entwickelter Datenüberlassungsvertrag bereitgestellt werden. Der vereinfachte Zugang führt dazu, dass mehr MDM-Teilnehmer in Summe mehr Daten anbieten und neue Übertragungstechniken mit höherer Bandbreite als bisher notwendig werden lassen. Höhere Bandbreiten ermöglichen dann auch das Verbreiten von lokalen Informationen [Vgl. 101].

In der kurzfristigen Sicht ergibt sich die Anforderung, dass keine weiteren lokalen Schnittstellen entwickelt werden. Vielmehr sollte man sich an den MDM-Standards orientieren. Die Standardisierung und die Preisgabe von Informationen dient nicht nur der Generierung von Open Data für Dritte, sondern sollte als Möglichkeit gesehen werden, über das MDM-Netzwerk selbst von neuen Informationsflüssen zu profitieren. Dies setzt im ersten Schritt jedoch voraus, dass Daten im Untersuchungsgebiet strukturiert erhoben werden. Unsystematisch werden in vielen Städten Deutschlands Daten erhoben aber aus Gründen der Personalknappheit, Unkenntnis oder anderen

Gründen nicht weiterverarbeitet. Kurzfristig sollte überprüft werden, ob bereits Verkehrsdaten erhoben oder gar verarbeitet werden. Im nächsten Schritt sollte mittelfristig angestrebt werden, dass diese Big Data auch strukturiert an der richtigen Stelle verwertet werden (können) und das knowhow in Verkehrsleitzentralen aufgebaut oder zumindest weiter verbessert wird. Das Land Baden-Württemberg unterstützt öffentliche Stellen bei diesen Fragen zum Beispiel im Rahmen der „Ideenschmiede Digitale Mobilität“, wo startup-Unternehmen auf kommunale Akteure treffen. Nach diesen Schritten können spätestens im Langfristhorizont die Daten auf den MDM importiert werden.

Unabhängig von den beiden aufgezeigten Anwendungsfällen müssen auf cloudbasierten Plattformen autonomes Computing, sichere Mandantenfähigkeit und Skalierbarkeit sichergestellt sein [Vgl. 86]. Die Server-Plattform wird kurzfristig in den meisten Fällen nicht existieren – bei der Plattform handelt es sich genauso wie bei den drei damit verbundenen Eigenschaften um im Langfristhorizont umzusetzende Pakete.

Autonomes Computing unterstützt Selbstkonfiguration von Komponenten, Selbstausbesserung von entdeckten Störungen, kontinuierliche Selbstverbesserung der Ressourcen und Selbstschutz sowie frühzeitige Erkennung von Angriffen [Vgl. 146].

Mandantenfähigkeit bezeichnet die Eigenschaft, dass mehrere Mandanten keinen gegenseitigen Einblick in ihre Daten haben [Vgl. 27]. Dieses Kriterium ist einzelfallabhängig zu bewerten, da die Cloud-Dienste durch den Austausch der Daten leben aber gleichzeitig private und hoheitliche Datenquellen geschützt werden müssen.

Die **Skalierbarkeits**-Anforderung ergibt sich aus den kurzen IT-Entwicklungszyklen und den rasant steigenden Nutzerzahlen: ein Server darf nicht permanent an seine Kapazitätsgrenzen stoßen, sodass dessen voraussichtliches Wachstum zum Zeitpunkt der Beschaffung bereits berücksichtigt werden muss [Vgl. 71]. Skalierbare Systeme haben also die Fähigkeit der flexiblen Größenänderung zur Abbildung eines zu erwartenden Wachstums [Vgl. 152].

Bisher haben die Fahrzeughersteller eigene Serversysteme aufgebaut. Eine Einigung der Anbieter auf gemeinsame Datenaustauschformate im sicherheitsrelevanten und verkehrstechnischen Bereich sind anzustreben. Erforderlich ist zunächst auch eine behördenübergreifende Etablierung und später behördenübergreifende Vernetzung sowie Standardisierung der Informationsflüsse über die Zuständigkeitsbereiche der Verkehrsbehörden hinweg. Um Daten zu bündeln und aggregiert weiterzuleiten, bedarf es in Zukunft weiterer neutraler Plattformen wie MDM für die standardisierte Bereitstellung von verkehrsrelevanten Daten [Vgl. 138].

Zur Wahrung der Datensicherheit müssen Serverstandorte ausgewählt werden, deren Ursprungsländer verlässlich sind und Datenschutz gewährleisten. Der seriösen Betreiberwahl sollte genügend Zeit eingeräumt werden.

4.2.2 Erweiterung der Übertragungstechnik

Die Frage nach der einzusetzenden Übertragungstechnik zur Übermittlung von Verkehrsinformationen ist nicht neu. Informationen werden heute vornehmlich noch über öffentlichen Rundfunk per analoger UKW übermittelt. Gängige Vertreter sind TMC und TMC Pro. Weiterentwicklungen hin zur digitalen Übertragung wie DAB und dem heutigen DAB+ haben keine vergleichbare Marktdurchdringung.

Das Radio Data System (RDS) stellt ein Kommunikationsprotokoll dar, das den Versand von digitalen Zusatzinformationen über das klassische UKW-Radio möglich macht. TMC ist ein RDS-basierter Dienst, der codierte Verkehrsmeldungen an UKW-Radioempfänger versendet [Vgl. 4]. Dabei werden Datenquellen wie Verkehrsleitzentralen, Zentralen der Polizei, öffentlich-rechtliche Radio-Verkehrsmeldezentralen, stationäre infrastrukturseitige Erfassungssysteme und Floating Car Data verwendet [Vgl. 133]. Die von der Telekomtochter T-Systems weiterentwickelte zahlungspflichtige Version TMC Pro, bietet höhere Aktualität durch das Verwenden von noch mehr straßenseitigen Sensoren.

Mit TMC und TMC Pro können dem Empfänger zielgruppenspezifische Informationen zur Verfügung gestellt werden. Filterkriterien sind der individuelle Standort und die Fahrtrichtung des Objekts. Fest definierten Ereigniscodes (sogenannte Events) werden diskrete Ereignisstandorte (Location Code List) zugeordnet [Vgl. 65]. Die Flexibilität solcher TMC-Meldungen ist groß aber endlich.

Digital Audio Broadcasting (DAB) ermöglicht eine stärkere Integration von Zusatzinformationen als die TMC-Technik und wird parallel zur klassischen UKW-Technik angeboten. Die Sendeleistung ist geringer, sodass weniger Sendestationen benötigt werden. Die Datenübertragungsraten sind bei DAB dennoch höher als bei UKW [Vgl. 64].

Mit Blick in die Zukunft stehen bei der Wahl der V2X-Übermittlungstechnik mehrere Alternativen zur Verfügung, die fallweise miteinander kombiniert werden [Vgl. 17]. Zur Übertragung von Informationen bieten sich grundsätzlich Wireless Local Area Network (WLAN) und Mobilfunk an.

Die Kernanforderung besteht darin, sicherheitsrelevante Anwendungsfälle zuverlässig zu unterstützen und Datenpakete schnellstmöglich bei geringer Latenzzeit (siehe Kapitel 3.2.3), also nahezu verzögerungsfrei, zu verbreiten. Das muss trotz etlicher paralleler Meldungen, bei sehr hoher Fahrzeugdichte und bei hohen Relativgeschwindigkeiten verschiedener Fahrzeuge zueinander problemlos möglich sein.

Für Testfelder ergibt sich im kurzfristigen Zeithorizont somit zunächst die Anforderung, Gebiete mit niedrigen Relativgeschwindigkeiten und geringen Fahrzeugdichten auszuwählen, um kritische Situationen zu vermeiden. Erst mit ausreichenden Erfahrungswerten sollten technisch anspruchsvollere Szenarien bestritten werden.

WLAN

Der WLAN-basierte WLAN-V2X-Ansatz wird von Europäern und Amerikanern vorangetrieben. Die amerikanische Version basiert auf dem fahrzeugspezifischen WLAN-Standard 802.11p des Normungsinstituts IEEE, kurz IEEE 802.11p, wohingegen das europäische Konkurrenzmodell „C-ITS“ (Cooperative Intelligent Transport Systems) auf dem vom europäischen Normungsinstitut ETSI ITS-G5-Standard basiert. Das weltweit agierende amerikanische Normungsinstitut Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) achtete beim IEEE 802.11p darauf, dass V2X-Anwendungen hoher Leistungsanforderungen abgebildet werden können. IEEE 802.11p ist ein erweiterter Standard der allgemeinen 802.11-Norm und spezialisiert sich auf die Schnittstellendefinition für Intelligente Transportsysteme (ITS). Häufig findet sich das amerikanische Modell unter der sogenannten Dedicated Short Range Communication (DSRC), übersetzbar mit zweckgebundener Nahbereichskommunikation, und wird wegen möglicher Verwechslung zu einem gleichnamigen Produkt in Europa meist kurz mit ITS-G5 bezeichnet. Im Folgenden wird der Begriff ITS-G5 verwendet. Im Detail unterscheiden sich die amerikanische DSRC und das europäische ITS-G5; allerdings funktionieren beide Modelle mit selbiger infrastrukturseitiger Hardware, sodass im Folgenden vereinheitlicht nur noch ITS-G5 genannt wird [Vgl. 88].

ITS-G5 ist im Gegensatz zur Mobilfunktechnik bereits heute für V2X-Anwendungsfälle einsetzbar und hat sich beispielsweise für die autonome Kommunikation mit Mauterhebungsstationen als geeignet erwiesen. ITS-G5 unterstützt im Gegensatz zum Mobilfunk bereits sich schnell zueinander bewegende Fahrzeuge, sowie Fahrzeuge über eine Distanz von rund 300m bei Datenübertragungsraten von bis zu 27 Mbit/s. So werden initiale Protokoll-Abhandlungen (Handshake) minimiert, sodass Authentifizierungen, Verschlüsselung und Identifizierung nahezu in Echtzeit erfolgen. Konforme Produkte existieren bereits. In den letzten Jahren wurden etliche Feldversuche unternommen, um die Marktreife zu validieren. Mobilfunkbasierte Produkte müssten diese Zyklen zunächst durchlaufen [Vgl. 5], [Vgl. 88].

MOBILFUNK

Neben dem WLAN-basierten Ansatz unterstützt der Mobilfunk als erfolgreichster Vertreter der Drahtlosübertragungstechnik ebenso V2X-Kommunikation. Dabei existieren etliche Begriffe, die im Folgenden mithilfe von Abbildung 19 und der Entwicklung der Übertragungsgeschwindigkeit nach Mobilfunkstandard voneinander abgegrenzt werden.

Geläufiger Vertreter ist zunächst der **LTE**-Standard mit bis zu 300 Mbit/s. Heutzutage kann bereits auf den Standard LTE-Advanced, kurz **LTE-A**, zurückgegriffen werden. Er wird auch als **4G** bezeichnet. Mit ihm sind Datenübertragungsraten bis 1 GBit/s möglich. Mit dem in Entwicklung befindlichen Standard **5G** (nicht in der Abbildung enthalten) werden Übertragungsraten bis 10 GBit/s ermöglicht.

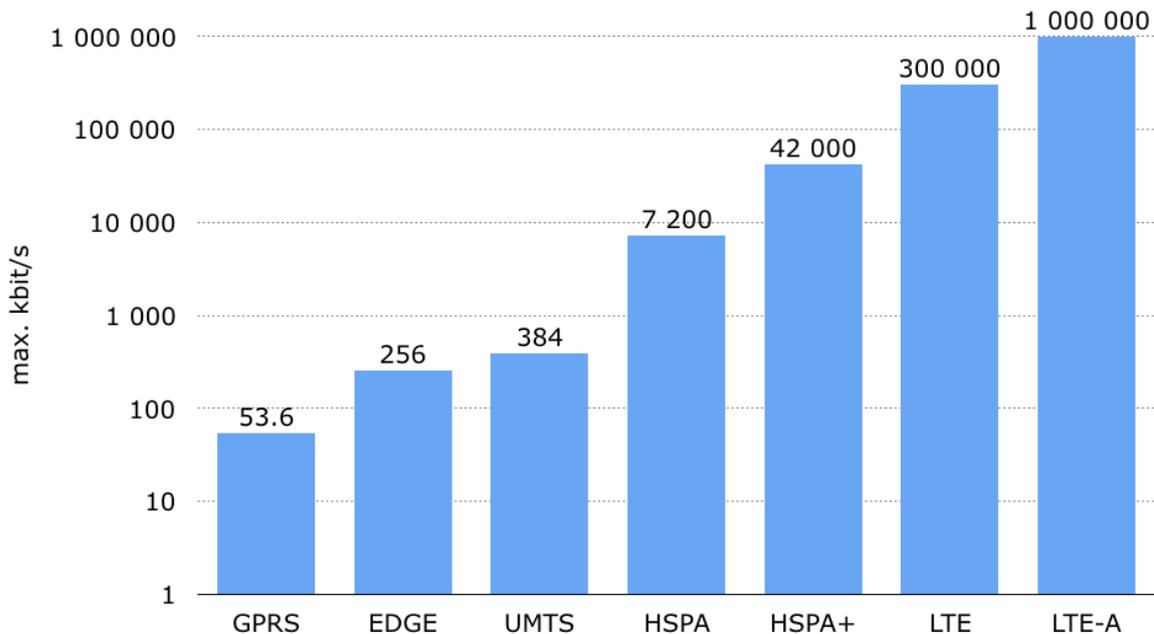


Abbildung 19: Entwicklung der Datenraten verschiedener Mobilfunkstandards [mit Änderungen entnommen aus 148]

Speziell für Lösungen der Verkehrsbranche sind Untervarianten des LTE entwickelt worden. Sie können als sukzessiver „Upgradepfad“ [88] zum nächsten Mobilfunkstandard 5G gesehen werden. Zu den Untervarianten zählt das herstellernerneutrale **LTE-V2X**, auch **Cellular-V2X** oder kurz **C-V2X** genannt. Die Telekom führt LTE-V2X synonym unter dem telekomspezifischen Namen **LTE-V**, wobei V für Vehicle steht. LTE-V und damit stellvertretend auch LTE-V2X eignet sich laut Telekom für zahlreiche Bereiche wie Kollisionswarnungen oder infrastrukturseitige Warnung vor Fußgängern [Vgl. 2].

In dieser Ausarbeitung wird ausschließlich der Begriff LTE-V2X verwendet. Man unterscheidet zwei Hauptvarianten [Vgl. 84]:

- **LTE-V2X Direct Communications**

Bei dieser Untervariante geht es um direkte lokale Kommunikation von Fahrzeug und Infrastruktur ohne dabei auf mobile Netzabdeckung angewiesen zu sein. Es handelt sich um das direkte Konkurrenzprodukt zum WLAN-basierten ITS-G5. Die große Netzinfrastruktur wird nicht benötigt, die notwendigen Eingriffe sind gering.

- **LTE-V2X Network Communications**

Hierbei handelt es sich um die beim Endkunden bekannte klassische netzwerkbasierte Kommunikation, die telematische Anwendungen unterstützt. Dafür wird das Mobilfunknetz der klassischen Mobilfunknetzbetreiber im Standard 4G oder 5G benötigt. Die Weiterentwicklung zu 5G-basierten LTE-V2X Network Communications ergibt zusätzliche Möglichkeiten und erweiterte Anwendungsszenarien für autonomes Fahren. Dazu zählt etwa die Möglichkeit, dass autonome Fahrzeuge ihre geplanten Fahrmanöver austauschen und so die Vorhersehbarkeit von Ereignissen und die Verkehrsflusseffizienz erhöht werden [Vgl. 84].

Der Vorteil des Mobilfunks, dessen weltweite Verbreitung, ist zugleich dessen Nachteil bei der Einführung für autonome Fahrzeuge. Gerade weil die Mobilfunk-Infrastruktur weltweit verbreitet ist, bedarf deren Erneuerung oder Umstrukturierung viel Zeit.

Deutschland braucht ein möglichst dichtes Datenaustauschnetz mit Bandbreiten bis 1 GBit/s, um autonomes Fahren unterstützen zu können. Um die enormen Datenmengen in Lichtgeschwindigkeit abzuwickeln und Reaktionen in nahezu Echtzeit zu ermöglichen, müssen Mobilfunkstationen an Glasfasernetze angeschlossen werden, da Kupfernetze die enormen Übertragungsraten nicht unterstützen [Vgl. 137]. Datenübertragung per Funk wäre stör- und manipulationsanfälliger und langsamer als die optische Übertragung per Licht über Glasfaserkabel / Lichtwellenleiter [Vgl. 16], [Vgl. 35], [Vgl. 55]. Daher ist Glasfaser künftig das Rückgrat der digitalen Infrastruktur [Vgl. 35].

Die aktuellen Mobilfunkversionen sind für einfache, also nicht-sicherheitsrelevante, V2X-Anwendungsfälle geeignet und unterstützen weder Anwendungsfälle mit hohen Relativgeschwindigkeiten noch geringe Latenzzeiten. Einen speziellen Problemfall stellen mobilfunkzellen- oder netzbetreiberübergreifende Bewegungen dar, sowie das Agieren über Landesgrenzen hinweg. Die technischen Herausforderungen zur Unterstützung sicherheitsrelevanter Anwendungen steigen durch die möglichst geringen Latenzzeiten erheblich. Es gibt dabei den Zielkonflikt, dass einerseits hohe Datenvolumina schnell über ein somit dichtes Netz an Mobilfunkbasisstationen übermittelt werden soll, aber auf der anderen Seite die Bestrebung des Netzbetreibers entgegensteht, die Anzahl an Mobilfunkbasisstationen aus Kostengründen minimal zu halten [Vgl. 17].

Auf der Suche nach dem neuen Mobilfunkstandard begegnet man 3GPP: das weltweite Mobilfunk-Standardisierungskonsortium, das sogenannte 3rd Generation Partnership Project (3GPP), legt die technischen Rahmenbedingungen der jeweiligen Mobilfunkstandards fest. Dazu gehören unter anderem die maximale Breite des

nutzbaren Frequenzspektrums für Down- und Upload, die dazugehörige Datenübertragungsrate, Modulationsverfahren und weitere Details von Informationsübertragung über Codierung bis zum Netzaufbau. Diese technischen Spezifikationen sind komplex, deren Umsetzung langwierig und sie werden in weltweiten Releases, also „Veröffentlichungen“, zur Verfügung gestellt [Vgl. 83].

Heute übliche Mobilfunk-Releases decken mit ein paar Modifizierungen Szenarien hoher statischer Nutzerdichte ab, beispielsweise bei einer Großveranstaltung bei der sich die Endgeräte kaum bewegen. 5G wird diesen Anwendungsfall hoher statischer Nutzerdichte künftig durch den Kleinzellen-Ansatz (Small Cells) ermöglichen. Heute werden die regulären Mobilfunk-Dachstandorte punktuell an hochfrequentierten Plätzen um weitere Mobilfunkbasisstationen ergänzt. Das erhöht die Kapazität, also die mögliche Anzahl gleichzeitiger Nutzer bei hohem Datendurchsatz. 5G wird dies im Gegensatz zu 4G flächendeckend, also im Rahmen seines Abdeckungsgebiets, und zeitlich unbegrenzt über den Kleinzellen-Ansatz unterstützen. Die Kleinzelle ist eine Mobilfunkzelle mit geringer Sendeleistung und somit geringer Empfangsreichweite mit Einbindung in das reguläre Mobilfunknetz. Die Antennen sind folglich kleiner und können schnell und ohne zwingende Anmeldung bei der Bundesnetzagentur entlang der Infrastruktur installiert werden [Vgl. 61].

Verkehr ist jedoch nicht permanent von der soeben beschriebenen hohen statischen Nutzerdichte geprägt, sondern von teils hohen Relativgeschwindigkeiten. Diese werden jedoch noch nicht unterstützt.

Kurzfristig muss das Mobilfunknetz je nach Bedarf durch den Kleinzellen-Ansatz ergänzt werden, sofern der spezifische Einsatz der autonomen Busse eine Mobilfunkabdeckung erfordert. Langfristig kann die punktuelle Mobilfunknetzergänzung jedoch entfallen, wenn der Mobilfunkstandard 5G implementiert wurde.

Große und schnelle Investitionen der Mobilfunkbetreiber in den Fahrzeugmarkt sind nicht zu erwarten, da den rund acht Milliarden Mobilfunkverträgen eine geringe Anzahl von weltweit jährlich rund 100 Millionen Neuwagen entgegensteht, sodass der Fahrzeugmarkt für Mobilfunkbetreiber eher als Nischenmarkt eingestuft wird [Vgl. 5]. LTE-V2X muss zunächst unter Einsatz hoher Investitionen entwickelt und später in die Bestandsinfrastruktur integriert werden.

Ein weiterer Hinderungsgrund schneller Entwicklungen im Mobilfunk-Sektor ist das Geschäftsmodell der Mobilfunkbetreiber selbst: sie erheben für die Nutzung ihrer Ressourcen Gebühren. V2X- und V2V-Kommunikation müssten aus Gründen der Diskriminierungsfreiheit (Zugang zu öffentlichen Verkehrsdaten muss weiterhin für Alle gewährleistet sein) allerdings kostenlos angeboten werden, sodass das

Geschäftsmodell der Netzbetreiber in Frage gestellt wird und erst recht keine hohen oder gar schnellen Investitionen in die Infrastruktur rechtfertigt [Vgl. 5].

Folglich werden bis zu dessen Implementierung Jahre vergehen. Große Mobilfunk-Infrastruktur-Upgrades haben in der Vergangenheit im Durchschnitt sechs Jahre gebraucht. Der voraussichtlich mit Release 16 kommende Mobilfunkstandard 5G wird Ende 2020 am Markt etabliert und Konkurrenz zu den am Markt bereits etablierten WLAN-Standards sein.

Die Notwendigkeit hoher Datenübertragungsraten zeigt sich unter anderem in einer Untersuchung des US-Verkehrsministeriums: bereits das Austauschen von Cooperative Awareness Messages (CAM) zwischen 30 Fahrzeugen mit einem Spitzenwert in der Rush Hour von 300 Fahrzeugen, führt zu einer infrastrukturseitigen Datenmenge von monatlich rund 16 GB bzw. einem Spitzenwert von 750 KB pro Sekunde [Vgl. 5]. CAM sind komprimierte V2I- bzw. V2V-Verkehrsinformationen, die zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und Backend ausgetauscht werden und enthalten Datum, Uhrzeit, Fahrzeugposition oder Fahrzeuggeschwindigkeit. [Vgl. 66], [Vgl. 3].

Trotz hoher Datenübertragungsraten müssen auch im mobilfunkbasierten Ansatz niedrige Latenzzeiten gewährleistet sein. Eine Übersicht ausgewählter nicht-sicherheitsrelevanter Anwendungsfälle und deren erforderlichen Latenzzeiten enthält Abbildung 20: Nicht-sicherheitsrelevante V2X-Anwendungsfälle [mit Änderungen entnommen aus 5]:

Anwendungsfall	Kommunikationsmodus	Maximale Latenzzeit
Übermittlung von Geschwindigkeitsbegrenzungen	Periodisches Senden	100 ms
Vorschlag für optimale Geschwindigkeit zur Abpassung einer Grünphase an LSA	Periodisches Senden	100 ms
Abwicklung von Fahrmanövern in Kreuzungssituationen	Periodisches Senden	100 ms
Kooperativer flexibler Fahrspurwechsel	Periodisches Senden	500 ms
Elektronische Mauterhebung bzw. ÖV-Bevorrechtigung oder Schrankenberechtigung	Periodisches Senden	500 ms

Abbildung 20: Nicht-sicherheitsrelevante V2X-Anwendungsfälle [mit Änderungen entnommen aus 5]

Sicherheitsrelevante Anwendungsfälle bedürfen hingegen einer ausfallsicheren Infrastruktur und noch kürzeren Latenzzeiten. Die Infrastruktur muss folglich über eine hohe Dichte an Mobilfunkbasisstationen verfügen, um eine lückenfreie Mobilfunk-Netzabdeckung zu ermöglichen. Auch muss im Gegensatz zu anderen im Nahfeld operierenden Technologien die Ortung präzise gewährleistet sein, um den lokalen Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sicherzustellen. Insbesondere in Städten mit Hochhäusern kommt Mobilfunk jedoch an seine Grenzen: in Hochhäuserschluchten und bei starkwüchsiger, massiver Vegetation gibt es keinen Empfang [Vgl. 32]. 5G soll die Abdeckung solcher Anwendungsfälle durch das systematische Kleinzellen-Netz gegenüber 4G deutlich verbessern [Vgl. 62]. Bis dahin kann auch ohne 5G das Kleinzellen-Netz durch lokale, unbürokratische Nachverdichtung mit Basisstationen, wie oben beschrieben, erreicht werden. Kurzfristig sind vegetativ anspruchsvolle Umgebungen zu vermeiden. Grünbewuchs ist regelmäßig zu entfernen und Häuserschluchten, baulich kurzfristig naheliegenderweise nicht veränderlich, sind zu umfahren.

Die Erweiterung der „klassischen“ netzwerkbasierter Technik hin zu **LTE-V2X Direct Communications** bietet Vorteile. Es soll die Kommunikation im Nahbereich bis 300 Meter vereinfachen, indem es direkten Datenversand ohne zwischengeschaltetes Mobilfunknetz ermöglicht. Die Latenzzeit verringert sich dadurch. Erste Tests finden bereits in Deutschland statt und deren Ergebnisse werden in eine branchenweite Normung einfließen [Vgl. 7]. LTE-V2X Direct Communications steckt im Vergleich zum WLAN-basierten ITS-G5 in den Kinderschuhen, kann jedoch im direkten Vergleich bei innerstädtischen Fahrgeschwindigkeiten gleiche Reichweiten von rund 300m bieten und diese bei höheren Fahrgeschwindigkeiten sogar übertreffen [Vgl. 88]. Zudem soll LTE-V2X Direct Communications eine bessere Leistung bei fehlender direkter Sichtverbindung und eine geringere Paketfehlerrate bei der Datenübermittlung bei hoher Verkehrsdichte bieten als WLAN-V2X.

Die Tatsache, dass Mobilfunkinfrastruktur bereits weltweit installiert ist, wird als Hauptgrund gesehen, V2X über Mobilfunk und langfristig nicht über WLAN abzuwickeln. Die heutige Mobilfunk-Infrastruktur ist jedoch nicht für V2X-Anwendungsfälle gerüstet. Eine WLAN-Lösung mit IEEE 802.11p erfordert zwar auch neue Infrastruktur, nutzt allerdings besser bestehende Infrastruktur und wird bereits in RSU an LSA oder WVZ verbaut [Vgl. 5]. Nicht zuletzt ist die Entscheidung für die jeweilige Technologie auch politisch getrieben. China hat 2017 zusammen mit einem Konsortium von „5G-Befürwortern“ aus Handel und Industrie ein verbindliches Programm beschlossen, Autobahnen, Städte und neu zugelassene Fahrzeuge bis 2025 auf LTE-V2X vorzubereiten. Amerika wird hingegen das eigens entwickelte WLAN-

basierte DSRC bevorzugen und die EU wiederum die modifizierte DSRC-Variante C-ITS, um letztlich eine Abhängigkeit von China zu vermeiden. Die Industrie bereitet sich daher auf parallelen Entwicklungsaufwand für verschiedene Systeme vor [Vgl. 68].

Die Auswirkungen auf konkrete Anwendungsfälle für autonome Fahrzeuge in Europa bleibt abzuwarten.

4.2.3 Vorantreiben der IT-Schnittstellen-Standardisierung

Eine zeitnahe Einigung auf herstellerübergreifende Standards für den Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ist notwendig, um das autonome Fahren nicht durch etliche IT-Systemgrenzen einzuschränken. Die hartnäckigen Bemühungen zur europäischen Interoperabilität in der Eisenbahnbranche belegen, dass Standardisierung möglichst früh thematisiert werden muss, um jahrzehntelange Anpassungsprozesse auf europäischer Ebene wie im Eisenbahnsektor zu verhindern.

Bei der Standardisierung muss jedoch das heutige niedrige Standardisierungslevel im klassischen Verkehr berücksichtigt werden: eine unter Standardisierungsgesichtspunkten wünschenswerte Abkehr von nationalen Alleinstellungsmerkmalen wie dem Linksverkehr oder unterschiedlichsten Fahrbahnmarkierungen in Europa scheint utopisch, für die IT am Beispiel der Entwicklung des europäischen Mobilfunk-Roamings jedoch nicht aussichtslos. Auch im Bereich des intereuropäischen Roamings konnten nach harten Verhandlungen wegweisende Verbesserungen für den Endverbraucher erzielt werden.

Standardisierte Systeme müssen in der Lage sein, die lokalen, regionalen oder gar nationalen Eigenheiten zu verarbeiten. Dazu bedarf es an Austausch zwischen den internationalen Testfeldern autonomen Fahrens [Vgl. 138].

Schnittstellen ergeben sich produktspezifisch zwischen den einzelnen Elementen. Sie sind der logische Berührungspunkt verschiedener Komponenten und ermöglichen den Austausch von Daten zwischen verschiedenen Prozessen [Vgl. 37]. Da sie sich kontinuierlich weiterentwickeln und der Privatwirtschaft entstammen, wird nicht weiter auf die Vielzahl verschiedener Schnittstellen eingegangen.

Das DLR hat im Rahmen eines Versuchs beispielhaft die Braunschweiger Testfeldinfrastruktur einer Straßenkreuzung auf eine neue Düsseldorfer Prüffeldinfrastruktur einer vergleichbaren Straßenkreuzung adaptiert. Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit etwaigen künftigen Massen-Rollouts von solch standardisierten Infrastruktureinheiten auf deutsche Straßen. Für die Standardisierung zur Massenmarkttauglichkeit wären – vereinfacht - folgende Schritte nötig [Vgl. 49]:

- Erfassung der Bestandssysteme, Analyse auf Kompatibilität, Identifikation lokal-spezifischer Ausprägungen

- Erfassung notwendiger Komponenten, Schnittstellenanalyse, Erstellung von Referenzarchitekturen
- Analyse der Übertragbarkeit der Referenzkreuzung auf die Prüfkreuzung und Erarbeitung eines Migrationskonzeptes
- Durchführung der Arbeiten, Montage und Inbetriebnahme
- Erstellung von Beiträgen für einen Leitfaden zur Integration kooperativer Systeme

Weitergehende Informationen enthält der dazugehörige Leitfaden. Bei jeglicher Implementierung ist auf Standardisierung und sich abzeichnende Branchen-Standards zu achten. Lokal-spezifische Lösungen können zu einem späteren Zeitpunkt zu erhöhten Kosten oder fehlender Integrationsmöglichkeit in OpenData-Plattformen führen [Vgl. 49].

4.2.4 Erfüllung der IT-Sicherheitsanforderungen

Die IT-Infrastruktureinrichtungen müssen zuverlässig gegen externe Angriffe, zum Beispiel Cyber-Angriffe, abgesichert werden [Vgl. 6]. Bei Betrachtung der heute ergriffenen Maßnahmen zur Absicherung von infrastrukturseitigen Gefahren, müssen auch künftige Abwehrmechanismen realistisch und damit in einem überschaubaren Rahmen bei gleichzeitigem Tolerieren eines gewissen Risikoausmaßes getroffen werden. Ein „100%-Schutz“ gegen Angriffe kann zwar nicht gewährleistet werden, aber die Hürden können hoch gesetzt werden, um Amateuren den Zugang zur Systemmanipulation unmöglich zu machen und Spezialisten den Zugang so weit wie möglich zu erschweren.

Durch die Vernetzung der Elemente entstehen künftig mehr Daten- und Informationsflüsse, die über Schnittstellen kommunizieren [Vgl. 138]. Die Anforderungen an Datenschutz und Datensicherheit steigen somit [Vgl. 136]. Europäische Anforderungen wie jene aus der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) sind dabei zu berücksichtigen. Eine einheitliche Definition von IT-Mindestsicherheitsstandards ist unerlässlich [Vgl. 138]. Gefahrenszenarien fahrzeuginterner Netzwerke werden im Folgenden nicht betrachtet.

Bei der Vernetzung der Fahrzeuge mit anderen Elementen werden Verschlüsselungs- und Signaturalgorithmen verwendet, sodass das System ohne Kenntnis dieser Schlüssel vor Angreifern geschützt ist [Vgl. 6]. Im Folgenden wird jedoch von Insidern ausgegangen, die die Kenntnis solcher Schlüssel in Erfahrung bringen können [Vgl. 6].

Die vorgestellten Sicherheitsanforderungen stellen eine interdisziplinäre Mischung aus fahrzeugseitigen und infrastrukturseitigen Kriterien dar. Sie werden daher in der späteren Bewertungsmethode nur rudimentär betrachtet.

- **Angriffe auf die Applikationsschicht** [Vgl. 6]:
Es handelt sich dabei um die Ebene auf der Anwendungsprogramme ausgeführt werden. Mögliche Angriffe:

- Nachrichtenfälschung bei Erstellung oder Weiterleitung einer Nachricht, z.B. falsche Weitergabe einer infrastrukturseitig vorgegebenen Höchstgeschwindigkeit an Fahrzeuge.

Als Gegenmaßnahme können Daten-Verifikationsansätze verwendet werden, zum Beispiel durch Abgleich und Validierung mit alten Datensätzen oder alternativen Sensordaten. Zudem können Hardwareeinheiten so separiert werden, dass ein Fremdzugriff nicht möglich ist.

- Sensordatenfälschung durch Imitation / Vorgabe einer falschen Außentemperatur, z.B. Manipulation eines streckenseitigen Temperatursensors, der diese Daten an MDM weiterleitet, die aggregierten Informationen in hochgenaue digitale Karten einspeist und gleichzeitig infrastrukturseitige Taumittelsprühanlagen an kritischen Stellen aktiviert.

Als Gegenmaßnahme können die Sensoranlagen redundant (also doppelt) ausgelegt werden, sodass das System bei widersprüchlichen Sensordaten in den Störfallmodus wechselt oder die fragwürdigen Datensätze durch fahrzeugseitige Temperatursensoren vor Ort validiert werden müssen und vor Ort mit der Infrastruktur abgeglichen werden.

- Replay-Angriffe durch In- oder Outsider indem bereits versendete Datenpakete abermals versendet werden. Die Kenntnis der versendeten Daten ist dabei nicht nötig. Replay-Angriffe ermöglichen Auffahrunfälle oder andere gefährliche Fahrmanöver.

Als Gegenmaßnahme kann ein Fahrzeug, das selbige Nachrichten mehrfach empfängt, diese automatisch ablehnen („nonce-Prinzip“).

- **Angriffe auf die Netzwerkschicht** [Vgl. 6]:

Die Netzwerkschicht sorgt für die Weiterleitung oder das Schalten von Verbindungen. Im Gegensatz zur Applikationsschicht werden neben den Anwendungen selbst auch das gesamte Netzwerk (Infrastruktur und Fahrzeuge) in Mitleidenschaft gezogen. Mögliche Angriffe:

- „Denial of Service“ oder „Distributed Denial of Service“-Angriffe legen die gesamte Kommunikation durch eine übermäßig hohe Anzahl an Kommunikationsanfragen lahm.

Entgegengewirkt werden kann fahrzeugseitig durch den zeitlich beschränkten Kanalzugriff der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte. Gegen Denial-of-Service-Attacken können zudem in regelmäßigen Abständen Kommunikationskanäle gewechselt werden

- Störsignale auf Fahrzeuge legen, das sogenannte Jamming. Eine Kenntnis der Schlüssel ist hierzu nicht notwendig, jedoch die Anwesenheit des Angreifers in unmittelbarer Nähe.
Als Gegenmaßnahme eignet sich Frequency Hopping, also ein in Zeitintervallen vordefiniertes Frequenzspringen.
- **Angriffe auf Systemlevel** [Vgl. 6]:
 - Bei unbewachter Infrastruktur oder in einem unbewachten Fahrzeug werden Sicherheitslücken in Soft- und Hardware genutzt, um später Kontrolle über Komponenten zu erlangen. Um modifizierte Elemente zu entdecken, müssen Fehlerverhaltensanalysen durchgeführt werden. Fahrzeuge können sich entweder in Gruppen vernetzen und ihr Verhalten gegenseitig auf Anomalien überprüfen und deren eigene Vertrauenswürdigkeit ermitteln. Alternativ können mobile Endgeräte von Fahrzeuginsassen die Fahrzeugparameter wie Beschleunigung oder Position mittels eigener Daten abgleichen und validieren. Autonome Fahrzeuge sollten nachts in geschützten Räumen untergebracht werden.
 - Bewusste Störung des Mobilfunk- oder GPS-Empfangs. Dadurch kann netzwerkbasierte Kommunikation nicht mehr erfolgen. Die Fahrzeuge können sich weder austauschen noch deren genauen Standort ermitteln. Ein Ausfall „zur sicheren Seite“ muss in diesem Falle gewährleistet sein: die Fahrzeuge müssen beim Fehlen solcher systemrelevanten Parameter automatisch zum Stillstand gelangen.
- **„privacy leaks“-Angriffe** [Vgl. 6]:
 - Unter Datenschutz fallende Informationen wie die Fahrzeugposition werden per Lauschattacke abgerufen, um Bewegungsprofile zu erstellen. Der Angriff ist kaum zu detektieren. Kurzzeitertifizierungen und die Verwendung von Pseudonymen können entgegenwirken.

In wieweit ein System Informationssicherheit erreicht hat, lässt sich an der Erfüllung der IT-Schutzziele bemessen. Die IT-Schutzziele werden auch als **CIA-Schutzziele** bezeichnet und umfassen Vertraulichkeit (**c**onfidentiality), Integrität (**i**ntegrity), Verfügbarkeit (**a**vailability) im engeren Sinne, sowie im weiteren Sinne Authentizität, Zurechenbarkeit und Privatsphäre. Je nach Literatur können die Schutzziele geringfügig abweichen oder um spezielle Anforderungen ergänzt sein. Schutzziele können sich widersprechen oder nicht alle gleichermaßen erfüllt werden [Vgl. 43], [Vgl. 80], [Vgl. 98], [Vgl. 6]:

- **Vertraulichkeit**

Daten können nur von Elementen verändert oder gelesen werden, die dazu berechtigt sind. Um Verstöße gegen Berechtigungen festzustellen, müssen Zugriffsrechte im Voraus definiert sein.

Darüber hinaus dürfen Daten auch während der Übertragung nicht durch unautorisierte Stellen gelesen oder verändert werden. Es geht um den Schutz der Inhalte. Dazu bedarf es eines geeigneten Verschlüsselungsverfahrens.

- **Integrität**

Daten dürfen nicht unerkannt verändert, gelöscht oder eingefügt werden. Änderungen im Datenbestand müssen nachvollziehbar, zurechenbar und ersichtlich sein. Um später Fehlerforschung betreiben zu können, dürfen sich verschiedene Infrastrukturelemente aus Kostengründen keine digitale Identität teilen.

Häufig wird zwischen einer starken Integrität (keine Manipulationsmöglichkeit) und einer schwachen Integrität (Manipulation möglich, aber nicht unbemerkt) unterschieden.

- **Verfügbarkeit**

Ziel ist, dass die Zeit, in der das System funktioniert, maximiert wird. Dazu sollten systemkritische Elemente gefunden werden und diese besonders vor Ausfällen geschützt werden. Diese Risikoanalyse muss Ausfallwahrscheinlichkeit, die damit verbundene und maximal tolerierbare Ausfallzeit und das monetäre Schadenspotential abdecken.

- **Authentizität**

Neben dem Identitätsnachweis müssen auch die Daten selbst authentisch sein. Durch den Identitätsnachweis wird sichergestellt, dass der Kommunikationspartner auch zweifelsfrei der erwartete offizielle infrastrukturseitige Kommunikationspartner (z.B. ein über eine RSU verbundener Sensor) ist. Authentische Daten liegen nur vor, wenn sie vom unter Identitätsnachweis geführten Element stammen. Um eine Überlastung der Kapazitäten durch Authentizitätsprüfungen zu vermeiden, kann das Adaptive Message Authentication-Verfahren angewendet werden. Dabei werden im „relaxed“-Modus Nachrichten an die Fahrzeuge auf jeden Fall überprüft und weitergeleitete Nachrichten nur mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit, um Ressourcen zu schonen. Bei Unstimmigkeiten wird in den „check-all“-Modus gewechselt bei dem alle Nachrichten geprüft werden.

- **Zurechenbarkeit**

Die Zurechenbarkeit ist für die Abrechnung von Dienstnutzung besonders relevant und somit beispielsweise für die Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren, die durch das Entfallen von Ökosteuern für Verbrennungsmotoren als steuerliche Kompensation künftig an Relevanz gewinnen dürfte.

- **Privatsphäre**

Schutz des Nutzers im Sinne bestehender Datenschutzregelungen. Anforderungen der neuen europäischen DSGVO sind zu berücksichtigen. Teile oder die gesamten Kommunikationsvorgänge sollen geheim gehalten werden. Dies erfolgt durch die Wahrung der Anonymität, bei der Nutzerverhalten zwar weiterhin identifizierbar bleibt aber nicht unter einer wahren Identität.

Die Wahrung der Privatsphäre ist vor dem Hintergrund der sich ständig erneuernden Datenschutzgesetze wie der Neueinführung der DSGVO Bedeutung beizumessen. Im Regelfall finden sich netzwerkbasierende Lösungen in welchen personenbezogene Daten beispielsweise in eine Cloud geleitet werden und damit nicht mit vollständig geleitet werden. WLAN-basierte Verfahren wie IEEE 802.11p oder LTE-V2X Direct Communications arbeiten nicht netzwerkbasierend und sind daher aus datenschutzrechtlicher Sicht besonders geeignet [Vgl. 5].

Mehr Sicherheitsmechanismen führen zu mehr Aufwand, die sich in höherer Latenzzeit, also höheren Reaktionszeiten, widerspiegeln. Es muss mittelfristig ein Kompromiss zwischen Systemleistung und Angriffssicherheit gefunden werden [Vgl. 6].

4.2.5 Sicherstellung der Gesamtsystemfunktionalität durch Vorab-Tests

Unter Einhaltung aller Spezifikationen muss sukzessive und spätestens vor Inbetriebnahme die Funktionalität des Gesamtsystems sichergestellt werden. Die Funktionalitätsüberprüfung besteht aus mehreren Teilen [Vgl. 49]:

- **Messung der Empfangsreichweiten**

Es soll festgestellt werden, ob und in welchem Radius Nachrichten ausgetauscht werden. Die Qualität der infrastrukturseitigen Installationen wie RSU kann nach Empfangsreichweite beurteilt und im Anschluss durch ggf. veränderte Positionierung verbessert werden. Das DLR besitzt ein Forschungsfahrzeug mit Messeinrichtung, das neben der Empfangseinheit von V2X, der sogenannten On-Board-Unit (OBU), auch über eine hochgenaue Ortungsplattform und eine hochgenaue Zeitquelle zur Messung von Latenzzeiten und Empfangsposition verfügt. Abbildung 21 zeigt das Messergebnis des Forschungsfahrzeugs auf einer Forschungskreuzung in Braunschweig, welche mittig mit der Beschriftung K047 ersichtlich ist.



Abbildung 21: Messergebnis von RSU-Reichweiten an einer Forschungskreuzung [49]

Die Reichweite in Ost-West-Richtung fällt groß aus und übertrifft die vom DLR erwartete Reichweite von ca. 300m. Zudem können Sender und Empfänger trotz nicht vorhandener Sichtlinie kommunizieren. Die geringere Nord-Süd-Reichweite ist auf lokale bauliche Bedingungen zurückzuführen: bauliche Rahmenbedingungen sind im urbanen Umfeld jedoch nicht kurzfristig abzuändern und stellen mit den daraus resultierenden Abschattungen bzw. geringeren Empfangsreichweiten ein Problem der V2X-Kommunikation im städtischen Umfeld dar.

Kurzfristig können im Falle schlechter Messergebnisse lediglich Schilder versetzt, Antennenpositionen verändert, der Grünbewuchs regelmäßig zurückgeschnitten oder gar eine andere Routenführung gewählt werden.

- **Durchführung von Interoperabilitätstests**

Die infrastruktur- und fahrzeugseitigen Systeme müssen die V2X-Informationen nicht nur empfangen, sondern auch dekodieren und inhaltlich richtig dekodieren können. Sobald dies erfolgreich festgestellt wurde, können die Anwendungen bis zur Inbetriebnahme eingefroren werden, um sie nicht erneut testen zu müssen [Vgl. 49].

- **Abnahmetests kooperativer Systeme**

Fehlfunktionen im laufenden Betrieb führen zu verringerter Nutzerakzeptanz. Um die Funktion einer Applikation beurteilen zu können, muss zuerst das erwartete Soll-Verhalten festgelegt werden. Insbesondere muss spezifiziert sein, unter welchen Randbedingungen die Applikation gut arbeitet und unter welchen Ausprägungen sie schlecht arbeitet. Im Anschluss kann das Messergebnis iterativ unter Abwandlung der Parameter verbessert werden.

Für die Durchführung von solchen Vorab-Tests ist wie bereits erwähnt ein Probefahrzeug notwendig, das die verkehrstechnische und informationstechnischen Anforderungen überprüft. Ein solches Fahrzeug wird derzeit im Rahmen des Projekts SmartLoad [Vgl. 74] am Institut für Fahrzeugsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie entworfen und müsste für den konkreten Anwendungsfall um weitere Komponenten erweitert werden. Das DLR verfügt über ein vergleichbares Fahrzeug [Vgl. 49].

5 Entwicklung einer Methode zur Infrastrukturbewertung

Eine Methode beschreibt eine festgelegte Art des Vorgehens [Vgl. 39]. Somit werden im Folgenden keine konkreten Lösungen für etwaige fehlende Voraussetzungen oder identifizierte Defizite erarbeitet, sondern Schwachstellen identifiziert.

Ziel ist die letztendliche Feststellung, ob eine Bestandsinfrastruktur für den Einsatz autonomer Busse geeignet ist oder nicht. Ein Abwägen zwischen verschiedenen Lösungsalternativen erfolgt dabei nicht, sodass übliche methodische Ansätze vereinfacht werden müssen, da diese im Regelfall zwischen mehreren Alternativen abwägen und eine Präferenzlösung ermitteln. Denn in dieser Ausarbeitung wird lediglich der Frage nachgegangen, ob sich die einzige Lösungsalternative „Betrieb autonomer Busse“ im betrachteten Raum anbietet oder nicht. Die Kriterien werden vom Vorhabenträger oder einem Expertengremium definiert und bewertet.

Die Entwicklung der Methode erfolgt unter folgenden Anforderungen:

- Es werden der kurzfristige (< 5a) und partiell der langfristige Zeithorizont (> 5a) betrachtet. In der kurzfristigen Sicht werden Kriterien behandelt, die heutige Modellregionen erfüllen müssen. Die heutigen Modellregionen zeichnen sich durch die niedrigere Automatisierungsstufe aus. Die Langfristsicht basiert auf Modellregionen höherer Automatisierungsstufen mit stärkerem Fokus auf infrastrukturellen Fragen.
- Hauptaugenmerk liegt auf der Durchführung eines kurzfristigen Buseinsatzes in den kommenden fünf Jahren.
 - Wie in vergleichbaren Modellregionen wird mit eingeschränkten Betriebszeiten gerechnet,
 - Durchführung im klassischen Linienbetrieb; flexible Bedienungsformen wie Flächen- oder Richtungsbandbetrieb werden nicht betrachtet und
 - Prüfung einer konkreten Modellregion und nicht großflächige, offene Suche nach einer Modellregion innerhalb eines großen Untersuchungsraums.
- Es wird, soweit methodisch integrierbar, nach „Muss-Kriterien“ und „Kann-Kriterien“ unterschieden. Darüber hinaus gibt es in vereinzelt Fällen noch Kriterien, die nicht erforderlich sind, aber eine sinnvolle Entwicklungsmöglichkeit bei erhöhtem finanziellen Aufwand darstellen ohne direkt für den Projekterfolg relevant zu sein („Begeisterungskriterien“).
- Nach Ampellogik werden positive Erkenntnisse grün hervorgehoben, Warnhinweise in gelb und kritische, ggf. auszuräumende Hindernisse mit roter Farbe hinterlegt.
- Da es sich bei den Kriterien um qualitative Parameter handelt und eine quantitative Bewertung mit Zielerfüllungsgraden oder Noten schwierig ist, sollen Methoden mit qualitativem Aussagecharakter zum Einsatz kommen.

5.1 Herleitung der Methode 1 – abgewandelte Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse (NWA) ist ein häufig genutztes Instrument, wenn qualitative Bewertungskriterien vorliegen. Im Folgenden wird eine von der allgemeinen NWA abgewandelte, für diesen Anwendungsfall vereinfachte Nutzwertanalyse vorgestellt:

Kriterium	Gewichtungsfaktor (%)	Zielerfüllungsfaktor (-)	Teilnutzwert (-)
Gesamtnutzwert (-)			

Abbildung 22: Muster einer Nutzwertanalyse [mit Änderungen entnommen aus 21]

Diese vereinfachte NWA ist um die Spalten von zusätzlichen Lösungsalternativen reduziert, weil im Rahmen dieser Ausarbeitung lediglich die einzige Option geprüft wird, ob die Bestandsinfrastruktur des Betrachtungsfelds für einen Einsatz autonomer Busse geeignet ist oder nicht.

Dadurch verändert sich die Aussage der Analyse, da im herkömmlichen Fall mehrere Gesamtnutzwerte errechnet werden, die miteinander verglichen werden und deren höchster Wert die vorteilhafteste Lösungsalternative darstellt. Der hier alleinstehende Gesamtnutzwert muss eine Aussage über die Vorteilhaftigkeit der einzigen Option treffen.

Zunächst müssen **Kriterien** bestimmt werden, deren Ausprägung in einem späteren Schritt bewertet werden können. Zu unterscheiden sind Muss-Zielkriterien, Kann-Kriterien und Begeisterungskriterien [Vgl. 21].

Die Kriterien sind nicht alle von gleicher Bedeutung. Zur Differenzierung gibt es den prozentualen **Gewichtungsfaktor**, der über alle Kriterien aufsummiert 100% ergeben muss. Er gibt Auskunft über die Wichtigkeit der Erfüllung des jeweiligen Kriteriums. Die Gewichtungen untereinander sind vorab durch einen Paarvergleich sukzessive gegeneinander abzuwägen. Je nach Anzahl der Kriterien kann es sich dabei um einen erheblichen Arbeitsaufwand handeln.

Im Anschluss erfolgt die Bewertung der Kriterienausprägung mithilfe des **Zielerfüllungsfaktors**. Er verdeutlicht, wie gut das jeweilige Kriterium aus Sicht des Vorhabenträgers heutzutage erfüllt ist bzw. in Zukunft erfüllt sein wird. Die Punktevergabe

kann wegen der rein qualitativen Aussagekraft auf vereinfachte Weise subjektiv und durch einen bzw. mehrere Experten vergeben werden. Die Bewertung empfiehlt sich mit weit gestuften Schulnoten nach der umgekehrten deutschen Schulnotenlogik. Durch die deutliche Abstufung werden eindeutige Aussagen erzielt. Und durch die umgekehrte Logik (6 = sehr gut, 1 = sehr schlecht) haben Gewichtungsfaktor (große Zahl = gut) und Zielerfüllungsfaktor (große Zahl = gut) die gleiche „Werterichtung“ (große Zahlen = gut).

Die rein qualitativen Aussagen der vorliegenden Ausarbeitung lassen keine feingliedrigeren Bewertungsabstufungen zu, ohne dabei ansonsten einen Anspruch auf Scheingenauigkeit zu wecken. Die vereinfachten Zielerfüllungsfaktoren für den vorliegenden Fall im Überblick:

- **Zielerfüllungsfaktor mit Schulnote 6:** sehr gute Erfüllung des Zielkriteriums ohne nennenswerte Einschränkungen. Die Anforderungen sind bereits zum heutigen Tage vollwertig erfüllt, werden planmäßig in der nächsten Zeit umgesetzt oder können ohne hohen Aufwand in naher Zukunft umgesetzt werden.
- **Zielerfüllungsfaktor mit Schulnote 3:** befriedigende Erfüllung des Zielkriteriums mit Abstrichen bei der Realisierung. Die Anforderungen sind heute schwach erfüllt, werden im Mittelfristhorizont unter Umständen umgesetzt oder können unter realistischen, aber anspruchsvollen Rahmenbedingungen in Zukunft umgesetzt werden.
- **Zielerfüllungsfaktor mit Schulnote 1:** ungenügende Erfüllung des Zielkriteriums. Die Anforderung wird zum heutigen Tage in keiner Weise umgesetzt. Eine Realisierung ist in Zukunft nicht geplant oder kann selbst in ferner Zukunft nicht ohne erheblichen Aufwand umgesetzt werden.

In der vierten Spalte werden nun zeilenweise **Teilnutzwerte** errechnet, indem zeilenweise der Zielerfüllungsfaktor mit seinem Gewichtungsfaktor multipliziert wird. Die über die letzte Spalte aufsummierte Teilnutzwerte ergeben den gewichtete Gesamtnutzwert (also die „Gesamtnote“), der ebenfalls in der Schulnotenlogik einen Wert mit einer Nachkommastelle zwischen 1 und 6 ergeben wird:

- **Gesamtnutzwert zwischen Schulnote 6,0 und 5,1:** das Projekt hat sehr hohe Chancen auf Realisierung und trifft dabei auf geringe Realisierungswiderstände. Die infrastrukturellen Anforderungen werden erfüllt. Es sind kaum oder nur kleine Anpassungen vorzunehmen, die kurzfristig umsetzbar sind.
- **Gesamtnutzwert zwischen Schulnote 5,0 und 4,1:** das Projekt ist prinzipiell realisierbar. Es bestehen infrastrukturelle Anforderungen, die vor Realisierung umgesetzt werden. Diese Anpassungen scheinen jedoch kurz- bis mittelfristig umsetzbar.

- **Gesamtnutzwert zwischen Schulnote 4,0 und 1,0:** das Projekt steht mittleren bis hohen Realisierungswiderständen entgegen. Die infrastrukturellen Anforderungen werden kaum bis gar nicht erfüllt. Die Anpassungen bedürfen hohen finanziellen Mitteln.

5.2 Herleitung der Methode 2 – angepasstes Flussdiagramm

Das Flussdiagramm, auch als Entscheidungsbaum oder Flowchart bekannt, läuft schrittweise durch Beantwortung einfacher Teil-Fragestellungen ab. Je nach Komplexität kann es sich um Ja-/Nein-Entscheidungen, individuelle Antwortmöglichkeiten je Abfragekriterium oder mehrere Antwortmöglichkeiten handeln. Damit eignet sich das Flussdiagramm ebenfalls für Ausarbeitungen mit rein qualitativem Aussagecharakter. Ein Flussdiagramm kann aus folgenden Operatoren bestehen:

- Anfangs-/Endfeld in langer Ovalform
- Fragestellung in Rautenform
- Ergebnisfeld in Rechteckform
- Kommentarfeld (u.U.) in Rechteckform
- Entscheidungskanten mit Ja/Nein-Auswahlpfad

Abbildung 23 zeigt ein Anwendungsbeispiel für einen einfachen Entscheidungsbaum mit der Fragestellung, ob eine Abschlussarbeit abgabefertig ist oder nicht:

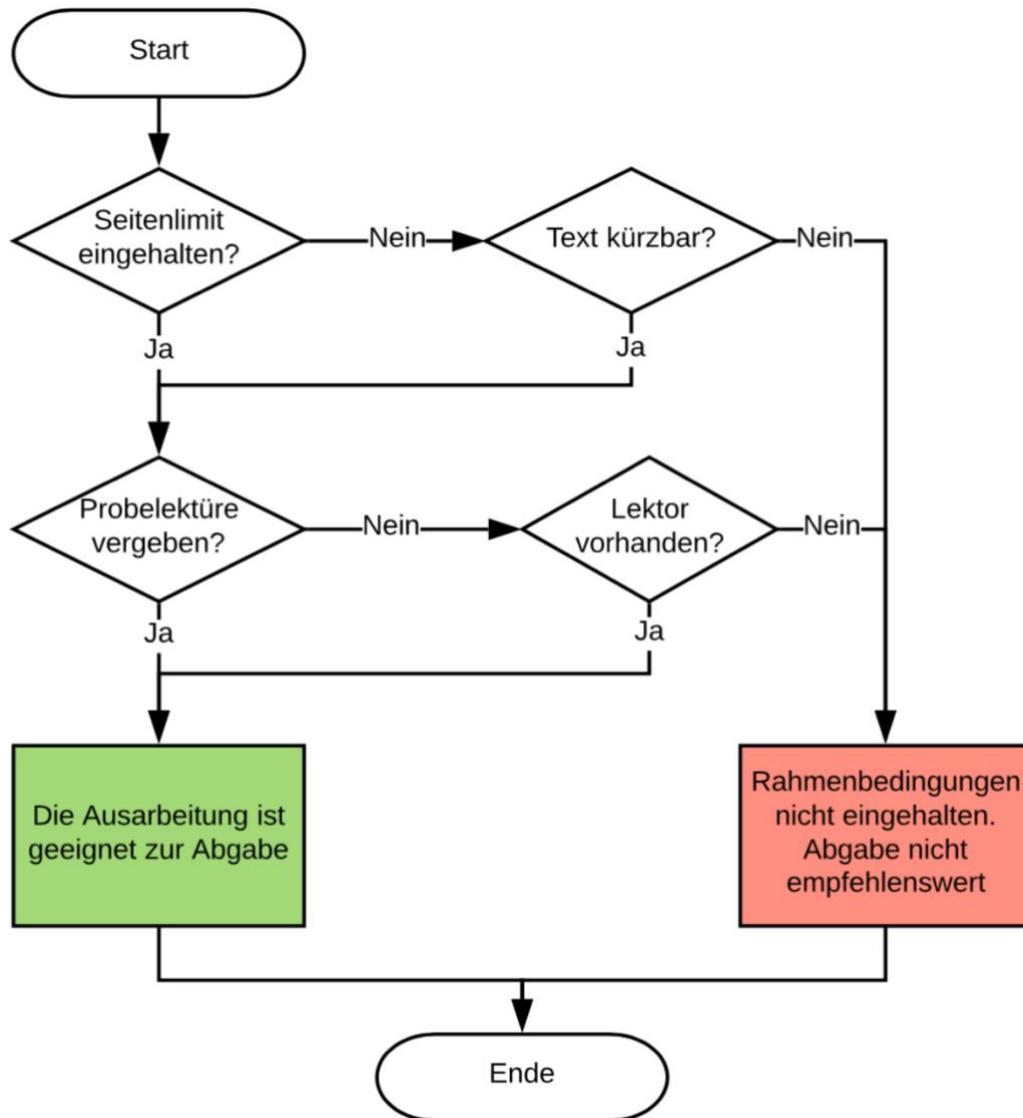


Abbildung 23: Exemplarischer Entscheidungsbaum (eigene Darstellung aus lucidchart.com)

Es bedarf bereits in diesem Beispiel einer streng hierarchischen Struktur, um in systematisch richtiger Reihenfolge zu einer Entscheidung zu gelangen. Die Komplexität ist bei der vorliegenden Aufgabenstellung dieser Ausarbeitung sehr hoch.

Eine Gewichtung der einzelnen Abfragekriterien ist möglich, stellt jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall einen sehr hohen Arbeitsaufwand dar und erweist sich somit als nicht zweckmäßig. Zunächst muss die Frage definiert sein, zu der das Flussdiagramm eine Antwort liefert. Bei vielen Abfragekriterien entstehen voneinander abhängige Fragestellungen und Ergebnisfelder. Zur besseren Darstellung sollten thematische Cluster gebildet werden, die in unterschiedliche Datenblätter aufgetrennt werden. Dadurch reduziert sich die Komplexität für den Leser: man wird durch die Fragen geleitet und der Entscheidungsweg ist nachvollziehbar. Es wird jeweils ein Attribut abgefragt und eine Entscheidung getroffen. Sukzessive gelangt man weiter nach unten, also tiefer, in den Entscheidungsbaum bis das Ende erreicht ist und

damit die Teilentscheidung für das Teilcluster-Themenpaket feststeht, bis man durch mehrere Blätter die Gesamtentscheidung erlangt [Vgl. 54].

5.3 Methodenabwägung und Wahl der Methode

Methode 1, die vereinfachte NWA, besticht zunächst durch die klare Gliederung im Bewertungsschema und die transparente, zahlenbasierte Berechnung des Gesamtergebnisses. Zudem kann die Ausarbeitung „barrierefrei“ an fast allen Computern über gängige Tabellenprogramme (z.B. Microsoft Excel) erfolgen. Da es sich bei der Ausarbeitung aber weiterhin um einen rein qualitativen Aussagecharakter handelt, zeigen sich folgende Nachteile der vereinfachten NWA:

- Die Bewertung der Prüfkriterien und die Festlegung der Gewichtungsfaktoren sind subjektiv, haben jedoch maßgeblichen Einfluss auf die Aussage des Gesamtergebnisses. Für mehr Objektivität müsste aufwändig mit einem Expertengremium diskutiert werden.
- Selbst die stark abgestufte deutsche Schulnotenlogik täuscht eine Bewertungsgenauigkeit vor, die durch die subjektive Einschätzung der Punkte durch den Vorhabenträger nicht existiert.
- Die Spalten des Eintragungsformulars bilden selten die richtigen Fragestellungen zum jeweiligen Zielkriterium ab, da sie individuell verschieden sind und führen dazu, dass die Bewertung im Durchschnitt schlichtweg nicht zutreffend abgebildet ist.
- Die Zeithorizonte (kurzfristig und mittel- bis langfristig), sowie die verschiedenen Kriterienkategorien (Kann-, Muss-, Begeisterungskriterien) lassen sich durch den Gewichtungsfaktor nicht adäquat abbilden.
- Die Bewertungen je Zielkriterium sind individuell und bedürfen der Kommentierung, die das Tabellenblatt unübersichtlich machen. Platz für Kommentare ist zudem nicht vorhanden.
- Die große Anzahl an Kriterien führt zu einem Datenblatt mit verschiedenen Bewertungsebenen, das erst nach genauem Studieren gedanklich zugänglich ist. Der Leser wird nicht durch die einzelnen Prozessschritte geführt. Dafür sind ergänzende Kommentare notwendig.
- Auch für die Öffentlichkeit ist die Entscheidung anhand der Zahlenwerte schwer nachvollziehbar. Für die Entscheidungsgrundlage müssen ergänzend Begründungen beigelegt werden [Vgl. 21].

Methode 2, das angepasste Flussdiagramm, überzeugt durch einen klaren Weg zur Entscheidungsfindung. Der Vorhabenträger kann sich an einem festen Schema orientieren, wird durch Fragen auf Defizite und späteren Handlungsbedarf hingewiesen. Kommentare können in das Flussdiagramm integriert werden. Nachteilig sind dennoch:

- der erhebliche Arbeitsaufwand für die Erstellung des Flussdiagramms durch das Aufsplitten der Fragestellungen auf viele einzelne Datenblätter bei gleichzeitiger Wahrung logischer Verknüpfungen
- der Einsatz eines speziellen Programms (z.B. Microsoft Visio), sodass nicht viele Akteure barrierefrei mit diesem Produkt arbeiten können. Zur Wahrung der Barrierefreiheit kann für diese Ausarbeitung das web-basierte Tool „lucidchart“ genutzt werden, das einen Export in PDF-Format ermöglicht
- die mangelnde Anpassungsfähigkeit bzw. der hohe Anpassungsaufwand im Falle von Änderungen der (z.B. technischen) Rahmenbedingungen
- Zeithorizonte, wie in dieser Ausarbeitung mit „kurzfristig“, „mittelfristig“, „langfristig“ sind schwer einbeziehbar. Dies gelingt bestenfalls über Kommentarfelder oder über Gewichtung der einzelnen Fragestellungen. Bei komplexen Abfragestrukturen kann nicht jede einzelne Fragestellung mit Gewichtung gegen alle anderen Fragestellungen abgewogen werden.

Letztendlich setzt sich für diesen Anwendungsfall das Flussdiagramm knapp vor der Nutzwertanalyse durch, da es zwar erstellungsaufwändig aber später sehr anwenderfreundlich ist. Methodisch sollen die Fragestellungen nur mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden und über das anschließende Ergebnisfeld kommentiert werden.

Das verwendete Flussdiagramm in dieser Ausarbeitung sieht exemplarisch wie folgt aus:

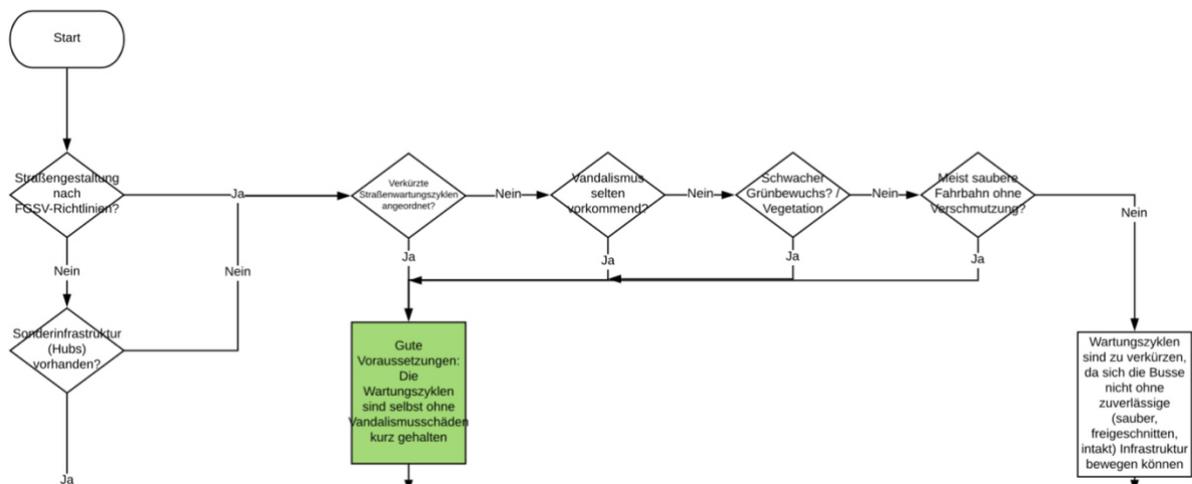


Abbildung 24: Exemplarisches Flussdiagramm (eigene Aufnahme aus lucidchart.com)

Neben den ovalen Start- und Endoperatoren, werden die rautenförmigen Elemente für Fragestellungen verwendet und die rechteckigen Elemente als farblich hinterlegte Kommentarfenster. Grüne Hintergrundfarbe der Elemente deutet auf positive, gelb auf neutrale und rot auf negative Feststellungen hin. Antworten mit „Ja“ implizieren eine positive Feststellung, verneinte Antworten hingegen eine Negative.

Die im Rahmen dieses Kapitels schlussendlich erarbeitete Methode ist im Praxisteil in Kapitel 6 ersichtlich.

6 Autonome Busse als Zubringer zum SPNV

Der Einsatz autonomer Fahrzeuge wird einen disruptiven Effekt auf den Öffentlichen Nahverkehr haben, der heutige Muster und Modelle grundlegend in Frage stellt. Autonome Fahrzeuge werden im Allgemeinen die Grenzen zwischen Öffentlichem und Individualverkehr verschwimmen lassen, da ein autonomes Fahrzeug als Privatfahrzeug, als Sharing-Fahrzeug oder als Bus genutzt bzw. eingestuft werden kann. Entweder werden sie Teil des öffentlichen Verkehrssystems oder stellen die Existenz des öffentlichen Verkehrs in Frage. Verkehrsunternehmen müssen sich daher bereits heute intensiv mit dem Einsatz autonomer Fahrzeuge und dessen Auswirkungen beschäftigen. Wohingegen Experten auch in Zukunft den ÖPNV in Städten als alternativlos ansehen, werden ländliche Verkehre in ein paar Jahren anders abgewickelt. Verkehrsunternehmen sollen bereits heute Chancen nutzen und Risiken entgegenwirken [Vgl. 91].

6.1 Status Quo

In Randgebieten verkehren neben Bussen und Bahnen in Deutschland heutzutage auch sogenannte Ruftaxis. Auf sie soll im Folgenden detaillierter eingegangen werden. Sie werden lokal jeweils anders genannt und haben lokalspezifische Ausprägungen. Stellvertretend sollen Angebote im Raum Stuttgart betrachtet werden.

Ruftaxis finden sich oftmals auch unter dem Begriff Anruflinientaxi (ALT) und können als Spezialprodukt des Linienbetriebs gesehen werden, da sie üblicherweise nach Fahrplan und in Zeiten und Räumen schwacher Nachfrage verkehren, also insbesondere abends und in ländlichen Gebieten und nur bei Bedarf, also nur bei getätigter Vorbestellung. Der klassische Linienbetrieb wird auf diese Art und Weise durch eine Vielzahl von Ruftaxis ergänzt, die auch außerhalb der Linienbus-Betriebszeiten Anschlüsse auf die S-Bahn in der Region herstellen. Die Ruftaxis sind montags bis sonntags in den Nachtstunden im Einsatz – deren Betriebszeiten eignen sich abgesehen von der Dunkelheit, um den Betrieb autonomer Busse schrittweise zu erproben [Vgl. 77], [Vgl. 139].

Bereits zum heutigen Zeitpunkt sind Buchungen über eine App möglich. In Stuttgart starten Ruftaxis an Bahnhöfen und lassen Fahrgäste wiederum an regulären Bushaltestellen (Kerngedanke des Linienbetriebs) oder auf Bedarf auch zwischen regulären Haltestellen aussteigen (Gedankenansätze des Richtungsband- bzw. Flächenbetriebs).

Neben den Ruftaxis/ALT gibt es Anrufsammeltaxis, die dem künftigen Einsatzstandard von autonomen Bussen noch stärker ähneln. Das Anrufsammeltaxi hat die Kerncharakteristika des ALT, fährt jedoch ohne festen Fahrplan in einem definierten Bedienungsgebiet und entspricht

somit dem Kerngedanken von Richtungsband- bzw. Flächenbetrieb. Die konkrete Abfahrtszeit und die Fahrroute werden von einer Zentrale ermittelt [Vgl. 75].

In autonomen Bussen wird von vielen Seiten, unter anderem auch von Siemens, viel Potential gesehen. Als Ersatz bisheriger ALT/AST/Ruftaxis können sie die letzten Meter zwischen Bahnhof und Haustür bedienen [Vgl. 77], [Vgl. 145].

Wie auch der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) feststellt, müssen die Verkehrsunternehmen im Rahmen von Modellprojekten unter Beweis stellen, dass sich autonome Fahrzeuge beim Ersatz von Ruftaxis, ALT oder AST oder allgemeiner beim Einsatz als autonome Shuttles eignen und sich in bestehende Strukturen eingliedern lassen. Gleichzeitig müssen sich die Verkehrsunternehmen auch als wandlungs- und anpassungsfähige Partner der öffentlichen Hand zeigen indem sie solch neuartigen, mutigen Vorhaben erfolgreich umsetzen, obwohl diese ihr eigenes Geschäftsmodell konterkarieren [Vgl. 91].

6.2 Vorteile autonomer Busse gegenüber herkömmlichen Angeboten

Unabhängig von der Fragestellung welche Leistungen autonome Busse übernehmen können und in welchem Zeithorizont welche Leistungen sukzessive von manuellen an autonome Fahrzeuge übergeben werden, bieten selbstfahrende Busse Vorteile gegenüber den heute bekannten Angeboten:

- Heutige Angebote stellen mit dem meist vorzufindenden Linienbetrieb ein starres Angebot dar, da sie fahrplangebunden, streckengebunden oder unter Einhaltung einer Vorausmeldefrist verkehren. Autonome Busse können Fahrgäste mittels flexiblerer Betriebsformen nachfrageorientiert mit flexiblem Linienweg und unter kurzer Vorausbuchungsfrist befördern.
- Autonome Busse der bisherigen Testfelder werden elektrisch betrieben. Unabhängig von der gesamtenergetischen Betrachtung des Produktlebenszyklus und der Frage der Energieherstellungsart fahren die Fahrzeuge im Gegensatz zu heutigen Fahrzeuge lokal emissionsarm.
- Verkehrsunternehmen leiden deutschlandweit unter Fahrermangel. Durch autonome Fahrzeuge können Mitarbeiter entlastet werden indem diese aufgrund einer knappen Personalausstattung nicht planmäßig Überstunden leisten müssen. Die Mitarbeiterzufriedenheit steigt mittelfristig.
- Autonome Busse verkehren nur, wenn Bedarf besteht und greifen dazu nicht auf Fahrpersonal zurück: durch den sparsameren Einsatz finanzieller Mittel kann das Angebot des öffentlichen Verkehrs bei gleichbleibendem Mitteleinsatz ausgebaut werden.

- Bislang auslastungsschwaches Angebot kann langfristig gesichert werden, da die Transportgefäße flexibel eingesetzt werden können und sich durch den entfallenden Fahrereinsatz Kosten senken.

Aufgrund dieser Charakteristika stellen autonome Busse einen Gegenpol zur möglicherweise steigenden Anzahl autonomer Individualfahrten in der Zukunft dar. Die Zuwachsrates des Individualverkehrs kann somit auf ein Mindestmaß reduziert werden.

6.3 Vorstellung Modellregionen

Im Folgenden sollen die beiden Modellregionen vorgestellt werden, mit deren Hilfe die erarbeitete Methode auf ihre Anwendbarkeit und Sinnhaftigkeit überprüft werden soll. Je Modellregion wird zudem kurz dargelegt, wieso dieses Testfeld gewählt wurde und wie die Eigenheiten des Betrachtungsraums sind. Mit ausgewählten Bildaufnahmen soll auf kritische Gegebenheiten in der Infrastruktur hingewiesen werden. Nicht alle informationstechnischen Aspekte können zweifelsfrei durch Literaturrecherche und Vor-Ort-Besuche validiert werden. Die Erfahrungen aus Bad Birnbach (2019a) zeigen, dass ein Testfeld aus politischen Erwägungen in Betracht gezogen wird und gleichzeitig minimale infrastrukturelle Anpassungen erfordern soll. Straßenzüge, in denen eine schlechte GPS-Abdeckung, ein schlechter Mobilfunkempfang und eine desolate Fahrbahnmarkierung vorzufinden sind, sollen von Anfang an gemieden werden.

Die Ausarbeitung verfolgt aus Komplexitätsgründen keinen explorativen Ansatz zur Findung von Modellräumen – es werden keine freien Räume gesucht in denen autonome Fahrzeuge prinzipiell zum Einsatz kommen könnten, sondern es werden im Raum stehende Vorschläge aufgegriffen bzw. bestehende Angebote des Öffentlichen Verkehrs auf die Wandelbarkeit in autonome Verkehre untersucht. Das Untersuchungsgebiet wird möglichst klein gehalten, da mit jedem einzelnen Straßenzug eine separate Bewertung der Infrastruktur mittels Flussdiagramm zu erfolgen hat.

6.3.1 Modellregion Leonberg

Diese Modellregion wurde aufgrund eines Zeitungsartikels gewählt, in dem sich die Stadt Leonberg mit der Etablierung eines autonomen Shuttles beschäftigt. Wie in vielen anderen deutschen Städten wurden für die Konzeptionierung und Erprobung des Testbetriebs für autonome Busse ein hoher Betrag im Haushalt eingestellt. Zwar sei man offen bei der Route, nannte in dem Artikel jedoch unter anderem eine in Frage kommende Relation, die von einem Einkaufszentrum (Leo-Center) in die nahegelegene Altstadt mit weiteren Geschäften führt und in dieser Ausarbeitung als Exempel dienen soll. Die Teststrecke weist mit ihrer geringen Anzahl von Zwischenstationen und einer begrenzten Rundkurslänge eine für autonome

Testfelder übliche Shuttle-Charakteristik auf [Vgl. 134]. Die Route ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

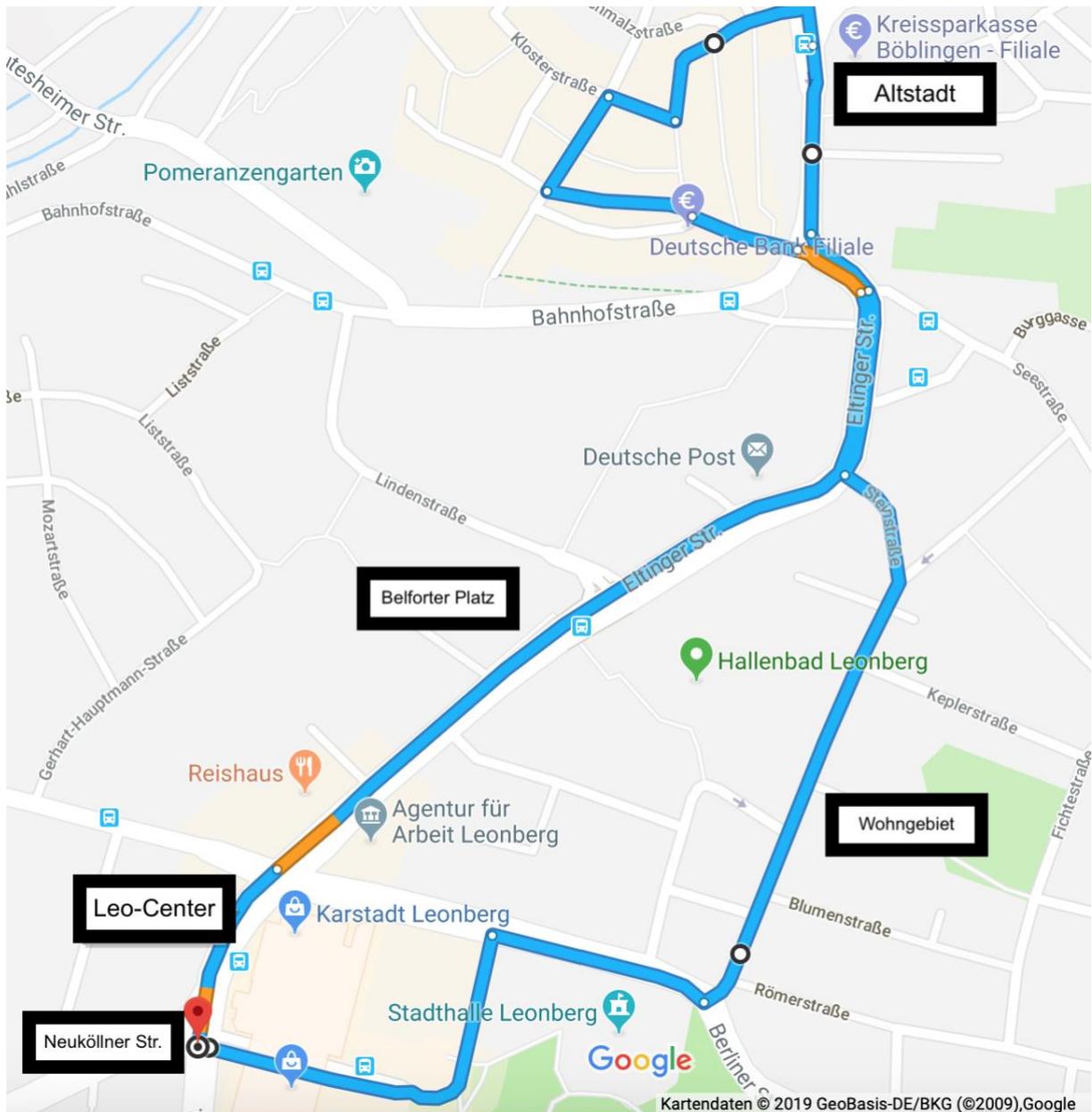


Abbildung 25: Routenverlauf Modellregion Leonberg (Quelle: Google Maps)

- Die Streckenlänge beträgt je nach gewähltem Routenverlauf ca. 3 km hin und zurück. Der Zeitungsartikel machte keine genauen Angaben über den Routenverlauf, sodass ein Routenverlauf gewählt wurde, der einerseits sinnvoll und andererseits bewusst auch an kritischen Stellen vorbeiführt.
- Für die Haltestelle Leo-Center ergeben sich mehrere Wendemöglichkeiten. Es wird die weniger frequentierte Neuköllner Straße mit bereits bestehender Bushaltestelle und direktem Zugang zum Einkaufszentrum gewählt (Abbildung 26).



Abbildung 26: Haltestellensituation Eltingen Leo-Center (eigene Aufnahme)

- An der in Abbildung 26 gezeigten Bushaltestelle „Eltingen Leo-Center“ startet das Fahrzeug nach Verlassen der Haltestelle mit einer infrastrukturell vorgesehenen 180°-Wende in die Gegenrichtung. Die Haltestellenbucht stellt für das Befahren durch autonome Busse kein Probleme dar. Zwar stellt ein moderner, vorgezogener Haltestellenkap mit gerader Haltelinie aus Fahrgastsicht einen Vorteil dar, aber das Fahrzeug kann ebenso in klassische Haltebuchten einfahren (2019a). Die Wendemöglichkeit ist in Abbildung 27 ersichtlich:



Abbildung 27: Wendemöglichkeit Höhe Neuköllner Str. (eigene Aufnahme)

- Es wird ein Routenverlauf durch ein Wohngebiet gewählt, um die Geschwindigkeiten (30 km/h im Wohngebiet und maximal 15 km/h fahrzeugseitig) anzugleichen. Das Fahrzeug verlässt die Neuköllner Straße und biegt rechts in die Römerstraße ein. Nach wenigen Metern biegt es links in die Steinstraße ein. Die Steinstraße kann beidseitig befahren werden. Trotz absolutem Halteverbot ist eine Fahrspur durch dauerhaft parkende Fahrzeuge nicht befahrbar. Bei der Besichtigung kam es zu Fahrsituationen in denen ein entgegenkommendes Fahrzeug zurücksetzen musste. Eine Mittelmarkierung fehlt zudem. Im gesamten Wohngebiet herrscht die Vorfahrtsregelung Rechts-vor-Links:



Abbildung 28: Wohngebiet im Gebiet Steinstraße (eigene Aufnahme)

- Innerhalb des Wohngebiets existieren keine Bestandshaltestellen. Mögliche weitere Haltestellen sind nicht Bestandteil der Betrachtung. Am Ende des Wohngebiets endet die „Tempo-30-Zone“, es besteht keine Fahrbahnmittelmarkierung und es wird rechts in die Eltinger Straße eingebogen und deren Verlauf weiter gefolgt:



Abbildung 29: Einbiegesituation von Steinstraße auf Eltinger Straße (eigene Aufnahme)

- Die Eltinger Straße ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Verkehrszeichen, teilweise verbogen (rechts auf untenstehender Abbildung ersichtlich). Die direkt nach dem Einbiegen auf die Eltinger Straße abzweigende Rechtsabbiegerspur ist nicht durchgängig durch Fahrbahnmarkierungen eingeleitet. Die Durchgängigkeit ist nicht gegeben:



Abbildung 30: Eltinger Straße mit verbogenen Verkehrszeichen und lückenhafter Beschilderung (eigene Aufnahme)

- An der abknickenden Vorfahrtstraße fährt das Fahrzeug geradeaus in den verkehrsberuhigten Altstadtbereich. Der Fahrbahnbelag (Abbildung 31) wechselt auf Pflasteroberbau. Bad Birnbach hat keine Probleme beim Befahren von Pflastersteinen mit autonomen Bussen. Dennoch muss die Eindeutigkeit der Verkehrssituation hergestellt werden: die Abbildung zeigt bereits, dass der gepflasterte Fußgängerweg und die gepflasterte Fahrbahndecke weder Kontraste noch bauliche Abgrenzbarkeit durch unterschiedliche Fahrbahnhöhen bieten. Dies war vermutlich beim Anlegen dieses des Straßenquerschnitts aufgrund des verkehrsberuhigten Bereichs stadtplanerische Intention. Für menschlich gesteuerte Fahrzeuge stellt der Querschnitt keine Schwierigkeit dar; der autonome Bus kann jedoch kaum Unterschiede zwischen Fußgängerweg und Straßenfahrbahn detektieren. Die ungewollte Mitnutzung des Fußgängerwegs ist zu unterbinden. Bad Birnbach hat dazu gelbe Baustellenmarkierungen für die Zeit des Testfelds angebracht (2019a). In Folge müsste auch in diesem Bereich auf die Eindeutigkeit der Fahrsituation durch das Herstellen von durchgängigen seitlichen Fahrbahnmarkierungen geachtet werden.



Abbildung 31: Fahrbahnbelagwechsel im Altstadtbereich (eigene Aufnahme)

- Die Haltestelle im Altstadtbereich verfügt über einen gepflasterten Fahrbahnbelag. Bis vor wenigen Monaten existierte eine Schranke, sodass die Fahrzeuge des Öffentlichen Verkehrs per Schrankenberechtigung exklusiv den Altstadtbereich befahren konnten. Die Schranke ist im Rahmen der Ortsbesichtigung nicht mehr vorhanden und wurde durch reguläre Leitpfosten ersetzt. Für eine Aufnahme des Fahrbetriebs durch autonome Busse sollte die Befahrbarkeit des Innenstadt-Altstadtbereichs durch diese Fahrzeuge mittels Schrankenberechtigung erneut geprüft werden.
- Der Bus verlässt die Altstadt aufgrund der beschränkten Fahrbahnbreite und der daraus resultierenden Einbahnstraßensituation in Form eines Rundkurses. Von der Graf-Ulrich-Straße aus der Altstadt kommend wird auf die stark frequentierte Grabenstraße der Rückweg angetreten. Es folgt mit kurzem Abstand die Bestandshaltestelle Leonberg Altstadt:



Abbildung 32: Grabenstraße mit Haltestellensituation Leonberg Altstadt (eigene Aufnahme)

- Die Fahrt wird auf der Grabenstraße fortgesetzt. Es wird der abknickenden Vorfahrtstraße aus Abbildung 33 weiter im Verlauf der Eltinger Straße gefolgt. Auf der Kreuzung existieren keine Hilfslinien.



Abbildung 33: Abknickende Vorfahrtstraße Grabenstraße - Eltinger Straße (eigene Aufnahme)

- Im weiteren Verlauf kann der Rückweg nicht über das Wohngebiet erfolgen, da von der Eltinger Straße aus kommend kein Abbiegen in das Wohngebiet möglich ist wie auf dem Hinweg. Die Fahrt wird daher auf der inzwischen vierspurigen Fahrbahn fortgesetzt:



Abbildung 34: Vierspurige Eltinger Straße (eigene Aufnahme)

Auf der Abbildung ist zu sehen, dass sich die vierspurige Straße auf zwei Spuren verengt. Trotz klar markierter Absperrflächen ist die fahrzeugseitige Umsetzbarkeit zu prüfen.

- Im Anschluss folgt die Bestandshaltestelle Belforter Platz. Die folgende Abbildung zeigt die beidseitig vorhandenen Haltestellen am Belforter Platz. Wohingegen die moderne, auf der anderen Straßenseite befindliche Haltestelle mit klarer Markierung kein Problem darstellt, wäre die im Bild nahe, ältere Haltestelle ohne Markierung und schlechten Kontrasten durch entsprechende Markierungen zu ergänzen.



Abbildung 35: Zwei Bestandshaltestellen unterschiedlichen Baustandards (eigene Aufnahme)

- Danach folgt eine größere, kürzlich fahrbahnsanierte, Kreuzung (Eltinger Straße / Römerstraße). Dort wird links auf die Römerstraße eingebogen und der Rundkurs um das Einkaufszentrum „Leo-Center“ eingeleitet. Nach kurzer Fahrt auf der Römerstraße biegt das Fahrzeug auf die Nebenstraße „Neuköllner Straße“ ein wo der Rundkurs von Neuem beginnt.

6.3.2 Modellregion Böblingen

Diese Region wurde gewählt, da sie ein bestehendes Ruftaxi-Angebot in der Region Stuttgart, genauer zwischen Böblingen und Dätzingen, beinhaltet und sich nach vorhergehender Definition für den Einsatz autonomer Busse eignet. Die Leonberger Modellregion ist städtisch geprägt; dahingegen ist die Böblinger Modellregion zunächst städtisch und im weiteren Verlauf ländlich anmutend. Das durchschnittliche Geschwindigkeitsniveau übersteigt 30 km/h deutlich. Die Anzahl an Bestandshaltestellen ist gemessen an der Streckenlänge gering, da das nächtliche Ruftaxiangebot gegenüber dem regulären Angebot tagsüber nur wenige Haltestellen abdeckt.

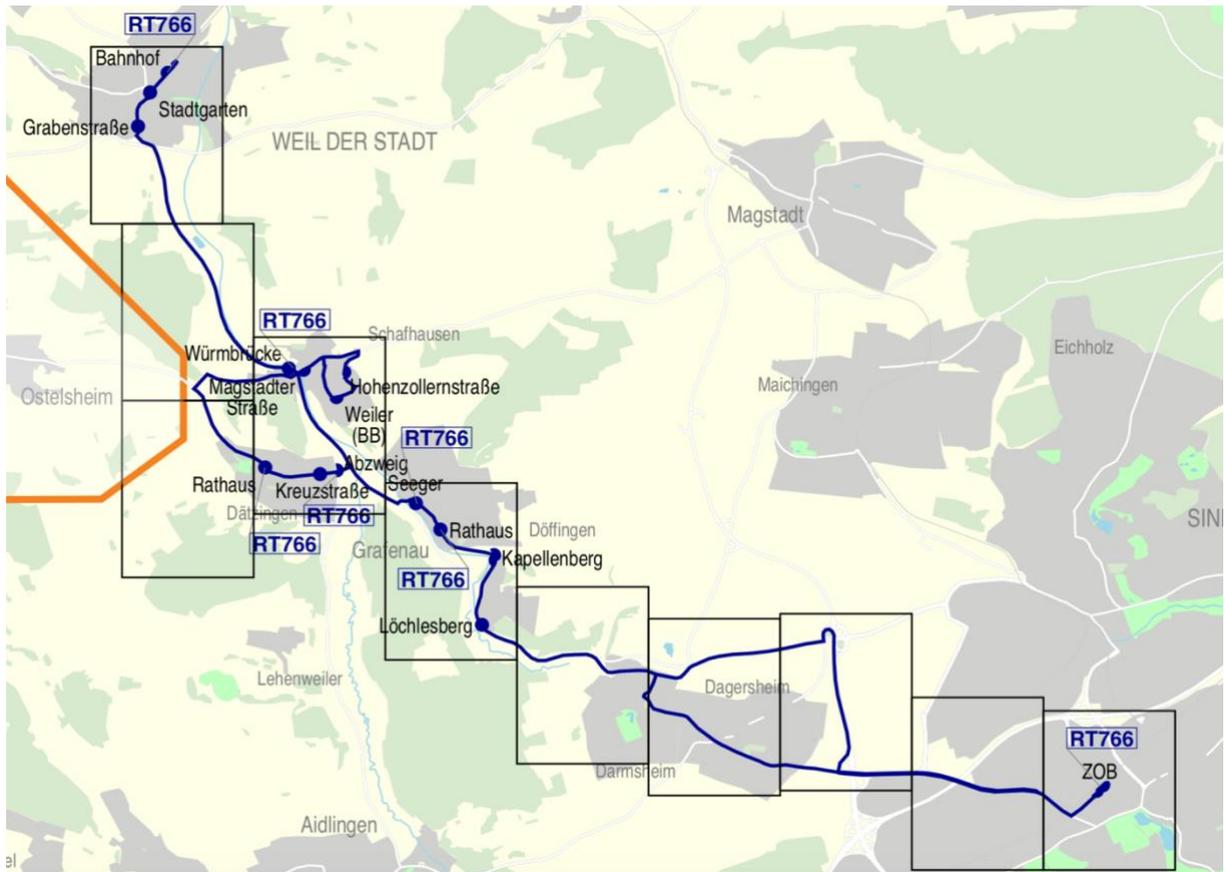


Abbildung 36: verkürzter Linienvorlauf Ruftaxi 766 Böblingen – Dätzingen (Quelle: VVS)

- Die Fahrzeit beträgt auf einfachem Wege weniger als 25 Minuten, die Streckenlänge beträgt hin und zurück rund 25 Kilometer. Wie in Abbildung 36 ersichtlich, verkehrt das Ruftaxi je nach Liniengerichtung auf abweichendem Fahrtverlauf: zur Vereinfachung wird nur der Hinweg betrachtet.
- Tagsüber verkehrt der reguläre Bus auf vollständigem Linienweg bis zur Endhaltestelle Weil der Stadt. Das hier betrachtete Ruftaxi verkehrt nachts nur auf verkürztem Weg bis zur Bestandshaltestelle Dätzingen Rathaus.

Die Route beinhaltet (außerorts) Tunnel und besteht aus anbaufreien Bundesstraßen, sodass eigene Bildaufnahmen in diesem Bereich nicht immer möglich waren. Es wird auf entsprechendes Material aus dem Internet zurückgegriffen obwohl eine Ortsbesichtigung durchgeführt wurde.

- Startpunkt ist der Zentrale Omnibusbahnhof (ZOB) von Böblingen mit etlichen Haltestegen. Es existiert keine Beschränkung, sodass kein Leitsystem benötigt wird. Der ZOB verfügt über keine Fahrbahnmarkierungen oder Hilfslinien beim Ein-/Ausfädeln in den normalen Straßenverkehr:



Abbildung 37: Haltestellensituation Böblingen ZOB (Quelle: Google Street View)

Das Fahrzeug verlässt den Bahnhofsbereich über die verkehrsberuhigte Talstraße und biegt auf die Calwer Straße ein. Auf den nächsten Kilometern handelt es sich um eine nach FGSV-Richtlinien dimensionierte, vielbefahrene vierspurige Straße mit intakter Fahrbahnmarkierung, etlichen LSA mit ÖV-Bevorrechtigungen im städtischen Umfeld. Die maximale Geschwindigkeit beträgt zunächst 50 und danach 70 km/h.

Für ein kurzes Teilstück verkehrt der Bus über die B464 mit einer Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h. Auch hierbei handelt es sich um einen vierspurigen Regelquerschnitt nach FGSV:



Abbildung 38: Regelquerschnitt B464 (Quelle: Google Street View)

Die aus dem städtischen Gebiet von Böblingen führende L1182 verfügt über intakte Fahrbahnmarkierungen. Sie ist wegen des Mercedes Benz – Werksverkehrs stark frequentiert und wird einer regelmäßigen Instandhaltung unterzogen:



Abbildung 39: Calwer Straße / L1182 (eigene Aufnahme)

Im Anschluss führt die Fahrt durch die seit 2018 für den Verkehr freigegebene Umfahrung von Darmsheim. Darin enthalten ist der einzige Tunnel der Strecke mit sehr guter Ausleuchtung, breitem einbahnigen Regelquerschnitt und intakter Fahrbahnmarkierung bei einem Tempolimit von 60 km/h:



Abbildung 40: Darmsheimer Tunnel (eigene Aufnahme)

Auf der vielbefahrenen L1182 (zulässige Geschwindigkeit bis 80 km/h in diesem Bereich) geht die Route einige Meter weiter. Danach biegt das Fahrzeug auf die schwächer befahrene Gemeindestraße „Dätzingen Straße“. Dort wird die erste Bestandshaltestelle „Löchlesberg“ nach Böblingen ZOB bedient:



Abbildung 41: Bestandshaltestelle Löchlesberg (eigene Aufnahme)

Die Haltestelle Löchlesberg befindet sich in einer Kurve und ist gut markiert.

Im weiteren Fahrtverlauf der Dätzinger Straße fehlt die Fahrbahnmittelmarkierung. Es handelt sich dabei um den einstreifigen FGSV-Regelquerschnitt RQ9 (9 Meter Fahrbahnbreite) mit leichter Abwandlung:



Abbildung 42: Dätzinger Straße (eigene Aufnahme)

Die darauffolgende Haltestelle Kapellenberg liegt ebenfalls in einer Kurve und ist gut von der Hauptfahrbahn abmarkiert. Bei der Einfädelung in die Dätzinger Straße besteht eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 70 km/h:



Abbildung 43: Haltstelle Kapellenberg (eigene Aufnahme)

Kurz vor bzw. nach dem Ortseingang von Döffingen besteht eine dauerhafte wohnhausbedingte Fahrbahnverengung auf eine Fahrbahnbreite über eine Länge von schätzungsweise 200m. Die Fahrbahn kann an dieser Stelle von beiden Seiten befahren werden. Fahrzeuge müssen aufgrund eingeschränkter Sichtweiten unter Umständen zurücksetzen:



Abbildung 44: Verengter Fahrbahnbereich Dätzinger Straße (Quelle: Google Street View)

In Döffingen darf mit maximal 30 km/h gefahren werden was für den autonomen Fahrbetrieb vorteilhaft ist. Die innergemeindliche Straße hat weiterhin keine Fahrbahnmittellmarkierung und die Bestandshaltestelle Döffingen Rathaus ist nicht von der Hauptfahrbahn getrennt:



Abbildung 45: Bestandshaltestelle Döffingen Rathaus (eigene Aufnahme)

Im weiteren Verlauf bis nach Dätzingen Rathaus konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Das bisherige Geschwindigkeitsniveau wird nicht weiter übertroffen. Es liegen keine Bereiche mit schlechter Fahrbahnmarkierung vor. Die Haltestellenbuchten sind klar erkenntlich und die Regelquerschnitte ausreichend groß. Auf weitere Bildaufnahmen wurde daher verzichtet.

6.4 Exemplarische Methodenanwendung

Die Modellregionen Leonberg und Böblingen werden anhand der erarbeiteten Methode in einzelnen Themenfeldblätter geprüft. Sie gliedern sich, analog zum Aufbau in „Anhang A“, in folgende Themenbereiche:

- Flussdiagramm „Ladeinfrastruktur“ (Anhang A 1.1)
- Flussdiagramm „Straßenausstattung“ (Anhang A 1.2)
- Flussdiagramm „Straßenraum und Straßeninfrastruktur“ (Anhang A 1.3)
- Flussdiagramm „Datenerhebung“ (Anhang A 1.4)
- Flussdiagramm „Datenübertragung“ (Anhang A 1.5)
- Flussdiagramm „Plattform und Funktionalität“ (Anhang A 1.6)

Jedes Flussdiagramm enthält Fragestellungen (Darstellung in Rautenform), die mit einer eindeutigen, einmal vorkommenden Nummer versehen sind. Diese Nummerierung dient im Folgenden dazu, die auf den Themenfeldblättern befindlichen Fragestellungen zu kommentieren und strukturiert durch die erarbeitete Methode zu führen. Die hinter dem Nummerncode stehenden Fragestellungen müssen dem im Anhang befindlichen jeweiligen Themenfeldblatt entnommen werden:

Nummer der Fragestellung	Kommentar
1.1	Heute verkehren autonome Busse der M1-Klasse auf kurzen Strecken (<10km) und erbringen Shuttle-Dienstleistungen. Größere Distanzen erfordern höheren Planungsaufwand, da auf weniger Erfahrungsschatz von umliegenden Modellregionen zurückgegriffen werden kann
1.2	Heute verkehren autonome Busse der M1-Klasse mit reduzierten Betriebszeiten. Die Busse verkehren nur bei Tageslicht und stehen tagsüber kurze Zeit still. Dadurch kann vermieden werden, dass die Kameradetektion nachts versagt. Zudem können die begrenzten Akkureichweiten durch häufigere Zwischenladungen kompensiert werden
1.3	Ladeleistungen über 50 kW ermöglichen eine Schnellladung, die separate Ladeinfrastruktur aber auch schnellere Ladevorgänge und weniger Einschränkungen im Betriebsprogramm mit sich bringen
1.4	Öffentliche Ladeinfrastruktur reduziert einerseits anfängliche Investitionen in die Ladeinfrastruktur, aber reduziert andererseits die verlässliche Verfügbarkeit der Ladesäulen: Ladevorgänge stehen stets in Konkurrenz zu Aufladevorgängen "Dritter"
1.5	Zusatzfrage in Abgrenzung zu 1.4
1.6	Zusatzfrage zur Eingrenzung der vorhandenen Ladeinfrastruktur
1.7	Zusatzfrage zur Eingrenzung der vorhandenen Ladeinfrastruktur
1.8	Zusatzfrage zur Eingrenzung der vorhandenen Ladeinfrastruktur

1.9	Zusatzfrage zur Eingrenzung der vorhandenen Ladeinfrastruktur
1.10	Die vorhergehenden Antworten implizieren, dass die Infrastruktur nicht für Schnellladevorgänge geeignet ist. Ohne Einsicht zur Langsamladung ist der Einsatz elektrischer Fahrzeuge fraglich
1.11	Zusatzfrage zur Eingrenzung der vorhandenen Ladeinfrastruktur
1.12	Kaum Zugangsmöglichkeiten zum Stromnetz. Ohne Verfügbarkeit des Stromnetzes ist ein sinnvoller Einsatz elektrischer Busse sinnlos
2.1	Standardisierung ermöglicht Förderwürdigkeit des Straßenbauvorhabens und erleichtert den massenmarkttauglichen Rollout auf anderen Straßen. Umgekehrt wird die Übernahme ähnlicher Konzepte aus anderen Modellregionen möglich. Eine Standardisierung ist daher vorteilhaft
2.2	Sonderinfrastruktur sollte für eine erstmalige Modellregion vermieden werden, da die anfängliche Komplexität durch zusätzlich notwendige Leitsysteme erhöht wird. Die Integration von Mautstationen / Schrankensystemen oder anderen Sonderlösungen sollten eine Ausbaustufe darstellen
2.3	die Straßeninfrastruktur wird zentrales Begutachtungsobjekt beim autonomen Fahren. Ihr kommt besondere Bedeutung zu, da sie regelmäßig auf Funktionstüchtigkeit überprüft werden muss
2.4	Ohne verdichtete Straßenwartung muss das Umfeld äußerst störungsfrei sein, um die niedrigen Instandhaltungszyklen zu rechtfertigen ohne Einbußen in der Qualität erwarten zu können
2.5	Ohne verdichtete Straßenwartung muss das Umfeld äußerst störungsfrei sein, um die niedrigen Instandhaltungszyklen zu rechtfertigen ohne Einbußen in der Qualität erwarten zu können
2.6	Ohne verdichtete Straßenwartung muss das Umfeld äußerst störungsfrei sein, um die niedrigen Instandhaltungszyklen zu rechtfertigen ohne Einbußen in der Qualität erwarten zu können
2.7	Die erhöhte Straßenwartung ist unabdingbar. Ohne Erhöhung der Wartungsdichte erscheint ein Betrieb autonomer Busse zunächst fraglich
2.8	Verkehrszeichen müssen erneuert, ersetzt, versetzt oder gar entfernt werden: ein unbürokratischer Weg und eine finanzielle Grundausstattung im kommunalen Haushalt sind unerlässlich
2.9	Eine ungeordnete Situation an Haltestellen ist gleichzusetzen mit der Komplexität einer Sonderinfrastruktur (Frage 2.2).
2.10	Wenn möglich sollten Modellregionen mit möglichst einfachen Einstiegsszenarien beginnen. Komplexe Betriebsabläufe sind zu vermeiden und durch Ersatzhaltestellen aufzulösen
2.11	Die autonomen Fahrzeuge der niedrigeren VDA-Automatisierungsstufen agieren kamerabasiert. Die Orientierung erfolgt mittels Verkehrszeichen weswegen der lückenlosen Beschilderung eine besondere Bedeutung zukommt
2.12	Wie 2.11: Neben dem Vorhandensein von Verkehrszeichen müssen diese frontal zur Fahrbahn ausgerichtet sein, sowie lückenlos und logisch installiert sein.
2.13	vgl. 2.11 und 2.12

2.14	Für Gebietskörperschaften in denen bislang keine autonomen Modellregionen etabliert sind, empfiehlt sich nach dem Vorbild von Bad Birnbach eine separate Warnung der restlichen Verkehrsteilnehmer mittels auffälliger Verkehrszeichen (und innerorts Rüttelschwellen o.ä.)
2.15	QR-Codes oder 3D-Schilder oder RFID-Tags helfen Fahrzeugen niedriger Automatisierungsstufen bei der Orientierung im Raum. Bereits Bad Birnbach implementierte drei unsichtbare Orientierungszeichen für die autonomen Fahrzeuge am Straßenrand
2.16	vgl. 2.15: kurzfristig unabdingbares Kriterium
2.17	thematisch ähnlich zu 2.14: die Fahrzeuge arbeiten kamerabasiert. Kontraste sind daher herzustellen, z.B. durch zuverlässige Ausleuchtung oder regelmäßig überprüfte kontrastreiche Fahrbahnmarkierung, lückenlose Beschilderung u.a
2.18	Wildfangzäune empfehlen sich außerorts, wohingegen innerorts auf Geschwindigkeitsbeschränkungen und Rüttelschwellen zu achten ist
2.19	vgl. 2.14
2.20	vgl. 2.12
2.21	Tunnel müssen auf die Beleuchtung der Fahrbahn hin überprüft werden. Derzeitige autonome Fahrzeuge agieren nicht nach digitalen Spuren sondern kamerabasiert und sind auf eine gute Fahrbahnausleuchtung angewiesen. Ohne "Upgrade" der Tunnelbeleuchtung, falls noch nicht vorhanden, sollte von einer Tunnelbefahrung abgesehen werden
2.22	vgl. 2.22
2.23	vgl. 2.21. Thematisch geht es ebenfalls um die Ausleuchtung, jedoch getrennt von der Infrastruktur "Tunnel" zu sehen
3.1	Separate Infrastruktur erleichtert die Implementierung autonomer Testfelder. BRT-Spuren, wenn auch selten in Deutschland vorkommend, sind vorteilhaft
3.2	Ein Kompromiss der separaten Infrastruktur besteht in abmarkierten Busfahrstreifen. Das Risiko des Mischverkehrs mit dem restlichen motorisierten Individualverkehr reduziert sich. Damit reduzieren sich die Risiken abrupten Abbremsens, dauerhafter Blockierungen durch Falschparker o.ä.
3.3	Schlaglöcher können zu Irritationen der kamerabasierten Ortung autonomer Fahrzeuge führen. Jegliche Beschädigungen im Oberbau sind aufzunehmen und - wenn möglich - auszubessern
3.4	Wenige Baulastträger erleichtern die Kommunikation und die Anforderungen an die Modellregion. Die Projektabwicklung erleichtert sich mit weniger Beteiligten
3.5	Anstehende Fahrbahnsanierungen sind vorteilhaft, sofern in die Planungen bereits im Sinne des autonomen Fahrens eingegriffen wurde oder wenn in die Planungen noch eingegriffen werden kann. Es wird angenommen, dass in eine Planung eingegriffen werden kann, wenn die Bautätigkeit noch fünf Jahre in der Zukunft liegt
3.6	vgl. 3.5
3.7	Ein schlechter Zustand der Fahrbahndecke, keine anstehende und keine bereits erfolgte Sanierung der Fahrbahndecke stellen schlechte Grundvoraussetzungen dar
3.8	vgl. 3.5
3.9	vgl. 3.5

3.10	Ein kommunaler Baubetriebshof erleichtert die Abwicklung durch schnellere Prozessabläufe und kürzere Kommunikationswege. Dadurch kann die Instandhaltung kleinerer Maßnahmen (Positionierung von Verkehrszeichen je nach Baulastträger, Ausbesserung von Fahrbahnschäden, Erneuerung von Fahrbahnmarkierung) schnell und unbürokratisch erfolgen
3.11	vgl. 3.7. Sollten zusätzlich Fahrbahnmarkierungen, also günstige "Eingriffe" in die Fahrbahndecke, nicht vorgesehen sein, so ist von einem Betrieb mit autonomen Fahrzeugen zunächst abzuraten
3.12	Sofern keine Auftragsverwaltung vorliegt (Übergabe bundeshoheitlicher Aufgaben an die Kommunen vor Ort u.a), sind Prozesse in Abstimmung mit dem Bund langsamer und komplexer. Die Umsetzung des Betriebes autonomer Busse gestaltet sich schwieriger
3.13	Durchgängige Fahrbahnmarkierungen sind für Fahrzeuge, deren Ortung kamerabasiert erfolgt, unabdingbar
3.14	vgl. 2.9. Kamerabasierte Fahrzeuge sollten zur Fehlervermeidung eindeutigen verkehrlichen Situationen ausgesetzt sein. Neue Ansätze wie "shared space" behindern den Verkehrsablauf, da Fußgänger und andere Fahrzeuge schwerer durch technische Assistenzsysteme voneinander zu trennen sind. Beim shared space teilen sich Fußgänger und motorisierter Individualverkehr selbige Fahrbahnebene ohne übliche Fahrbahn-Seitenmarkierung
3.15	vgl. 2.17
3.16	vgl. 2.17: die Oberbau-Bauweise impliziert, ob es sich um eine kontrastreiche oder kontrastarme Umgebung handelt
3.17	Mit Hilfslinien kann die Eindeutigkeit der Verkehrssituation unterstützt werden
3.18	Parkplätze, die für heutige Fahrzeuge (Sports Utility Vehicle u.a) nicht dimensioniert sind führen dazu, dass diese über die eigentliche Parkplatzmarkierung hinausragen. Eine Behinderung der umherfahrenden autonomen Fahrzeuge in nächster Umgebung ist nicht auszuschließen
3.19	vgl. 3.18
3.20	vgl. 3.18
3.21	Die Durchfahrtshöhe ist vorab zu prüfen, da die heutigen autonomen Busse besondere Dachaufbauten mit einer Höhe von bis zu 2,7m haben
3.22	vgl. 3.21
3.23	vgl. 3.1, abschließende Frage, um eine differenziertere Einschätzung beim Teilergebnis dieses Themenfeldblatts geben zu können
4.1	IVLZ sind ein grober Indikator für zukunftsweisende Denkweise: dort werden Daten gesammelt, Informationen generiert und ausgetauscht
4.2	vgl. 4.1. Im Regelfall werden Kommune weder über eine IVLZ verfügen, noch an eine interkommunale IVLZ angeschlossen sein
4.3	Auch ohne IVLZ können lokal bzw. vereinzelt Daten erhoben werden. Diese stellen einen Grundstein dar
4.4	Daten können unwissentlich erhoben werden. Deren Strukturierung / Analyse ist ein Handlungsfeld, sofern Daten erhoben werden
4.5	Noch positiver kann die Bewertung des Bestandes ausfallen, wenn Daten im Sinne des Mobilitätsdatenmarktes der BAST erhoben / verbreitet werden

4.6	Im Regelfall werden Verkehrsdaten bislang nicht als Open Data gehandelt. Die Frage dient der Sensibilisierung der Akteure, dass eine Teilung der Daten keinen "Wettbewerbsnachteil" darstellt
4.7	vgl. 4.1. Allerdings Erweiterung um die Fragestellung, ob sich die IVLZ weiterentwickelt oder zu einer der "ersten IVLZ" gehört und sich bislang nicht weiterentwickelt hat weil das System nicht konsequent umgesetzt und betrieben wurde
4.8	Moderne LSA-Rechner implizieren, dass die Kommune in ihre Verkehrsinfrastruktur investiert, dass vorliegende Rechner für moderne Algorithmen einsatzfähig sind, belastungsabhängige Signalprogramme geschaltet werden können und eine moderne Hintergrundinfrastruktur vorhanden sein muss oder entsteht
4.9	vgl. 4.8 - auch die Aussicht auf künftige Investitionen ist positiv zu bewerten
4.10	Ein weiterer Entwicklungsschritt sind netzwerkfähige Komponenten, die an LSA installiert sind
4.11	Im Regelfall werden keine netzwerkfähigen Komponenten verbaut sein. Positiv ist zu bewerten, falls dies in der Vergangenheit bereits thematisiert wurde oder gar Gelder in den Haushalt eingestellt wurden / werden sollen
4.12	Technische Systeme können im Idealfall redundant ausgelegt werden. Diese Frage dient zur Sensibilisierung des Lesers
5.1	Es handelt sich um kritische Bereiche, die über schwache oder keine Mobilfunkabdeckung verfügen. Das wäre eine Einschränkung bei der Wahl der Übertragungstechnik
5.2	Sofern mobilfunk-"kritische" Bereiche befahren werden sollen, kann ein dichtes Mobilfunkbasisstationsnetz diesen Effekt kompensieren
5.3	vgl. 5.2. 4G impliziert, dass der nächste Schritt zu 5G wahrscheinlich ist
5.4	GPS-Abdeckung ermöglicht die Ortung der Fahrzeuge bei der Abwicklung von Fahrmanövern. Ohne GPS-Abdeckung ist die Abwicklung autonomen Fahrzeugbetriebs erschwert
5.5	Mobilfunkbasierte Abwicklung autonomen Fahrens ist in Überlagerung mit GPS-Abdeckung darauf angewiesen, dass Letzere vorhanden ist: denn die mobilfunkbasierte Kommunikation benötigt als Zusatzinformation für die übertragenen Daten zusätzlich den präzisen Fahrzeugstandort
5.6	Glasfaser ermöglicht die leistungsfähige Anbindung von Mobilfunkbasisstationen und erleichtert die spätere Implementierung von 5G. Zudem ist die Störfallsicherheit gegeben
5.7	vgl. 5.6
5.8	Heute Mobilfunknetze sind weder für hohe statische Nutzerdichten noch für hohe Relativgeschwindigkeiten einzelner Sender ausgelegt. Im sicherheitsrelevanten Bereich wäre beim Vorliegen von hohen Relativgeschwindigkeiten, also auf Landstraßen ($V=100$ km/h) oder auf BAB ($V> 100$ km/h i.a.), das Vorhandensein von 5G elementar wichtig, da 5G hohe statische Nutzerdichten und hohe Relativgeschwindigkeiten durch den small-cells-Ansatz unterstützt
5.9	vgl. 5.8
5.10	ohne 5G muss "manuell" mit 4G ein Kleinzellenansatz ermöglicht werden durch Nachverdichtung der Mobilfunkbasisstationen mittels "Repeater"

5.11	vgl. 5.8
5.12	vgl. 5.10
6.1	Testfahrzeuge können durch Forschungseinrichtungen bereitgestellt werden, die sich mit der systematischen Überprüfung von Infrastruktur beschäftigen. Dazu wird eine Forschungs"kooperation", z.B. mit dem KIT benötigt
6.2	vgl. 6.1
6.3	vgl. 6.1
6.4	Testergebnisse sind nur dann verwertbar, wenn Erwartungen an den Test (Testausprägungen) vorab festgehalten werden
6.5	Verschattungen, die Signale aller Art behindern, sind zu vermeiden
6.6	vgl. 6.5
6.7	Sofern Verschattungen nicht vermeidbar sind, sollte auf andere Routen ausgewichen werden
6.8	Fahrzeuge kommunizieren künftig mit der Infrastruktur. Busse kommunizieren klassischerweise mit den LSA, um sich anzumelden und eine Grünphase anzufordern. Dazu ist es notwendig zu überprüfen, ob / wann sich die Fahrzeuge bei der LSA anmelden können
6.9	vgl. 6.8
6.10	vgl. 5.6
6.11	vgl. 5.6
6.12	vgl. 5.6
6.13	Die Frage dient der Sensibilisierung des Lesers. Eine kurzfristige Umsetzung dieser Anforderung ist wünschenswert, aber nicht zwingend erforderlich
6.14	Die Frage dient der Sensibilisierung des Lesers. Eine kurzfristige Umsetzung dieser Anforderung ist wünschenswert, aber nicht zwingend erforderlich
6.15	Die Frage dient der Sensibilisierung des Lesers. Eine kurzfristige Umsetzung dieser Anforderung ist wünschenswert, aber nicht zwingend erforderlich
6.16	Das Wachstum des Servers sollte bei dessen Implementierung bedacht werden. Die Frage dient der Sensibilisierung des Lesers

Abbildung 46: Kommentierung der erarbeiteten Methode "Flussdiagramm" (eigene Darstellung)

Zur besseren Übersichtlichkeit werden bei der Bewertung der Modellregion Leonberg und Böblingen (Kapitel 6.4.1 und 6.4.2) nur kritische Punkte und die von Bedeutung erscheinenden Erkenntnisse diskutiert. Für die vorliegende Ausarbeitung ist es nicht sinnvoll, die einzelnen Ja-Nein-Entscheidungen je Themenblatt noch einmal detailliert zu kommentieren. Im Anschluss wird der Einsatz der Flussdiagramme kritisch reflektiert.

6.4.1 Bewertung der Modellregion Leonberg

Disziplin Verkehrsinfrastruktur, Flussdiagramm „Straßenraum und Straßeninfrastruktur“

- Das Testfeld verfügt weder über baulich abgetrennte BRT-Infrastruktur noch über abmarkierte Sonderfahrstreifen, sodass stattdessen Verkehrszeichen anzuordnen sind, die auf den Mischverkehr mit autonomen Bussen hinweisen.
- Die Straßenzüge weisen etliche ausgebesserte Stellen im Asphaltoberbau auf, sind jedoch in keinem derart auffälligen Zustand, dass die Kameradetektion durch autonome Busse gefährdet oder verfälscht wird. Keine der Straßen wurde kürzlich saniert. Anstehende Maßnahmen konnten durch Internetrecherche nicht belegt werden. Im Falle von Planungsmaßnahmen kann somit rechtzeitig Einfluss genommen werden.
- Die Stadt Leonberg verfügt über einen Baubetriebshof, jedoch auch über kumulierte Schulden in Höhe von 142 Millionen Euro [Vgl. 132], der Investitionsbereitschaft über das notwendige Maß hinaus verhindert. Der Rundkurs führt über Gemeinde- und Kreisstraßen (K1012). Die Baulastträgerschaft der Gemeindestraßen liegt bei der Stadt Leonberg, die der Kreisstraßen beim Landkreis. Durch den hohen Anteil gemeindlicher Straßen können die Fahrbahnmarkierungen einfach, also auf kleinem Dienstweg über den städtischen Baubetriebshof, instandgesetzt werden:
 - An vielen Stellen muss die Fahrbahnmarkierung erneuert, ergänzt oder vereinfacht werden,
 - insbesondere im Altstadtbereich müssen wegen des kontrastarmen Pflasteroberbaus reflektierende Fahrbahnmarkierungen angebracht werden,
 - die größere Straßenverkehrskreuzung in der Nähe des Einkaufszentrums Leo-Center (Römer Str. / Leonberger Str.), sowie die zu kreuzende abknickende Vorfahrtsstraße (Eltinger Str. in Richtung Graf-Eberhard-Str.) sind mit Hilfslinien zu versehen, um die komplexe Situation kurzfristig für die Busse der niedrigeren VDA-Automatisierungsstufen begreifbar zu machen und
 - die Längsparkplätze im Wohngebiet sind entweder bei weiterhin gewolltem Zweirichtungsbetrieb zu verlegen oder bei Umstellung auf Einbahnstraßenbetrieb eindeutig mit Markierungen von der Hauptfahrbahn zu separieren.

Teilergebnis Straßenraum und Straßeninfrastruktur: die Modellregion ist für den Einsatz geeignet, sofern punktuelle Verbesserungen in die Wege geleitet werden. Dies kann unter geringem Aufwand in Absprache mit dem städtischen Baubetriebshof erfolgen.

Disziplin Verkehrsinfrastruktur, Flussdiagramm „Straßenausstattung“

- Es handelt sich mehrheitlich um Gemeindestraßen bei deren Entwurf die FGSV-Richtlinien nicht vollumfänglich angewendet wurden. Die Planunterlagen liegen zwecks Überprüfung der Regelquerschnitte nach FGSV-Standard nicht vor. In der Modellregion befindet sich keine Sonderinfrastruktur, die Schrankenberechtigung oder ein im heutigen Stadium noch aufwändiges Leitsystem erfordert. Auch besonders unübersichtliche Situationen an Haltestellen (z.B. kreuzende Fußgänger an Fernbusbahnhöfen) sind nicht gegeben.
- Wie in den meisten Städten werden die Straßeninstandhaltungszyklen verständlicherweise auf das Notwendige beschränkt. Zwar wurden mutwillige Sachbeschädigung, übermäßige Vegetation oder Bereiche mit verschmutzter Fahrbahn bei der Ortsbegehung nicht festgestellt, dennoch muss die Instandhaltung beim Betrieb autonomer Busse intensiviert werden.
- Die Haltestellensituationen lassen sich mit Änderungen in der Fahrbahnmarkierung durch den eigenen Baubetriebshof weiter vereinfachen. Dennoch handelt es sich bereits heute um wenig frequentierte Bestandshaltestellen. Von den Haltestellenbuchten aus wird stets in eine einspurige Straße eingefädelt (Ausnahme Belforter Platz), sodass die Abfertigungskomplexität auf einem Normalmaß liegt.
- An einigen Stellen, insbesondere im Zulauf auf die Altstadt, muss die Redundanz von Verkehrszeichen überprüft werden. Sofern ein Testfahrzeug im Rahmen einer Forschungs Kooperation zur Verfügung steht, sollte zunächst geprüft werden, ob das Fahrzeug bei der Vielzahl der Schilder in der Innenstadt zuverlässig navigiert. In diesem Zusammenhang kann durch die Kamera-Detektionsgüte festgestellt werden, ob die Verkehrszeichen richtig positioniert sind, d.h. mit freier Sichtverbindungen und frontaler Aufstellung zur Fahrbahn. Die Schilder sollten zudem reflektierend und deren Funktionsfähigkeit durch regelmäßige Reinigung sichergestellt sein.
- Maschinenlesbare Schilder (z.B. QR- oder RFID-basiert) sind wie in allen Testfeldern zunächst nicht vorhanden. Für den Testbetrieb der Automatisierungsstufen 1-3 nach VDA sind diese jedoch vorzusehen.
- Im gesamten Testfeldgebiet müssen Warnschilder für den Betrieb autonomer Fahrzeuge angebracht werden. Die Höchstgeschwindigkeit überschreitet an keiner Stelle 50 km/h, sodass eine Geschwindigkeitsreduktion durch Verkehrszeichen nicht zwingend nötig ist. Eine Anordnung von Rüttelschwellen (z.B. im Wohngebiet) oder verstärkte stationäre oder temporäre Geschwindigkeitskontrollen sind auch unabhängig vom Einsatz autonomer Busse empfehlenswert.

- Da die Strecke nicht über Tunnel verfügt und kurzfristig keine Nachtfahrten geplant sind (Annahme entsprechend anderer deutscher Testfelder), kann auf eine verbesserte Ausleuchtung kritischer Gefahrenpunkte verzichtet werden.

Teilergebnis Straßenausstattung: die Modellregion ist für den Einsatz geeignet.

Disziplin Verkehrsinfrastruktur, Flussdiagramm „Ladeinfrastruktur“

- In der Kurzfristsicht wird diese Modellregion wie andere Testfelder zunächst mit eingeschränkten Betriebszeiten verkehren: neben langen nächtlichen Standzeiten wird das Fahrzeug mittags an einen abgesicherten Standplatz mit Ladeinfrastruktur fahren.
- Durch die langen Standzeiten können die Busse langsam geladen werden. Die Langsamladung benötigt keine aufwändige Infrastruktur sondern lediglich haushaltsüblichen Steckdosen, was jedoch häufigere und längere Ladevorgänge erzwingt. Leonberg verfügt auch über öffentliche Ladesäulen, darunter eine derzeit kostenlose 11 kW-AC-Ladesäule im Wohngebiet im Bereich Steinstraße. Da das Fahrzeug zuverlässig geladen werden muss, sollte auf nicht-öffentlich zugängliche (z.B. städtische) Ladeinfrastruktur zurückgegriffen werden: entlang der Fahrtstrecke befinden sich das städtische Hallenbad, das Bürgeramt und mit kurzem Umweg das Finanzamt. Der Zugriff auf eine normale Steckdose und einen Parkplatz an diesen öffentlichen Einrichtungen (z.B. während der Mittagspause) scheinen ambitioniert, aber nicht unmöglich. Über einen nächtlichen Abstellplatz, gar ein Depot, liegen keine Informationen vor. Zum Schutz vor Vandalismus und Wittereinflüssen sollte ein separater, gesicherter nächtlicher Abstellplatz vorgesehen werden.

Teilergebnis Ladeinfrastruktur: die Modellregion ist für den Einsatz geeignet. Die Verfügbarkeit von Steckdosen muss gesichert sein.

Disziplin IT-Infrastruktur, Flussdiagramm „Plattform und Funktionalität“

- Von einer Kooperation mit einer Forschungseinrichtung oder einer anderen Modellregion liegen keine Informationen vor. Ein Testfahrzeug, das durch eine Forschungseinrichtung bereitgestellt werden kann, ist empfehlenswert. Damit können Umsetzungshindernisse vorab festgestellt werden.
- Konkrete Tests zu Empfangsreichweiten liegen aufgrund des frühen Planungsstadiums nicht vor und wären nicht zielführend. Über die Existenz eines Backend-Servers besteht aufgrund der fehlenden Verkehrsleitzentrale keine Klarheit. Daher können die weiterführenden Kriterien ebenso wenig bewertet werden.

Teilergebnis Plattform und Funktionalität: die Kriterien dieses Themenfelds betreffen ein spätes Planungsstadium in dem sich die Modellregion Leonberg noch nicht befindet. Die nicht erfüllten Kriterien können bei entsprechender Vorkenntnis noch rechtzeitig erfüllt werden.

Dennoch bestehen nach heutiger Sicht erhebliche Defizite in der langfristigen Sicht. Das Testfeld eignet sich somit nur, wenn entsprechende Schritte mittelfristig eingeleitet werden.

Disziplin IT-Infrastruktur, Flussdiagramm „Datenübertragung“

- Die Modellregion beinhaltet zwar keine Fahrt durch einen Tunnel, jedoch eine Häuserschlucht in der Nähe des Wendepunkts am Einkaufszentrum Leo-Center, sowie einen eng bebauten Altstadtbereich. Die deutschen Netzbetreiber Telekom, Vodafone und Telefónica geben für den gesamten Bereich der Stadt Leonberg eine durchgängige 4G/LTE-Abdeckung an [130], [131], [141]. Auf den Seiten der Bundesnetzagentur findet sich zudem eine hohe Dichte an Mobilfunkbasisstationen im Stadtgebiet von Leonberg, auch an den kritischen Stellen potentiell niedriger Mobilfunkabdeckung [26].
- Per App konnten keine Stellen schwacher GPS-Abdeckung identifiziert werden, sodass die Frage nach der einzusetzenden Übertragungstechnik technologie-offen diskutiert werden kann. Mitte 2017 gab die Telekom bekannt, schrittweise durch Eigenmittel Glasfaserverbindungen in den Rand- und Stadtbezirken von Leonberg zu verbauen [Vgl. 8]. Damit sind ideale Voraussetzungen für die spätere Implementierung für 5G gegeben.
- Durch die innerstädtische Führung haben die Fahrzeuge untereinander keine hohen Relativgeschwindigkeiten. In der Hauptverkehrszeit wird die hohe Fahrzeugdichte durch das ebenso dichte Netz an Mobilfunkstationen und später durch 5G ausgeglichen.

Teilergebnis Datenübertragung: die Modellregion ist für den Einsatz geeignet.

Disziplin IT-Infrastruktur, Flussdiagramm „Datenerhebung“

- Neben der übergeordneten „Straßenverkehrszentrale BW“ mit dem Fokus auf großräumiger Steuerung befindet sich die nächstgelegene IVLZ in Stuttgart. Von dort aus kann auf das überörtliche Verkehrsgeschehen auf der BAB „A8“ bis auf Höhe des Stuttgarter Flughafens, nicht aber auf Leonberg oder gar den Leonberger Innenstadtbereich, Einfluss genommen werden [Vgl. 122]. Über eine eigene Verkehrsleitzentrale verfügt die Stadt Leonberg zwar nicht, soll sich jedoch nach Empfehlung des Leonberger Gemeinderats der interkommunalen „Regionalen Mobilitätsplattform“ des Verbands Region Stuttgart (VRS) anschließen [Vgl. 56]. Es handelt sich dabei um eine regionale Verkehrsmanagementzentrale. Diese ermöglicht Standardisierung, erspart Doppelarbeit und erhöht die Regelungstiefe. Es muss demnach davon ausgegangen werden, dass heutzutage punktuell Verkehrsdaten erhoben aber nicht verwertet werden. Der rechtzeitige Aufbau von knowhow, die Ermunterung der Orientierung an MDM-Schnittstellenstandards gegenüber den

Teilnehmern der „Regionalen Mobilitätsplattform“ des VRS sowie das Eingehen von Kooperationen, z.B. im Rahmen der „Ideenschmiede digitale Mobilität“ des Landes Baden-Württemberg, sind unerlässlich.

- Im Rahmen des Förderprogramms „Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme“ des BMVI hat die Stadt Leonberg Anfang 2018 einen modernen Verkehrsrechner zur verkehrsgerechten LSA-Steuerung inkl. ÖV-Bevorzugsmodul, Aufbereitung und Bereitstellung von Verkehrsdaten beantragt [Vgl. 63]. Positiv bemerkenswert sind die ersten Schritte in Richtung einer modernen LSA-Architektur inklusive der dahinterstehenden Bereitschaft Daten künftig zu erheben und verwerten. Weitergehende Förderprogramme des Bundes und ein steigendes kommunales Bewusstsein für die Erneuerung der verkehrstechnischen Anlagen lassen eine positive Entwicklung vermuten.

Teilergebnis Datenerhebung: Die Modellregion ist in diesem Themenfeld kurz- und langfristig – wie fast alle Modellregionen – noch nicht ausreichend für die Zukunft gewappnet. Dennoch kann ein Testfeld kurzfristig implementiert werden, da es sich im Themenfeld Datenerhebung um keine Muss-, sondern um Kann-Kriterien handelt.

Gesamtergebnis Modellregion Leonberg

Alle Themenfelder ergaben für die kurzfristige Sicht ein positives Ergebnis. Erwartungsgemäß muss die Modellregion für die langfristige Sicht einige Anforderungen umsetzen, die jedoch zum heutigen Tage kein Testfeld in Deutschland bereits erfüllt. Aufgrund der sonst positiven Rahmenbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass die langfristigen Anforderungen in notwendigem Maße umgesetzt werden können.

6.4.2 Bewertung der Modellregion Böblingen

Disziplin Verkehrsinfrastruktur, Flussdiagramm „Straßenraum und Straßeninfrastruktur“

- Wie auch in der Modellregion Leonberg ist die Nutzung von Bus-Sonderfahrstreifen nicht möglich. Auf den Betrieb von autonomen Fahrzeugen muss daher durchgehend hingewiesen werden. Durch die Streckenlänge ist die Ausschilderung, insbesondere falls es sich um das einzige autonome Fahrzeugprojekt in der Modellregion handelt, mit hohem Aufwand verbunden.
- Der Oberbau befindet sich in durchweg gutem Zustand, teilweise sogar erst kürzlich saniert. Dadurch fehlt jedoch die Aussicht auf den Verbau von moderner Sensorik, die für den Betrieb künftiger autonomer Fahrzeuge von strategischer Bedeutung ist. In der Modellregion sind verschiedene Baulastträger (B464, L1182, Gemeindestraßen u.a)

involviert, sodass eine zügige Umsetzung von Änderungen mit Hindernissen verbunden ist.

- Die zu Böblingen bzw. Sindelfingen gehörenden Stadtteile können auf den technischen Betriebsdienst der beiden Städte zurückgreifen, die restlichen Gemeinden verfügen über den Bauhof der Gemeinde Grafenau. Die Koordinierung der verschiedenen Baulastträgerschaften (ggf. üben die Städte Böblingen und Sindelfingen eine Auftragsverwaltung im Auftrag des Bundes für die B464 aus) ist genauer zu prüfen.
- Die Fahrbahnmarkierungen waren testfeldweit intakt, allerdings an manchen Stellen regelquerschnittsbedingt nicht vorhanden. Eine nachträgliche Markierung, z.B. in gelb, ist zwingend nötig, damit sich die autonomen Busse orientieren können. Auch müssen Kreuzungsbereiche zwingend mit Hilfslinien versehen werden, insbesondere wenn das autonome Fahrzeug den Kreuzungsbereich aufgrund hoher Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer schnell räumen muss. Das betrifft die mehrmals vorkommende Ein- bzw. Ausfädelung auf die L1182 mit Geschwindigkeitsbeschränkungen zwischen 70 und 80 km/h, zum Beispiel im Bereich der Bestandshaltestelle Löchlesberg.
- Die Fahrbahnmarkierungen sind an der kritischen Stelle des Darmsheimer Tunnels reflektierend, an den restlichen Stellen der Modellregion nicht.
- Die Durchfahrtshöhen sind unkritisch, da es sich durchgängig um moderne konstruktive Ingenieurbauwerke handelt.

Teilergebnis Straßenraum und Straßeninfrastruktur: die Modellregion ist kurzfristig für den Einsatz geeignet. Die mittel- bis langfristigen Entwicklungspotentiale für höhere Automatisierungsstufen sind durch die stark befahrenen und erst kürzlich sanierten Fahrbahnen eingeschränkt. Die Umsetzung von Vorhaben ist durch die verschiedenen Baulastträger und zwei involvierte Baubetriebshöfe anspruchsvoller.

Disziplin Verkehrsinfrastruktur, Flussdiagramm „Straßenausstattung“

- Auf der Strecke findet sich unter anderem der FGSV-Regelquerschnitt RQ9 ohne Fahrbahnmittelmarkierung. In einem Feldtest muss geprüft werden, ob sich das Fahrzeug mit der nahe am Fahrbahnrand befindlichen Seitenmarkierung orientieren kann oder ob zusätzliche Fahrbahnmarkierungen vorgesehen werden müssen.
- Es ist derzeit nicht von verkürzten Wartungszyklen auszugehen. Da es sich um ländliche Gebiete handelt, muss mit verschmutzten Fahrbahnen durch landwirtschaftlichen Verkehr gerechnet werden. Starker Grünbewuchs in der Vegetationsperiode ist ebenso möglich. Vandalismus konnte bei der Ortsbesichtigung nicht gesichtet werden. Eine häufige Instandhaltung ist unabdingbar.

- Ein weiteres Problem stellt die Haltestellensituation am ZOB in Böblingen dar: durch die Bussteige müssen Fußgänger permanent den Fahrweg der Fahrzeuge queren und sind durch die zeitlich engen Anschlussbeziehungen zu den Nahverkehrszügen schnell unterwegs. Die Vielzahl an Bussen, die fehlenden Leitlinien innerhalb des Busbahnhofs und die fehlenden Leitlinien bei der Ausfädelung vom Busbahnhof auf die normale Straßeninfrastruktur erschweren die Einsatzbedingungen. Zusätzliche Fahrbahnmarkierungen oder das Aufsuchen einer weniger im Mittelpunkt des Geschehens stehende „Außenparkposition“ sind am Anfang empfehlenswert, um abrupte Fahrmanöver des autonomen Busses zu verhindern.
- Es fanden sich keine beschädigten oder fehlenden Verkehrszeichen. Einzelne Leitpfosten standen jedoch nicht frontal zur Fahrbahn, sondern waren vermutlich durch die letzte maschinelle Reinigung umgeknickt. Eine regelmäßige Instandhaltung ist anzustreben.
- Maschinenlesbare Schilder sind für die lange Strecke punktuell vorzusehen. Ebenso die bereits erwähnten Warnschilder, um auf den Betrieb autonomer Busse hinzuweisen. Durch die ländliche Streckencharakteristik sollten an bekannten Wildwechselstellen großräumig Wildfangzäune aufgestellt werden.

Teilergebnis Straßenausstattung: die Modellregion ist für den Einsatz teilweise geeignet. Es bedarf zusätzlicher Fahrbahnmarkierungen, zusätzlicher Schilder und Wildfangzäunen. Durch die linienförmige Streckenausdehnung steckt ein hoher Instandhaltungsaufwand und finanzieller Aufwand dahinter.

Disziplin Verkehrsinfrastruktur, Flussdiagramm „Ladeinfrastruktur“

- Die Route weist im Gegensatz zu Leonberg keine Shuttle-Charakteristik auf: anstelle eines Rundkurses ist die Strecke linienförmig und führt über eine verhältnismäßig weite Strecke von rund 25km. Der Abstimmung der Ladeinfrastruktur kommt besondere Bedeutung zu, da die Akkukapazität und damit die Reichweite heutiger autonomer Busse (z.B. 9 kWh) eingeschränkt ist. Die topographische Einschätzung der Route ist positiv, da sie im städtischen und im ländlichen Gebiet jeweils eben ist. Die genaue Abstimmung muss jedoch in einer Energiebedarfsrechnung erfolgen, die nicht Bestandteil dieser Ausarbeitung ist.
- Wie in der Modellregion Leonberg wird die Infrastruktur für Langsamladung benötigt. Dazu kommen folgende Stellen in Frage:
 - Der Busbetriebshof des für die Mittelzentren Böblingen und Sindelfingen agierenden Busunternehmens Pflieger liegt entlang der Strecke, allerdings muss ein stark frequentiertes Industriegebiet gequert werden

- Der ehemalige Busbetriebshof von „DB Regiobus Stuttgart“ liegt direkt in Böblingen an der Modellstrecke
- Elektroladesäulen im nahegelegenen neuen Baugebiet „Flugfeld“ am Bahnhof Böblingen. Die Verfügbarkeit ist durch die gleichzeitige Nutzung durch Dritte nicht gewährleistet. Ggf. kann der bereits vorhandene infrastrukturseitige Anschluss genutzt werden, um eine weitere Ladesäule neben der öffentlich zugänglichen Ladesäulen für die Modellregion bereitzustellen.
- Perspektivisch kann auf keine Oberleitungen von Straßenbahnen zugegriffen werden, sodass induktive oder konduktive Ladeinfrastruktur möglich ist. Über Zugangspunkte an das Nieder- bzw. Mittelspannungsnetz liegen keine Informationen vor.

Teilergebnis Ladeinfrastruktur: die Modellregion ist für anfängliche Modellszenarien geeignet, da die Langsamladung mit vertretbarem Aufwand (Schuko-Steckdosen oder Ladesäule) unterstützt werden kann. Mittel- bis langfristige Szenarien müssten durch Einbindung in das Nieder- bzw. Mittelspannungsnetz realisiert werden.

Disziplin IT-Infrastruktur, Flussdiagramm „Plattform und Funktionalität“

- Aufgrund des frühen Planungsstadiums besteht keine Forschungspartnerschaft, sodass auch noch kein Testfahrzeug bereitstehen kann. Alle Vorbereitungen sind rechtzeitig durchzuführen.
- Bauliche Verschattungen durch Fußgängerzonen oder Häuserschluchten entfallen. Das Fahrzeug bewegt sich auf breiten Fahrbahnen.
- Als Automobilregion haben Mercedes-Benz, Porsche und der Landkreis Böblingen ein Interesse an Breitbandanbindungen über Glasfaser. Bereits 2016 verfügten im Landkreis sogar 75-95% der Haushalte laut Bericht von BMVI und TÜV Rheinland über Breitbandanschlüsse. Damit sind die Voraussetzungen für Cloud Computing oder autonomes Fahren perspektivisch gegeben [Vgl. 81].
- Wie die Modellregion Leonberg soll auch Böblingen Teil der regionalen Mobilitätsplattform des VRS werden. Eine entsprechende Grundsatzentscheidung wurde vom Gemeinderat begrüßt [Vgl. 127]. Über eine IVLZ verfügen die beteiligten Städte und Gemeinden der Modellregion Böblingen nicht.

Teilergebnis Plattform und Funktionalität: die Modellregion ist kurzfristig für den Einsatz geeignet. Perspektivisch müssen eine Verkehrsleitzentrale gebaut und die Breitbandanschlüsse per Glasfaser weiter ausgebaut werden.

Disziplin IT-Infrastruktur, Flussdiagramm „Datenübertragung“

- Der einzige Tunnel der Modellregion hat eine Länge von ca. 1km. Eine Mobilfunkbasisstation findet sich im nahegelegenen Darmsheim, allerdings vermutlich in der Verschattung des Tunnels. Das Fahrzeug muss also auf die Tunnelfahrt eingelernt werden. Auf den Seiten der Bundesnetzagentur findet sich zudem eine hohe Dichte an Mobilfunkbasisstationen im Stadtgebiet von Böblingen und Sindelfingen. Nach Verlassen der Stadtgemarkung ist die Dichte an Stationen, insbesondere im Bereich Dätzingen und Döffingen-Kapellenberg bzw. Döffingen-Löchlesberg, schwach. Unter Umständen muss das Netz an Mobilfunkstationen über den Kleinzellen-Ansatz unbürokratisch mittelfristig bis zum Implementieren von 5G verdichtet werden. Andernfalls müssen bei schwacher Mobilfunkabdeckung WLAN-basierte Ansätze geprüft werden.
- Per App konnten auch in der Modellregion Böblingen keine Stellen schwacher GPS-Abdeckung identifiziert werden, sodass die einzusetzende Übertragungstechnik frei auswählbar ist (Mobilfunkansatz macht nur Sinn, wenn eine genaue Ortung einhergeht).
- Der ländliche Streckenverlauf führt zu höheren Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h, wobei 100 km/h auf der richtungsfahrbahngetrennten B464 erreicht wird. Ohne mittige Fahrzeugrückhaltesysteme treffen die Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von 80km/h aufeinander. Die Fahrzeugdichte ist zwar gering, aber die Relativgeschwindigkeiten der Fahrzeuge dafür umso höher (bis zu 160 km/h Relativgeschwindigkeit ohne dazwischenliegender Leitplanke). Die drei deutschen Mobilfunknetzbetreiber attestieren für die Modellstrecke eine vollständige 4G-Abdeckung [130], [131], [141], selbst in Gebäuden. Vodafone verdichtet sein Netz mit rund 15 LTE-Mobilfunkstationen 2019 und 2020 im Landkreis Böblingen [Vgl. 140].

Teilergebnis Datenübertragung: die Modellregion ist für den Einsatz bedingt geeignet. Die ländlichen Gebiete verfügen noch nicht zweifelsfrei über die notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen. Hohe Relativgeschwindigkeiten, das fehlende 5G und ein teilweise dünnes Netz an Mobilfunkstationen im ländlichen Raum, erschweren die Implementierung. Als Automobilregion kann jedoch mit einer positiven Fortentwicklung im Bereich der digitalen Mobilität gerechnet werden.

Disziplin IT-Infrastruktur, Flussdiagramm „Datenerhebung“

- Die Erkenntnisse für die Modellregion Böblingen entsprechen denen der Modellregion Leonberg. Wie in Leonberg findet sich in der Modellregion keine IVLZ. Nach aktueller Diskussion sollen sich die Mittelzentren Böblingen und Sindelfingen dem regionalen Verkehrsmanagement unter Federführung des VRS anschließen.

- Auch die beiden Mittelzentren Böblingen und Sindelfingen rüsten schrittweise Lichtsignalanlagen auf, um von der störanfälligen induktionsbasierten auf eine GPS-basierte Verfahrensweise umzustellen. Bereits Ende 2016 wurden 32 Verkehrsrechner und 15 LSA dafür umgerüstet [Vgl. 79]. Das Befassen mit diesem Thema ist positiv zu werten, wenngleich die restlichen Abschnitte in ländlichen Gebieten von dieser Entwicklung nicht profitieren. Außerhalb der städtischen Gemarkungsgrenze passiert der Bus jedoch auch nur drei kleine bis mittelgroße LSA.

Teilergebnis Datenerhebung: Die Modellregion muss wie andere Modellregionen kurz- und langfristig weitere Komponenten für das autonome Fahren integrieren. Dennoch kann ein Testfeld kurzfristig implementiert werden, da es sich im Themenfeld Datenerhebung um keine Muss-, sondern um Kann-Kriterien handelt.

Gesamtergebnis Modellregion Böblingen

Nicht alle Themenfelder ergaben für die kurzfristige Sicht ein positives Ergebnis, da die Modellregion durch ihre linienförmige Ausbreitung auf heterogene lokale Voraussetzungen stößt. Der ländliche Raum ist von der digitalen Fortentwicklung zeitlich entkoppelt und profitiert beispielsweise nicht als Erstes von der Modernisierung von LSA-Rechnern. Erwartungsgemäß muss auch die Modellregion Böblingen für die langfristige Sicht einige Anforderungen umsetzen, die jedoch im Windschatten der Bemühungen der großen Automobilhersteller umgesetzt werden.

6.5 Bewertung der Methode

Wie eingangs bereits festgehalten; eine Methode ist die Grundlage für planmäßiges und festgelegtes Handeln und ein Verfahren, das auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet ist. Sie dient später als Entscheidungsgrundlage. Sie offeriert keine konkrete Lösungen sondern identifiziert Defizite. Sie soll eine Verfahrensweise an die Hand geben, bestehende Infrastruktur auf ihre Eignung für autonome Busse einzustufen.

Wie ist die Methode der Flussdiagramme nach praktischer Anwendung zu bewerten? In der Gesamtschau war sie nicht vollumfänglich zufriedenstellend, jedoch zielführender als der Ansatz der Nutzwertanalyse:

- Flussdiagramme sind auch ohne „Einlernen“ schnell verständlich und leicht anwendbar,
- man gelangt schnell an ein Zwischenergebnis ohne komplizierte oder manipulierbare Zahlengerüste für Bewertung und Gewichtung zu verwenden
- und Flussdiagramme bieten eine ausreichend genaue Ersteinschätzung des Sachverhalts.

Hinderlich in der Handhabung zeigten sich jedoch:

- Im konkreten Anwendungsfall konnte die Struktur der vorigen Kapitel nicht analog auf die Struktur der Themenfelder der einzelnen Flussdiagramme übertragen werden, da sich einerseits Themen nicht sinnvoll miteinander in einem Flussdiagramm verbinden ließen und umgekehrt andere Themen verknüpft wurden, obwohl sie in den vorigen Kapitel getrennt behandelt wurden.
- Die Herleitung eines Gesamtergebnisses gestaltet sich im Gegensatz zu den Beispielen aus der Theorie als sehr schwierig. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die Aufgabenstellung komplex ist und sich die unterschiedlichen Themenfelder schwer auf ein Gesamtergebnis reduzieren lassen und andererseits, dass im Kurzfristhorizont keine K.O-Kriterien wie in der Theorie existieren, die konkret einen Betrieb autonomer Busse ausschließen. Darüber hinaus besteht subjektiver Entscheidungsspielraum.

Lösungsansatz: Die Aufgliederung der Themencluster ist sinnvoll, um Komplexität zu reduzieren. Die einzelnen Cluster führen zu Teilergebnissen. Auf die methodische Herleitung eines Gesamtergebnisses (z.B. durch ein Entscheidungsblatt, das alle Teilergebnisse mittels Gewichtung zu einem Gesamtergebnis berechnet) wird verzichtet. Da es sich bei fast allen Kriterien um „Kann-Kriterien“ handelt, wäre eine Verrechnung der Teilergebnisse zu einem harten Gesamtergebnis methodisch falsch. Es entsteht der Eindruck, dass Muss-Kriterien vorliegen und eindeutige Aussagen getroffen werden können. Im derzeitigen Stadium ist dies unzutreffend. Die Herleitung des Gesamtergebnisses muss durch Einschätzung eines Expertengremiums erfolgen, das die Teilergebnisse diskutiert und abwägt.

- schwache inhaltliche Abhängigkeiten von Fragestellungen untereinander führen dazu, dass die Abarbeitungsreihenfolge irrelevant ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass es im frühen Entwicklungsstadium autonomer Busse keine Maßnahmen gibt, die im niedrigen Automatisierungsgrad besonders schädlich oder besonders förderlich sind. Es existieren fast nur Kann- und Begeisterungskriterien deren Nicht-Erfüllung zunächst keine negativen Auswirkungen haben.

Lösungsansatz: Es wird keine spezifische Abarbeitungsreihenfolge vom Leser erwartet. Die einzelnen Flussdiagramme können in beliebiger Reihenfolge analysiert werden.

- Die Bewertung der Abfragekriterien bzw. des Ist-Zustands ist subjektiv und sollte nicht von einem einzelnen Akteur, sondern von einem Expertengremium vorgenommen werden. Es handelt sich um eine subjektive, individuelle, erfahrungsbasierte Bewertung.

- Durch die reine Ja-/Nein-Auswahlmöglichkeit kommt der präzise formulierten Fragestellung eine besondere Bedeutung zu, da diese unmissverständlich für verschiedene Anwender formuliert sein muss. Umgekehrt lässt die Beantwortung der abgefragten Kriterien über eine reine Ja-Nein-Auswahlmöglichkeit keine individuelle Bewertung oder gar Ergänzungen zu.
- Flussdiagramme führen nur schwer auf eindeutige Ergebnisse. Die Vielzahl an abzufragenden Kriterien und deren Abhängigkeiten untereinander verhindern, dass ein differenziertes Bewertungsergebnis entsteht. Als Teilergebnis können nur Aussagen wie „Ja, geeignet“ oder „Nein, nicht geeignet“ generiert werden.
- Zwei Zeithorizonte, also kurzfristig (<5a) und langfristig (>5a), können in den einfachen Abfragekriterien schlecht abgebildet werden. Da der Zeithorizont eng mit dem Attribut „Kann“- oder „Muss“-Kriterium verbunden ist, lassen sich auch diese Charakteristika schlecht im Flussdiagramm abbilden. Die negative Beantwortung eines Langfrist-Kriteriums muss im Flussdiagramm beispielsweise dennoch in der Teilbewertung mit einer kurzfristigen Positivwertung versehen werden, da es sich bei dem Langfristkriterium in der kurzfristigen Sicht um kein K.O-Kriterium handelt. Ein differenziertes Bewertungsbild ist auf diese Weise jedoch nicht möglich. Zukunftsthemen werden nur thematisch über Kommentarfelder angeschnitten ohne Auswirkungen auf das letztliche Teilergebnis zu haben.
- Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt nicht direkt im Dokument. Beim Flussdiagramm handelt es sich um keine Checkliste. Auch können keine Felder farblich hervorgehoben werden können, sondern es muss eine separate Dokumentation angefertigt werden, die ein ausformuliertes Entscheidungsdossier als Ergebnis haben sollte. Nur auf diese Weise ist später die Ja-Nein-Auswahlcharakteristik für Außenstehende noch nachvollziehbar.
- Die Ergebnisse und Erkenntnisse sind nicht in Präsentationen integrierbar. Sie sind schlecht vor einem größeren Publikum vorzustellen, da der Entscheidungsbaum detailliert vorgestellt werden müsste und die einzelnen Abfragekriterien im Präsentationsformat zu klein sind.
- Die Abbildung von inhaltlichen Abhängigkeiten erzeugt Arbeitsaufwand und birgt das Risiko der Unvollständigkeit oder gar der Redundanz.

Das Flussdiagramm weist im Rückblick zwar Schwächen auf, eignet sich aber für den Anwendungsfall, deckt die wesentlichen Anforderungen ab und stellt eine bessere Alternative als die Nutzwertanalyse dar.

6.6 Handlungsempfehlung

Beide Modellregionen sind prinzipiell für den kurzfristigen Einsatz autonomer Busse geeignet, müssen allerdings für den langfristigen zukunftsweisenden Einsatz autonomer Busse mit höherer Automatisierungsstufe noch eine Transformation vollziehen. Diese Anforderung besteht aber für jede Modellregion Deutschlands, da die Ausarbeitung bewusst Themen der Zukunft aufgreift, die heutige Straßen noch nicht abbilden, für die jedoch bereits heute Bewusstsein geweckt werden muss.

In der Detailbewertung für die Kurzfristsicht ähneln sich die beiden untersuchten Modellregionen. Dennoch hat sich das Umfeld von Leonberg als geeigneter erwiesen, da Böblingen zusätzliche Erschwernisse in der Umsetzung birgt:

- Die Streckenlänge von über 25km lässt sich schlechter mit den heutigen niedrigen Akkukapazitäten der Fahrzeuge vereinbaren. Häufigere Ladevorgänge oder gar mehrere Ladevorgänge in einem Rundkurs sind hinderlich.
- Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten im Testfeld sind höher als in Leonberg. Mit der fahrzeugseitigen Geschwindigkeit von heutzutage maximal 30 km/h, kann das Fahrzeug nicht auf den betrachteten Straßen (B464: $V = 100$ km/h oder L1182: $V = 70-80$ km/h) verkehren. Der Beschilderungsaufwand oder der Kontrollaufwand für eine flächendeckende Geschwindigkeitsreduktion im gesamten Testfeld im Anfangsstadium wären enorm.
- Die Unfallgefahr durch die hohen Differenzgeschwindigkeiten von autonomen Bussen und restlichem Individualverkehr wären hoch. Der autonome Bus stellt ein regelrechtes Verkehrshindernis im ländlichen Raum dar. Ein Ausweichen auf benachbarte Fahrradstreifen scheint aufgrund der geringen Fahrbahnbreite nicht möglich.
- Durch die geringe Fahrzeuggeschwindigkeit erreicht der autonome Bus keine konkurrenzfähige Fahrzeiten im Vergleich zum heutigen Ruftaxi. Es würde sich bei heutigem technischen Stand um ein zunächst redundantes Angebot mit verlängerten Fahrzeiten handeln.
- Die Dichte von Mobilfunkstationen ist geringer in Leonberg, obwohl diese insbesondere im Bereich des Darmsheimer Tunnels oder aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten sich begegnender Fahrzeuge hoch sein sollte. Der Aufwand für eine Verdichtung der Basisstationen ist somit höher als in Leonberg.
- Die Komplexität durch mehr Beteiligte (mehrere Baulastträger, mehrere Kommunen, mehrere Baubetriebshöfe) ist höher.

Im Gesamtergebnis hat sich die Modellregion als geeignet erwiesen. Sie weist zwei Charakteristika auf, die für heutige Modellregionen vorteilhaft sind:

- Innerstädtischer Streckenverlauf ($V \leq 50$ km/h) mit Shuttle-Charakteristik und Rundkurs-Route.
- Begrenzte Streckenlänge (Länge ≤ 10 km)., sodass sich der intensivere Instandhaltungsaufwand, die bessere und angepasste Beschilderung und die vorzuhaltende Ladeinfrastruktur in Verbindung mit der heute geringen Akkukapazität der Fahrzeuge auf einen geringen Radius erstrecken.

7 Fazit und Ausblick

Autonomem Fahren wird ein hoher gesellschaftlicher Wert beigelegt – in letzter Zeit finden sich tagtäglich Diskurse in Zeitungen, die sich mit der Thematik beschäftigen. Dabei steht das Automobil im Vordergrund. Literatur zu autonomen Bussen findet sich kaum, sodass für die vorliegende Ausarbeitung viele Aspekte auf die der autonomen Busse transferiert, erweitert bzw. reduziert werden mussten.

Zentraler Anwendungsfall autonomer Busse ist der öffentliche Nahverkehr. Er darf den Anschluss bei der aktuellen Transformation im Mobilitätssektor nicht verpassen. Die dafür bereitzustellenden Investitionsmittel sind enorm.

Die vielerorts angedachten und teils bereits umgesetzten autonomen Testfelder weisen shuttleartige Charakteristika auf weil heutige autonome Busse aufgrund fahrzeugseitiger und rechtlicher Restriktionen (Akkukapazität, maximal zulässige Geschwindigkeit) keinen gleichwertigen Ersatz zu Standardbussen mit Verbrennungsmotor darstellen. Sie stellen ein Zusatzangebot dar.

In der Ausarbeitung zeichnen sich Anforderungen im Bereich Ladeinfrastruktur ab: neben der Notwendigkeit exklusiver Ladeinfrastruktur für autonome Busse, handelt es sich um lokal abhängige Abwägungen. Die häufig zu findende Plug-In-Ladeinfrastruktur muss konsequenterweise in Zukunft automatisiert werden, um ein stimmiges autonomes Gesamtbild zu liefern. Je nach Netz-Zugänglichkeit kommen konduktive oder induktive Ladeansätze in Frage.

Weitere Anforderungen bestehen im Bereich der Straßenausstattung. Diese soll durch den Einbau von Sensorik, Road Side Units, schlauer werden. Weitere denkbare Elemente sind eine verbesserte Ausleuchtung kritischer Zonen, Leitsysteme in kritischen Infrastrukturen, Verkehrszeichen jeglicher Facette, Warnbeschilderung oder Landmarken zum Abgleich mit neuartigen hochgenauen digitalen Karten. Der Modernisierung, der anfänglichen Ausbesserung schlechter Stellen im Oberbau und der regelmäßigen Instandhaltung wird künftig ein hoher Stellenwert eingeräumt. Wie im IT-Bereich müssen Verkehrszeichen standardisiert werden.

Informationstechnische Anforderungen bestehen in den künftig häufiger und flächendeckender vorzufindenden Verkehrsleitzentralen. Sie dienen der Verkehrssteuerung und werden eine optimale Verteilung der Fahrzeuge ermöglichen. Die cloudbasierten Dienste müssen IT-Sicherheitsziele berücksichtigen um Cyber-Angriffe abzuwehren.

Zudem bedarf es einem veränderten Umgang mit Open Data. Die Mitarbeiter sind zu schulen und im weiteren Umgang mit Open Data zu sensibilisieren. Die Weitergabe oder Veröffentlichung von Daten darf nicht weiterhin als Wettbewerbsnachteil gesehen werden.

Eine Standardisierung kann durch die Integration auf den Mobilitätsdatenmarkt der Bundesanstalt für Straßenwesen erreicht werden.

Nicht zuletzt wird sich die Übertragungstechnik in wenigen Jahren rasant entwickeln. Es steht die Grundsatzentscheidung an, ob Mobilfunk- oder WLAN-basierte Verfahren zum Einsatz kommen. Beim mobilfunkbasierten 5G-Ansatz bedarf es Glasfaseranbindungen für die Mobilfunkbasisstationen, die vielerorts erst in der Vorplanung stecken.

Insbesondere im informationstechnischen Bereich hat die Infrastruktur - zusammenfassend gesehen - ein enormes Entwicklungspotential und Aufholbedarf. In der Literatur finden sich nur wenig konkrete Ausführungen zu den informationstechnischen Anforderungen an die Infrastruktur von morgen. Bislang ist die Infrastruktur passives Element des Verkehrs – es bedarf einer Evolution der Infrastruktur, um sie zum aktiven Element umzugestalten indem sie über Elemente verfügt, die die Kommunikation zwischen Infrastruktur, Fahrzeugen und Steuerzentralen ermöglicht.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Bestandsinfrastruktur und deren Eignung hinsichtlich der Nutzbarkeit durch autonome Busse. Auch wenn der heutige Stand der Technik auf fahrzeugseitigen Fragestellungen fußt, konnten für den kurz- bis langfristigen Horizont etliche infrastrukturelle Anforderungen festgehalten werden. Auch aus diesem Grunde sind bei der Methoden-Entwicklung zwei Zeithorizonte betrachtet worden, um den stark differierenden Anforderungen von heute und der nahen Zukunft gerecht zu werden. Nach genauer Abwägung hat sich die methodische Herangehensweise mit Flussdiagrammen gegenüber einer vereinfachten Nutzwertanalyse als vorteilhafter dargestellt. Auch bei Anwendung an den zwei Modellregionen Leonberg und Böblingen haben sich Flussdiagramme als geeignet erwiesen. Die anfängliche Erstellung logischer Verknüpfungen und daraus resultierender Bewertungsergebnisse durch eine einfache Ja-Nein-Abfragelogik erfordert viel Vorstrukturierung. Dennoch stellt sich das Instrument im Nachgang als anwenderfreundlich dar und besticht durch seine Nachvollziehbarkeit bzw. Transparenz gegenüber Dritten.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollten der kurzfristige und der mittel- bis langfristige Zeithorizont methodisch getrennt betrachtet werden, um die Bewertungsergebnisse feiner und zutreffender abstimmen zu können. Dadurch kann die Zahl der Kriterien reduziert werden, sodass die Abfrage kompakter und noch anwenderfreundlicher gestaltet ist.

Weitere Recherche muss sich detaillierter mit den langfristigen infrastrukturellen Anforderungen beschäftigen, da die entwickelte Methode aufgrund der schwach ausgeprägten Literatur zum heutigen Zeitpunkt nur Ansätze liefern kann.

Ebenso sollte die Methode weiterentwickelt werden, um ein Gesamtergebnis strukturiert herzuleiten was bislang nicht abgebildet wird. Dazu bedarf es der Verknüpfung der einzelnen Flussdiagramme und noch konkreterer Anforderungen an die Infrastruktur, um besser

abschätzen zu können in welchem Maße die einzelnen Flussdiagramme erfüllt werden müssen, um ein differenziertes Gesamtergebnis berechnen zu können.

Die Aufgabenstellung impliziert, dass sich im Rahmen dieser Ausarbeitung eine kompakte Methode zur Bewertung der Infrastruktur erarbeiten lässt, um sie auf die Eignung für den autonomen Fahrbetrieb von Bussen zu beurteilen. Dieser Hypothese kann zum heutigen Zeitpunkt bei Vernachlässigung der erforderlichen zwei Zeithorizonte zugestimmt werden. Inhaltlich muss jedoch festgestellt werden, dass sich die meisten Modellregionen bei der umfassenden Zusammenstellung aller infrastrukturellen Anforderungen bislang nicht für den Einsatz autonomer Busse eignen. Die Methode sollte daher keinesfalls als demotivierend gesehen werden, sondern zum Aufzeigen von Entwicklungspotentialen.

Abschließend ist daher festzuhalten, dass die Verkehrs- und IT-Infrastruktur für kurzfristige Anwendungsfälle geeignet ist, da aufgrund der fahrzeugseitigen Entwicklung kaum infrastruktureitige Anforderungen bestehen. Mittel- bis langfristig ist die entwickelte Methode jedoch anzuwenden. Es können mehrere Modellregionen miteinander verglichen werden. Aufgrund der Infrastrukturcharakteristika (lange, verbindliche Entscheidungen mit langer Vorplanung) müssen mittel- bis langfristige Anforderungen aber bereits kurzfristig thematisiert werden. Die Methode setzt dafür bereits kurzfristig Impulse und wird ihrer Aufgabe gerecht.

Die weitere, spannende Entwicklung autonomer Busse und deren sukzessiv tiefere Integration in die Bestandsinfrastruktur kann weiterhin mit Spannung weiterverfolgt werden.

8 Quellenverzeichnis

8.1 Literaturverzeichnis

- [1] ABB: *Gelegenheits-Ladestationen für Elektrobusse*. URL <https://new.abb.com/ev-charging/de/produkte/gelegenheits-ladestationen>. - abgerufen am 2018-11-07. — ABB Asea Brown Boveri Ltd
- [2] ACHIM SAWALL: *Deutsche Telekom testet LTE-V auf der A9*. URL <https://www.golem.de/news/huawei-deutsche-telekom-testet-lte-v-auf-der-a9-1607-122024.html>. - abgerufen am 2018-12-06. — Golem.de
- [3] ACHIM SAWALL: *Produkte für LTE-V2X verfügbar*. URL <https://www.golem.de/news/fraunhofer-und-huawei-produkte-fuer-lte-v2x-verfuegbar-1810-136904.html>. - abgerufen am 2018-12-06. — Golem.de
- [4] ADAC: *UKW Verkehrsfunksender in Deutschland*. URL https://www.adac.de/_mmm/pdf/tuz_navi_verkehrsfunksender_brd_1010_50460.pdf. - abgerufen am 2018-11-06. — ADAC
- [5] ALESSIO FILIPPI ; KEES MOERMAN ; GERARDO DAALDEROP ; PAUL D. ALEXANDER ; FRANZ SCHOBER ; WERNER PFLIEGL: *Ready to go - 802.11p als Kommunikationsstandard im Vergleich zu LTE und 5G*. URL <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/mobility/road/connected-mobility-solutions/documents/its-g5-ready-to-roll-de.pdf>. - abgerufen am 2018-11-01
- [6] ANDREAS DAUSENAU: *Automobile Systeme in der Automatisierung - Autonomes Fahren und Angriffssicherheit*. URL <https://www.uni-koblenz-landau.de/de/koblenz/fb4/ist/AGZoebel/Lehre/sommer2016/SeminarASidA/A4>. - abgerufen am 2018-10-30
- [7] ANDRIJAN MÖCKER: *LTE-V2X - Direktkommunikation zwischen Fahrzeugen im Test auf der A9*. URL <https://www.heise.de/newsticker/meldung/LTE-V2X-Direktkommunikation-zwischen-Fahrzeugen-im-Test-auf-der-A9-3632671.html>. - abgerufen am 2018-12-06. — heise online
- [8] ARNOLD EINHOLZ: *Schnelles Internet in Leonberg: Das Hochgeschwindigkeits-Netz für alle kommt - Leonberger Kreiszeitung*. URL <https://www.leonberger-kreiszeitung.de/inhalt.schnelles-internet-in-leonberg-das-hochgeschwindigkeits-netz-fuer-alle-kommt.cae8f92-1718-4c18-98e5-8c5548858bd2.html>. - abgerufen am 2019-02-09. — Leonberger Kreiszeitung
- [9] AUDI AG: *Integrated Roadways - Intelligente Straßen für induktives Laden*. URL <https://aiomag.de/integrated-roadways-intelligente-strassen-fuer-induktives-laden-12165>. - abgerufen am 2018-11-19. — aio
- [10] AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN: *Intelligente Straßen für intelligente Mobilität* -

- Anforderungen an die Straßeninfrastruktur in der digitalen Gesellschaft.* URL https://www.vt.bgu.tum.de/fileadmin/w00bnf/www/VKA/2015/Intelligente_Strassen_Custodis.pdf. - abgerufen am 2018-11-24. — Autobahndirektion Südbayern
- [11] AUTONOMES FAHREN & CO: *FlexKerbs - Straße ändert sich nach Bedarf.* URL <https://www.autonomes-fahren.de/flexkerbs-strasse-aendert-sich-nach-bedarf/>. - abgerufen am 2018-10-31. — Autonomes Fahren & Co
- [12] AUTONOMES FAHREN & CO: *Infrastruktur beim Autonomem Fahren?* URL <https://www.autonomes-fahren.de/infrastruktur-beim-autonomen-fahren/>. - abgerufen am 2018-10-25
- [13] BADEN-WÜRTTEMBERG: *2,5 Millionen Euro für Forschung auf dem Testfeld Autonomes Fahren.* URL <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/25-mio-euro-fuer-forschung-auf-dem-testfeld-autonomes-fahren/>. - abgerufen am 2018-10-26
- [14] BADISCHE ZEITUNG: *Mehr als 4000 Gäste fahren in Lahr mit dem autonomen Bus.* URL <http://www.badische-zeitung.de/lahr/mehr-als-4000-gaeste-fahren-in-lahr-mit-dem-autonomen-bus>. - abgerufen am 2018-10-25. — Badische Zeitung
- [15] BARBARA STOCK: *Dresden erprobt die Zukunft des Fahrens.* URL <http://www.dnn.de/Thema/Specials/e-Golf-Test/Dresden-erprobt-die-Zukunft-des-Fahrens>. - abgerufen am 2018-10-30. — Dresdner Neueste Nachrichten
- [16] BENJAMIN KIRCHBECK: *Industrie 4.0 in Echtzeit: Latenz von höchstens einer Millisekunde.* URL <https://www.industry-of-things.de/industrie-40-in-echtzeit-latenz-von-hoechstens-einer-millisekunde-a-602229/>. - abgerufen am 2018-10-29. — Industry of Things
- [17] BERND REDER: *Connected Car: Sprachwirrwarr bei Car-to-Car-Kommunikation.* URL <https://www.computerwoche.de/a/sprachwirrwarr-bei-car-to-car-kommunikation,3064890>. - abgerufen am 2018-11-01. — Computerwoche
- [18] BRAUNSCHWEIGER VERKEHRS-GMBH: *Braunschweig fährt jetzt induktiv- Der erste emil-Elektrobus ist auf der M19 unterwegs.* URL https://www.verkehr-bs.de/fileadmin/user_upload/downloads/Emil/A5_emil_Flyer_WEB.pdf. - abgerufen am 2018-12-18. — Braunschweig fährt induktiv!
- [19] BRIAN SHAFFER ; BENJAMIN KIRCHBECK: *Kfz-Radarsysteme: Die Gründe für den Wechsel von 24 GHz auf 77 GHz.* URL <https://www.next-mobility.news/kfz-radarsysteme-die-gruende-fuer-den-wechsel-von-24-ghz-auf-77-ghz-a-698641/>. - abgerufen am 2018-11-27. — next-mobility.news
- [20] BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN: *Nationale Stelle für Verkehrsdaten.* URL https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Kurzinfos/Fahrzeugtechnik/2018/F-09.html. - abgerufen am 2018-12-01. — Bundesanstalt für Straßenwesen
- [21] BUNDESMINISTERIUM DES INNERN, FÜR BAU UND HEIMAT: *Organisationshandbuch - Qualitative Bewertungsmethoden.* URL https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/65_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652_Qualitative/qualitative-node.html. - abgerufen am 2018-10-26.

— Organisationshandbuch

- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Digitale Testfelder für das automatisierte und vernetzte Fahren im Realverkehr in Deutschland*. URL https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/uebersicht-digitale-testfelder-avf-bmvi.pdf?__blob=publicationFile. - abgerufen am 2018-10-30
- [23] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Digitale Testfelder*. URL <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Digitale-Testfelder/Digitale-Testfelder.html>. - abgerufen am 2018-10-30
- [24] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM)*. URL <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mobilitaets-datenmarktplatz.html>. - abgerufen am 2018-12-01. — Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- [25] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG: *Informations- und Kommunikationstechnik*. URL https://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/archiv/reihen/strategiepapiere/Strategiepapier326_02_2013.pdf. - abgerufen am 2018-11-19. — Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
- [26] BUNDESNETZAGENTUR: *EMF-Datenbank Leonberg*. URL <https://emf2.bundesnetzagentur.de/karte/default.aspx>. - abgerufen am 2019-02-09. — EMF-Datenbank
- [27] COMPART: *Definition Mandantenfähigkeit*. URL <https://www.compart.com/de/glossar/mandantenfaehigkeit>. - abgerufen am 2018-12-02. — Compart
- [28] CYBERPORT.DE: *Definition IP-Schutzklasse*. URL <https://www.cyberport.de/techniklexikon/inhaltsverzeichnis/i/ip-schutzklasse.html>. - abgerufen am 2018-11-01. — Techniklexikon Cyberport
- [29] DAIMLER: *Schnell durch die Stadt. Vorfahrt dank Bus Rapid Transit*. URL <https://www.daimler.com/produkte/services/mobility-services/bus-rapid-transit/>. - abgerufen am 2018-11-19. — Daimler
- [30] DEUTSCHE BAHN: *Deutsche Bahn und Berliner Verkehrsbetriebe kooperieren im Bereich autonomes Fahren*. URL https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Berliner-Verkehrsbetriebe-kooperieren-im-Bereich-autonomes-Fahren-2102370. - abgerufen am 2018-11-07. — Deutsche Bahn AG
- [31] DEUTSCHE BAHN: *Faktenblatt Erste autonome Buslinie Deutschlands*. URL <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/259942/5ff8f9ba554b7fa90cd574836614918d/Faktenblatt-autonomer-Bus-data.pdf>. — Faktenblatt Erste autonome Buslinie Deutschlands
- [32] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: *Das intelligente Fahrzeug der Zukunft – Komponenten und Entwicklungswerkzeuge*. URL

https://www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/veranstaltungen/2016/IntelligentesFahrzeug_Demonstrationen-und-Ausstellung_160427.pdf. - abgerufen am 2018-11-25. — Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

[33] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: *Basisdienst C2X Road Side Unit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*. URL http://www.urbanonline.org/cms/upload/download/allgemein/Halbzeitpraesentation_2014-05-14/Demonstratoren_Projekt_Vernetzes_Verkehrssystem/VV-SK_DLR.pdf. - abgerufen am 2018-11-25. — Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Abteilung Verkehrssystemtechnik

[34] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität*. URL <https://www.dlr.de/ts/aim#gallery/25289>. - abgerufen am 2018-11-25. — Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Abteilung Verkehrssystemtechnik

[35] DIAGNOSE:FUNK: *Die Leistungsmerkmale der Übertragungstechniken*. URL <https://www.diagnose-funk.org/themen/mobilfunk-alternativen/breitbandnetze-glasfaser-statt-lte/die-leistungsmerkmale-der-uebertragungstechniken>. - abgerufen am 2018-12-11. — diagnose:funk

[36] DON DAHLMANN: *Welche Sensoren gibt es im Auto – und wofür sind sie da?* URL <https://ngin-mobility.com/artikel/welche-sensoren-gibt-es-im-auto-und-wofuer-sind-sie-da/>. - abgerufen am 2018-11-26. — NGIN Mobility

[37] DR. STEFAN RIEDL: *Definition Schnittstelle*. URL <https://www.it-business.de/was-ist-eine-schnittstelle-a-714831/>. - abgerufen am 2018-12-11. — IT-business

[38] DR. THORALF KNOTE ; BEATE HAUFE ; DR. LARS SAROCH: *E-Bus-Standard - Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse*. URL https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf. - abgerufen am 2018-10-30

[39] DUDEN: *Definition Methodik*. URL <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methodik>. - abgerufen am 2018-12-13. — Duden.de

[40] ELEKTROMOBILITÄT NRW: *Elektrobusse in NRW - Marktübersicht und -entwicklungen*. URL <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwi094i07efeAhUHZKQKHaiiDw0QFjACegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fbroschueren.nordrheinwestfalendirekt.de%2Fherunterladen%2Fder%2Fdatei%2Fe-busse-broschuere-final-pdf%2Fvon%2Felektrobusse-in-nrw-marktuebersicht-und-entwicklungen%2Fvom%2Fenergieagentur%2F2901&usg=AOvVaw05UKTJj3HEupv6L-35s57S>. - abgerufen am 2018-11-22. — Elektromobilität NRW

[41] ENBW: *E-Ladestationen für Elektroauto, E-Bike und Roller*. URL <https://www.enbw.com/ladestationen>. - abgerufen am 2018-12-18. — E-Ladestationen für Elektroauto, E-Bike und Roller

[42] EON: *Elektromobilität: Alles rund ums Laden eines Elektroautos*. URL <https://www.eon.de/de/eonerleben/laden-von-elektroautos.html>. - abgerufen am 2018-11-07. — eon

[43] ERIC WEIS: *Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit - Schutzziele der*

- Informationssicherheit.* URL <https://www.brandmauer.de/blog/it-security/schutzziele-der-informationssicherheit>. - abgerufen am 2018-11-02. — Brandmauer IT Security Blog
- [44] ERNESTO SINGER: *Mercedes-Benz Future Bus: So wird öffentlicher Nahverkehr autonom.* URL <https://www.daimler.com/innovation/next/mercedes-benz-future-bus-so-wird-oeffentlicher-nahverkehr-autonom.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — Daimler
- [45] ERNST HALBMAYER: *Methoden, Methodik und Methodologie.* URL <https://www.univie.ac.at/ksa/elearning/cp/ksamethoden/ksamethoden-30.html>. - abgerufen am 2019-03-03. — Einführung in die empirischen Methoden der Kultur- und Sozialanthropologie
- [46] EVOBUS GMBH: *Die Technik des Future Bus.* URL <https://www.evobus.com/evobus-gmbh-deutsch/layer/die-technik-des-future-bus/>. - abgerufen am 2018-10-25. — EvoBus GmbH
- [47] FIS: *Erhaltung von Straßenfahrbahnen.* URL <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/415195/>. - abgerufen am 2018-11-08. — Forschungsinformationssystem
- [48] FORSCHUNGSINFORMATIONSSYSTEM (FIS): *Betriebsformen im Regionalverkehr auf dem Lande.* URL <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/13332/>. - abgerufen am 2018-11-22. — Forschungsinformationssystem (FIS)
- [49] *Forschungsprojekt URBAN - Vernetztes Verkehrssystem.* . — Schlussbericht Forschungsprojekt URBAN - Vernetztes Verkehrssystem
- [50] GEMEINDERAT STADT BERN: *Erneuerung Lichtsignalanlage Effinger-/Zieglerstrasse: Projektierungs- und Ausführungskredit.* URL <https://www.bern.ch/.../aktuell.../stadtratsvortrag-erneuerung-lichtsignalanlage.pdf>. - abgerufen am 2018-11-27. — Vortrag des Gemeinderats an den Stadtrat
- [51] GIACOMO TUVERI ; HENDRIK HÄRTER: *Die Technik hinter vernetzten Fahrzeugen und autonomem Fahren.* URL <https://www.next-mobility.news/die-technik-hinter-vernetzten-fahrzeugen-und-autonmem-fahren-a-665028/>. - abgerufen am 2018-10-25. — next-mobility.news
- [52] HANS DORSCH: *Bus ohne Fahrer.* URL <https://www.heise.de/tr/artikel/Bus-ohne-Fahrer-3295046.html>. - abgerufen am 2018-11-05. — Technology Review
- [53] HARTMUT SCHUMACHER: *GPS-Empfang prüfen.* URL <https://androidmag.de/tipps/profi/gps-empfang-pruefen/>. - abgerufen am 2018-12-20. — Androidmag
- [54] HEIKE LORENZ: *Entscheidungsmethoden – Eine Wahl zwischen Alternativen treffen.* URL <https://das-unternehmerhandbuch.de/entscheidungsmethoden-wahl-zwischen-alternativen/>. - abgerufen am 2018-10-26. — Das Unternehmerhandbuch
- [55] HELMUT BÜNDER ; THIEMO HEEG: *Gerne überall 5G – aber bitte keinen Mast vor der eigenen Tür.* URL <https://www.faz.net/1.5885467>. - abgerufen am 2019-02-25. — Frankfurter Allgemeine Zeitung
- [56] HENNING MAAK: *Verkehrsproblem in Leonberg- Intelligentes System soll Verkehrsnot lindern.* URL <https://www.leonberger-kreiszeitung.de/inhalt.leonberg-projekt-des-vrs-wird-empfohlen->

- intelligentes-system-soll-verkehrsnot-lindern.6e5c2b8a-771b-480f-ba33-11fce0b51d36.html. -
abgerufen am 2019-02-09. — Leonberger Kreiszeitung Germany
- [57] HENNING NATZSCHKA: *Straßenbau: Entwurf und Bautechnik*. 3. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011 — ISBN 978-3-8348-1343-5
- [58] HORST GERHARD: *Der richtige Asphalt am richtigen Platz*. URL https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/asphaltberatung/downloads/vortrag_gerhard_30.11.pdf. - abgerufen am 2019-04-10. — Bayerische Asphalt-Mischwerke
- [59] HUAWEI TECHNOLOGIES DEUTSCHLAND: *LTE-V2X-Direktkommunikation für mehr Verkehrssicherheit*. URL <https://www.presseportal.de/pm/108888/4116828>. - abgerufen am 2018-12-06. — presseportal.de
- [60] IDS UNI HANNOVER: *Definition Fahrzeugklassen*. URL https://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids_lehre/lichttechnik/8Signalbild.Teil_Regelungen.pdf. - abgerufen am 2019-04-10. — IDS
- [61] INFORMATIONSZENTRUM MOBILFUNK: *Wissenswertes zu 5G*. URL <http://www.informationszentrum-mobilfunk.de/technik/funktionsweise/5g>. - abgerufen am 2018-12-25. — Informationszentrum Mobilfunk
- [62] INFORMATIONSZENTRUM MOBILFUNK: *5G Nutzen und Anwendungen*. URL <http://www.informationszentrum-mobilfunk.de/artikel/5g-nutzen-und-anwendungen>. - abgerufen am 2018-12-25. — Informationszentrum Mobilfunk
- [63] INGENIEUR GESELLSCHAFT VERKEHR IGV: *Stadt Leonberg - Masterplan für die Gestaltung nachhaltiger und emissionsfreier Mobilität „Green City“*. URL https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/Masterplaene-Green-City/leonberg.pdf?__blob=publicationFile. - abgerufen am 2019-02-09. — Stadt Leonberg - Masterplan „Saubere Luft“
- [64] ITWISSEN: *DAB (digital audio broadcast)*. URL <https://www.itwissen.info/DAB-digital-audio-broadcast-Digitaler-Hoerfunk.html>. - abgerufen am 2018-12-05. — ITWissen.info
- [65] ITWISSEN: *TMC (traffic message channel)*. URL <https://www.itwissen.info/TMC-traffic-message-channel-Digitaler-Verkehrsfunk.html>. - abgerufen am 2018-12-05. — ITWissen.info
- [66] ITWISSEN: *CAM (cooperative awareness message)*. URL <https://www.itwissen.info/CAM-cooperative-awareness-message.html>. - abgerufen am 2018-12-05. — ITWissen.info
- [67] ITWISSEN: *Definition Sensor*. URL <https://www.itwissen.info/Sensor-sensor.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — ITWissen.info
- [68] JOCHEN KNECHT: *5G vs. WLAN: China gegen USA und Europa*. URL <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/vehicle-2-x-datenerbertragung-globaler-streit/>. - abgerufen am 2018-12-11. — auto motor und sport
- [69] JOHANNES REICHEL: *DB-Bus in Bad Birnbach fährt ein Jahr unfallfrei*. URL <https://www.vision-mobility.de/de/news/autonomes-fahren-db-bus-bad-birnbach-faehrt-ein-jahr->

unfallfrei-2295.html. - abgerufen am 2018-10-27. — VISION mobility - Das Fachmagazin für Pkw, Flottenmanagement, Mobilität, Konnektivität und Infrastruktur

[70] JOHANNES WIESINGER: *Störeinflüsse bei der Navigation.* URL https://www.kfztech.de/kfztechnik/komfort/navigation/navigation_stoereinfluesse.htm. - abgerufen am 2018-12-25. — kfztech.de

[71] JOHANNING, VOLKER ; MILDNER, ROMAN: *Car IT kompakt: das Auto der Zukunft -vernetzt und autonom fahren.* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 — ISBN 978-3-658-09967-1

[72] JONAS-ERIK SCHMIDT: *Straße der Zukunft heilt sich selbst und liefert Strom.* URL <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Strasse-der-Zukunft-heilt-sich-selbst-und-liefert-Strom-3876483.html>. - abgerufen am 2018-11-08. — heise online

[73] KAI-HOLGER EISELE: *Neue Sensor- und Informationstechnologien vermessen die Welt.* URL <https://www.daimler.com/innovation/next/neue-sensor-und-informationstechnologien-vermessen-die-welt.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — Daimler

[74] KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE: *Auto der Zukunft soll sicher, leicht und bezahlbar sein.* URL https://www.kit.edu/kit/pi_2018_136_auto-der-zukunft-soll-sicher-leicht-und-bezahlbar-sein.php. - abgerufen am 2019-01-09. — Karlsruher Institut für Technologie

[75] KARLSRUHER VERKEHRSVERBUND: *Ruftaxi.* URL <https://www.kvv.de/fahrtplanen/sonderfahrten/ruftaxi.html>. - abgerufen am 2019-01-13. — KVV

[76] KATHARINA JUSCHKAT: *Mit Sensoren den Verkehr besser überblicken.* URL <https://www.elektrotechnik.vogel.de/mit-sensoren-den-verkehr-besser-ueberblicken-a-659593/>. - abgerufen am 2018-11-26. — elektrotechnik

[77] KATRIN NIKOLAUS: *Chauffiert werden - ohne Fahrer.* URL <https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/digitalisierung-und-software/autonome-systeme-selbstfahrende-fahrzeuge.html>. - abgerufen am 2018-10-30. — Siemens

[78] KEEGAN GARCIA: *Radarsensoren und Signalverarbeitung in einem SoC.* URL [/elektronik/halbleiter/radarsensoren-und-signalverarbeitung-in-einem-soc-148183.html](https://www.elektronik-halbleiter.com/radarsensoren-und-signalverarbeitung-in-einem-soc-148183.html). - abgerufen am 2018-11-26. — Elektroniknet

[79] KREISZEITUNG BÖBLINGER BOTE: *Freie fahrt für Linienbusse - Sindelfingen stellt System um.* URL https://www.krzbb.de/krz_51_111190490-13-_Freie-fahrt-fuer-Linienbusse.html. - abgerufen am 2019-02-17. — Kreiszeitung Böblinger Bote

[80] KRYPTOWISSEN: *Schutzziele der Informationssicherheit.* URL <https://www.kryptowissen.de/schutzziele.php>. - abgerufen am 2018-12-10. — Kryptowissen.de

[81] LANDKREIS BÖBLINGEN: *Breitbandausbau im Landkreis Böblingen.* URL https://www.lrabb.de/Lde/start/Service+_+Verwaltung/breitband.html. - abgerufen am 2019-02-17. — Landkreis Böblingen

[82] LEITSPEED: *GPS-Satellitenabdeckung.* URL <http://www.leitspeed.de/VBOXMotorsport/SonstigeInfos/GPS-Satelliten-Empfangs-Daten.php>. -

abgerufen am 2018-12-20. — Leitspeed.de

[83] LTE-ANBIETER.INFO: *Übersicht aller LTE-Release und Gerätekategorien*. URL <https://www.lte-anbieter.info/technik/kategorien-und-3gpp-release.php>. - abgerufen am 2019-01-10. — LTE-anbieter.info

[84] MAGED ZAKI: *C-V2X ebnet den Weg hin zu 5G für autonomes Fahren*. URL <https://www.all-electronics.de/c-v2x-5g-autonomes-fahren/>. - abgerufen am 2018-12-06. — All-Electronics.de

[85] MAGICMAPS: *Wie funktioniert Satellitennavigation?* URL <https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/wie-funktioniert-gps.html>. - abgerufen am 2018-12-20. — magicmaps.de

[86] MARGARET ROUSE: *Definition Cloud-Storage-Infrastruktur*. URL <https://www.searchstorage.de/definition/Infrastruktur-fuer-Cloud-Storage>. - abgerufen am 2018-12-02. — SearchStorage.de

[87] MARINELA POTOR: *Induktives Laden- Elektroautos mit unbegrenzter Reichweite*. URL <https://mobilitymag.de/induktives-laden-elektroautos-reichweite/>. - abgerufen am 2018-12-17. — Mobility Mag

[88] MARK PATRICK ; BENJAMIN KIRCHBECK: *V2X-Kommunikation: LTE vs. DSRC*. URL <https://www.next-mobility.news/v2x-kommunikation-lte-vs-dsrc-a-699809/>. - abgerufen am 2018-12-06. — next-mobility.news

[89] MARKUS MAURER ; J. CHRISTIAN GERDES ; BARBARA LENZ ; HERMANN WINNER (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Berlin : Springer Vieweg, 2015 — ISBN 978-3-662-45853-2

[90] MARTIN RANDELHOFF: *Automatisierung des Straßengüterfernverkehrs*. URL <https://www.zukunft-mobilitaet.net/113531/analyse/automatisierung-strassengueterverkehr-selbstfahrende-lkw-autonom-automatisierte-nfz-nutzfahrzeuge/>. - abgerufen am 2018-10-25. — Zukunft Mobilität

[91] MARTIN RÖHRLEEF ; DR. VOLKER DEUTSCH ; DR. TILL ACKERMANN: *Positionspapier - Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen*. URL <https://www.vdv.de/position-autonome-fahrzeuge.pdf>

[92] MATTHIAS RÖSER: *BAST wird Nationale Stelle für Verkehrsinformationen*. URL <https://www.verkehrsbrief.de/bast-wird-nationale-stelle-fur-verkehrsinformationen/>. - abgerufen am 2018-12-01. — Verkehrsbrief

[93] MICROSOFT AZURE: *Definition Cloud*. URL <https://azure.microsoft.com/de-de/overview/what-is-the-cloud/>. - abgerufen am 2018-12-02. — Microsoft Azure

[94] MINISTERIUM FÜR VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG: *Nachhaltige Mobilität*. URL <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/verkehrspolitik/nachhaltige-mobilitaet/>. - abgerufen am 2018-11-05. — Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

[95] MOBI-WISSEN.DE: *Definition Kraftomnibus*. URL <http://www.mobi->

wissen.de/Verkehr/Kraftomnibus. - abgerufen am 2019-04-10

[96] NAHVERKEHRSGESELLSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Umweltverbund*. URL <https://www.nvbw.de/aufgaben/umweltverbund/>. - abgerufen am 2018-11-05. — NVBW.de

[97] NEW BUSINESS: *Infrastruktur für Autonomes Fahren*. URL <https://www.newbusiness.at/magazin/infrastruktur-fuer-autonomes-fahren>. - abgerufen am 2018-10-25. — New Business - Magazin für Unternehmer

[98] NICO GRUNDMEIER: *C.I.A. Prinzip*. URL <http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug10/sli/indexd917.html?q=node/19>. - abgerufen am 2018-11-02. — Sicherheitslücken im Internet

[99] ODG: *OCIT-Schnittstellen*. URL <https://www.ocit.org/de/ocit/schnittstellen/>. - abgerufen am 2018-11-27. — Ocit Developer Group

[100] OLAF PONETA: *Zukunftstechnologien am Beispiel der fahrerlosen Fahrzeuge*. URL [https://www.uni-koblenz-](https://www.uni-koblenz-landau.de/de/koblenz/fb4/ist/AGZoebel/Lehre/Sommer2015/SeminarASidA/TA9)

[landau.de/de/koblenz/fb4/ist/AGZoebel/Lehre/Sommer2015/SeminarASidA/TA9](https://www.uni-koblenz-landau.de/de/koblenz/fb4/ist/AGZoebel/Lehre/Sommer2015/SeminarASidA/TA9). - abgerufen am 2018-11-05. — Seminar Sommersemester 2015 - Automobile Systeme in der Automatisierung

[101] PATRIC STIELER ; VOLKER KANNGIESSER ; FLORIAN HILTI: *MobilitätsDatenMarktplatz – welche Chancen ergeben sich für Städte und Gemeinden?* URL http://gispoint.de/gisopen-paper?id=127&tx_browser_pi1%5BshowUid%5D=1571. - abgerufen am 2018-12-01

[102] PAUL BALZER: *Fahrzeugumfeldsensorik: Überblick und Vergleich zwischen Lidar, Radar, Video*. URL <http://www.cbcity.de/fahrzeugumfeldsensorik-ueberblick-und-vergleich-zwischen-lidar-radar-video>. - abgerufen am 2018-11-26. — Motorblog

[103] PETER NEUMANN: *Olli - erstmals ist in Berlin ein autonom fahrender Bus unterwegs*. URL <https://www.berliner-zeitung.de/berlin/verkehr/-olli--erstmals-ist-in-berlin-ein-autonom-fahrender-bus-unterwegs-25205714>. - abgerufen am 2018-11-03. — Berliner Zeitung

[104] PROF. DR. CHRISTIAN SIEMERS ; SEBASTIAN GERSTL: *Echtzeit - Grundlagen von Echtzeitsystemen*. URL <https://www.embedded-software-engineering.de/echtzeit-grundlagen-von-echtzeitsystemen-a-669520/>. - abgerufen am 2019-03-10. — Elektronik Praxis

[105] PROF. DR. SUSANNE PATIG ; ANDRÉ ZWANZIGER ; SEBASTIAN HERDEN: *Definition IT-Infrastruktur*. URL <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/datenwissen/Informationsmanagement/IT-Infrastruktur>. - abgerufen am 2018-10-26. — Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik - Online Lexikon

[106] PROF. DR. WOLFGANG KÜHN: Hochautomatisiertes Fahren und Straßenverkehrsinfrastruktur. In: *Straßenverkehrstechnik* (2018), Nr. September 2018

[107] PROF. DR.-ING. PETER KIRCHHOFF ; ANTONIOS TSAKARESTOS: *Planung des ÖPNV in ländlichen Räumen: Ziele - Entwurf - Realisierung*. 1. Auflage. : Vieweg + Teubner, 2007 — ISBN 978-3-8351-0227-9

[108] PROJEKTMANAGEMENT: DEFINITIONEN, EINFÜHRUNGEN UND VORLAGEN: *Definition Methode*.

- URL <http://projektmanagement-definitionen.de/glossar/methode/>. - abgerufen am 2018-10-26
- [109] PSA GRUPPE DEUTSCHLAND: *Zusammenarbeit zwischen der Groupe PSA und VINCI Autoroutes -erstmals fährt ein autonomes Fahrzeug durch eine Mautstation*. URL <https://de-media.groupe-psa.com/de/zusammenarbeit-zwischen-der-groupe-psa-und-vinci-autoroutes-erstmals-f%C3%A4hrt-ein-autonomes-fahrzeug>. - abgerufen am 2018-10-30. — PSA Gruppe Deutschland
- [110] REGIERUNGSPRÄSIDIEN BADEN-WÜRTTEMBERG: *Straßen und Bauwerke erhalten*. URL <https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/Verkehr/Strassen/Seiten/Strassenerhaltung.aspx>. - abgerufen am 2018-11-08. — Regierungspräsidien Baden-Württemberg
- [111] RITZ, JOHANNES: *Mobilitätswende-autonome Autos erobern unsere Strassen: Ressourcenverbrauch, Ökonomie und Sicherheit*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2018 — ISBN 978-3-658-20952-0
- [112] ROSCHER, KARSTEN ; JIRU, JOSEF: *Autonomes Verkehrswarnsystem mit Car2X-Kommunikation*. URL <https://www.esk.fraunhofer.de/de/forschung/projekte/VIP.html>. - abgerufen am 2018-11-25. — Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik ESK
- [113] RÜDIGER ABELE: *Hochpräzise Landkarten für das autonome Fahren*. URL <https://www.daimler.com/innovation/next/hochpraezise-landkarten-fuer-das-autonome-fahren.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — Daimler
- [114] SCHRAVEN, SEBASTIAN ; KLEY, FABIAN ; WIETSCHEL, MARTIN: *Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung*. URL https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2010/WP8-2010_Induktive-Ladung-EV.pdf. - abgerufen am 2018-12-17. — Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
- [115] SIEMENS: *Sittraffic ESCoS - Das kooperative Verkehrssystem für die digitale Straße*. URL <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/mobility/road/connected-mobility-solutions/cooperative-systems/documents/sittraffic-escos-de.pdf>. - abgerufen am 2018-11-19. — Siemens
- [116] SIEMENS: *Ladetechnik für eBusse*. URL <https://www.siemens.com/global/de/home/produkte/mobilitaet/strassenverkehr/elektromobilitaet/ebus-ladeinfrastruktur.html>. - abgerufen am 2018-10-30. — Siemens.com
- [117] SONJA PIEPER: *Sensoren und Aktoren von autonomen Robotern*. URL https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/technik_didaktik/sensoren_aktoren_roboter.pdf. - abgerufen am 2018-11-19
- [118] SPEKTRUM.DE: *Die Straßen der Zukunft*. URL <https://www.spektrum.de/news/intelligente-strassen-sollen-strom-erzeugen/1351985>. - abgerufen am 2018-11-08. — Spektrum.de
- [119] SPEKTRUM.DE: *Definition Verkehrsinfrastruktur*. URL <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/verkehrsinfrastruktur/8607>. - abgerufen am 2018-10-26. — Lexikon der Geographie

- [120] STADT BRAUNSCHWEIG: *emil - ein Bus fährt induktiv*. URL http://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/e-mobilitaet/emil.html. - abgerufen am 2018-12-18. — braunschweig.de
- [121] STADT FÜRTH: *Verkehrsmanagement Fürth - Teil Dauerzählstellen und Verkehrsrechner*. URL http://stadtrat.fuerth.de/vo0050.php?__kvonr=54143&voselect=47697. - abgerufen am 2018-11-27. — Stadt Fürth
- [122] STADT STUTTGART: *IVLZ - Aufgaben und Erfolge*. URL <https://www.stuttgart.de/item/show/273534/1>. - abgerufen am 2018-11-20. — Stadt Stuttgart
- [123] STADT STUTTGART: *Stuttgart - Integrierte Verkehrsleitzentrale (IVLZ)*. URL <https://www.stuttgart.de/ivlz>. - abgerufen am 2018-11-20. — Stadt Stuttgart
- [124] STEFFAN HEUER: *Künstliche Intelligenz macht Fahrzeuge fit für die Zukunft*. URL <https://www.daimler.com/innovation/next/kuenstliche-intelligenz-macht-fahrzeuge-fit-fuer-die-zukunft.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — Daimler
- [125] STEFFAN HEUER: *CES 2017: Intelligente Karten von HERE für autonome Fahrzeuge*. URL <https://www.daimler.com/innovation/next/karten-mit-koepfchen.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — Daimler
- [126] STEFFAN HEUER: *Konferenz SXSW 2017: Infrastruktur für autonome Fahrzeuge*. URL <https://www.daimler.com/innovation/next/strassen-und-streams.html>. - abgerufen am 2018-10-25. — Daimler
- [127] STUTTGARTER NACHRICHTEN: *Mobilitätsplattform für die Region: Böblingen - Pfortnerampeln für die Innenstadt*. URL <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.mobilitaetsplattform-fuer-die-region-mit-elektronik-gegen-den-dauerstau-page3.c6421af4-73f8-49b3-8a29-0abeb7933306.html>. - abgerufen am 2019-02-17. — stuttgarter-nachrichten.de
- [128] STUTTGARTER ZEITUNG: *Feinstaub in Stuttgart: Details zur geplanten Busspur am Neckartor*. URL <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.feinstaub-in-stuttgart-details-zur-geplanten-busspur-am-neckartor.a293ff5c-8b67-4bdb-abce-013c8f8163f9.html>. - abgerufen am 2018-11-09. — stuttgarter-zeitung.de
- [129] SYLVIA LÖSEL: *Was ist eine Kamera?* URL <https://www.it-business.de/was-ist-eine-kamera-a-666175/>. - abgerufen am 2018-11-19. — IT-business
- [130] TELEFONICA DEUTSCHLAND: *Telefonica Netzabdeckung Leonberg*. URL <https://www.o2online.de/service/netz-verfuegbarkeit/netzabdeckung/>. - abgerufen am 2019-02-09. — Netzabdeckung: Alles zu Technologie & Infrastruktur von o2
- [131] TELEKOM: *Telekom Netzabdeckung Leonberg*. URL <https://www.telekom.de/start/netzausbau>. - abgerufen am 2019-02-09. — Telekom Netzausbau mit bester Netzqualität
- [132] THOMAS K. SLOTWINSKI: *Leonberger Haushalt: Einnahmen steigen, die Ausgaben noch mehr*. URL <https://www.leonberger-kreiszeitung.de/inhalt.leonberger-haushalt-einnahmen-steigen-die-ausgaben-noch-mehr.461bf82b-b362-44be-8d48-03be9f4d8cdf.html>. - abgerufen am 2019-02-10.

— Leonberger Kreiszeitung Germany

[133] TIM SANWALD: *Verkehrsabhängiges Routing basierend auf TMC Nachrichten*. URL ftp://ftp.informatik.uni-stuttgart.de/pub/library/ncstrl.ustuttgart_fi/TR-2013-80/TR-2013-80.pdf. - abgerufen am 2018-12-05. — Bachelorarbeit Nr. 80, Verkehrsabhängiges Routing basierend auf TMC Nachrichten

[134] ULRIKE OTTO: *Autonomes Fahren in Leonberg: Ein selbst fahrender Bus am Engelberg*. URL <http://www.leonberger-kreiszeitung.de/inhalt.autonomes-fahren-in-leonberg-ein-selbst-fahrender-bus-am-engelberg.33503e89-944f-4d54-8f36-1e8b264a00df.html>. - abgerufen am 2018-10-25.

— Leonberger Kreiszeitung

[135] VERA BAUER: *Intelligente Straße erkennt Unfälle und Staus*. URL <https://www.mobilegeeks.de/news/integrated-roadways-intelligente-strasse-erkennt-unfaelle-und-staus/>. - abgerufen am 2018-11-13. — MobileGeeks Deutschland

[136] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. URL <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>. - abgerufen am 2018-10-29

[137] VERBAND KOMMUNALER UNTERNEHMEN: *Infrastrukturziel Glasfaser*. URL <https://www.vku.de/vku-positionen/kommunaler-breitbandausbau/infrastrukturziel-glasfaser/>. - abgerufen am 2018-12-13. — Verband Kommunaler Unternehmen e.V.

[138] VEREINIGUNG DER BAYERISCHEN WIRTSCHAFT E.V.: *Positionspapier Automatisiertes Fahren - Infrastruktur*. URL <https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2016/Downloads/160418-Automatisiertes-Fahren-Infrastruktur.pdf>. - abgerufen am 2018-10-25

[139] VERKEHRS- UND TARIFVERBUND STUTTGART: *Rufauto-Linien im Landkreis Böblingen*. URL <http://www.vvs.de/download/Ruftaxi-Landkreis-Boeblingen.pdf>. - abgerufen am 2019-01-13. — Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart GmbH

[140] VODAFONE: *Infrastruktur ausgebaut - Vodafone bringt LTE zum Schönbuchtunnel*. URL <https://www.presseportal.de/pm/43172/4187613>. - abgerufen am 2019-02-17. — presseportal.de

[141] VODAFONE: *Vodafone Netzabdeckung Leonberg*. URL <https://www.vodafone.de/hilfe/netzabdeckung.html>. - abgerufen am 2019-02-09. — Netzabdeckung: So gut ist unser Mobilfunknetz

[142] WEIDMANN ELEKTRONIK: *24 GHz Radarsensor - Grundlagen*. URL http://www.weidmann-elektronik.de/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=17&Itemid=21. - abgerufen am 2018-11-26. — Weidmann Elektronik

[143] WERNER BEUTNAGEL: *Smart Streets: Fundament der Mobilität*. URL <https://www.car-it.com/fundament-der-mobilitaet/id-0059920?cookie-state-change=1542117642128>. - abgerufen am 2018-11-13. — Car-it.com - Connected Mobility

[144] WERNER PLUTA: *Mainz testet autonomen Bus am Rheinufer*. URL

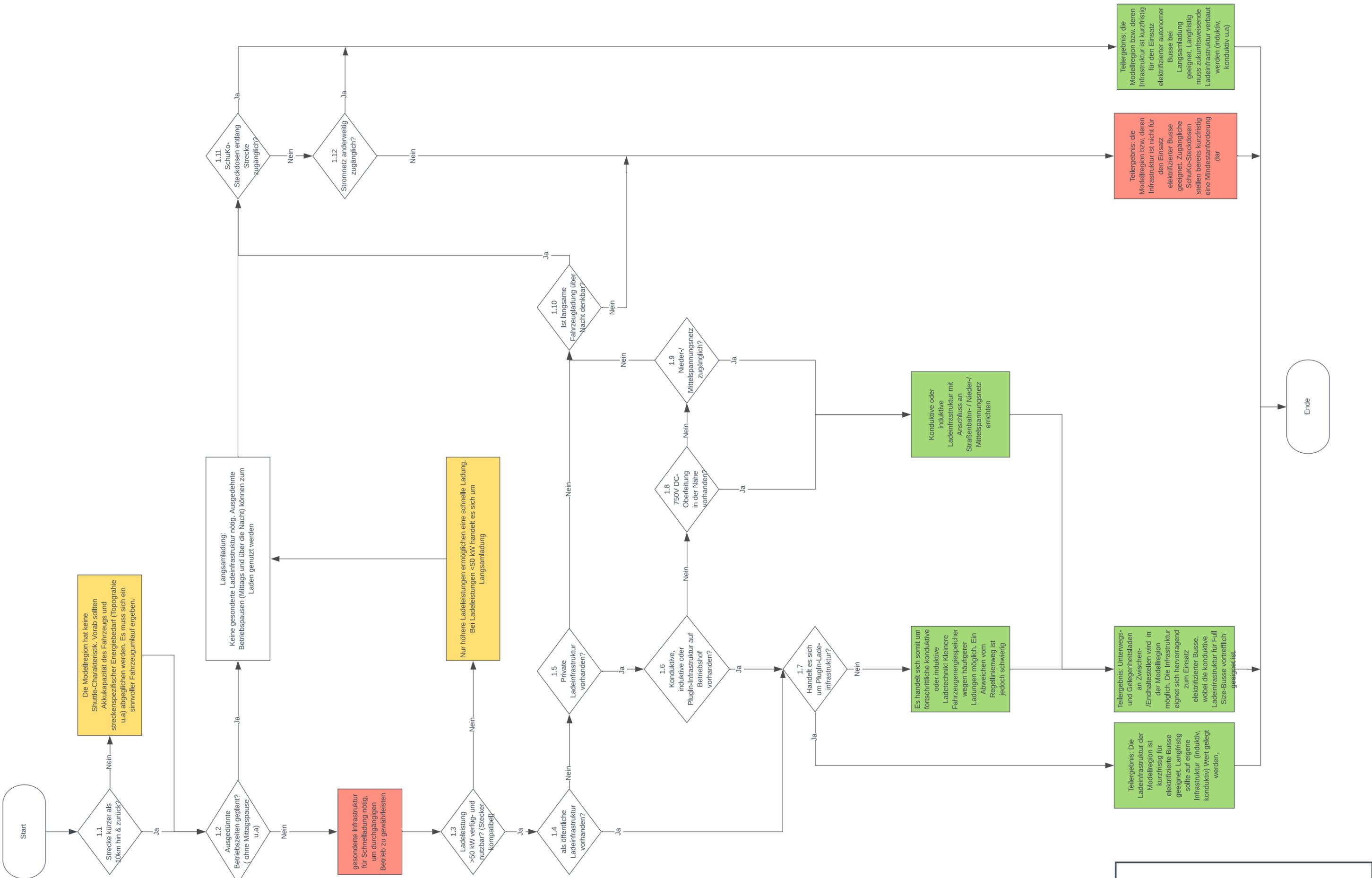
- <https://www.golem.de/news/navya-mainz-testet-autonomen-bus-am-rheinufer-1808-135897.html>. - abgerufen am 2018-11-03
- [145] WERNER PLUTA: *ÖPNV-Anbieter will mit autonom fahrendem Bus auf die Straße*. URL <https://www.golem.de/news/autonomes-fahren-oePNV-anbieter-will-mit-autonom-fahrendem-bus-auf-die-strasse-1809-136682.html>. - abgerufen am 2018-10-25
- [146] WIKIPEDIA: *Definition Autonomes Computing*. URL https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Autonomic_Computing&oldid=157335028. - abgerufen am 2018-12-02. — Wikipedia
- [147] WIKIPEDIA: *Technical Specifications EasyMile EZ10*. URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=EasyMile_EZ10&oldid=856347213. - abgerufen am 2018-11-07. — Wikipedia
- [148] WIKIPEDIA: *Mobilfunkstandard*. URL <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mobilfunkstandard&oldid=180624561>. - abgerufen am 2018-12-05. — Wikipedia
- [149] WIKIPEDIA: *Technische Daten Easymile EZ10*. URL https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Easymile_EZ10&oldid=181211806. - abgerufen am 2018-11-04. — Wikipedia
- [150] WIKIPEDIA: *Körperscanner*. URL <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=K%C3%B6rperscanner&oldid=182171414>. - abgerufen am 2018-11-27. — Wikipedia
- [151] WIKIPEDIA: *Busfahrstreifen*. URL <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Busfahrstreifen&oldid=182777996>. - abgerufen am 2018-11-19. — Wikipedia
- [152] WIKIPEDIA: *Definition Skalierbarkeit*. URL <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Skalierbarkeit&oldid=183496370>. - abgerufen am 2018-12-21. — Wikipedia
- [153] WISSENSCHAFTLICHE DIENSTE DES DEUTSCHEN BUNDESTAGES: *Privatisierung von staatlichen Sicherheitsaufgaben (öffentliche Sicherheit)*. URL <https://www.bundestag.de/blob/417886/fc247654d8e32322d48e42a3e8d1dd03/wd-3-118-07-pdf-data.pdf>. - abgerufen am 2018-11-21. — Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages

8.2 Kontaktierungsverzeichnis

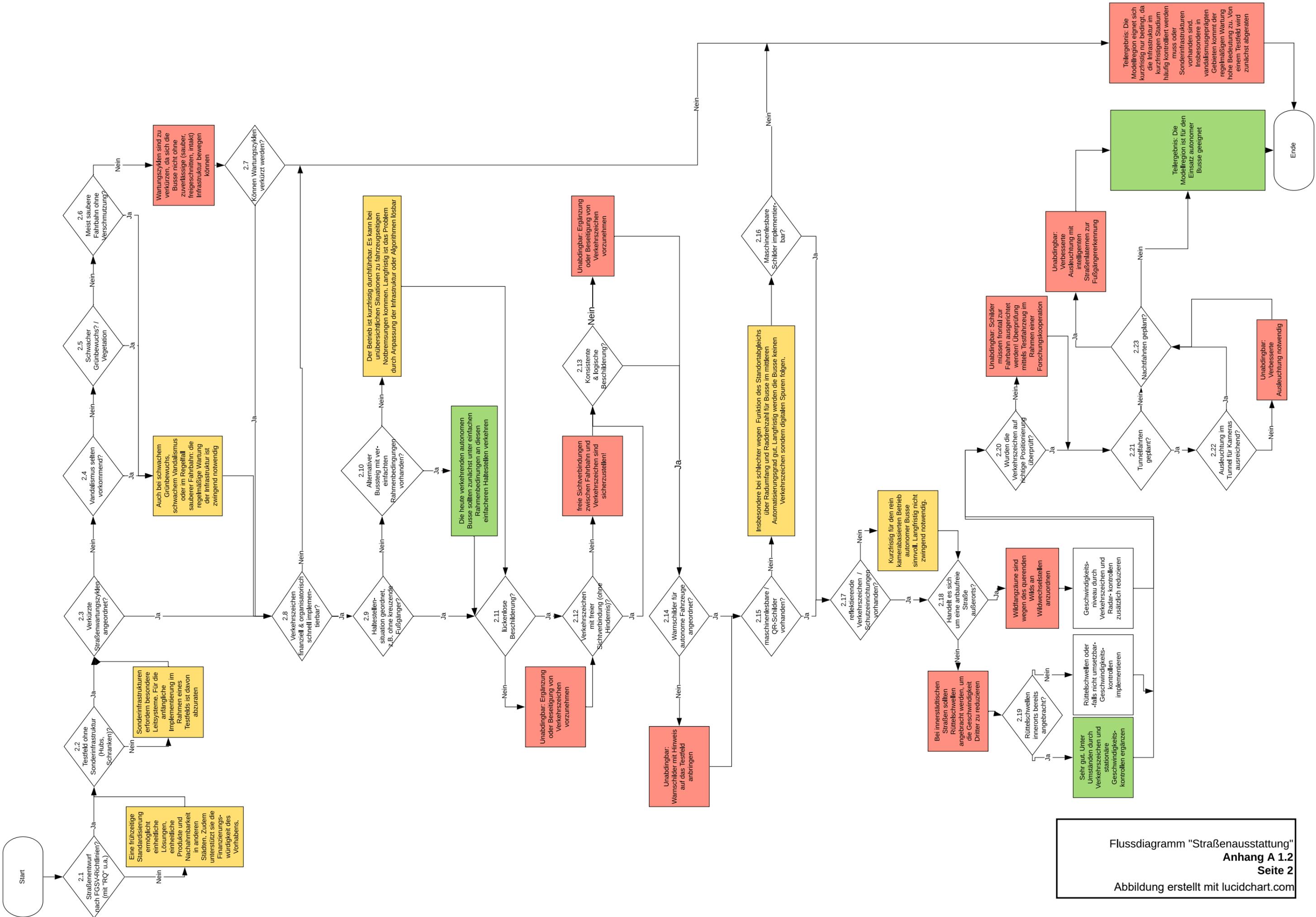
Verwaltungsgemeinschaft Bad Birnbach (2019a): Herr Kurt Tweraser, 23.01.2019, Interview per E-Mail zu den Praxiserfahrungen im Testfeld Bad Birnbach. Der Fragebogen ist im Anhang enthalten.

Anhang A

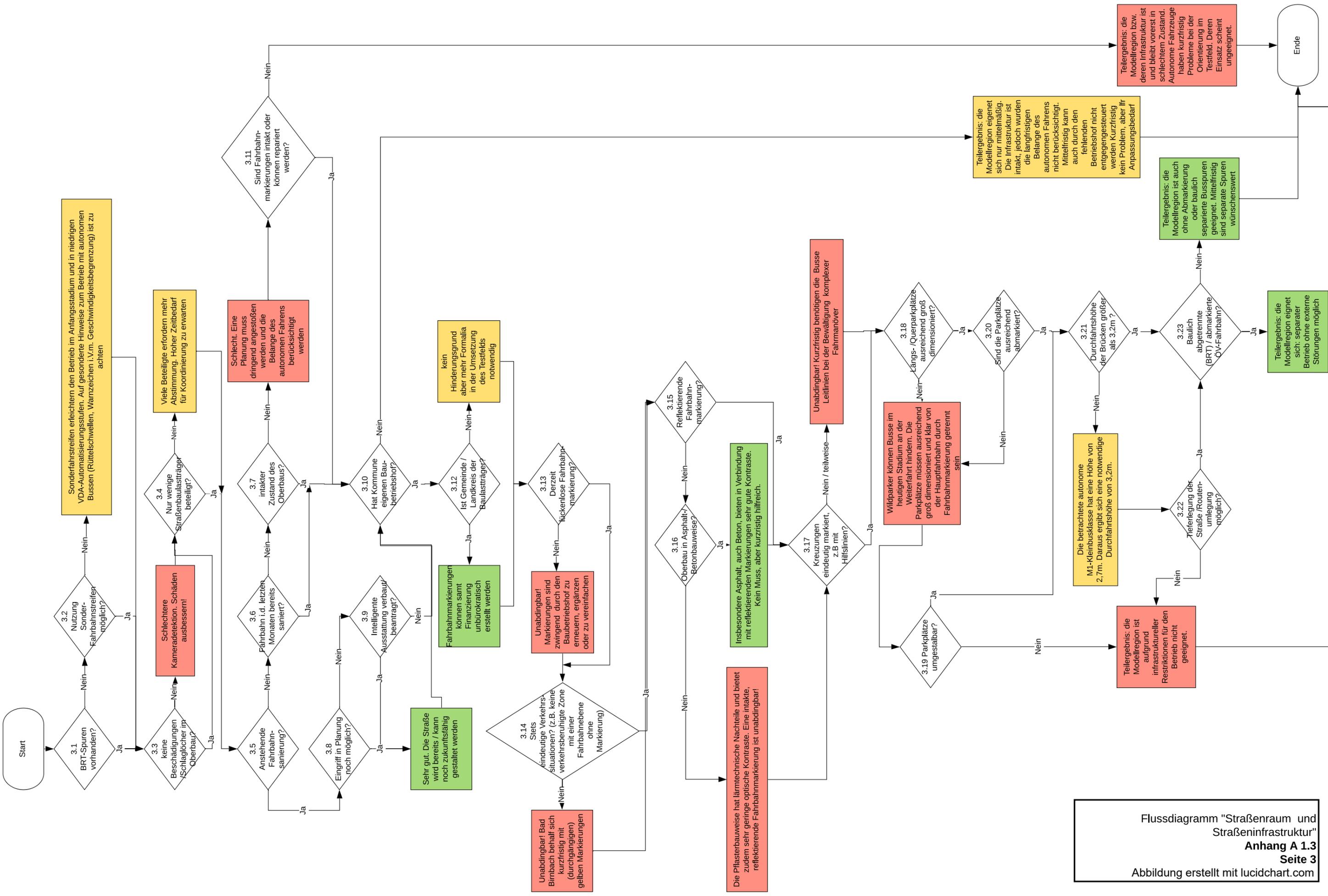
Anhang	Bezeichnung	Seitenzahl
A 1.1	Flussdiagramm Ladeinfrastruktur	Seite 1
A 1.2	Flussdiagramm Straßenausstattung	Seite 2
A 1.3	Flussdiagramm Straßenraum und Straßeninfrastruktur	Seite 3
A 1.4	Flussdiagramm Datenerhebung	Seite 4
A 1.5	Flussdiagramm Datenübertragung	Seite 5
A 1.6	Flussdiagramm Plattform und Funktionalität	Seite 6
A 2.1	Ausgefüllter Fragebogen Bad Birnbach, Herr Kurt Tweraser	Seite 7-12



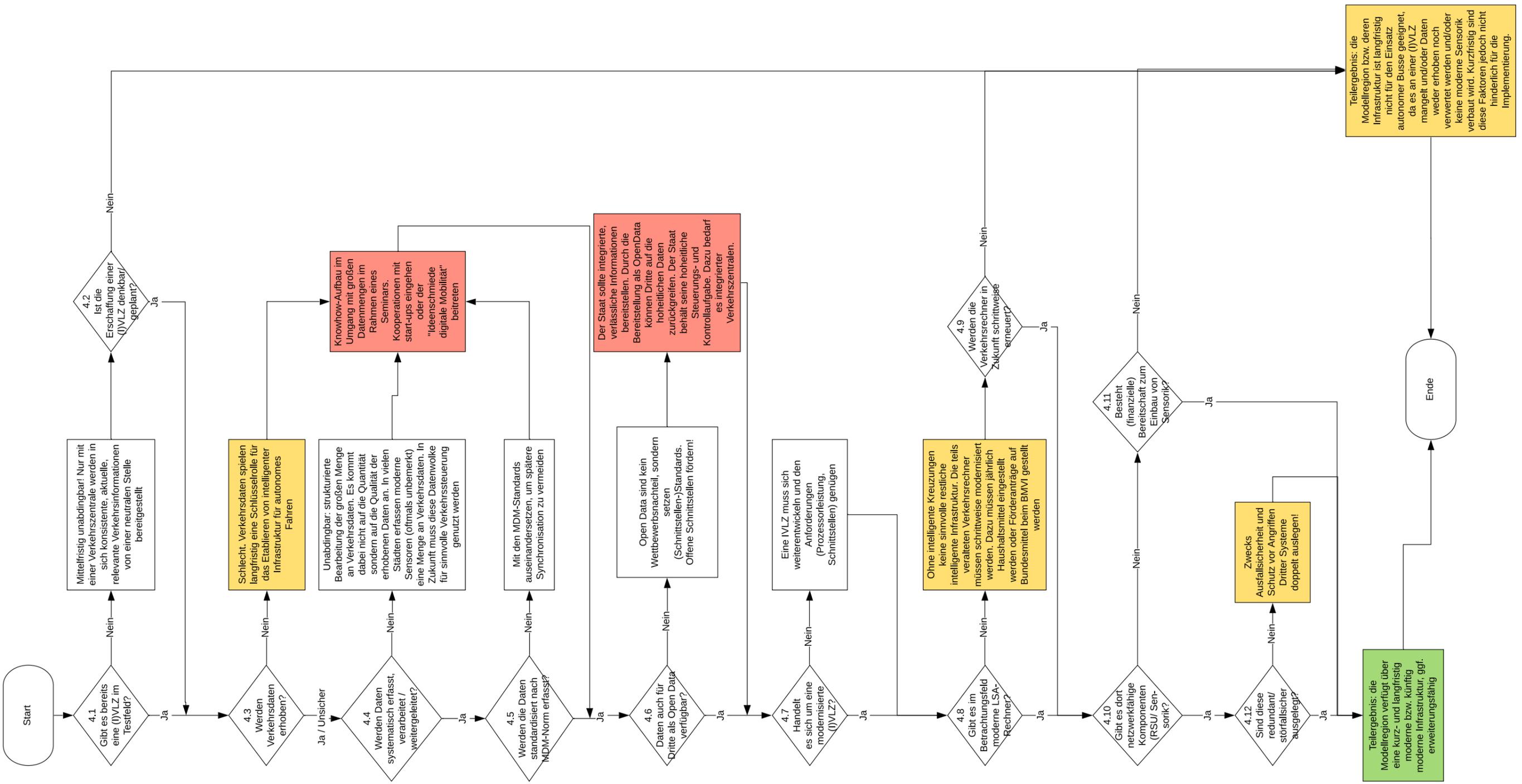
Flussdiagramm "Ladeinfrastruktur"
Anhang A.1.1
 Seite 1
 Abbildung erstellt mit lucidchart.com



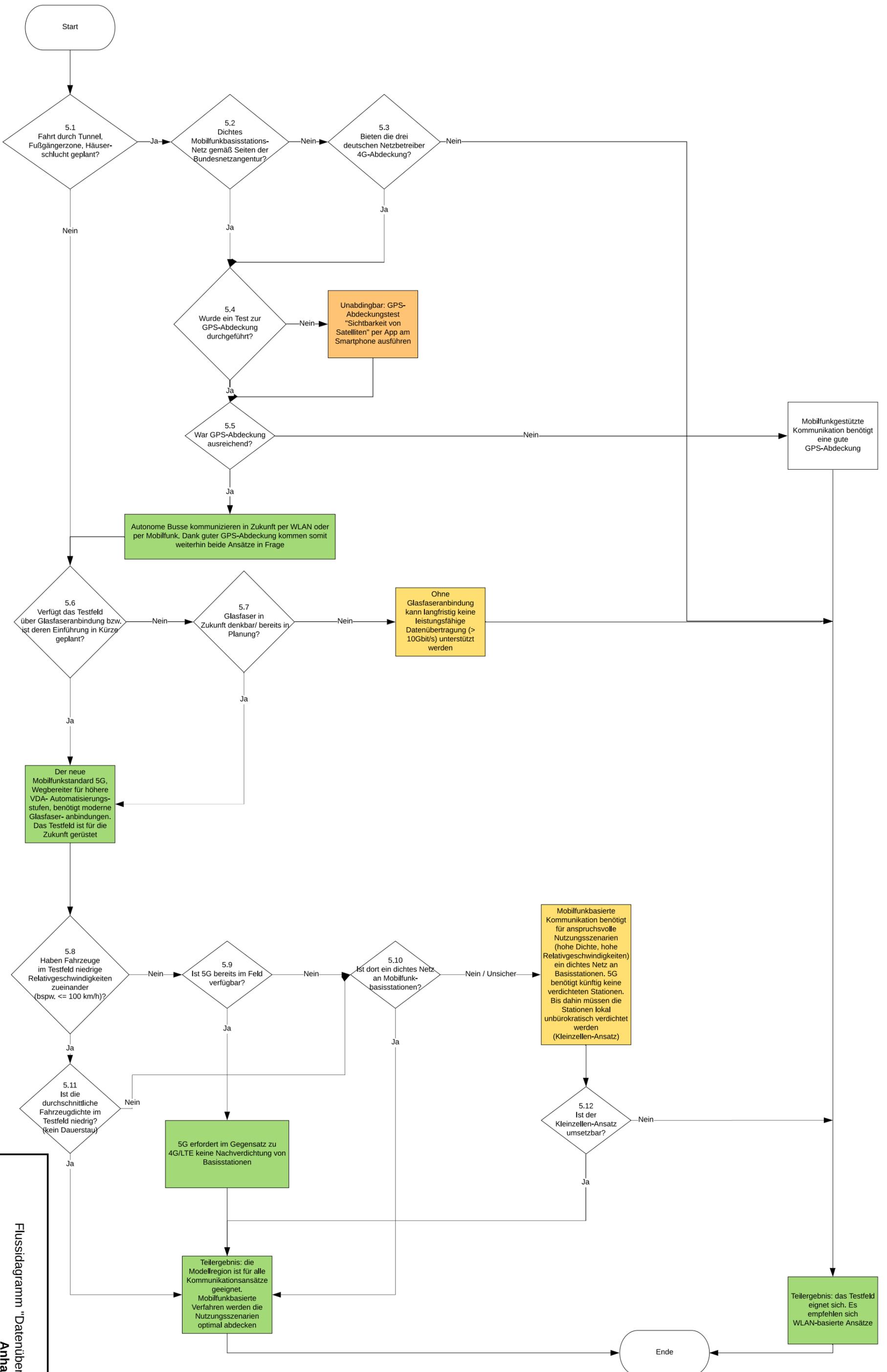
Flussdiagramm "Straßenplanung"
 Anhang A 1.2
 Seite 2
 Abbildung erstellt mit lucidchart.com



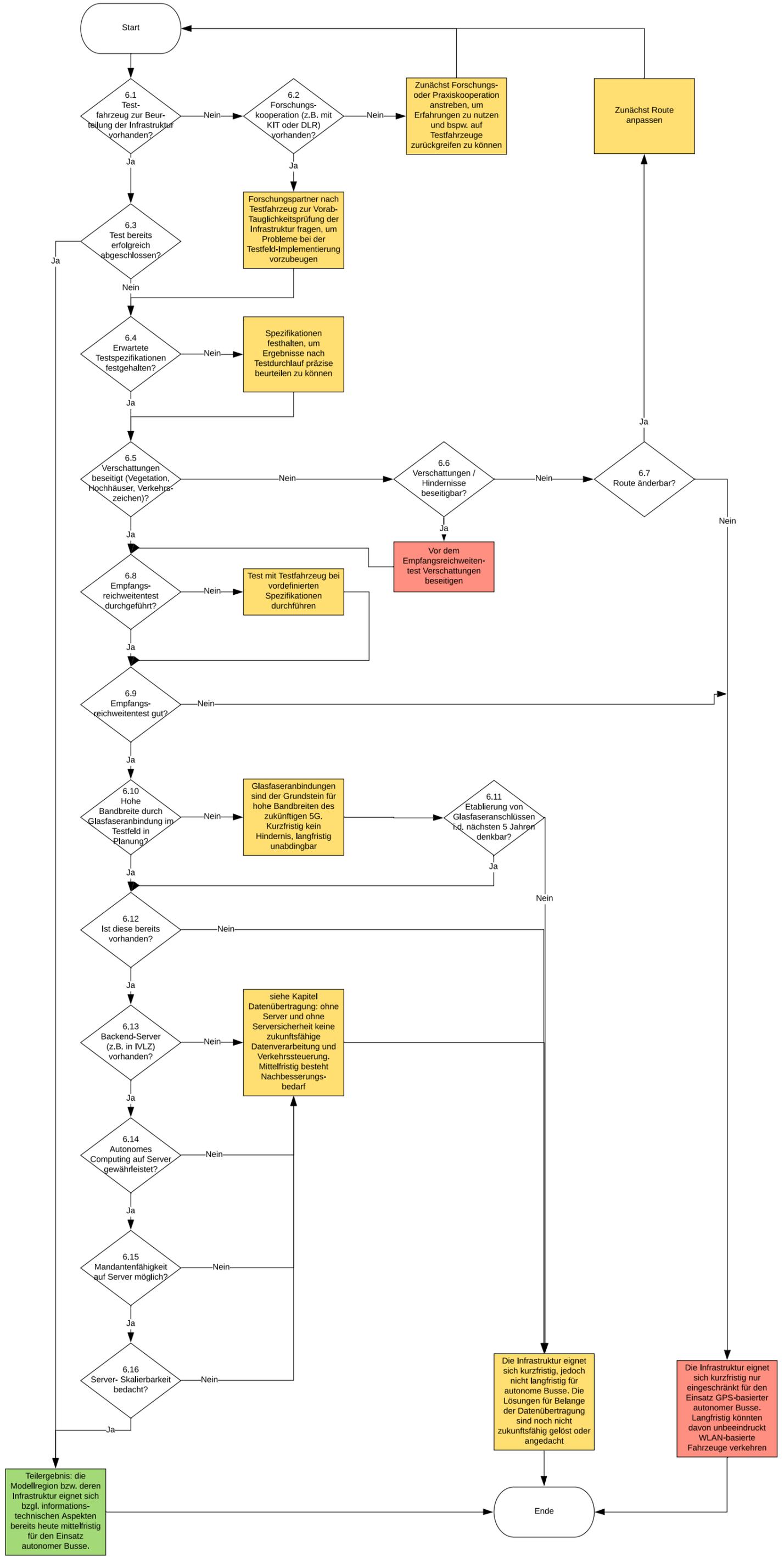
Flussdiagramm "Straßenraum und Straßeninfrastruktur"
Anhang A 1.3
 Seite 3
 Abbildung erstellt mit lucidchart.com



Flussdiagramm "Datenerhebung"
 Anhang A 1.4
 Seite 4
 Abbildung erstellt mit lucidchart.com



Flussdiagramm "Datenübertragung"
Anhang A 1.5
Seite 5
Abbildung erstellt mit lucidchart.com



Flussdiagramm "Plattform und Funktionalität"
 Anhang A.1.6
 Seite 6
 Abbildung erstellt mit lucidchart.com

Sehr geehrter Herr Tweraser,

herzlichen Dank, dass Sie sich für die Umfrage Zeit nehmen.

Der Betrieb autonomer Busse wird in der heutigen Automatisierungsstufe oftmals nur fahrzeugseitig betrachtet. Mit höheren Automatisierungsgraden steigen jedoch die infrastrukturellen Anforderungen. Dazu möchte ich Ihnen im Anschluss einige Fragen stellen. Am Anfang werden übergreifende Fragen gestellt, die im Fortgang nochmals konkretisiert werden. Über eine ausführliche Beantwortung würde ich mich sehr freuen.

Vielen Dank und freundliche Grüße
Frederic Schmidt

1. Wie wurde Ihr Testfeld ausgewählt?

Es wurde nach einem Gebiet gesucht, das möglichst wenig (infrastrukturelle) Anpassung erforderte, also nach einem Gebiet mit möglichst geringem Umsetzungswiderstand. Kritische Straßenzüge, beispielsweise mit mangelnder GPS- oder Mobilfunk-Abdeckung, wurden ausgeschlossen.

Ihr Kommentar:

Das Gebiet wurde aber auch aus politischen Erwägungen ausgewählt. Es sollte die „letzte Meile“ zwischen dem außerhalb liegendem Bahnhof und dem Hauptort Bad Birnbach geschlossen werden. Zudem hat man die Strecke ausgewählt, da Sie für einen Textbetrieb mit weniger Aufwand realisiert werden sollte.

Es existierten vorab politische oder eigene Zielsetzungen. Daher konnte das Bediengebiet nicht frei gewählt werden. Dadurch führte das Testfeld auch durch Gebiete, die mit zusätzlichem technischem Aufwand realisiert werden mussten.

Ihr Kommentar:

2. Mussten Änderungen an der Verkehrs- bzw. Straßenverkehrsinfrastruktur vorgenommen werden?

Nein.

Ihr Kommentar:

XJa, nämlich Folgende:

Fahrbahnmarkierungen u. Beschilderung damit der übrige Verkehr „Rücksicht“ nimmt, Vergrößerung (Tieferlegung) einer Unterführung

3. Mussten Änderungen an der IT-Infrastruktur vorgenommen werden? Zur IT-Infrastruktur zählen auch Fragestellungen einer Verkehrsleitzentrale.

XNein.

Ergänzende Kommentare:

Ja, nämlich Folgende:

4. Fährt der Bus über gepflasterte Streckenabschnitte?

Nein.

Ihr Kommentar:

XJa, und dabei ergaben sich folgendes Problem bzw. folgender Anpassungsbedarf:

Bisher keine Probleme und kein Anpassungsbedarf

5. Waren Parkplätze (Längs-, Querparkplätze) hinderlich für den Betrieb des Busses und wie wurde mit Problemen umgegangen?

Erläuterung:

Längsparkplätze entlang der Strecke wären grundsätzlich nicht hinderlich, doch wenn „schlampig“ geparkt wird und die Fahrzeuge zu weit in die Fahrbahn ragen werden Sie von den Sensoren des Busses registriert und er erkennt ein Hindernis.

6. Wie werden Fahrmanöver in Kreuzungsbereichen abgewickelt und welche Probleme ergeben sich dabei? War infrastrukturseitiger Anpassungsbedarf notwendig (beispielsweise das zusätzliche Anbringen von Orientierungslinien für die Kamerasensorik)?

- Nein. Das Fahrzeug hat alle Fahrmanöver eigenständig ohne infrastrukturelle Anpassungen abgewickelt.

Ihr Kommentar:

XJa, folgende Elemente wurden angepasst:

Beschildung und Haltelinien zur Verdeutlichung wurden angepasst, ansonsten nichts Notwendig.

7. Musste die Fahrbahnbeschaffenheit im Testfeld verbessert werden? (Zustandsverbesserung durch Schließung von Schlaglöchern, oder vergrößerte Fahrbahnbreiten anlegen, Änderungen in der Fahrbahnmarkierung oder kontrastreichere Fahrbahngestaltung)

- Nein.

Ihr Kommentar:

XJa, die Fahrbahnbeschaffenheit wurde auf diese Weise verbessert:

Zur verbesserung der Sicherheit im ersten Testbetrieb wurde die Fahrbahn mittels Markierungen verbreitert.

8. Welche maximale Geschwindigkeit dürfen die klassischen „manuellen“ Fahrzeuge im Testfeld fahren? Gab es im Falle stark differierender Geschwindigkeitsniveaus (autonomer Bus mit maximal 15 km/h versus klassischer manueller Innenstadtverkehr mit maximal 50 km/h) Schwierigkeiten oder Anpassungsbedarf? Wie wurde mit einer Geschwindigkeitsdifferenz umgegangen (beispielsweise Freigabe eines verbreiterten Fahrradstreifens für den autonomen Bus)? Wie ist die Erfahrung im Mischverkehr autonomer Bus und klassischer manueller Verkehr?
Erläuterung:

Fahrstrecke I (Ortsbereich Bad Birnbach): Verkehrsgeschwindigkeit 30 km/h, autonomer Bus max. 15 km/h
Fahrstrecke II (Außerortsbereich – Kreisstraße); noch nicht in Betrieb: Verkehrsgeschwindigkeit bisher 60 km/h, autonomer Bus mind. 25 km/h – Verkehrsbeschränkung wird derzeit noch geprüft; Linienbetrieb soll in der ersten Jahreshälfte 2019 aufgenommen werden.

9. Mussten im autonomen Testfeld Geschwindigkeitsbeschränkungen verändert werden?
XNein.

Tempolimits mussten nicht angepasst werden, weil:

Fahrtstrecke I (Ortsbereich Bad Birnbach): keine Anpassung notwendig

XJa.

Auf welches Tempolimit hat man die Testfeldabschnitte begrenzt? Und wieso?

Fahrtstrecke II (Außerorts – Kreisstraße): Beschränkung wird derzeit geprüft.

10. Welche Ausstattungselemente benötigt der autonome Bus auf Ihrem Testfeld? (Zutreffendes bitte ankreuzen)

- Verdichtete Mobilfunkzellen (Nachverdichtung der Mobilfunk-Basisstationen über Kleinzellen-Ansatz)

XLandmarken bzw. QR-Codes bzw. maschinenlesbare Schilder, zum Beispiel als Rückfallebene

- Verbesserte Glasfaseranbindung
- Sonstiges:

Auf freier Strecke wurden zwei Orientierungstafeln installiert.

11. Der autonome Bus wird über steckerbasierte / Plug-In-Ladeinfrastruktur geladen. Welche Infrastruktur muss konkret vorgehalten werden? Welche Änderungen wurden dafür vorgenommen? Welche Hindernisse gab es? Gibt es Empfehlungen für die Ladeinfrastruktur? Wie sind die Erfahrungen bei Aufladevorgängen?

Erläuterung:

Ladung erfolgt über üblichen Haushaltsstrom 240 V ohne zusätzliche Absicherung. Funktioniert problemlos.

12. Ist eine sehr gute GPS-Abdeckung für Ihr Testfeld notwendig gewesen?

XNein.

Ihr Kommentar:

GPS-Abdeckung, so wie ursprünglich vorhanden reichte aus.

- Ja, aus folgenden Gründen (z.B. baulich verdeckte Innenstadtbereiche):

13. War die GPS-Abdeckung bei Projektstart auf Anhieb ausreichend?

- Nein, diese musste auf folgende Weise verbessert werden (z.B. Wahl einer anderen Strecke oder bauliche Maßnahmen wie Versetzung von Bauwerken oder Instandhaltungsmaßnahmen wie regelmäßige Grünschnittkontrolle?):

XJa.

Ihr Kommentar:

14. Wie orientiert sich der autonome Bus?

Die Route wurde initial per SLAM-Technik auf das Fahrzeug übertragen. Wodurch kann sich das Fahrzeug im Raum, insbesondere in Bereichen schwacher GPS-Abdeckung, orientieren? Was sind im Testfeld optische Referenzpunkte für den Bus?

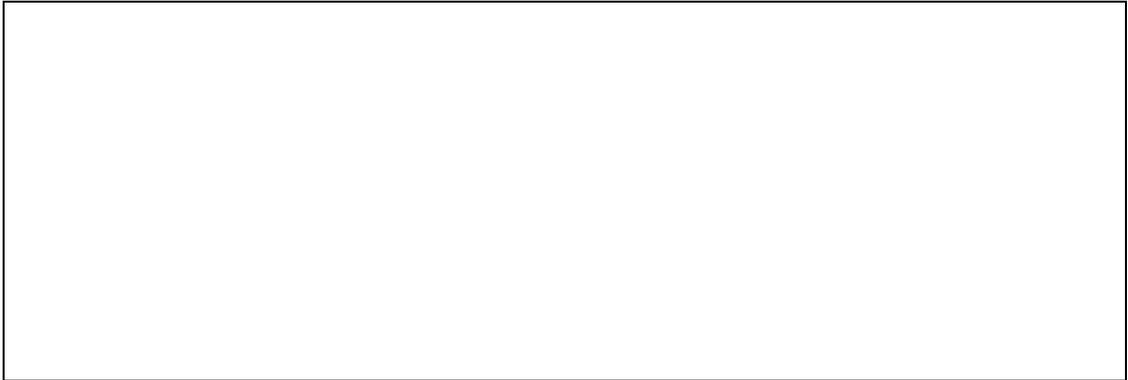
Erläuterung:

Optische Referenzpunkte sind zwei Orientierungstafeln.
Ansonsten über GPS und zusätzlich wird über Radumfang und Winkel die Strecke zusätzlich berechnet.

15. Würden Sie bei der erneuten Implementierung des Testfelds etwas unter infrastrukturellen / technischen Gesichtspunkten anders machen? (ohne Kostenbetrachtung)

Derzeit nicht.

16. Gibt es sonstige Anmerkungen zu verkehrs- und informationstechnisch infrastrukturellen Themen?



Nochmals herzlichen Dank für Ihre Teilnahme.

Freundliche Grüße
Frederic Schmidt