

Diplomarbeit

Einführung von V2X bei der DVB AG

eingereicht an der
Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der
Westfälischen Hochschule Zwickau
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieur (FH)

vorgelegt von: cand. ing.

**M o r g n e r ,
T o b i a s**

Geb. am: 16.06.1999

Studiengang Verkehrssystemtechnik
Studienschwerpunkt Verkehrstechnik und -anlagen

Ausgegeben von: Prof. Dorsch
Erstbetreuer/Zweitbetreuer: Prof. Dorsch / Prof. Queck
Auftraggeber: Dresdner Verkehrsbetriebe AG
Betreuer des Auftraggebers: Dipl. – Ing. (FH) Schönherr, Björn

Autorenreferat

Das seit den 1980er Jahren zum Einsatz kommende analoge Bake-Funk-System zur Priorisierung des ÖPNV in Dresden hat in Zeiten voranschreitender Digitalisierung und Technisierung des Verkehrssektors das Ende der Leistungsfähigkeit erreicht. Im Rahmen der internationalen Etablierung intelligenter Verkehrssysteme als Werkzeug des Verkehrsmanagements eröffnet sich gegenwärtig die Möglichkeit, die Vehicle-To-Everything-Communication als neuen Kommunikationsstandard bei der DVB einzusetzen. Diese Arbeit zeigt, welche Kriterien durch den Verkehrsbetrieb an die technologische Umsetzungsvarianten gestellt werden und wie eine Umsetzung dieses Projektes ablaufen kann. Außerdem wird dargelegt, inwiefern das Unternehmen auf kurz-, mittel- und langfristige Sicht davon profitieren kann und welche weiteren Potentiale sich neben einer optimierten Anforderung an den Lichtsignalanlagen auch im Rahmen der Einbindung weiterer Verkehrsmittel ergeben.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Chemnitz/Zwickau, 22.11.2021



Tobias Morgner

Inhalt

I	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	I
II	Anlagenverzeichnis	III
III	Abkürzungsverzeichnis	IV
1	Einleitung	1
2	Status Quo	4
2.1	LSA-Anforderung im ÖPNV	4
2.2	Bake-Funk-Technologie	5
2.2.1	technische Grundlagen	5
2.2.2	Vorteile	8
2.2.3	Nachteile	9
2.3	weitere Anforderungstechnologien	12
2.3.1	Funksysteme	12
2.3.2	Leitungsgebunden	13
2.3.3	Kontinuierliche Kommunikation Fahrzeug – LSA-Knoten	15
2.4	Potentialanalyse im Netz	16
2.4.1	Vorüberlegungen	16
2.4.2	Definition Verkehrsqualität	16
2.4.3	theoretisches Fahrzeitpotential	17
2.4.4	Technisch mögliches Potential	19
2.4.5	einzuhaltende Randbedingungen	21
2.4.6	Konflikte bei der Qualitätsermittlung an LSA	22
3	V2X	23
3.1	Methodik der Technologiebetrachtung	23
3.2	Geschichte	24
3.3	Testfelder in Deutschland	27
3.4	Kriterien für den Einsatz im Stadtgebiet	31
3.4.1	Leistungskriterien	31
3.4.2	Funktionskriterien	34
3.4.3	Entwicklungskriterien	35
3.4.4	weitere spezifische Kriterien	36
3.4.5	Wichtung der Kriterien	38

3.5	Arten von V2X-Lösungen	39
3.5.1	Varianten der Unterscheidung	39
3.5.2	Backend V2X.....	40
3.5.3	Cellular V2X	40
3.5.4	WLAN-V2X	41
3.5.5	dezentrale LSA-Zustandsermittlung und Priorisierung	42
3.5.6	Zentrale Zustandsermittlung und Priorisierung.....	43
3.5.7	Telegrammtypen.....	44
3.6	Technologische Umsetzung im Stadtgebiet	49
3.6.1	Technik am Knoten.....	49
3.6.2	Technik auf der Strecke.....	51
3.6.3	Technik im Fahrzeug.....	52
3.6.4	Technik zwischen Knoten und Managementzentrale	52
3.7	Herausforderungen	53
4	Realisierung und Visionen	57
4.1	Betrachtung aus Sicht des Projektmanagements.....	57
4.2	Projekttablauf	58
4.2.1	Übersicht	58
4.2.2	Kurzfristige Maßnahmen	58
4.2.3	Mittelfristige Aufgaben.....	63
4.2.4	Langfristige Aufgaben.....	63
4.2.5	Externe Einflüsse.....	64
4.3	Betreibermodelle	66
4.3.1	Betreibermodelle allgemein	66
4.3.2	Betreibermodelle Dresden.....	66
4.4	Visionen	67
4.4.1	Visionen aus Fahrgastsicht	67
4.4.2	Visionen aus Sicht der DVB	69
5	Zusammenfassung	75
IV	Literatur.....	76
V	Anhang.....	A-1

I Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 1: Vorgehensweise zur Umsetzung von.....	2
Abbildung 2: Eine Funkbake an der Stele der Haltestelle "Walpurgisstraße" (eigene Aufnahme)	5
Abbildung 3: Eine Straßenbahn fährt an einer Funkbake vorbei und löst eine Meldepunktkette aus, eigene Aufnahme	7
Abbildung 4: Optische Rückkoppelung der Anmeldung zum Rechtsabbiegen durch ein "A" und das Weichenstellsignal nach rechts (eigene Aufnahme).....	12
Abbildung 5: Schlüsselkontakte am Lennéplatz mit 4 möglichen Ausfahrrichtungen (eigene Aufnahme)	15
Abbildung 6: Veränderungen der Fahrzeitverluste im Zuge der Königsbrücker Landstraße durch Einführung der Selbststeuerung [21, S. 9].....	21
Abbildung 7: Gesamtbilanz der Verlustzeitenentwicklung aller Verkehrsteilnehmer [21, S. 10]	21
Abbildung 8: Einordnung der ITS-G5 Anwendungen in das Frequenzband [31, S. 14]....	26
Abbildung 9: Standorte von RSU-Einheiten im Testfeld Dresden.....	30
Abbildung 10: Untergliederung V2X (eigene Darstellung)	40
Abbildung 11: Die Kommunikationsebenen von C-V2X [40, S. 70177]	41
Abbildung 12: durch das IVI ermittelte RSU-Reichweiten am Comeniusplatz [47, S. 8]...	42
Abbildung 13: dezentrale Lösung (eigene Darstellung).....	43
Abbildung 14: zentrale Lösung mit RSU-Einbindung (eigene Darstellung).....	44
Abbildung 15: zentrale Lösung, Backendsystem (eigene Darstellung)	44
Abbildung 16: schematischer Aufbau eines CAM-Telegrammes [49, S. 21].....	46
Abbildung 17: schematischer Aufbau eines CPM-Telegrammes [30, S. 58].....	47
Abbildung 18: schematischer Aufbau eines DENM-Telegrammes [52, S. 31]	48
Abbildung 19: RSU-Aufbau am Comeniusplatz Dresden (eigene Aufnahme).....	50
Abbildung 20: Smart-Intersection Zellscher Weg/Ackermannstraße (eigene Aufnahme) .	50
Abbildung 21: urbic® -Auszug des LSA-Ranking nach gewichteten Verlustzeiten	60
Abbildung 22: verschiedene Beispiele der rheinbahn zum möglichen Aufbau der Nutzeroberfläche der OBU im Fahrzeug [32, S. 18]	62

Abbildung 23: Entwicklung der Anzahl an Fahrzeugen mit integrierter V2X-Ausstattung [65, S. 3]	72
Abbildung 24: Wirkungsgefüge der ÖPNV-Priorisierung	73

Tabellen

Tabelle 1: Anforderung an die Leistungskriterien verschiedener Stufen des automatisierten Fahrens [40, S. 70172]	34
Tabelle 2: Wichtung der Kriterien nach zeitlichen Ebenen (eigene Darstellung)	39

II Anlagenverzeichnis

A1	Transkript Dr. Lämmer (zu 2.4.4)	A-2
A2	Aufbau eines R09.16 Analogfunktelegrammes nach VDV (zu 2.2.1)	A-7
A3	Fahrzeitübersichten (zu 2.4.3)	A-8
	Linie 10 MESSE DRESDEN → Striesen	A-8
	Linie 10 Striesen → MESSE DRESDEN	A-9
	Linie 12 Leutewitz → Striesen	A-10
	Linie 12 Striesen → Leutewitz	A-11
	Linie 61 Löbtau → Fernsehturm	A-12
	Linie 61 Fernsehturm → Löbtau	A-13
A4	Fahrzeitpotentiale (zu 2.4.3)	A-14
A5	Darstellung Verkehrssituation Linie 4 (zu 3.4.1)	A-16
A6	Verlustreichste LSA-Knoten in Dresden (zu 4.2.2)	A-17
A7	Projektschritte zur Einführung von V2X (zu 4.2)	A-18

III Abkürzungsverzeichnis

BiDiMoVe	BiDirektional, Multimodal, vernetzt
CAM	Cooperative Awareness Messages
C-ITS	Cooperative Intelligent Transportation Systems
DENM	Dezentralized Environmental Notification Message
DSRC	Dedicated Short-Range Communications
DVB	Dresdner Verkehrsbetriebe
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
HBS	Handbuch zur Bemessung von Verkehrsanlagen
HEAT	Hamburg Electric Autonomous Transportation
IEEE	Institute of Electrical Engineers
ITS	Intelligent Transport Systems
IV	Individualverkehr
IVHS	Intelligent Vehicle-Highway Systems Strategic Plan
IVI	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
KoMoD	Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf
LSA	Lichtsignalanlage
MIV	motorisierter Individualverkehr
OBU	OnBoard-Unit
OCA	Open Traffic Systems City Association e.V.
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems
ODG	OCIT® Developer Group
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PPP	Public-Private-Partnership
PKI	Private Key Infrastructure
RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RSU	RoadSideUnit
RSE	RoadSideEquipment
SAQ	Stufe der geschwindigkeitsbezogenen Angebotsqualität des ÖPNV
SPaT	Signal Phase and Timing
SREM	Signal Request Extended Messages

SSEM	Signal Response Extended Message
urbic®	urban traffic control
V2I	Vehicle-To-Infrastructure
V2V	Vehicle-To-Vehicle
V2X	Vehicle -To-Everything
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VERONIKA	Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel
VMZ	Verkehrsmanagementzentrale
VVnöml	Verwaltungsvorschriften für den nichtöffentlichen mobilen Landfunk

Vorwort

V2X im ÖPNV ist ein hochaktuelles und sehr dynamisches Thema, das zunehmend an Bedeutung gewinnt. Deshalb war diese Arbeit geprägt vom Wälzen unzähliger Zeitschriften, Internetartikel und Richtlinien, die trotz ihres noch jungen Alters schon teilweise wieder inaktuell waren.

Die Danksagung geht an meinen Betreuer Herrn Schönherr der DVB für die Auswahl dieses hochinteressanten Themas, an die tatkräftige und jederzeit zeitnahe Unterstützung durch Frau Prof. Dorsch sowie das Interesse am Thema durch Frau Prof. Queck.

Danken möchte ich außerdem den fleißigen Lektoren dieser Arbeit und auch den auskunftsfreudigen Fachkundigen für die Telefoninterviews und Videokonferenzen von SWARCO, dem LSBG Hamburg, der Rheinbahn AG, dem IVI Dresden und Herrn Lämmer sowie allen interessierten Experten, mit denen ich im Rahmen des ITS-Weltkongresses in Hamburg zum Thema intelligente Verkehrssysteme ins Gespräch kommen durfte.

1 Einleitung

Der Wunsch, mobil zu sein, gerät zunehmend in Konflikt mit Bemühungen um eine nachhaltige Verkehrspolitik. In Zeiten zunehmender klimatischer Veränderung ist es Ziel, die Emissionen auf zurückgelegten Strecken so weit wie möglich zu minimieren. Dies gelingt perspektivisch nur durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen auf politischer, gesellschaftlicher und technischer Ebene.

Maßnahmen, die darauf abzielen, existierende Verkehrsströme so zu lenken und zu leiten, dass vorhandene Verkehrsinfrastrukturen und -mittel optimal genutzt werden können, sind unter dem Begriff „Verkehrsmanagement“ zusammengefasst. Verkehrslenkung und -beeinflussung findet dabei auf verschiedene Weisen statt, sowohl analog als auch digital. [Vgl. 1]

Ein Baustein des Verkehrsmanagements ist die Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur. Dies wird unter dem Kurzbegriff „V2X“ gebündelt, welcher „Vehicle-To-Everything“ bedeutet und grundsätzlich den Datenaustausch zwischen diversen Fahrzeugen mit verschiedener Infrastruktur beschreibt.

Die gegenwärtige Forschung befasst sich dabei vornehmlich mit der Entwicklungsstufe „Vehicle-To-Vehicle“ (V2V), dem Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen (zumeist PKW). Dieser zielt bislang vorrangig auf die Unfallvermeidung durch frühzeitige Stauerkennung, Fahrparameterveränderungen und der Analyse vor Fahrmanövern ab. [Vgl. 2]

Ziel der weiteren Forschung ist die Vernetzung des gesamten Verkehrs durch Schaffung von standardisierten Schnittstellen. Eine Etablierung dieses Standards bietet umfassende Möglichkeiten der intelligenten Verkehrssteuerung, nicht nur für die Verbesserung des Verkehrsablaufes bei PKW, sondern vornehmlich auch im Öffentlichen Personennahverkehr. Der Transfer der Daten der Bordrechner an andere Fahrzeuge und an Lichtsignalanlagen und die Analyse der Verkehrsdaten, die durch andere Fahrzeuge und die Verkehrsinfrastruktur bereitgestellt werden, eröffnen ein großes Spektrum zur Erschließung von Potentialen in Pünktlichkeit, Betriebsstabilität und Leistungsfähigkeit an Verkehrsknoten.

Mit V2X scheint es möglich, zahlreiche verkehrstechnische Aufgabenbereiche in ein gemeinsames System zu implementieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus

daraufgelegt, welche Überlegungen und Handlungen notwendig sind, um V2X als neuen Standard für die Anforderung der Fahrzeuge zu etablieren und welche weiteren Möglichkeiten sich für das Unternehmen auch auf Sicht der Kundengewinnung ergeben. Eine Aussage über eine konkrete Umsetzungsvariante wird dabei aufgrund der Dynamik der wissenschaftlichen Erkenntnisse und Forschung nicht getroffen. Da es sich damit im Wesentlichen um die theoretische Planung einer neuen Art der Bevorrechtigung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) handelt, folgt die Struktur dieser Arbeit damit im Groben der durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) vorgeschlagene „Vorgehensweise zur Umsetzung von Maßnahmen“. [3, S. 11]

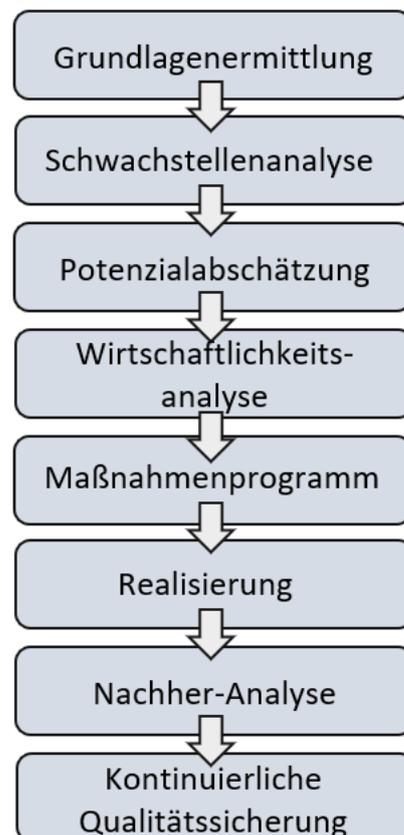


Abbildung 1: Vorgehensweise zur Umsetzung von ÖPNV-Beschleunigungsmaßnahmen [nach 3, S. 11]

Inhalt des ersten Kapitels ist dabei zunächst die Darstellung und Potentialanalyse des bestehenden Bake-Funk-Systems, das bereits seit den 1980er Jahren in der Stadt als Standard verwendet wird sowie anderer Technologien, die gegenwärtig existieren.

Im folgenden Kapitel 3 erfolgt eine Einführung in die technischen Grundlagen verschiedener Umsetzungsvarianten von V2X und eine Bewertung dieser hinsichtlich Entwicklungs-, Funktions- und Leistungskriterien. Anschließend wird dargelegt, welche Voraussetzungen für die Einführung dieses Systems im Fahrzeug, an den Knoten und auf freier Strecke notwendig sind. In der Problemdarstellung wird aufgezeigt, welche Fragen bezüglich der Technik im Allgemeinen und im Speziellen für Dresden zu klären sind und welche Antworten es hierfür gibt.

Kapitel 4 beschreibt die Realisierungsphase dieses Projektes. Dabei werden Szenarien und Vorgehensweisen der Einführung des neuen Standards dargelegt und weitere langfristige Möglichkeiten und Effekte von V2X auf den Verkehrsablauf, die Fahrgastzufriedenheit und die Umwelt im Zusammenhang mit V2X als Baustein des vernetzten Fahrens beleuchtet, bevor im abschließenden Kapitel eine Zusammenfassung über die Erkenntnisse der Arbeit geliefert wird.

2 Status Quo

2.1 LSA-Anforderung im ÖPNV

Insbesondere der straßengebundene ÖPNV im städtischen Raum (hierzu zählen auch Straßenbahnen) [Vgl. 4, S. 81] kommt im Fahrtverlauf regelmäßig an Kreuzungen in Konflikt mit Halt zeigenden Lichtsignalanlagen (LSA). Neben den notwendigen Haltestellenaufenthaltszeiten tragen diese möglichst zu vermeidenden Standzeiten zu einer erheblichen Reduktion der Beförderungsgeschwindigkeit im innerstädtischen Bereich bei. So beläuft sich die durchschnittliche Beförderungsgeschwindigkeit der zentrumsorientierten Dresdner Straßenbahnlinien und der tangentialen Buslinien im Spitzenverkehr auf teilweise unter 20km/h, dadurch erhöhen sich die Reisezeiten für die Kunden.¹ Um (dennoch) attraktive Beförderungszeiten anbieten und im Wettbewerb zum motorisierten Individualverkehr mithalten zu können, sind Beschleunigungsmaßnahmen im ÖPNV unabdingbar.

Ein ÖPNV mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten ist dabei ein Schlüsselfaktor, um die Attraktivität und Akzeptanz des öffentlichen Verkehrs zu erhöhen. [Vgl. 5, S. 14]

Häufig sind für entsprechende Priorisierungsmaßnahmen kommunalpolitische Entscheidungen notwendig.

Neben baulichen Optionen, wie der Schaffung eigener Busspuren oder von besonderen Gleiskörpern für die Straßenbahnen, ist die Bevorrechtigung an Lichtsignalanlagen eine der effektivsten Maßnahmen. [Vgl. 5, S. 32-33]

Besonders auf Hauptverkehrsstraßen, auf denen der Individualverkehr (IV) durch eine Koordinierung (umgangssprachlich: „Grüne Welle“) ungehindert fährt, kann es ohne Priorisierung durch die Haltestellen entlang der Strecke dazu kommen, dass Busse und Straßenbahnen eine „Rote Welle“ erleben. [Vgl. 4, S. 456] Zudem erhöhen sich durch Fahrzeuge, die Haltestellen ohne Fahrgasthalt passieren können und ebenfalls in der Koordinierung mitschwimmen, Fahrzeitstreuungen erheblich.

¹ Die Beförderungsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Division von Linienlänge und fahrplanmäßiger Fahrdauer.

Für die praktische Umsetzung der Priorisierung gibt es mehrere Möglichkeiten. Es wird grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen technischen Ansätzen unterschieden. Zum einen ist es möglich, Fahrzeuge durch die Detektion an festen Punkten im Netz zu orten, zum anderen kann diese Detektion durch eine Wegstreckenmessung und die Auslösung von Meldepunkten nach definierten Wegstrecken erfolgen. Bei den Dresdner Verkehrsbetrieben (DVB) kommt gegenwärtig das seit den 1980er Jahren verwendete „Bake-Funk-System“ zum Einsatz, das im folgenden Abschnitt 2.2 genauer erklärt wird. [Vgl. 3, S. 27]

2.2 Bake-Funk-Technologie

2.2.1 technische Grundlagen

Das wesentliche Prinzip der Bake-Funk-Technologie ist die Funkübermittlung von Datenpaketen des Bordrechners an bestimmten Punkten im Liniennetz via Sendemodul des Fahrzeuges an die Antwortmodule (auch „Baken“ oder „Funkempfangs- und Auswerteinheiten“, siehe Abbildung 2) im Straßenraum und die daraus folgende Beeinflussung der LSA-Schaltung zur möglichst optimalen Freigabeschaltung.

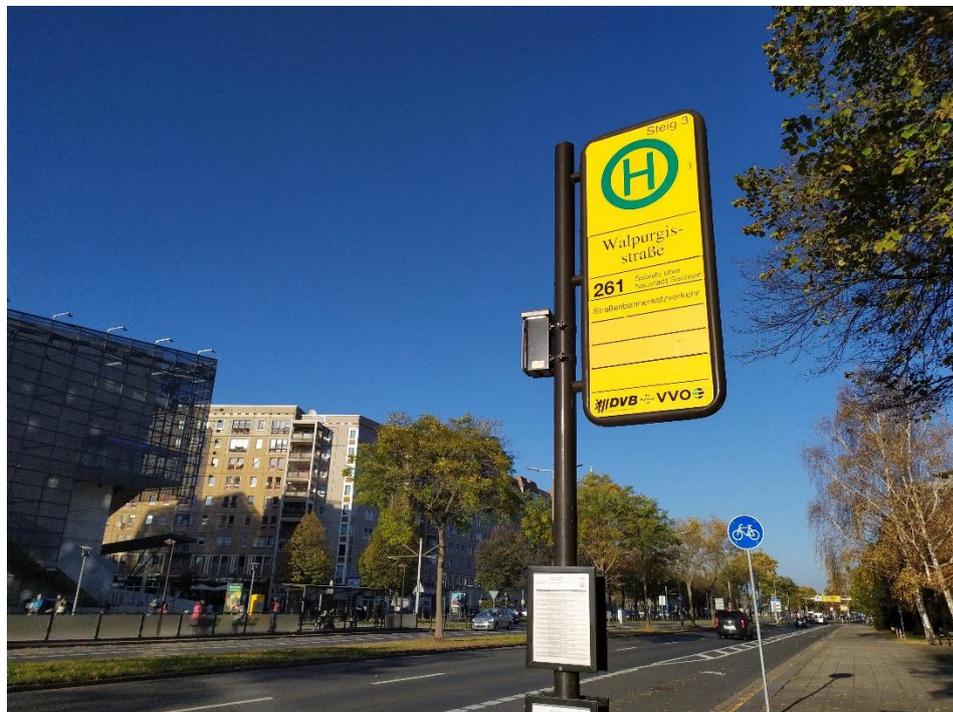


Abbildung 2: Eine Funkbake an der Stele der Haltestelle "Walpurgisstraße" (eigene Aufnahme)

Jede Lichtsignalanlage der Stadt Dresden hat eine festgelegte Nummer, die sich durch die geographische Lage der Anlage ergibt. Zudem ist jeder Anlage wiederum ein Steuergerät zugeteilt.²

Vor dem Erreichen eines LSA-Knotens erhalten die Fahrzeuge durch Vorbeifahrt an den Funkbaken die Information, nach welchem zurückgelegten Weg welcher Meldepunkt ausgelöst werden soll – die sogenannte Meldepunktkette (siehe Abbildung 3, S.7). Durch den Bordrechner wird der zurückgelegte Weg ermittelt und an den erreichten Meldepunkten das Datentelegramm an den LSA-Steuerrechner ausgesendet. Grundsätzlich erfolgt zunächst eine Voranmeldung, die dem Steuergerät signalisiert, dass sich ein Fahrzeug annähert und feindliche Freigabephasen können noch ausgeleitet werden. Feindliche Freigaben sind Grünphasen eines anderen Verkehrsstromes am Knoten. Durch die anschließende Hauptanmeldung wird der eigentliche Beeinflussungsprozess eingeleitet. Befindet sich eine Haltestelle direkt vor einer LSA, wird durch ein zusätzliches Türschließsignal die Abfahrbereitschaft signalisiert, um eine unnötig lange Gründeckung zu vermeiden. Unmittelbar nach Querung des Signalgebers erfolgt die Abmeldung und die Steuerung kann die Beeinflussung für das angeforderte Fahrzeug beenden.

Jeder Meldepunkt besitzt eine eigene Nummer, die sich durch ein Berechnungsverfahren ergibt. Durch die Linienversorgung mit den Meldepunkten erkennt die Steuerung, in welche Richtung das Fahrzeug unterwegs ist und kann die Freigabe richtungsgebunden schalten.

Der Aufbau der Datenpakete, beziehungsweise Datentelegramme, ist durch den Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) 1984 festgelegt wurden. Bei der DVB wird der R09.16 Standard verwendet. Dieser Standard besagt, dass pro Telegramm 3 Infobytes und bis zu 6 Zusatzbytes mit fahrtspezifischen Informationen codiert werden können. Die einzelnen Bytes bestehen jeweils aus 8 Bits. [Vgl. 6, 25 a]

² Informationen über alle Knoten und Anlagen sind im nicht-öffentlich-zugänglichen urbic®-System abrufbar (Vgl. 2.2.2)



Abbildung 3: Eine Straßenbahn fährt an einer Funkbake vorbei und löst eine Meldepunktkette aus, eigene Aufnahme

In Anlage 2 findet sich die Definition der Meldedatensätze durch den VÖV aus 1990 [7, Bild 3.3], die folgend in schriftlicher Form dargestellt wird:

Im ersten Infobyte wird dabei definiert, um welchen übermittelten Telegrammtyp es sich handelt, der Aufbau dieses Bytes ist somit für alle R09.16 Telegramme identisch.

Infobyte 2 spiegelt die Fahrplanlage des sendenden Fahrzeuges wider. Dabei sind 4 Bits für die Fahrplanlage reserviert: Bit 1 zeigt, ob die Verspätung positiv („0“) oder negativ – Verfrühung – ist (belegt als „1“). Die folgenden drei Bits können entsprechend maximal 7 Minuten Verfrühung bzw. Verspätung projizieren.

Infobyte 3 und Zusatzbyte 1 geben Informationen über die Meldepunktnummer und somit Information darüber, in welche Richtung das Fahrzeug planmäßig unterwegs ist, so, dass die LSA-Anforderung entsprechend aktiviert werden kann.

Zusatzbyte 2 beinhaltet gegebenenfalls eine Priorität im Sinne einer etwaigen Bevorrechtigung gegenüber einem anderen angemeldeten Fahrzeug(typ). Weiterhin enthalten ist die Information über eine mögliche manuelle Betätigung der Richtungsanforderung durch das Fahrpersonal und die Liniennummer, die auch durch Zusatzbyte 3 verschlüsselt wird.

Zusatzbyte 4 und 5 informieren über das Fahrtziel und das Zusatzbyte 6 codiert gegebenenfalls die Zuglänge, damit Freigabe- beziehungsweise Zwischenzeiten entsprechend angepasst werden können.

Diese Technologie bringt eine Reihe an Vor- und Nachteilen mit sich, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

2.2.2 Vorteile

Etablierung

In der Januarausgabe 1984 hat der VÖV mit Schrift 04.05.01 die „Anforderungen an rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme (RBL) – Übertragungsverfahren Datenfunk“ definiert. Somit ist die Technik bereits über 30 Jahre im Einsatz und auch die in Dresden verwendeten R09 Funktelegramme zur Übertragung größerer Datenmengen wurden bereits in den 1980er Jahren definiert. Die Technik findet neben Dresden bei zahlreichen Deutschen Verkehrsunternehmen Anwendung, z.B in Hamburg [Vgl. 8], Hannover [Vgl. 9] und Kassel [Vgl. 10, S. 4]. Wartungsprozesse und das Vorgehen bei der Datenversorgung sind somit Standardabläufe und die Technik ist in ausreichender Form erprobt, so, dass die Zuverlässigkeit sehr hoch ist.

Auswertbarkeit

Die Übermittlung der Telegramme und Speicherung der Daten in den Verkehrsrechnern ermöglicht es, die Verkehrsqualität entlang der Strecken und an einzelnen LSA zu bewerten und zu überwachen. Unter anderem durch die DVB wurde urbic® („urban traffic control“) entwickelt. Durch diese Software ist es möglich, die Verkehrsqualität gemäß dem Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) 2015 zu bewerten. Grundsätzlich erfolgt dabei ein Abgleich zwischen theoretisch notwendiger Fahrzeit, um einen Lichtsignalknoten zu queren, und der tatsächlich benötigten Fahrdauer. Damit ist es auch möglich, die Funktionalität zu überwachen und auf auffällig schlechte Verkehrsqualitäten gezielt reagieren zu können. [Vgl. 11]

LSA-Beeinflussungen, die ohne die Übermittlung von Telegrammen arbeiten, zum Beispiel induktive Systeme, bieten diese Möglichkeit nicht. Zudem ist dadurch eine

gezielte Zusammenarbeit zwischen Verkehrsbetrieben und den Firmen, die für die Verkehrstechnik zuständig sind, möglich.

Treten auf einem Streckenabschnitt kurz vor einer LSA Störungen auf, die den Verkehrsfluss erheblich behindern, kann dies allerdings nicht korrekt in der Software abgebildet werden, da die Hauptanmeldung in diesem Fall bereits erfolgt und keine Ankunftsprognose in Echtzeit möglich ist.

Richtungsweisung

Im Gegensatz zu leitungsgebundenen Anforderungssystemen (Vgl. 2.3.2) ermöglicht das Bake-Funk-System durch die Zielübermittlung eine richtungsbezogene Anforderung schon vor Erreichen des LSA-Knotens und sorgt somit für eine maßgebliche Erhöhung der Verkehrsqualität im Vergleich zu anderen Systemen.

Sofortreaktion auf Änderungen

Dank der Versorgung der Linienwege in den Empfangs- und Auswerteeinheiten vor Ort ist es im Fall von Baustellen oder Störungen sofort möglich, auf die veränderten Linienwege zu reagieren, nachdem die geänderte Route an das Fahrzeug übermittelt wurde, da die Telegramme den entsprechend neuen Weg enthalten. Ein Betriebshof muss nicht angefahren werden. [Vgl. 3, S. 28]

2.2.3 Nachteile

Meldepunktbezogenheit

Das System der Meldepunkte ermöglicht zwar wie unter 2.2.1 beschrieben verschiedene Stufen der Anmeldung an den LSA, ist aber nicht leistungsfähig genug, um eine kontinuierliche Standortübermittlung des angeforderten Fahrzeuges zu ermöglichen. Nähert sich ein Fahrzeug aufgrund einer Verkehrsstörung (zum Beispiel Lieferverkehr am Straßenrand) nach der erfolgten Hauptanmeldung ungewöhnlich langsam dem Signalgeber, führt dies öfter dazu, dass eine maximale Dehnung der Freigabephase erfolgt und kurz bevor das Fahrzeug die Kreuzung erreicht, wird auf Rot, bzw F0 (Haltebegriff der Sondersignalisierung für ÖV-

Fahrzeuge³) geschaltet. Dann muss das betroffene Fahrzeug eine weitere Phase warten und der Verkehr des Nebenstromes, darunter möglicherweise auch anderer ÖPNV, wird unnötig lang an der Fahrt gehindert. Die Ankunftsprognose der Verkehrsmittel entspricht somit nur selten den realen Verkehrsbedingungen, sondern stützt sich auf vorher getroffene Annahmen über Fahrdauern auf bestimmten Abschnitten.

Standortwahl

Für eine korrekte Übermittlung der Datentelegramme ist es notwendig, dass ein ununterbrochener Kontakt zwischen den Sende- und Empfangseinheiten besteht. Gerade im Zuge von (außerplanmäßigen) Baumaßnahmen muss darauf geachtet werden, dass die Baken so positioniert werden, dass keine Objekte den Datenaustausch blockieren. Ist abzusehen, dass beispielsweise Baucontainer für längere Zeiträume vor den Empfangseinheiten stehen, müssen diese provisorisch neu positioniert werden.

Zu beachten ist auch, dass vorgenommene Änderungen an Meldepunkten in Auftrag gegeben werden müssen und dann durch die zuständigen Unternehmen vor Ort in den Baken nachversorgt werden müssen.

Die Reichweite der Funkfrequenzen der Ortsbaken ohne Informationsverlust beträgt etwa 8 Meter. [Vgl. 4, S. 516] Die Standortwahl der Baken stellt somit eine weitere Schwierigkeit da, denn zum einen darf dieser maximale horizontale Abstand nicht überschritten werden, zum anderen müssen die Baken in Höhe der Empfangseinheit der Fahrzeuge angebracht werden. In aller Regel bieten sich hierfür Masten der Straßenbeleuchtung, Verkehrszeichen oder auch Straßenbäume an. In jedem Fall muss die Anbringung mit den zuständigen Behörden abgestimmt werden.

Wartungsaufwand

Auch nach der Anbringung der Infrarotbaken vor Ort müssen im Rahmen einer regelmäßigen Wartung Batterien gewechselt und bei Bedarf Grünschnitt in unmittelbarer Nähe durchgeführt werden, um die Datenqualität nicht negativ zu

³ Anlage 4 (zu den §§20, 21, 50, 51) 3. Fahrsignale in Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 /BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1410) geändert worden ist

beeinflussen. Anlagen, die durch physische Einwirkung nicht mehr nutzbar sind, müssen zudem ersetzt werden. Auch die außen am Fahrzeug angebrachten Sende- und Empfangseinheiten müssen gewartet und gegebenenfalls repariert werden. In regelmäßigen Abständen müssen die Batterien der Ortsbaken getauscht werden.

Unidirektionalität

Analogfunk bietet dem Fahrpersonal kaum Möglichkeiten, Rückinformation durch die Verkehrsinfrastruktur zu erhalten, inwiefern die Anmeldung an einer LSA berücksichtigt wurde. Die Informationsübermittlung findet somit nur in eine Richtung statt (unidirektional). Das Fahrpersonal erhält die Signalisierung, ob eine Anforderung eingegangen ist, über die LSA (in der Regel die Zeichen „A“ oder „S“, siehe Abbildung 4, S.12). Im Fall einer erfolglosen Anmeldung kann das Fahrpersonal in der Regel über den Schlüsselkontakt nachholen.

Abhängigkeit Analogfunkfrequenzen

Die Analogfunktechnologie beansprucht Teile der natürlichen Ressource Funkfrequenz und ist dabei abhängig von der Zuteilung dieser Frequenzen durch eine staatliche Zuteilungsstelle. Das Frequenzraster für den betrieblichen Analogfunk unterliegt dabei einer stetigen Weiterentwicklung und ist durch die Bundesnetzagentur in den Verwaltungsvorschriften für Frequenzzuteilungen im nichtöffentlichen mobilen Landfunk (VVnömL) geregelt. [Vgl. 12, S. 24] Gegenwärtiger Standard ist eine Kanalbandbreite von 20kHz. 2018 wurde durch die Bundesnetzagentur festgelegt, dass diese Bandbreite im Betriebsfunk bis längstens 31.12.2028 beantragt werden kann. Die Abschaltung dieser Frequenzen hat als unmittelbare Folge, dass die Nutzung des Analogfunkes für die Verarbeitung der R09 Telegramme dann nicht mehr möglich ist. Kurzfristig kann dieser Tatsache durch eine Umrasterung auf die seit 2008 zur Verfügung stehenden 12,5kHz und 6,25kHz Analogfunkfrequenzen entgegengewirkt werden. [Vgl. 13] Auf langfristige Sicht erscheint es sinnvoll, eine neue Technologie im Stadtgebiet zu etablieren, um unabhängig von den Frequenzzuteilungen zu werden.



Abbildung 4: Optische Rückkoppelung der Anmeldung zum Rechtsabbiegen durch ein "A" und das Weichenstellsignal nach rechts (eigene Aufnahme)

Begrenzte Anwendbarkeit

Zwei fundamentale Nachteile des etablierten analogen Anmeldeverfahrens sind die begrenzte Einsetzbarkeit und die fehlenden Schnittstellen zu weiterer Verkehrsinfrastruktur. So ermöglicht die gegenwärtige Technik weder die Kommunikation von ÖPNV-Fahrzeugen untereinander noch die Aufnahme anderer Informationen der Verkehrsinfrastruktur, sie dient lediglich dem Zweck der Anmeldung der ÖPNV-Fahrzeuge an den LSA.

2.3 weitere Anforderungstechnologien

2.3.1 Funksysteme

Infrarotbake

Das Bake-Funk-System ist Bestandteil der Funksysteme, derzeitiger Status Quo bei der DVB und wurde unter 2.2 ausführlich betrachtet.

Datenversorgung Bordrechner

Bei einer Anforderung auf Grundlage der Datenversorgung im Bordrechner werden Telegramme dann zum Signalknoten geschickt, wenn das Fahrzeug entsprechende Punkte im Linienverlauf erreicht hat, an denen die Aussendung zuvor festgelegt wurde. Die Messung des zurückgelegten Linienweges kann dabei beispielsweise durch das Zählen von Radumdrehungen erfolgen. Nachteilig an diesem System ist, dass die Anforderung im Störfall durch die Bindung an den eingepflegten Linienweg unflexibel ist. [Vgl. 3, S. 28]

GPS-basiert

Auch GPS-basierte Lösungen funktionieren prinzipiell vergleichbar mit dem Bake-Funk-System, weisen jedoch eine höhere Ungenauigkeit bei der Standortermittlung des Fahrzeuges auf. Das Fahrzeug übermittelt seine Positionsdaten via GPS und löst bei Erkennen eines GPS-Aktivierungspunktes an virtuellen Meldepunkten eine Meldepunkt-kette in Form von Voran-, Haupt- und Abmeldung aus. [Vgl. 3, S. 28] Dieses System findet bei der DVB keine Anwendung, kommt aber unter anderem in Chemnitz zum Einsatz. [Vgl. 14] Die größere Ungenauigkeit ist in der Praxis beispielsweise dadurch erkennbar, dass eine Abmeldung erst erfolgt, wenn das Fahrzeug den Knoten schon länger passiert hat oder dass das Fahrzeug viel zu früh am Knoten angemeldet wird und dadurch Freiphasen verpasst.

2.3.2 Leitungsgebunden

Leitungsgebundene Anforderungen sind eine einfache Art der Fahrzeuganmeldung, die es nicht ermöglichen, durch verschiedene Meldepunkte eine möglichst optimierte Freiphase einzuleiten. In Dresden kommen leitungsgebundene Kontakte in der Regel als Rückfallebene zum Einsatz, wenn die eigentliche Anforderung nicht funktioniert. Es gibt aber auch Anwendungsfälle, bei denen Leitungskontakte eine effektive Anforderung ermöglichen. So beispielsweise die Ausfahrt aus Wendeanlagen oder die Passage von Schrankenanlagen – hierbei wird durch das Auslösen des Kontaktes die Abfahrtbereitschaft signalisiert. Dadurch, dass bei der Anforderung keine Daten des Fahrzeuges übermittelt werden, ist es zudem schwierig, eine qualitative Überwachung des Verkehrsablaufes durchzuführen.

Auslösen von Weichenkontakten

Bei diesem nur für den Straßenbahnbetrieb einsetzbaren Verfahren wird die richtungsbezogene Anforderung an einem Knoten ausgelöst, in dem die Straßenbahn eine zwischen den Schienen befindliche Koppelspule überfährt. Diese Spule empfängt über eine an der Straßenbahn befindlichen Sendespule einen Impuls. Die Richtungsanforderung wird entweder manuell durch das Fahrpersonal mit einem Taster ausgelöst oder anhand der Information über die Fahrtrichtung vom Bordrechner übertragen. Dadurch ist zwar eine automatische Detektion einer Straßenbahn möglich, aber es werden keine weiteren Fahrzeuginformationen übermittelt. Damit eignet sich diese Variante für Betriebshöfe und Ausfahrten aus Wendeschleifen sowie als Rückfallebene um ein händisches Stellen der Weiche zu verhindern. Die korrekte Weichenstellung wird dem Fahrpersonal durch Signale an den Knoten angezeigt. [Vgl. 15]

Auslösen von Oberleitungskontakten

Oberleitungskontakte funktionieren nach dem einfachen Prinzip, dass mit dem Durchfahren eines Kontaktes, der in die Oberleitung eingelassen ist, die Anforderung für eine Straßenbahn an einer Kreuzung ausgelöst wird. Im Gegensatz zum Weichenkontakt können dabei keine richtungsbezogenen Informationen übertragen werden. Damit eignet sich diese Technologie nur für Streckenabschnitte ohne Weichen und an Wendeschleifen sowie als provisorische Einrichtung bspw. vor temporären Schrankeneinrichtungen oder an Baustellenampeln. [Vgl. 16]

Schlüsselkontakt

Der Schlüsselkontakt wird eigenständig durch das Fahrpersonal oder gegebenenfalls anderes betriebliches Personal direkt an der Anlage durch einen Schlüssel, einen Taster, einen Chip oder andere geeignete Varianten ausgelöst. Dabei muss das Personal selbstständig die korrekte Fahrbeziehung anfordern. In Dresden werden Schlüsselkontakte sowohl als Rückfallebene als auch zur Anforderung für Fahrbeziehungen, die vom Regelbetrieb abweichen und somit nicht in der Steuerung eingepflegt sind, verwendet. Da Schlüsselkontakte direkt an den Anlagen verbaut sind, ist diese Form der Anforderung auch langfristig als Rückfallebene von Bedeutung. In Abbildung 5 (S.15) ist eine Variante der Richtungstaster mit Chipbedienung zu sehen.



Abbildung 5: Schlüsselkontakte am Lennéplatz mit 4 möglichen Ausfahrrichtungen (eigene Aufnahme)

Induktivschleife

Eine klassische Form der Fahrzeugerkennung sind im Straßenbelag eingelassene Induktivschleifen. Überfährt ein Fahrzeug diese Schleife, wird ein elektrischer Impuls ausgelöst, der als Steuerimpuls an die Lichtsignalanlage weitergeleitet wird. Diese Form der Anforderung ermöglicht keine sichere Separation von Fahrzeugtypen und kann im ÖPNV-Bereich nur sinnvoll an Straßen eingesetzt werden, die ausschließlich vom ÖPNV genutzt werden dürfen. [Vgl. 3, S. 29]

2.3.3 Kontinuierliche Kommunikation Fahrzeug – LSA-Knoten

Bislang in der Erprobungsphase befinden sich Systeme, die über die Möglichkeit der meldepunktbasierten Funkssysteme und der ortsfesten, leitungsgebundenen Systeme hinaus gehen.⁴ Durch Nutzung von Möglichkeiten des vernetzten Fahrens und der Kommunikation aller Verkehrsmittel und der Verkehrsinfrastruktur untereinander im Rahmen von politisch angestrebten Intelligent Transport Systems

⁴ Vgl. Beispiele unter Punkt 3.3

(ITS) und V2X ergeben sich zahlreiche Potentiale. Da die Vernetzung des Verkehrs durch die DVB als zukunftsfähig und wegweisend angesehen wird, erfolgt eine ausführliche Betrachtung dieser Technologie im Kapitel 3.

2.4 Potentialanalyse im Netz

2.4.1 Vorüberlegungen

Vor der Einführung einer neuen Fahrzeugkommunikationstechnik, ist es notwendig, zunächst darzulegen, welches Freigabe- und Fahrtzeitpotential gegenwärtig besteht, um in der Projektphase der Nachher-Analyse bewerten zu können, wie groß die Effekte der neuen Technologie sind. Diese Überlegung folgt damit den Punkten „Schwachstellenanalyse“ und „Potentialabschätzung“ der FGSV-Vorgehensweise. [3, S. 11] Der Verkehrsablauf an Knotenpunkten erfordert dabei die Definition einiger Rahmenbedingungen, die auch bei der Einführung einer neuen Technologie eingehalten werden müssen. Aufgrund der Komplexität des Liniennetzes werden diese Analysen nur vereinfacht durchgeführt. Das beispielhafte Vorgehen einer ausführlichen Schwachstellen- und Potentialanalyse wurde im Rahmen der Studienarbeit: „Potentialanalyse Straßenbahnlinie 6 in der Landeshauptstadt Dresden“ aufgezeigt. [17]

2.4.2 Definition Verkehrsqualität

Um die gegenwärtige Situation im Liniennetz zu bewerten, bietet es sich an, den Verkehrsablauf an den einzelnen Knoten in verschiedene Qualitätsstufen einzuordnen. Durch die FGSV wurde im HBS Teil S (Stadtstraßen) ein entsprechendes Vorgehen beschrieben. Aus dem Verhältnis der zu erwartenden Beförderungsgeschwindigkeit $V_{\text{ÖV}}$ und der idealen Beförderungsgeschwindigkeit $V_{\text{ÖV,ideal}}$ ergibt sich der „Beförderungsgeschwindigkeitsindex“ $I_{\text{ÖV}}$. [18, S7-5]

$$I_{\text{ÖV}} = \frac{V_{\text{ÖV}}}{V_{\text{ÖV,ideal}}}. \quad (1)$$

Beträgt der Quotient gleich oder mehr als 0,95, ist die Beförderungsgeschwindigkeit (nahezu) ideal und die zugeordnete „Stufe der geschwindigkeitsbezogenen Angebotsqualität des ÖPNV (SAQ)“ ist für den entsprechenden Netzabschnitt A. Mit abnehmender zu erwartender Beförderungsgeschwindigkeit aufgrund von

Behinderungen durch Verkehr oder Lichtsignalanlagen sinkt die SAQ auf B, C, D, E oder F. Bei SAQ = F liegt $I_{\text{ÖV}}$ unter 0,5 und die „ÖV-Fahrzeuge werden in besonders hohem Maß [...] auf der Strecke beeinflusst“. [18, S7-6]

Als Berechnungsgrundlage der SAQ dienen bei der DVB die gespeicherten Telegrammdateien in den Verkehrsrechnern in urbic® (Vgl. 2.2.1, 2.2.2). Durch die Auswertung der realen Fahrtdaten ist es möglich, für die Ermittlung der Verkehrsqualitätsstufe die reale Beförderungsgeschwindigkeit anstelle der berechneten, zu erwartenden Geschwindigkeit zu nutzen. Da äquivalent zur Geschwindigkeit auf einem Netzabschnitt die Zeit für das Durchfahren des Abschnittes genutzt werden kann, sind in urbic® zusätzlich diese Dauern hinterlegt.

2.4.3 theoretisches Fahrzeitpotential

Zunächst soll betrachtet werden, welche Fahrzeiten bei einem verlustfreien Betrieb des Liniennetzes erreichbar sind. Diese theoretischen, beziehungsweise notwendigen Fahrzeiten sind Grundlage der Fahrplangestaltung bei Verkehrsbetrieben und entsprechen der technischen Fahrzeit.

Diese ergibt sich aus der Addition der einzelnen fahrdynamischen Zeitdauern für Beschleunigen, Bremsen und Beharrungsfahrt (= Fahrt bei konstanter Geschwindigkeit) sowie der minimal notwendigen Haltestellenaufenthaltszeit, welche maßgeblich durch Zeit zum Öffnen und Schließen der Türen beeinflusst wird. Die Geschwindigkeiten, die bei dieser Berechnung Beachtung finden, entsprechen den maximal zulässigen Geschwindigkeiten auf den Straßen, bzw. bei Weichen- oder Kurvenfahrt. [Vgl. 19, S. 81]

Jegliche Beeinträchtigungen durch den fließenden Verkehr und Fahrgastwechsel werden hierbei vernachlässigt. Die theoretische Fahrzeit entspricht somit der geringstmöglichen Fahrzeit im Streckenverlauf. Um die theoretische in die reale Fahrzeit zu transformieren sind Zuschläge notwendig. Darunter fallen Standzeiten an LSA und auf der Strecke, Puffer für erhöhte Fahrgastwechselzeiten an Knotenpunkten und Wartezeiten vor der Einfahrt in eine Haltestelle. Je nach Verkehrsaufkommen schwanken diese unterschiedlich stark. [Vgl. 19, S. 85-87] Daraus ergeben sich sogenannte „Fahrzeitklassen“. Bei der DVB werden diese unterteilt in die Fahrzeitklassen A, B, C und D. Fahrzeitklasse A entspricht dabei der Fahrtdauer in der verkehrsstärksten Zeit Montag – Freitag zwischen ca. 6 – 19 Uhr.

Fahrzeitklasse B beinhaltet die Fahrzeiten in den verkehrsarmen Nachtzeiten und sind deshalb in der Regel am kürzesten. Die Klassen C und D spiegeln die Fahrzeiten am Wochenende beziehungsweise am Abend und frühen Morgen als Zwischenabstufung zwischen Tag- und Nachtfahrzeit wider.

Besonders die Fahrzeiten der tangentialen Buslinien zeigen, welche Fahrzeitverluste durch die notwendigen Zuschläge entstehen: Im Fahrplanjahr 2021 ergibt sich für die stark frequentierte Linie 61, die Umsteigebeziehungen zu allen Dresdner Straßenbahnlinien bietet und einen Großteil des Universitätsgelände erschließt, aus Richtung Fernsehturm zur Endhaltestelle Löbtau Gröbelstraße eine theoretische Fahrzeit von 51 Minuten. Die Planfahrzeit in Fahrzeitklasse A beträgt 62 Minuten und damit fast 11 Minuten mehr. In Gegenrichtung sind statt 51 Minuten und 44 Sekunden 61 Minuten notwendig, knapp 10 Minuten Verlust. Dadurch werden in einem 10-Minuten-Takt mindestens zwei zusätzliche Umläufe inklusive Personal und Fahrzeugen benötigt.

Die kombinierte Straßenbahnlinie 10/12, die von der MESSE DRESDEN durch die Stadt nach Striesen und dort weiter über die zentralen Knotenpunkte, Blasewitz und Löbtau nach Leutowitz im Dresdner Westen fährt, erleidet entlang des gesamten Linienwegs erhebliche Verluste: Von der Messe nach Leutowitz sind theoretisch 80 Minuten und 59 Sekunden notwendig, die Planfahrzeit beträgt allerdings 86 Minuten. In Gegenrichtung dauert die fahrplanmäßige Fahrt ebenfalls 86 Minuten, theoretisch wären nur 78 Minuten und 33 Sekunden nötig. Eine Übersicht über die Zusammensetzung der Fahrzeiten der Linien 10/12 und 61 findet sich in Anlage 3.

Betrachtet man die Verluste aller Linien, die während der Hauptverkehrszeit im 10-Minuten-Takt-unterwegs sind (alle Straßenbahnlinien, die Buslinien 61-66 und 68, sowie die Kombination aus Linie 70/80), gelangt man zu einem aufsummierten Potential über Hin- und Richtung von deutlich über 2 Stunden. Dominierend sind dabei die Buslinien, die nur auf kurzen Streckenabschnitten auf eigenen Anlagen verkehren können und somit stark abhängig vom MIV sind. Ein tabellarischer Überblick über diese Potentiale findet sich im Anlage 4.

Hinzu kommt, dass viele Linien in den Spitzenverkehrszeiten trotz der Pufferzeiten sehr verspätungsanfällig sind. Um dies zu kompensieren und Lenkzeitüberschreitungen zu vermeiden, gibt es an den Endpunkten weitere Wendezeitzuschläge, die dem Personal nicht an die Pausenzeit angerechnet

werden. Zusammen mit weiteren Zusatzkursen, die unterwegs sind, um eine ausreichende Wendezeit für eine pünktliche Rückfahrt zu ermöglichen, ist so ein erheblicher Personal-, Fahrzeug- und Kostenmehraufwand gegenüber einem optimalen Verkehrsablauf notwendig.

2.4.4 Technisch mögliches Potential

Um zu ermitteln, welcher Anteil der unter 2.4.3 ermittelten Potentiale durch einen neuen technologischen Anforderungsstandard erschlossen werden können, können Untersuchungen von Stefan Lämmer aus 2009 und 2016 eine Grundlage bilden. Lämmer untersuchte die Potentiale an einigen hochfrequentierten Dresdner Knoten und Strecken. [20] [21] Dies geschah nicht unter der Annahme des Einsatzes der kontinuierlichen V2X-Technologie, sondern auf Grundlage einer detektorbasierten LSA-Selbststeuerung. Durch eine häufigere Detektion der tatsächlichen Fahrzeugpositionen des IV und ÖPNV, gelang es zunächst in einer Simulation für Bahnhof Mitte und im Jahr 2016 in der praktischen Umsetzung entlang der Königsbrücker Landstraße den Verkehrsablauf an den LSA-Knoten deutlich zu verbessern. Im Rahmen dieses Projektes wurde von einer üblichen Festzeitsteuerung mit flexiblen Freifenstern abgewichen und eine rein anforderungsbasierte Steuerung aufgesetzt. Die einzigen Rahmenbedingungen waren hierbei die Einhaltung von definierten Mindestfreigabezeiten und maximalen Wartezeiten der einzelnen Verkehrsströme.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Verkehrsqualitäten durch eine Flexibilisierung der Verkehrssteuerung erhöht und Verlustzeiten deutlich reduziert werden konnten. Eine Messung zu verschiedenen Tageszeiten legte dar, dass Straßenbahnen, die die Königsbrücker Landstraße im Hauptstrom befahren, nun ohne Stopp an den LSA fahren konnten, während die Verluste mit der zuvor verwendeten verkehrsabhängigen VS-PLUS⁵-Steuerung in etwa 18 Sekunden betrugen. Auch die Busse, die von der Königsbrücker Landstraße links zur Wendeanlage Infineon Nord abbogen, warteten im Schnitt nur 10 statt knapp 46 Sekunden. (Abbildung 6, S. 16) In Folge sanken die Beförderungszeiten und schwankten zudem weniger stark, da bei Annäherung eines ÖPNV-Fahrzeuges nahezu immer unmittelbar eine

⁵ VS ist ein Schweizer Verkehrstechnikunternehmen, das effiziente Verkehrslösungen anbietet, VS-PLUS ist ein Produkt des Unternehmens

Freigabe folgte. [Vgl. 21, S. 4-10] Die Gesamtbilanz zu den Verlusten aller Verkehrsteilnehmer findet sich in Abbildung 7, S. 21.

Es ist vernünftigerweise zu erwarten, dass durch den Einsatz einer intelligenten V2X Steuerung ähnliche Effekte an mit der Topografie der Königsbrücker Straße vergleichbaren Netzabschnitten zu erwarten sind, wenn die Steuerungslogik so flexibel wie möglich gestaltet wird. Streckenabschnitte, auf denen der Verkehrsablauf mit der Königsbrücker Straße vergleichbar ist, weisen auf der Hauptachse Straßenbahnverkehr auf und stehen nur mit wenigen abbiegenden Linien in einem Konflikt. Dies sind beispielsweise die Karcherallee, die Bodenbacher Straße, die Kesselsdorfer Straße, Hamburger Straße und Schäferstraße. Die Qualitätsanalyse mit urbic® zeigt auf, welche Streckenabschnitte noch sehr hohe und stark schwankende Verlustzeiten für ÖV-Fahrzeuge generieren, die Verkehrsqualität kann jederzeit abgelesen werden. Für hochbelastete Knoten mit schlechter Verkehrsqualität kann allerdings nur vermutet werden, dass sich die Verkehrsqualität durch eine intelligente Verkehrssteuerung verbessert, denn gegenwärtig gibt es keine validen Berechnungsmethoden, die auf ein konkretes durch V2X erschließbares Potential schließen lassen. Zur Validierung dieser Annahmen ist deshalb eine Testphase im Rahmen der Einführung von V2X unabdingbar. Untermuert wurde diese Vermutung auch in einem mit Dr. Lämmer geführten Interview über dessen Selbststeuerung und seine Sichtweisen zur Zukunft und den Potentialen einer kontinuierlichen Anforderung im Sinne von V2X. Eine Zusammenfassung des Interviews findet sich in Anlage 1.

Höhere durchschnittliche Beförderungsgeschwindigkeiten und geringe Fahrzeitschwankungen bedeuten für den Verkehrsbetrieb nicht nur Einsparungen bei Betriebs- und Personalkosten, sondern haben weitere Effekte. Zum einen erhöht sich insgesamt die Kapazität der Strecken und Knoten, was besonders im Straßenbahnnetz relevant ist, da Ausbaumaßnahmen wesentlich komplexer als im Straßennetz sind. Angebotsausbau wird dadurch erleichtert. Zum anderen steigt die Attraktivität des Angebots aus Kundensicht und Auslastung der Fahrzeuge sowie Fahrgeldeinnahmen können steigen. [Vgl. 5, S. 14]

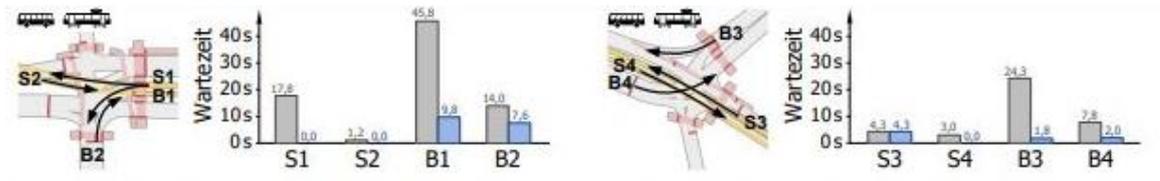


Abbildung 6: Veränderungen der Fahrzeitverluste im Zuge der Königsbrücker Landstraße durch Einführung der Selbststeuerung [21, S. 9]



Abbildung 7: Gesamtbilanz der Verlustzeitenentwicklung aller Verkehrsteilnehmer [21, S. 10]

2.4.5 einzuhaltende Randbedingungen

Die LSA-Steuerlogik unterliegt in jedem Fall den durch die Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA) festgesetzten Randbedingungen. [22] Diese müssen sowohl bei den klassischen phasengesteuerten Umlaufplänen, der Freiläufersteuerung nach Lämmer als auch bei einer künftigen Steuerung, deren Berechnung auf Grundlage der Fahrzeuergfassung durch V2X erfolgt. Darunter fallen die Einhaltung von Zwischenzeiten beim Wechsel zwischen verschiedenen Schaltphasen, die gegenseitig nicht verträglich sind. Zwischenzeiten sind notwendig, damit Personen und/oder Fahrzeuge, die sich während des Wechsels von Signalphasen im Kreuzungsbereich befinden, noch sicher queren können. Diese Zeiten müssen für jede Kreuzung entsprechend ihrer Topografie und den verschiedenen Räumungsfällen einzeln berechnet werden. [Vgl. 22, S. 21]

Definiert sind auch sogenannte Mindestfreigabezeiten, die ermöglichen sollen, dass es während einer Grünphase unter Einbeziehung der Verzögerung durch Reaktions- und Beschleunigungszeiten für das führende Fahrzeug überhaupt möglich ist, die Grünphase zum Queren der Kreuzungsanlage zu nutzen. Diese beträgt 5 Sekunden für Fahrzeuge. Für Fußgänger muss sich so berechnet werden, dass mindestens die Hälfte der Furt überquert werden kann. [Vgl. 22, S. 26]

Außerdem ist die Zeitdauer, für die die Signalphase „GELB“ bzw. F4 („Halt zu erwarten“) bei ÖPNV-Sondersignalen aufleuchten muss, als sogenannte

„Übergangszeit“ definiert. Diese Zeit garantiert, dass den Verkehrsteilnehmern beim Wechsel von GRÜN auf ROT genügend Zeit bleibt, um sicher zu reagieren. [Vgl. 22, S. 21]

Bei der Umlaufphasenplanung ist stets zu beachten, dass ein häufiger Phasenwechsel zu anteilig höheren Zwischenzeiten führt.

2.4.6 Konflikte bei der Qualitätsermittlung an LSA

Bei der Optimierung der Verkehrsqualitäten auf der Strecke und an LSA-Knoten treten zunehmend mehr Konflikte auf, bei denen Prioritäten gesetzt werden müssen. Einerseits ist es für das Verkehrsunternehmen aus betriebswirtschaftlicher Sicht erstrebenswert, die Verlustzeiten auf der Strecke so gering wie möglich zu halten, um Fahr- und Umlaufzeiten und damit die Anzahl an Personal und Fahrzeugen zu reduzieren. [Vgl. 19, S. 107] Andererseits können durch die bewusste Beeinflussung der Verkehrsqualitäten an den Knoten Anschlüsse gesichert werden, wodurch die Gesamtreisezeit der Fahrgäste minimiert und die Kundenzufriedenheit erhöht werden kann. [Vgl. 5, S. 12]

Ein weiterer Konflikt tritt in Bezug auf das Verfahren zur Verkehrsqualitätsermittlung in Zusammenhang mit bereits bestehenden intelligenten ITS-Lösungen wie das Fahrerassistenzsystem „COSEL“ mit einer Grünzeitprognose. Durch die Prognosen nähern sich die Fahrzeuge den LSA-Knoten mit optimaler Geschwindigkeit um diesen ohne Halt, fahrgastfreundlich und energieeffizient passieren zu können. Damit wird allerdings auch eine höhere Verkehrsqualität suggeriert, als eigentlich vorherrscht. Dadurch wird das Qualitätsmanagement durch Software wie urbic® erschwert. Gegenwärtig wird COSEL auf der Nord-Süd-Achse und künftig auch auf dem Innenstadtring eingesetzt. Die LSA an den Knoten entlang dieser Verkehrsachsen priorisieren Fahrzeuge nach Fahrplanlage. [23] [24]

3 V2X

3.1 Methodik der Technologiebetrachtung

Im vorherigen Kapitel konnte aufgezeigt werden, dass die gegenwärtige Zuverlässigkeit des Dresdner ÖPNV in Bezug auf die Qualität des Verkehrsablaufes an Knotenpunkten noch Potentiale aufweist, diese durch die an der Grenze der Belastbarkeit funktionierende Analogfunktechnologie aber kaum erschlossen werden können. Dadurch begründet sich die Notwendigkeit der Einführung eines neuen technologischen Standards zur Anforderung an LSA.

Hierbei wird der von der FGSV empfohlenen Vorgehensweise weiter gefolgt. Nach der Darstellung der gegenwärtigen Situation inklusive einer Schwachstellenanalyse und Potentialabschätzung erfolgt die Erstellung eines Maßnahmenprogrammes. Unter diesem Aspekt ist es Ziel dieses Kapitels, alle Fragen bezüglich der technischen Umsetzung der neu einzuführenden Technologie zu erörtern und zu klären. Um die Dynamik der Forschung im Bereich der intelligenten Verkehrssystemen aufzuzeigen, wird dafür ein geschichtlicher Überblick über die Bemühungen rund um ITS im Allgemeinen gegeben und gezeigt, welche gegenwärtigen Anwendungsfälle es bereits gibt. Eine Methode, um Erkenntnisse über Ergebnisse aktueller Forschungen zu erhalten, sind Expertengespräche. Im Rahmen der Arbeit wurden deshalb mehrere Gespräche mit Fachverständigen geführt, die die Aussagen einiger Publikationen konkretisieren konnten.

Die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten und Umsetzungsarten von V2X machen es notwendig, zu definieren, welche Kriterien für das gewünschte Einsatzfeld von besonderer Bedeutung sind und welche Anforderungen an andere Kriterien zu stellen sind. In der „integrierte[n] Betrachtung zur Fahrzeugkommunikation“ [25] hat das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) in Zusammenarbeit mit dem Institut für vernetzte Mobilität gGmbH (IVM) in einem Leitfaden dargelegt, welche Kriterien bei einer anvisierten Einführung eines V2X-Systems betrachtet werden sollten. Es wurde dabei unterschieden zwischen Leistungs-, Entwicklungs- und Funktionskriterien. Die Anforderungen aus Sicht der DVB an diese Kriterien werden unter 3.4 vorgestellt. Darauf aufbauend werden die technischen Umsetzungsvarianten vorgestellt und entsprechend den Kriterien bewertet. In 3.6 wird gezeigt, welche Umrüstungen im Stadtgebiet notwendig sind.

Abschließend werden Herausforderungen aufgezeigt, die mit dem gegenwärtigen Stand der Technik noch bestehen.

3.2 Geschichte

V2X ist Bestandteil des komplexen Systems ITS. Unter ITS werden alle Vorhaben und technologischen Umsetzungen zusammengefasst, die zum Ziel haben, den Verkehr über alle Verkehrsträger hinweg so zu steuern, dass Unfallrisiken und Emissionen minimiert und Verkehrsströme effizienter gesteuert werden können – sowohl im Individual- als auch im öffentlichen Verkehr.

Erstmalig offiziell verwendet wurde dieser Begriff ab dem Jahr 1994 in den USA, als das dortige Verkehrsministerium (US Department of Transportation) den 1991 in das Leben gerufenen „Intelligent Vehicle-Highway Systems Strategic Plan“ (IVHS) durch den Begriff „ITS“ ersetzte. [Vgl. 26, S. 19] IVHS zielte dabei zunächst auf eine Zusammenarbeit zahlreicher öffentlicher und privater Akteure zur Schaffung eines vernetzten Managements der fertiggestellten Highways ab, um Verkehrsprobleme im Land lösen zu können. Bau, Betrieb und Wartung sollten dabei intelligent verknüpft werden. Durch ITS sollte dabei verdeutlicht werden, dass es sich um eine intermodale Aufgabe handelt, die nicht nur die Technik in den Fahrzeugen betrifft. Dadurch beschleunigte sich der Prozess des Aufbaus gemeinsamer Schnittstellen, um eine verlustfreie Kommunikation zwischen den Akteuren des Verkehrs zu ermöglichen. [Vgl. 27] Mitte der Neunziger gab es erste Erfolge bei der Entwicklung von Kollisionswarnern, die auf kurze Distanz Geschwindigkeitsänderungen vorausfahrender Fahrzeuge erfassen und Bremsvorgänge einleiten können. Mit Testfahrzeugen gelang es bereits 1995 zwischen München und Kopenhagen lange Autobahnabschnitte durch Assistenzsysteme automatisiert zu fahren. [Vgl. 28, S. 2]

Ein Quantensprung in der Entwicklung intelligenter Verkehrssteuerung und der Kommunikation zwischen verschiedenen Akteuren im Verkehr war im Jahr 1999 die Entscheidung der Federal Communications Commission ein 75 Megahertz Spektrum im 5 Gigahertz („G5“) Bereich des Radiofrequenzbandes für Nahbereichskommunikation (Dedicated Short-Range Communications – DSRC) zuzuteilen. Später wurden die Nutzungsmöglichkeiten auf ITS allgemein ausgeweitet. [Vgl. 26, S. 18]

Auf europäischer Ebene wurde im Jahr 2008 durch das Electronic Communication Committee und der European Commission ebenfalls beschlossen, eine zunächst 30MHz umfassende Bandbreite für sicherheitsrelevante und nicht-sicherheitsrelevante ITS-Anwendungen zu reservieren. 2010 folgte die sogenannte „IVS-Richtlinie“, die von den EU-Mitgliedstaaten forderte, dass Verkehrsmanagementmaßnahmen nach ITS-Maßgaben umgesetzt werden, um die EU-weite Standardisierung zu fördern. Dort findet sich auch eine offizielle Definition des Begriffes: *„Intelligente Verkehrssysteme (IVS) sind hochentwickelte Anwendungen, die — ohne Intelligenz an sich zu beinhalten — darauf abzielen, innovative Dienste im Bereich verschiedener Verkehrsträger und des Verkehrsmanagements anzubieten, und die verschiedenen Nutzer mit umfassenderen Informationen zu versorgen und sie in die Lage zu versetzen, die Verkehrsnetze auf sicherere, koordiniertere und „klügere“ Weise zu nutzen.“* [29, L207/3Satz 3]

2014 wurden technische Rahmenbedingungen für ein erweitertes Spektrum von 70MHz (5,855 GHz – 5,925 GHz) durch das European Telecommunications Standards Institute (ETSI) definiert (siehe Abbildung 8, S. 26). [Vgl. 30, S. 12-15 (12-15)] Dabei wurden die gegenwärtig verwendeten Anwendungstypen festgesetzt: [Vgl. 30, S. 8-9]

- *Vehicle to Vehicle (V2V)* als ITS-Anwendung zwischen einzelnen Fahrzeugen und Fahrzeugclustern, auch entgegen der Fahrtrichtung des betrachteten Fahrzeuges.
- *Vehicle to Infrastructure (V2I)* sowohl mit dem Informationsfluss von Fahrzeug zur Infrastruktur (Uplink) als auch entgegengesetzt (downlink). Die Kommunikation kann dabei jeweils von/zu einem oder mehreren Fahrzeugen stattfinden.
- *Kommunikation zwischen Verkehrsinfrastruktur/Fahrzeug und Fußgänger bzw. Radfahrer.*
- *Vehicle-To-everything (V2X)* Kommunikation zwischen allen Verkehrsträgern und -mitteln sowie der Infrastruktur untereinander

Im Laufe der letzten Jahre hat sich zudem eine weitere Unterscheidung von V2X-Anwendungen herausgebildet. Sicherheitsrelevante Anwendungen umfassen unter anderem die Warnung vor Kollisionen, Halt zeigenden LSA, kritischen Brückenhöhen und Straßenzuständen sowie die Assistenz beim Abbiegen, Spurhalten- und wechseln. Auch der Empfang und die Reaktion auf Verkehrswarmmeldungen (Falschfahrer, Verkehrsstau) sind Teil. [Vgl. 30, S. 19]

Zunehmende Bedeutung erlangen allerdings Anwendungen, die den Verkehrsablauf optimieren und die Verkehrsqualität erhöhen sollen, ohne dabei direkt sicherheitskritische Aufgaben zu erfüllen. Dies sind sogenannte nicht-sicherheitsrelevante Anwendungen. Auf kurzfristige Sicht erfüllt auch die Einführung von V2X bei der DVB überwiegend nicht-sicherheitsrelevante Aufgaben.

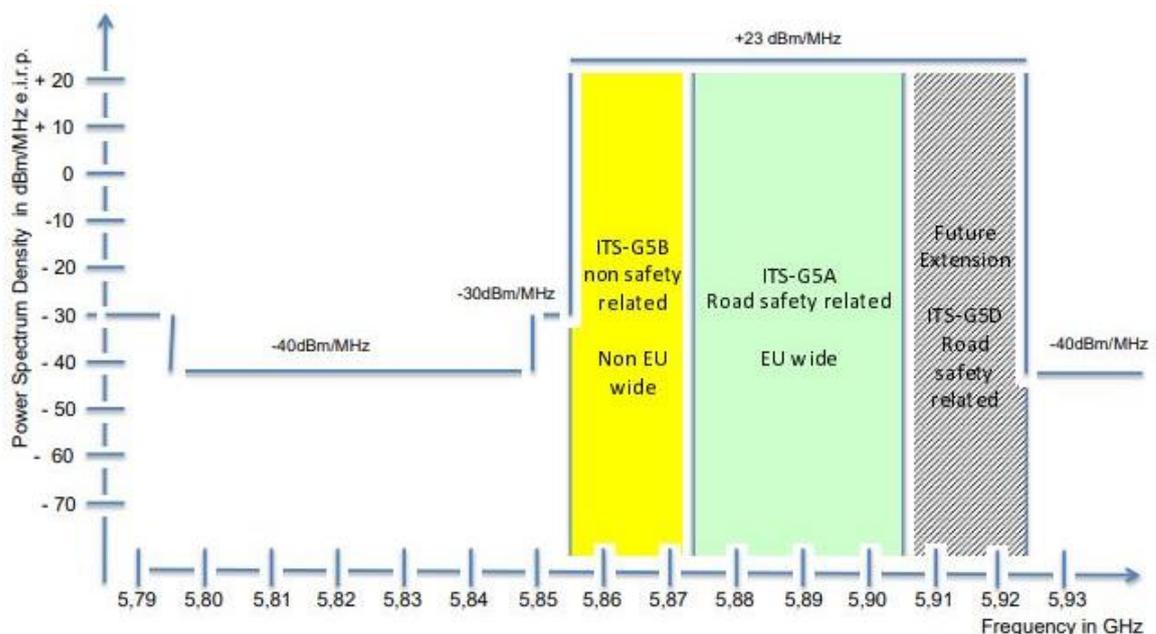


Abbildung 8: Einordnung der ITS-G5 Anwendungen in das Frequenzband [31, S. 14]

Da gegenwärtig noch kein einheitlicher technologischer Standard festgesetzt ist und durch die Kommunen/Ländern beziehungsweise den Bund in den Städten umgesetzt werden kann, gibt es derzeit viele verschiedene Umsetzungsvarianten von V2X-Anwendungen je nach Hersteller der Fahrzeuge und der Infrastrukturanlagen. Die technischen Systeme, die in den IV-Fahrzeugen der Automobilhersteller etc. verbaut sind, basieren dabei zunächst noch auf der Umsetzungsvariante, Hindernisse und Verkehrszustände durch eigene Detektoren und Sensoren an Bord zu erkennen und zu bewerten.

Eine Aufnahme und Auswertung von Informationen, die durch die Verkehrsinfrastruktur in Form von Telegrammen ausgesendet und so zur Verfügung gestellt werden, ist bislang in der Erprobungsphase.

3.3 Testfelder in Deutschland

In Deutschland gibt/gab es mehrere Testfelder, in denen verschiedene kooperative IST-Anwendungen (C-ITS) erprobt werden bzw. wurden und deren Testergebnisse teilweise Grundlage für die vorliegende Arbeit sind. Folgend werden öffentliche Projekte vorgestellt, die für die DVB von besonderem Interesse sind, da dort entweder Anwendungen in Bezug auf den ÖPNV in den Fokus genommen wurden oder das Projekt selbst in Dresden durchgeführt wird. Die erwähnten technischen Komponenten und Umsetzungsmöglichkeiten werden im Punkt 3.5 erklärt.

VERONIKA

Das Kunstwort VERONIKA steht für „Vernetztes Fahren des öffentlichen Nahverkehrs in Kassel“. Ausgangspunkt für dieses von Anfang 2017 bis Ende 2019 laufende Projekt war ebenfalls die begrenzte Anwendbarkeit der analogen Anforderungstechnologie. Insbesondere die Tatsache, dass die R09-Telegramme nur einen begrenzten Inhalt übermitteln können, war ein Beweggrund für die Initialisierung eines WLAN-V2X-Modelles. Damit wurde getestet, inwiefern weitere fahrzeugspezifische Daten wie Fahrzeugtyp (relevant vor allem für die Zwischenzeitberechnung aufgrund der unterschiedlichen Länge der Bahnen) und Besetzgrad in die Freiphasenberechnung integriert werden können. Neben Bussen wurden auch Rettungsfahrzeuge mit für V2X notwendige Bordtechnik, den sogenannten OnBoard-Units (OBU, Vgl. 3.6.3), ausgestattet und sendeten Standortinformationen an die Verkehrsinfrastruktur. Damit war es den Bussen und anderen mit OnBoard-Technik ausgestatteten Fahrzeugen möglich die Richtung zu detektieren, aus der die Einsatzfahrzeuge kamen. [Vgl. 10]

KoMoD

Das Projekt „Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf“ lief von Juni 2017 bis Juni 2019. Das Testfeld umfasste sowohl Bereiche der Autobahn als auch einen städtischen Abschnitt in Düsseldorf. Ziel war die Erprobung unterschiedlicher Anwendungen des vernetzten und des hochautomatisierten Fahrens. Ein Projektbestandteil war zum einen die ÖPNV-Priorisierung durch Verwendung der

V2X-Technologie und die Erhöhung der Verkehrsqualität durch genaue Schaltzeitprognosen. Auf einer den Rhein querenden Teststrecke wurden 5 Kreuzungen mit sogenannten RoadSide-Units (RSU) von zwei verschiedenen Herstellern ausgestattet. Zur Testung der Zuverlässigkeit und Dauerleistungsfähigkeit wurden 16 Busse mit insgesamt 32 OBU aufgerüstet. Das Testfeld war auch für die Öffentlichkeit nutzbar, entsprechend ausgerüstete Fahrzeuge konnten von der Vernetzung profitieren. Im Rahmen des Projektes konnten insbesondere Ergebnisse bezüglich der Antennenpositionen der OBU in den Fahrzeugen und den Reichweiten der RSU festgehalten werden. Das Anschlussprojekt „KOMODnext“ mit erweiterten Funktionen rund um teilautomatisiertes Fahren befindet sich gegenwärtig (2021) in Umsetzung. [Vgl. 32]

BiDiMoVe

Das umfassendste Projekt in Bezug auf Anwendungen im ÖPNV lief in Hamburg von 10/2018 bis 09/2021. Die Abkürzung BiDiMoVe ergibt sich aus wesentlichen Eigenschaften von V2X: „BiDirektional, Multimodal, vernetzt“. BiDiMoVe ist eines von mehreren ITS-Teilprojekten der Hansestadt. Im Rahmen des Projektes wurden auf einer Pilotstrecke der Linie M26 9 LSA-Knoten mit moderner RSU-Technik ausgestattet. Dadurch konnten bereits erstmalig die neuen Telegrammtypen SREM/SSEM zur ÖPNV-Anmeldung verwendet werden (Vgl. 3.5.7), verschiedene OnBoard-Technik getestet werden und eine Public Key Infrastructure zur Systemsicherheit implementiert werden. Außerdem wurden zur Anbindung der einzelnen Systembestandteile Schnittstellen des aktuellen Standards genutzt. Auch Mapping-Anwendungen wurden umfassend erprobt. [Vgl. 33]

Parallel zu BiDiMoVe wurde im Hafenviertel ein autonomes Kleinbussystem getestet, das unter dem Namen Hamburg Electric Autonomous Transportation (HEAT) von 2019 bis Oktober 2021 getestet. Durch eine umfassende technische Ausrüstung entlang der Strecke konnte das Shuttle auf der 1,8 Kilometer langen Strecke Geschwindigkeiten von bis zu 25km/h erreichen und war damit leistungsfähiger als andere vergleichbare Systeme in Deutschland.⁶

⁶ Umfassende Informationen über die ITS-Projekte der Stadt Hamburg gab es vom 11.-15.10.2021 auf dem ITS-Weltkongress in Hamburg

Frankfurt MIND+

Seit Anfang 2021 befindet sich in Frankfurt das durch die Verkehrsgesellschaft Frankfurt (VGF) und das Straßenverkehrsamt geführte Projekt MIND+ (Multimodal – Intelligent – Nachhaltig – Digital) im Aufbau. Eine Besonderheit dieses Projektes ist die Verknüpfung mit dem „Digital Train Control System Frankfurt“ und vereint somit den Aufbau eines zentralen Verkehrsrechners, der Entwicklung einer Verkehrsdatenplattform unter Berücksichtigung eines „umweltsensitiven Verkehrsmanagements“ und der ÖPNV-Priorisierung miteinander. Forschungsergebnisse dieses Projektes können später Einfluss auf die Entscheidung für bestimmte Technologien bei der DVB haben. [Vgl. 34] [Vgl. 35]

Forschung durch das IVI in Dresden

Das IVI führt gegenwärtig Versuche zu Anwendungsfällen von V2X in Dresden durch, aktuell ausschließlich für Belange des Individualverkehrs. Diese Untersuchungen sind Bestandteile des Projekts C-ROADS Germany – Urban Nodes, das von Januar 2019 bis Dezember 2023 läuft und wiederum Teil eines europäischen Projektes zur Erprobung von ITS-Technologien ist. [Vgl. 36] Nach und nach werden dabei weitere Funktionalitäten in das Gesamtsystem integriert. Dazu gehören die Verkehrsdatenerfassung, die Detektion von Rettungsfahrzeugen, das „Green Light Optimal Speed Advisory“ (GLOSA - eine Geschwindigkeitsempfehlung für das Erreichen von Grünphasen), „Traffic Signal Priority Request“ (Bevorzugung bestimmter Verkehrsmittel an den LSA) und die „Vulnerable Road User Protection“ (der Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer durch Warnmeldungen in den Fahrzeugen). Dafür wurden bereits an zahlreichen Knoten im Innenstadtbereich RSUs installiert. [Vgl. 37] In Abbildung 9 (S. 30) ist ein Überblick über alle Anlagen im Stadtgebiet zu sehen. Am Knoten Zellscher Weg/Ackermannstraße befindet sich dabei die erste „Smart Intersection“ der Stadt, an der eine Vielzahl weiterer Verkehrsdaten erfasst werden kann (Vgl. 3.6.1) [38].

Mittelfristig erscheint eine Zusammenarbeit in dieser Thematik zwischen DVB und IVI sinnvoll.

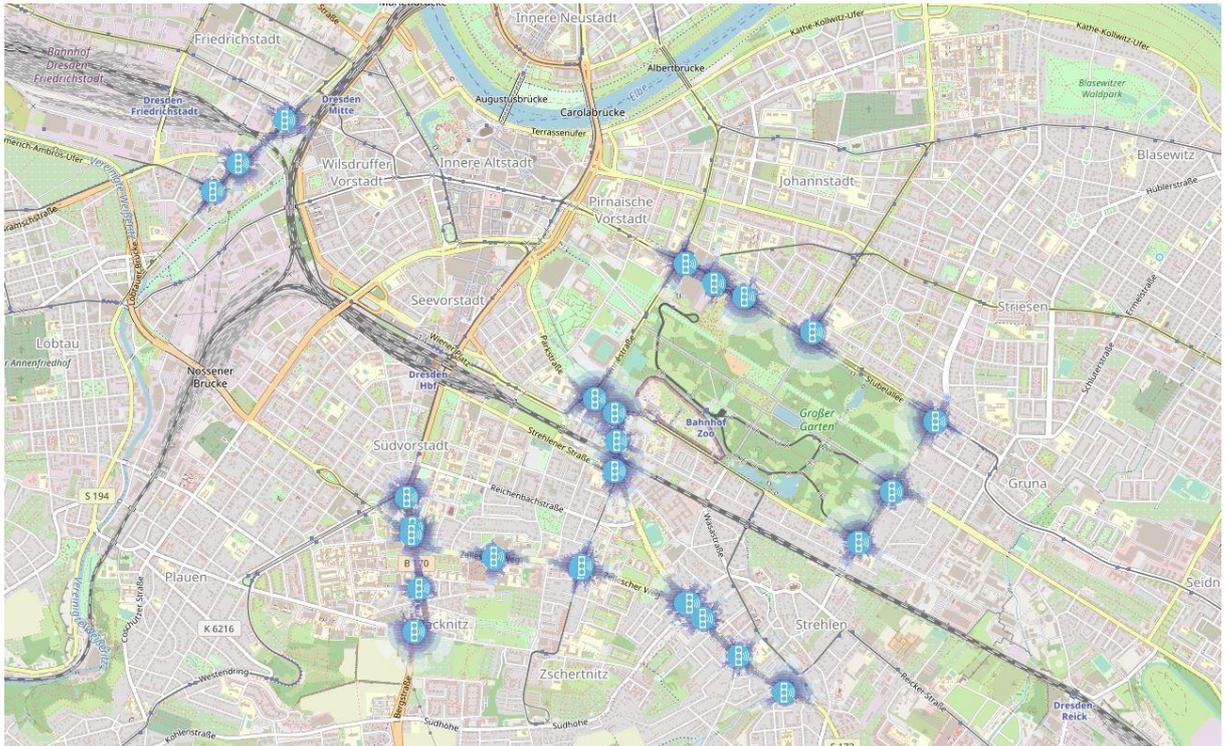


Abbildung 9: Standorte von RSU-Einheiten im Testfeld Dresden

Rail2X

Im Rahmen von Bemühungen zur weiteren Digitalisierung gibt es auf dem Netz der Erzgebirgsbahn auf der nicht im Personenverkehr bedienten Strecke zwischen Schwarzenberg und Pockau-Lengefeld ein erstes Testfeld zu Anwendungen im Rahmen von Rail2X. Im Wesentlichen wurden 3 Anwendungsfälle untersucht: Service und Diagnose an der Weiche, Annäherungsermittlung am Bahnübergang und Tasteranforderung am Bedarfshalt an Haltepunkten. Die hier erlangten Projektergebnisse sind zum Teil auch für den Straßenbahnbetrieb der DVB von Interesse. [Vgl. 39] Potentielle Anwendungsmöglichkeiten werden unter 4.4.2 genauer vorgestellt.

3.4 Kriterien für den Einsatz im Stadtgebiet

3.4.1 Leistungskriterien

Leistungskriterien sind quantifizierbare (messbare) Anforderungen an ein System, folgend werden die für V2X und die DVB relevanten Kriterien vorgestellt.

Latenz

Die Latenz beschreibt den zeitlichen Versatz zwischen Aussendung eines Signals durch die Bordtechnik im Fahrzeug und die Verarbeitung der Information durch die Anlage. Die Gesamtlatenz ist dabei die Summe der Zeitdifferenzen zwischen Aussendung des Telegrammes vom Fahrzeug und der Verarbeitung der Information in der Verkehrssteuerung in die eine Informationsrichtung und die Rückkopplung von der Anlage zur Empfangseinheit im Fahrzeug gleichermaßen. [Vgl. 25, S. 31] Bei der reinen Nutzung von V2X als Anforderungsmethode des ÖPNV und der langfristigen Kommunikation mit weiteren Verkehrsmitteln sind die Ansprüche an die Latenz geringer als bei sicherheitsrelevanter Nutzung (Abstandsregelungen, Gefahrenerkennung etc.). Anspruch der DVB an die künftig eingesetzte technische Lösung ist eine Latenz, die so gering ist, dass relevante Telegrammdaten noch rechtzeitig durch den Verkehrsrechner (dezentrale Lösung, Vgl. 3.4.4) oder die lokale Steueranlage (zentrale Lösung, Vgl. 3.4.5) ausgewertet und bearbeitet werden können. Die Latenzzeiten sollen dabei konkurrenzfähig zum bisherigen Analogfunk sein und im Bereich von wenigen Millisekunden liegen.⁷ Die Gesamtlatenz bis zur Rückinformation des Fahrpersonals ist zweitrangig, da diese den eigentlichen Verkehrsablauf nur indirekt beeinflusst, sollte dennoch so gering sein, dass das Personal noch Informationen (bspw. Geschwindigkeitsprognosen) zu vorausliegenden Anlagen erhalten kann.

Reichweite

Wichtig bei der Auswahl einer geeigneten V2X-Technologie ist die Reichweite der Signale. So muss auch bei einer Fahrgeschwindigkeit von bis zu 70km/h und langen Abschnitten auf freier Strecke im Dresdner Umland sichergestellt werden, dass eine Anforderung an gesicherten Bahnübergängen verlustfrei übermittelt wird, da hohe Fahrgeschwindigkeiten diese langen Anforderungswege bedingen. Zwischen den

⁷ Dieser Wert orientiert sich zunächst am Status Quo des Bake-Funk-Systems (Vgl. 2.2.1)

Haltestellen Coswig, Salzstraße und Coswig, Rathaus entlang der Linie 4 liegen zwei signalisierte und ein nicht signalisierter Bahnübergang, sowie eine Entfernung von etwa 1000m. Eine mit 70km/h fahrende Bahn hat bei einer anzunehmenden Bremsverzögerung von 1m/s^2 einen Bremsweg von knapp 200m. Ein Abbild über die Situation in Coswig findet sich in Anlage 5.

Im innerstädtischen Bereich mit hoher Dichte an lichtsignalgeregelten Verkehrsknoten sind Anforderungen an die Reichweite geringer. Es bieten sich folglich auch hybride, bzw. kombinierte Lösungen zwischen Stadt und Land an, um den Umrüstaufwand so gering wie möglich zu halten.

Zuverlässigkeit

Die Wahrscheinlichkeit, mit der empfangene Telegramme korrekt ausgewertet werden, wird als Zuverlässigkeit definiert. [Vgl. 25, S. 30] Die Zuverlässigkeit ist für eine reibungsfreie Kommunikation mit der Infrastruktur fundamental wichtig. Je niedriger die Frequenz ist, mit der Datentelegramme ausgesendet werden, desto höher muss die Zuverlässigkeit sein, da der Datenverlust durch fehlerhafte Telegramme zunimmt. Damit nimmt mit steigender Anzahl der Partizipanten im V2X-Netzwerk die Anforderung an die Zuverlässigkeit zu. Bei der bidirektionalen Kommunikation ist dabei die Zuverlässigkeit in Richtung der Infrastruktur gewichtiger zu bewerten als die Rückkopplung zum Fahrpersonal bzw. Fahrzeug, da der Rückweg weniger funktionsrelevant ist. Grundsätzlich sollte die Zuverlässigkeit bei deutlich über 90% liegen, wie in Tabelle 1 (S. 34) zu erkennen ist.

Verbindungsichte

Die Verbindungsichte sagt aus, wie viele Verbindungen zwischen den verschiedenen Komponenten innerhalb einer bestimmten Fläche zustande kommen können und hängt somit maßgeblich mit der Zuverlässigkeit zusammen: [Vgl. 25, S. 32] Je höher die Auslastung eines Knotens, desto höher auch die Wahrscheinlichkeit, dass Datenpakete kollidieren und nicht mehr korrekt ausgelesen werden können. In der ersten Phase der Einführung spielt dieses Kriterium aufgrund der geringen Anzahl an Teilnehmern im Netzwerk zunächst eine untergeordnete Rolle. Kommunizieren auf langfristige Sicht zunehmend mehr Verkehrsteilnehmer untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur, werden die

Empfangseinheiten stärker belastet. Vor Allem im Bereich des Innenstadtrings mit hoher LSA-Dichte ist eine enorme, momentan nicht näher abzuschätzende Menge an Verbindungen zu erwarten, da hier verstärkt der Effekt auftritt, dass RSU zunächst Telegramme empfangen und decodieren, die für ein weiter entferntes Ziel bestimmt sind. Dadurch erhöhen sich Latenzen und durch eine Kollision von ankommenden Telegrammen ist eine Abnahme der Zuverlässigkeit zu erwarten. Schlussfolgernd sollte bei der technischen Umsetzung von V2X auf eine hohe Verarbeitungskapazität der RSU und auch einer eventuell dezentral angebotenen Verkehrszentrale gesetzt und dabei Möglichkeiten für eine langfristige Steigerung der Kapazität geschaffen werden (beispielsweise durch einen modularen Aufbau, der Erweiterungen ermöglicht).

Abdeckung

Eine grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche Kommunikation zwischen den Systemkomponenten ist die Abdeckung, das „Zustandekommen eines Verbindungsaufbaus“ [25, S. 31]. Je nach umgesetzter Technologie bezieht sich dies auf das Vorhandensein von Kabelinfrastruktur, Abdeckung mit 5G und/oder WLAN. Vor Einführung der Technologie muss sichergestellt werden, dass die Kommunikation jederzeit möglich ist. Die von IVI erwähnte „High-Speed-Unterstützung“ ist im innerstädtischen Raum irrelevant, da durch den ÖPNV in der Stadt Dresden ausschließlich Geschwindigkeiten unter 100km/h gefahren werden.

Das Institute of Electrical Engineers (IEEE) hat ermittelt, welche Anforderungen an einzelne Leistungskriterien in Abhängigkeit von verschiedenen Umsetzungsstufen von V2X zu stellen sind. Für die DVB ist zunächst der Anwendungsfall „Vehicle Platooning“ von Interesse, der den Aufbau eines Fahrzeugkommunikationsnetzwerkes beschreibt. In Tabelle 1 (S. 34) kann abgelesen werden, welche Zielgrößen für Latenzen (Latency), Datenpaketgrößen (Payload Size) Zuverlässigkeit (Reliability), Datenraten (Data Rate) und Reichweiten (Min. Range) durch das IEEE empfohlen werden.

Tabelle 1: Anforderung an die Leistungskriterien verschiedener Stufen des automatisierten Fahrens [40, S. 70172]

Use Case Group	Max. Latency (msec)	Payload Size (Bytes)	Reliability (%)	Data Rate (Mbps)	Min. Range (meters)
Vehicle Platooning	10 - 500	50 - 6000	90 - 99.99	50 - 65	80 - 350
Advanced Driving	3 - 100	300 - 12000	90 - 99.999	10 - 50	360 - 500
Extended Sensors	3 - 100	1600	90 - 99.999	10 - 1000	50 - 1000
Remote Driving	5	-	99.999	UL: 25 DL: 1	-

3.4.2 Funktionskriterien

Im Gegensatz zu den Leistungskriterien sind die funktionalen Kriterien nicht direkt messbar, sondern beschreiben jeweils, inwiefern eine konkrete technische Anforderung im verwendeten V2X-System vorhanden soll.

IT-Sicherheit und Redundanz

Die DVB ist als Verkehrsunternehmen Teil der kritischen Infrastruktur („KRITIS“)⁸ und ist damit zuständig für die Versorgung der Bevölkerung mit Verkehrsdienstleistungen. Es ist daher unbedingt zu gewährleisten, dass die umgesetzte V2X-Technologie nach außen hin abgeschlossen ist und nur durch den ÖPNV an sich genutzt werden kann. Ein Eingriff in das IT-Netzwerk der Verkehrszentrale, der lokalen Verkehrssteuerung oder des Bordsystems kann einen Ausfall der gesamten Nahverkehrssysteme zur Folge haben und ist daher zwingend auszuschließen. Zum Einsatz kommende Sicherheitslösungen müssen damit einhergehend auch eine rechtssichere Grundlage haben, um im Zweifel Haftbarkeiten feststellen zu können. Im Rahmen der Testphase sollte für die mittel- und langfristige Ausdehnung von V2X eine zukunftsfähige Lösung gefunden werden.

Auch im Fall eines Stromausfalles oder einer kurzzeitigen Unterbrechung des Netzes muss gewährleistet werden, dass das System funktioniert, bzw. redundant konstruierte Systeme Unfälle und sicherheitskritische Verkehrsbehinderungen ausschließen. Redundanz ist dabei an allen Stellen des Systems notwendig. Ein

⁸ Vgl. §3 Absatz 3 Satz 1 BSI-Kritisverordnung vom 22. April 2016 (BGBl. I S. 958), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 6. September 2021 (BGBl. I S. 4163) geändert worden ist

Ausfall einer einzelnen Komponente (sowohl Hard- als auch softwareseitig) darf nicht zum System-Black-Out führen. [Vgl. 41, S. 5]

Anbindung an die Verkehrsinfrastruktur

Die Ausstattung aller städtischen Verkehrsknoten mit RoadSideEquipment (RSE), bzw. die Verknüpfung mit einer dezentralen Verkehrszentrale ist für die Anforderungen des ÖPNV obligatorisch und Kern der Sache. Nur wenn mittelfristig alle Anlagen angebunden werden können, kann der Analogfunk als Anforderungstechnologie abgelöst werden und eine optimale Verkehrssteuerung ermöglicht werden. Wünschenswert ist hierbei auch eine Lösung für die Anbindung an Baustellen- bzw. temporäre LSA.

3.4.3 Entwicklungskriterien

Die Entwicklungskriterien beziehen sich insbesondere auf (betriebs-)wirtschaftliche Faktoren und thematisieren die Standardisierung und weitere Elemente des Marktes. [Vgl. 25, S. 32] Auf kurzfristige Sicht sind sie dabei wenig relevant, da sich entsprechende Entwicklungen auf mittel- und langfristige Sicht aus den Ergebnissen eines Testfeldes ergeben.

Standardisierung

Im Rahmen der intelligenten Verkehrssteuerung und Vernetzung der Verkehrsmittel als Teil des Verkehrsmanagement ist es für eine landes-, europa- und bestenfalls weltweite Kooperation sinnvoll, auf einen einheitlichen Standard der Technologien und deren Schnittstellen zu setzen, sowohl hardware-, als auch softwareseitig. Dies erleichtert einen Erfahrungsaustausch zwischen verschiedenen Unternehmen und die Einsetzbarkeit der Verkehrsmittel über bestimmte räumliche Grenzen hinaus. So kann ein erheblicher Qualitätsgewinn für Fahrgäste und Betrieb erreicht werden, wenn auch bei notwendigen Einsätzen von Fahrzeugen aus Fremdunternehmen (bspw. großräumiger Schienenersatzverkehr im Baustellen- oder Havariefall) eine Kommunikation der Fahrzeuge mit der Verkehrsinfrastruktur und die Möglichkeit zur Anforderung an allen LSA im Stadtgebiet gegeben ist. Eine standardisierte Lösung ermöglicht zudem, ohne großen Mehraufwand auch andere betriebliche Fahrzeuge der DVB in das System zu integrieren, bspw. Verkehrsdispatcher, Entstör- und Baustellenfahrzeuge.

Reife

Da es bislang keine großräumigen Untersuchungen und Tests einer vernetzten Verkehrssteuerung über alle straßengebundenen Verkehrsmittel hinweg gibt, existiert auch noch keine ausgereifte Systemlösung. Die DVB wird zunächst somit ein weniger ausgereiftes System einführen. Deshalb ist es wichtig, während der Einführung der neuen Technologie auch an erprobten Rückfallebenen festzuhalten und den Systemwechsel schrittweise zu vollziehen. Somit ist die Reife der Technologie an sich weniger relevant für das Unternehmen, wichtig ist, dass die Technologien grundsätzlich umsetzbar sind.

Entwicklungspotential

Da das Entwicklungspotential insgesamt bei allen Technologien noch sehr hoch ist (insbesondere bei der Leistungsfähigkeit), ist dies an sich kein relevantes Kriterium.

Weitere vom IVI erwähnten Entwicklungskriterien spielen für die DVB im Rahmen der Einführung keine Rolle und werden in diesem Kapitel nicht weiter betrachtet.

3.4.4 weitere spezifische Kriterien

Aufwand der Umrüstung

Ein zusätzliches Kriterium, das in der iV2X Dokumentation nicht direkt erwähnt wird, aber für einen kommunalen Verkehrsbetrieb wie der DVB aus wirtschaftlicher Sicht relevant ist, ist der Aufwand der Umrüstung. Im Gesamtprojekt werden zahlreiche Akteure der Verkehrsbetriebe, der Verkehrstechnik und der Verwaltung beteiligt sein, zwischen denen Abstimmungen notwendig sind. Es ist dabei zu beachten, dass auch Umrüstungen in Stadtgebieten notwendig sein werden, in denen kurz- und mittelfristig keine Verbesserungen im Verkehrsablauf zu erwarten sind, insbesondere an verlustzeitfreien Bahnübergängen im Überland, an schwach frequentierten Straßen am Stadtrand oder an Ausfahrten von Wendeschleifen. Die DVB und auch die städtischen Akteure sind interessiert an den Lösungen, deren Umrüstaufwand und Kosten möglichst gering sind.

Förderfähigkeit

In Zusammenhang mit dem Aufwand der Umrüstung ergibt sich auch die Forderung, dass das Projekt förderfähig ist. Da durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung in der aktuellen Förderperiode (2021 – 2027) insbesondere auch Projekte fördert, die sich mit vernetzter Mobilität befassen, ist diese Förderfähigkeit mit hoher Sicherheit unabhängig von der technischen Umsetzung gegeben. [Vgl. 42]

Flexibilität

Der tägliche Fahrbetrieb stellt weitere Anforderungen an die neu zu beschaffende Technologie. Zunächst soll die Steuerung eine hohe Flexibilität im praktischen Betrieb aufweisen. Dies impliziert, dass das Gesamtsystem auch bei Störungen und Unregelmäßigkeiten im Verkehrsablauf uneingeschränkt arbeitet. Dies stellt einen Vorteil im Vergleich zur bisherigen Analogsteuerung dar, die nur im geringen Umfang auf vorversorgte Routen für eine Beschleunigung des ÖPNV sorgt.

Dazu gehören auch komplexe Baumaßnahmen mit LSA an Stellen im Stadtgebiet, an denen sie nicht standardmäßig vorgesehen sind. Diese haben einen negativen Einfluss auf die Verkehrsqualität, da sie oftmals vorgesehen Koordinierungen durchbrechen oder Ankunftsprognosen am Folgeknoten ungenau werden. Die technische V2X-Lösung soll es ermöglichen, auch provisorische Anlagen in die Steuerung zu integrieren und ÖPNV-Fahrzeugen eine Priorisierung ermöglichen.

Ausstattung der Bordtechnik

Die V2X-Komponenten im Fahrzeug müssen über Schnittstellen verfügen, die es ermöglichen, die rückgekoppelten Informationen in geeigneter Weise über ein Display dem Fahrpersonal anzuzeigen, auch nach eigenen Konfigurationen durch das Personal. Im Sinne der Bedienfreundlichkeit sollte möglichst keine zusätzliche physische Technik in die Fahrzeuge eingebaut werden müssen (Integration OBU in Bordrechner). Es ist zudem wünschenswert, dass die Informationen über eine bestimmte Zeitdauer (bspw. einen Betriebstag) gespeichert und ausgewertet werden können, um in der Phase der Betriebseinführung die Funktionalität zu überprüfen und statistische Auswertungen durchführen zu können.

Insbesondere die Busse sind im Liniennetz täglich zahlreichen Hindernissen ausgesetzt. Dazu zählen notwendige Gefahrenbremsungen und die Fahrt durch Unebenheiten in der Fahrbahn. Dadurch werden die OBU perspektivisch großen physischen Belastungen ausgesetzt, denen sie standhalten müssen. Eine robuste Ausführung ist somit eine Grundvoraussetzung.

Nachrüstbarkeit

Die DVB ist als öffentliches Verkehrsunternehmen nicht nur interessiert an der Erhöhung der Verkehrsqualität, sondern auch an weiteren Anwendungen in Bezug auf Sicherheit, die V2X durch die Vernetzung der Verkehrsinfrastruktur bietet. Dazu gehören bspw. Fußgänger-, Fahrraderkennung beim Abbiegen und die Detektion kreuzender Einsatzfahrzeuge. Es ist daher wünschenswert, dass diese Funktionen auch noch nachträglich in der gewählten Gesamtlösung nachgerüstet werden können.

3.4.5 Wichtung der Kriterien

Zur Zusammenfassung der Relevanz der einzelnen Kriterien zeigt Tabelle 2 (S.39) eine Übersicht über alle erwähnten Kriterien nach zeitlicher Perspektive und ihre Wichtigkeit für die DVB. Mit „0“ werden Kriterien bewertet, die in der jeweiligen zeitlichen Ebene nur eingeschränkt relevant sind. Kriterien, die mit einem „+“ bewertet wurden, sollten in der technischen Lösung integriert sein, sind aber nicht grundsätzlich funktionsrelevant. Die Zielgrößen der mit „++“ gekennzeichneten Kriterien sollten in jedem Fall im Rahmen der Realisierung erreicht werden, damit das System den Anforderungen entspricht.

Basierend auf dem Abgleich der durch die DVB geforderten Kriterien bezüglich Funktion, Leistung und Entwicklung und den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten aus 3.5 wird unter 3.6 dargestellt, welcher Umrüstaufwand an den Knotenbereichen, auf freier Strecke und im Fahrzeug selbst notwendig ist

Tabelle 2: Wichtung der Kriterien nach zeitlichen Ebenen (eigene Darstellung)

Kriterium zeitliches Spektrum	kurzfristig	mittelfristig	langfristig
Leistungskriterien			
Latenz	+	++	++
Reichweite	++	++	++
Zuverlässigkeit	0	+	++
Verbindungsichte	0	+	++
Abdeckung	++	++	++
Funktionskriterien			
IT-Sicherheit und Redundanz	0	++	++
Anbindung Verkehrsinfrastruktur	+	++	++
Entwicklungskriterien			
Standardisierung	0	++	++
Reife	0	+	++
Entwicklungspotential	0	+	+
Weitere Kriterien des Verkehrsunternehmens			
Aufwand der Umrüstung	0	+	+
Förderfähigkeit	++	+	+
Flexibilität	+	++	++
Ausstattung der Bordtechnik	+	++	++
Nachrüstbarkeit	0	+	++

3.5 Arten von V2X-Lösungen

3.5.1 Varianten der Unterscheidung

Folgend werden alle grundsätzlichen Ansätze zur Verwirklichung von V2X-Technologien vorgestellt. Die Arten werden dabei auf zwei Weisen betrachtet. Zunächst werden im Rahmen der technischen Umsetzungsoptionen die WLAN-V2X, Cellular-V2X und Backend-V2X-Technologien vorgestellt. Aufbauend darauf gibt es die Möglichkeit, die Berechnungen zentral über ein Verkehrsmanagementsystem laufen zu lassen oder den Prozess dezentral an den Knoten zu steuern, bzw. eine Kombination aus diesen Optionen zu schaffen. [Vgl. 25, S. 25-29] [Vgl. 43, S. 22-25] Abbildung 10 (S. 40) zeigt eine Übersicht dieser Untergliederung

Für die Informationsübertragung sind – unabhängig von der umgesetzten Variante – verschiedene Telegrammtypen notwendig, die durch das ETSI definiert wurden. Diese werden am Ende des Abschnittes vorgestellt.

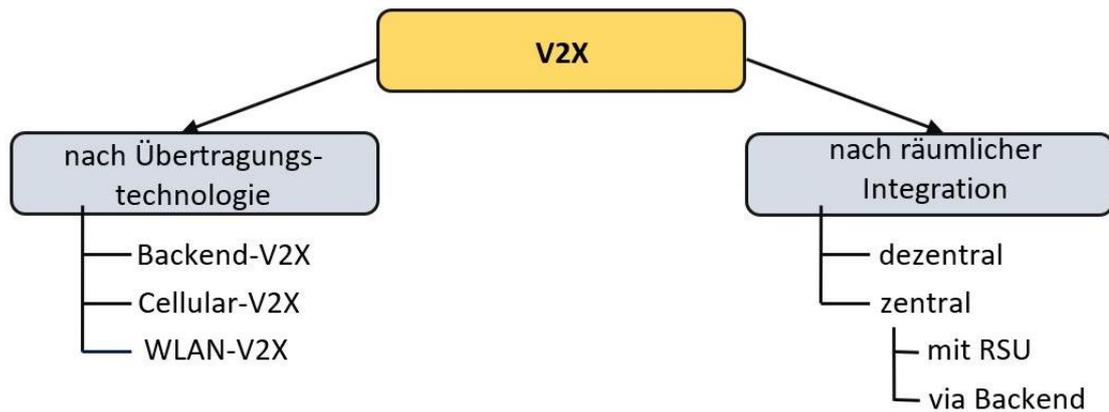


Abbildung 10: Untergliederung V2X (eigene Darstellung)

3.5.2 Backend V2X

Backend V2X beschreibt die Variante der Nutzung der existierenden Telekommunikationsinfrastruktur für V2X-Anwendungen. Die Ausstattung von Fahrzeugen mit Mobilfunktechnologie nimmt stetig zu und ermöglicht bereits jetzt einen Datenaustausch zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen im Uplink (Datenfluss von Fahrzeug zur Infrastruktur) und Downlink (Datenfluss zwischen Infrastruktur und Fahrzeug). Grundlage ist dabei nicht eine konkrete, sondern die Gesamtheit der parallel verfügbaren Mobilfunkstandards. Die Abdeckung mit dem neuesten Standard 5G (perspektivisch auch das noch leistungsfähigere 6G, an dessen Erforschung unter anderem die TU Dresden beteiligt ist [Vgl. 44]), nimmt rasant zu, LTE ist gerade im urbanen Raum weitverbreitet verfügbar. [Vgl. 25, S. 26-27]

3.5.3 Cellular V2X

Cellular V2X kann als eine Weiterentwicklung aufbauend auf Backend-V2X angesehen werden. Mit der sogenannten „5G New Radio air interface“, einer erst Ende 2019 neudefinierten Luft-Schnittstelle – dem „sidelink“ – werden das Spektrum der sicherheitsrelevanten V2X-Anwendungen erweitert, da dadurch Informationen zwischen einzelnen Fahrzeugen und einzelner Infrastruktur ermöglicht wird [Vgl. 45, S. 1]. Der englische Begriff „cellular“, also „zellulär“ bedeutet, dass der Datenaustausch über ein großes Datennetzwerk entsprechend einem Cloudsystem funktioniert, sogenannte Funkzellen bauen sich auf. Durch die Weiterleitung von Informationen zwischen den Fahrzeugen entstehen dabei einmalige Verbindungsketten, sogenannte ad-hoc-Netzwerke und eine Kommunikation über eine Fahrzeugkolonne (auch ÖPNV), der sogenannte „Groupcast“ ist möglich. Die

Kommunikation aller Teilnehmer im lokalen Netzwerk wird als Broadcast bezeichnet. (siehe Abbildung 11). Die enorme Menge an Daten, die langfristig durch die Luft übertragen werden, bedingt die Anwendung von 5G mit dem bis zu 10 Gigabit an Daten pro Sekunde übermittelt werden können. [Vgl. 46]

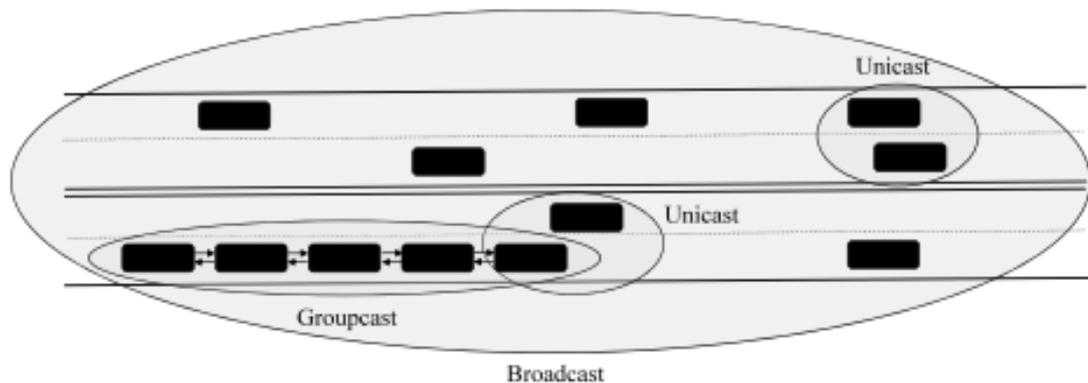


Abbildung 11: Die Kommunikationsebenen von C-V2X [40, S. 70177]

Durch die Bindung an und Abhängigkeit von Mobilfunkbetreibern ist es zwar auch möglich, dass Fahrzeuge direkt mit dem Mobilfunknetz kommunizieren, es entstehen allerdings Konflikte vornehmlich bei der Datenverbindung zwischen Endgeräten, die an Mobilfunknetze verschiedener Anbieter gekoppelt sind. Durch die hohe Netzabdeckung ist die Zuverlässigkeit an sich dabei als hoch zu bewerten.

Bislang gibt es keine großen, durch die öffentliche Hand finanzierte Testfelder, in dem ein Cellular-V2X für den ÖPNV erprobt wurde.⁹ Dadurch ist der Stand der Standardisierung bei dieser Technologievariante kaum ausgeprägt und auch sicherheitskritische Fragen, besonders in Bezug an die Anforderungen an ein Unternehmen der kritischen Infrastruktur, sind gegenwärtig noch ungeklärt. Dafür besitzt diese Technologie eine hohe Dynamik bei der Entwicklung und bietet hohes Potential auf mittel- und langfristige Sicht.

3.5.4 WLAN-V2X

Dieser Lösungsansatz basiert auf dem 802.11p Standard des IEEE, der darauf abzielt, die WLAN-Technologie für die Kommunikation zwischen den Teilnehmern/Komponenten auf kurzen Distanzen im Straßenverkehr zu etablieren. Bezeichnet wird diese Technologie zum einen als WLANp, zum anderen durch das

⁹ In keinem der unter 3.2 aufgeführten Testfelder wurde C-V2X erprobt

ETSI als ITS-G5. Ein Anwendungsfall dieser Technologie ist die Nahbereichskommunikation, bzw. DSRC. [Vgl. 25, S. 25]

Wie bei der gegenwärtig verwendete Analogfunktechnologie sind die Reichweiten folglich eingeschränkt und auf den Nahbereich reduziert. Die Reichweite, bei der noch eine akzeptable Empfangsqualität zu messen ist, beträgt etwa 300 Meter. Dies zeigten bereits einige praktische Versuche. Dazu zählen mehrere hundert Testläufe mit 16 mit OBU ausgestatteten Gelenkbussen im Rahmen des KoMoD-Testfeldes, bei denen insbesondere beim Überqueren der zum Testgebiet gehörenden knapp 400m langen Kniebrücke über den Rhein erhebliche Einbrüche der Empfangsqualität gab. Auch im C-Roads Testfeld Dresden (Vgl. 3.3) konnten Reichweiten zwischen 265m und 360m gemessen werden (siehe Abbildung 12). Dies geschah durch Messfahrten mit einem BMW i3, der mit einer OBU ausgestattet wurde und Fahrten entlang von Knotenstrecken, die mit RSU ausgestattet sind (Stübelallee, Testfeld rund um den Flughafen Dresden), unternahm. [Vgl. 47, S. 7]



Abbildung 12: durch das IVI ermittelte RSU-Reichweiten am Comeniusplatz [47, S. 8]

3.5.5 dezentrale LSA-Zustandsermittlung und Priorisierung

Kern einer dezentralen Lösung ist der direkte Datenaustausch zwischen OBU im Fahrzeug und RSU an der Lichtsignalanlage. Die Datenverarbeitung und Signalphasenberechnung erfolgen damit direkt am Knoten und weist kurze Latenzzeiten auf, der Umrüstaufwand ist gering. Alle Informationen, die im

Knotenumfeld ausgesendet werden, können verarbeitet werden. Auf Echtzeitverkehrsdaten einer zentralen Mobilitätsdatenplattform kann dabei nicht zugegriffen werden, Flexibilität, Entwicklungspotential und Leistungsfähigkeit sind gering. [Vgl. 43, S. 31] In Abbildung 13 ist die dezentrale Anforderung schematisch dargestellt.

Praktische Umsetzungen gab es unter anderem bei KoMoD und VERONIKA.



Abbildung 13: dezentrale Lösung (eigene Darstellung)

3.5.6 Zentrale Zustandsermittlung und Priorisierung

Bei der Umsetzung einer zentralen Anforderungsvariante wird die Berechnung der Signalphasen inklusive der Entscheidung über Bevorrechtigungen von Fahrzeugen in einer Verkehrsmanagementzentrale (VMZ) durchgeführt und anschließend an die LSA-Steuerung übermittelt. Vorteil der VMZ ist, dass dort alle Backendinformationen gebündelt und ausgewertet werden können, da die Server in den Zentralen über entsprechende Rechenleistungen verfügen und eine Mobilitätsdatenbank integriert werden kann. [Vgl. 43, S. 30] Diese Variante wurde unter anderem im Rahmen des Projektes BiDiMoVe angewendet und als WLAN-V2X umgesetzt. Bei KoMoD wurde zur Datenübertragung an die Zentrale Mobilfunk verwendet, also eine Backend-V2X-Variante umgesetzt. Diese Lösung ist in Abbildung 14 (S. 44) dargestellt.

Es ist auch eine Umsetzungsvariante möglich, bei der die Anforderung zuerst vom Fahrzeug an das Betriebsleitsystem des Verkehrsunternehmens (zB DVB) oder andere Backendsysteme gesendet wird und von dort eine Anforderungsanfrage an die Zentrale geschickt wird. RSU werden dabei nicht verwendet. [Vgl. 43, S. 29] Ein Schema dieser Lösung findet sich in Abbildung 15 (S. 44).

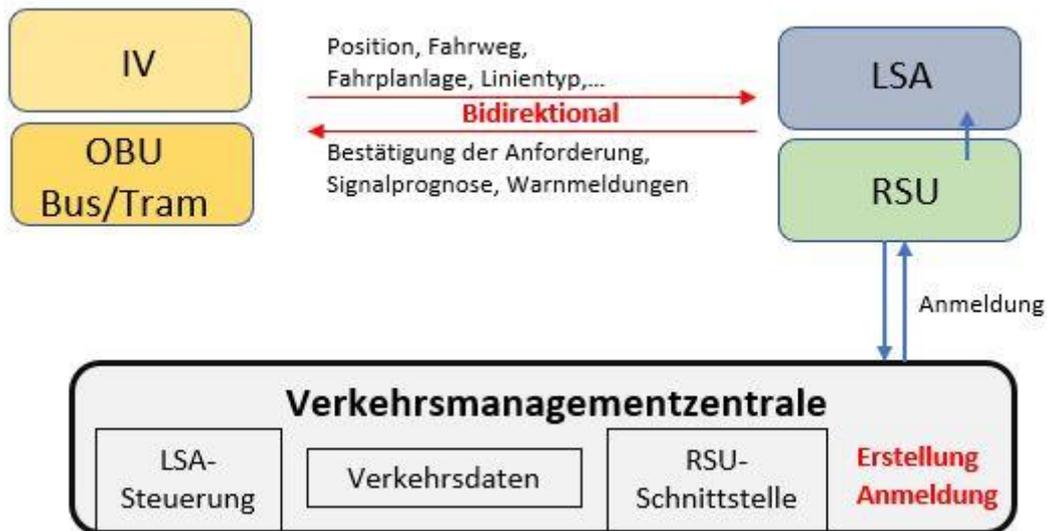


Abbildung 14: zentrale Lösung mit RSU-Einbindung (eigene Darstellung)

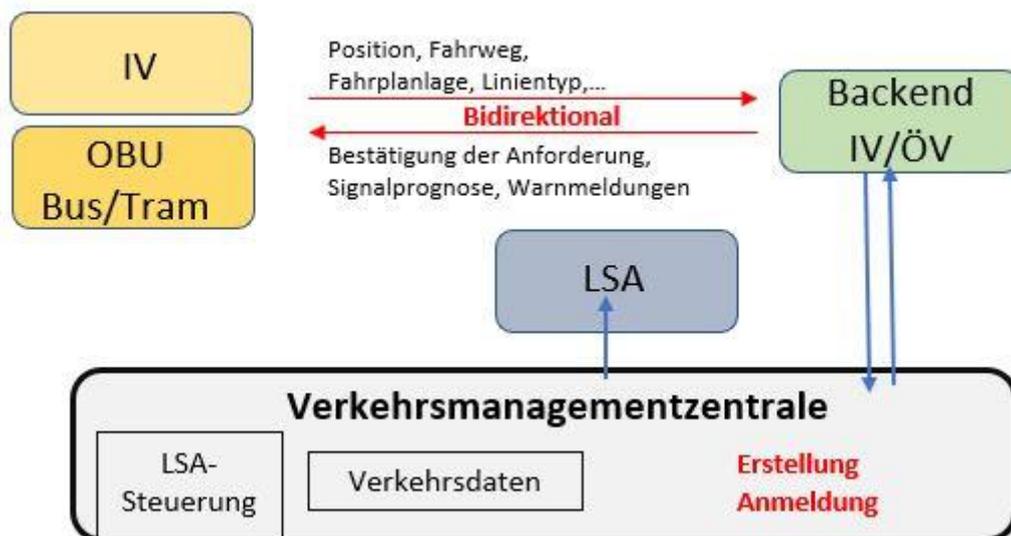


Abbildung 15: zentrale Lösung, Backendsystem (eigene Darstellung)

3.5.7 Telegrammtypen

Es folgt eine Darstellung der im Rahmen von ITS verwendeten Telegrammtypen. Definiert werden diese an verschiedenen Stellen durch das ETSI. In CEN ISO/TS 19091 wird auf Europäischer Ebene genormt, welche Informationen durch das RSE und die Bordtechnik der Fahrzeuge in welchen Anwendungsfällen und in welcher Reihenfolge zur Verfügung gestellt werden sollen, um Anforderungen an den Knoten effizient zu bearbeiten, darunter beispielsweise der Anwendungsfall, dass zu priorisierender ÖPNV auf einen Streckenabschnitt mit einer Reihe an

signalisierten Kreuzungen fährt. [48] Die Vielzahl der Telegramme und der darin darstellbaren Informationen übersteigt deutlich die Leistungsfähigkeit der aktuell verwendeten R09.16 Telegramme (Vgl. 2.2).

CAM

„Cooperative Awareness Messages“ (CAM) können für den Verkehrsbetrieb als eine Zwischenstufe zwischen gegenwärtig verwendeten R09.16 Telegrammen und den für V2X vorgesehene SREM/SSEM Telegramme (siehe folgender Absatz) angesehen werden. Der Inhalt wurde im ETSI Papier ETSI EN 302 637-2 aus 2014 definiert. [49] Jede CAM besteht im Gegensatz zu den Analogfunktelegrammen aus verschiedenen Containern. Im „special vehicle container“ kann definiert werden, dass es sich um ein ÖPNV-Fahrzeug handelt. In diesem Container können die R09.16 Telegramme integriert werden. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass kein softwareseitiger Umrüstaufwand vorhanden ist, und Qualitätsmanagementtools wie urbic® weiterhin verwendet werden können. Außerdem gibt es Container, für Parameter, die sich ständig ändern (high-frequency-Container) und einen, für Parameter, die für das Fahrzeug konstant sind (low-frequency-Container). Insgesamt können somit deutlich mehr Informationen als durch die R09 Telegramme übertragen werden – insbesondere sicherheitsrelevante Informationen. Die informatische Syntax und die Gruppierung von Parameterwerten wurde unter anderem in ETSI TS 102 894-2 dargelegt. [50] Der schematische Aufbau einer CAM ist in Abbildung 16, S.46 zu sehen.

Da dabei weiterhin die R09-Telegramme verwendet werden können, gibt es somit zunächst eine zukunftsfähige Lösung zur Abschaltung der Analogfunkfrequenzen, die DVB kann aber noch nicht von einer potenziellen Verbesserung der Verkehrsqualität an den Knoten profitieren, da weiterhin nur eine meldepunktabhängige Anforderung möglich ist.

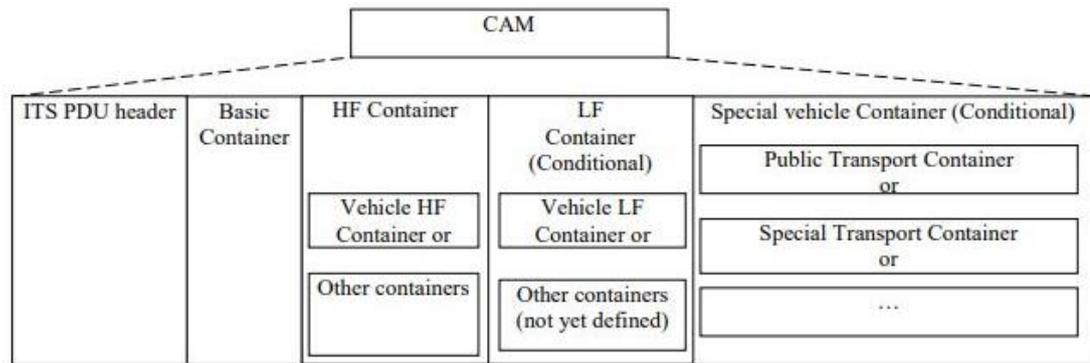


Abbildung 16: schematischer Aufbau eines CAM-Telegrammes [49, S. 21]

SREM/SSEM

„Signal Request Extended Messages“ (SREM) sind vorgesehen, um Parameter vom Fahrzeug zur Infrastruktur zu schicken. Die Antwort der Anfrage (Annahme oder Verweigerung der Anforderung) wird dann als „Signal Response Extended Message“ (SSEM) gesendet. Durch das ETSI werden diese Nachrichtentypen als Standard zur Anforderung an Lichtsignalanlagen empfohlen. Diese Telegramme überschreiten weit die Leistungsfähigkeit der R09.16-Telegramme und können neben Fahrplanlage, Fahrtziel, Linie, Kurs und Fahrplanlage viele weitere Parameter übermitteln, unter anderem die tatsächliche Geschwindigkeit, die Priorität des Verkehrsmittels und die Priorisierung innerhalb des Liniennetzes (zum Beispiel Straßenbahn gegenüber Quartierbus). [Vgl. 47, S. 4-5]

SPaT

Durch die Signal Phase and Timing (SPaT) Telegramme werden die Signalphasen und die erwarteten Schaltzeiten durch die RSU übermittelt. Dieser Nachrichtentyp bildet damit die Grundlage für weitere Anwendungen wie GLOSA und ist damit notwendig, um dem Fahrzeuge (und damit auch dem Personal) eine Information darüber zu geben, wann [Vgl. 51, S. 8]

MAP

Das MAP-Telegramm, welches durch die RSU an den Knoten gesendet und durch die OBU empfangen wird, beinhaltet die Knotenpunkttopografie mit allen Fahrstreifen und Fahrspuren, den Beziehungen zwischen den einzelnen Knotenpunktobjekten und die möglichen Fahrrelationen. Auf Basis dieses Telegrammtyps kann die kartenbasierte Darstellung in den OBU erfolgen. Damit

gibt es sowohl für Fahrpersonal als auch Disposition eine standardisierte Kartengrundlage. Insbesondere bei störungsbedingt abweichenden Linienwegen erleichtert sich dadurch die Kommunikation von Linienänderungen. [Vgl. 51, S. 9]

CPM

Die „Collective Perception Message“ ist ein erst 2019 durch das ETSI im Technical Report ETSI TR 103 562 definierter Nachrichtentyp. [30] Er wird speziell verwendet für die an hochtechnisierten Verkehrsknoten gesammelten Informationen der Sensoren und Detektoren. Da die Nachricht ausschließlich Informationen über eine konkrete Kreuzung beinhaltet, sind keine großen Reichweiten zu überbrücken. Auch dieser Nachrichtentyp besitzt einen Containeraufbau (siehe Abbildung 17). Da die CPM Informationen über Fußgänger und/oder Radfahrer im Kreuzungsbereich übermitteln, erfüllen sie sicherheitsrelevante Aufgaben. Die Daten werden als Mapdaten übermittelt und beinhalten unter anderem Geschwindigkeiten, Positionen, Abbiegewinkel und Größen der Objekte. Insbesondere für abbiegende Busse wird somit eine zusätzliche Möglichkeit der präventiven Unfallvermeidung eröffnet.

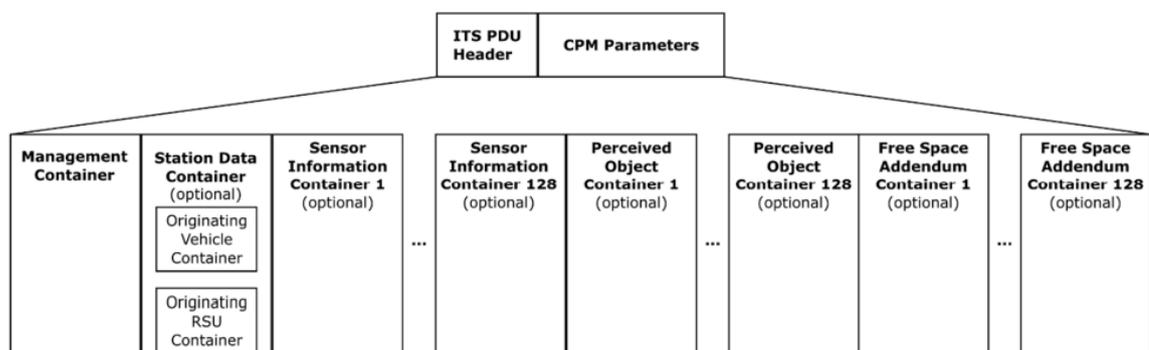


Abbildung 17: schematischer Aufbau eines CPM-Telegrammes [30, S. 58]

DENM

Durch die Dezentralized Environmental Notification Message (DENM) werden sicherheitsrelevante Informationen hochfrequent ausgesendet und Warn- und Verkehrsdaten zwischen den Verkehrsteilnehmern und der Straßeninfrastruktur ausgetauscht. Definiert ist der Inhalt dieser Nachricht durch das ETSI in der EN 302 637-3 Part 3. [52] Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Typen von DENM-Nachrichten. Neue DENM-Nachrichten informieren über das erstmalige Auftreten eines Events. Änderungen bezüglich des erstgemeldeten Zustandes werden durch

die Update-DENM übermittelt. Ist ein Ereignis nicht mehr aktuell oder nicht mehr aktiv, wird dies durch eine Cancellation DENM übertragen. Diese 3 Typen werden jeweils durch dieselbe Verkehrsinfrastrukturanlage übermittelt. Negotiation DENM werden verschickt, wenn sich beispielsweise die Ereignisposition verändert und in den Empfangsbereich einer anderen RSU fällt. [Vgl. 52, S. 8-18]

Wie auch die CAM besteht jede DENM aus mehreren Containern. Der Management-Container beinhaltet Informationen des Fahrzeuges, wie bspw. den Ort und Informationen des Events, der Zeit und der Fahrtrichtung. Im Situation Container wird durch die Verwendung definierter Fall-Codes das aufgetretene Event genauer beschrieben. Im Location Container wird der Ort genauer beschrieben. Er beinhaltet beispielsweise den Straßentyp. Im á la carte Container werden weitere Informationen dargestellt, die nicht schon durch anderen Container beschrieben werden konnten, beispielsweise die Spur, auf der das Event auftritt, eventuelle Bauarbeiten oder auch Temperaturen. [Vgl. 52, S. 32-33] Der Aufbau ist in Abbildung 18 dargestellt.

Die DVB kann von diesen Warnmeldungen insofern profitieren, dass vorausliegende Unfälle oder gefährliche Kreuzungssituationen durch Lieferverkehr unmittelbar an die OBU übermittelt werden. Damit kann ein „Festfahren“ in Störungen verhindert und ein frühzeitiges Eingreifen der Disposition ermöglicht werden. Die Koordination zwischen den einzelnen Komponenten im Verkehrsmanagementsystem der Stadt Dresden erfolgt dabei perspektivisch über die standardisierte OCIT®-Schnittstelle (Vgl. 3.6.4)

Weiterhin relevant ist die Schnittstellengestaltung zwischen Verkehrsmanagementzentrale und dem Datenbackend der DVB. Für eine kundenfreundliche und optimierte Steuerung

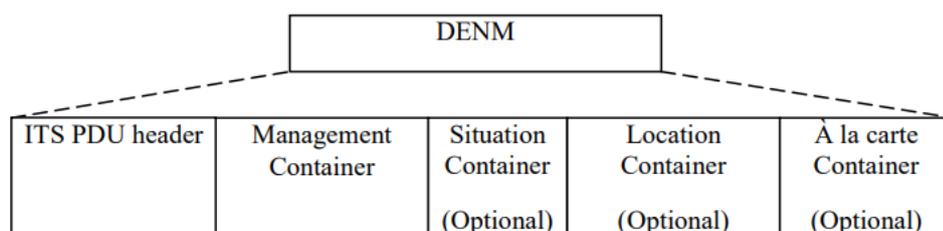


Abbildung 18: schematischer Aufbau eines DENM-Telegrammes [52, S. 31]

DSM

Ein weiterer Nachrichtentyp, der für die DVB unter Umständen von Interesse sein kann, ist die Diagnosis, Logging and Status Message, die aus Rail2X (Vgl. 3.2) heraus entstand und langfristig möglicherweise verwendet werden kann, um Zustandsinformationen der Weichen zu übermitteln und die Wartung damit zu vereinfachen und Sicherheitsrisiken zu minimieren. [Vgl. 39, S. 89-90]

3.6 Technologische Umsetzung im Stadtgebiet

3.6.1 Technik am Knoten

Wird zu Anmeldung der Fahrzeuge nicht auf ein Back-End-System zurückgegriffen (Vgl. 3.4.1) müssen an den Verkehrsknoten RSU installiert werden. Die Anschaffungskosten können pro Anlage grob mit einigen tausend Euro zuzüglich der Betriebskosten für Wartung und Energieverbrauch angegeben werden. [25, S. 60] Die Betriebskosten liegen generell höher als die des Analogfunksystems, bei dem kaum Strom verbraucht wird.

Für eine optimale Abdeckung sollte die RSU möglichst hoch und von Gebäuden/Mauern etc. unbeeinflusst hängen. Teilweise wird es notwendig sein, eigene Masten für die Technik zu installieren (siehe Abbildung 19, S. 50).

Werden hochbelastete Knoten perspektivisch zu Smart Intersections (Vgl. 3.2) upgradet, muss weitere Technik installiert werden – auch in Vorbereitung auf weitere Stufen des autonomen Fahrens. Dazu gehören leistungsfähige Kameras, Radare und Lidare, die anhand von Algorithmen feststellen können, um welchen Typ Verkehrsmittel es sich bei einem detektierten Objekt handelt und dreidimensional auf einer virtuellen Karte widerspiegeln können [Vgl. 53]. Durch leistungsfähige Schnittstellen und Übertragungstechniken muss sichergestellt werden, dass die Latenzen der sicherheitsrelevanten Informationen gering und die Sendefrequenzen hoch sind. In Abbildung 20 (S. 50) ist die erste Smart Intersection Dresdens mit ihrem Gesamtaufbau zu sehen.



Abbildung 19: RSU-Aufbau am Comeniusplatz Dresden (eigene Aufnahme)



Abbildung 20: Smart-Intersection Zellscher Weg/Ackermannstraße (eigene Aufnahme)

Initialisierung einer PKI

Unbedingt zu vermeiden ist es, dass eine unautorisierte Kommunikation zwischen einzelnen Teilnehmern des V2X-Netzwerkes stattfindet. So darf es nicht passieren, dass ein PKW eine Busanmeldung aussendet oder manipulierte Telegramme zur Abschaltung einer Anlage führen, außerdem müssen Nachrichten innerhalb des Systems zur richtigen Zielstation geleitet werden. Dafür muss ein auf Zertifikaten basiertes Sicherheitsnetzwerk implementiert werden, die sogenannte Public Key Infrastructure (PKI). Diese Aufgabe liegt allerdings weder bei der DVB noch der Stadt Dresden, sondern fällt in die Zuständigkeit des Bundes oder der Bundesländer, denn eine PKI verfolgt prinzipiell eine strenge Hierarchie, bei der durch die Wurzelzertifizierungsstelle Zertifikate ausgegeben werden, mit denen wiederum Zertifikate an untergeordnete Stellen ausgegeben werden können. [Vgl. 54] Im Rahmen von ITS müssen sich alle beteiligten Akteure Zertifikate einholen, die sie zum Anbieten und Empfangen von V2X-Anwendungen, bzw. -Daten berechtigen. Am Ende der Kette müssen die Zertifikate in den OBU und RSU jeweils ausgewertet und geprüft werden. Entsprechende Verfahren befinden sich aktuell (2021) in der Entwicklung. [Vgl. 43, S. 138-139] Im Projekt BiDiMoVe konnte bereits eine PKI testweise zum Einsatz kommen. [Vgl. 41]

3.6.2 Technik auf der Strecke

Grundsätzlich sind auf freier Strecke im Stadtbereich keine weiteren RSU-Ausrüstungen notwendig, wenn die RSU-Abdeckung an den Knoten ausreichend ist. Für Lösungen zur Detektion von Baustellen und Störungen muss unter Umständen neue Technologie beschafft werden (Vgl. 3.7, Baustellenabsicherung).

Eine Lösung muss allerdings für Bereiche am Stadtrand, bei denen Entfernungen zwischen einzelnen RSU so groß sind, dass die Sende- und Empfangsreichweiten ausgeschöpft sind, gefunden werden. Werden zwischen den Knoten zusätzliche Strecken-RSU installiert, kann vom RSU-ad-hoc-Netzwerk profitiert werden. Ein solches Netzwerk entsteht, wenn die RSU so dicht beieinander liegen, dass eine knappe Überlagerung der Reichweiten der einzelnen Anlagen entsteht und Informationen, die nicht für die unmittelbar nächste Anlage gedacht sind, können so zwischen den Anlagen bis zum Ziel wandern („Hopping“). [Vgl. 55, S. 1-2]

Dabei sind optimale Standorte zu ermitteln, um zum einen wirtschaftlich zu arbeiten und Redundanz zu vermeiden und andererseits für eine lückenlose Abdeckung zu sorgen. Dafür wurden bereits mehrere Algorithmen entwickelt, zum Beispiel in der Publikation „*Efficient RSU Placement Schemes in Urban Vehicular Ad hoc Networks*“ [55]: Optional kann mit einem hybriden auf die Mobilfunktechnologie zurückgegriffen werden, zwei verschiedene Systeme verlangen allerdings einen erheblichen organisatorischen Mehraufwand.

3.6.3 Technik im Fahrzeug

Im Fahrzeug ist primär die Installation von OBU notwendig. Die Kosten einer einzelnen OBU liegen gegenwärtig etwa im dreistelligen Euro-Bereich [25, S. 59]. Möglicherweise kann diese Technik bereits ab Werk im Rahmen des Ausschreibungsprozesses eingebaut werden. Werden Busse und Bahnen damit nachträglich ausgestattet, ist eine Anpassung der Antennenposition notwendig, um optimale Sende- und Empfangsergebnisse zu erhalten.¹⁰

Um den Besetztgrad optimal erfassen und als weiteres Kriterium bei der Fahrzeugpriorisierung nutzen zu können, ist der Einbau neuer Fahrgastzählensysteme erforderlich, die die Besetzung und die Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeug detektieren können und fähig sind zu ermitteln, ob eventuell vorgemeldete Umstiegswünsche auch berücksichtigt wurden. Diese Informationen können dann über Schnittstellen an die OBU übermittelt werden. Bei einer Detektion stehender Fahrgäste kann dem Fahrpersonal bspw. eine Meldung über anzupassendes Brems- und Beschleunigungsverhalten via OBU übermittelt werden.

3.6.4 Technik zwischen Knoten und Managementzentrale

Festzulegen ist insbesondere, wie die Informationen zwischen den Feldgeräten an den Verkehrsknoten zur VMZ gelangen. Zur Luftübertragung kann der LTE oder 5G-Standard verwendet werden. Eine autarke, aber aufwändigere Lösung ist die Verlegung von Glasfaserkabeln im Untergrund.

Gegenwärtig sind ausschließlich die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten des Managementsystems definiert und sollten im Rahmen des

¹⁰ Insbesondere im Rahmen von KoMoD wurden umfangreiche Versuchsreihen zu optimalen Antennenpositionen durchgeführt

Projektes auch in Dresden etabliert werden. [Vgl. 43, S. 121] Standardisierte Schnittstellen werden dabei durch die verschiedenen Hersteller und Anbieter von Verkehrstechnik unterstützt. Verschiedene Schnittstellen wurden innerhalb der OCIT® Developer Group (ODG), wiederum Bestandteil der Open Traffic Systems City Association e.V. (OCA), unter der Marke OCIT® entwickelt. In der ODG sind verschiedene Signalbaufirmen organisiert. OCIT steht für: "Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems" und untergliedert sich wiederum in verschiedene Teilelemente. Zentrale Datensysteme, wie bspw. das Baustelleninformationssystem, die Verkehrsrechnerzentralen und die Managementzentrale, werden durch OCIT-C (Center to Center) miteinander verknüpft und bieten damit den Vorteil, dass alle Steueranlagen von einem Arbeitsplatz aus bedient werden können. [Vgl. 56] Die Verbindung der Verkehrsmanagementzentrale und den Feldgeräten vor Ort im Straßennetz erfolgt durch OCIT-O (OCIT-Outstations). Je nach gewähltem Übertragungsweg (bspw. Mobilfunk, Ethernet) gibt es verschiedene OCIT-O-Profile. Die Verbindung des LSA-Steuergerätes mit den Signalgebern ist durch den OCIT-LED-Standard möglich.

Die Darstellung der technischen Lösungen an den Knoten, auf der Strecke dient als Orientierung, eine finale Entscheidung für eine Technologie muss aufgrund der Komplexität und Dynamik der Thematik im Unternehmen getroffen werden. Die Umsetzung erfolgt mittelfristig in einem ausgewählten Testfeld. Die dort erworbenen Kenntnisse sind Grundlage für eine weitere Umsetzung im Stadtgebiet (Vgl. 4.2). Die großflächige Umsetzung ist weiterhin abhängig von den gebotenen Leistungen der einzelnen Unternehmen und wird im Rahmen von Ausschreibungen bestimmt.

3.7 Herausforderungen

Bei nicht-standardisierten Implementierungen eines neuen Systems gibt es nahezu immer Probleme, deren Lösung im Rahmen von Testfeldern und technischer Innovation zunächst noch gefunden werden muss. Dieser Abschnitt soll kurz aufzeigen, welche Probleme erwartbar bzw. denkbar sind und welche Lösungen denkbar sind.

Steigende Anzahl von „Kunden“ einer LSA

Fällt gegenwärtig eine LSA aus (bspw. durch lokalen Stromausfall, physische Gewalteinwirkung oder technische Defekte), läuft der Verkehr nach Maßgabe der

Verkehrszeichen am Knoten oder den Handzeichen von Verkehrspolizisten weiter. Perspektivisch steigen die Anforderungen an die LSA an und neben dem optischen Informationsweg wird die Lichtzeichenfarbe (Rot, Gelb, Grün, bzw. die Signale entsprechend der Betriebsordnung für Straßenbahnen (BoStrab)) nun auch digital übermittelt¹¹. Rechtlich wirksam ist allerdings nur der optische Weg. Das heißt, besonders bei einem streckenweise anzustrebenden autonomen Betrieb muss immer gegengecheckt werden, ob digitales und optisches Signal übereinstimmen und das System im Zweifelsfall gestoppt werden. Nicht abzusehen ist, welchen (negativen) Einfluss der Ausfall einer LSA auf den Verkehrsablauf im ÖPNV hat, wenn an die Phasenschaltung weitere qualitative Berechnungen gekoppelt sind. Es ist daher ratsam, in der Testphase auch den Störbetrieb zu simulieren.

Rückfallebene des Systems

Bislang gibt es im Rahmen der Testfelder keine belastbaren Untersuchungen zum Verhalten der V2X-Komponenten bei Systemausfall. Um den ÖPNV aufrecht erhalten zu können, müssen damit auch langfristig Rückfallebenen direkt an den Anlagen oder auf dem Übertragungsweg verbaut werden, insbesondere Schlüsselkontakte. Gerade für die noch wenig verwendete zentralenbasierte Lösung gibt es derzeit keine Notfallkonzepte. Eine Erprobung eines Systemausfalls sollte erfolgen.

Baustellenabsicherung

Für erhebliche Einschränkungen in der Betriebsqualität sorgen Baustellen, die die Leistungsfähigkeit von Verkehrsknoten reduzieren. Ist eine Baustelle vorhanden, soll diese durch die Steuerungslogik möglichst optimal berücksichtigt werden können, auch im Fall von unplanbaren Havariebaustellen. In der Stadt Hamburg lief zwischen 2018 und April 2021 ein durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördertes Projekt zur Lokalisierung von Baustellen und deren automatischer Visualisierung in Karten. Ergebnis des Projektes waren die sogenannten „Geo-Baken“, deren Warnleuchten mit Sensoren ausgestattet waren, die die GPS-Standortdaten an die Verkehrszentrale übermittelt haben. [Vgl. 57]

¹¹ Dieses Problem wurde im Rahmen einer Demonstration der Projekte des Testfeldes für automatisiertes und vernetztes Fahren (TEAF) bei den Hamburger Verkehrsanlagen im Rahmen des ITS-Weltkongresses am 14.10.2021 präsentiert.

Leistungsfähigkeit OBU

Es gibt noch keine hinreichenden Ergebnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit der OBU. In der kurzfristigen Umsetz- und Testphase sind die Anforderungen noch gering, da eine horizontale Kommunikation zwischen Fahrzeugen aufgrund der noch wenig verbreiteten Ausstattung mit OBU nur für geringe Datenmengen sorgen wird und auch die Anzahl der Telegrammdateien eher gering ist. Die praktischen Versuche im Rahmen von BiDiMove zeigten allerdings bereits auf, dass die Leistungsfähigkeit durch aufwendige Ent- und Verschlüsselungsprozesse der PKI (Vgl. 3.6.1) und eine hochfrequente Telegrammaussendung schnell erreicht ist. [O. Koch, T. Harders (LSBG Hamburg¹²), persönliche Kommunikation, 19.10.2021]

Noch nicht alle Schnittstellen definiert

In den Verkehrsmanagementzentralen laufen perspektivisch alle relevanten Verkehrsdaten des IV, der ÖPNV-Betriebszentralen und anderer Verkehrsteilnehmer zusammen. Im gesamten Netz aus Fahrzeugen, den dezentralen Anlagen an den Knotenpunkten, Verteilerrechenzentren, der Verkehrsmanagementzentrale sowie den daran angeschlossenen Systemen der Verkehrsbetriebe, Daten Providern und weiteren, gibt es eine Vielzahl von Schnittstellen. Nicht alle davon sind gegenwärtig standardisiert. Durch die OCA wird der Aufbau einer Schnittstelle zwischen LSA-Steuergerät und RSU gegenwärtig noch geprüft. [Vgl. 43, S. 120] .

Umfangreiches Mapping notwendig

Grundlage für die Anforderung an LSA und die Verarbeitung der Verkehrsdaten, die durch die unter 3.4.6 erläuterten Telegrammtypen übermittelt werden, ist einheitliches Kartenmaterial mit hohem Detailgrad. Neben der Topografie des Knotenpunktes müssen auch die einzelnen Fahrstreifen mit ihren erlaubten Fahrbeziehungen und Verkehrshindernissen (Baustellen und allgemeine Änderungen der Verkehrsführung) eingepflegt sein. Diesbezüglich ist ein hoher Arbeitsaufwand zu erwarten, da die Daten ständig aktualisiert werden müssen. Gegenwärtig gibt es noch keinen einheitlichen Standard für die Gestaltung der Karten, befindet sich allerdings durch die OCA in der Erarbeitungsphase. [Vgl. 43, S. 119] Für die Erfüllung des langfristigen Ziels eines weiträumig standardisierten

¹² LSBG = Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer

V2X-Verkehrsmanagements, ist es wünschenswert, wenn diese Daten durch eine zentrale Stelle für den gesamten Landkreis, den Freistaat oder darüber hinaus bereitgestellt werden. Langfristig ist es vorstellbar, dass ein Teil der Kartendaten automatisiert aktualisiert wird, beispielsweise durch Eingabe von Sensoren/Kameras der Fahrzeuge oder der Infrastruktur. Um den Anforderungen an kritische Infrastrukturen zu entsprechen, sollte die Bereitstellung der Daten durch eine öffentliche oder eine öffentlich zertifizierte Stelle erfolgen, um unabhängig von privaten Daten zu sein. Ein Verfahren, um Kartendaten automatisch durch Verkehrsdaten mit dem langfristigen Ziel des autonomen Fahrens zu aktualisieren wurde im Rahmen des von Juni 2017 bis Dezember 2019 in Berlin betriebenen Testfeldes „SAFARI“ erprobt. [Vgl. 58] Die Erfassung der aktuellen Straßendaten kann perspektivisch auch durch den ÖPNV erfolgen.

4 Realisierung und Visionen

4.1 Betrachtung aus Sicht des Projektmanagements

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie der Prozess der Einführung der neuen Technologie abläuft und welche Möglichkeiten sich durch V2X in langfristiger Betrachtung für den Verkehrsbetrieb, die Stadt und den Verkehr insgesamt eröffnen können. Dies entspricht im Wesentlichen einer theoretischen Betrachtung der Realisierungsphase der Maßnahmenplanung für ÖPNV-Bevorrechtigungsmaßnahmen.

Zunächst wird ein Überblick über die zeitliche Einordnung und Darstellung von Projektphasen, die zur Einführung und den Weiterbetrieb von V2X notwendig sind, gegeben. Auch der Einfluss externer Faktoren wird dabei aufgezeigt.

Abschließend wird der Nutzen von V2X für die DVB insbesondere in Hinblick auf die Kundenzufriedenheit bewertet und die Notwendigkeit der Einführung von V2X untermauert.

Die zeitlichen Betrachtungen des Kapitels sind jeweils der kurz-, mittel- und langfristigen Zeitebene zugeteilt. Aufgrund der Komplexität des Gesamtprojektes und der nicht realistisch abschätzbaren Gesamtdauer, weichen die Definitionen der Zeithorizonte von den in der Wirtschaft üblichen ab. Der kurzfristige Horizont beträgt dort etwa 1 Jahr, die mittelfristige Ebene liegt bei bis etwa 5 Jahren, darüber hinaus spricht man vom langfristigen Planungshorizont. [59] Im V2X-Projekt überlagern sich die Inhalte der kurzfristigen Zeitebene mit dem Projektbeginn und sind notwendig, um die grundsätzliche Funktionalität des neuen Systems zu sichern. Phasen im mittelfristigen Zeithorizont beinhalten Schritte, die im anfänglichen Testbetrieb noch nicht notwendig sind. Der langfristige Zeitrahmen beschreibt alle Schritte, die über die grundsätzlichen Anforderungen des Verkehrsbetriebs hinaus geht und im Rahmen des vernetzten und (teilweise) autonomen Fahrens abläuft (vmtl. weit über 2030 hinaus)

4.2 Projektablauf

4.2.1 Übersicht

Die langfristige Einführung einer neuen Technologie in einem Unternehmen muss akribisch geplant werden. Diese Aufgabe übernimmt das Projektmanagement eines Betriebes. Ein typisches Arbeitsmittel des Projektmanagements ist die Darstellung zeitlicher Horizonte und einzusetzender Ressourcen in einem GANTT-Diagramm. [Vgl. 60] In Anlage 7 findet sich ein abstrakter Entwurf eines solches Diagrammes zur Einführung von V2X bei der DVB. Jeder Balken stellt dabei einen Prozess dar. Je näher der Beginn dieses Balkens am Ursprung der X-Achse (Zeitachse) liegt, desto eher soll mit diesem Prozess begonnen werden. Je länger ein Balken ist, desto länger dauert dieser Prozess. Liegen zwei Balken im selben zeitlichen Abschnitt, sollen oder können die Prozesse gleichzeitig ablaufen. Die einzelnen Arbeitsschritte des Diagrammes werden folgend zeitlich untergliedert beschrieben.

Aufgrund des frühen Planungsstadiums dieses Projektes können keine konkreten zeitlichen Rahmen benannt werden, alle Prozesse werden deshalb in die bereits erwähnten Zeithorizonte kurzfristig, mittelfristig und langfristig eingeordnet.

Es kann weiterhin unterschieden werden zwischen Prozessen, die innerbetrieblich und denen, die außerbetrieblich erfolgen müssen. Dargestellt sind ebenfalls externe Einflüsse, die den Ablauf maßgeblich beeinflussen.

4.2.2 Kurzfristige Maßnahmen

Projektteam bilden

Zu Beginn muss ein Team gebildet werden, in dem Beteiligte der DVB, der Stadtverwaltung und aus der Verkehrstechnik zusammenkommen. Dabei ist auch zu überlegen, welche Organisationsform des Projektteams am sinnvollsten ist. Aufgrund des Umfangs und der Langfristigkeit des Projektes ist es denkbar, eine sogenannte „reine Projektorganisation“ mit einem Projektleiter mit unternehmerischer Entscheidungskompetenz und einem eigenen Team, bestehend aus verschiedenen Experten, zu wählen. Dafür müssen intern und/oder extern Stellen ausgeschrieben und die Räumlichkeiten zur Verfügung gestellt werden. [Vgl. 61] Die großflächige Einführung von V2X verlangt deshalb auch einige Umstrukturierungsmaßnahmen im Unternehmen.

Fördergeld beantragen

Die finanzielle Absicherung des Projektes muss abgesichert werden. Wie unter 3.3.4 dargelegt, ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Europäische Union gesichert.

Testfeld festlegen

Erster Schritt der Durchführung ist es, festzulegen, wo die Infrastruktur im Stadtgebiet umgerüstet und wie ein sinnvoller Fahrzeugeinsatz mit Testfahrzeugen ablaufen kann. Bei der Festlegung auf eine Testumgebung ist es grundsätzlich sinnvoll, an bestehende Testfelder in der Stadt anzuknüpfen. Durch das Fraunhofer IVI und den Freistaat Sachsen, der gegenwärtig eine landesweite Verkehrsmanagementzentrale errichtet, wird ein Testfeld im Süden der Stadt Dresden entlang der B170 aufgebaut. [Vgl. 62] Als Verkehrsunternehmen besteht das Interesse, gemeinsame Forschungen zu betreiben, allerdings kann dieses Testfeld nicht zielführend aufgegriffen werden, da die dort verkehrende Linie 66 in Kooperation mit dem Regionalverkehr Sächsische Schweiz-Osterzgebirge (RVSOE) betrieben wird und eine zusätzliche Abstimmung notwendig wäre, außerdem sind die Verkehrsqualität der durch den ÖPNV genutzten Knoten bereits aktuell sehr hoch, so, dass eine Auswirkung auf den Verkehrsablauf nur begrenzt bewertet werden kann.

Aus diesem Grund muss durch die DVB ein eigenes Testfeld festgelegt werden. Dabei sollte der Fokus auf einem Linienabschnitt liegen, um markante Auswirkungen auf die Knotenpunkte im Streckenablauf gebündelt erfassen zu können und positive Effekte beispielsweise durch eine Fahrzeitreduktion und eine Senkung der Fahrzeitstreuung aufzeigen zu können. In Abbildung 21 (S. 59) ist ein urbic® -Auszug der Auflistung der Dresdner Knoten mit den größten Verlustzeiten zu sehen. Wird nach einer Linie, die die größten Überschneidungen mit diesen aufgeführten Knoten hat, gesucht, ist das Ergebnis Buslinie 61, bzw. Straßenbahnlinie 12. Unter Beachtung der gegenwärtigen Ausrüstung im Stadtgebiet, erscheint ein Testfeld rund um den Großen Garten (unter Einbeziehung des Wasaplatz und der Zwinglistraße) als sehr praktikabel. Eine Übersicht der Lage der Knoten im Netz findet sich in Anlage 6.

Nr.:	LSA	Σ tver min/Zeitraum	Ø Verlustzeit. min/h (LOS)
1	346 , Schillerplatz	13385 (223h)	45.84 (E)
2	203 , Pirnaischer Platz	9539 (159h)	32.67 (D)
3	136 , Könnertstraße/Jahnstraße	7144 (119h)	24.47 (E)
4	1301 , Körnerplatz/Grundstr.	5806 (97h)	19.88 (D)
5	121 , Lennéplatz	5592 (93h)	19.15 (D)
6	204 , Rathenauplatz	5375 (90h)	18.41 (C)
7	604 , Nürnberger /Budapester Str.	5166 (86h)	17.69 (D)
8	421 , Wasaplatz	5036 (84h)	17.24 (C)
9	363 , Blasewitzer /Fetscherstraße	4879 (81h)	16.71 (E)
10	308 , Bodenbacher / Zwinglistraße	4826 (80h)	16.53 (C)
11	324 , Fetscherplatz	4588 (76h)	15.71 (C)
12	307 , Stübelallee / Zwinglistraße	4242 (71h)	14.53 (C)
13	107 , Albertplatz	4219 (70h)	14.45 (D)
14	506 , Fritz-Foerster-Platz	4083 (68h)	13.98 (D)
15	804 , Tharandter /Kesselsdorfer Straße	3781 (63h)	12.95 (C)
16	606 , Chemnitzer /Nöthnitzer Str.	3731 (62h)	12.78 (D)
17	425 , Reicker Straße / Lohmannstraße	3232 (54h)	11.07 (C)
18	104 , Schlesischer Platz	3207 (53h)	10.98 (D)
19	310 , Bodenbacher /Enderstraße	3104 (52h)	10.63 (C)
20	330 , Schandauer Straße / Altenberger Straße	3085 (51h)	10.57 (B)

Abbildung 21: urbic® -Auszug des LSA-Ranking nach gewichteten Verlustzeiten

Technologie ausschreiben

Da es sich um eine öffentliche Maßnahme handelt, sind die einzelnen Leistungen hierfür auszuschreiben. Dafür müssen Ausschreibungsunterlagen erstellt und genau überprüft werden. [Vgl. 63] Die Unterlagen beinhalten im Wesentlichen die Anforderungen an die Kriterien der Technik, wie sie in unter 3.4 beschrieben sind, untersetzt mit konkreten Parametern. Ausgeschrieben werden müssen die RSU, die OBU, neue Hardware und Managementsoftware zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsrechner, die Schnittstellen, aber auch Servicedienstleistungen wie Wartung und Installation der Technik.

Installation der Technik

Nach erfolgter Ausschreibung und Erhalt der Technik kann diese installiert werden. Da die Installation weiterer Anlagen nach einem festen Schema ablaufen sollte, um den notwendigen Aufwand zu minimieren, sollte im Rahmen der Testphase ein Leitfaden erstellt werden, der darlegt, welche beteiligte Institution welche Schritte durchzuführen hat. Erfolgt der Einbau von OBU nicht ab Werk, ist die Umrüstung in den Werkstätten notwendig. Die Auswahl der umgerüsteten Busse und/oder Straßenbahnen muss zudem mit der Betriebsplanung abgestimmt werden, da deren

Einsatz für die entsprechenden Linien geplant werden soll, um ausreichende Messergebnisse zu erhalten.

Inhalt Telegramme

Durch das ETSI wurden zahlreiche verschiedene Parameter für die jeweiligen unter 3.4.6 vorgestellten Telegramme definiert. Dabei gilt es kurzfristig herauszufinden, welche Parameter im Fahrzeug erfasst und übermittelt werden müssen, um eine optimale Priorisierung der DVB-Fahrzeuge zu erreichen. Dafür sind weiterführende Untersuchungen sinnvoll.

Dabei ist es auch Aufgabe, im Rahmen der Einführungsphase Parameter innerhalb der Verkehrssteuerung festzulegen und regelmäßig korrektiv anzupassen. Diese Parameter sollen der LSA-Steuerung vorgeben, wie sie im Konfliktfall verschiedener ÖPNV-Fahrzeuge mit unterschiedlichen Besetzgraden, variierenden Verspätungen und Linientypen reagieren soll, später muss auch der IV in das System integriert werden. Auf diese Weise kann bspw. festgelegt werden, dass voll besetzte Busse 10-fach stärker priorisiert werden als leere Autos. Diese Parameterdefinition erfordert zunächst eine manuelle Eingabe, Abstimmungen der Werte müssen zwischen DVB und Stadt erfolgen.

Transformation Analogfunktelegramme in CAM-Telegramme

Große Relevanz besitzt die Transformation der Informationen aus den Analogfunktelegrammen in die neuen Nachrichtentypen nach ETSI. In der ersten Umsetzungsphase empfiehlt sich die Integration der R09.16 Telegramme in einen Container der CAM-Telegramme. Dafür müssen alle Container der CAM definiert werden. Damit besteht keine weitere Abhängigkeit von den Analogfunkfrequenzen und die Funktionalität des V2X-Systems kann in der Stadt erprobt werden. Allerdings bietet diese weiterhin meldepunktbasierte Anforderungstechnologie in Bezug auf die Effizienz des Verkehrsablaufes noch keine Vorteile. [Vgl. 47, S. 5]

Benutzeroberfläche OBU

Jederzeit ist bei der Umsetzung auf die Benutzerfreundlichkeit für das Personal zu achten. Die Vielzahl der möglichen Informationen müssen im Fahrzeug so übermittelt werden, dass die Fahrer nicht überfordert sind und sich dauerhaft auf den Verkehr konzentrieren können. Warnmeldungen können möglicherweise

akustisch übertragen werden, Informationen über Spurführungen und Freifahrphasen durch eine einfache Bildschirmdarstellung. Auch die Rückmeldung über eine Anforderung des Fahrzeuges sollte auf der OBU dargestellt werden, so können die Anforderungszeichen an den Lichtsignalanlagen eingespart werden. Zusätzlich müssen auch Informationen wie Fahrplanlage und der technische Zustand des Fahrzeuges weiterhin unkompliziert abrufbar sein. Zunächst sollten dafür verschiedene Benutzeroberflächen gestaltet und im praktischen Betrieb getestet werden. Nach Rückmeldungen durch das Personal kann das Design angepasst werden. Änderungen sind in jedem Fall mit dem Betriebsrat abzustimmen. In Abbildung 22 sind verschiedene Umsetzungsvarianten, die im Rahmen des KoMoD-Testfeldes (Vergleich 3.2) erarbeitet wurden, zu sehen. Bestenfalls kann das Fahrpersonal selbst über eine bevorzugte Variante individuell entscheiden.



Abbildung 22: verschiedene Beispiele der rheinbahn zum möglichen Aufbau der Nutzeroberfläche der OBU im Fahrzeug [32, S. 18]

Betrieb Testfeld

Noch auf kurzfristige Sicht (bis vor 2028, Auslauf Zuteilung Analogfunkfrequenzen) sollte es möglich sein, ein Testfeld aufzubauen, zu betreiben und teilweise auszuweiten. Wichtig dabei ist die kontinuierliche Überwachung und Dokumentation durch das Projektteam, um unter anderem Informationen über laufende Kosten, den Energieverbrauch und Zuverlässigkeit, aber auch die Zufriedenheit des Fahrpersonals und der Fahrgäste zu erhalten.

4.2.3 Mittelfristige Aufgaben

Smart Intersections

Um im vollen Maße von den Möglichkeiten von V2X profitieren zu können, empfiehlt es sich, im Innenstadtbereich mehrere Kreuzungen mit hohem Gefahrenpotential mit der Technik für Smart Intersections nachzurüsten (Vgl. 3.3).

Transformation CAM-Telegramme in SREM/SSEM-Telegramme

Um von einer kontinuierlichen Anforderung profitieren zu können, ist es notwendig, von den Analogfunktelegrammen im CAM-Container auf SSEM/SREM umzusteigen. Dafür muss festgelegt werden, auf welche Weise an den Knoten unterschieden wird zwischen Fahrzeugen, die noch mit der herkömmlichen Anforderungstechnologie im Netz unterwegs sind und denen, die bereits die V2X Komponenten verbaut haben. Eine Möglichkeit ist die Auswertung der Fahrzeugnummer an den Knoten, da durch diese eindeutig die Technologie zum Fahrzeug zugeordnet werden kann.

Auswertung Testfeld

Die umfassende Auswertung des Testbetriebes stellt die Weichen für eine Entscheidung über die technische Umsetzungsvariante im gesamten Stadtgebiet, weshalb eine gewissenhafte Auswertung der gesammelten Informationen notwendig ist. Wenn die DVB zufrieden mit den erreichten Ergebnissen (insbesondere die Erschließung von Potentialen und der Zuverlässigkeit der Technik) ist, kann die Technik im gesamten Stadtgebiet ausgerollt werden. Durch vorher standardisierte Prozesse wird dieser Roll-Out zeitlich schneller ablaufen als die Einrichtung eines Testfeldes.

4.2.4 Langfristige Aufgaben

Betreibermodell festsetzen

Mit Abschluss aller Testaktivitäten und der Etablierung des Systems in der ganzen Stadt (und darüber hinaus) muss sich für ein festes Betreibermodell entschieden werden, da mit dem Roll-Out auch die Arbeit des Projektteams endet. Alle weiteren Aufgaben müssen entsprechend eigenverantwortlich durch die jeweiligen Institutionen durchgeführt werden.

Kooperation im Verbund

Spätestens mit der Vernetzung des Gesamtsystems müssen auch alle weiteren Verkehrsunternehmen im Verbund integriert werden. Unter dem Aspekt einer weitreichenden Standardisierung passiert dieser Projektschritt mglw. auch schon automatisch. Sobald Busse ab Werk mit OBU ausgerüstet werden oder der Regionalverkehr einige beschafft, können diese unkompliziert in ein innerstädtisches Testfeld integriert werden.

Ausweitung auf die gesamte Stadt

Wenn das System auf die gesamte Stadt und darüber hinaus ausgerollt ist, der SREM/SSEM-Standard integriert wurde und eine durchgehende Netzabdeckung und damit keine weitere Abhängigkeit von Analogfunkfrequenzen besteht, ist der Transformationsprozess abgeschlossen und die Einführung von V2X bei der DVB AG beendet.

Qualitätsmanagement

Eine Weiterführung des Qualitätsmanagements an den Knoten und entlang der Strecke muss jederzeit in einer vergleichbaren Weise wie mit dem gegenwärtig verwendeten urbic® gewährleistet sein, um ohne zeitliche Differenzen korrektiv in auf das V2X-System einwirken zu können. Eine Herausforderung während der Testphase ist das zeitgleiche Management des bisherigen und des V2X-Systems. Das Management von V2X sollte deshalb in die Zuständigkeit des gegründeten Projektteams fallen.

4.2.5 Externe Einflüsse

Der Betrieb des Testfeldes und auch die langfristige technische Umsetzung ist weitgehend geprägt durch den Einfluss externer Faktoren, die teilweise einen Meilenstein in der Entwicklung von V2X-Anwendungen darstellen. Projekte kommunaler Verkehrsbetriebe sind in der Regel abhängig von finanzieller Förderung, ein gewinnbringender Betrieb von V2X-Technik ist der ÖPNV-Branche im Gegensatz zur Automobilbranche nicht möglich. Deshalb besteht grundsätzlich eine *Abhängigkeit vom politischen Willen und Leitfaden*, ein zentrales V2X-System mit einer ÖPNV-Priorisierung, bzw. generell ein nachhaltiges Verkehrsmanagement mit Schwerpunkt auf dem ÖPNV, zu fördern.

Um die Systemsicherheit zu gewährleisten, muss abgewartet werden, welche Umsetzung bzgl. der *PKI* durch den Bund oder den Freistaat getroffen wird. Auch durch das Voranschreiten weiterer *Standardisierungsprozesse* bei *Schnittstellen* und den (sicherheits-)technischen Vorgaben zum Einbau und Betrieb von OBU in den Fahrzeugen entscheidet sich, welcher Eigenentwicklungsaufwand durch das V2X-Projektteam in Dresden erbracht werden muss. Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems ist abhängig von dem technischen Stand der OBU, Backend und RSU-Technik. Mit Blick auf die zunehmende Auslastung des Systems durch Integration aller Verkehrsteilnehmer wird es spannend, welche Rechenleistung in der Praxis tatsächlich erbracht werden kann und ob somit tatsächlich alle potentiellen Anwendungsfälle in der Praxis umgesetzt werden können. Einen wesentlichen Beitrag zur Leistungsfähigkeit spielt auch die *Entwicklung von 6G*.

Eine wesentliche Erleichterung mit Hinblick auf die Integration benachbarter Regionen und Verkehrsunternehmen sowie der Verwendung aktueller Verkehrsnachfragedaten wird die Entwicklung von *großräumigen Verkehrsmanagementzentralen* bringen. Hier wird es spannend, ob sich eine bundesweite oder landesweite Plattform etablieren kann, oder ob die Daten auch längerfristig noch auf kleinräumigen, kommunalen Plattformen zur Verfügung stehen. Dies würde den Prozess der bundesweiten V2X-Standardisierung verlangsamen.

Augenmerk liegt auch auf dem Voranschreiten bei der Entwicklung von C-V2X. Bislang wird diese Umsetzungsvariante im ÖPNV nicht erprobt, aber kann auf langfristige Sicht weitere Möglichkeiten eröffnen, wenn sich die Forschung und Praxis auf diese Technologie fokussiert.

Sollte es langfristig möglich sein, im städtischen Verkehr ein *serienmäßiges, automatisiertes Fahren* aufzubauen, ergibt sich daraus ein ganz neues Betrachtungsfeld für den ÖPNV. Diese Auswirkungen und Potentiale müssen in weiterführenden Arbeiten betrachtet werden, wenn sich diese Möglichkeit abzeichnet.

4.3 Betreibermodelle

4.3.1 Betreibermodelle allgemein

Im Laufe der Einführung und dem langfristigen Betrieb der neuen Technologie muss ein Konzept zum Betrieb des Gesamtsystems erarbeitet werden. Dabei muss stets den Anforderungen der kritischen Infrastruktur entsprochen werden, ein störungsfreier Verkehrsablauf des ÖPNV ist hoheitliche Aufgabe kommunaler Stellen. Durch die langfristige Vernetzung aller Verkehrsträger werden die Betreibermodelle künftig deutlich komplexer als die bisherigen Modelle, da sichergestellt werden muss, dass alle Verkehrsdaten in einer Managementzentrale zusammenlaufen. In der iV2X Dokumentation werden 3 grundsätzliche Betreibermodelle vorgestellt: [Vgl. 25, S. 78-81]

In Variante 1 liegt die Finanzierungsbudget und der Betrieb des RSU-Equipments der gesamten Verkehrsinfrastruktur in öffentlicher Hand. Weitere Verkehrsdienstleistungen wie die Installation der Technik und die Netzwerkausrüstung werden durch Outsourcingverträge an andere Unternehmen vergeben. Im Wesentlichen entspricht dieses Betreibermodell dem bisherigen Modell in der Stadt. [Vgl. 25, S. 78-79]

Bei Variante 2 wird die Zuständigkeit für die Errichtung und den Betrieb des RSE und unter Umständen auch der VMZ in private Hand gegeben, aber öffentlich ausgeschrieben und finanziert. Damit ist das Know-How beim privaten Betreiber gebündelt, der Betrieb aller weiteren Komponenten des Straßensystems obliegt auch weiter der öffentlichen Hand. [Vgl. 25, S. 79-80]

Variante 3 sieht eine gemeinwirtschaftliche Kooperation zwischen privaten und öffentlichen Unternehmen beim Betrieb des RSE vor (Kostenaufteilung), dies entspricht in etwa dem Modell von Public-Private-Partnerships (PPP). [Vgl. 25, S. 80-81]

4.3.2 Betreibermodelle Dresden

Auf kurz- und mittelfristige Sicht kann keine Aussage über ein potenzielles Betreibermodell gegeben werden, da sich das Netzwerk zunächst in der Aufbauphase befindet und auf noch keine standardisierten und routinierten Abläufe zurückgegriffen werden kann. Da V2X auch und vor allem sicherheitskritische

Anforderungen bedient, sollte die Verwaltung und Aufsicht des Projektes eine hoheitliche Aufgabe sein. Darunter fällt unter anderem die Bereitstellung der Kartendaten, bei denen keine Abhängigkeit von privaten Anbietern bestehen sollte. Dies trifft auch auf die Validierung der Daten aus der Messtechnik an den Knoten zu. Ein Teil der Aufgaben kann hingegen unter Verwaltungsaufsicht outgesourct werden. Ein Modell, dass sich an einer PPP orientiert, ist aus Sicht der DVB eher ungünstig, da damit ein Interesse der privaten Unternehmen zur Erwirtschaftung von Gewinn durch Komfort- und Effizienz Anwendungen besteht. Die DVB sollte alle für den Betrieb notwendigen V2X-Anwendungen durch öffentliche Hand zur Verfügung gestellt bekommen. Damit erscheint – zunächst für den Testbetrieb – eine Umsetzung als zielführend, die sich am Betreibermodell, Variante 1 orientiert.

4.4 Visionen

4.4.1 Visionen aus Fahrgastsicht

Für die Kunden des ÖPNV stellt V2X auf vielen Ebenen ebenfalls eine Verbesserung gegenüber der gegenwärtigen Angebotsqualität dar. Im Folgenden werden einige dieser potentiellen Vorteile dargestellt. Bei vielen Aspekten gibt es eine Überschneidung der Interessen von Kunden und DVB, die einzelnen Visionen sind in die Kategorie eingeordnet, für die sich die größeren Vorteile ergeben.

Übermittlung der Halteposition an konkreten Knoten

V2X eröffnet die Möglichkeit der Kommunikation der ÖV-Fahrzeuge untereinander. So kann im Vergleich zur GPS-Datenübermittlung mit hoher Sicherheit festgestellt werden, in welcher Reihenfolge die Fahrzeuge an Doppelhaltestellen ankommen. Diese Information ist für Fahrgäste insbesondere an großflächigen Haltestellen von Vorteil, beispielweise dem Pirnaischen Platz, dem Postplatz oder dem Bahnhof Neustadt. So kann die Fahrzeugreihenfolge kurz vor Eintreffen der Fahrzeuge an den DFI der Haltestellen angezeigt und zusätzlich über die RSU an alle im Umfeld befindlichen mobilen Endgeräte übermittelt werden. Fahrgäste können sich so optimal verteilen und die Fahrgastwechselzeiten sowie Laufwege minimieren.

Wird eine bestimmte Fahrzeugreihenfolge gewünscht, beispielsweise bei planmäßig gleichzeitig oder kurz hintereinander an einer Haltestelle eintreffenden Fahrzeugen, kann die Information bei der Umlaufphasenschaltung einer LSA, an der sich die Reihenfolge der Fahrzeuge entscheidet, beeinflusst werden. An nicht

signalisierten Knoten (z.B. Hauptbahnhof) kann das Fahrpersonal durch die Information über die Annäherung eines anderen Fahrzeuges entsprechende Entscheidungen treffen.

Sicherheitsaspekt

Auf eine neue Art und Weise kann V2X wesentlich zur Erhöhung der Sicherheit im Verkehrsraum beitragen. Im Gegensatz zur Herangehensweise, dass Hindernisse durch Fahrerassistenzsysteme verschiedener Hersteller erkannt und dem Fahrer mitgeteilt werden, basieren Sicherheitsanwendungen mit V2X darauf, dass die Verkehrsinfrastruktur das Hindernis durch Kameras und Sensoren erkennt, die Information an das RSE weiterleitet und dann an die OBU als eine Warnmeldung weiterleitet. Besonders profitieren können beispielsweise abbiegende Busse durch Fahrrad- und Fußgängererkennung mit Hilfe von Wärmebildkameras. Im Rahmen von BiDiMoVe (Vgl. 3.3) gibt es bereits erste praktische Versuche in Hamburg bezüglich dieses Anwendungsfalles. Insbesondere bei einem hektischen Fahrgastwechsel und beim Miteinander von Rad und ÖPNV im Straßenraum erhöht sich die Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer. Durch eine bessere Grünzeitprognose ist auch eine Reduktion von Brems- und Beschleunigungsvorgängen möglich, damit erhöht sich neben der Sicherheit auch der Fahrkomfort.

Nachfrageorientierte Steuerung

Ein ähnlicher Anwendungsfall wie die Haltepositionsvorhersage ist die Vorhersage von gewünschten Anschlussverbindungen und die Berücksichtigung der ermittelten Wünsche durch die LSA-Schaltung. Zum einen ist es möglich, durch die Angebotsplanung im Rahmen von Verkehrssimulationen zu ermitteln, zu welchen Tageszeiten welche Fahrtenrelationen besonders gefragt sind. Diese Relationen können als Parameter in der LSA-Steuerlogik hinterlegt werden. Anschlüsse, die gewährleistet werden können, können so dem Fahrpersonal über die OBU bzw. durch Schnittstellen auch im Bordrechner angezeigt werden. Langfristig erscheint es realistisch, dass die Fahrtwünsche auch in Echtzeit durch die Suchanfragenauswertung in Mobilitätsapps ausgewertet werden können. Finden bspw. in der MESSE DRESDEN Events statt und ist bei der Abreise erkennbar, dass zahlreiche Fahrgäste in eine bestimmte Richtung fahren möchten, so kann das vernetzte System selbstständig eine optimale Route für die Fahrgäste unter der

Berücksichtigung der aktuellen Fahrplanlage und den Fahrzeugpositionen ermitteln und dies zum einen dem Fahrpersonal und zum anderen den Fahrgästen über Anzeigen in den Fahrzeugbildschirmen, automatische Ansagen oder Mobilitätsapps mitteilen. [Vgl. 64, S. 23] Um von diesem Anwendungsfall praktisch profitieren zu können, muss eine zentrale Lösung umgesetzt werden, damit die Daten des Betriebsleitsystems der DVB und den Verkehrsdaten der Stadt in der VMZ verknüpft werden können.

4.4.2 Visionen aus Sicht der DVB

Neben den im Rahmen der Einführung zu erwartenden und umsetzbaren Vorteilen der V2X-Technologie eröffnen sich auf langfristige Sicht noch zahlreiche weitere Möglichkeiten, die einem intelligenten Verkehrsmanagement zuträglich sein können und die Attraktivität, betriebliche Planbarkeit und Zuverlässigkeit des ÖPNV erheblich verbessern können. Damit ergeben sich auch zahlreiche Vorteile für die DVB selbst.

Flexibilität im Störfall

Unzufriedenheit entsteht beim Kunden vor allem dann, wenn eine geplante Reise aufgrund von unvorhersehbaren Ereignissen nicht stattfinden kann und durch Unfälle, Streckenblockaden und andere Behinderungen des Fahrweges operative Änderungen im Fahrbetrieb notwendig werden. Ziel ist es, die Phase des unregelmäßigen und unplanbaren Verkehrsablaufes zeitlich zu minimieren und die Verlässlichkeit des ÖPNV zu erhöhen. [5, S. 13] Gerade bei Großstörungen im Liniennetz stößt die Kapazität der Disposition allerdings schnell an Grenzen. Besonders kritisch ist es, wenn mehrere Fahrzeuge in der Störung feststecken und für den weiteren Linienbetrieb unbestimmt lang ausfallen.

Durch die Kombination aus Vernetzung aller Akteure des städtischen Verkehrsinfrastruktursystems und der dynamischen Fahrtroutenregelung auf Kartenbasis, wird es möglich, die Disposition im Störfall teilweise zu automatisieren und einen reibungsfreien Verkehrsablauf auf der Umleitungsrouten zu ermöglichen, da zum einen Unabhängigkeit von der Routenversorgung an den LSA-Knoten besteht und zum anderen Einsatzorte für operative Fahrzeuge optimal berechnet werden können. Durch hinterlegte Parameter bezüglich notwendiger Pausenzeiten und maximaler Dienstlängen des Fahrpersonals ist es zudem

vorstellbar, dass Informationen über Ablösungen automatisiert zwischen den Fahrzeugen und Personal gesendet werden (hierfür müssen Dienstablets in das Netzwerk einbezogen werden) Langfristig ist es sogar denkbar, dass durch den Datenfluss mobiler Endgeräte Prognosen getroffen werden können, an welchen Stellen im Liniennetz die Verkehrsnachfrage gerade besonders hoch ist. Operativ verfügbare Fahrzeuge können dann an diesen Stellen eingesetzt werden.

Digitalisierung von Weichen und Bahnübergängen

Durch RSE im Bereich von Weichen außerhalb des innerstädtischen Bereiches können Informationen über den Weichenzustand aufgenommen und verteilt werden. Dadurch kann beispielsweise dem Fahrpersonal außerhalb der Sichtweite einer Weiche angezeigt werden, ob sie korrekt gestellt ist. So kann sich die Beförderungsgeschwindigkeit erhöhen, da die Sensorik feststellen kann, ob Weichen nicht verschlossen sind und spitz befahren werden (dann sind nur 15km/h erlaubt)¹³, oder ob sie verschlossen sind (dann sind höhere Geschwindigkeiten erlaubt). Außerdem können Informationen über den Weichenzustand (auch eventueller Verschleiß) an die Managementzentrale übermittelt werden. Auch die Einbindung von Bahnübergängen in den Sendebereich der RSU bietet Möglichkeiten, da Fahrzeuge in dessen Umfeld bereits ohne Sichtkontakt Meldungen über sich nähernde Straßenbahnen erhalten, umgekehrt können Straßenbahnen so auch Meldungen von querenden Einsatzfahrzeugen erhalten. [Vgl. 39, S. 20-38]

Zusammenarbeit mit der Forschung (IVI)

Dresden ist ein bedeutender Standort für Forschungen im Verkehrssektor. Wie unter 3.3 aufgezeigt, führt das IVI der Fraunhofer Gesellschaft bereits jetzt erste Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und den Potentialen des V2X-Standards durch. Durch eine Kooperation mit der Forschung kann in Dresden mittelfristig ein Testfeld aufgebaut werden, das es ermöglicht, die Wechselwirkungen zwischen ÖPNV und IV auch großräumig zu untersuchen und ein modernes Verkehrsmanagementsystem aufzubauen.

¹³ §50 (4.) Satz 1 der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1410) geändert worden ist

zukunftsfähige Lösung Abschaltung Analogfunkfrequenzen

Mit der Etablierung von V2X als neue Anforderungstechnologie kann sich die DVB von der Inanspruchnahme der betrieblichen Analogfunkfrequenzen lösen, deren Abschaltung viele deutsche Verkehrsunternehmen vor künftige Probleme stellt (Vgl.2.2.3). Möglich ist zwar auch eine Umrasterung, dadurch wird das Problem aber nur weiter in die Zukunft verschoben. Im Gegensatz zur Umrasterung eröffnet V2X eine Vielzahl an zukunftsfähigen Anwendungsmöglichkeiten.

Standardisierter Betrieb über die Grenzen des Verkehrsbetriebes

In Deutschland gibt es gegenwärtig weit über 100 verschiedene Verkehrsverbände und Tarifgemeinschaften [Vgl. 4, S. 185-188] und eine noch größere Zahl von Verkehrsunternehmen und -betrieben [4, S. 180]. Je nach Organisation des Verbundes/Verkehrsbetriebes gibt es eigene Festlegungen zur Umsetzung einer ÖV-Priorisierung und der technischen Ausstattung von Fahrzeugen innerhalb eines bestimmten Gebietes. Um die Attraktivität für Fahrgäste zu erhöhen, die innerbetrieblichen Abläufe zu harmonisieren und die Kooperation zwischen den Verbänden zu verbessern, ist anzustreben, die Technik so weit wie möglich zu standardisieren. Durch die Standardisierung und den Austausch von Erfahrungswerten verbessert sich auch die betriebswirtschaftliche Planbarkeit.

Standardisierung – bestenfalls auf Ebene der Europäischen Union – bietet weitere Vorteile: Im Störfall können auch Busse fremder Verkehrsunternehmen in einer Stadt vollumfänglich von einer ÖPNV-Priorisierung profitieren. Fahrzeughersteller können den Innenraum der Fahrzeuge so gestalten, dass die Bestandteile der OBU einheitlich installiert werden können.

Konkurrenzfähigkeit zur Automobilindustrie

Der Verkehrssektor unterliegt ständigem Wandel. Zunehmend werden Fahrzeugmodelle mit V2X-Technologien ausgestattet und Verkehrssicherheit und -effizienz zu erhöhen. Der öffentliche Personennahverkehr steht ständig in Konkurrenz mit den Technologien der Automobilbranche und möchte als leistungsstarkes, sicheres und zuverlässiges Verkehrsmittel weiter an Attraktivität gewinnen. Dafür muss sich den Entwicklungen des Automobilmarktes anschließen werden. Es wäre denkbar ungünstig für die DVB, wenn sowohl die Verkehrsinfrastruktur als auch Fahrzeuge des Individualverkehrs zunehmend mit

intelligenter V2X-Technologie ausgerüstet werden und sich dadurch dessen Attraktivität erhöht, der ÖPNV selbst aber nicht Teil eines Verkehrsmanagementsystems sein kann und damit „auf der Strecke“ bleibt. In Abbildung 23 ist zu sehen, dass die Anzahl an zugelassenen Fahrzeugen mit ITS-Technologie an Bord rasant zunimmt, für 2022 werden bereits 6.000.000 damit ausgestattete Fahrzeuge unterwegs sein werden.

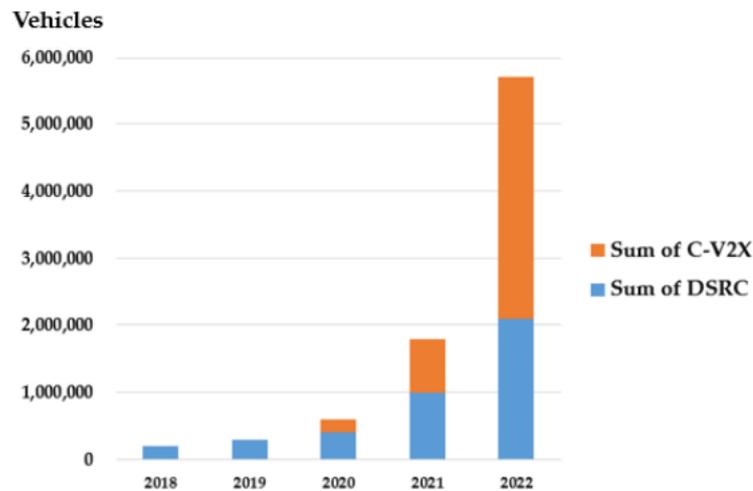


Abbildung 23: Entwicklung der Anzahl an Fahrzeugen mit integrierter V2X-Ausstattung [65, S. 3]

Nachhaltige und effiziente Mobilität

In der gegenwärtigen Debatte rund um klimafreundliche Mobilität und die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes kann die DVB politisch punkten. Werden durch V2X Fahrzeitpotentiale erschlossen und Standzeiten außerhalb von Haltestellen minimiert, führt dies zu positiven Effekten aus verschiedenen Sichten: Zum einen reduziert sich der Abgasausstoß bzw. Energieverbrauch bei Elektrofahrzeugen durch weniger Brems- und Anfahrvorgänge. Außerdem führt eine Reduzierung der Verlustzeiten durch konsequente ÖPNV-Priorisierung zur Senkung des Bedarfs an Fahrzeug und Personal. Weniger Fahrzeuge bedeuten wiederum weniger Energieverbrauch. Die freiwerdenden technischen und personellen Ressourcen können wiederum zur Steigerung des Angebotes verwendet werden. Durch höhere durchschnittliche Beförderungsgeschwindigkeiten erhöht sich dabei auch die Kapazität auf den Streckenabschnitten, der Verkehr wird insgesamt wirtschaftlicher und der finanzielle Zuschussbedarf durch die Stadt sinkt unter Umständen. Ein Wirkungsgefüge der beschriebenen Faktoren ist in Abbildung 24 zu erkennen.

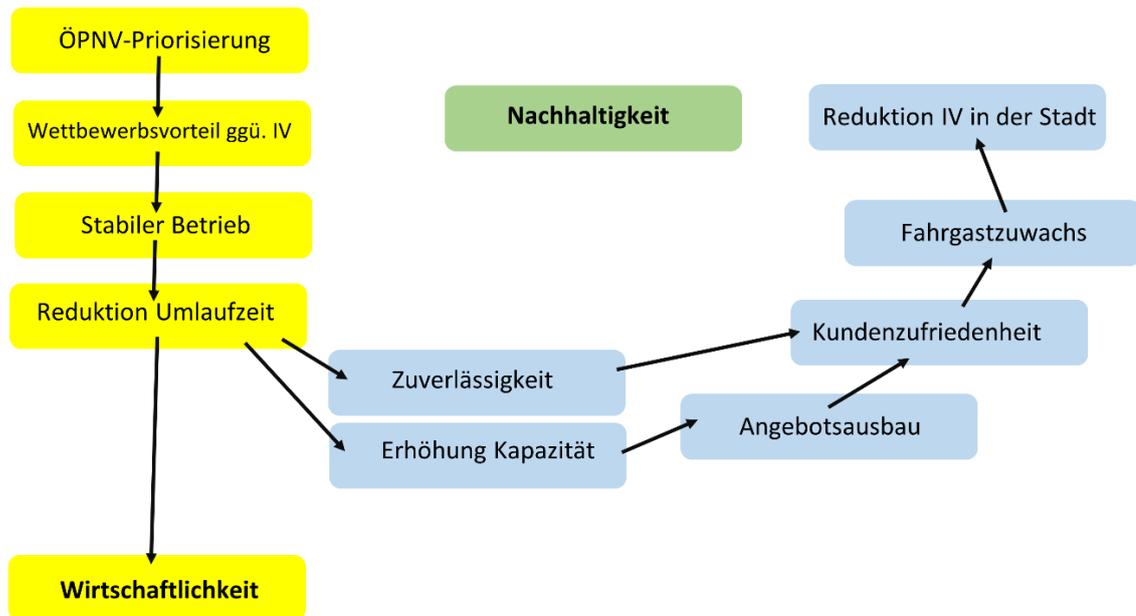


Abbildung 24: Wirkungsgefüge der ÖPNV-Priorisierung

Schritt in Richtung des automatisierten Fahrens

Eine wesentliche Bemühung beim Vorantreiben der Entwicklung vernetzter V2X Technologie ist es, dem autonomen Fahren näher zu kommen. Momentan befindet sich der technische Standard im Entwicklungsschritt des „teilautomatisierten Fahrens“, [66] das heißt, dass der Fahrer in bestimmten Situationen (bspw. lange Autobahnabschnitte) nur noch eine überwachende Funktion hat. Mit der Bereitstellung von Infrastrukturdaten durch V2X-Anwendungen kann diese Entwicklung auch im innerstädtischen Bereich vorangetrieben werden und der Modus des hochautomatisierten Fahrens erreicht werden. Gegenwärtig ist nicht absehbar, wann und ob ein autonomer Fahrbetrieb in den Städten und auf dem Land umsetzbar sein wird. Dennoch ist anzustreben, die Entwicklung hin zum autonomen Betrieb in einigen Bereichen voranzutreiben. Ein stetiger Angebotsausbau im Netz des ÖPNV steht im Konflikt mit der Verfügbarkeit von Fahrpersonal. Es ist vorstellbar, dass Testläufe für autonome Fahrten zunächst in konfliktarmen und abgeschirmten Bereichen stattfinden können, möglicherweise auf Abschnitten des Tramnetzes, auf denen die Fahrzeuge auf bahneigenen Anlagen mit wenig Berührungspunkten zu anderen Linien oder Verkehrsmitteln verkehren. Voraussetzung hierfür ist in jedem Fall die Implementierung eines V2X-Systems, da nur durch die Vernetzung und Detektion aller Verkehrsteilnehmer ein sicherer und

möglichst störfreier Betrieb ermöglicht werden kann. In Deutschland gibt es bereits einige Testfelder für autonomen Linienbetrieb in Städten: HEAT Hamburg (Vgl.3.2), das nachfragegesteuerte ABSOLUT-Shuttle im Leipziger Norden[67], das „ELBI“ in Magdeburg [68] und weitere Modellprojekte. Eine vollständige Übersicht findet sich auf den Seiten des VDV. [69]

5 Zusammenfassung

Eine intelligente und digitalisierte Priorisierung des innerstädtischen ÖPNV in Dresden durch den Einsatz und Betrieb eines V2X-Netzwerkes bietet langfristig große Chancen im Zuge der Bemühungen um das Vorantreiben der Mobilitätswende. Durch die Erschließung von bestehenden Fahrzeitpotentialen, der Steigerung der Kapazität des Netzes, der Übermittlung sicherheitsrelevanter Daten der Verkehrsknoten und einer zunehmenden Flexibilität bei der Abweichung vom Regelbetrieb können die Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Attraktivität des Nahverkehrs in Dresden gesteigert werden. Die gängigen technischen Lösungen auf dem Markt knüpfen dabei an die Vorteile des bisher verwendeten Analogfunksystems an und eröffnen durch die Möglichkeit der direkten Kommunikation mit den Verkehrsknoten und einer Rückübermittlung von relevanten Informationen durch verschiedene, standardisierte Nachrichtentypen an das Bordsystem der Busse und Straßenbahnen neue Ebenen der ÖPNV-Beschleunigung, insbesondere, wenn eine zentralenbasierte Lösung mit Einbindung einer Verkehrsmanagementzentrale umgesetzt wird.

Aufgezeigt werden konnte allerdings auch, dass die stadtweite Einführung einer vernetzten V2X-Technologie großen personellen und technischen Aufwand verlangt und stets durch die dynamische Entwicklung der Forschung beeinflusst wird. In einem ersten Schritt sollte deshalb zunächst ein Testfeld mit einigen in das System eingegliederte Knoten in der Innenstadt aufgebaut werden, in dem festgestellt werden kann, welche Systemparameter für Dresden definiert werden sollen und wie leistungsfähig die Systemkomponenten sind. Für die langfristige Umrüstung aller städtischen Verkehrsanlagen ist eine Zusammenarbeit mit Akteuren aus Stadt und Verkehrstechnik sowie die Festlegung eines Betreibermodelles unumgänglich. Dabei steht die DVB in Konkurrenz zur Entwicklung von V2X-Anwendungen im Individualverkehr. Durch eine möglichst zeitnahe Umsetzung dieser Technologie im Stadtgebiet und einer aktiven Priorisierung des ÖPNV ist es möglich, langfristig einen Wettbewerbsvorteil gegenüber dem motorisierten Individualverkehr zu erlangen.

IV Literatur

- [1] SWARCO, *Urbanes Verkehrsmanagement*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.swarco.com/de/loesungen/verkehrs-management/urbanes-verkehrsmanagement> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [2] *Car2x/V2X Know-how | Vector*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vector.com/de/de/know-how/v2x/> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., *Hinweise zu Bevorrechtigungsmaßnahmen für den ÖPNV im städtischen Verkehrsmanagement*, 2018. Aufl. Köln: FGSV Verlag GmbH.
- [4] W. Reinhardt, *Öffentlicher Personennahverkehr: Technik – rechts- und betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., „Empfehlungen für einen verlässlichen öffentlichen Verkehr“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV R2 - Regelwerke FGSV 166, 2017.
- [6] Verband öffentlicher Verkehrsunternehmen, *VÖV 04.05.1 / Ergänzung: Technische Anforderungen an rechnergestützte Betriebsleitsysteme - Übertragungsverfahren Datenfunk*. Ergänzung vom 05.11.1986.
- [7] Verband öffentlicher Verkehrsunternehmen, *VÖV 04.05.1 / Ergänzung 2: Technische Anforderungen an rechnergestützte Betriebsleitsysteme - Übertragungsverfahren Datenfunk*. Ausgabe Juni 1990.
- [8] VHH, *Wie funktioniert die Ampel-Beeinflussung? - VHH*. [Online]. Verfügbar unter: <https://vhhbus.de/ampel-beeinflussung/> (Zugriff am: 24. August 2021).
- [9] „Ampeln in Hannover - Was ist eine Vorrangschaltung?“, *Hannoversche Allgemeine*, 20. Feb. 2015, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.haz.de/Thema/Specials/Ampeln/Was-ist-eine-Vorangschaltung>. Zugriff am: 12. November 2021.
- [10] Robert Hoyer, „VERONIKA Vernetztes Fahren des oeffentlichen Nahverkehrs in Kassel“, 2018.
- [11] *Erfolgreiches Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://urbic-system.com/> (Zugriff am: 12. November 2021).

- [12] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn Referat 225, *Verwaltungsvorschriften für Frequenzzuteilungen im nichtöffentlichen mobilen Landfunk: VVnömL*.
- [13] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn Referat 225, „Mitteilung Nr. 253/2018“, *Amtsblatt Nr. 17/2018*, 2018.
- [14] *Lichtsignalanlage im Zuge der Straße der Nationen in Chemnitz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eibs.de/leistungen-projekte/projekt/lichtsignalanlagen-chemnitz> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [15] M. Schneider, „Woher weiß die Straßenbahn eigentlich, wohin sie fahren muss?“, *Freiburger Verkehrs AG*, 25. Feb. 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.vag-freiburg.de/weichensteuerung/>. Zugriff am: 12. November 2021.
- [16] ESN Bahngeräte GmbH, *Oberleitungskontakt*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.esn-online.de/de/produkte/sensoren/oberleitungskontakt.html> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [17] T. Morgner, *Potentialanalyse Straßenbahnlinie 6 in der Landeshauptstadt Dresden*, 2021.
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS 2015“, Köln, FGSV W1 - Wissensdokumente FGSV 299 B, 2015.
- [19] L. Schnieder, *Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr: Ziele, Methoden, Konzepte*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com>
- [20] S. Lämmer, J. Krimmling und A. Hoppe, „Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen - Regelungstechnischer Ansatz und Simulation“, 2009.
- [21] S. Dr.-Ing. Lämmer, „Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest“, 2016.
- [22] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., „Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA : Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV R1 - Regelwerke FGSV-321, 2015.
- [23] TU Dresden, *Verbesserung der Verkehrsqualität auf dem Stadtring und der Ost-West-Verbindung in Dresden*. [Online]. Verfügbar unter:

- dresden.de/bu/verkehr/vis/vlp/forschung/oeffentlicher-personennahverkehr/optimierung-der-verkehrssteuerung-auf-der-ost-west-verbinding-und-dem-stadtring-in-der-landeshauptstadt-dresden?set_language=de (Zugriff am: 12. November 2021).
- [24] DVB, „Vorfahrt für den Nahverkehr“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dvb.de/~ /media/files/die-dvb/nsv_broschuere_nov_2015.pdf
- [25] R. Protzmann, I. Radusch, A. Festag, Fritzsche Richard und Marco Rehme, „iV2X - Integrierte Betrachtung Fahrzeugkommunikation“.
- [26] U.S. Department of Transportation, „History of Intelligent Transportation Systems“.
- [27] *BMVI - Intelligente Verkehrssysteme*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/intelligente-verkehrssysteme-ivs.html> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [28] W. Niewöhner und M. Egelhaaf, „Auf gutem Weg – aber längst nicht am Ziel“, *Internationales Verkehrswesen*, Nr. 67, 2015.
- [29] P. Office, *RICHTLINIE 2010/40/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:207:0001:0013:DE:P DF>
- [30] ETSI, „TR 103 562 - V2.1.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2“, 2019.
- [31] ETSI, „TR 103 083 - V1.1.1: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference document (SRdoc); Technical characteristics for pan European harmonized communications equipment operating in the 5,855 GHz to 5,925 GHz range intended for road safety and traffic management, and for non-safety related ITS applications“, 2014.
- [32] D. Therhaag, „Automatisiertes und vernetztes Fahren auf digitalen Testfeldern in Deutschland: Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf Showcase ÖPNV“. Düsseldorf, 1. Juli 2019.

- [33] *BMVI - Bidirektional, Multimodal, Vernetzt – BiDiMoVe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/bidimove.html> (Zugriff am: 9. November 2021).
- [34] Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH, *Öffentliche Ausschreibung Frankfurt am Main 2020 Frankfurt MIND (Multimodal – Intelligent – Nachhaltig – Digital) Referenznummer der Bekanntmachung: VGF-EU 158/20 2020-12-07*. [Online]. Verfügbar unter: https://ausschreibungen-deutschland.de/727698_Frankfurt_MIND_Multimodal__Intelligent__Nachhaltig__DigitalReferenznummer_der_2020_Frankfurt_am_Main (Zugriff am: 9. November 2021).
- [35] Innovation VGF, *Frankfurt MIND - Innovation VGF*. [Online]. Verfügbar unter: <https://innovation.vgf-ffm.de/frankfurt-mind/> (Zugriff am: 9. November 2021).
- [36] C-ROADS Germany, *Herzlich Willkommen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.c-roads-germany.de/deutsch/projekt/> (Zugriff am: 9. November 2021).
- [37] C-ROADS Germany, *C-ITS Pilotprojekt Dresden*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.c-roads-germany.de/deutsch/c-its-pilotprojekte/c-its-pilot-dresden/> (Zugriff am: 9. November 2021).
- [38] T. Otto, F. Trauzettel, M. Gay, M. Peter und K. Koslowski, „Smart Intersection Approach for automated-assisted Driving“, Paper ID 575, 2021.
- [39] C. Dr.-Ing. Meirich, „Rail2X - Smart Services Abschlussbericht“, *Berichte aus dem DLR-Institut*, Band 36.
- [40] G. Naik, B. Choudhury und J.-M. Park, „IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications“, *IEEE Access*, Jg. 7, S. 70169–70184, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
- [41] M.-D. Stegen und Nätthe Felix, „Ideas for the increase of confidence of ITS messages to achieve legally binding in future“, 2021.
- [42] *European Regional Development Fund - Regional Policy - European Commission*. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/funding/erdf/ (Zugriff am: 14. November 2021).
- [43] OCA e.V., „Leitfaden zur Einführung kommunaler C-ITS Verkehrssysteme“.

- [44] Mdr.de, *Mobilfunknetz 6G: 70 Millionen Euro für Forschung in Dresden und München | MDR.DE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/dresden/sechs-g-netz-mobilfunk-tu-zentrum-forschung-100.html> (Zugriff am: 13. November 2021).
- [45] M. H. C. Garcia *et al.*, „A Tutorial on 5G NR V2X Communications“, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 23, Nr. 3, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3057017.
- [46] *Wissenswertes zu 5G | Informationszentrum Mobilfunk*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/technik/funktionsweise/5g> (Zugriff am: 14. November 2021).
- [47] T. Otto, I. Partzsch, M. Klöppel-Gersdorf, A. Zimmermann und A. Purschwitz, „C-ITS Service “Traffic Signal Priority” via ETSI G5 (CAM and SREM/SSEM)“, Paper ID 573, 2021.
- [48] ETSI, „CEN ISO/TS 19091: Intelligent transport systems - Cooperative ITS - Using V2I and I2V communications for applications related to signalized intersections (ISO/TS 19091:2019)“, 2019.
- [49] ETSI, „EN 302 637-2 - V1.3.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service“, 2014.
- [50] ETSI, „TS 102 894-2 - V1.2.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary“, 2014.
- [51] J. Dipl. Ing. Weingart, „Standardisation of SPaT and MAP“.
- [52] ETSI, „EN 302 637-3 - V1.2.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service“, 2014.
- [53] *Erkennen Sie alles auf einen Blick!* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.jenoptik.de/produkte/lidar-sensoren-technologien> (Zugriff am: 18. November 2021).
- [54] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, *SM PKI Root CA*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/Smart-metering/Smart-Meterin-PKI/SMPKIRootCA/smpkirootca_node.html (Zugriff am: 14. November 2021).

- [55] S. F. Hwang, W. C. Chen, C. R. Dow und N. L. Nguyen, „Efficient RSU Placement Schemes in Urban Vehicular Ad Hoc Networks“, *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, 2019.
- [56] ODG Ocit Developer Group, *Schnittstellen / OCIT*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ocit.org/de/ocit/schnittstellen/> (Zugriff am: 9. November 2021).
- [57] *DE.DIGITAL - GeoNetBake*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Smart-City-Navigator/Projekte/geonetbake.html> (Zugriff am: 19. November 2021).
- [58] *Safari - Testfeld*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.testfeld-berlin.de/index.html> (Zugriff am: 19. November 2021).
- [59] Prof. Dr. Wolfgang Breuer, „Definition: Fristigkeit“, *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 15. Feb. 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/fristigkeit-33240>. Zugriff am: 20. November 2021.
- [60] Gantt.com, *Was ist ein Gantt Diagramm?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gantt.com/ge/> (Zugriff am: 20. November 2021).
- [61] *BWL-Lexikon.de*, ▷ *Reine Projektorganisation » Definition, Erklärung & Beispiele + Übungsfragen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/reine-projektorganisation/> (Zugriff am: 20. November 2021).
- [62] Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, „SACHSEN. Wo die ZUKUNFT beginnt.“, *Gemeinschaftsstand der Bundesländer auf dem ITS Weltkongress 2021*, S. 26–27.
- [63] S. Renz, „Einführung in das Vergaberecht Teil II Wer muss ausschreiben?“, *Brennecke und Partner*, 1. Jan. 2000, 2000. [Online]. Verfügbar unter: https://www.brennecke-rechtsanwaelte.de/Einfuehrung-in-das-Vergaberecht-Teil-II-Wer-muss-ausschreiben_79074. Zugriff am: 20. November 2021.
- [64] Fraunhofer-Allianz Verkehr als Fraunhofer-Leitmarkt Mobilitätswirtschaft, Hg., *Thesen zur Entwicklung und Forschung im Personenverkehr bis 2030: Strategiepapier zur Entwicklung der Forschungsagenda People Mobility der FhG - Ausblick 2030*.
- [65] L. Miao, J. J. Virtusio und K.-L. Hua, „PC5-Based Cellular-V2X Evolution and Deployment“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 21, Nr. 3, 2021, doi: 10.3390/s21030843.

- [66] Prof. Dr.-Ing. habil. Kühn, Wolfgang, „Verkehrsinfrastruktur und hochautomatisiertes Fahren: Digitale Straßendaten als Vorwissen für hochautomatisierte Fahrzeuge“, *Internationales Verkehrswesen*.
- [67] Project ABSOLUT, *Home*. [Online]. Verfügbar unter: www.absolut-project.com (Zugriff am: 14. November 2021).
- [68] *UrbanShuttle - Automatisierter Shuttlebus im Pilotbetrieb*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.urban-shuttle.ovgu.de/Pilotbetrieb/Shuttlebus.html> (Zugriff am: 14. November 2021).
- [69] *Autonome Busse in Deutschland: Liste & Details der Projekte | VDV - Die Verkehrsunternehmen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx> (Zugriff am: 14. November 2021).

V Anhang

Abbildungsverzeichnis des Anhangs

Abbildung A5.1: Situation der Linie 4 zwischen Coswig, Salzstraße und Coswig, Rathaus (urbic®-Auszug).....	A-16
Abbildung A6.1: Übersicht der 20 Knoten mit den höchsten Verlustzeiten und Einordnung Linien 12 und 61 (eigene Darstellung)	A-17
Abbildung A7.1: Projektschritte zur Einführung von V2X.....	A-18

Tabellenverzeichnis des Anhangs

Tabelle A2.1: schematischer Aufbau eines Analogfunktelegrammes nach VDV.....	A-7
Tabelle A3.1: Fahrzeitübersicht Linie 10 Richtung Striesen.....	A-8
Tabelle A3.2: Fahrzeitübersicht Linie 10 Richtung MESSE DRESDEN.....	A-9
Tabelle A3.3: Fahrzeitübersicht Linie 12 Richtung Striesen.....	A-10
Tabelle A3.4: Fahrzeitübersicht Linie 12 Richtung Leutewitz.....	A-11
Tabelle A3.5: Fahrzeitübersicht Linie 61 Richtung Fernsehturm.....	A-12
Tabelle A3.6: Fahrzeitübersicht Linie 61 Richtung Löbtau.....	A-13
Tabelle A3.1: Fahrzeitpotentiale der Hauptlinien im Netz der DVB.....	A-14

A1 Transkript Dr. Lämmer (zu 2.4.4)

Interviewpartner: Herr Dr. Ing Lämmer
Thema: Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Selbststeuerung an
 LSA auf V2X-Anwendungen
Datum: 06.09.2021
Zeit: 15:00 Uhr – 15:40 Uhr
Ort: Chemnitz, Zürich (Telefoninterview)

Abkürzungen:

M.: Herr Morgner
L.: Herr Dr. Lämmer

Zusammenfassende Transkription

M./L.: Begrüßung

M.: kurze Erläuterung Thematik Diplomarbeit

L.: Vorstellung Forschungsprojekte Bahnhof Mitte/Königsbrücker Landstraße

M.: Vorschlag zur Nutzung der Forschungsergebnisse der Freiläuferschaltung
 von Herrn Lämmer als Grundlage für eine Potentialanalyse mit V2X

L.: Nachfrage über Studiengang und Studienort sowie den Kern der
 Diplomarbeit

M.: Erläuterung der Struktur der Diplomarbeit und Darstellung der gegenwärtigen
 Probleme im Liniennetz sowie Darlegung des Grundes für den Anruf

L.: Vorstellung einer Struktur für das Gespräch:

1. Erfassung ÖPNV-Fahrzeuge mit Vor- und Nachteilen des Bake-Funk-
Systems sowie einer kontinuierlichen Erfassung durch V2X

2. „Wie können Ampeln Busse und Straßenbahnen gut signalisieren?“

3. „Welche Rolle soll ÖPNV im vernetzten Straßensystem spielen?“

M.: Zustimmung zur Gesprächsgliederung

L.: Funk-Bake-System: Telegrammaussendung entspricht Belegung eines
 ortsfesten Detektors, es kann geortet werden, dass sich ein Bus/eine
 Straßenbahn zu diesem Zeitpunkt an einem bestimmten Querschnitt befindet

mit zusätzlicher Information über das Fahrziel und die Abfahrbereitschaft des ÖPNV-Fahrzeuges. Telegrammzuverlässigkeit nach eigener Erfahrung in Dresden und anderen Städten ca. 90%. Sehr geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass keine der Anmeldungstypen (Vor- und Hauptanmeldung) ausgesendet werden. Gefahr besteht bei Nichtaussendung der Abmeldung, da unnötig lange Grünphasendehnung. Lösung des Problems durch Timeout („Zwangsabmeldung“). Dafür kann ein bestimmter Zeitwert angenommen werden. In der Selbststeuerung sind dafür Werte für „Grünsekunden“ definiert. Problem bei falscher Auszählzeit: Bus steht noch in der Spur vor dem Signalgeber, wird aber durch ÖV an der Weiterfahrt behindert. Daraus ergibt sich großes Potential der kontinuierlichen Anmeldung, da Grünphasen optimal gedehnt werden können.

- M.: Thema Leistungsfähigkeit Bordrechner, Erkennung der Verkehrslage durch Gesamtsystem.
- L.: Untermauerung des Potentials durch optimale Grünphasengabe, Kontinuierliche Erfassung muss auch die Erfassung des Fahrtzieles des ÖPNV-Fahrzeuges ermöglichen.
- M.: Telegramme werden weiterhin ausgesendet, dadurch ergibt sich eine Redundanz
- L.: Überlagerungen mehrerer Telegramme verschiedener ÖPNV-Fahrzeuges an hochbelasteten Kreuzungen können Problem darstellen.
- M.: Durch kontinuierliche Telegrammübermittlung sind fehlerhafte Telegramme weniger relevant
- L.: Zusammenfassung, Befürwortung der kontinuierlichen Erfassung
- M.: Frage, welche Telegrammdateien zentral ausgewertet werden sollen und welche Daten dezentral an den Anlagen verarbeitet werden können.
- L.: Überleitung zum zweiten Themenkomplex („Wie sollte eine LSA mit den Informationen umgehen, um den Verkehr gut zu regeln?“) Lämmer bezeichnet sich als „Verfechter“ einer flexiblen Steuerung, die eine Koordinierung des Individualverkehrs durchbricht, denn Koordinierung behindert in der Praxis den ÖPNV, da dieser nicht prognostizierbar an den LSA ankommt (aufgrund variierender Fahrgastwechselzeiten, Fahrplanbindung, unterschiedliche Reisezeit je nach Fahrplanlage). Die flexible Steuerung steht dem Konzept der Koordinierung dabei entgegen. Grundlage für die flexible Steuerung ist eine Zielfunktion, die minimale Wartezeiten beinhaltet, außerdem werden die Verkehrsmittel unterschiedlich stark gewichtet.
- M.: Die Entscheidung über die Art der Steuerung ist auch abhängig von politischen Entscheidungen
- L.: Es ist notwendig, eine Steuerung einzubauen, die diese Flexibilität überhaupt ermöglicht. In dieser Steuerung soll je nach Stadt und Gebiet gewichtet werden könne, welche Priorisierung der ÖPNV genießt (metaphorischer

Vergleich mit einem Schieberegler). Die Umsetzung der Priorisierung erfolgt durch den Betreiber der Steuerungsanlage. Zusammenfassung: Es ist sehr einfach dem ÖPNV in einer flexiblen Steuerung „GRÜN“ zu geben, da im Gegensatz zur phasengesteuerten Steuerung keine Berechnungsprozesse notwendig sind, um nach dem Überspringen oder Dehnen einer Phase wieder in die vorhergesehene Steuerung zurückzukehren, dadurch kommt es tlw. zur Überlastung der Anlage.

- M.: Erwähnung der LOS-Stufen in urbic®. Es wird nicht möglich sein, an hochbelasteten Knoten LOS A zu erreichen
- L.: Signalisierung des ÖPNV unterliegt weiteren Besonderheiten: 1. Zuführung der Fußgänger zu den Haltestellen, wenn ein Bus oder eine Straßenbahn einfährt, sollte beachtet werden. 2. Dynamische Zeitinseln, die den sicheren Fahrgastwechsel an Haltestellen durch ein Rückhalten und vorheriges Räumen des IV ermöglichen, müssen realisiert werden. 3. Die priorisierte Einfädelung von Bussen, die an Kreuzungen stehen, muss gewährleistet werden. Im Straßennetz gibt es 4 „große Player“: ÖPNV, Radfahrer, Fußgänger und motorisierter IV. Jeder von diesen Teilnehmern im Straßenverkehr hat grundsätzlich die gleiche Wichtigkeit, Priorisierung je nach Gebiet. Jeder Teilnehmer besitzt verschiedene Eigenschaften: MIV ist sehr „fluid“, Fußgängerverkehr sehr „sporadisch“ (zum Beispiel viel Fußgängerverkehr nach Ankunft eines ÖPNV-Fahrzeuges), Radverkehr ist ebenfalls sporadisch, heterogen und wetterabhängig. „Vernünftiges Miteinander“ muss möglich sein, „Grüne Welle“ für MIV hat negative Folgen vor allem für den Fußgänger, da mehr „GRÜN“ vorgehalten wird, als eigentlich notwendig ist. Bei Optimierung ausschließlich für den ÖPNV erleidet der Fußgänger ebenfalls Nachteile.
- M.: Berücksichtigung weiterer Faktoren des ÖPNV wie Fahrplanlage ist sinnvoll.
- L.: Gegenwärtig sehr schwierig, die Fahrplanlage der ÖPNV-Fahrzeuge zu erfassen (tlw. nicht durch die Auswerteeinheiten ausgewertet) – die Erfassung der Fahrplanlage bietet allerdings großes Potential.
- M.: Durch Bake-Funk ist die Erfassung der ÖPNV-Fahrzeuge im Störfall gegenwärtig nur schwer möglich, es entstehen tlw. nicht realistische Fahrplanlagen
- L.: Bei Änderung des Linienverlaufes ist gegenwärtig eine sehr umständliche Neukonfiguration aller Anlagen auf der Strecke notwendig. Erwähnt den Ansatz, dass eine Zielerfassung des Fahrzeuges nicht nur durch Linie und Route möglich ist, sondern das ÖPNV-Fahrzeug kann auch übermitteln, welche Haltestelle es als nächstes anfahren möchte. Die Haltestellen haben eine eindeutig identifizierbare Nummer und sind unabhängig von Fahrziel und Route in den Anlagen versorgbar
- M.: Interessanter Ansatz, allerdings mit den R09.16-Telegrammen nicht möglich. Zustimmung zur Meinung von L.

- L.: Wenn ÖPNV im Stau hinter MIV steht, muss Schaltung entsprechend intelligent darauf reagieren.
- M.: Erläuterung des V2X-Status-Quo. Durch den zunehmenden Einbau von OBU ist es möglich, den Fahrern ein optimiertes Routing anzubieten, Umsetzung auf langfristige Ebene
- L.: Erwähnung „Microrouting“ als sehr „spannendes Thema“, auch eine Möglichkeit für den Radverkehr. Allerdings hochkomplexe Berechnung, da bei einer flexiblen LSA-Steuerung in Kombination mit flexibler Routenführung unerwartete Fahrtrouten des MIV entstehen. In einer ersten Stufe ist es für die LSA-Steuerung sehr interessant zu erfahren, in welche Richtung die MIV-Fahrzeuge fahren wollen.
- M.: Einigung auf den Punkt, dass ITS und LSA-Management ein wichtiges Element der Verkehrswende sind.
- L.: Zustimmung. Erwähnung der publizierten Forschungsarbeiten zum Thema, unter anderem eine Studie in Luzern zum Thema Selbststeuerung.
- M.: Erwähnung, dass Bezug zu bestimmten Referenzknoten in Ausarbeitung erfolgt. 3ter Themenkomplex bereits abgehakt
- L./M.: Verabschiedung.

Einverständniserklärung zur Erhebung und Verarbeitung von Interviewdaten

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis zur Nutzung der personenbezogenen Daten, die im Rahmen des folgenden Gesprächs erhoben wurden:

Forschungsprojekt: Einführung von V2X bei der DVB AG
Institution: Westsächsische Hochschule Zwickau
Name des Interviewers: Tobias Morgner
Interviewte Person: Dr.-Ing. Stefan Lämmer
Datum des Interviews: 06.09.2021
Ort: Chemnitz, Dresden (Telefoninterview)

Im Rahmen eines Telefoninterviews wurden Daten mit einem Aufnahmegerät erfasst und später verschriftlicht. Die erhobenen Informationen werden dabei ausschließlich zum Ziel der Arbeit am o.g. Forschungsprojekt verwendet. Im Interview erfasste personenbezogene Daten werden mit Abschluss des Forschungsprojektes gelöscht.

Der Speicherung der personenbezogenen Daten zu Dokumentationszwecken kann durch die interviewte Person jederzeit widersprochen werden. Die Teilnahme an dem Gespräch erfolgte freiwillig. Das Gespräch konnte zu jedem Zeitpunkt abgebrochen werden. Das Einverständnis zur Aufzeichnung und Weiterverwendung der Daten kann jederzeit widerrufen werden und die aufgezeichneten Informationen sind jederzeit durch die interviewte Person einsehbar.

Dresden, 22.9.21

Datum, Ort



Interviewte Person

A2 Aufbau eines R09.16 Analogfunktelegrammes nach VDV (zu 2.2.1)

Quelle: [7, Bild 3.3]

Tabelle A2.1: schematischer Aufbau eines Analogfunktelegrammes nach VDV

Bez.	Bedeutung	Infobyte 1		Infobyte 2				Infobyte 3				Zusatzbyte 1-6					
		Modus	Typ	ZV	ZW	ZW	ZW	Länge	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	
R09.10	reduzierte Meldung	1 0 0 1	0 0 0 1	ZV	ZW	ZW	ZW	0 0 0 0	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	
R09.11	Standard - Meldung	Info-byte 1	ZV ZW ZW ZW	0 0 0 1	Info-byte 3	Zusatzbyte 1	MP MP MP MP	MP MP MP MP									
R09.12	Standard - Meldung mit Priorität	Info-byte 1	ZV ZW ZW ZW	0 0 1 0	Info-byte 3	Zusatzbyte 1	PR PR HA HA	R R R R									
R09.13	Standard - Meldung mit Liniennummer	Info-byte 1	ZV ZW ZW ZW	0 0 1 1	Info-byte 3	Zusatzbyte 1	PR PR HA HA	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	LN LN LN LN	
R09.14	Standard - Meldung mit Linien-Kurs-Nr.	Info-byte 1	ZV ZW ZW ZW	0 1 0 0	Info-byte 3	Zusatzbyte 1	Zusatzbyte 2	Zusatzbyte 3	KN KN KN KN	KN KN KN KN	KN KN KN KN	KN KN KN KN	KN KN KN KN	KN KN KN KN	KN KN KN KN	KN KN KN KN	
R09.15	nicht verwendet			0 1 0 1													
R09.16	Maximal - Meldung	Info-byte 1	ZV ZW ZW ZW	0 1 1 0	Info-byte 3	Zusatzbyte 1	Zusatzbyte 2	Zusatzbyte 3	Zusatzbyte 4	ZN ZN ZN ZN	ZN ZN ZN ZN	ZN ZN ZN ZN	ZN ZN ZN ZN	ZN ZN ZN ZN	R ZL ZL ZL	ZL ZL ZL	

Legende:

- HA Anforderung manuell ausgelöst
- KN Kursnummer
- LN Liniennummer
- MP Meldepunktnummer
- PR Priorität
- R Reservebits
- ZV Vorzeichen Fahrplanabweichung
- ZW Betrag der Fahrplanabweichung

A3 Fahrzeitübersichten (zu 2.4.3)

Linie 10 MESSE DRESDEN → Striesen

Tabelle A3.1 Fahrzeitübersicht Linie 10 Richtung Striesen (Quelle DVB)

Haltestelle von	Haltestelle nach	Weg [m]	Fahrdynamische Fahrzeit	Haltestellenaufenthaltszeit	Theoretische Fahrzeit		Planfahrzeit
			ab Haltestelle bis Haltestelle [min:sec]	Fahrzeitklasse A [min:sec]	Fahrdynamische Fahrzeit + Hst. Aufenthalt [min:sec]	[A] [min]	
Messe, Gleisschleife	Messe Dresden	284	00:49	00:00	00:49	1	
Messe Dresden	Messering (HALLE 1)	449	01:10	00:09	01:19	1	
Messering (HALLE 1)	Alberthafen	567	00:55	00:11	01:06	1	
Alberthafen	Vorwerkstraße	195	00:28	00:11	00:39	0	
Vorwerkstraße	Krankenh. Friedrichstadt	331	00:59	00:12	01:11	1	
Krankenh. Friedrichstadt	Weißeritzstraße	465	01:04	00:18	01:22	2	
Weißeritzstraße	Bahnhof Mitte	472	01:28	00:18	01:46	3	
Zwischensumme			06:52	01:19	08:11	9	
Bahnhof Mitte	S-Bf. Freiburger Straße	851	01:52	00:28	02:20	3	
S-Bf. Freiburger Straße	Budapester Straße	623	01:05	00:21	01:26	1	
Budapester Straße	Hauptbahnhof	666	01:29	00:22	01:51	2	
Hauptbahnhof	Gret-Palucca-Straße	496	01:15	00:31	01:46	2	
Gret-Palucca-Straße	Lenneplatz	550	01:09	00:23	01:32	2	
Lenneplatz	Georg-Arnhold-Bad	760	01:34	00:20	01:53	1	
Georg-Arnhold-Bad	Straßburger Platz	313	00:36	00:18	00:54	2	
Zwischensumme			09:00	02:42	11:42	13	
Straßburger Platz	Krhs. St. Joseph-Stift	666	01:50	00:21	02:11	2	
Krhs. St. Joseph-Stift	Fetscherplatz	566	01:49	00:15	02:04	2	
Fetscherplatz	Mosenstraße	483	01:08	00:20	01:27	2	
Mosenstraße	Spenerstraße	404	00:43	00:22	01:05	1	
Spenerstraße	Bergmannstraße	388	00:50	00:23	01:14	1	
Bergmannstraße	Pohlandplatz	472	00:48	00:23	01:11	2	
Pohlandplatz	Gottleubaer Straße	468	00:49	00:21	01:11	1	
Gottleubaer Straße	Altenberger Straße	369	00:40	00:12	00:52	2	
Altenberger Straße	Ludwig-Hartmann-Straße	247	00:32	00:21	00:53	1	
Zwischensumme			09:10	02:58	12:08	14	
Gesamtsumme		11085	25:02	06:59	32:01	36	

Die Haltestellenaufenthaltszeit wird durch das Fahrgastzählsystem ermittelt.

Theoretische Fahrzeit

Fahrplanzeit

Linie 10 Striesen → MESSE DRESDEN

Tabelle A3.2 Fahrzeitübersicht Linie 10 Richtung MESSE DRESDEN (Quelle DVB)

Haltestelle von	Haltestelle nach	Weg [m]	Fahrdynamische Fahrzeit	Haltestellenaufenthaltszeit	Theoretische Fahrzeit	Planfahrzeit [A] [min]
			ab Haltestelle bis Haltestelle [min:sec]	Fahrzeitklasse A [min:sec]	Fahrdynamische Fahrzeit + Hst. Aufenthalt [min:sec]	
Ludwig-Hartmann-Straße	Altenberger Straße	248	00:50	00:18	01:08	1
Altenberger Straße	Gottleubaer Straße	438	00:45	00:22	01:08	1
Gottleubaer Straße	Pohlandplatz	500	00:51	00:13	01:05	2
Pohlandplatz	Bergmannstraße	488	00:49	00:21	01:10	1
Bergmannstraße	Spenerstraße	389	00:46	00:23	01:09	1
Spenerstraße	Mosenstraße	318	00:37	00:20	00:56	1
Mosenstraße	Fetscherplatz	575	00:56	00:22	01:17	2
Zwischensumme			05:34	02:20	07:54	9
Fetscherplatz	Krhs. St.Joseph-Stift	553	01:04	00:23	01:26	2
Krhs. St.Joseph-Stift	Straßburger Platz	566	01:22	00:16	01:37	2
Straßburger Platz	Georg-Arnhold-Bad	563	01:13	00:21	01:34	2
Georg-Arnhold-Bad	Lenneplatz	532	01:17	00:19	01:37	2
Lenneplatz	Gret-Palucca-Straße	522	01:01	00:21	01:22	1
Gret-Palucca-Straße	Hauptbahnhof	631	01:35	00:22	01:57	2
Hauptbahnhof	Budapester Straße	640	01:27	00:34	02:01	1
Budapester Straße	S-Bf. Freiburger Straße	669	01:09	00:21	01:29	2
Zwischensumme			10:07	02:56	13:03	14
S-Bf. Freiburger Straße	Bahnhof Mitte	869	01:53	00:18	02:12	3
Bahnhof Mitte	Weißeritzstraße	478	01:29	00:28	01:57	2
Weißeritzstraße	Krankenh. Friedrichstadt	424	00:59	00:18	01:17	2
Krankenh. Friedrichstadt	Vorwerkstraße	361	01:05	00:19	01:24	1
Vorwerkstraße	Alberthafen	207	00:29	00:15	00:43	1
Alberthafen	Messering (HALLE 1)	503	00:50	00:08	00:58	1
Messering (HALLE 1)	Messe Dresden	446	01:07	00:14	01:21	1
Messe Dresden	Messe, Gleisschleife	510	01:26	00:13	01:39	2
Zwischensumme			09:18	02:13	11:31	13
Gesamtsumme		11430	24:59	07:29	32:28	36

Linie 12 Leutewitz → Striesen

Tabelle A3.3 Fahrzeitübersicht Linie 12 Richtung Striesen (Quelle DVB)

Haltestelle von	Haltestelle nach	Weg [m]	Fahrdynamische Fahrzeit	Haltestellenaufenthaltszeit	Theoretische Fahrzeit	Planfahrzeit [A] [min]
			ab Haltestelle bis Haltestelle [min:sec]	Fahrzeitklasse A [min:sec]	Fahrdynamische Fahrzeit + Hst. Aufenthalt [min:sec]	
Leutewitz	Gottfried-Keller-Straße	561	01:43	00:00	01:43	2
Gottfried-Keller-Straße	Cossebauder Straße	234	01:05	00:15	01:20	1
Cossebauder Straße	Ockerwitzer Straße	392	01:06	00:15	01:21	1
Ockerwitzer Straße	Altotta	393	01:04	00:17	01:21	1
Altotta	Birkenhainer Straße	467	01:00	00:21	01:21	2
Birkenhainer Straße	Pennricher Straße	427	00:45	00:17	01:02	1
Zwischensumme			06:42	01:25	08:07	8
Pennricher Straße	Conertplatz	414	00:55	00:21	01:17	1
Conertplatz	Bünaustraße	552	02:03	00:20	02:23	2
Bünaustraße	Tharandter Straße	393	00:42	00:21	01:04	2
Tharandter Straße	Oederaner Straße	496	01:35	00:29	02:04	2
Oederaner Straße	Rosenstraße	318	00:37	00:15	00:52	1
Rosenstraße	S-Bf. Freiburger Straße	677	01:25	00:13	01:39	2
S-Bf. Freiburger Straße	Schwimmh. Freib. Platz	340	00:38	00:23	01:01	1
Zwischensumme			07:56	02:23	10:19	11
Schwimmh. Freib. Platz	Postplatz	639	01:55	00:17	02:12	2
Postplatz	Prager Straße	709	01:37	00:24	02:01	2
Prager Straße	Pirnaischer Platz	522	01:25	00:33	01:57	2
Pirnaischer Platz	Deutsches Hygiene-Museum	533	01:12	00:32	01:44	2
Deutsches Hygiene-Museum	Straßburger Platz	318	00:37	00:14	00:51	2
Straßburger Platz	Krhs. St. Joseph-Stift	666	01:54	00:21	02:15	2
Krhs. St. Joseph-Stift	Fetscherplatz	566	01:49	00:15	02:04	2
Fetscherplatz	Gabelsbergerstraße	424	01:05	00:20	01:24	2
Gabelsbergerstraße	Blasewitzer/Fetscherstr	362	00:50	00:19	01:09	2
Blasewitzer/Fetscherstr	Augsburger Straße	407	01:08	00:22	01:29	2
Zwischensumme			13:31	03:37	17:08	20
Augsburger Straße	Königsheimplatz	292	00:35	00:26	01:01	1
Königsheimplatz	Lene-Glatzer-Straße	378	00:47	00:20	01:07	1
Lene-Glatzer-Straße	Prellerstraße	458	00:53	00:16	01:09	1
Prellerstraße	Schillerplatz	531	00:53	00:15	01:08	2
Schillerplatz	Jüngststraße	498	01:15	00:33	01:48	2
Jüngststraße	Heinrich-Schütz-Straße	376	00:45	00:18	01:03	1
Heinrich-Schütz-Straße	Gustav-Freytag-Straße	507	01:18	00:16	01:34	2
Gustav-Freytag-Straße	Ludwig-Hartmann-Straße	530	01:28	00:14	01:42	1
Zwischensumme			07:53	02:38	10:31	11
Gesamtsumme		14380	36:02	10:03	46:05	50

Linie 12 Striesen → Leutewitz

Tabelle A3.4 Fahrzeitübersicht Linie 12 Richtung Leutewitz (Quelle DVB)

Haltestelle von	Haltestelle nach	Weg [m]	Fahrdynamische Fahrzeit	Haltestellenaufenthaltszeit	Theoretische Fahrzeit	Planfahrzeit [A] [min]
			ab Haltestelle bis Haltestelle [min:sec]	Fahrzeitklasse A [min:sec]	Fahrdynamische Fahrzeit + Hst. Aufenthalt [min:sec]	
Ludwig-Hartmann-Straße	Ludwig-Hartmann-Straße	100	00:28	00:19	00:47	1
Ludwig-Hartmann-Straße	Gustav-Freytag-Straße	405	00:57	00:20	01:17	1
Gustav-Freytag-Straße	Heinrich-Schütz-Straße	567	01:14	00:13	01:26	1
Heinrich-Schütz-Straße	Jüngststraße	497	00:57	00:16	01:13	1
Jüngststraße	Schillerplatz	527	01:00	00:17	01:18	3
Schillerplatz	Prellerstraße	368	00:40	00:34	01:15	1
Zwischensumme			05:17	02:00	07:16	8
Prellerstraße	Lene-Glatzer-Straße	430	00:53	00:15	01:08	1
Lene-Glatzer-Straße	Königsheimplatz	515	00:51	00:17	01:08	2
Königsheimplatz	Augsburger Straße	307	00:36	00:21	00:57	1
Augsburger Straße	Blasewitzer/Fetscherstr.	261	00:33	00:29	01:02	2
Blasewitzer/Fetscherstr	Gabelsbergerstraße	503	01:15	00:22	01:37	1
Gabelsbergerstraße	Fetscherplatz	443	01:06	00:18	01:24	2
Fetscherplatz	Krhs. St.Joseph-Stift	553	01:04	00:23	01:26	2
Zwischensumme			06:18	02:25	08:43	11
Krhs. St.Joseph-Stift	Straßburger Platz	566	01:28	00:16	01:44	2
Straßburger Platz	Deutsches Hygiene-Museum	467	01:03	00:21	01:24	1
Deutsches Hygiene-Museum	Pirnaischer Platz	529	01:23	00:19	01:41	3
Pirnaischer Platz	Prager Straße	522	01:34	00:32	02:06	2
Prager Straße	Postplatz	551	01:29	00:33	02:02	2
Postplatz	Schwimmh. Freib. Platz	598	01:43	00:25	02:08	2
Schwimmh. Freib. Platz	S-Bf. Freiburger Straße	343	00:39	00:19	00:58	1
S-Bf. Freiburger Straße	Rosenstraße	667	01:22	00:21	01:43	2
Rosenstraße	Oederaner Straße	341	00:38	00:13	00:51	1
Oederaner Straße	Tharandter Straße	522	01:14	01:26	02:41	2
Tharandter Straße	Bünaustraße	348	01:14	01:38	02:52	1
Zwischensumme			13:47	06:22	20:10	19
Bünaustraße	Conertplatz	644	01:59	00:21	02:21	2
Conertplatz	Pennricher Straße	300	00:38	00:20	00:58	1
Pennricher Straße	Birkenhainer Straße	497	01:03	00:19	01:22	1
Birkenhainer Straße	Altotta	467	01:13	00:16	01:29	2
Altotta	Ockerwitzer Straße	413	01:10	00:18	01:28	1
Ockerwitzer Straße	Cossebauder Straße	389	01:10	00:17	01:27	2
Cossebauder Straße	Gottfried-Keller-Straße	219	00:35	00:18	00:53	1
Gottfried-Keller-Straße	Leutewitz	787	02:38	00:14	02:52	2
Zwischensumme			10:27	02:23	12:50	12
Gesamtsumme		14646	35:49	13:10	48:58	50

Linie 61 Löbtau → Fernsehturm

Tabelle A3.5 Fahrzeitübersicht Linie 61 Richtung Fernsehturm (Quelle DVB)

Haltestelle von	Haltestelle nach	Weg [m]	Fahrdynamische Fahrzeit	Haltestellenaufenthaltszeit	Theoretische Fahrzeit		Planfahrzeit [A] [min]
			ab Haltestelle bis Haltestelle [min:sec]	Fahrzeitklasse A [min:sec]	Fahrdynamische Fahrzeit + Hst. Aufenthalt [min:sec]		
Löbtau Gröbelstraße	Tharandter Straße	239	01:01	00:00	01:01		2
Tharandter Straße	Zwickauer Straße	947	01:22	00:29	01:51		2
Zwickauer Straße	Chemnitzer Straße	336	00:38	00:12	00:50		1
Chemnitzer Straße	Bernhardstraße	390	00:42	00:18	01:00		1
Bernhardstraße	Nürnberger Platz	482	00:59	00:22	01:21		2
Nürnberger Platz	Technische Universität	525	00:52	00:22	01:13		2
Technische Universität	Staats- u. Unibibliothe	472	00:48	00:20	01:08		2
Staats- u. Unibibliothe	Zellescher Weg	584	00:56	00:20	01:16		1
Zellescher Weg	C.-David-Friedrich-Str.	681	01:03	00:19	01:21		2
C.-David-Friedrich-Str.	Wasaplatz	274	00:40	00:23	01:03		2
Zwischensumme			09:00	03:04	12:04		17
Wasaplatz	S-Bf. Strehlen	386	00:55	00:22	01:16		2
S-Bf. Strehlen	Tiergartenstraße	959	01:55	00:24	02:19		2
Tiergartenstraße	Grunaer Weg	774	01:27	00:22	01:49		2
Grunaer Weg	Zwinglistraße	487	01:01	00:17	01:18		2
Zwinglistraße	Schneebergstraße	551	01:07	00:30	01:37		1
Schneebergstraße	Schlüterstraße	226	00:30	00:18	00:48		2
Schlüterstraße	Pohlandplatz	550	00:53	00:18	01:12		1
Pohlandplatz	Dornblüthstraße	470	01:07	00:16	01:23		2
Dornblüthstraße	Niederwaldstraße	504	01:25	00:23	01:48		2
Niederwaldstraße	Jacobistraße	538	01:21	00:22	01:43		1
Jacobistraße	Wägnerstraße	302	00:36	00:16	00:51		1
Wägnerstraße	Schillerplatz	387	01:29	00:11	01:40		2
Zwischensumme			13:45	03:58	17:43		20
Schillerplatz	Körnerplatz	747	01:47	00:44	02:31		3
Körnerplatz	Rißweg	614	01:33	00:23	01:56		1
Rißweg	Steglichstraße	670	01:19	00:07	01:26		2
Steglichstraße	Tännichtstraße	269	00:33	00:13	00:46		1
Tännichtstraße	Elisabethstraße	663	01:12	00:13	01:25		1
Elisabethstraße	Grundstraße	724	01:50	00:13	02:03		2
Grundstraße	Bühlau Ullersdorfer Pl.	507	01:07	00:18	01:25		3
Zwischensumme			09:20	02:10	11:30		13
Bühlau Ullersdorfer Pl.	Cunewalder Straße	270	00:55	00:28	01:23		2
Cunewalder Straße	Quohrener Straße	613	01:11	00:13	01:24		1
Quohrener Straße	Hornweg	375	00:45	00:06	00:51		1
Hornweg	Gönnsdorf	875	02:03	00:17	02:20		2
Gönnsdorf	Zachengrundring	338	00:49	00:18	01:07		1
Zachengrundring	Pappritz	1045	01:25	00:15	01:41		2
Pappritz	Fernsehturm	772	01:25	00:17	01:42		2
Zwischensumme			08:33	01:54	10:27		11
Summe		19546	40:38	11:06	51:44		61

Linie 61 Fernsehturm → Löbtau

Tabelle A3.6 Fahrzeitübersicht Linie 61 Richtung Löbtau (Quelle DVB)

Haltestelle von	Haltestelle nach	Weg [m]	Fahrdynamische Fahrzeit	Haltestellenaufenthaltszeit	Theoretische Fahrzeit	Planfahrzeit [A] [min]
			ab Haltestelle bis Haltestelle [min:sec]	Fahrzeitklasse A [min:sec]	Fahrdynamische Fahrzeit + Hst. Aufenthalt [min:sec]	
Fernsehturm	Fernsehturm	190	00:40	00:00	00:40	1
Fernsehturm	Pappritz	632	00:59	00:18	01:17	1
Pappritz	Zachengrundring	1191	01:37	00:17	01:55	2
Zachengrundring	Gönnsdorf	303	00:45	00:14	00:59	1
Gönnsdorf	Hornweg	768	01:42	00:20	02:02	2
Hornweg	Quohrener Straße	321	00:40	00:19	00:59	1
Quohrener Straße	Cunewalder Straße	516	00:58	00:10	01:07	1
Cunewalder Straße	Bühlau Ullersdorfer Pl.	487	01:17	00:12	01:29	2
Bühlau Ullersdorfer Pl.	Grundstraße	386	00:50	00:25	01:15	1
Zwischensumme			09:28	02:15	11:43	12
Grundstraße	Elisabethstraße	809	01:33	00:15	01:48	2
Elisabethstraße	Tännichtstraße	599	01:12	00:14	01:26	1
Tännichtstraße	Steglichstraße	306	00:36	00:13	00:48	1
Steglichstraße	Rißweg	692	01:20	00:14	01:34	1
Rißweg	Körnerplatz	571	01:35	00:10	01:45	2
Körnerplatz	Schillerplatz	744	01:47	00:22	02:08	3
Zwischensumme			04:42	01:27	09:29	10
Schillerplatz	Wagnerstraße	438	01:28	00:32	01:59	2
Wagnerstraße	Jacobistraße	276	00:34	00:12	00:46	1
Jacobistraße	Niederwaldstraße	576	01:17	00:20	01:37	2
Niederwaldstraße	Dornblüthstraße	386	01:04	00:24	01:28	2
Dornblüthstraße	Pohlandplatz	389	00:53	00:24	01:17	2
Pohlandplatz	Schlüterstraße	749	01:08	00:17	01:25	2
Schlüterstraße	Schneebergstraße	332	00:44	00:18	01:02	1
Schneebergstraße	Zwinglistraße	429	01:01	00:17	01:18	2
Zwinglistraße	Grunaer Weg	304	00:42	00:23	01:06	2
Grunaer Weg	Tiergartenstraße	890	01:38	00:18	01:57	2
Tiergartenstraße	S-Bf. Strehlen	1043	02:06	00:20	02:26	2
Zwischensumme			12:35	03:45	16:20	20
S-Bf. Strehlen	Wasaplatz	288	00:45	00:25	01:10	2
Wasaplatz	C.-David-Friedrich-Str.	425	00:43	00:18	01:01	2
C.-David-Friedrich-Str.	Zellescher Weg	692	01:04	00:25	01:29	2
Zellescher Weg	Staats- u. Unibibliothe	531	00:52	00:22	01:14	1
Staats- u. Unibibliothe	Technische Universität	453	00:47	00:20	01:07	1
Technische Universität	Nürnbergger Platz	436	00:45	00:23	01:08	2
Nürnbergger Platz	Bernhardstraße	486	01:01	00:21	01:22	2
Bernhardstraße	Chemnitzer Straße	323	00:37	00:22	00:59	1
Chemnitzer Straße	Zwickauer Straße	412	00:44	00:20	01:03	1
Zwickauer Straße	Tharandter Straße	910	01:32	00:11	01:43	3
Tharandter Straße	Löbtau Gröbelstraße	189	00:45	00:28	01:12	3
Zwischensumme			09:34	03:54	13:28	20
Summe		19472	36:19	11:21	51:00	62

A4 Fahrzeitpotentiale (zu 2.4.3)

Tabelle A4.1: Fahrzeitpotentiale der Hauptlinien im Netz der DVB (eigene Darstellung)

Straßenbahn					Bus				
Linie	Richtung	t_f	t_p	Differenz	Linie	Richtung	t_f	t_p	Differenz
1	Leutewitz	45:41	48:00	02:19	61	Löbtau (Weißig)	56:14	01:05:00	08:46
1	Prohlis	46:30	47:00	00:30	61	Weißig	55:33	01:06:00	10:27
2	Gorbitz	51:35	53:00	01:25	62	Dözschen	33:13	38:00	04:47
2	Kleinzschachwitz	50:55	53:00	02:05	62	Johannstadt	33:56	39:00	05:04
3	Wilder Mann	36:04	37:00	00:56	63	Pillnitz	01:05:04	01:11:00	05:56
3	Coschütz	36:39	38:00	01:21	63	Löbtau	01:05:30	01:11:00	05:30
4	Weinböhla	01:18:53	01:21:00	02:07	64	Kaditz	55:13	02:00	06:47
4	Laubegast	01:21:15	01:19:00	00:00	64	Reick	55:03	02:00	06:57
6	Niedersedlitz	57:34	59:00	01:26	65	Luga	39:32	44:00	04:28
6	Wölfnitz	57:52	01:00	03:08	65	Schillerplatz_L	39:28	43:00	03:32
7	Weixdorf	01:04:21	01:04:00	00:00	66	Lockwitz	44:05	53:00	08:55
7	Pennrich	01:02:38	01:01:00	00:00	66	Freital	43:05	52:00	08:55
8	Hellerau	34:41	35:00	00:19	70	Industriegebiet	01:11:25	01:15:00	03:35
8	Südvorstadt	33:41	34:00	00:19	70	Gompitz	01:09:23	01:13:00	03:37
9	Kaditz	49:45	51:00	01:15	75	Cossebaude	55:21	01:02:00	06:39
9	Prohlis	48:27	49:00	00:33	75	Goppeln	55:56	01:03:00	07:04
10	MESSE DRESDEN	32:28	36:00	03:32					
10	Striesen	32:01	36:00	03:59					
11	Zschertnitz	45:07	47:00	01:53					
11	Bühlau	44:32	48:00	03:28					
12	Leutewitz	48:58	50:00	01:02					
12	Striesen	46:05	50:00	03:55					
13	Mickten	46:39	50:00	03:21					
13	Prohlis	46:42	49:00	02:18					
12 Linien					8 Linien				
Summe				41:11	Summe				01:40:59
Gesamt									02:22:10

t_f = theoretische Fahrzeit

t_p = fahrplanmäßige Fahrzeit

Anmerkungen zur Tabelle:

- Um ein realistisches Fahrzeitpotential zu erhalten und Doppelungen zu vermeiden, wurden bei Linien mit Ästen (61, 66, 65) jeweils nur die längeren Äste aufgeführt.
- Die auf einem großen Abschnitt parallel verkehrenden und sich zu einem 10-Minuten-Takt ergänzenden Linien 70/80 wurden in der Tabelle nur einmal dargestellt, um einen 10-Minuten-Takt zu simulieren. Dafür wurde Linie 70 ausgewählt, da deren Linienweg länger ist.

- Linie 75 ist seit 06.09.2021 in Linie 68 umbenannt und damit auch als „Premiumsbuslinie“ mit dichter Taktung unterwegs. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Tabelle wurde die Linie noch
- Bei den Linien 4 und 7 gibt es tlw. kein Potential, bzw. wäre sogar negativ und wurde deshalb auf 0 festgesetzt, da die durch das Fahrgastzählssystem ermittelten Fahrgastwechselzeiten im Innenstadtbereich sehr hoch sind und die theoretische Fahrzeit damit länger als praktisch erforderlich ist. Vermutlich sind in dieser Fahrgastwechselzeit auch Haltestellenaufenthaltszeiten an Haltestellen unmittelbar vor hochbelasteten Knoten enthalten. Eine Differenzierung kann das gegenwärtige System nicht vornehmen. Eine Ermittlung realistischer Fahrgastwechselzeiten fand unter anderem im Rahmen der Potentialanalyse der Straßenbahnlinie 6 statt. [17]

A5 Darstellung Verkehrssituation Linie 4 (zu 3.4.1)



Abbildung A5.1: Situation der Linie 4 zwischen Coswig, Salzstraße und Coswig, Rathaus (urbic®-Auszug)

Legende:

- Verlauf Straßenbahnlinie 4
- Signalisierte Bahnübergänge

A6 Verlustreichste LSA-Knoten in Dresden (zu 4.2.2)

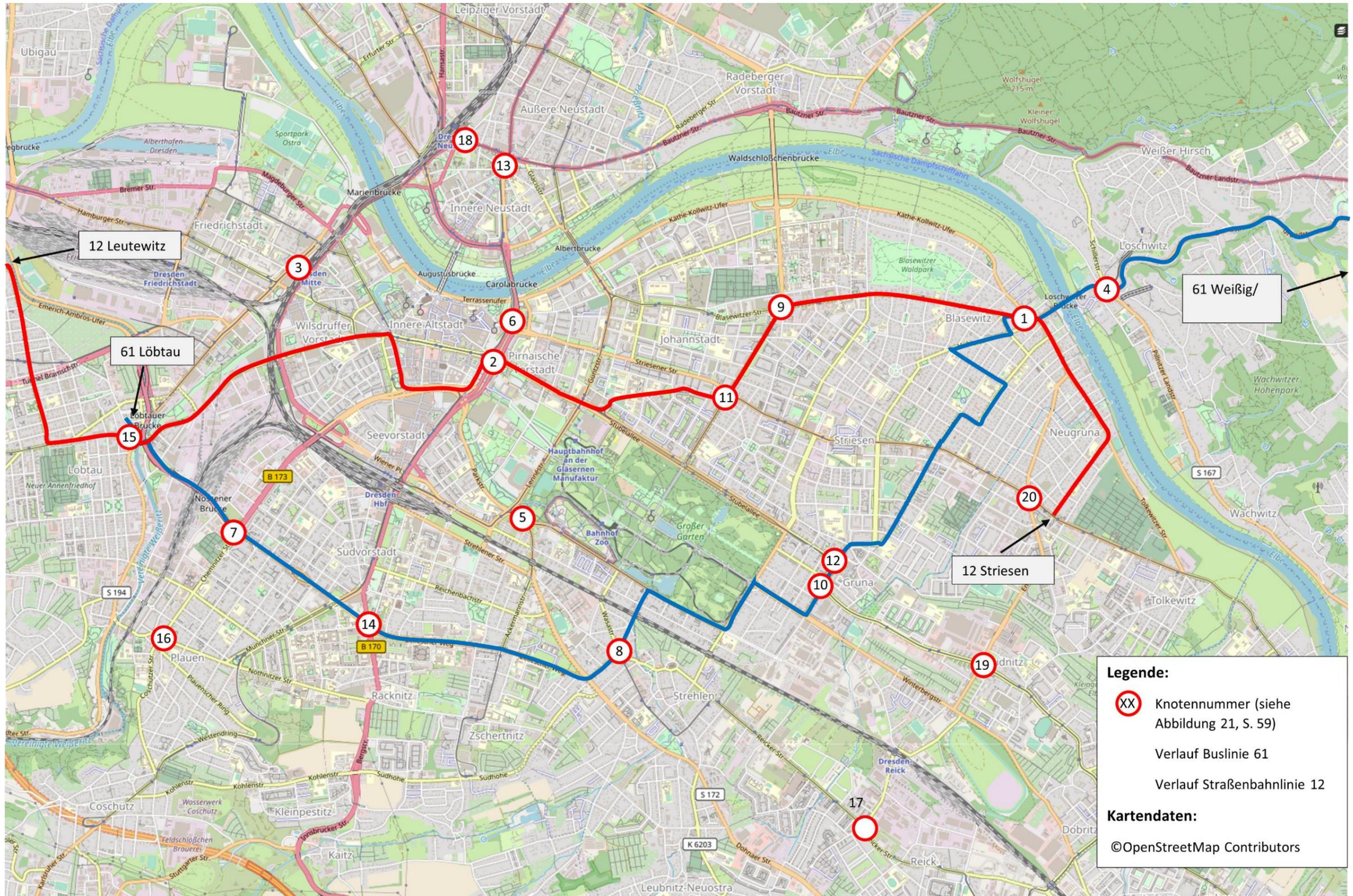


Abbildung A6.1: Übersicht der 20 Knoten mit den höchsten Verlustzeiten und Einordnung Linien 12 und 61 (eigene Darstellung)

A7 Projektschritte zur Einführung von V2X (zu 4.2)

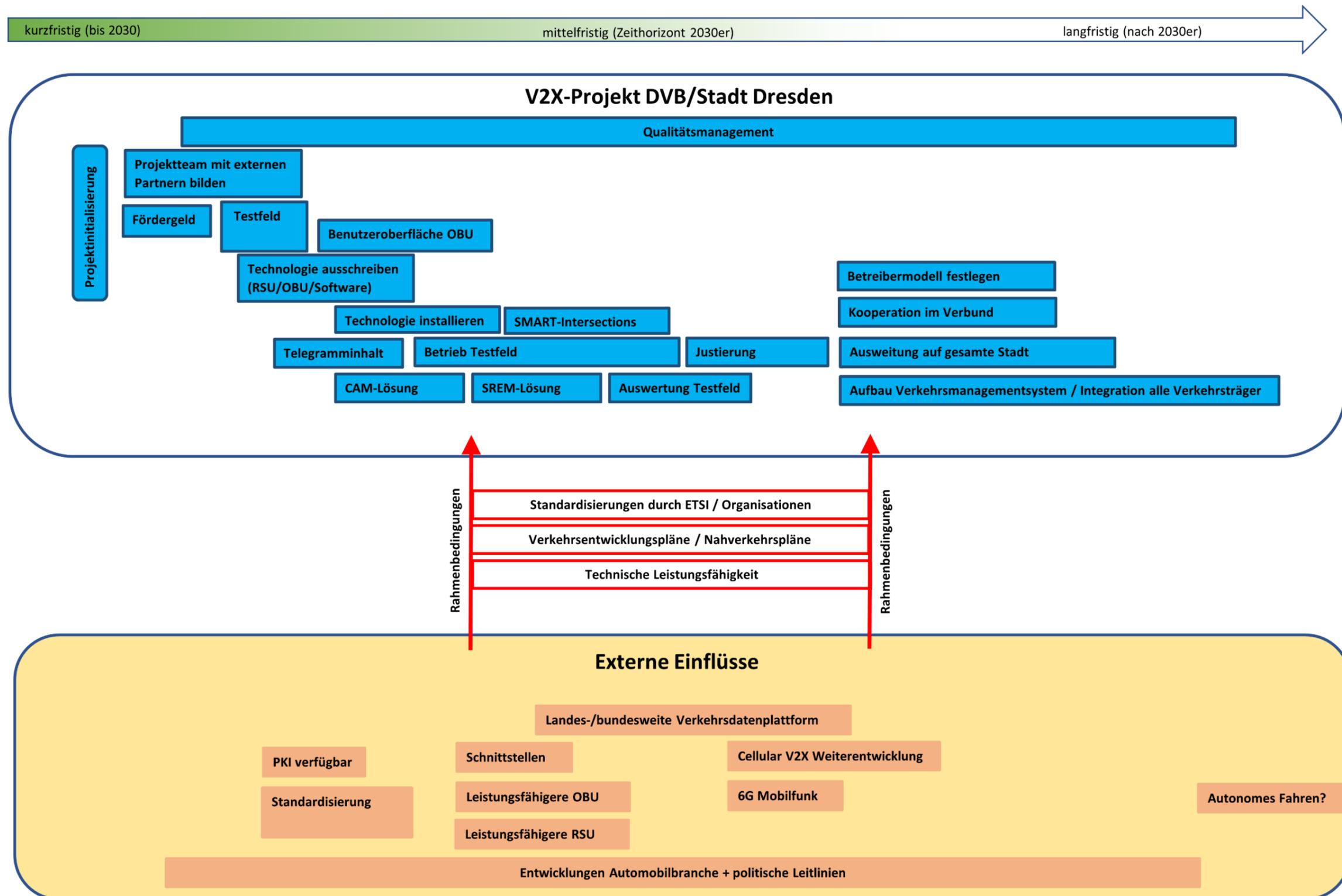


Abbildung A7.1: Projektschritte zur Einführung von V2X (eigene Darstellung)