

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Abschlussbericht, Oktober 2025

Auftraggeber
Landeshauptstadt Magdeburg
Dezernat für Umwelt und
Stadtentwicklung
An der Steinkuhle 6
39128 Magdeburg



Quelle: www.mvbnet.de

Auftragnehmer
VCDB VerkehrsConsult
Dresden-Berlin GmbH
Könneritzstraße 31
01067 Dresden
Tel. 0351 4823 100
Fax 0351 4823 109
dresden@vcdb.de
www.vcdb.de

Standorte
Dresden
Berlin
Magdeburg
Leipzig

Ansprechpartner
Matthias Zöbisch
m.zoebisch@vcdb.de

Dennis Honke
d.honke@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Aufgabenstellung.....	13
2	Rahmenbedingungen	15
2.1	Magdeburger Systemarchitektur	15
2.2	Parallele Vorhaben.....	15
2.3	Projektziele	16
3	Kommunikations- und Anmeldeysteme	17
3.1	Marktanalyse	17
3.1.1	Infrarot (Aktuelles System)	17
3.1.2	Analogfunk.....	18
3.1.3	Digitalfunk.....	20
3.1.4	Öffentlicher Mobilfunk	23
3.1.5	C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems)	27
3.1.6	Weitere Systeme	35
3.2	Vergleich zwischen dezentraler und zentraler ÖPNV-Bevorrechtigung.....	37
3.2.1	Dezentrale ÖPNV-Bevorrechtigung	37
3.2.2	Zentrale ÖPNV-Bevorrechtigung.....	38
3.2.3	Vergleich anhand des Systems „Mobilfunk“	39
3.3	Zusammenfassung und Fazit.....	40
4	Anmeldesystem der Zukunft für die Landeshauptstadt Magdeburg	41
4.1	Technische Betrachtung Datenübertragung ÖPNV zu LSA	41
4.1.1	Rückfallebene	41
4.1.2	Ausfallsicherheit	42
4.1.3	Ferndiagnose	44
4.1.4	Priorisierung ÖPNV-Fahrzeuge untereinander	45
4.1.5	Rückkanal LSA zu Fahrzeug.....	47

4.1.6	Kompatibilität zur vorhandenen Infrastruktur	48
4.1.7	Informations-Sicherheit	49
4.1.8	Betrachtung besonderer Funktionen.....	50
4.2	C-ITS Funktionen im Vergleich mit TETRA und Mobilfunk	51
4.2.1	TETRA.....	51
4.2.2	Mobilfunk.....	51
4.3	Finanzielle Bewertung der Systeme.....	52
4.3.1	Übersicht der Investitions- und Betriebskosten.....	52
4.3.2	Bewertung der Investitions-/ und Betriebskosten	55
4.3.3	Finanzielle Förderung von ÖPNV-Beschleunigungssystemen	57
4.4	Organisatorische Bewertung	59
4.4.1	Migrationspfad zur Implementierung.....	59
4.4.2	Wechselwirkungen zu vorhandenen Systemen	61
4.4.3	Standardisierung und Harmonisierung	61
4.5	Variantenvergleich der ÖPNV-Bevorrechtigung (dezentral & zentral)...	62
4.6	Zusammenfassung und Handlungsempfehlung.....	63
5	Leitstellenbetrachtung	65
6	Qualitätsanalysen	79
6.1	System urbic®	79
6.2	Knotenpunktanalysen	79
6.2.1	Knotenübersicht und Methodik.....	79
6.2.2	Verkehrszählung Knotenpunkt Breiter Weg / Ernst-Reuter-Allee.....	81
6.2.3	Interpretation für den Knoten Breiter Weg / Ernst-Reuter-Allee	81
6.2.4	Fazit aus den quantitativen Auswertungen	85
6.3	Fahrtverlaufsanalysen.....	87
6.4	Analyse der Knotenpunktzufahrten	88
6.5	Workshops mit dem Fahrpersonal.....	90
6.6	Handlungsansätze.....	90
7	Maßnahmen	92
7.1	Maßnahmenstruktur.....	92
7.2	Maßnahmenübersicht	92
7.3	LSA-bezogene Maßnahmen	93

7.4	Ansätze zur Verkehrsanlagengestaltung.....	97
7.4.1	Maßnahme I1.....	99
7.4.2	Maßnahme I2.....	100
7.4.3	Maßnahme I3.....	102
7.4.4	Maßnahme I4.....	104
7.4.5	Maßnahmen I5	109
7.4.6	Maßnahme I6.....	110
7.4.7	Maßnahme I7.....	112
7.4.8	Stellungnahme SPA Magdeburg zu den Maßnahmen I1 bis I7	115
7.4.9	Maßnahme A1 (Festschreibung C-ITS als Zielsystem)	116
7.4.10	Maßnahme A2 (Etablierung Mobilfunk als Rückfallebene)	117
7.4.11	Maßnahme A3 (Förderantrag)	117
7.4.12	Maßnahme A4 (Leitstelle Stufe 1)	118
7.4.13	Maßnahme A5 (Leitstelle Stufe 2)	118
7.4.14	Maßnahme A6 (Qualitätserfassung an Lichtsignalanlagen)	119
7.4.15	Maßnahme A7 (verstärkte Nutzung LIVEtsp).....	119
7.4.16	Maßnahme A8 (Erweiterung Modulbibliothek)	120
7.4.17	Maßnahme L1 (LSA 143).....	120
7.4.18	Maßnahme L2 (LSA 342).....	122
7.4.19	Maßnahme L3.....	124
7.5	Nutzenbetrachtung.....	126
8	Fazit	129
	Anhangsverzeichnis	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau ÖPNV-Bevorrechtigung mittels Infrarottechnologie	18
Abbildung 2:	Aufbau ÖPNV-Bevorrechtigung mittels Analogfunk	19
Abbildung 3:	Digitalfunk Trunked Mode (TMO) vs. Direct Mode (DMO)	21
Abbildung 4:	Mobilfunk Evolution des Mobilfunks	23
Abbildung 5:	Mobilfunk Aufbau Cellulare V2X	27
Abbildung 6:	C-ITS Allgemeiner Aufbau und Struktur der Cooperative Awareness Message (CAM)	28
Abbildung 7:	C-ITS Systemübersicht für V2X-basierte ÖPNV-Priorisierung	29
Abbildung 8:	C-ITS Musterarchitektur für eine „Zentralisierte Busbevorrechtigung“	31
Abbildung 9:	C-ITS GLOSA Funktionsweise	33
Abbildung 10:	C-ITS Abbiege Assistent Funktionsweise	34
Abbildung 11:	Aufbau ÖPNV-Bevorrechtigung mittels Induktionsschleife	35
Abbildung 12:	Oberleitungskontakt Typ 8474 von ESN Bahngeräte GmbH	36
Abbildung 13:	Schlüsselkontakte am Lennéplatz (Dresden) mit 4 möglichen Ausfahrrichtungen	37
Abbildung 14:	Funktionsweise dezentrale ÖPNV-Bevorrechtigung	38
Abbildung 15:	Funktionsweise zentrale ÖPNV-Bevorrechtigung	38
Abbildung 16:	Vergleich dezentrale und zentrale Systemarchitektur	40
Abbildung 17:	Integrationspfad C-ITS	59
Abbildung 18:	Integrationspfad TETRA	60
Abbildung 19:	Integrationspfad Mobilfunk	60
Abbildung 20:	Variantenvergleich ÖPNV-Bevorrechtigung.....	63
Abbildung 21:	Bewertung aller Varianten der dezentrale und zentrale ÖPNV-Bevorrechtigung	63
Abbildung 22:	SWOT-Analyse – Prinzipieller Aufbau	65
Abbildung 23:	SWOT-Analyse – Zielstellung und Differenzierung der Systeme	67
Abbildung 24:	SWOT-Analyse – Schnittmengen	67
Abbildung 25:	SWOT-Analyse – Fragestellungen	68
Abbildung 26:	SWOT-Analyse – Variante 1 Stärken und Schwächen	68
Abbildung 27:	SWOT-Analyse – Variante 1 Chancen und Risiken	69
Abbildung 28:	SWOT-Analyse – Variante 1 Ergebnisse	69
Abbildung 29:	SWOT-Analyse – Variante 2 Stärken und Schwächen	70
Abbildung 30:	SWOT-Analyse – Variante 2 Chancen und Risiken	70
Abbildung 31:	SWOT-Analyse – Variante 2 Ergebnisse	71

Abbildung 32: SWOT-Analyse – Variante 3 Stärken und Schwächen	71
Abbildung 33: SWOT-Analyse – Variante 3 Chancen und Risiken	72
Abbildung 34: SWOT-Analyse – Variante 3 Ergebnisse	72
Abbildung 35: Resultat der Leitstellenanalyse	73
Abbildung 36: Migrationskonzept Leitstellen	75
Abbildung 37: Gegenüberstellung Effizienzsteigerung	76
Abbildung 38: Gegenüberstellung Ressourcennutzung	76
Abbildung 39: Gegenüberstellung Flexibilität und Skalierbarkeit	76
Abbildung 40: Gegenüberstellung soziale Interaktion	77
Abbildung 41: Gegenüberstellung Kosteneinsparung.....	77
Abbildung 42: Variantenübersicht	78
Abbildung 43: Auswertung der ÖPNV-Verlustzeiten – Knoten 342 Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg	82
Abbildung 44: Auswertung der Wartezeiten des Fußgänger- und Radverkehrs – Knoten 342 Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg.....	83
Abbildung 45: Auswertung der Kfz-Wartezeiten – Knoten 342 Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg.....	84
Abbildung 46: Weg-Geschwindigkeits-Diagramm der Linie 1	87
Abbildung 47: Auswertung der Knotenpunktzufahrten – Knoten 143 Kastanienstraße / Lübecker Str.	89
Abbildung 48: Reisezeitenverteilung auf Knotenpunktzufahrten – Knoten 143 Kastanienstraße / Lübecker Str.	89
Abbildung 49: Auszug eines kommentierten Geschwindigkeit-Weg-Diagramms	91
Abbildung 50: Übersicht der räumlich verortbaren Maßnahmen.....	93
Abbildung 51: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Haeckelstraße/Museum und Verkehrsbetriebe	100
Abbildung 52: Lageplan Maßnahme I2	101
Abbildung 53: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Magdeburg Hauptbahnhof und Wilhelmstädter Platz	102
Abbildung 54: Lageplan Maßnahme I3 – direktes Linksabbiegen des Radverkehrs	103
Abbildung 55: Lageplan Maßnahme I4 (Hauptvariante).....	105
Abbildung 56: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Nicolaiplatz und Kastanienstraße	109
Abbildung 57: Lageplan Maßnahme I5	110
Abbildung 58: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Südring und Jordanstraße	111
Abbildung 59: Lageplan Maßnahme I6	112
Abbildung 60: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Jordanstraße und Halberstädter Straße / Leipziger Straße.....	113
Abbildung 61: Lageplan Maßnahme I7 Variante 1.....	114
Abbildung 62: Lageplan Maßnahme I7 Variante 2.....	115
Abbildung 63: Haltestelle Kastanienstraße / Situation der ÖPNV-Anmeldung	120

Abbildung 64: Effekte der kurzfristigen Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung (LSA 143).....	121
Abbildung 65: Effekte der kurzfristigen Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung (LSA 342).....	124
Abbildung 66: Effekte der kurzfristigen Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung (LSA 334).....	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung von Cellular V2X und New Radio V2X	26
Tabelle 2:	Überblick über C-ITS-Nachrichtentypen bezüglich des Inhalts, Triggers und systeminterner Priorisierungsstufe (TC – Traffic Class)	30
Tabelle 3:	Übersicht der besonderen Funktionen im Anmeldesystem der Zukunft	50
Tabelle 4:	Übersicht der Investitions- und Betriebskosten der dezentralen ÖPNV-Bevorrechtigung	54
Tabelle 5:	Übersicht der Investitions- und Betriebskosten der zentralen ÖPNV-Bevorrechtigung	54
Tabelle 6:	Weitere Vergleichspunkte	64
Tabelle 7:	Weiterzuverfolgende Maßnahmen der Verkehrsanlagengestaltung*	99
Tabelle 8:	Zeitpotenziale pro Knotenpunkt	127

Abkürzungsverzeichnis

2G/4G/5G	...	Mobilfunkstandards – 2./4./5. Generation
3GPP	...	3rd Generation Partnership Project
BAST	...	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMDV	...	Bundesministeriums für Digitales und Verkehr
BOS	...	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BO Strab	...	Betriebsordnung Straßenbahn
C2X	...	Connected to Everything
CAM	...	Cooperative Awareness Message
CDMA	...	Code Division Multiplex Access
CEF	...	Connecting Europe Facility
C-ITS	...	Cooperative Intelligent Transportation System
CPM	...	Collective Perception Message
C-V2X	...	Cellular Vehicle to X
DMRS	...	Demodulation Reference Signals
DMO	...	Direct-Mode (TETRA)
DENM	...	Decentralised Environmental Notification Message
DTV	...	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DQPSK	...	Differential Quadrature Phase Shift Keying
EADS	...	European Aeronautic Defence and Space (Airbus)
EDGE	...	Enhanced Data Rates for GSM-Evolution
EFRE	...	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
ETSI	...	European Telecommunications Standards Institute (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen)
EU	...	Europäische Union
FDM	...	Frequency Division Multiplexing
FDMA	...	Frequency Division Multiple Access (Frequenzmultiplexverfahren)
FFSK	...	Fast Frequency Shift Keying
FGSV	...	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GLOSA	...	Green Light Optimal Speed Advisory
GMSK	...	Gaussian Minimum Shift Keying (Modulationsverfahren)
GPRS	...	General Packet Radio Service
GPS	...	Global Positioning System
GSM	...	Global System for Mobile Communication
HARQ	...	Hybrid Automatic Repeat Request
HBS	...	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Abkürzungsverzeichnis

IP	...	Internet Protokoll
IR	...	Infrarot
ITCS	...	Intermodal Transport Control System
ITS / IVS	...	Intelligent Transport System / Intelligente Verkehrssysteme
ITS-G5	...	Standard für die Fahrzeugvernetzung, der auf dem WLAN-Standard IEEE 802.11p (WLANp) basiert
IVIM	...	Infrastructure to Vehicle Information Message
Kfz	...	Kraftfahrzeug
KP	...	Knotenpunkt
KRITIS-V	...	Kritische Infrastrukturen - Verkehr
LH	...	Landeshauptstadt
LIVEtsp	...	Produkt der finnischen Firma Mattersoft
LSA	...	Lichtsignalanlage
LOS	...	Level of Service
LTE	...	Long Term Evolution
MAP	...	Karten Daten
MAPEM	...	MapData Message
MIV	...	Motorisierter Individual Verkehr
MVB	...	Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG
NEMO	...	Funkverfahren: angepasste Variante einer Amplituden- und Phasenmodulation bei Analogfunk
NR	...	New Radio
OBU	...	On Board Unit
OCIT-C/O	...	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems
OFDM	...	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PMR	...	Professioneller Mobilfunk
PSFCH	...	Physical Sidelink Feedback Chanel
PSK	...	Phase Shift Keying
R09	...	Format vom VDV zur Übertragung von Informationen an Lichtsignalanlagen
RSU	...	Road Side Unit
QAM	...	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	...	Quadrature Phase Shift Keying
QSV	...	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs
SaaS	...	Software-as-a-Service
SDS	...	Software-Defined Storage
SPAT	...	Signal Phase and Timing
SPATEM	...	Signal Phase and Timing Message
SREM	...	Signal Request Message
SSEM	...	Signal Status Message
SWOT	...	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TAE	...	Telegramm-Auswerteeinheiten

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Abkürzungsverzeichnis

TDM	...	Time Division Multiplexing
TDMA	...	Time Division Multiplex Access
TEA	...	Tetra Encryption Algorithmen
TEN-V	...	Transeuropäisches Verkehrsnetz
TETRA	...	Terrestrial Trunked Radio
TMO	...	Trunked Mode
TSP	...	Transit Signal Priority
UMTS	...	Universal Mobile Telecommunications System
urbic®	...	Qualitätsmanagementtool für ÖV-Beschleunigung an Lichtsignalanlagen von Dresden-IT
V2V	...	Vehicle to Vehicle
V2X	...	Vehicle to Everything
VCDB	...	VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
VDV	...	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VEP	...	Verkehrsentwicklungsplan
VISUM	...	Verkehrsplanungssoftware von PTV Group
VRU	...	Vulnerable Road User
VZ	...	Verkehrszeichen
ÖPNV	...	Öffentlicher Personen Nahverkehr

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Die Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG (MVB) betreiben in der Landeshauptstadt Magdeburg ein Liniennetz im Tagesverkehr mit zehn Straßenbahnlinien und 14 Buslinien. Hinzu kommen weitere Linien des Nachtnetzes. Darüber hinaus fahren derzeit 16 Regionalbuslinien in das Stadtgebiet ein, welche von insgesamt vier Verkehrsunternehmen aus den umliegenden Landkreisen betrieben werden.

Zur Beschleunigung des Straßenbahnverkehrs wurden viele Lichtsignalanlagen (LSA) mit einer Vorrangschaltung für Straßenbahnen ausgerüstet. Technisch basiert die Vorrangschaltung auf einer Fahrzeuferfassung vor den LSA über Infrarotbaken sowie einer gesonderten Berücksichtigung der so angeforderten ÖPNV-Freigabe in der LSA-Steuerung.

Das vorhandene System ist den aktuellen Anforderungen der flexiblen Fahrzeuwerkerkennung und zeitoptimierten ÖPNV-Freigabe nicht mehr gewachsen. Fahrplanabweichungen, Warte- und Verlustzeiten der Straßenbahnen nehmen zu, die Attraktivität des ÖPNV sinkt und die Kundenzufriedenheit nimmt spürbar ab. Hinzu kommt die deutlich negative Beeinflussung der betrieblichen Kennziffern der ÖPNV-Dienstleister.

Ausdruck dieser unbefriedigenden Situation ist der Beschluss (Beschluss-Nr. 745-026(VII)21) des Stadtrates der Landeshauptstadt (LH) Magdeburg. Demnach soll durch eine technische und organisatorische Optimierung der Lichtsignalanlagenschaltungen sowie eine bedarfsgerechte Steuerung an den auf der Strecke liegenden Verkehrskreuzungen eine bessere Bevorrechtigung für die Straßenbahn erreicht werden. Gleichzeitig sollen dabei auch die Verkehrsabläufe für alle anderen Verkehrsmittel, wenn möglich optimiert werden.

Mit der vorliegenden Studie „Straßenbahnbevorrechtigung durchsetzen“ soll daher aufgezeigt werden, mit welchen Maßnahmen eine Minimierung der Wartezeiten an LSA insbesondere für den ÖPNV jedoch auch für alle andern Gruppen der Verkehrsteilnehmenden erreicht werden kann. Geltende Gesetze, Richtlinien, Regelwerke und Vorschriften sind dabei zu berücksichtigen.

Dabei stehen die technischen Möglichkeiten einer möglichst genauen Ankunftsprognose der ÖPNV-Fahrzeuge an den LSA sowie

- der damit punktgenauen Freigabe im Sinne ihrer zügigen Durchfahrt und
- möglichst viel Zeit für den übrigen Verkehr im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Wesentliche Bestandteile des Projektes sind:

- Auseinandersetzung mit der Magdeburger Systemarchitektur sowie mit deren unabhängig von diesem Projekt geplanten Weiterentwicklung
- Betrachtung der Verkehrsleitstellenstruktur, Vergleich von möglichen Entwicklungsvarianten hierzu und Empfehlung einer Vorzugslösung
- Erarbeitung eines Vergleichs von möglichen ÖPNV-Anmeldesystemen, Empfehlung eines Anmeldesystems der Zukunft
- Analysen der derzeitigen ÖPNV-Betriebsqualität mit dem Fokus auf mit der Auftraggeberin abzustimmende Knotenpunkte (dort auch Erfassung der Verkehrsqualitäten des Individualverkehrs), Erörterung der Ergebnisse mit dem Fahrpersonal der MVB
- Skizzieren von verkehrsorganisatorischen Lösungsansätzen für problembehaftete Streckenabschnitte und Knotenpunkte
- Erarbeitung von verbesserten LSA-Steuerungen für drei Knotenpunkte
- Zusammenfassung der Projekterkenntnisse in Form von Maßnahmenempfehlungen

Die Bearbeitung des Projektes und somit auch die Ausarbeitung von Maßnahmen und Empfehlungen erfolgt unter Beachtung des Gebotes des sparsamen und effizienten Mitteleinsatzes. Damit verbunden ist nicht das Streben nach der preiswertesten Lösung, sondern nach einer Systemlösung, welche – unter Beachtung der vorhandenen Magdeburger Systemarchitektur - eine auf Dauer wirtschaftliche Verkehrsorganisation inklusive des ÖPNV-Betriebs in der Landeshauptstadt Magdeburg ermöglicht.

Mit Umsetzung der hier zu konzipierenden ÖPNV-Beschleunigung wird eine weitere Grundlage für eine wirtschaftliche Umsetzung des Nahverkehrsplans der Landeshauptstadt Magdeburg ab 2018 (Beschluss-Nr. 1970-056(VI)18) gelegt.

2 Rahmenbedingungen

2.1 Magdeburger Systemarchitektur

In Magdeburg werden aktuell folgende Systeme zur Datenübertragung genutzt:

- Infrarottechnik zur drahtlosen Datenübertragung zwischen öffentlichen Verkehrsmitteln und Lichtsignalanlagen
- TETRA-Betriebsnetz zur Datenübertragung und Sprachfunk zur Leitstelle
- Mobilfunk zur Datenübertragung ins Hintergrundsystem des Systemherstellers Init SE

Über das aktuelle Infrarot System, das in Magdeburg zur ÖPNV-Beschleunigung eingesetzt wird, sendet das Fahrzeug drahtlos Daten zur Anmeldung und Bevorrechtigung an Lichtsignalanlagen als VDV-Standardtelegramme im R09-Format an eine Infrarotfunkbake. Die Funkbake empfängt das Signal und leitet dieses an einen Steuerrechner der MVB weiter. Der Steuerrechner wertet das Signal aus und übermittelt die Anmeldung via potenzialfreien Kontakt an das Steuergerät der Lichtsignalanlage weiter. Diese ist für die ÖPNV-Bevorrechtigung und -Freigabe zuständig.

Die MVB betreibt ein eigenes Funknetz per Digitalfunk TETRA zur Datenübertragung und Sprachfunk zur Leitstelle. Dieses Netz ist aktuell sehr ausgelastet. Zusätzlich wird Mobilfunk zur Datenübertragung ins Hintergrundsystem des Systemherstellers Init SE aufgebaut.

Weiterhin verfolgt die MVB ein paralleles Vorhaben zur Verbesserung der ÖPNV-Beschleunigung und zur Erneuerung der Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur. Dieses Vorhaben wird im folgenden Kapitel beschrieben.

2.2 Parallele Vorhaben

Das in Magdeburg eingesetzte Infrarot-System zur ÖPNV-Beschleunigung gilt als veraltet und wurde 2018 strategisch zur Ausmusterung beschlossen. Hauptgründe sind die hohen Instandhaltungskosten sowie die schwierige Beschaffung von Ersatzteilen, da die Technik kaum noch produziert wird. Die damit verbundenen Einzelanfertigungen machen das System unwirtschaftlich und ineffizient (siehe Kapitel 3.1.1).

Aus diesem Grund initiierte die MVB im Jahr 2017 eine eigene Untersuchung, deren Ergebnis die Entscheidung für eine zentrale Mobilfunkkommunikation zur Übertragung von VDV-Standardtelegramme an die Lichtsignalanlagen als Lösung zur ÖPNV-Beschleunigung war. Zur Umsetzung wurde das Produkt LIVEtsp der finnischen Firma Mattersoft (Teil der Init-Gruppe) gewählt. Die technische Funktionsweise der Lichtsignalanlagen-Beeinflussung (TSP $\triangleq$ Transit Signal Priority) mit LIVEtsp beruht auf einem Software-as-a-Service (SaaS) Ansatz. Zunächst senden die Busse und Bahnen des öffentlichen Nahverkehrs in Echtzeit

Daten wie ihre aktuelle Position, Fahrtrichtung und etwaige Verspätungen via Mobilfunk an das zentrale LIVEtsp-System. Dort analysiert das integrierte TSP-Modul diese Informationen und entscheidet, wann und welches VDV-Standardtelegramme im R09-Format über eine zu definierende Schnittstelle an den städtischen Verkehrsrechner gesendet wird. Der Verkehrsrechner leitet diese Information an die Lichtsignalanlage weiter, welche darauf nach Umprogrammierung der Steuerung die ÖPNV-Bevorrechtigung im Signalprogramme berücksichtigt. Nach einer intensiven Vorbereitungsphase ist geplant, im Jahr 2025 die ersten Lichtsignalanlagen mit Echtzeitinformationen aus dem LIVEtsp-System anzusteuern.

Das parallele Vorhaben der MVB wurde im Projekt berücksichtigt und mitbetrachtet. Informationen zur zentralen ÖPNV-Beschleunigung ist im Kapitel 3.2.2 einschließlich einer schematischen Darstellung in Abbildung 15 zu finden. Der öffentliche Mobilfunk zur Übertragung von Daten zur ÖPNV-Bevorrechtigung wurde in Kapitel 3.1.4 betrachtet.

2.3 Projektziele

Neben dem im Kapitel 1 skizzierten Ziel der Verbesserung der Verkehrsqualität für den Magdeburger ÖPNV ist das Projekt in den Kontext der beschlossenen Ziele des Verkehrsentwicklungsplans (VEP) 2030plus (Beschluss-Nr. 207-007(VI)14 zur DS0012/14) einzuordnen und zwar insbesondere durch die Berücksichtigung der hier verankerten Maßgaben

- gleichberechtigte Beachtung der Belange aller Verkehrsarten bei der Planung und Schaltung von Lichtsignalanlagen und situationsbezogene Gewichtung einzelner Belange
- Angebotsverbesserung im ÖPNV bei Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit.

Ziel und Inhalt der vorzulegenden Studie ist es daher Maßnahmen aufzuzeigen, mit welchen eine Minimierung der Wartezeiten an LSA und deren Streuung insbesondere für den ÖPNV, jedoch auch für alle anderen Gruppen der Verkehrsteilnehmenden unter Berücksichtigung der geltenden Gesetze, Richtlinien, Regelwerke und Vorschriften erreicht werden kann.

Um dies zu erreichen werden im Projekt die technischen Möglichkeiten einer möglichst genauen Prognose der Ankunft der ÖPNV-Fahrzeuge vor den LSA und der damit punktgenauen Freigabe im Sinne ihrer zügigen Durchfahrt analysiert. Dadurch wird erreicht, dass vor und nach dem ÖPNV-Fahrzeug möglichst viel Zeit für den übrigen Verkehr freigegeben werden kann.

3 Kommunikations- und Anmeldesysteme

Das Kapitel 3 umfasst eine Übersicht zu Kommunikations- und Anmeldesystemen im ÖPNV, deren Vergleich und daraus abgeleitet die Empfehlung eines Anmeldesystems der Zukunft für den ÖPNV in der Landeshauptstadt Magdeburg, dessen Beschreibung im Kapitel 4 erfolgt.

Das Kapitel 3 soll einen Überblick über die derzeit verfügbaren und zukünftig zu erwartenden Produkte und Dienste zur Beschleunigung des Öffentlichen Verkehrs bieten. Außerdem wurde eine Übersicht über die für die ÖPNV-Bevorrechtigung relevanten C-ITS Dienste und mit BiDiMove ein Referenzsystem erarbeitet. Im letzten Abschnitt werden die zentrale und dezentrale Datenübertragung bei C-ITS Diensten mit Ihren spezifischen Vor- und Nachteilen gegenübergestellt.

3.1 Marktanalyse

Nachfolgend sind die wesentlichen Eigenschaften von Produkten und Diensten zur Beschleunigung des Öffentlichen Verkehrs skizziert.

3.1.1 Infrarot (Aktuelles System)

ÖPNV-Beschleunigung durch Infrarottechnik ist eine drahtlose Technologie, die Datenübertragung zwischen öffentlichen Verkehrsmitteln und Lichtsignalanlagen (LSA) ermöglicht. Diese Technologie basiert auf der Nutzung von Lichtwellen im infraroten Spektrum, das einen Wellenlängenbereich von 780 Nanometern (nm) bis 1 Millimeter (mm) umfasst. Das ÖPNV-Fahrzeug sendet eine Kennung, die seine Linie und Ziel oder eine Meldepunktnummer angibt, über einen Infrarotsender aus, der im Fahrzeug eingebaut ist. Entlang der Strecke gibt es im Zulauf zu einer Lichtsignalanlage Infrarotempfänger, die über Kabel direkt mit einer Auswerteeinheit am Steuergerät verbunden sind. Die Auswerteeinheit ist dafür zuständig, die Signale des Fahrzeugs zu empfangen und zu verarbeiten. Sie leitet die Freigabeanforderung für die LSA an die entsprechende Steuerungseinheit über die Ansteuerung potenzialfreier Kontakte weiter.

Die Infrarottechnik wird derzeit in Magdeburg eingesetzt, um Straßenbahnen an LSAs zu beschleunigen. Die Infrarottechnik hat jedoch einige Nachteile, die ihre Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einschränken. Zum einen sind die Datenraten, die mit dieser Technologie erzielt werden können, sehr gering, was die Menge und die Qualität der übertragenen Informationen begrenzt. Zum anderen ist die Infrarottechnik anfällig für Störungen durch externe Faktoren, die die Sichtbarkeit und die Ausrichtung der Lichtwellen beeinträchtigen können. Dazu gehören Witterungsbedingungen wie Regen, Schnee oder Nebel, Grünwuchs wie Bäume oder Sträucher, die die Infrarotsender oder -empfänger verdecken können, oder Abschattung durch große Fahrzeuge wie LKW oder Busse, die die

direkte Verbindung zwischen dem Fahrzeug und dem Empfänger unterbrechen können. Diese Faktoren können dazu führen, dass die Signale nicht richtig empfangen oder interpretiert werden, was zu Fehlfunktionen oder Verzögerungen bei der Freigabe der LSA führen kann.

Das aktuelle Infrarot System, das in Magdeburg zur ÖPNV-Beschleunigung eingesetzt wird, hat sich als nicht zukunftsfähig erwiesen. Die Gründe dafür sind vor allem der hohe finanzielle Aufwand, der für die Instandhaltung des Systems erforderlich ist, sowie die Schwierigkeit, neue Komponenten zu beschaffen. Da die Infrarottechnik ein historisches System darstellt und kaum noch nachgefragt wird, sind die Hersteller nicht mehr bereit, die nötigen Ersatzteile oder neue Geräte zu produzieren und zu liefern. Eine Ersatzbeschaffung ist daher nur maximal als Einzelstück möglich, was die Kosten und die Lieferzeiten erheblich erhöht. Diese Faktoren machen das aktuelle Infrarot System zu einer unwirtschaftlichen und ineffizienten Lösung für die ÖPNV-Beschleunigung. Eine weitere Verwendung der Infrarottechnik wurde 2018 strategisch abgelehnt.

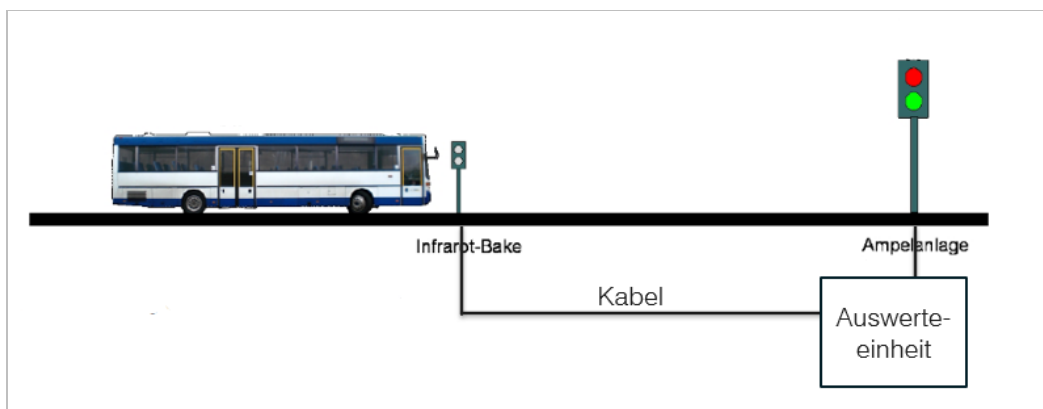


Abbildung 1: Aufbau ÖPNV-Bevorrechtigung mittels Infrarottechnologie

3.1.2 Analogfunk

Analogfunk ist das am weitesten verbreitetste Verfahren zur Datenübertragung für ÖPNV-Beschleunigung in Deutschland. Laut einer Studie vom Fraunhofer IVI in Kooperation mit der VCDB aus dem Jahr 2020 ¹ nutzen etwa 85% der deutschen Verkehrsunternehmen diese Technologie. Analogfunk basiert auf der Übertragung von Funksignalen im 2-Meter- oder 4-Meter-Band, die einen Frequenzbereich von 136 MHz bis 174 MHz bzw. von 68 MHz bis 87,5 MHz umfassen. Die Funkfrequenzen werden durch die Bundesnetzagentur vergeben, die für die Regulierung des deutschen Telekommunikationsmarktes zuständig ist. Ab dem Jahr 2028 wird es zu einer Kanalbreitenänderung kommen, die den

¹ Quelle | BASt Verkehrstechnik Heft V 353, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

Frequenzbereich für Verkehrsunternehmen dezidiert. Das bedeutet, dass die Kanalbreite von 25 kHz auf 12,5 kHz reduziert wird, um mehr Kanäle zur Verfügung zu stellen und die Interferenzen zu verringern. Der VÖV-Datenübertragungsstandard 04.05.03 von 1980 ist ein Protokoll, das die Datenübertragung zwischen Fahrzeugen und LSA über Analogfunk regelt. Es nutzt zwei Arten von Modulationen, um die Daten in Funksignale umzuwandeln: FFSK (Frequency-Shift Keying) oder das NEMO-Funkverfahren, dass eine angepasste Variante einer Amplituden- und Phasenmodulation darstellt. Durch den Analogfunk wird eine direkte Kommunikation von Fahrzeug zu LSA ohne Basisstation hergestellt. Das heißt, dass das Fahrzeug seine Kennung (Linie/Ziel) und seine Freigabeanforderung direkt an die LSA sendet, ohne dass eine Zwischenstation oder ein Netzwerk benötigt wird.

Die Analogfunktechnologie hat jedoch einige Nachteile, die ihre Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einschränken. Zum einen sind die Datenraten, die mit dieser Technologie erzielt werden können, sehr gering, was die Menge und die Qualität der übertragenen Informationen begrenzt. Zum anderen ist die Sicherheit der Datenübertragung nicht gewährleistet, da die Funksignale nicht verschlüsselt oder authentifiziert sind und somit leicht abgehört oder manipuliert werden können. Außerdem existiert kein Kollisionsmanagement von Nachrichten, was es notwendig macht, die Nachrichten zu wiederholen, um sicherzustellen, dass sie empfangen werden. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Interferenzen und Verzögerungen. Ebenso wird die Datenübertragung nur an festgelegten Meldepunkten im Fahrtverlauf des Fahrzeugs ausgelöst. Das führt zu einer punktuellen Datenübertragung, die für ÖPNV-Beschleunigung suboptimal ist, da sie keine kontinuierliche Anpassung der LSA an die Verkehrslage ermöglicht. In Magdeburg waren die Fahrzeuge der MVB vor einigen Jahren bereits mit Analogfunkgeräten ausgestattet, welche aber 2013 unter anderem aus den oben genannten Gründen ausgebaut wurden. Eine erneute Verwendung der Analogfunktechnik wurde 2018 strategisch abgelehnt.

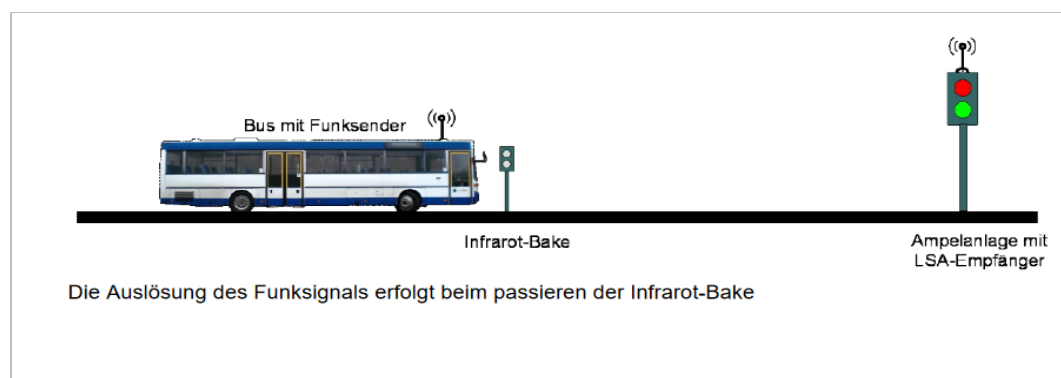


Abbildung 2: Aufbau ÖPNV-Bevorrechtigung mittels Analogfunk

3.1.3 Digitalfunk

Digitalfunk ist eine drahtlose Technologie, die Sprach- und Datenübertragung über ein Bündelfunksystem ermöglicht. Ein Bündelfunksystem ist ein Funknetzwerk, das aus mehreren Kanälen besteht, die dynamisch zwischen den Teilnehmern verteilt werden. Digitalfunk wird häufig als Betriebsfunk von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) eingesetzt, wie zum Beispiel Polizei, Feuerwehr oder Rettungsdienst. Auch werden Digitalfunksysteme als Betriebsfunk im ÖPNV eingesetzt, um eine Sprachkommunikation von der Leitstelle zu den Fahrern und eine Datenübertragung zu den Bordrechnern zu ermöglichen. Es kann aber auch zur ÖPNV-Beschleunigung verwendet werden, indem es die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und LSA unterstützt. Die LSA-Datenübertragung erfolgt aktuell vor allem für diesen Anwendungsfall über zwei Standards: TETRA (Terrestrial Trunked Radio) und Tetrapol. Beide Standards basieren auf digitaler Modulation und Verschlüsselung, um eine hohe Qualität und Sicherheit der Funksignale zu gewährleisten. Sie erlauben auch die Integration von Daten- und Sprachdiensten, wie zum Beispiel Kurznachrichten oder Telefonie.

Die Datenraten, die mit diesen Standards erzielt werden können, sind höher als bei Analogfunk, jedoch immer noch begrenzt. Ein weiterer Nachteil dieser Technologie sind die längeren und unbeständigeren Telegrammlaufzeiten, die durch die Verarbeitung der digitalen Signale entstehen. Das bedeutet, dass die Zeit, die ein Signal benötigt, um vom Sender zum Empfänger zu gelangen, variieren kann, was zu Fehlern oder Verzögerungen bei der Datenübertragung führen kann. Die Nutzung von Digitalfunk erfordert auch eine teure Infrastruktur, die je nach Betriebsart unterschiedlich ausgestaltet sein kann.

Es gibt zwei Betriebsarten: Direkt- und Netzmodus. Im Direktmodus kommunizieren die Fahrzeuge direkt mit den LSA, ohne dass eine Basisstation oder eine Serverinfrastruktur benötigt wird. Im Netzmodus werden die Funksignale über eine Basisstation und eine Servernetzwerkinfrastruktur an die LSA weitergeleitet, was eine größere Reichweite und eine bessere Abdeckung ermöglicht. Allerdings müssen die Basisstationen oder das Backbone aufgebaut und betrieben werden, was hohe Kosten und einen hohen Wartungsaufwand verursacht. Digitalfunk als Technologie zur ÖPNV-Beschleunigung ist in Deutschland gering verbreitet und nur in Berlin und Hamburg zu finden.

Im Folgenden werden die beiden digitalen Funktechnologien TETRA und Tetrapol genauer betrachtet.

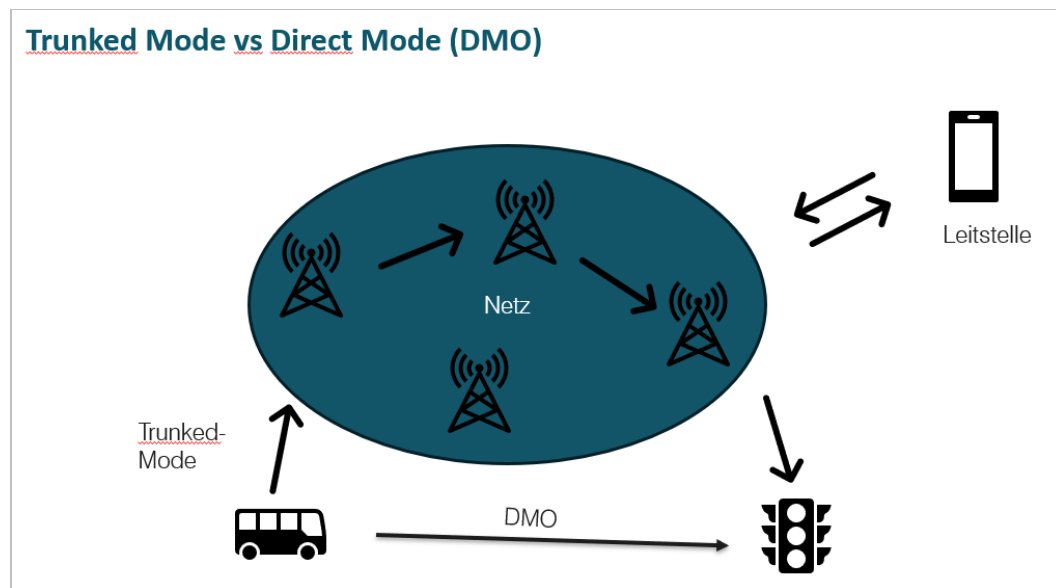


Abbildung 3: Digitalfunk | Trunked Mode (TMO) vs. Direct Mode (DMO)

TETRA (Terrestrial Trunked Radio)

TETRA ist ein europäischer Standard für professionellen Mobilfunk (PMR), der die Sprach- und Datenkommunikation zwischen verschiedenen Teilnehmern ermöglicht. Tetra bietet einige Funktionen, die über den Analogfunk hinausgehen, wie zum Beispiel Verschlüsselungen, Gruppenanrufe, Notrufe, Priorisierungen und höhere Datenraten. Tetra basiert auf dem ETSI-Standard EN 300 392, der Mitte der 90er Jahre entstand, um einen einheitlichen und interoperablen Standard für den PMR in Europa zu schaffen. Tetra arbeitet im Frequenzband 380 - 470 MHz, das von der Bundesnetzagentur für den BOS-Funk zugewiesen wurde. TETRA verwendet die Zeitmultiplextechnik (TDMA), die einen 25 kHz Träger in vier Zeitschlitze unterteilt, die jeweils einem Kanal entsprechen. Jeder Kanal kann eine Sprachverbindung aufbauen, die eine maximale Geschwindigkeit von 7,2 kbit/s erreicht. Als Modulationsverfahren können verschiedene Varianten des Phase Shift Keying (PSK) genutzt werden, wie beispielsweise das $\pi/4$ -DQPSK (Differential Quarternary Phase Shift Keying). Tetra unterstützt außerdem die Paketdatenübertragung, die eine höhere Geschwindigkeit von bis zu 36,0 kbit/s ermöglicht, indem sie mehrere Zeitschlitze bündelt. Zusätzlich kann die Verwendung von Verfahren der Quadraturamplitudenmodulation (QAM) zur Datenübertragung eingesetzt werden, welche Datenraten im 25 kHz Träger von bis zu 115,2 kbit/s ermöglichen, aber einen höheren Signal-zu-Rauschabstand erfordern als PSK-Modulationen.

Die LSA-Ansteuerung über TETRA kann über beide beschriebenen Betriebsarten erfolgen: Direct-Mode (DMO) oder Trunked-Mode (TMO). Im DMO kommunizieren die Fahrzeuge direkt miteinander oder mit den LSA, ohne dass eine Basisstation oder ein Backbone benötigt wird. Dieser Modus ist vorteilhaft, wenn die Fahrzeuge in einem begrenzten Gebiet operieren oder wenn die Netzabdeckung nicht ausreichend ist. Im TMO werden die

Funksignale über eine Basisstation oder ein Backbone an die LSA weitergeleitet, was eine größere Reichweite und eine bessere Abdeckung ermöglicht. Dieser Modus ist vorteilhaft, wenn die Fahrzeuge in einem größeren Gebiet operieren.

Die LSA-Ansteuerung über TETRA hat jedoch einige Nachteile, die ihre Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einschränken. Zum einen sind die Umschaltzeiten zwischen den Modi lang (teilweise bis zu 30 Sekunden), was zu Verzögerungen bei der Datenübertragung führen kann. Zum anderen ist das Fahrzeug während der Datenübertragung zur LSA nicht für eine Sprachkommunikation zur Leitstelle erreichbar, was zu Sicherheitsproblemen führen kann. Aus diesem Grund ist es notwendig, zwei Funkgeräte pro Fahrzeug zu installieren, wenn beide Betriebsarten DMO und TMO parallel verwendet werden sollen. Die LSA-Ansteuerung im TMO führt außerdem zu größeren Latenzen, da die Funksignale einen längeren Weg zurücklegen müssen. Zudem ist die LSA-Ansteuerung im TMO abhängig von der TETRA-Infrastruktur, die teuer und wartungsintensiv ist.

Tetrapol

Tetrapol ist ein digitales, zellulares Bündelfunksystem für Sprach- und Datenübertragung, das für geschlossene Benutzergruppen wie Behörden oder Betriebe entwickelt wurde. Es wurde in den 1990er Jahren von Matra und dem europäischen Luft- und Raumfahrtkonzern EADS (heute Airbus) als Alternative zu TETRA, einem anderen digitalen Bündelfunkverfahren, konzipiert. Es verwendet, wie andere digitale Bündelfunksysteme, die PMR-Frequenzen im 400 MHz-Band. Als Kanalzugriffsverfahren wird FDMA (Frequency Division Multiple Access) verwendet mit einer Gaussian Minimum Shift Keying Modulation (GMSK). Diese unterstützt eine maximale Datenrate von 7,6 kbit/s.

Tetrapol zeichnet sich durch ein schnelleres Umschalten zwischen Direct- und Trunked Mode aus, was bedeutet, dass nur ein Funkgerät pro Fahrzeug benötigt wird, während TETRA zwei Geräte erfordert, um beide Modi zu unterstützen. Tetrapol wurde jedoch lange Zeit als ein geschlossenes System vermarktet, das nur von EADS hergestellt und gewartet wurde. Dies hat die Marktdurchdringung und die Interoperabilität mit anderen Systemen eingeschränkt. Aktuell wird das System von Airbus, dem Nachfolger von EADS, kaum weiterentwickelt, da der Fokus auf dem neueren Bündelfunksystem TETRAPOL IP liegt. TETRAPOL IP ist eine Weiterentwicklung von Tetrapol, die auf dem Internetprotokoll basiert und eine bessere Anbindung an andere Netze und Dienste ermöglicht.

3.1.4 Öffentlicher Mobilfunk

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Funksystemen ist die Nutzung des öffentlichen Mobilfunks nicht auf einen kleinen Nutzerkreis (wie einem Verkehrsbetrieb oder einer Behörde) beschränkt, sondern wird kommerziell von Mobilfunk Providern einer großen Nutzergruppe bereitgestellt. Zunächst startete in den 1950-er Jahren ein erstes analoges Funksystem zur Sprachübertragung, um eine Telefonübertragung in Zügen zu ermöglichen. Dieses später deutschlandweit etablierte Funknetz hat sich über die Folgejahre stetig weiterentwickelt, sodass die Qualität und Zugänglichkeit des Netzes weiter gesteigert werden konnte. Die Entwicklung des Mobilfunks ist beispielhaft in der Abbildung 4 dargestellt.

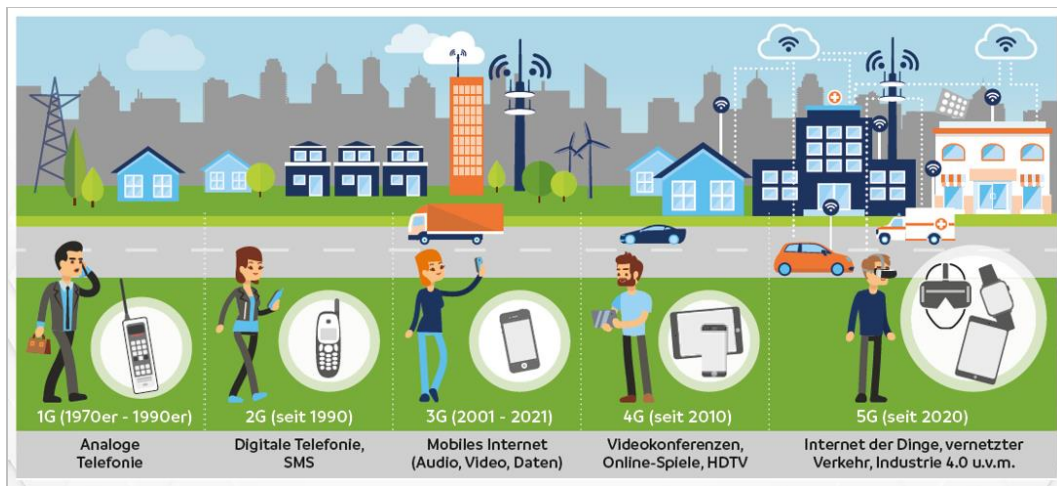


Abbildung 4: Mobilfunk | Evolution des Mobilfunks ²

Die Entwicklung des Mobilfunks lässt sich in verschiedene Ausrüstungsgenerationen einteilen, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

2G (2. Generation)

Nach der Umsetzung des ersten analogen Funknetzes ist 2G der erste digitale Mobilfunkstandard. 2G basiert auf dem GSM-Standard (Global System for Mobile Communication) und ist auch heute noch flächendeckend in Deutschland verfügbar, da viele ältere Geräte die neuen Standards nicht unterstützen und es als Rückfallebene genutzt wird. Mit 2G war zum ersten Mal zu der Telefonie auch die Datenübertragung

² Quelle | Informationszentrum Mobilfunk, <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/2023/04/26/die-geschichte-des-mobilfunks-in-deutschland/>, aufgerufen am 11.03.2024

möglich. Für die Datenübertragung existieren zwei Standards: GPRS (2.5G, General Packet Radio Service) und EDGE (2.75G, Enhanced Data Rates for GSM-Evolution).

GPRS entstand 2001 und ist ein paketorientierter Dienst zur Datenübertragung. Die Datenrate hängt direkt von der Auslastung des Netzes ab und kann maximal 54 Kbit/s im Downstream erreichen.

Der EDGE-Standard aus dem Jahr 2006 baut auf GPRS auf und ist auch ein paketorientierter Dienst zur Datenübertragung. Die Leistungsfähigkeit wird jedoch durch effizientere Verfahren erhöht. Die maximale Datenrate beträgt 220 Kbit/s.

3G (3. Generation)

Das Mobilfunk-Netz der 3. Generation, oder UMTS-Netz (Universal Mobile Telecommunications System) genannt, leitete das Zeitalter des mobilen Internets ein. Durch die Einführung der Funkzugriffstechnik CDMA (Code Division Multiplex Access) war es möglich gleichzeitig Daten zu senden und zu empfangen, was die Leistungsfähigkeit auf bis zu 384 Kbit/s erhöht hat. Da aus Kostengründen die Funkmasten des 3G-Netzes zum Umbau auf 4G und 5G genutzt wurden, hat man sich in Deutschland 2021 dazu entschieden, das 3G-Netz komplett abzuschalten.

4G (4. Generation)

Einfaches LTE (3.9G, Long Term Evolution) basiert auf der UMTS-Infrastruktur und wurde vor allem aus Marketinggründen als 4G bezeichnet, obwohl es eigentlich die Kriterien für eine neue Generation nicht erfüllt. Dennoch ist die maximale Bandbreite deutlich höher und Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 150 Mbit/s sind möglich. Die Latenzzeit beträgt zwischen 20 und 50 Millisekunden, was den Einsatz von LTE sehr attraktiv für ÖPNV-Bevorrechtigung macht. Der erste Sendemast wurde 2010 in Deutschland in Betrieb genommen.

Ab 2014 wurde LTE A oder LTE+ eingeführt, eine Weiterentwicklung von LTE. Durch die Trägerbündelung konnte die Bandbreite noch einmal auf 300 bis 600 Mbit/s gesteigert werden.

5G (5. Generation)

5G ist der neuste Mobilfunkstandard und verspricht Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 10 Gbit/s und Latenzzeiten die unter einer Millisekunde liegen. Dies wird unter anderem durch die Verschiebung des genutzten Frequenzbereiches erreicht. 5G nutzt höhere Frequenzen (3,4 - 3,8 GHz) als LTE. Dadurch können mehr Informationen in weniger Zeit übertragen werden, jedoch nimmt auch die Reichweite rapide ab. Folglich müssen für eine gute Abdeckung wesentlich mehr Mobilfunkmasten errichtet werden. Das 5G Netz befindet sich derzeit in Deutschland noch im Ausbau.

Cellular Vehicle to X (C-V2X)

Die Kommunikationstechnologie C-V2X wurde vom 3rd Generation Partnership Project (3GPP) entwickelt und innerhalb ihrer 14. Veröffentlichung (Rel. 14) publiziert. Als Kommunikationsplattform wird hierbei das existierende LTE-Mobilfunknetz genutzt. Da hier die Netzabdeckung teilweise Lücken aufweist, ermöglicht C-V2X die Nutzung von Sidelink-Übertragungskanälen über die PC5-Schnittstelle, wodurch diese Technik auch für Indoor-Anwendungsszenarien ohne Funkverbindung zu einer Basisstation (z. B. Tunnel, Tiefgaragen) genutzt werden kann. Hierfür wurden zwei neue Modi (3 und 4) eingeführt, um eine Kommunikation mit geringer Latenz sicherzustellen.

Die Kommunikationstechnologie wird kontinuierlich weiterentwickelt, um den Güteanforderungen fortschrittlicher/moderner V2X-Anwendungen gerecht zu werden. In der aktuellsten 17. Veröffentlichung (Rel. 17) dient das 5G-Netz als Kommunikationsplattform, wobei nun von New Radio (NR) V2X die Rede ist. Im Gegensatz zu ITS-G5 ist hier eine Abwärtskompatibilität nicht gegeben. Die nachfolgende Tabelle 1 stellt die wesentlichen Funktionen von C-V2X und NR V2X einander gegenüber

Funktion	C-V2X	NR V2X
Kommunikationstyp	Broadcast	Broadcast, Groupcast, Unicast
Modulationsverfahren	Rel.14: Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16-Quadrature Amplitude Modulation (QAM) Rel. 15: 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Signalmodulation	Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)
Wiederholung v. Nachrichten	immer (wenn konfiguriert)	Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)
Rückkanal	keiner	Physical Sidelink Feedback Chanel (PSFCH)
Multiplexverfahren	Frequency Division Multiplexing (FDM)	Time Division Multiplexing (TDM)
Demodulation Reference Signals (DMRS)	4 DMRS-Symbole pro Sub-Frame	flexibel
Frequenzabstand der Unterträger	15 kHz	sub-6 GHz: 15, 30, 60 kHz mmWave: 60, 120 kHz
Planungsintervall des Sendemodus	einmal pro Sub-Frame	Slot, Mini-Slot, Multi-Slot
Sidelink Modes	Modes 3 & 4	Modes 1 & 2
Sidelink Sub-Modes	keine	Modes 2(a) & 2(d)

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Cellular V2X und New Radio V2X

Einsatz des Öffentlichen Mobilfunks für die ÖPNV-Beschleunigung

ÖPNV-Priorisierung mithilfe von öffentlichem Mobilfunk wird in Deutschland selten genutzt, bietet sich jedoch für kleinere Verkehrsunternehmen an, die keine eigene Funkinfrastruktur betreiben, da die bereits vorhandene Mobilfunk-Infrastruktur verwendet wird. Die Datenübertragung erfolgt als IP-Datentelegramm, entweder direkt an die LSA oder über eine zentrale Serverinstanz. Die Latenzen und Zuverlässigkeit hängen vom Mobilfunkstandard ab (2G: teilweise große Latenz je nach Netzauslastung von bis zu mehreren Sekunden, 4G: Latenz unproblematisch, mehrere Millisekunden). 5G als Funkstandard kann ebenso für ÖPNV-Beschleunigung verwendet werden. Bei LTE und 5G sind bereits spezielle Modi zur direkten Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA im Standard implementiert. Es ist jedoch für diesen „Sidelink Mode“ ohne Einbindung von Basisstationen in den Kommunikationsaufbau spezielle Hardware bzw. Softwaremodifikationen zur Realisierung notwendig. In den meisten Anwendungsfällen

wird der klassische Kommunikationsweg über eine Basisstation und das Backbone des Mobilfunkproviders umgesetzt. Mobilfunkmodule sind meist bereits in den Fahrzeugen über das ITCS-System und die Bordrechner verbaut. Bei einem zentralen Aufbau über eine Leitstelle kann die Leitstellenkommunikation mit den LSA auch über andere Verfahren (Kabel, OCIT-O Protokoll) erfolgen.

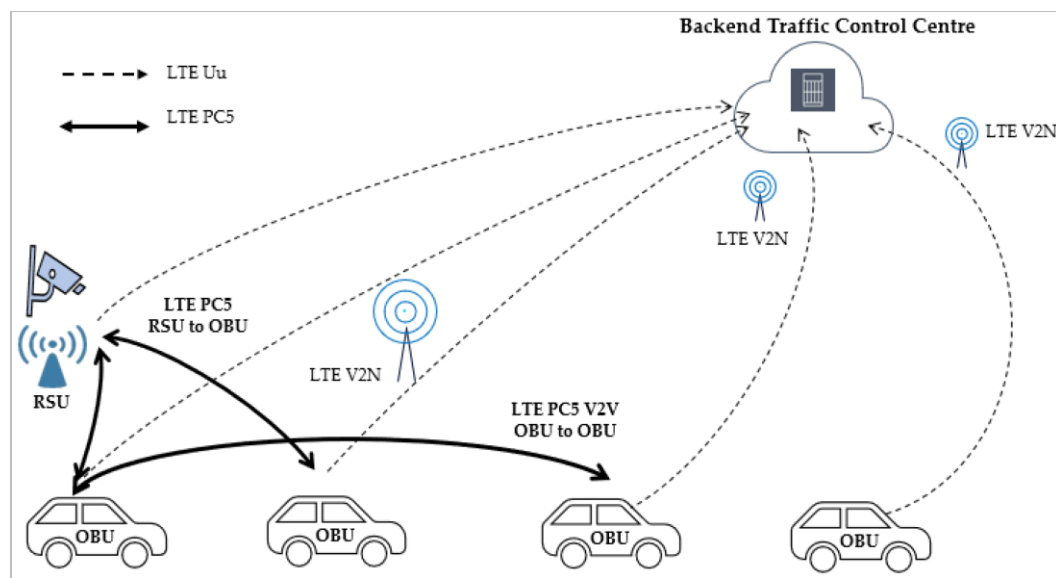


Abbildung 5: Mobilfunk | Aufbau Cellulare V2X ³

3.1.5 C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems)

Stand der Technik C-ITS im ÖPNV

Kooperative intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) (engl.: *cooperative intelligent transport systems*) ermöglichen den bidirektionalen Informationsaustausch über digitale Kommunikationstechnologien sowohl zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern (V2V) als auch von Fahrzeugen zur Verkehrsinfrastruktur (V2X). Beispielsweise bringt der direkte Austausch von aktuellen Verkehrsinformationen und Gefahrenmeldungen im unmittelbaren verkehrlichen Umfeld das Potenzial mit sich, die Anzahl und damit auch die Wahrscheinlichkeit von Verkehrsunfällen signifikant zu verringern. Mit V2X-Technik ausgestattete Fahrzeuge können den Verkehrsfluss beispielsweise durch Geschwindigkeitsanpassungen, um die nächste Grünphase an der LSA ohne stoppen zu passieren, positiv beeinflussen und damit den Verbrauch von Betriebsmitteln sowie letztendlich die Kosten des laufenden Betriebes reduzieren.

³ Quelle | PC5-Based Cellular-V2X Evolution and Deployment, S. 10

Solche sicherheitsrelevanten Anwendungen sowie Anwendungen zur Optimierung des Verkehrsflusses bilden den Kern von C-ITS und ermöglichen den Austausch von verschiedenen anwendungsspezifischen Nachrichten (vgl. Tabelle 2). Von hoher Relevanz für den ÖPNV kann das Einbinden eines *Public Transport Containers* innerhalb der *Cooperative Awareness Message* (CAM) sein. Dieser ist Teil des optionalen *Special Vehicle Container* innerhalb dessen anwendungsspezifische Daten übertragen werden können (vgl. Abbildung 6).

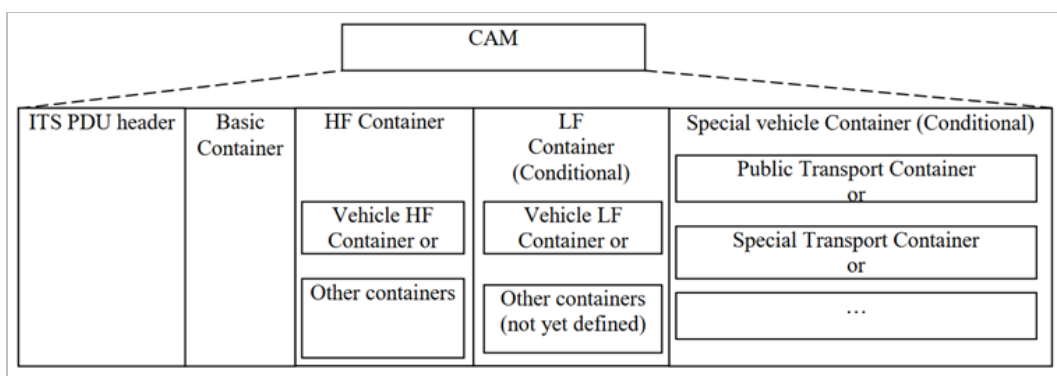


Abbildung 6: C-ITS | Allgemeiner Aufbau und Struktur der Cooperative Awareness Message (CAM) ⁴

ÖPNV-Fahrzeuge können damit periodisch (1 bis 10 Hz) Statusmeldungen mit Informationen über den aktuellen Standort, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung generieren und versenden. Kontinuierlich können hierüber Informationen über die Annäherung eines ÖPNV-Fahrzeuges an Infrastrukturelemente wie Lichtsignalanlagen (LSA) zur Verfügung gestellt werden.

Die Integration und Verarbeitung dieser Daten birgt hohes Verbesserungspotenzial für Anwendungen, wie beispielsweise die LSA-Ankunftsprognose von ÖPNV-Fahrzeugen oder die Prognose von Schaltzeitpunkten an verkehrsabhängig gesteuerten LSAs. Der bereits genannte Special Vehicle Container der CAM ermöglicht auch das Einbinden konventioneller R09.xx-Telegramm-Inhalte, wodurch die klassischen Themen der ÖPNV-Priorisierung realisiert werden können. Die Abbildung 7 zeigt die Systemübersicht der V2X-basierten ÖPNV-Priorisierung. Darin sind farblich die Systembestandteile hervorgehoben, die durch die Einführung von C-ITS hinzukommen.

⁴ Quelle | ETSI, ETSI EN 302 637-2 V1.3.1 (2014-09), S. 21

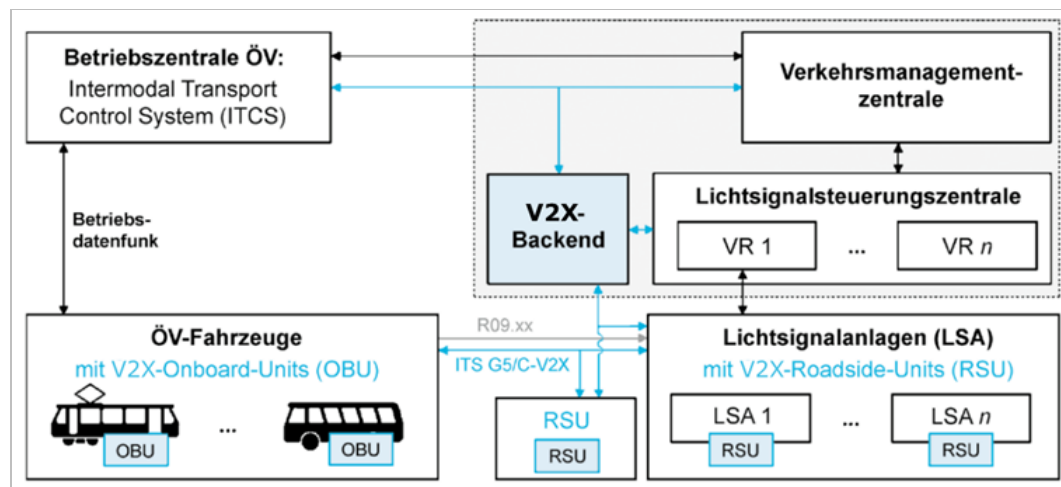


Abbildung 7: C-ITS | Systemübersicht für V2X-basierte ÖPNV-Priorisierung ⁵

Bei Ertüchtigung einer LSA für V2X-basierte Anwendungen erfolgt die Installation einer *Roadside Unit* (RSU), die in der Regel Teil des LSA-Gesamtsystems ist. Es besteht auch die Möglichkeit diese, als davon abgesetztes System mit einer direkten Anbindung an das V2X-Backend umzusetzen, um beispielsweise eine abgesicherte Kommunikation bei langen Annäherungsstrecken zu gewährleisten. RSUs umfassen mindestens ein Kommunikationsmodul für das Senden und Empfangen von V2X-Nachrichten über aktuelle Kommunikationstechnologien. Durch den hybriden Einsatz von RSUs, einerseits als Modul für V2X-basierte Anwendungen und andererseits als Empfangseinheit für R09.xx-Telegramme, können die klassischen Telegramm-Auswerteeinheiten (TAE) vollständig ersetzt werden. Auf der anderen Seite werden fahrzeugseitig sogenannte *Onboard-Units* (OBUs) eingesetzt, die das alte Kommunikationssystem ersetzen, beziehungsweise übergangsweise ergänzen.

Durch den Einsatz von RSUs werden die zentralenseitigen Systeme um ein V2X-Backend ergänzt, dass grundsätzlich in eine Verkehrsmanagementzentrale oder in die Lichtsignalsteuerungszentrale integriert, beziehungsweise daran angebunden werden kann. Dieses übernimmt Funktionen der Betriebsüberwachung, der Datenaufnahme und -aufbereitung der einzelnen RSUs sowie die Verteilung zentral verfügbarer Nachrichten (z. B. Gefahrenwarnungen mittels *Decentralised Environmental Notification Messages* [DENM]).

⁵ Quelle | Verkehrstechnik Heft V 353, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten, S. 28

Nachricht	Inhalt/Aufgabe	Trigger	TC	Bemerkung
Cooperative Awareness Message (CAM)	Information über die sendende ITS-Station: Position, Geschwindigkeit, Status, ...	periodisch	2	
Decentralised Environment Notification Message (DENM)	Besondere Situationen, Gefahren	ereignis-gesteuert	0/1	Unterteilung in High-Priority-DENM und normale DENM
MapData Message (MAPEM)	Topologie von Kreuzungen und allg. Streckenabschnitten	periodisch	3	
Signal Phase and Timing Message (SPATEM)	Status von LSA: Ampelphasen, Restlaufzeiten, Prognose für zukünftigen Signalstatus	periodisch	3	immer verknüpft mit einer MAPEM, die die zugehörige Kreuzung beschreibt
Signal Request Extended Message (SREM)	Priorisierungsanfrage	ereignis-gesteuert	3	
Signal Status Message (SSEM)	Antwort auf Priorisierungsanfrage	ereignis-gesteuert	3	
Infrastructure to Vehicle Information Message (IVIM)	Verkehrszeichen	periodisch	3	
Collective Perception Message (CPM)	Verbreitung von durch Sensorik detektierten Objekten im Verkehrsraum	periodisch	3	

Tabelle 2: Überblick über C-ITS-Nachrichtentypen bezüglich des Inhalts, Triggers und systeminterner Priorisierungsstufe (TC – Traffic Class)

Beispielhafter Aufbau eines C-ITS Systems anhand von Hamburg (BiDiMoVe)

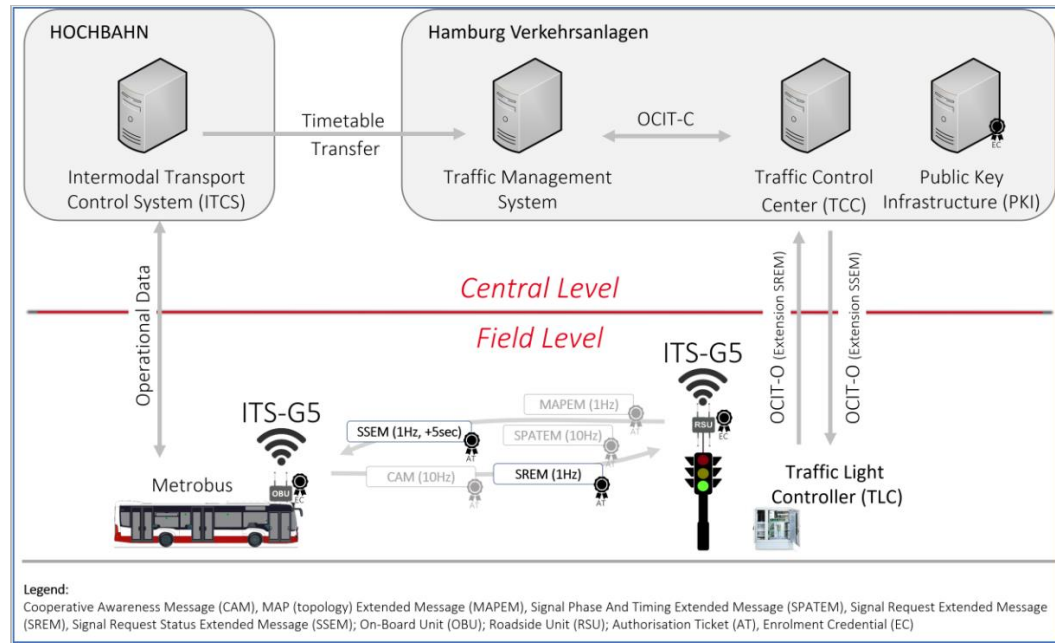


Abbildung 8: C-ITS | Musterarchitektur für eine „Zentralisierte Busbevorrechtigung“⁶

Das Projekt BiDiMoVe (Bidirektional, Multimodal, Vernetzt) ist ein vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI) gefördertes Projekt. Es hatte eine Laufzeit von 3 Jahren (Oktober 2018 bis September 2021). Als Projektziel verfolgte dieses Projekt folgende Punkte:

„Auf Basis der ganzheitlichen IVS-Strategie der Stadt Hamburg wollen die Projektpartner die Implementierung und Erprobung einer Public Key Infrastructure für den informationstechnisch sicheren Betrieb kooperierender IVS-Komponenten erreichen und so einen Piloten für zukünftige Einsatzszenarien erarbeiten. Als Anwendungsfelder dienen die Einsatzoptimierung und gesicherte Priorisierung des ÖPNV sowie die Erprobung eines Abbiegeassistenten für die Busfahrer, mit dem vor parallel querenden Radfahrern und Fußgängern gewarnt wird.“

Damit eine gezielte Kommunikation zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmern ermöglicht wird, sind neue Prozesse für die Zertifikats- und Rechteverwaltung zu spezifizieren und umzusetzen. Die Stadt Hamburg nutzt für diese Szenarien Linienbusse in einem ausgewählten Testgebiet, um die Technik im Realbetrieb auf Alltagstauglichkeit, Effizienz und Akzeptanz zu prüfen. Um die Übertragbarkeit von Diensten für das vernetzte

⁶ Quelle | BiDiMoVe – bidirektionale multimodale Vernetzung: Abschlussbericht, S. 4

Fahren zu gewährleisten, sollen erstmals die neuen OCIT-Schnittstellen (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) der kooperativen Stadtinfrastruktur sowie die nationale IVS-Rahmenarchitektur in einem realen städtischen Umfeld eingesetzt werden.“⁷

Die Kommunikation von Fahrzeug zur LSA erfolgt dezentral über definierte ITS-G5 Protokolle. Die LSA verfügt zusätzlich über eine Verbindung zu einer Leitstelle der Hamburger Verkehrsanlagen. Die Fahrzeuge senden Operational Data zu einer Leitstelle der Hochbahn. Die beiden Leitstellen sind mit einander verbunden und tauschen Informationen aus. Somit verfügt die LSA über Anmeldeinformationen des Fahrzeuges und Informationen der Verkehrssituation.

Anwendungsszenarien

ÖPNV-Priorisierung

Durch kontinuierliche Positionsauswertung und Informationsaustausch zwischen Fahrzeug und LSA, kann die LSA die Freigabe für das ÖPNV-Fahrzeug dynamisch so legen, dass es den Knotenpunkt optimal passieren kann. Die Informationsübertragung erfolgt über erweiterte CAM-Nachrichten mit R09.16-Inhalten oder via SREM-Nachrichten. In der Anforderungsnachricht SREM sendet das Fahrzeug seinen gewünschten Fahrtweg und voraussichtliche Ankunftszeit an das LSA-Steuergerät. Die Rückmeldung zur Priorisierung an den Fahrer kommt via SREM-Nachricht mit der das Steuergerät den Priorisierungswunsch quittiert.

Die Vorteile dieser Anwendung sind die Reduktion von Verlustzeiten an der LSA, Kraftstoffreduktion durch Vermeidung von Stoppen und Anfahren, und es ist eine betriebsdienliche Optimierung von LSA-Programmen möglich.

Für eine ÖPNV-Priorisierung müssen die Fahrzeuge mit C-ITS OBUs ausgerüstet sein und erhalten alle erforderlichen Informationen zur Anmeldung vom Bordrechner. Die Lichtsignalanlagen sind mit RSUs ausgerüstet und können erweiterte CAM/SREM auswerten.

⁷ Quelle | Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI),
<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/bidimove.html>, Aufgerufen am 11.03.2024

GLOSA (vgl. C.2.2 Traffic Light Optimal Speed Advisory)

Mit dem GLOSA C-ITS wird dem Fahrer eine Annäherungsgeschwindigkeit an einen Knotenpunkt angezeigt um diesen bei einer Grünphase passieren zu können. Die Geschwindigkeit wird vom Fahrzeug anhand der prognostizierten Schaltzeiten der LSA berechnet. Das kann ergänzend für ÖPNV-Fahrzeuge zur Anmeldung an die LSA genutzt werden, um Halten an dem Knotenpunkt zu vermeiden.

Vorteile sind die Reduktion von Verlustzeiten an LSAs und die Kraftstoffreduktion durch vermiedenes Halten und Anfahren.

Für den GLOSA-Dienst müssen die Fahrzeuge mit C-ITS OBUs ausgerüstet und der geplante Fahrweg bekannt sein. Die Fahrzeuge müssen außerdem ihre eigne Position mit einer Genauigkeit von 5m bestimmen können. Die LSA sendet dann über die verbaute RSU MAP und SPAT-Nachrichten.

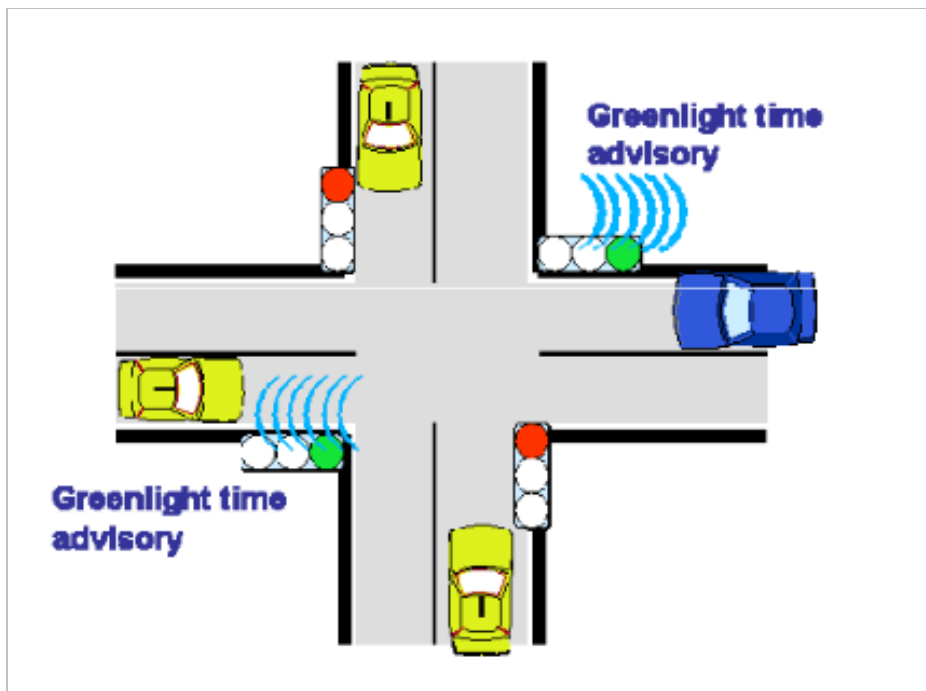


Abbildung 9: C-ITS | GLOSA Funktionsweise ⁸

⁸ Quelle | ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06), S. 50

Abbiege-Assistent (vgl. C.1.2.4 Vulnerable Road User Warning)

Die Anwendung eines Abbiegeassistenten auf Basis von C-ITS ist eine mögliche Maßnahme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, besonders beim Abbiegen von Bussen, da hier der sogenannte „Tote Winkel“ besonders groß ist. Fahrzeugführer werden gewarnt, wenn sich schwache Verkehrsteilnehmer im geplanten Fahrweg aufhalten. Die Erkennung der schwachen Verkehrsteilnehmer kann entweder passiv durch Detektoren am Knotenpunkt, durch andere ausgerüstete Fahrzeuge oder durch aktive Sender bei den Verkehrsteilnehmern erfolgen.

Der Abbiege-Assistent erhöht die Verkehrssicherheit.

Für den Abbiege-Assistent müssen die Fahrzeuge mit C-ITS OBUs ausgerüstet und der Fahrtweg bekannt sein. Sensorik muss am Knotenpunkt und an der RSU verbaut sein. Die Sensordaten der RSU müssen an der On-Board-Unit am Fahrzeug empfangen und ausgewertet werden.

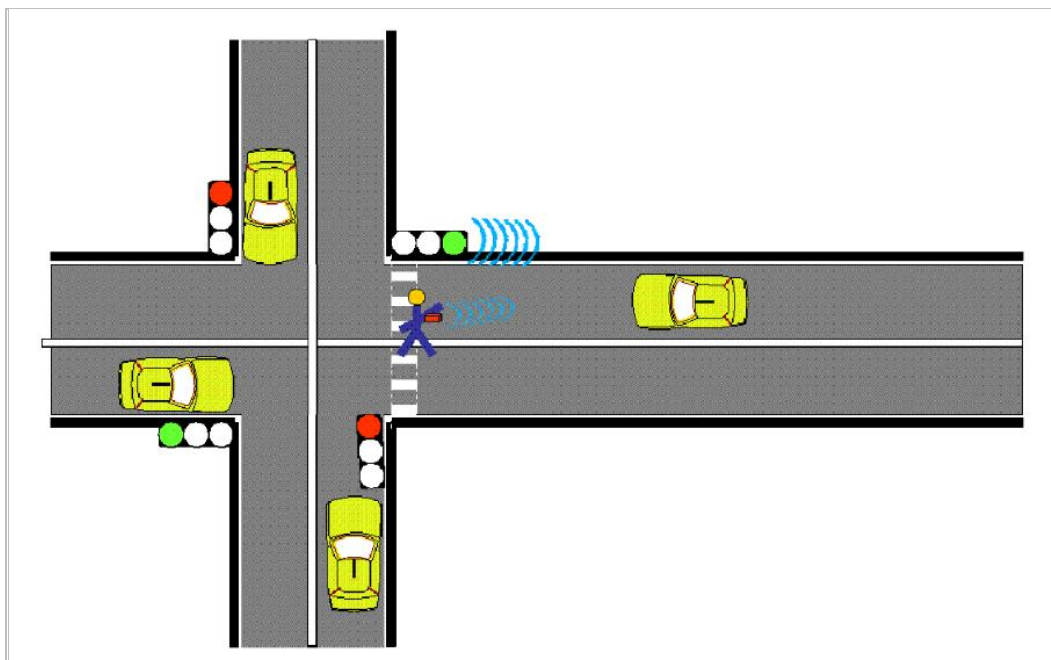


Abbildung 10: C-ITS | Abbiege Assistent Funktionsweise ⁹

⁹ Quelle | ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06), S. 31

3.1.6 Weitere Systeme

Dieses Kapitel soll einen Überblick weiterer derzeit verfügbarer Produkte und Dienste zur Beschleunigung des Öffentlichen Verkehrs bieten.

3.1.6.1 Induktionsschleife

Ein mit Wechselspannung beaufschlagter Draht, der im Boden eingelassen wird, wirkt als Spule. Durch Parallelschalten eines Kondensators wird die Metallschleife zu einem Schwingkreis mit einer Resonanzfrequenz, die von der Induktivität der Spule abhängig ist. Fährt ein Fahrzeug in den Bereich der Spule, verändert sich durch den Metallanteil im Fahrzeug die Induktivität der Spule und somit auch die Resonanzfrequenz. Außerdem wird die Dämpfung der Schwingung geringer. Durch zusätzliche Elektronik können anhand typischer Hüllkurven unterschiedliche Fahrzeugarten unterschieden werden. Da Induktionsschleifen im ÖPNV jedoch meist nur zur Anmeldung an eine LSA (einfache Detektion) genutzt werden und um Kosten zu sparen, werden Induktionsschleifen oft auf separaten Busspuren verwendet. Da es eine einfache und mittlerweile gut etablierte Technologie ist, gibt es zahlreiche Anbieter wie zum Beispiel: Roekens GmbH & Co. KG, SWARCO Traffic Systems GmbH, Grimm GmbH & Co. KG.

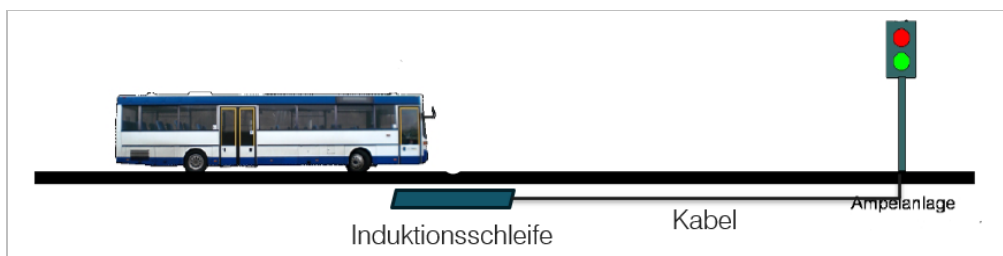


Abbildung 11: Aufbau ÖPNV-Bevorrechtigung mittels Induktionsschleife

3.1.6.2 Oberleitungskontakt

Detektion über Oberleitungskontakte ist ein Meldungsverfahren für Straßenbahnen und Oberleitungsbusse, bei dem die Anwesenheit von Pantographen erkannt und ausgewertet werden. Durch die Kombination mehrerer Kontakte hintereinander ist es möglich, zusätzlich die Richtung des Fahrzeuges zu detektieren. Oberleitungskontakte werden jedoch meist nur für die Erkennung der Gleisbelegung genutzt. Mehrfachtraktionen sind in der Regel unproblematisch, da die Funktionsweise ähnlich wie bei Achszählern ist. Das bedeutet die Anzahl an erfassten Pantographen beim Einfahren in den Gleisabschnitt wird gespeichert und mit der Anzahl beim Verlassen abgeglichen.

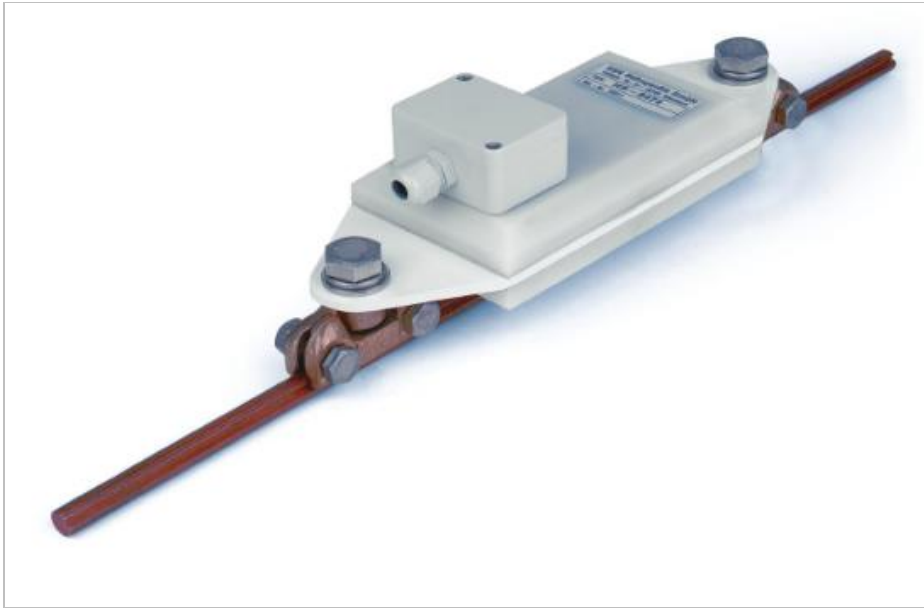


Abbildung 12: Oberleitungskontakt Typ 8474 von ESN Bahngeräte GmbH ¹⁰

3.1.6.3 Manuelle Anmeldung

Die Manuelle Anmeldung fasst alle Anmeldeverfahren zusammen, bei denen der Fahrzeugführer sich „von Hand“ anmelden muss. Im ÖPNV-Bereich erfolgt dies meist über ein Identifikationsmedium, zum Beispiel einem Schlüssel (oft Bartschlüssel) oder einem digitalen Chip. Die Identifikation ist auch direkt am LSA-Mast über einen Taster oder Anforderungssensor möglich. Da es bei diesen Methoden immer zu einer Fahrtunterbrechung kommt, weil der Fahrer während der Anmeldung nicht weiterfahren kann oder sogar aussteigen muss, wird diese Methode meist nur noch als Rückfallebene genutzt.

¹⁰ Quelle | <https://esn-online.de/wp-content/uploads/datenblaetter/sensortechnik/Beruehrungsloser-Oberleitungskontakt-Typ-8474.pdf>, S.1



Abbildung 13: Schlüsselkontakte am Lennéplatz (Dresden) mit 4 möglichen Ausfahrrichtungen¹¹

3.2 Vergleich zwischen dezentraler und zentraler ÖPNV-Bevorrechtigung

3.2.1 Dezentrale ÖPNV-Bevorrechtigung

Bei der dezentralen ÖPNV-Beschleunigung kommunizieren das Fahrzeug und die LSA direkt miteinander, ohne dass eine Recheneinheit dazwischengeschaltet ist. Das führt in der Regel zu kurzen Latenzzeiten, die sich meist im Millisekundenbereich befinden, und zu einem robusten System, da der Ausfall eines Knotenpunktes keine Auswirkungen auf andere hat. Es gibt außerdem weniger Komponenten: meist nur Sendeeinheiten an den Fahrzeugen und infrastrukturseitige Empfangseinheiten, was das System an sich robust macht. Dadurch ist die dezentrale ÖPNV-Beschleunigung wartungsärmer als die zentrale.

Bei einer dezentralen ÖPNV-Bevorrechtigung wird nur ein Knotenpunkt betrachtet und optimiert. Deswegen müssen im Vergleich zu einem zentralen Ansatz die Wechselwirkungen auf die umliegenden Knotenpunkte gesondert betrachtet werden. Es müssen zum Beispiel Grüne Wellen und Rückstaus aufgrund verlängerter Rotphasen für den motorisierten Individualverkehr berücksichtigt werden.

¹¹ Quelle | Diplomarbeit: Einführung in von V2X bei der DVB AG, S. 15

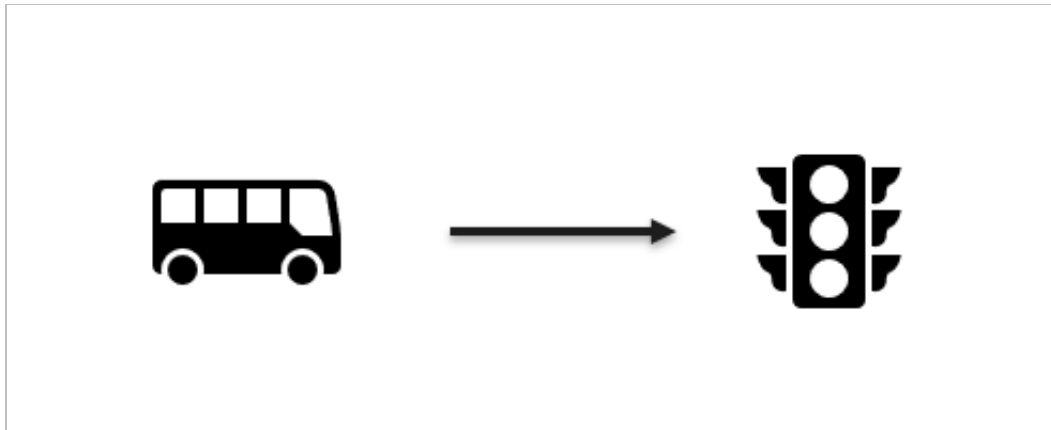


Abbildung 14: Funktionsweise dezentrale ÖPNV-Bevorrechtigung

3.2.2 Zentrale ÖPNV-Bevorrechtigung

Bei der zentralen ÖPNV-Beschleunigung ist im Gegensatz zum dezentralen Ansatz mindestens eine Recheneinheit bei der Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA dazwischengeschaltet. In der Regel jedoch zwei, die Leitstelle des Verkehrsbetriebs und die Verkehrsleitzentrale, die meist zum Straßenverkehrsamt gehört. Dadurch können zusätzliche Informationen, wie die derzeitige Verkehrssituation, Verspätung anderer ÖPNV-Fahrzeuge oder Baustellen berücksichtigt werden. Außerdem sind automatische Datensammlungen und dadurch weitere Optimierungen möglich. Es ist jedoch ein „Single Point of Failure“ System, was bedeutet, dass es bei einem Ausfall einer zentralen Recheneinheit zu einem kompletten Ausfall bzw. eingeschränkter Nutzung des Systems kommen kann. Die hohe Anzahl an Schnittstellen im System führen außerdem zu einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit und komplexeren Fehlersuche bei Störungen.

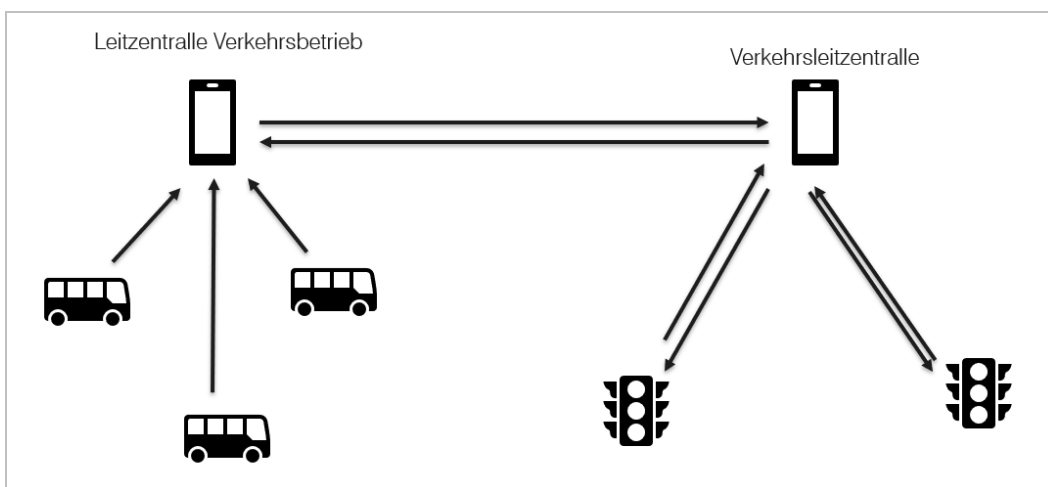


Abbildung 15: Funktionsweise zentrale ÖPNV-Bevorrechtigung

3.2.3 Vergleich anhand des Systems „Mobilfunk“

Die Kommunikation bei der ÖPNV-Bevorrechtigung lässt sich in direkte und indirekte unterteilen. Bei der direkten Kommunikation sendet das Fahrzeug die Informationen an die LSA ohne dass Infrastruktur oder eine Instanz dazwischengeschaltet ist. (vgl. Abbildung 16)

Die Systemarchitektur kann dezentral, das bedeutet jeder Knotenpunkt wird unabhängig voneinander optimiert, und zentral, also über eine zentrale Instanz umgesetzt werden. (vgl. Abbildung 16)

Bei der ÖPNV-Beschleunigung mithilfe von Mobilfunk (C-V2X) ist es möglich die Kommunikation direkt (LTE Sidelink) oder indirekt durchzuführen. In der Regel ist die Kommunikation bei Mobilfunk jedoch indirekt, da eine Basisstation benötigt wird. Die Reichweite bei LTE Sidelink ist sehr gering, deswegen wird es oft nur genutzt, wenn der Kontakt zu einer Basisstation nicht hergestellt werden kann, zum Beispiel in einem Tunnel.

Es lässt sich außerdem sowohl eine dezentrale als auch eine zentrale Systemarchitektur realisieren. Bei einem dezentralen Ansatz kann die Kommunikation entweder indirekt über das Netz oder direkt mit LTE Sidelink erfolgen. Der Vorteil einer solchen Architektur sind die aufgrund der kurzen Wege sehr geringen Latenzzeiten, die sich in der Regel im Millisekundenbereich befinden.

Wenn eine zentrale ÖPNV-Beschleunigung umgesetzt wird, kommunizieren Fahrzeug und LSA nicht direkt miteinander, sondern meistens über das Netz und zusätzlich über zentrale Recheneinheiten. Unter Umständen wäre es auch möglich, dass Fahrzeuge und Leitstelle direkt miteinander kommunizieren. Die Kommunikation von der Recheneinheit zu den LSA muss nicht zwingend mit Mobilfunk umgesetzt werden. Aufgrund der verlängerten Wege und zusätzlichen Instanzen kann die Latenz in schlechten Fällen bis zu 40 Sekunden betragen.

Um die Vorteile der unterschiedlichen Kommunikationsarten und Systemarchitekturen zu nutzen, werden in der Realität oft Mischformen realisiert. So wurde zum Beispiel bei BiDiMiVe eine Kombination aus einer dezentralen und zentralen Systemarchitektur umgesetzt, bei der die eigentliche Bevorrechtigung dezentral und direkt von Fahrzeug zu LSA durchgeführt wurde. Zusätzliche Daten wurden dann an eine zentrale Leitstelle gesendet, die diese Informationen an die LSAs weiterleitet. (vgl. Abbildung 8)

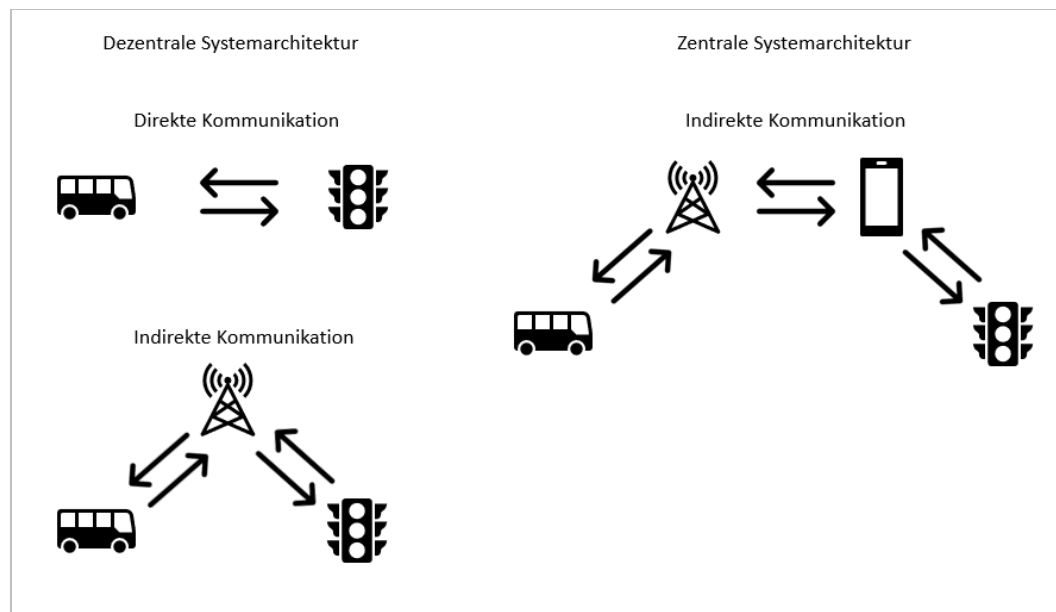


Abbildung 16: Vergleich dezentrale und zentrale Systemarchitektur

3.3 Zusammenfassung und Fazit

Das aktuelle Infrarot-System, das in Magdeburg zur ÖPNV-Beschleunigung eingesetzt wird, hat sich als nicht zukunftsfähig erwiesen. Die Gründe dafür sind vor allem der hohe finanzielle Aufwand, der für die Instandhaltung des Systems erforderlich ist, sowie die Schwierigkeit, neue Komponenten bzw. Ersatzteile zu beschaffen. Da die Infrarottechnik ein historisches System darstellt, ist das System sehr fehleranfällig und genügt nicht einer zukünftigen Datenübertragung. Diese Faktoren machen das aktuelle Infrarot-System zu einer unwirtschaftlichen und ineffizienten Lösung für die ÖPNV-Beschleunigung. Eine weitere Verwendung der Infrarottechnik wurde 2018 strategisch abgelehnt.

In Magdeburg wurden die Analogfunkgeräte in den Fahrzeugen der MVB 2013 ausgebaut.

Daher werden die **drei Systemvarianten Digitalfunk via TETRA, öffentlicher Mobilfunk und C-ITS vorausgewählt**. Im folgenden Kapitel werden deren Vor- und Nachteile detailliert analysiert sowie verschiedene technische Parameter und Eigenschaften der Systeme beschrieben. Daraus folgt die Ermittlung einer die Vorzugsvariante für eine zukünftige ÖPNV-Beschleunigung.

4 Anmeldesystem der Zukunft für die Landeshauptstadt Magdeburg

Auf Grundlage des Kapitels 3 wurden drei Systemvarianten zur ÖPNV-Beschleunigung vorausgewählt. In diesem Kapitel erfolgt deren detaillierter Vergleich und daraus abgeleitet die Empfehlung eines Anmeldesystems der Zukunft für den ÖPNV in der Landeshauptstadt Magdeburg.

4.1 Technische Betrachtung Datenübertragung ÖPNV zu LSA

Um aus den drei vorausgewählten Systemvarianten die Vorzugsvariante für eine zukünftige ÖPNV-Beschleunigung zu ermitteln, werden verschiedene technische Parameter und Eigenschaften der Systeme beschrieben und deren Vor- und Nachteile analysiert. Um ein möglichst umfassendes Bild über die Fähigkeiten der Datenübertragungssysteme darzustellen, wurden folgende Aspekte bei der technischen Betrachtung berücksichtigt: Rückfallebenen, Ausfallsicherheit, Möglichkeiten der Ferndiagnose, Möglichkeit der Priorisierung von Fahrzeugen, Rückkanal von LSA zum Fahrzeug, die Kompatibilität zur vorhandenen Infrastruktur und Informationssicherheit.

In den folgenden Abschnitten werden die technischen Aspekte der drei Datenübertragungssysteme C-ITS, TETRA und Mobilfunk beschrieben und vergleichend dargestellt.

4.1.1 Rückfallebene

Für die Bewertung der Rückfallebene bei den einzelnen Varianten wurde der Fokus vor allem auf alternative Übertragungsebenen oder /-modi innerhalb des Funksystems und die Möglichkeit des automatischen Wechsels bei Störungen für verbesserte Kommunikationszuverlässigkeit gesetzt.

C-ITS

C-ITS verfügt über mehrere interne Betriebsmodi, die als Rückfallebene dienen können, wenn die Übertragung von SREM/SSEM ausfällt. Zum Beispiel kann ein R09-Telegramm in den Public-Transport-Container der CAM-Nachricht integriert werden. Dieses kann dann anstelle der regulären SREM-Nachricht an die LSA gesendet und ausgewertet werden. Diese Methode führt zu einer Leistungsminderung des Systems, da die CAM-Nachrichten lediglich den Dateninhalt eines R09-Telegramms übertragen und keine spezifischen Informationen wie eine Ankunftsprognose, wie bei einer SREM enthalten. Dennoch bleibt eine einfache Bevorrechtigung möglich, und es kommt nicht zu einem Ausfall. Für diese

Methode muss jedoch nach wie vor eine Kommunikation über das ETSI ITS-G5 Kommunikationsnetz zur RSU aufgebaut werden können.

Da bei einer reinen Nutzung von ETSI ITS-G5 kein alternatives Frequenzspektrum bei C-ITS als das 5,9 GHz-Band vorgesehen ist, kann es bei einer externen Störung dieses Funkkanals zu einem Ausfall kommen. Wird hingegen ein Hybridsystem aus ETSI ITS-G5 und einer mobilfunkbasierten Datenübertragung verwendet, kann eine Störung im 5,9 GHz-Frequenzband durch eine Umschaltung der Datenübertragung zu LTE- oder 5G kompensiert werden.

TETRA

Im TETRA-Funknetz können bei Ausfällen oder Störungen die Geräte vom Trunked-Modus (Kommunikation über das Netz) in den Direct-Modus wechseln. Im Direct-Modus kommunizieren die Geräte über die Luftschnittstelle und sind unabhängig vom Netz, sodass eine fortlaufende Kommunikation gewährleistet werden kann, solange die Geräte funktionsfähig sind. Allerdings können Geräte im Direct-Modus nur innerhalb ihrer Funkreichweite miteinander kommunizieren. In einer zentralen Systemarchitektur können nur die Geräte, die sich innerhalb ihrer Funkreichweite befinden, mit der Zentraleinheit kommunizieren. Ein weiteres Problem beim Wechseln der Modi ist das Umschalten der Empfangsgeräte an den LSAs. Dieser Vorgang kann nicht automatisch oder zentral erfolgen, sondern muss an den einzelnen Funkgeräten vor Ort durchgeführt werden.

Mobilfunk

Im Mobilfunk ist es möglich, bei Störungen im 4G-Netz in das 2G-Netz zu wechseln. Dadurch ist es auch bei einem Komplet- oder Teilausfall des 4G-Netzes über das unabhängige 2G-Netz möglich, eine ÖPNV-Priorisierung zu realisieren. In den meisten Modulen ist diese Umschaltung bereits automatisch bei Störungen implementiert, was bedeutet, dass der Betreiber keine Softwareanpassungen vornehmen muss.

Der Wechsel in das 2G-Netz birgt jedoch Nachteile. Durch die veraltete Technologie ist die Kommunikation mit hohen Latenzzeiten, einer reduzierten Qualität und Sicherheit der Datenübertragung verbunden.

4.1.2 Ausfallsicherheit

Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit im Betrieb werden die verschiedenen Technologien hinsichtlich ihrer Redundanzfähigkeit (die Fähigkeit, den Ausfall einer Komponente durch eine andere auszugleichen) und ihrer Resistenz gegen Störungen (Einsatz von Techniken wie Fehlerkorrekturverfahren, Frequenzsprungverfahren usw. zur Minderung von Interferenzen oder Signalverlust) analysiert.

C-ITS

Bei einem Defekt einer RSU innerhalb eines C-ITS-Netzwerks können benachbarte RSUs im Straßennetz aktiviert werden, um die Nachrichtенbearbeitung und -weiterleitung zu übernehmen. Durch das Prinzip des „Hoppings“ ist es möglich, dass Nachrichten über mehrere Knotenpunkte hinweg auch über längere Distanzen übermittelt werden. Dies führt zwar zu einer erhöhten Latenz (bis zu mehreren Hundert Millisekunden, je nach Entfernung und Anzahl der Hopps), ermöglicht jedoch die Kommunikation mit Teilnehmern, die sich außerhalb der direkten Funkreichweite befinden.

Im C-ITS-Kontext kommt das Verfahren der Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction) und der automatischen Wiederholungsanfrage (Automatic Repeat Request) zum Einsatz. Dabei kodiert der Sender die Nachricht redundant, was dem Empfänger erlaubt, Fehler eigenständig zu erkennen und zu beheben. Kann ein Fehler nicht behoben werden, wird automatisch eine Anforderung zur erneuten Übermittlung der Nachricht gestellt.

TETRA

TETRA-Netzwerke sind von der Öffentlichkeit abgetrennte Netze die nur von den zu der Behörde gehörenden Geräten genutzt werden können. Dadurch existieren keine externen Störeinflüsse, was zu einer sehr hohen Zuverlässigkeit führt. Ausfälle von Basisstationen können durch die Nutzung von umliegenden Basisstationen kompensiert werden.

Es ist außerdem ein Forward Correction Verfahren, ähnlich wie bei C-ITS, im System implementiert, mit dem fehlerhafte Nachrichten erkannt und korrigiert werden können.

Mobilfunk

In einem Mobilfunknetz ist es nicht erforderlich, dass sämtliche Basisstationen stets funktionsfähig sind. In der Regel existieren mehrere Stationen innerhalb der Funkreichweite, die eine Verbindungsaufnahme ermöglichen. Mittels spezialisierter Softwareprozesse innerhalb des Funksystems wird ein automatisches Handover realisiert, das den Wechsel von einer Funkzelle zur nächsten nahtlos gestaltet, sollte eine Basisstation ausfallen oder nicht verfügbar sein.

Obwohl Mobilfunknetze eine breite Nutzerbasis haben, da sie grundsätzlich von jedem mit einem mobilen Endgerät verwendet werden können, resultiert dies in einer geringeren Ausfallsicherheit. Die Vielzahl an potenziellen Störquellen kann die Netzstabilität beeinträchtigen. Zusätzlich führen Großveranstaltungen wie Konzerte, Sportereignisse oder Feiertage wie Silvester regelmäßig zu einer Überlastung des Netzwerks, was die Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit beeinflussen kann.

4.1.3 Ferndiagnose

Bei der Ferndiagnose wurden Möglichkeit zur Überwachung und Diagnose des Systems aus der Ferne analysiert, um potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen.

Eine gute Ferndiagnose verbesserte die Betriebszeit, reduziert die Wartungskosten und erhöht die Zuverlässigkeit des Systems.

C-ITS

C-ITS bietet sehr gute Möglichkeiten zur Ferndiagnose und zur Überwachung des Zustands der Systeme. Die RSUs und OBUs können permanent in einem Monitoringsystem eingeloggt werden. Dadurch können Probleme frühzeitig über das Backbone-/ Bordrechnernetzwerk gefunden werden. Außerdem ist es möglich über besagte Methoden die RSUs und OBUs mit Updates zu versorgen und somit Probleme zu beheben oder Verbesserungen vorzunehmen. Eine Anbindung an ein zentrales Monitoringsystem ist insbesondere für die Aktualisierung von Zertifikatsdiensten notwendig.

TETRA

Die Ferndiagnose bei TETRA ist etwas komplexer, da sich die Teilnehmer nur während der Kommunikation im Netz befinden. Solange sich das Gerät nicht im Netz befindet, kann es auch nicht auf Funktionstüchtigkeit geprüft werden. Über das ITCS kann jedoch eingesehen werden, wenn ein Gerät im Netz eingebucht ist. Anhand dieser Information können mögliche Störungen abgeleitet werden. Zum Beispiel falls das Gerät seit einer sehr langen Zeit nicht mehr eingebucht war.

Geräte, die sich im Betriebsmodus DMO befinden, können nur in direkter Funkreichweite erreicht werden, was eine Ferndiagnose von einem zentralen Ort unmöglich macht.

Mobilfunk

Da das Mobilfunknetz durch einen externen Netzprovider zur Verfügung gestellt wird, ist auch dieser für die Diagnose des Netzes verantwortlich.

Die Diagnose der Mobilfunkmodule liegt in der Verantwortung des Verkehrsbetriebes. Dafür kann eine Monitoring-Software ähnlich wie bei C-ITS verwendet werden. Außerdem können Over-The-Air-Updates der Mobilfunkmodule durchgeführt werden, um zum Beispiel softwareseitige Probleme zu beheben. Es kann außerdem im ITCS überprüft werden, ob eine Mobilfunkverbindung zum Fahrzeug besteht.

4.1.4 Priorisierung ÖPNV-Fahrzeuge untereinander

Um die Effizienz der ÖPNV-Bevorrechtigung weiter zu steigern kann eine Priorisierung der ÖPNV-Fahrzeuge untereinander implementiert werden. Diese wird relevant, wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig an einem Knotenpunkt ankommen und dient dazu, die Verzögerungen einzelner Fahrzeuge zu reduzieren bzw. die Gesamtqualität der Beförderung zu verbessern.

Grundlage für eine erfolgreiche fahrzeugseitige Berechnung der optimalen Priorisierung bildet eine robuste Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation: Nur wenn ein Fahrzeug erkennt, dass ein weiteres Fahrzeug mit einer konkurrierenden Fahrtrajektorie sich dem gleichen Knotenpunkt nähert, kann das Fahrzeug auf Basis der eigenen und der empfangenen Informationen einen für den Gesamtbetrieb optimalen Priorisierungswert errechnen.

Im folgenden Vergleich wird daher nicht nur berücksichtigt, inwieweit eine Priorisierungsinformation über das jeweilige Funksystem übertragen werden kann, sondern auch wie die für die Berechnung der Priorisierungswerte benötigten Informationen zum berechnenden Fahrzeug gelangen können. Die einzelnen Varianten wurden auf die Umsetzbarkeit einer Priorisierung von ÖPNV-Fahrzeugen untereinander untersucht.

C-ITS

Die Priorisierung der ÖPNV-Fahrzeuge untereinander ist im ITS G5 Standard bereits implementiert. Durch die Fahrzeuge ausgesendeten CAM-Nachrichten werden über die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikationen relevante Daten ausgetauscht. Die Berechnung der Priorisierung kann sowohl im Fahrzeug als auch im LSA-Steuerrechner festgelegt werden.

Im Forschungsprojekt „BiDiMoVe“ wurde eine Priorisierung der ÖPNV-Fahrzeuge untereinander erfolgreich mithilfe eines „Priority“ Wertes, der im Fahrzeug über ein im Forschungsprojekt speziell entwickeltes Verfahren erzeugt wurde, umgesetzt. Dieser Wert umfasst eine Multi-Kriterien-Bevorrechtigung von ÖPNV-Fahrzeugen, bei der zum Beispiel die aktuelle Fahrplanlage und der Besetzungsgrad des Busses Einfluss auf die Priorisierungsstärke haben. Dieser „Priority“-Wert wird dann von der LSA entsprechend verarbeitet.

TETRA

Da bei TETRA zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA die im Standard definierten R09-Telegramme genutzt werden, ist eine fahrzeugseitige Priorisierung nicht möglich, da die Übertragung der für die Berechnung notwendigen Informationen (hier Informationen über alle an einem Knotenpunkt konkurrierend ankommenden Fahrzeuge und deren Verspätungslage/Auslastung) über die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation im Standard nicht definiert ist und ebenso die zur freien Nutzung zur Verfügung stehenden Infobytes

nicht ausreichen würden, um die benötigten Informationen zu versenden. Im Telegrammformat R09.16 kann eine Priorisierung gesendet werden, diese wird in der Praxis -wenn überhaupt- als für das Fahrzeug definierter statischer Wert z.B. zur Priorisierung von Einsatzfahrzeugen genutzt.

Eine Koordination der Fahrzeuge untereinander kann jedoch bei einem zentralen Ansatz über eine Leitstelle erfolgen. Die verlängerten Wege sorgen für hohe Latenzzeiten, was die Effektivität stark einschränken kann, wenn Informationen unter Umständen zu spät den Empfänger erreichen.

Mobilfunk

Wenn die Fahrzeuge miteinander im gleichen IP-basierten Subnetz kommunizieren, ist eine fahrzeugseitige Priorisierung theoretisch möglich, da die Fahrzeuge untereinander Daten, wie zum Beispiel ihre Verspätung oder Auslastung, austauschen und verarbeiten können. Eine technische Umsetzung eines mobilfunkgestützten fahrzeugseitigen Priorisierungssystems ist bisher noch nicht in der Praxis durchgeführt worden.

Bei der Nutzung von R09-Telegrammen ist die Koordination genau wie bei TETRA nur bei einer zentralen Architektur über die Leitstelle möglich.

4.1.5 Rückkanal LSA zu Fahrzeug

Dieses Bewertungskriterium beschreibt die Möglichkeit der LSA, Informationen funkbasiert an das anfordernde Fahrzeug als Rückmeldung senden zu können. Dies ist wichtig, um den Fahrzeugführern eine Rückmeldung zu geben, ob ein Priorisierungswunsch erkannt und wie dieser im LSA-Steuerprogramm berücksichtigt wird. Außerdem ist es eine Voraussetzung für manche Funktionen, wie zum Beispiel die dynamische Anpassung der Fahrempfehlung im Fahrzeug.

C-ITS

Ein Rückkanal von der LSA zum Fahrzeug ist über die Signal Status Message (SSEM) im Standard vorhanden. Dieser Nachrichtentyp wird als Antwort auf eine Request-Nachricht (SREM) mit der voraussichtlichen Freigabezeit für die gewünschte Fahrtrelation von der LSA gesendet.

TETRA

In der Regel können die LSAs über TETRA nicht an die Fahrzeuge senden. Die derzeitigen TETRA-Empfangseinheiten auf dem Markt sind darauf ausgelegt, Nachrichten nur zu empfangen.

Bei einer zentralen Architektur ist es möglich, über eine zentrale Recheneinheiten Rückmeldungen zu schicken. Diese Methode wird beispielsweise bei der Wuppertaler Schwebebahn angewendet, wobei diese jedoch mit erhöhten Latenzen verbunden ist.

Mobilfunk

Befinden sich die Fahrzeuge und die LSA im gleichen IP-Netzwerk, ist ein Rückkanal von der LSA zum Fahrzeug theoretisch möglich.

Wird jedoch über die R09-Telegramme kommuniziert, ist ein Rückkanal nicht vorgesehen, da im Standard keine Antwortnachricht definiert ist. Es kann jedoch genau wie bei TETRA bei einem zentralen Aufbau trotzdem ein Rückkanal über eine zentrale Recheneinheit aufgebaut werden.

4.1.6 Kompatibilität zur vorhandenen Infrastruktur

Die Bewertung der Kompatibilität mit der bestehenden Infrastruktur konzentriert sich auf die Integration der Schnittstellen in vorhandene Systeme bei LSA und im Fahrzeug, die Nutzung bestehender Hard- und Software bei der Implementierung des Funksystems sowie die Fähigkeit zur Aktualisierung für zukünftige Entwicklungen des Funksystems.

C-ITS

Da weder die Infrastruktur noch die Fahrzeuge der MVB derzeit über eine eingebaute Ausrüstung für den C-ITS-Funk verfügen, müssen On-Board-Units und Road-Side-Units beschafft und entsprechend in den Fahrzeugen und entlang der Strecke installiert werden. Die Verbindung der Road-Side-Units zu den Lichtsignalanlagen stellt bei den Steuergeräten der „sX“-Produktfamilie von Yunex keine Probleme dar. Es ist eine Umprogrammierung der LSA-Steuerung notwendig.

TETRA

Theoretisch könnten die vorhandenen TETRA-Funkgeräte der Fahrzeuge verwendet werden. Da die Netzauslastung im aktuell verwendeten Trunked-Mode durch die Kommunikation mit der Leitstelle sehr hoch ist und daher eine Umsetzung der ÖPNV-Beschleunigung nur im TETRA Direct-Mode sinnvoll umsetzbar ist und gleichzeitig die Umschaltzeiten zwischen den beiden Betriebsmodi hohe Latenzen verursachen würden, müssen in den Fahrzeugen zusätzlich zu den vorhandenen Funkgeräten weitere DMO-Funkgeräte nachgerüstet werden. Ebenso müssen zusätzliche Empfänger an den LSAs gekauft und ausgerüstet werden. Bei einem zentralen Ansatz kann auf zusätzliche Empfänger an den LSAs verzichtet werden, es wird aber eine Software zur Priorisierung und Weiterleitung der Anmeldungen von den Fahrzeugen an die LSA benötigt. Bei Nutzung von R09-Telegrammen ist eine Umprogrammierung der LSA-Steuerung notwendig.

Mobilfunk

In den Bordrechnern der Fahrzeuge sind bereits Mobilfunkgeräte eingebaut, die auch für die ÖPNV-Beschleunigung genutzt werden können und daher keine zusätzliche Beschaffung erfordern. Jedoch ist es erforderlich, zusätzliche Mobilfunkempfänger an den Lichtsignalanlagen zu erwerben und zu installieren. Bei einem zentralen Ansatz, ähnlich wie bei TETRA, wäre keine zusätzliche Hardware erforderlich, dennoch wird eine zentrale Software zur Priorisierung und Weiterleitung der Anmeldungen von den Fahrzeugen an die LSA benötigt. Ebenfalls wird beim zentralen Ansatz eine Schnittstelle zwischen zu beschaffender Software und LSA-Leitrechner bedingt. Bei Nutzung von R09-Telegrammen ist eine Umprogrammierung der LSA-Steuerung notwendig.

4.1.7 Informations-Sicherheit

Das Bewertungskriterium "Informationssicherheit" umfasst die Fähigkeit zur Implementierung von Verschlüsselungsverfahren, einer strukturierten Zugriffskontrolle und Authentifizierung für die Nutzung und Verwaltung des Systems. Darüber hinaus ist der Schutz vor Manipulation der Kommunikation der Lichtsignalanlagen von entscheidender Bedeutung.

C-ITS

In einem C-ITS System werden die Nachrichten durch kryptographische Signaturen geschützt. Es ist keine Verschlüsselung vorgesehen, da diese dem offenen Grundprinzip der kooperativen Datenübertragung entgegenstehen würde. Es wird bei jedem Empfänger geprüft, ob der Sender der Nachricht gemäß seiner Signatur authentifiziert und autorisiert ist, die Nachrichten zu versenden. Nachrichten von Sendern von ungültigen oder nicht vertrauenswürdigen Zertifikaten werden von den Empfängern abgelehnt. Die OBUs und RSUs müssen durch die Public-Key-Infrastruktur entsprechende Zertifikate erhalten.

TETRA

Nachrichten in einem TETRA-Netzwerk werden mithilfe der Tetra Encryption Algorithmen (TEA) verschlüsselt. Es gibt insgesamt vier dieser Algorithmen. TEA 1 und 4 sind für industrielle Anwendungen verfügbar, während TEA 2 und 3 ausschließlich für Sicherheitsaufgaben innerhalb des Behörden- und Organisationsfunks (BOS) verwendet werden dürfen, beispielsweise von der Polizei. Im Jahr 2021 wurden von der IT-Sicherheitsfirma MidnightBlue erhebliche Sicherheitslücken im TEA 1 festgestellt. Obwohl TEA 4 nicht spezifisch untersucht wurde, ist anzunehmen, dass er ähnliche Schwachstellen wie TEA 1 aufweist. Dies deutet darauf hin, dass ein TETRA-Netzwerk, das TEA 4 verwendet, voraussichtlich ebenfalls anfällig für die Manipulation von Nachrichten ist.

Mobilfunk

In 4G-Netzwerken sind die Nachrichten verschlüsselt, und sowohl das Mobilfunkmodul als auch die Basisstation müssen sich gegenseitig authentifizieren. Trotz dieser Sicherheitsvorkehrungen besteht jedoch die theoretische Möglichkeit, dass der Netzbetreiber Daten manipulieren kann, da es sich um ein externes Netzwerk handelt.

Bei 2G handelt es sich um eine ältere Technologie, bei der die Sicherheitsverfahren entsprechend veraltet sind. Das Hauptproblem bei 2G ist, dass die Basisstation sich nicht authentifizieren kann. Dies ermöglicht es theoretisch nahezu jedem mobilfunkfähigen Gerät, sich als Basisstation auszugeben, Nachrichten zu empfangen und zu manipulieren.

4.1.8 Betrachtung besonderer Funktionen

Für das Anmeldesystem der Zukunft wurden weiterhin folgende Funktionen in Betracht gezogen:

- (1) Manuelle Anforderung vom Fahrzeug
- (2) Signalisierung einer geplanten Durchfahrt an einer Haltestelle
- (3) Nutzung R09-Telegramme für nicht im Protokoll vorgesehene Funktionen

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse der Untersuchung auf Umsetzbarkeit in den drei Varianten dargestellt.

	C-ITS	TETRA	Mobilfunk
(1)	<u>Möglich</u> , mit manuellem Versenden der SREM	<u>Möglich</u> , mit manuellen versenden des R09-Telegramms (z.B. Button an Bordrechner)	<u>Möglich</u> , mit manuellem versenden des R09-Telegramms (z.B. Button an Bordrechner)
(2)	<u>Möglich</u> , automatische Ankunftszeitänderungen bei SREM mit/ohne zusätzliche Aktion des Fahrers (z.B. Button an Bordrechner)	<u>Möglich</u> , durch manuelle Anforderung des Fahrers (z.B. Button an Bordrechner)	<u>Möglich</u> , durch manuelle Anforderung des Fahrers (z.B. Button an Bordrechner)
(3)	<u>Möglich</u> , über Freitextinhalt in CAM-Nachrichten	<u>Teilweise Möglich</u> , mit ergänzenden Informationen über SDS (bis zu 140 Zeichen)	<u>Möglich</u> , mit ergänzenden Informationen (z.B. Fahrzeug ID, Zeitsynchronisation)

Tabelle 3: Übersicht der besonderen Funktionen im Anmeldesystem der Zukunft

4.2 C-ITS Funktionen im Vergleich mit TETRA und Mobilfunk

Im Rahmen von Kapitel 3.1.5 wurden zusätzliche Funktionen von Lichtsignalanlagen, insbesondere im Kontext kooperativer intelligenter Verkehrssysteme, ermittelt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchung hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit für TETRA und Mobilfunk dargelegt. Diese Funktionen umfassen:

- (1) ÖPNV-Priorisierung via SREM/SSEM mit voraussichtlicher Ankunftsprognose an Haltelinie
- (2) GLOSA (Green-Light-Optimal-Speed-Advisory)
- (3) Abbiege-Assistent zum Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmern

4.2.1 TETRA

- (1) Die Umsetzung einer ÖPNV-Priorisierung mittels SREM/SSEM ist aufgrund der typischen Netz- und Systemarchitektur von TETRA nicht möglich, da ein dauerhafter Informationsaustausch mit der Lichtsignalanlage hierbei nicht vorgesehen ist.
- (2) Eine GLOSA ist mit TETRA nicht umsetzbar, da ein permanenter Informationsaustausch wie bei SREM/SSEM Voraussetzung für den Dienst ist.
- (3) Die Implementierung eines Abbiege-Assistenten ist nicht möglich, da die R09-Telegramme keine entsprechende Funktion vorsehen. Darüber hinaus gibt es nicht ausreichend Platz im SDS-Kurznachrichtendienst für die Übertragung von Sensordaten und Warnungen.

4.2.2 Mobilfunk

- (1) Die ÖPNV-Priorisierung mittels SREM/SSEM ist theoretisch umsetzbar. Ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit der Lichtsignalanlage ist in einem Mobilfunknetz möglich. Allerdings erfordert dies individuelle Software auf den Steuergeräten der Lichtsignalanlagen, die in der Lage ist, die gängigen C-ITS-Protokolltypen zu interpretieren und zu senden.
- (2) Die Implementierung eines GLOSA-Dienstes ist machbar. Wie bei der Priorisierung mittels SREM/SSEM wird hierfür jedoch maßgeschneiderte Software benötigt, die in der Lage ist, C-ITS-Telegramme auf den Steuergeräten der Lichtsignalanlagen und Fahrzeugen zu erstellen und zu verarbeiten.
- (3) Es existiert keine Funktion im R09-Telegramm, die die Nutzung eines Abbiege-Assistenten ermöglicht. Dennoch kann dies durch das Senden zusätzlicher Informationen umgesetzt werden. Allerdings gibt es keine vorgefertigten industriellen Lösungen dafür, weshalb eine Eigenentwicklung mit erheblichem Aufwand verbunden wäre.

4.3 Finanzielle Bewertung der Systeme

Es werden eine grobe wirtschaftliche Abschätzung bezüglich der Investitions- und Betriebskosten aller vorausgewählten Systeme durchgeführt sowie finanzielle Förderungsmöglichkeiten untersucht.

4.3.1 Übersicht der Investitions- und Betriebskosten

Die Einführung von ÖPNV-Beschleunigungssystemen mittels verschiedener Technologien wie C-ITS, TETRA-Funk oder Mobilfunk erfordert eine detaillierte Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten. In diesem Kapitel werden die Grundlagen und Annahmen für die Kalkulationen sowie die spezifischen Kosten für jede Technologie beschrieben.

Für die Abschätzung der Kosten werden folgende Annahmen getroffen (alle Kostenangaben sind Nettowerte und entsprechen dem Preisstand 2023):

- Ausrüstung von 95 Straßenbahnen mit den entsprechenden Systemen (fahrzeugseitige Funksender bzw. On-Board-Units inkl. Verkabelung und softwareseitiger Anbindung an den Bordrechner)
- Ausrüstung von 144 Lichtsignalanlagen (LSA) mit ÖPNV-Priorisierung (entsprechende Sende- und Empfangseinheiten mit Anpassung des Lichtsignalprogramms)
- Das TETRA-Netzwerk ist infrastruktureitig so ausgelegt, dass eine zusätzliche Datenübertragung von ÖPNV-Telegrammen (insb. im zentralen Ansatz) ohne Erweiterung umgesetzt werden könnte.

Es werden zwei Szenarien für die LSA-Umrüstung betrachtet:

- C-ITS: Annahme von 25.000 bis 100.000 € pro LSA-Umrüstung für C-ITS, je nach Umfang und Alter der Anlagen inkl. Anpassung des Lichtsignalprogramms und Ausrüstung mit RSUs
- TETRA/Mobilfunk: Annahme von 25.000 € pro LSA-Umrüstung (neue Empfangseinheiten unter Nutzung vorhandener Hardwareschnittstellen mit Anpassung des Lichtsignalprogramms)

Die spezifischen Kosten für jede Technologie werden also wie folgt berücksichtigt:

C-ITS:

- Kosten für die Ausrüstung für alle Straßenbahnen mit On-Board-Units (OBU) inklusive Verkabelung/Antennen: ca. 380.000 €
- Kosten für die Ausrüstung aller LSAs mit Road-Side-Units (RSU): ca. 5.800.000 €
- Kosten für die Anpassung der Bordrechner-Software zur Ansteuerung der OBUs mit C-ITS-Telegrammen: ca. 100.000 €
- Lizenzkosten für Monitoring-Software für RSUs und OBUs: je ca. 9.000 € / Jahr

TETRA / dezentrales System:

- Kosten für zusätzliche Funkgeräte in Straßenbahnen: ca. 190.000 €.
- Kosten für die Ausrüstung einer LSA mit TETRA-Empfängern inklusive Montage: ca. 900.000 €.
- Kosten für die Umrüstung der LSA: ca. 3.600.000 €.
- Kosten für die Anpassung der Bordrechner-Software: ca. 20.000 €.
- Lizenzkosten für Monitoring-Software: ca. 9.000 € / Jahr.
- Es werden keine zusätzlichen Kosten für den Betrieb und die Wartung des TETRA-Funknetzes berücksichtigt, da dieses Funknetz bereits durch den Betriebsfunk der MVB vorhanden ist.

Mobilfunk / dezentrales System:

- Kosten für die Ausrüstung einer LSA mit Mobilfunk-Empfängern inklusive Montage: ca. 900.000 €.
- Kosten für die Umrüstung der LSA: ca. 3.600.000 €.
- Kosten für die Anpassung der Bordrechner-Software: ca. 80.000 €.
- Kosten für den Mobilfunkvertrag der LSA-Empfänger: ca. 14.400 € / Jahr.
- Lizenzkosten für Monitoring-Software: ca. 9.000 € / Jahr.

TETRA / zentrales System:

- Kosten für zusätzliche Funkgeräte in Straßenbahnen: ca. 190.000 €.
- Kauf Software für zentralisierter Lichtsignalanlagen Beeinflussung via R09 Telegramm inkl. OCIT C: ca. 120.000 €
- Kosten für die Umrüstung der LSA: ca. 3.600.000 €.
- Kosten für die Anpassung der Bordrechner-Software: ca. 20.000 €.
- Lizenzkosten Software zur zentralisierten Lichtsignalanlagen Beeinflussung: ca. 30.000 € / Jahr.
- Es werden keine zusätzlichen Kosten für den Betrieb und die Wartung des TETRA-Funknetzes berücksichtigt, da dieses Funknetz bereits durch den Betriebsfunk der MVB vorhanden ist.

Mobilfunk / zentrales System:

- Kauf Software für zentralisierter Lichtsignalanlagen Beeinflussung via R09 Telegramm inkl. OCIT C: ca. 120.000 €
- Kosten für die Umrüstung der LSA: ca. 3.600.000 €.
- Kosten für die Anpassung der Bordrechner-Software: ca. 20.000 €.
- Lizenzkosten Software zur zentralisierten Lichtsignalanlagen Beeinflussung: ca. 30.000 € / Jahr.
- Lizenzkosten Monitoring Software: ca. 9.000 € /Jahr

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Anmeldesystem der Zukunft für die Landeshauptstadt Magdeburg

In folgenden Tabellen sind die entsprechenden Kosten vergleichend gegenübergestellt:

	C-ITS	TETRA	Mobilfunk
Investitionskosten Infrastruktur [€]	5.800.000	4.500.000	4.500.000
Investitionskosten Fahrzeuge [€]	380.000	210.000	80.000
Betriebskosten Infrastruktur [€] (über 15 Jahre)	135.000	---	216.000
Betriebskosten Fahrzeuge [€] (über 15 Jahre)	135.000	135.000	135.000
Summe Infrastrukturkosten [€]	5.935.000	4.500.000	4.716.000
Summe Fahrzeugkosten [€]	515.000	345.000	215.000
Gesamtsumme [€]	6.450.000	4.845.000	4.931.000

Tabelle 4: Übersicht der Investitions- und Betriebskosten der dezentralen ÖPNV-Bevorrechtigung

	TETRA	Mobilfunk
Investitionskosten Infrastruktur [€]	3.600.000	3.600.000
Investitionskosten Fahrzeuge [€]	330.000	140.000
Betriebskosten Infrastruktur [€] (über 15 Jahre)	---	---
Betriebskosten Fahrzeuge [€] (über 15 Jahre)	450.000	450.000 + (135.000)
Summe Infrastrukturkosten [€]	3.600.000	3.600.000
Summe Fahrzeugkosten [€]	780.000	590.000 + (135.000)
Gesamtsumme [€]	4.380.000	4.190.000 + (135.000)

Tabelle 5: Übersicht der Investitions- und Betriebskosten der zentralen ÖPNV-Bevorrechtigung

4.3.2 Bewertung der Investitions-/ und Betriebskosten

Die Investitionskosten und Betriebskosten variieren signifikant zwischen den verschiedenen Technologien und Implementierungsstrategien für die ÖPNV-Beschleunigung. Die Unterschiede lassen sich wie folgt zusammenfassen:

C-ITS (ETSI G5, Dezentrales System)

C-ITS weist die höchsten Investitionskosten sowohl für die Infrastruktur als auch für die Fahrzeugausrüstung auf. Diese Technologie erfordert eine erhebliche finanzielle Anfangsinvestition. Die laufenden Betriebskosten sind moderat, aber im Vergleich zu den anderen Technologien nicht unerheblich. Mit einer Gesamtsumme von 6.550.000 € hat C-ITS die höchsten Gesamtkosten im Vergleich zu den anderen betrachteten Varianten. Daher wird diese Technologie mit - (schlecht) bewertet.

TETRA (Dezentrales System)

Das dezentrale TETRA-System hat moderate Investitionskosten sowohl für die Infrastruktur als auch für die Fahrzeuge. Die laufenden Betriebskosten sind bei dieser Variante vernachlässigbar, da auf das bereits vorhandene Funknetzwerk aufgebaut werden kann und hierfür keine zusätzlichen laufenden Kosten, die über den bereits vorhandenen Wartungsaufwand hinaus gehen, erwartet werden. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 4.845.000 €. Diese Kosten sind im Vergleich zu C-ITS deutlich niedriger, was TETRA zu einer kosteneffizienten Option macht. Allerdings gibt es keine besonderen Vorteile gegenüber anderen Technologien, daher wird TETRA (dezentral) mit 0 (neutral) bewertet.

Öffentlicher Mobilfunk (Dezentrales System)

Der dezentrale Ansatz des öffentlichen Mobilfunks hat ähnliche Investitionskosten wie TETRA, jedoch etwas niedrigere Kosten für die Fahrzeuge, da hierbei auf die bereits im Fahrzeug vorhandene Mobilfunkanbindung des Bordrechners zurückgegriffen werden kann. Die Betriebskosten sind relativ hoch aufgrund der erforderlichen Mobilfunkverträge, was die Gesamtkosten auf 4.931.000 € erhöht. Trotz der moderaten Gesamtkosten bietet der öffentliche Mobilfunk im dezentralen Ansatz keinen deutlichen Kostenvorteil und wird daher ebenfalls mit 0 (neutral) bewertet.

TETRA (Zentrales System)

Die zentrale Implementierung von TETRA weist ähnliche Investitionskosten wie der dezentrale Ansatz auf, jedoch kommen zusätzliche Kosten für die zentralisierte Software hinzu. Zusätzliche laufende Betriebskosten für die Infrastruktur sind nicht vorhanden und die Fahrzeugkosten bleiben moderat. Mit einer Gesamtsumme von 4.380.000 € hat TETRA

(zentral) die niedrigsten Gesamtkosten, was diese Technologie als sehr kosteneffizient erscheinen lässt. Dennoch ist bei der Bewertung dieser Variante zu berücksichtigen, dass die Abschätzung unter der Annahme betrachtet wurde, dass das infrastrukturseitige TETRA-Netzwerk nicht angepasst werden muss. Ob dies mit der aktuellen hohen Auslastung des Netzes auch in der Praxis umgesetzt werden kann, stellt in diesem Kontext ein zusätzliches Kostenrisiko dar, weshalb die Variante mit 0 (neutral) bewertet wird.

Öffentlicher Mobilfunk (Zentrales System)

Der zentrale Ansatz des öffentlichen Mobilfunks bietet ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die Investitionskosten sind sowohl für die Infrastruktur als auch für die Fahrzeuge gering. Es fallen keine zusätzlichen Betriebskosten für die Infrastruktur an und die Fahrzeugbetriebskosten bleiben moderat. Mit einer Gesamtsumme von 4.325.000 € sind die Gesamtkosten im Vergleich aller Varianten am geringsten, was diese Lösung als kosteneffizient und attraktiv erscheinen lässt. Daher wird der öffentliche Mobilfunk (zentral) mit + (gut) bewertet.

Die zentrale Implementierung des öffentlichen Mobilfunks bietet im Verhältnis der betrachteten Varianten die günstigste Implementierung und stellt somit aus Kostensicht die bevorzugte Lösung dar. Dezentrale Ansätze, insbesondere mit C-ITS, sind aufgrund der hohen Investitionskosten weniger attraktiv.

4.3.3 Finanzielle Förderung von ÖPNV-Beschleunigungssystemen

Die finanzielle Förderung von ÖPNV-Beschleunigungssystemen spielt eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung und Einführung dieser Technologien. In diesem Kapitel werden die verfügbaren Fördermöglichkeiten für die Umstellung auf TETRA, Mobilfunk und C-ITS sowie die relevanten Förderprogramme auf nationaler und europäischer Ebene beschrieben.

4.3.3.1 TETRA und Mobilfunk

Für die Umrüstung auf TETRA oder Mobilfunk sind derzeit kaum spezifische Fördermöglichkeiten bekannt, möglicherweise können jedoch EFRE-Mittel (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) genutzt werden.

4.3.3.2 C-ITS

Die Einführung von C-ITS-Systemen wird derzeit durch verschiedene Förderinstrumente unterstützt, teilweise sogar in Kombination möglich.

Förderprogramm "Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme" des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)

Das Förderprogramm "Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme" des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) zielt darauf ab, die Digitalisierung und Modernisierung der Verkehrsinfrastruktur in Städten und Gemeinden zu unterstützen. Dies umfasst auch die Einführung von C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und Effizienz.

Es besteht die Möglichkeit, eine Förderung von 65% bis 80% der Investitionskosten für die Einführung von ÖPNV-Beschleunigungssystemen mit C-ITS zu erhalten. Diese Förderung kann für finanzschwache Kommunen durch zusätzliche finanzielle Unterstützung des Eigenanteils auf bis zu 90% erhöht werden. Am 06.05.2024 wurde ein neuer Förderaufruf für Umsetzungen bis zum Jahr 2026 durch das Ministerium veröffentlicht. Ein jährlicher Förderaufruf war in den letzten Jahren gegeben.

EU: Connecting Europe Facility (CEF):

Die Connecting Europe Facility (CEF) ist ein Finanzierungsinstrument der Europäischen Union, das die Entwicklung hochwertiger, nachhaltiger und effizienter transeuropäischer Netze in den Bereichen Verkehr, Energie und digitale Dienste fördert. Das Hauptziel des CEF-Programms ist es, die europäische Infrastruktur zu modernisieren und zu vernetzen, um das Wirtschaftswachstum und die Wettbewerbsfähigkeit der EU zu stärken und gleichzeitig die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Erstens unterstützt CEF die Entwicklung und Fertigstellung des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V). Dies umfasst die Beseitigung von Engpässen, die Verbesserung der intermodalen Verbindung und die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Zweitens trägt CEF zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei und unterstützt umweltfreundliche und nachhaltige Verkehrslösungen. Drittens fördert CEF die digitale Transformation im Verkehrssektor durch den Einsatz neuer Technologien wie intelligente Verkehrssysteme (ITS) und Kommunikationslösungen wie C-ITS. Die Förderung umfasst verschiedene Maßnahmen, die dazu beitragen, die Effizienz und Sicherheit des Verkehrs zu verbessern und gleichzeitig die Umweltbelastung zu reduzieren. Zu den förderfähigen Maßnahmen gehören die Implementierung von C-ITS-Infrastruktur, die Unterstützung von Forschungsprojekten zur Weiterentwicklung und Standardisierung von C-ITS-Lösungen, die Förderung von Pilotprojekten, die die praktische Anwendung und den Nutzen von C-ITS in realen Verkehrsumgebungen demonstrieren, sowie die Finanzierung von Schulungsprogrammen und Plattformen für den Austausch bewährter Verfahren und Technologien im Bereich C-ITS.

Derzeit sind keine laufenden Förderungen bekannt, jedoch könnten in Zukunft Förderaufrufe zur Unterstützung beim Aufbau und der Ausrollung der C-ITS-Infrastruktur erfolgen. In den letzten Jahren wurde jährlich ein entsprechender Förderaufruf veröffentlicht.

Bundesförderung für Forschungs- und Entwicklungsprojekte:

Das mFUND-Programm des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) fördert seit 2016 Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die auf digitalen datenbasierten Anwendungen im Mobilitätsbereich basieren. Ziel des Programms ist es, innovative Mobilitätslösungen zu entwickeln und die Digitalisierung des Verkehrssektors voranzutreiben. Das mFUND-Programm hat drei Hauptziele. Erstens fördert es die Entwicklung digitaler Mobilitätslösungen durch die Nutzung und Verwertung von Daten. Zweitens trägt es zur Verbesserung der Verkehrssicherheit bei, indem moderne Technologien eingesetzt werden. Drittens unterstützt es die Schaffung nachhaltiger und effizienter Verkehrssysteme, um den Mobilitätssektor zukunftsfähig zu gestalten.

Das mFUND-Programm hat bereits eine Vielzahl von Projekten gefördert, die die Digitalisierung und Vernetzung des Verkehrs vorantreiben. Beispielprojekte im Bereich C-ITS umfassen unter anderem die Entwicklung von Kommunikationsplattformen für vernetzte Fahrzeuge, die Optimierung von Ampelschaltungen durch Echtzeitdaten und die Integration von C-ITS in städtische Verkehrssysteme.

EFRE-Mittel:

Durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) können möglicherweise Fördermittel über das Bundesland Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt werden, die möglicherweise auch für die ÖPNV-Priorisierung mit C-ITS genutzt werden können.

4.4 Organisatorische Bewertung

Für die untersuchten Systeme werden mögliche Migrationspfade aufgezeigt und der aktuelle Stand der Standardisierung und Harmonisierung beschrieben. Weiterhin werden Wechselwirkungen zu vorhandenen Systemen aufgezeigt.

4.4.1 Migrationspfad zur Implementierung

Der Migrationspfad beschreibt die Möglichkeit der schrittweisen Implementierung parallel zum Betrieb des derzeitigen Bestandsystems während der Migrationsphase.

C-ITS

Die Einführung von C-ITS kann durch einen Parallelbetrieb mit den bestehenden IR-Baken realisiert werden. Da es sich um zwei getrennte Systeme handelt, besteht keine gegenseitige Beeinflussung. Der Ausbau des C-ITS-Systems sollte mit der Ausrüstung der Fahrzeuge mit On-Board-Units (OBUs) beginnen und schrittweise durch die Nachrüstung der Lichtsignalanlagen (LSAs) mit Road-Side-Units (RSUs) fortgesetzt werden. Zudem sind an den LSA-Steuergeräten Anpassungen erforderlich.

In der folgenden Abbildung wird der Migrationspfad anhand von Zeitstrahlen für die einzelnen Maßnahmen dargestellt. Der gesamte Zeitstrahl erstreckt sich über einen Zeitraum von 15 Jahren.

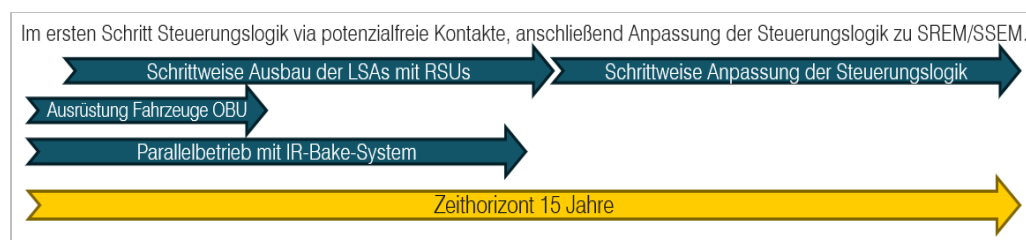


Abbildung 17: Integrationspfad C-ITS

TETRA

Wie schon bei C-ITS ist auch ein Parallelbetrieb von IR-Baken und TETRA möglich, da es sich um getrennte Systeme handelt, die keine Auswirkungen aufeinander haben. Um einen reibungslosen Parallelbetrieb zu gewährleisten, muss die Software auf den Bordrechnern der Fahrzeuge so angepasst werden, dass sie sowohl die Telegramme für das IR-Baken-System als auch für das TETRA-System versenden kann. Zusätzlich ist eine schrittweise Ausrüstung der Lichtsignalanlagen (LSAs) mit TETRA-Empfängern und eine Umprogrammierung der Steuerung bei Verwendung von R09-Telegrammen erforderlich.

In der folgenden Abbildung wird der Migrationspfad für die einzelnen Maßnahmen anhand von Zeitstrahlen dargestellt.

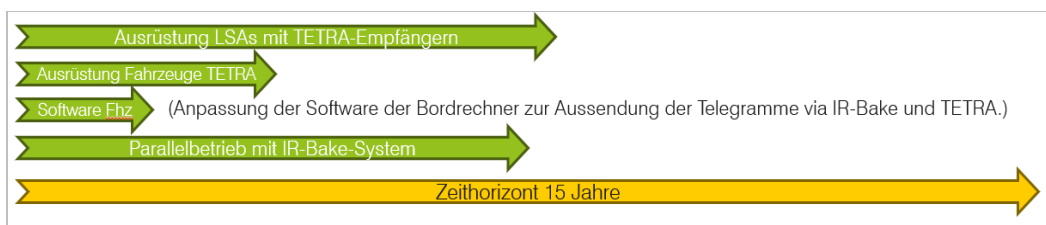


Abbildung 18: Integrationspfad TETRA

Mobilfunk

Wie bereits bei C-ITS und TETRA ist auch bei der Einführung von Mobilfunk ein Parallelbetrieb mit dem bestehenden IR-Baken-System möglich, da es sich um getrennte Systeme handelt, die keine Auswirkungen aufeinander haben. Ebenso wie bei TETRA ist eine Anpassung der Software auf den Bordrechnern der Fahrzeuge notwendig, um sowohl Telegramme für das IR-Baken-System als auch für das Mobilfunk-System senden zu können. Parallel dazu sollte eine schrittweise Ausrüstung der Lichtsignalanlagen (LSAs) mit entsprechenden Mobilfunk-Empfängern erfolgen, um die vollständige Funktionalität des Systems sicherzustellen. Bei Nutzung von R09-Telegrammen ist eine Umprogrammierung der LSA-Steuerung notwendig.

In der folgenden Abbildung wird der Migrationspfad für die einzelnen Maßnahmen anhand von Zeitstrahlen dargestellt.

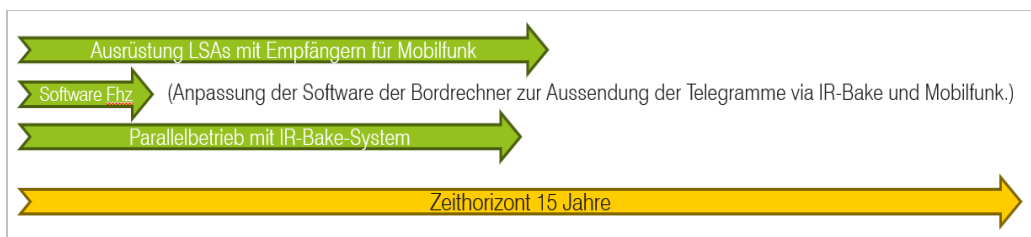


Abbildung 19: Integrationspfad Mobilfunk

4.4.2 Wechselwirkungen zu vorhandenen Systemen

In diesem Abschnitt wird auf die Wechselwirkungen der Vorzugsvarianten auf die vorhandenen Systeme näher eingegangen.

In Magdeburg ist bereits ein IR-LSA-Anmeldesystem, TETRA-Daten-/Sprachfunk zur Leitstelle und Mobilfunk zum Init-Hintergrundsystem vorhanden.

C-ITS

Da C-ITS ein komplett neues System ist, das derzeit in Magdeburg nicht verwendet wird, gibt es keine Wechselwirkungen mit den aktuell vorhandenen Systemen.

TETRA

TETRA wird bei der MVB bereits für die Leitstellenkommunikation und die Kommunikation zum ITCS verwendet. Eine zusätzliche LSA-Anmeldung würde die Frequenzbelegung erhöhen, wenn diese ebenfalls im Trunked-Mode gesendet würde. Daher werden zusätzliche Funkgeräte in den Fahrzeugen für die DMO-Anwendung (Direct Mode Operation) notwendig sein.

Mobilfunk

Durch die zusätzliche Belastung durch die LSA-Anmeldung entsteht ein erhöhter Datenverkehr. Da die Bandbreite der Mobilfunkverbindung (hier LTE) jedoch auch größere Datenmengen übertragen kann, ist voraussichtlich mit keinen Leistungseinschränkungen zu rechnen.

4.4.3 Standardisierung und Harmonisierung

Normen dienen als Grundlage und flexibles Instrumentarium, um Schnittstellen zwischen Systemen und Herstellern zu definieren, was wiederum die Marktdurchdringung erleichtert. Diese Harmonisierung erfolgt beispielsweise durch die Aufnahme von Normen im Amtsblatt der Europäischen Union, wodurch die Interoperabilität von Systemen verschiedener Hersteller begünstigt wird.

C-ITS

Bei C-ITS ist sowohl auf Seiten der Infrastruktur als auch auf Seiten des Fahrzeugs eine hohe Standardisierung gegeben. Durch C-Roads wurde ein europaweiter harmonisierter Ausbau der Infrastruktur erreicht. Für die Harmonisierung auf fahrzeugseitiger Ebene ist das Car2Car Communications Konsortium verantwortlich, welches sich eng mit dem C-Roads-Konsortium austauscht und entsprechend harmonisierte Richtlinien herausgibt.

TETRA

In Deutschland gibt es lediglich vier Verkehrsunternehmen, die TETRA für die ÖPNV-Priorisierung nutzen¹². Standards existieren in Bezug auf VDV-Standardtelegramme R09.16 und TETRA Digitalfunk als Technologie. Dementsprechend handelt es sich um einen sehr spezifischen, kleinen Markt, aber es gibt mehrere Anbieter und entsprechende Teile sind verfügbar.

Mobilfunk

Bei nur sehr wenigen Verkehrsunternehmen kommt Mobilfunk für die ÖPNV-Priorisierung als dezentrale Lösung aktuell zum Einsatz. Die Implementierung ist in vielen Fällen lediglich mit Init-Bordrechner möglich und es gibt kaum Marktverfügbarkeit. Eine Umsetzung wäre daher eine spezifische Einzellösung für das Verkehrsunternehmen. Gleiches kann über das zentrale System ausgesagt werden. Hier ist aktuell nur das Unternehmen Mattersoft Ltd. (Tochterunternehmen der Init SE) bekannt, welches nur für Init-Systeme eine zentrale Software zur Ermittlung von R09-Telegrammen aus GPS-Positionen von Fahrzeugen (übertragen über Mobilfunk) und zur Weiterleitung dieser Telegramme an den LSA-Leitrechner anbietet.

4.5 Variantenvergleich der ÖPNV-Bevorrechtigung (dezentral & zentral)

Im Rahmen der vergleichenden Bewertung der verschiedenen Systeme zur ÖPNV-Beschleunigung wurden zunächst Bewertungsmatrizen erstellt. Hierzu wurden die gesammelten Informationen entsprechend der vorhergehenden Kapitel für jede Bewertungsdimension systematisch aufbereitet und in tabellarischer Form dargestellt. Für jede Variante wurde anhand eines einheitlichen Schemas eine qualitative Einstufung auf einer fünfstufigen Skala von "sehr schlecht" bis "sehr gut" vorgenommen. Diese Einstufungen basieren auf den beschriebenen Vor- und Nachteilen innerhalb der einzelnen Bewertungsparametern und geben eine Übersicht über die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Variante in den einzelnen Bewertungsdimensionen.

In den folgenden Tabellen wurden die Varianten anhand der in Kapitel 4 definierten Kriterien bewertet. Es wurden zwischen einem dezentralen und zentralen Ansatz unterschieden.

Da durch die standardisierten Telegramm-Typen SREM/SSEM bei C-ITS die Kommunikation mit der LSA immer dezentral erfolgt, wurde dieses Verfahren bei der Bewertung für den zentralen Ansatz ausgelassen.

¹² Quelle | BASt Verkehrstechnik Heft V 353, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

Parameter	C-ITS	TETRA	Mobilfunk	TETRA-zentral	Mobilfunk-zentral
Rückfallebene	⊙	⊖	+	⊖⊖	⊙
Ausfallsicherheit	+	⊕⊕	⊖	+	⊖⊖
Ferndiagnose	⊕⊕	⊙	⊕⊕	⊙	⊕⊕
Priorisierung ÖV-Fahrzeuge untereinander	⊕⊕	⊙	⊙	+	+
Rückkanal von LSA	⊕⊕	⊖⊖	⊖	⊖⊖	⊙
Kompatibilität zu vorhandener Infrastruktur	⊖	+	+	⊙	⊕⊕
IT-Sicherheit	⊕⊕	⊖	+	⊖	+
Invest-/ Betriebskosten (2x)	⊖	⊙	⊙	⊙	+
Migrationspfad	+	+	+	⊕⊕	⊕⊕
Standardisierung und Harmonisierung	⊕⊕	⊙	⊖	⊙	⊖

Abbildung 20: Variantenvergleich ÖPNV-Bevorrechtigung

4.6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlung

Die Bewertung erfolgt anhand von einem Punktsystem. Die genaue Bewertung und entsprechende Punktevergabe können in den Tabellen in dem vorangegangenen Kapitel eingesehen werden (vgl. Abbildung 20). Die Punkte wurden wie folgt vergeben: sehr schlecht gibt -2 Punkte, schlecht gibt -1 Punkt, neutral gibt 0 Punkte, gut gibt 1 Punkt und sehr gut gibt 2 Punkte. Außerdem wurden die Wertungspunkte für die Investitions- und Betriebskosten doppelt gewichtet, da diese ein hervorgehobenes Kriterium bei der Auswahl eines zukünftigen Systems darstellen.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse des Punktesystems einsehbar.

	C-ITS	TETRA (dezentral)	TETRA (zentral)	Mobilfunk (dezentral)	Mobilfunk (zentral)
Anzahl Punkte	+9	0	-1	+3	+7

Abbildung 21: Bewertung aller Varianten der dezentrale und zentrale ÖPNV-Bevorrechtigung

Durch zusätzlichen Funktionsumfang, EU-weite Standardisierung sowie Harmonisierung und Möglichkeit der Nutzung der Infrastruktur durch weitere Verkehrsteilnehmer bei C-ITS wird dieses System **als Zielsystem empfohlen**.

Das parallele Vorhaben der MVB mit dem System LIVEsp vom Unternehmen Mattersoft Ltd. mit der spezifischen Einzellösung mit **Mobilfunk als zentralen Ansatz** kann als Rückfallebene / Technologie für die Übergangszeit (10 bis eher 15 Jahre) umgesetzt werden.

Mobilfunk kann zukünftig also auch nach 15 Jahren als „Long-Range“-Übertragung in C-ITS integriert werden. Dadurch gehen die Investitionskosten nicht „verloren“.

Weitere Vergleichspunkte der Technologien C-ITS, TETRA und Mobilfunk sind in der folgenden Tabelle beschrieben:

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Anmeldesystem der Zukunft für die Landeshauptstadt Magdeburg

Vergleichs- punkt	C-ITS	TETRA	Mobilfunk
Kompatibilität zu Regional- verkehrsun- ternehmen	Aufgrund der Standardisierung sowie Harmoni- sierung sehr gut kompatibel	Nur mit viel Aufwand möglich	Nur mit Init-Bord- rechner oder Schnittstellen zum Init-System
Förderung	Gute Fördermög- lichkeiten (Bund, EU)	Nur allgemeine För- derung zur ÖPNV- Priorisierung (bspw. EFRE)	Nur allgemeine För- derung zur ÖPNV- Priorisierung (bspw. EFRE)

Tabelle 6: Weitere Vergleichspunkte

Außerdem wird C-ITS vom VDV, BASt und FGSV in Deutschland empfohlen.

C-ITS ermöglicht weitere Funktionen als die ÖPNV-Priorisierung. Zum Beispiel können bei entsprechender Infrastrukturausrüstung virtuelle Fahrsperrern, Weichensteuerungen oder weitere Steuerelemente über C-ITS-Telegramme angesteuert werden. Des Weiteren bietet diese Technologie eine Vielzahl von konkreten Anwendungen für den Individualverkehr, wie beispielsweise GLOSA, Abbiege-Assistent, Baustellenwarnung, Verkehrszeichenübermittlung an Fahrzeuge etc.

Als nächste Schritte wird ein zu fassender Beschluss für das Anmeldesystem der Zukunft in Magdeburg durch die Entscheidungsträger empfohlen. Sobald dieser vorliegt ist ein Umstellungs- und Migrationsplan zu entwickeln, unter Berücksichtigung von geplanten Baumaßnahmen im Stadtgebiet. Für das Anmeldesystem der Zukunft ist ein Finanzierungsplan aufzustellen, der zu bestätigen ist. Es wird empfohlen, entsprechende Förderung zu beantragen.

Die formulierten Empfehlungen gelten nicht nur für das untersuchte System Straßenbahn, sondern auch für das Verkehrssystem Bus. Auch ohne eine Betrachtung dieses ÖPNV-Systems lassen sich allgemeingültige Ableitungen treffen, die nachfolgend noch einmal zusammengefasst skizziert werden. LiveTSP als zentrale Mobilfunkvariante weist voraussichtlich geringere Kosten auf als die Umrüstung auf C-ITS. Allerdings dient C-ITS nicht nur der ÖPNV-Bevorrechtigung, sondern kann mit weiteren Diensten wie GLOSA (Vorteile wie Kraftstoffreduktion etc.) und Abbiegeassistent (besserer Schutz für vulnerable Verkehrsteilnehmer) ergänzt werden (siehe Seite 32 bis 34). Weiterhin ist C-ITS vorteilhafter bei den Themen Ausfallsicherheit, Priorisierung der ÖV-Fahrzeuge untereinander, Rückkanal zur LSA, IT-Sicherheit und in der Standardisierung/Harmonisierung

5 Leitstellenbetrachtung

Zur Verbesserung des Störungsmanagements wurde analysiert, inwiefern die Leitstellen der MVB, des Fachdiensts Verkehrstechnik / LSA-Dienst und der Betriebszentrale für die Straßentunnel zusammengelegt werden können. Ziel ist es, durch Integration der verschiedenen Aufgabenträger eine Verbesserung der Qualität der ÖPNV-Beschleunigung sowie die schnelle Reaktion auf Störungen im Anmeldesystem (z.B. durch Schaltung Alternativer/Festzeitprogramme) und damit die Aufrechterhaltung eines hochwertigen ÖPNV gerade im Fall von kurzfristigen dispositiven Maßnahmen wie beispielsweise Events, Unfällen, Ausfällen oder anderen Ereignissen zu erreichen.

SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse ist ein äußerst effektives Instrument, um die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken eines bestimmten Bereichs zu untersuchen. In der Studie zur Leitstellenanalyse ermöglicht die Anwendung der SWOT-Analyse eine umfassende Bewertung der aktuellen Situation sowie eine strategische Planung für zukünftige Entwicklungen. Abbildung 22 zeigt den prinzipiellen Aufbau der SWOT-Analyse inklusive der wesentlichen Komponenten.

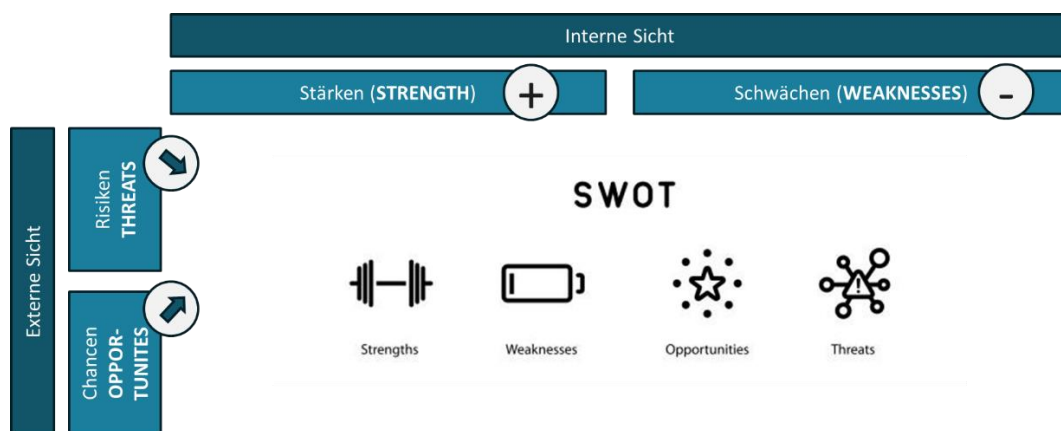


Abbildung 22: SWOT-Analyse – Prinzipieller Aufbau

Die Verwendung einer SWOT-Analyse in der Studie zur Leitstellenanalyse bietet eine umfassende Möglichkeit, die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken verschiedener Leitstellenmodelle zu bewerten. Dabei sind u.a. folgende Vorteile dieser Methodik hervorzuheben:

- **Ganzheitlicher Ansatz:** Die SWOT-Analyse ermöglicht es, alle relevanten Aspekte der verschiedenen Leitstellenmodelle zu berücksichtigen, einschließlich ihrer internen Stärken und Schwächen sowie externen Chancen und Risiken.

- **Strategische Entscheidungsfindung:** Durch die Identifizierung von Stärken und Chancen kann die SWOT-Analyse helfen, strategische Entscheidungen zu treffen, die die Leistung und Effizienz der Leitstellen verbessern.
- **Risikominderung:** Indem potenzielle Schwächen und Risiken erkannt werden, kann die SWOT-Analyse dazu beitragen, Risiken zu minimieren und mögliche Probleme frühzeitig anzugehen, bevor sie zu größeren Herausforderungen werden.
- **Besseres Verständnis der Umgebung:** Die Analyse der externen Chancen und Risiken ermöglicht es, die Einflüsse der Umgebung auf die Leitstellenmodelle zu verstehen und angemessen darauf zu reagieren.

Nachfolgend werden die Komponenten beschrieben und erläutert, welche im Zuge der SWOT-Analyse in dieser Studie zum Einsatz kamen:

- **Stärken identifizieren:** Durch die Analyse der Stärken der Leitstellen konnte herausgefunden werden, was bereits gut funktioniert und welche Ressourcen und Fähigkeiten zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht es, diese Stärken gezielt auszubauen.
- **Schwächen aufdecken:** Die Identifizierung von Schwächen ist entscheidend, um Bereiche zu erkennen, in denen Verbesserungen notwendig sind. Durch die Analyse und das Verständnis der Schwächen können gezielte Maßnahmen ergriffen werden, um die Leistungsfähigkeit der Leitstelle zu steigern.
- **Chancen erkennen:** Die Analyse externer Chancen ermöglicht es, potenzielle Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Leitstelle zu identifizieren.
- **Risiken einschätzen:** Durch die Identifizierung von Risiken können potenzielle Bedrohungen für die Leitstelle frühzeitig erkannt und gemindert werden. Dies ermöglicht es, proaktiv auf Herausforderungen zu reagieren und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Ermittlung der Schnittmengen – Ziel der SWOT-Analyse

Ziel der SWOT-Analyse mit Bezug auf den Aufbau der Leitstellen ist im Ergebnis eine dezidierte Bewertung zu erhalten, welche Schnittmengen innerhalb der Abbildung 23 aufgezeigten Zielsysteme der Leitstellen sinnvoll kombiniert werden können oder doch singulär betrachtet werden sollten.

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Leitstellenbetrachtung

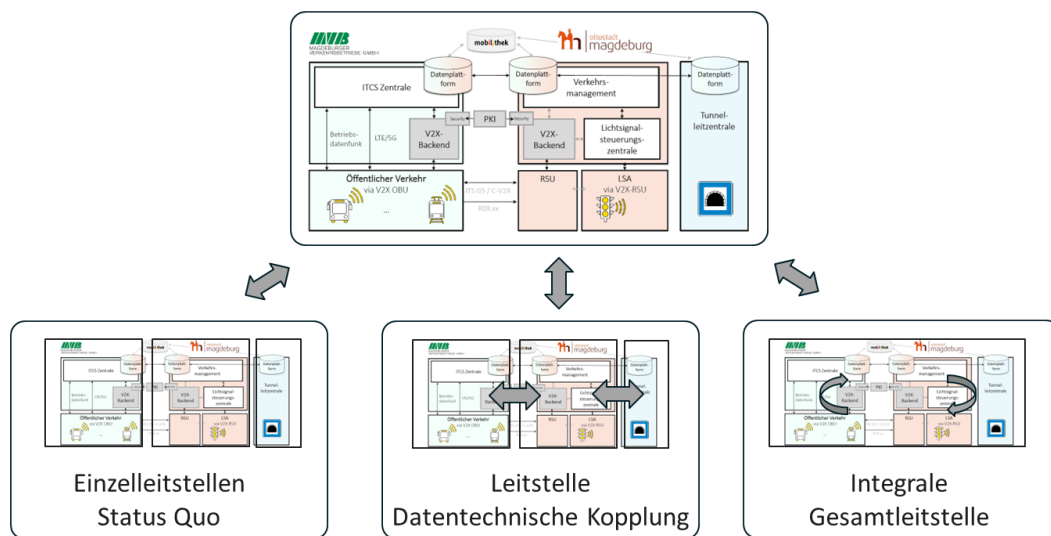


Abbildung 23: SWOT-Analyse – Zielstellung und Differenzierung der Systeme

Dabei werden drei mögliche Zielsysteme unterschieden:

- Variante 1 Einzelleitstellen wie im Status Quo: Aufbau der Leitstellen als drei einzelne unabhängige Leitstellen ohne Datenaustausch.
- Variante 2 Leitstellen mit datentechnischer Kopplung: Aufbau der Leitstellen als einzelne unabhängige Leitstellen jedoch mit datentechnischer Kopplung.
- Variante 3 Integrale Gesamtleitstelle: Aufbau einer Leitstelle, welche sowohl datentechnisch gekoppelt als auch physisch vereint ist.

Abbildung 24 zeigt die Analyse der Schnittmengen, welche sich aus der Analyse der Stärken und Schwächen der internen Sicht sowie den Chancen und Risiken der externen Sicht ergeben.

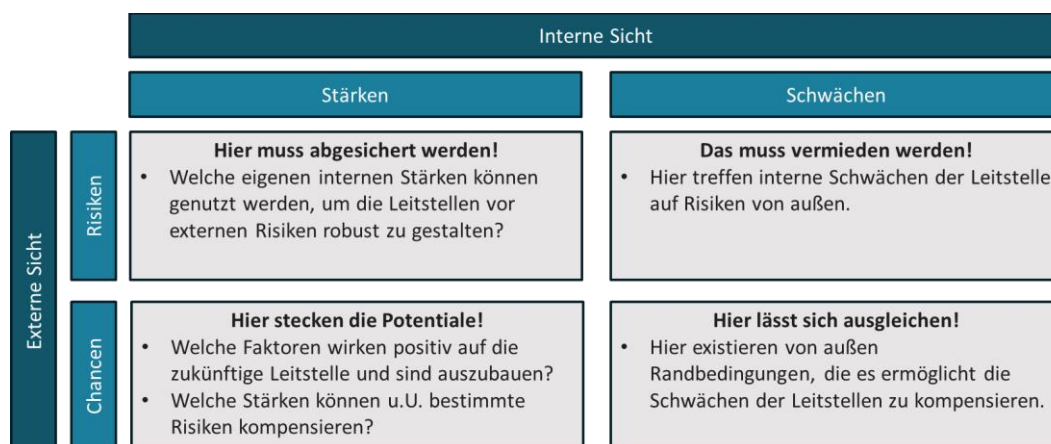


Abbildung 24: SWOT-Analyse – Schnittmengen

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Leitstellenbetrachtung

Dabei wurden für alle zuvor vorgestellten Varianten u.a. die in Abbildung 25 dargestellten Fragestellungen Varianten-bezogen erörtert.

Stärken 	Schwächen 
• Was sind die Vorteile des Systems? • Welche Hauptargumente sprechen für diese Lösung? • Was ist gegenüber den Alternativsystem besser?	• Wo liegt die Nachteile des Systems? • Welche Prozesse können verbessert werden? • Was macht das Alternativsystem besser?
Chancen 	Risiken 
• Welche Chancen hat dieses System? • Was sind Trends bzw. moderne Architekturen? • Welche Chancen bietet die Lösung für das zukünftige Mobilitätsmanagement?	• Welche Risiken bestehen? • Welche Schwächen führen zukünftig zu Gefahren? • Welche Rahmenbedingungen führen zu Risiken?

Abbildung 25: SWOT-Analyse – Fragestellungen

Ergebnisse der SWOT-Analyse

Variante 1 Einzelleitstellen wie im Status Quo

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse zur Analyse der Stärken und Schwächen für die Variante 1, des Systems der Einzelleitstellen im Status Quo.

Stärken 	Schwächen 
Datenhaltung/Schnittstellen • Security by Design im „Silo“ • kaum Angriffsvektoren über Schnittstellen Organisation/Mitarbeiter • Organisatorisch getrennte Leitstellen • Regelungen hinsichtlich übergreifender Vertraulichkeit nicht notwendig Räumlichkeiten/Equipment • individuelle Gestaltung der Leitstelle möglich • keine Abstimmung bei Bedarfen Dritter notwendig Funktion/Aufgaben • Fachspezifische Koordinierung der Aufgaben im „traditionellen“ Verkehr	Datenhaltung/Schnittstellen • Datenerhaltung erfolgt in „Silos“ • Datenaustausch schwer/nicht möglich Organisation/Mitarbeiter • keine direkte Interaktion der Mitarbeiter der unterschiedlichen Leitstellen • keine Vertretung möglich Räumlichkeiten/Equipment • keine schnelle Abstimmung möglich • keine Nutzung gemeinsames Equipment möglich Funktion/Aufgaben • kein integraler Gedanke im Zuge der Steuerung des Verkehrs bzw. der Mobilität von „morgen“

Abbildung 26: SWOT-Analyse – Variante 1 Stärken und Schwächen

Abbildung 27 zeigt die Resultate zur Bewertung der Chancen und Risiken für die Variante 1.

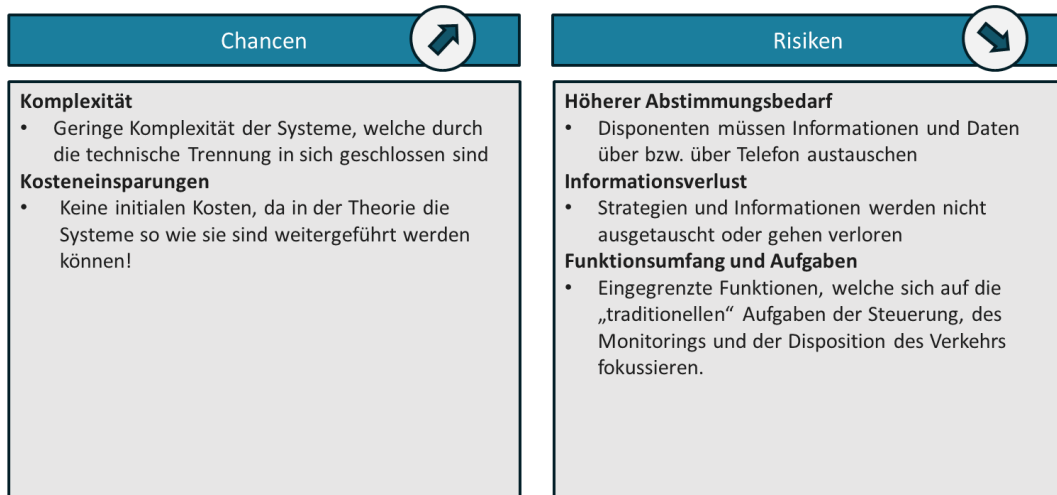


Abbildung 27: SWOT-Analyse – Variante 1 Chancen und Risiken

Abbildung 28 fasst abschließend die Ergebnisse der SWOT-Analyse für Variante 1 zusammen.

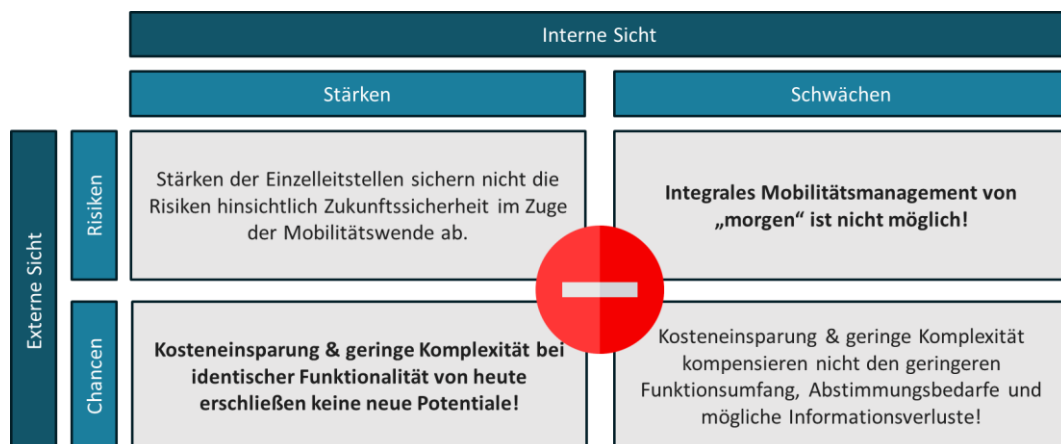


Abbildung 28: SWOT-Analyse – Variante 1 Ergebnisse

Fazit: Zwar bietet die Variante 1 – Einzeleinstellen im Status Quo – einerseits initiale Kosteneinsparungen im Investitionsaufwand und eine geringere Komplexität, jedoch ist die Funktionalität identisch dem System von heute. Dadurch werden keine neuen Potentiale erschlossen. Ein integrales Mobilitätsmanagement von „morgen“ ist bei Umsetzung dieser Variante nicht möglich. Damit ist diese Varianten zur Unterstützung der multimodalen Verkehrswende nicht geeignet. Weiterhin müssen auch hier zukünftig schrittweise Erneuerungen vorgesehen werden, um bspw. Anforderungen an KRITIS-V sowie neue funktionale Anforderungen zu erfüllen. Diese Kosten wurden aktuell noch nicht berücksichtigt, sind aber auf längere Sicht auch entsprechend zu kalkulieren.

Variante 2 Leitstellen mit datentechnischer Kopplung

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse zur Analyse der Stärken und Schwächen für die Variante 2, des Systems mit datentechnischer Kopplung der Einzelleitstellen.

Stärken 	Schwächen 
Datenhaltung/Schnittstellen • Physisch getrennte Leitstelle mit Datenaustausch/Schnittstelle • gemeinsame Datenhaltung/Berechtigungskonzept Organisation/Mitarbeiter • Austausch der Daten ermöglicht Entscheidung auf integraler Informationsbasis Basis Räumlichkeiten/Equipment • individuelle Gestaltung der Leitstelle möglich • keine Abstimmung bei Bedarfen Dritter notwendig Funktion/Aufgaben • Fachspezifische Koordinierung der Aufgaben für eine integrale Mobilität von „morgen“	Datenhaltung/Schnittstellen • Angriffsvektoren sind zu definieren • Security ist technisch zu realisieren Organisation/Mitarbeiter • keine direkte Interaktion der Mitarbeiter der unterschiedlichen Leitstellen • keine Vertretung möglich Räumlichkeiten/Equipment • keine schnelle Abstimmung möglich • keine Nutzung gemeinsames Equipment möglich Funktion/Aufgaben • Austausch von Informationen ist technisch möglich / Personell sind es eigenständige Leitstellen mit herkömmlichen Kommunikationswegen

Abbildung 29: SWOT-Analyse – Variante 2 Stärken und Schwächen

Abbildung 30 zeigt die Resultate zur Bewertung der Chancen und Risiken für die Variante 2.

Chancen 	Risiken 
Verbesserte Situationsübersicht • ganzheitliche Situationsübersicht als Grundlage der Disposition der Mobilität datentechnisch Effizienzsteigerung/ Reaktionsfähigkeit • effizientere Koordination auf identischer Daten- und Informationsgrundlage Flexibilität und Skalierbarkeit • Oft etwas flexibler und höher skalierbar als komplett getrennte Leitstellen Kosteneinsparungen • Implementierung Datenschnittstellen kann möglicherweise kostengünstiger sein als die direkte Integration physischer Systeme	Höherer Abstimmungsbedarf • Technische Rahmenbedingungen sind zu schaffen. Effizienz • Abstimmungsverluste der Disponenten, da keine kurzen Kommunikationswege innerhalb einer integralen Leitstelle möglich sind Komplexität • Integration verschiedener Systeme und Daten kann technisch komplex sein und längere Implementierungszeiträume erfordern.

Abbildung 30: SWOT-Analyse – Variante 2 Chancen und Risiken

Abbildung 31 fasst abschließend die Ergebnisse der SWOT-Analyse für Variante 2 zusammen.

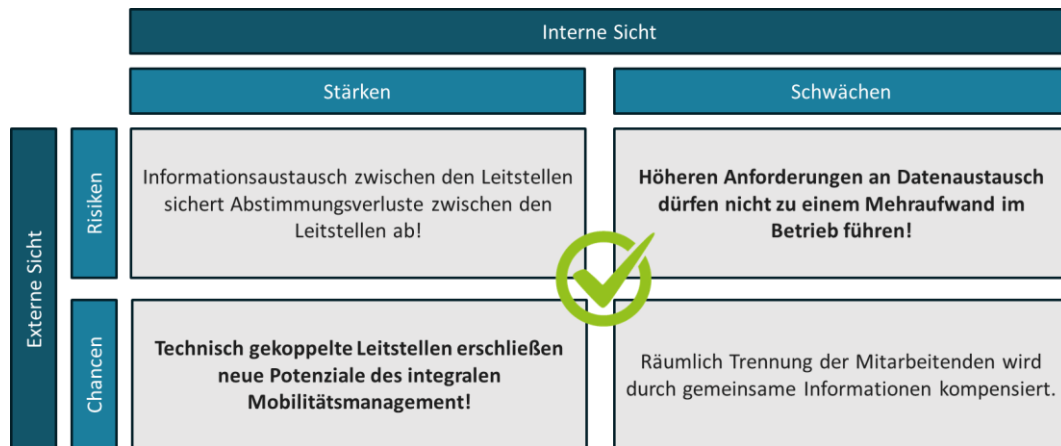


Abbildung 31: SWOT-Analyse – Variante 2 Ergebnisse

Fazit: Die technisch gekoppelten Leitstellen bieten die Möglichkeit neue Potenziale des integralen Mobilitätsmanagements zu erschließen. Dabei ist darauf zu achten, dass die höheren Anforderungen an den Datenaustausch nicht zu einem Mehraufwand im Betrieb führen. Variante 2 stellt somit eine zukunftsfähige Lösung der Leitstellengestaltung mit Fokus auf die aktuell stattfindende Mobilitätswende dar.

Variante 3 Integrale Gesamtleitstelle

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse zur Analyse der Stärken und Schwächen für die Variante 3, der integralen Gesamtleitstellen. Dabei existiert neben den datentechnischen Verbindungen zwischen den Systemen, wie sie in Variante 2 dargestellt wurde, auch die physische Integration aller Leitstellen in gemeinsame Räumlichkeiten.

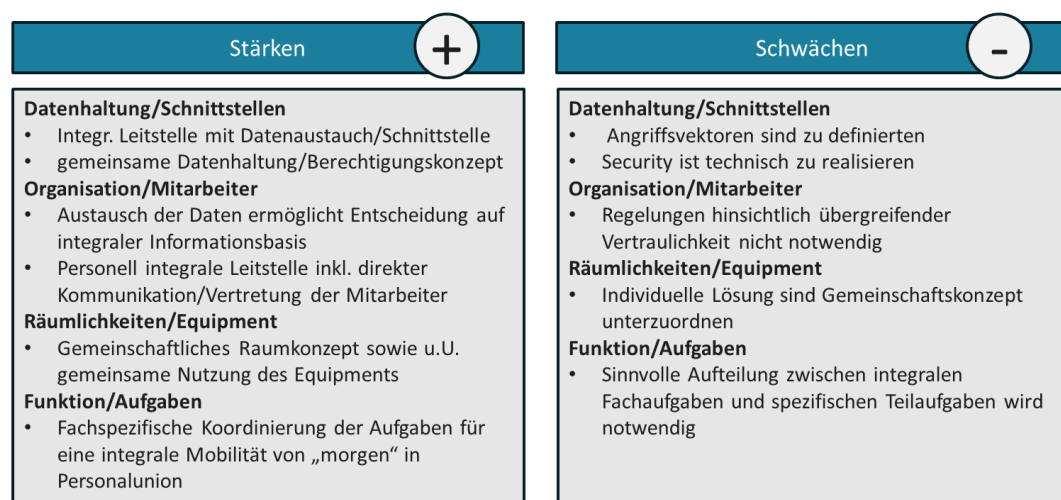


Abbildung 32: SWOT-Analyse – Variante 3 Stärken und Schwächen

Abbildung 33 zeigt die Resultate zur Bewertung der Chancen und Risiken für die Variante 3.

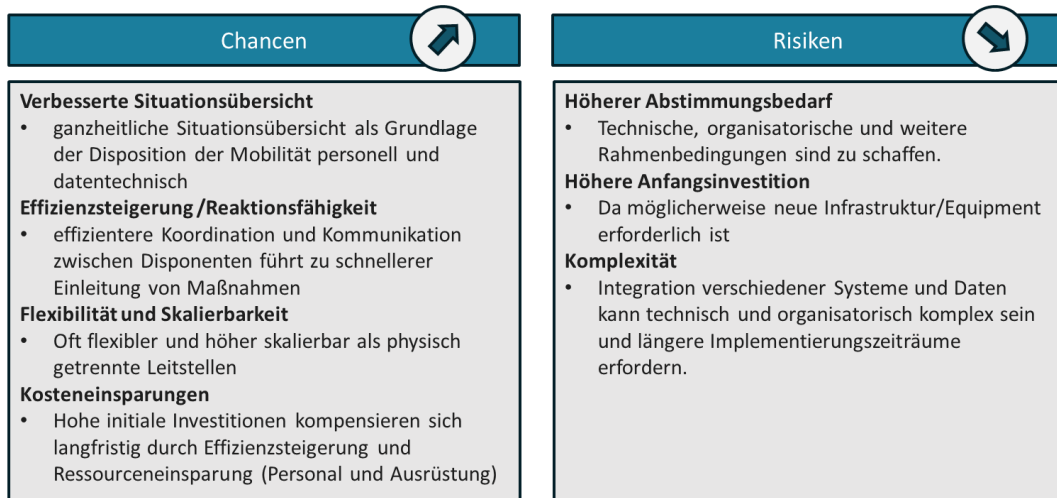


Abbildung 33: SWOT-Analyse – Variante 3 Chancen und Risiken

Abbildung 34 fasst abschließend die Ergebnisse der SWOT-Analyse für Variante 3 zusammen.

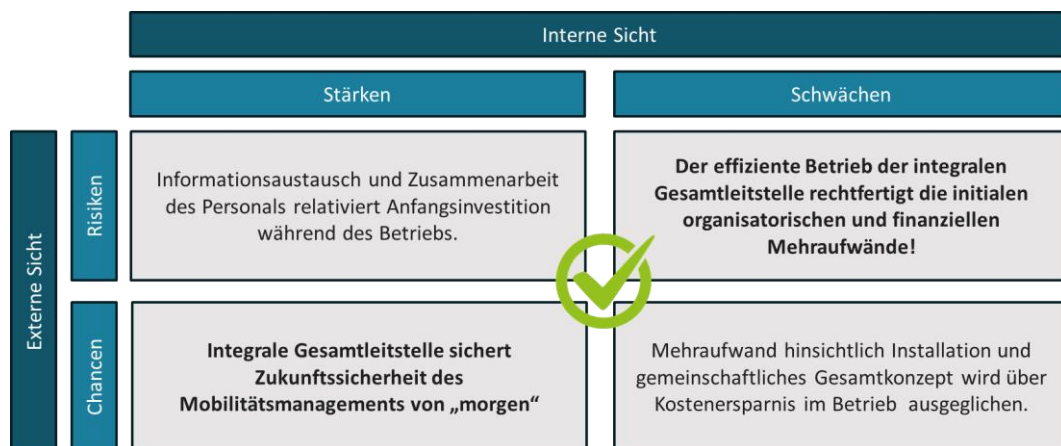


Abbildung 34: SWOT-Analyse – Variante 3 Ergebnisse

Fazit: Die integrale Gesamtleitstelle gewährleistet die Zukunftssicherheit zur Umsetzung des Mobilitätsmanagements von „morgen“. Der effizientere Betrieb einer integralen Gesamtleitstelle rechtfertigt dabei die initial höheren organisatorischen und finanziellen Mehraufwände. Der direkte Kontakt zwischen den Mitarbeitern ermöglicht schnelle Abstimmungen sowie ein positives gemeinsames Arbeitsklima aller Bereiche. Der zuvor oft situative Austausch im Zuge eines zu disponierenden Events oder Störungen wird nun durch einen weiteren sozialen Austausch außerhalb dieser Zeiten ergänzt.

Resultat der Leitstellenanalyse

Die Ergebnisse der SWOT-Analyse dienen als Grundlage für die Entwicklung einer fundierten und zielgerichteten Strategie der Leitstellenentwicklung. Durch die Berücksichtigung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken können realistische Ziele definiert werden. Dabei konnten die zwei folgenden Varianten als Vorzugsvarianten (siehe Abbildung 35) bewertet werden:

- Variante 2 Leitstellen mit datentechnischer Kopplung: Aufbau der Leitstellen als einzelne unabhängige Leitstellen jedoch mit datentechnischer Kopplung.
- Variante 3 Integrale Gesamtleitstelle: Aufbau einer Leitstelle, welche sowohl datentechnisch gekoppelt als auch physisch vereint ist.

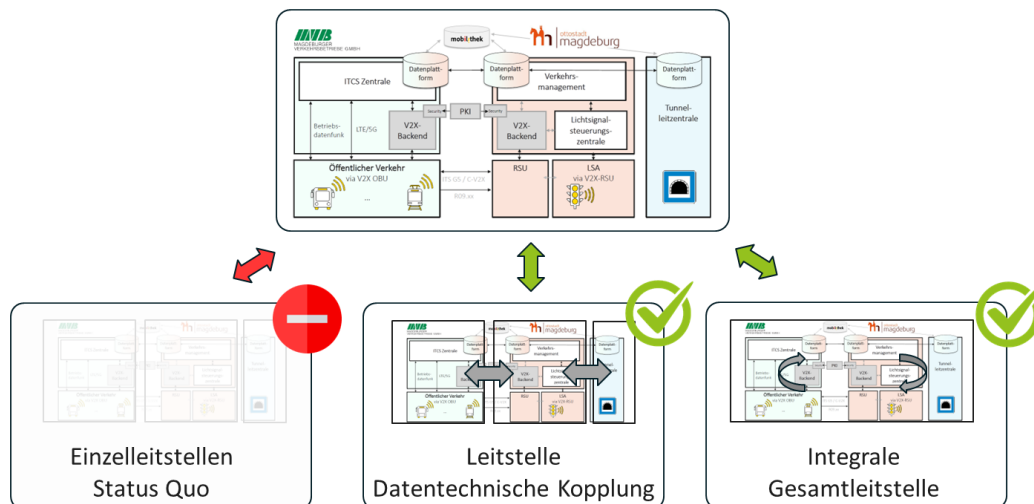


Abbildung 35: Resultat der Leitstellenanalyse

Die Variante 1 Einzelleitstellen wie im Status Quo ist nicht zu empfehlen, da diese durch die Gestaltung der Leitstellen als „Silos“ keinen Austausch ermöglicht. Ein Mobilitätsmanagement, wie es in den kommenden Jahren notwendig wird bzw. aktuell schon erforderlich ist, wäre so nicht möglich.

Auf dieser Basis erfolgt eine vertiefte Bewertung der Varianten 2 und 3 sowie deren Gegenüberstellung. Hinsichtlich der Vorteile einer integrierten Leitstelle im Vergleich zu physisch getrennten Leitstellen oder solchen, die datentechnisch über Schnittstellen gekoppelt sind, gibt es mehrere Aspekte zu berücksichtigen:

- **Effizienzsteigerung:** Integrierte Leitstellen ermöglichen eine effizientere Koordination und Kommunikation zwischen den verschiedenen Leitstellenpersonalen, da alle relevanten Informationen zentralisiert verfügbar sind. Dies kann zu schnelleren Reaktionszeiten und einer effizienteren Mobilitätssteuerung führen.
- **Nahtlose Kommunikation und Koordination:** Physisch integrierte Leitstellen ermöglichen eine direkte und nahtlose Kommunikation und Koordination zwischen den verschiedenen Personen und Abteilungen.
- **Bessere Ressourcennutzung:** Durch die Integration verschiedener Leitstellenfunktionen können Ressourcen wie Personal und Ausrüstung effektiver genutzt werden, da redundante Prozesse vermieden werden und Synergien genutzt werden können.
- **Verbesserte Situationsübersicht:** Integrierte Leitstellen bieten eine ganzheitliche Situationsübersicht über alle Mobilitätsbereich, was eine bessere Koordination und Mobilitätssteuerung ermöglicht. Eine zentrale Leitstelle könnte eine umfassendere und detailliertere Übersicht über den gesamten Verkehr in der Stadt bieten, einschließlich des Straßenverkehrs, der öffentlichen Verkehrsmittel und der Tunnel.
- **Langfristige Kosteneinsparungen:** Obwohl die Implementierung einer integrierten Leitstelle anfänglich mit höheren Kosten verbunden sein kann, können langfristig betrachtet Kosten durch Effizienzsteigerungen und Ressourcenoptimierung eingespart werden.
- **Flexibilität und Skalierbarkeit:** Integrierte Leitstellen sind oft flexibler und skalierbarer als physisch getrennte Leitstellen, da sie es ermöglichen, schnell auf veränderte Anforderungen und Mobilitätsszenarien zu reagieren, indem sie neue Funktionalitäten integrieren oder bestehende Prozesse anpassen.
- **Soziale Beziehungen:** Heute findet die Kommunikation der Mitarbeiter oft nur dann statt, wenn problem- bzw. eventorientiert Lösungen gesucht werden. Dieser Stress- bzw. negative- getriggerte Kontakt der Leitstellen untereinander wird innerhalb der integrierten Leitstelle kompensiert. Hier treten die Mitarbeiter ganzheitlich in eine soziale Interaktion, was das gemeinsame Teamgefüge stärkt.

Die Gegenüberstellung der Varianten 2 und 3 zeigt, dass die Varianten 3 weitere Potenziale heben kann. Diese sind gerade in der sozialen Interaktion, in der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen aber auch im gemeinsamen Überbrücken von Zeiten mit wenigen Events und reinen Kontroll- und Monitoringfunktionen zu sehen.

Der wesentliche Vorteil der Variante 3 zur Variante 2 ist dabei das gemeinsame Gebäude der integralen Leitstelle. Das Finden und der Aufbau der gemeinsamen Räumlichkeiten stellen jedoch gleichzeitig die größte Herausforderung dar. Daher wird für die Implementierung der Integralen Leitstelle eine iterative Roadmap vorgeschlagen (Abbildung 36).



Gegenüberstellung der Variante 2 und Variante 3

Die Gegenüberstellung von Variante 2 und Varianten 3 soll klar aufzeigen, wo im spezifischen die Unterschiede zwischen diesen beiden Varianten liegen. Abbildung 37 zeigt, dass eine effiziente Koordinierung zwischen den Leitstellen einer wesentlichen Verbesserung der Reaktionszeiten und somit zur gesamtheitlichen Effizienzsteigerung führt.

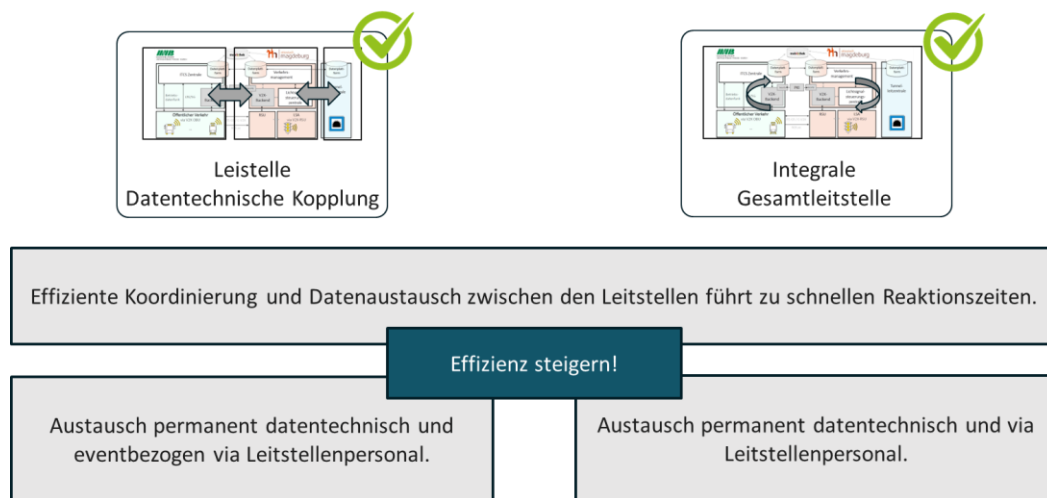


Abbildung 37: Gegenüberstellung Effizienzsteigerung

Neben dieser Effizienzsteigerung können infolge der gemeinsamen Verwendung der Leitstellenfunktionen redundante Prozesse vermieden werden und so bisher nicht erschließbare Potenziale in der gemeinsamen Ressourcennutzung gehoben werden (siehe Abbildung 38). Auch gemeinsame Personalunionen erschließen weitere Potenziale in Variante 3.

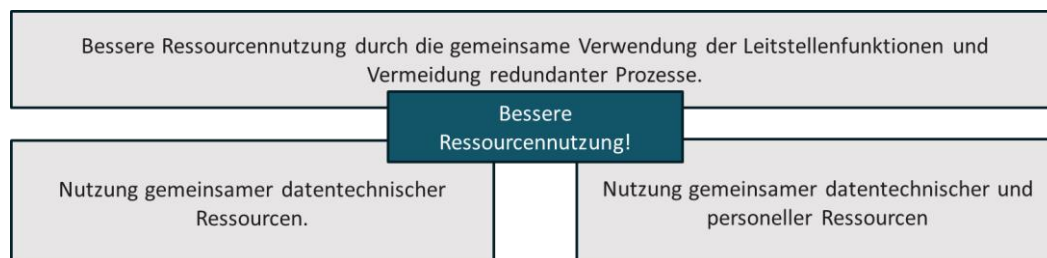


Abbildung 38: Gegenüberstellung Ressourcennutzung

Nicht zuletzt die höhere Flexibilität und die sowohl datentechnische als auch aufgabentechnische Skalierbarkeit der beiden Varianten zeigen die Möglichkeit des stufenweisen Übergangs sowie die Vorteile der integralen Leitstelle im finalen Ausbau (Abbildung 39).

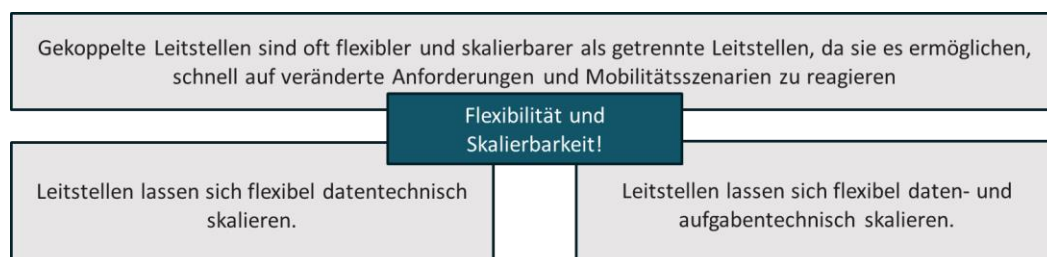


Abbildung 39: Gegenüberstellung Flexibilität und Skalierbarkeit

Ein wesentlicher weiterer Vorteil zwischen der Variante 2 und 3 sind die sozialen Interaktionen (Abbildung 40). Durch die gemeinsame Arbeit – sowohl bei Hochlast als auch bei Normallast - aber auch die gemeinsamen Pausenzeiten kann das komplette soziale Gefüge innerhalb der integralen Leitstelle extrem positiv beeinflusst werden.

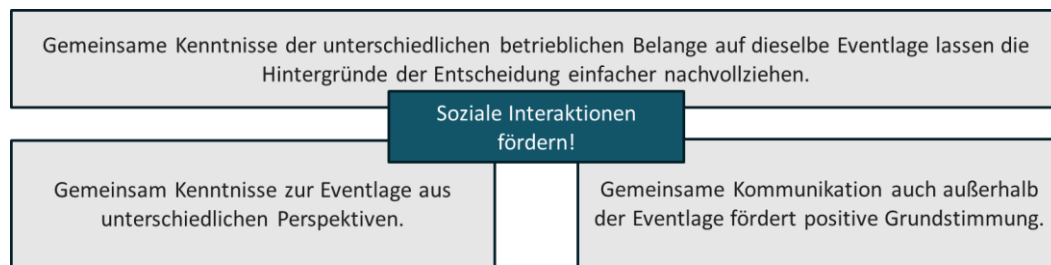


Abbildung 40: Gegenüberstellung soziale Interaktion

Final sollen die langfristigen Kosteneinsparungen der Varianten 2 und 3 genannten werden. Dabei müssen die Betriebskosten den initialen Investitionskosten gegenübergestellt werden.

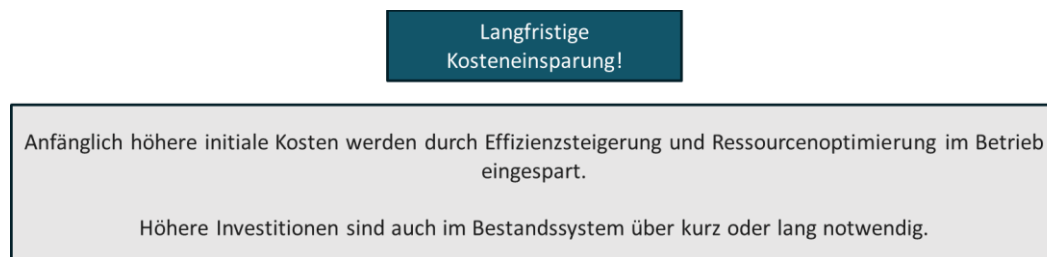


Abbildung 41: Gegenüberstellung Kosteneinsparung

Zusammenfassung

Auf Basis der Gegebenheiten in Magdeburg und der Untersuchung der Möglichkeiten der Zusammenlegung der drei Einzeleinstellen MVB, Fachdiensts Verkehrstechnik / LSA-Dienst und Betriebszentrale für die Straßentunnel wurden die folgenden drei Varianten mit Hilfe der SWOT-Analyse untersucht:

- Variante 1 Einzeleinstellen wie im Status Quo:
- Variante 2 Leitstellen mit datentechnischer Kopplung
- Variante 3 Integrale Gesamtleitstelle

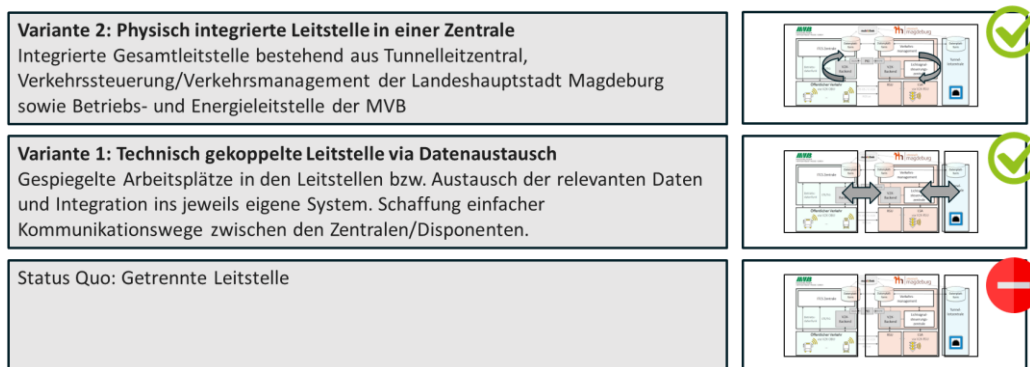


Abbildung 42: Variantenübersicht

Das Ergebnis der Untersuchung widerspricht klar einer Empfehlung von Variante 1. Zielarchitektur sollte die Variante 3 sein, wobei hier als Roadmap der Weg über Variante 2 sehr gut möglich ist. Langfristig strategisch und im Sinne der Zukunftsfähigkeit des Systems zur Gestaltung der Mobilitätswende, kommen lediglich die beiden Varianten 2 und 3 in Frage.

6 Qualitätsanalysen

6.1 System urbic®

Das System urbic® ist das Werkzeug für einen qualitätsgerechten Stadtverkehr und erfolgreiches Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen. Mit urbic® lassen sich sowohl Knoten als auch ganze Linien anhand der bekannten Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) bzw. nach dem Level of Service (LOS) gemäß HBS 2015 bewerten. Die Knotenreporte können beliebig nach Datum und Uhrzeit konfiguriert werden. Damit ist problemlos eine Analyse der LSA-Verlustzeit über mehrere Monate oder Jahre hinweg möglich. Auch auf einzelne Datensätze kann jederzeit zugegriffen werden. Im Rahmen der LSA-bezogenen Qualitätsbestimmung lässt sich damit beispielsweise die Fahrplanlage einzelner Fahrten nachvollziehen. Hierbei ist zu beachten, dass eine linienfeine bzw. fahrplanlageabhängige Auswertung nur bei entsprechend vorhandenen Daten verfügbar ist. Im Anwendungsfall Magdeburg liegend die Daten mit dem aktuellen ÖV-Beschleunigungssystem ausschließlich ohne Linien und Fahrplanbezug vor. Eine Auswertung in Magdeburg ist demnach nur richtungsbezogen an den Knotenpunkten möglich.

Die Linienreporte erlauben darüber hinaus eine Darstellung der richtungsfeinen Verkehrsqualitäten über alle Knotenpunkte einer Linie. Die Kartendarstellung zeigt anschaulich die Schwachstellen der ÖPNV-Verkehrsqualität auf. Durch tagesgenaue Auswertungen können aussagekräftige Vorher-Nachher-Vergleiche erstellt werden. Somit lassen sich Veränderungen infolge von Programmänderungen und Beschleunigungsprojekten unkompliziert quantitativ und qualitativ bewerten, ohne dass eine manuelle und kostenintensive Analyse notwendig ist.

6.2 Knotenpunktanalysen

6.2.1 Knotenübersicht und Methodik

Es wurde die aktuelle Situation der Lichtsignalsteuerungen an wichtigen Knotenpunkten untersucht. Im Einzelnen handelt es sich dabei um folgende sechs Knotenpunkte:

- Lübecker Straße / Kastanienstraße (Knoten 143)
- Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (Knoten 342)
- Jerichower Platz (Knoten 354)
- Herrenkrugstraße / Tessenowstraße (Knoten 367)
- Große Diesdorfer Straße / Europaring (Knoten 523)
- Leipziger Straße / Wiener Straße / Raiffeisenstraße (Knoten 572)

Die Auswertung erfolgte auf Basis von Daten aus dem Verkehrsrechner der Landeshauptstadt Magdeburg überwiegend aus dem Zeitraum vom 13. bis 17. November

2023 sowie ergänzend vom 16. bis 18. Januar 2024 für den Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (Knoten 342). Sie basiert auf der Zusammenfassung der an den Lichtsignalanlagen in diesem Zeitraum tatsächlich gesendeten Freigabe- und Sperrzeiten (Grün- bzw. Rotzeiten) und den Meldungen der Verkehrsdetektoren (Kfz-Schleifen, ÖPNV-Meldepunkte sowie Taster für den Fußgängerverkehr soweit vorhanden). Die Auswertungen für den öffentlichen Verkehr beruhen zudem auf einer Datenaufbereitung mit dem Softwaretool urbic®, in dem weiteren Daten für den Straßenbahnverkehr hinterlegt und aufbereitet wurden, um eine quantitative und qualitative Bewertung der Verlustzeiten im Straßenbahnverkehr zu ermöglichen.

Die Bewertung der einzelnen Lichtsignalanlagen erfolgte auf Basis der Archivspeicher des Verkehrsrechners. Hierzu wurden die verkehrstechnischen Schaltarchive in Form von OPL-Dateien sowie die ÖPNV-Speicherarchive (PU2-Datei) verwendet. In den entsprechenden Archivdateien werden alle Schaltzustände, Detektorzustände und Meldungseingänge zeit- und datumsbezogen sekundengenau gespeichert.

Für die Auswertung des Fußgänger- und Radverkehrs und des MIV wurden an drei Tagen im November 2023 und an zwei weiteren Tagen im Januar 2024 rund 2 Mio. Schaltvorgänge an den zu untersuchenden Anlagen aus den Schaltarchiven ausgelesen und digital aufbereitet. Zur Bewertung der Verkehrsverhältnisse wurden die minimalen und maximalen Signalzeiten (Sperrzeit, Freigabezeit usw.) berechnet. Soweit ein Zusammenhang zwischen Detektorauslösungen (z. B. Tastendruck bei Fußgängersignalen) und Signalzuständen (Signalfreigabe) möglich war, wurden die minimalen und maximalen Wartezeiten berechnet.

Die Bewertung des ÖPNV basiert auf einer Auswertung des Speicherarchivs des ÖPNV für das gesamte Jahr 2023 und den Beginn des Jahres 2024. Bezüglich der Qualität des Verkehrsablaufes für einzelne Signalgruppen (Grafiken in Anlage 1) wurden die Zeiträume entsprechend den übrigen Verkehrsarten ausgewertet. Beim Auslösen einer Funkbake wird dies im Steuergerät ohne Fahrzeug- und Linienbezug mit Zeit- und Datumsangabe gespeichert. Durch eine sequentielle Verknüpfung der einzelnen Baken im Linienvverlauf konnten Zuordnungen zu einzelnen theoretischen Fahrzeugen und somit Reisezeiten zwischen den Baken berechnet werden. Mit den errechneten Reisezeiten wurde aus einer Datenmenge von mehreren 1.000 Einzelfahrzeugen das 5. Perzentil der Reisezeiten berechnet. Dieses Perzentil wurde als „optimale unbehinderte Fahrt“ angenommen. Die Bewertung des ÖPNV basiert auf der Reisezeitdifferenz zwischen der aktuellen Fahrt und der optimalen Fahrt und ermöglicht somit eine Aussage über den erreichten Level of Service. Insbesondere im Bereich von Haltestellen ist zu beachten, dass auftretende Aufenthaltszeiten an Haltestellen in den ausgewiesenen Reisezeiten und Verlustzeiten enthalten sind und somit zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen können.

Die Auswertung der zahlreichen verkehrstechnischen Kenngrößen ergab an diesen sehr komplexen Knoten ein erhebliches Optimierungspotenzial für die Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs. Darüber hinaus werden auch für den Fußgänger- und Radverkehr sowie für den Kfz-Verkehr häufig die wünschenswerten und in den Richtlinien empfohlenen Grenzwerte der maximalen bzw. durchschnittlichen Wartezeiten überschritten.

6.2.2 Verkehrszählung Knotenpunkt Breiter Weg / Ernst-Reuter-Allee

Da für den Knoten Breiter Weg / Ernst-Reuter-Allee keine aktuellen Zähldaten vorlagen, wurde am 23.01.2024 eine Verkehrszählung des Individualverkehrs durchgeführt. Daraus lassen sich die Verkehrsstärken der Frühspitze (09:45 Uhr – 10:45 Uhr), der Spätspitze (15:30 Uhr – 16:30 Uhr), die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) und der jeweilige Anteil der Spitzenstunde am DTV ermitteln. Die Spätspitze ist bezüglich des Kfz-Verkehrs gegenüber der Frühspitze die höher belastete: Die Verkehrsmengen der Frühspitze entsprechen zwischen 4 % und 9 % des DTVs, die der Spätspitze zwischen 7 % und 15 %. Ebenso wurden die Rad- und Fußgängerverkehrsstärken in den Spitzenstunden gezählt. Diese liegen analog zu den Kfz-Verkehrsmengen in der Spätspitze über denen der Frühspitze. Die exakten Belastungen können dem Anhang 1 entnommen werden.

6.2.3 Interpretation für den Knoten Breiter Weg / Ernst-Reuter-Allee

Beispielhaft werden die Ergebnisse zum Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg als dem Knoten mit dem höchsten Aufkommen an ÖPNV-Fahrten erläutert. In Abbildung 43 findet sich eine Übersicht zu den Verlustzeiten der Straßenbahnsignale, über die der Knoten während der Analyse befahren wurde. Im Betrachtungszeitraum waren dies die Signale S1 und S12 der West-Nord-Beziehung, die Signale S2 und S8 der Nord-Süd-Beziehung (entlang des Breiten Wegs) sowie S5 und S11 der Ost-West-Beziehung (entlang der Ernst-Reuter-Allee). Die übrigen ÖPNV-Signale lieferten zu den ausgewerteten Zeiten keine Anmeldungen an den ÖPNV-Detektoren. Ausgewertet wurden im Zeitraum von Dienstag bis Donnerstag (jeweils zwischen 07:00 Uhr und 19:00 Uhr) alle vom System urbic® identifizierbaren ÖPNV-Fahrten. Insgesamt umfasste dies 1.890 Fahrzeugbewegungen. Asymmetrien zwischen den Richtungen (also z. B. 557 Fahrten auf Signal S8 aber nur 170 Fahrten auf dem Signal S2 der Gegenrichtung) resultieren überwiegend aus der Tatsache, dass wegen der derzeit vorhandenen Anmeldetechnik nicht alle auflaufenden Daten eindeutig zugeordnet und ausgewertet werden konnten. Die Balken im Diagramm zeigen die Spanne der zwischen Anmeldung und Abmeldung der Fahrzeuge aufgetretenen Verlustzeiten (für S1 also z. B. 0 Sekunden bis über 150 Sekunden). Zusätzlich werden in der Abbildung die an den einzelnen Signalen aufgetretenen mittleren Verlustzeiten mit einem schwarzen Kreuz dokumentiert (für S1 also z. B. etwa 60 Sekunden). Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015) klassifiziert die Qualität für die

einzelnen Verkehrsarten mit einem sogenannten Level of Service (LOS) auf einer Skala von A bis F ähnlich einer Schulnotenbewertung. Die Stufe A steht dabei für den optimalen Zustand, die Stufen E und F für ungenügend bzw. überlastet. Die mittleren Verlustzeiten an den ÖPNV-Signalen S1, S2, S11 und S12 liegen mit über 45 Sekunden in den Qualitätsstufen E bzw. F. Sie müssen als unzureichend im Sinne einer effizienten ÖPNV-Priorisierung bewertet werden, wenngleich für die Bewertung natürlich auch die Streuung der Haltestellenaufenthaltszeiten zu berücksichtigen ist. Lediglich die ÖPNV-Signale S5 aus Richtung Osten (geradeaus entlang der Ernst-Reuter-Allee) und S8 aus Richtung Süden (geradeaus entlang des Breiten Wegs) liegen mit rund 25 Sekunden bzw. etwas mehr als 30 Sekunden im Bereich des LOS C und D. Insgesamt mussten am Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg mehr als 50 % aller erfassten ÖPNV-Fahrzeuge eine Verlustzeit von mehr als 60 Sekunden hinnehmen.

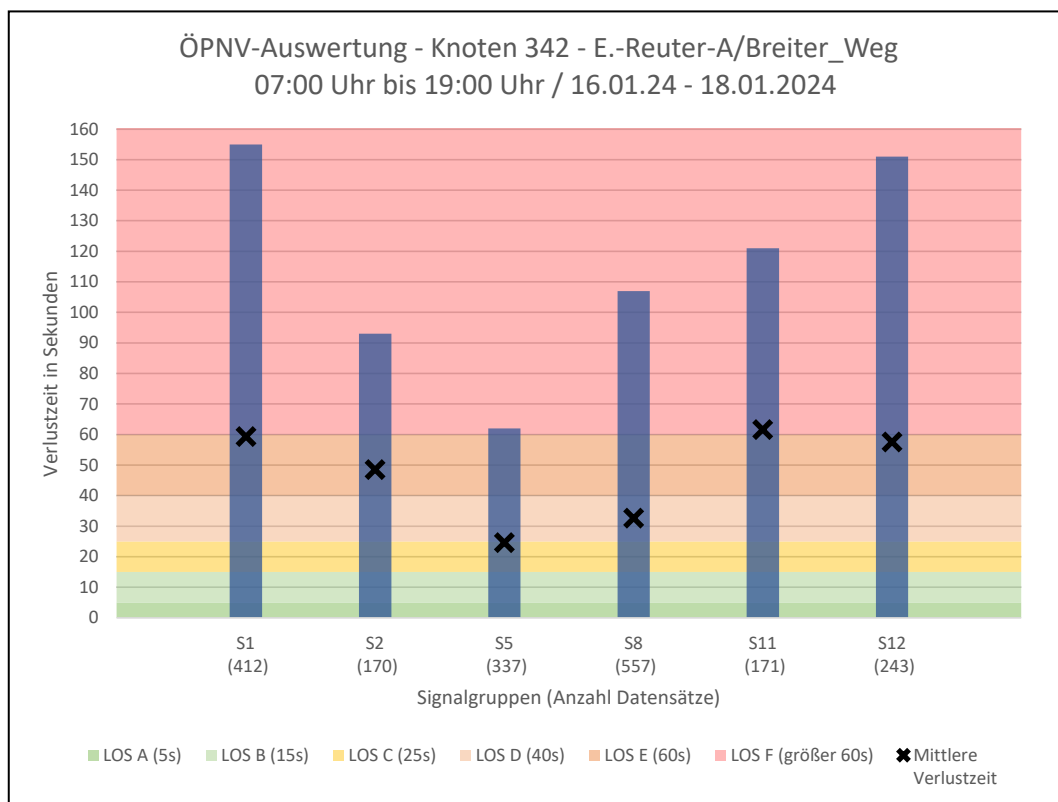


Abbildung 43: Auswertung der ÖPNV-Verlustzeiten – Knoten 342 Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg

Mit Blick auf eine qualitativ hochwertige ÖPNV-Priorisierung wäre unseres Erachtens mindestens ein LOS C und damit eine mittlere Verlustzeit von maximal 25 Sekunden oder kürzer anzustreben. Bei den erfassten und ausgewerteten 1.890 ÖPNV-Fahrzeugen traten in der Summe (überschlägig gerundet) der drei betrachteten Tage etwa 23 Fahrzeugstunden an Verlusten auf. Bei einer Reduktion der mittleren Verlustzeit an allen ÖPNV-

Signalen auf 20 Sekunden (mittlerer Wert LOS C) würde diese Verlustzeitsumme um etwa 12 Stunden auf rund 11 Stunden sinken und sich damit etwa halbieren.

Natürlich ist die Machbarkeit einer solchen Zielvorgabe unter Berücksichtigung der Knotenkomplexität sowie der konkurrierenden Ansprüche des nichtmotorisierten Verkehrs und des Kfz-Verkehrs im weiteren Verlauf noch im Detail für jeden einzelnen Knoten zu prüfen. Nicht zuletzt ist der Grad der ÖPNV-Priorisierung jedoch auch eine verkehrspolitische Entscheidung der Landeshauptstadt Magdeburg.

Die nachfolgende Abbildung 44 zeigt eine ähnlich erzeugte Auswertung für die Fußgängersignale am Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg für die Spitzenstunde am Morgen an den drei mittleren Werktagen. Im Gegensatz zum ÖPNV und zum Kfz-Verkehr definiert das HBS 2015 für den Fußgänger- und Radverkehr als Qualitätskriterium keine mittleren, sondern maximale Wartezeiten. Diese maximalen Wartezeiten sind für LOS C mit 55 Sekunden und für LOS D mit 70 Sekunden definiert. Bis auf das Fußgängersignal F4 haben am Knoten alle Fußgängersignale eine maximale Wartezeit von über 85 Sekunden (oberes Balkenende) und liegen damit komplett im unzureichenden Bereich des LOS F.

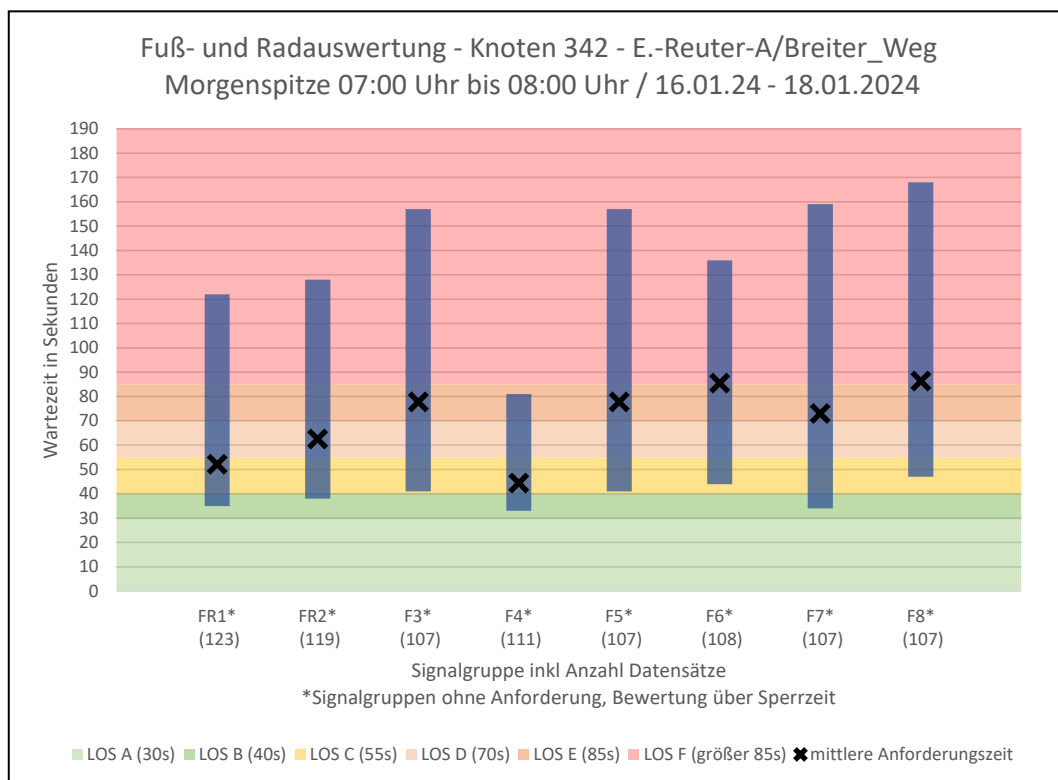


Abbildung 44: Auswertung der Wartezeiten des Fußgänger- und Radverkehrs – Knoten 342 Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg

Schließlich zeigt Abbildung 45 abschließend die Spanne der gemessenen Sperrzeiten (Rotzeiten) der Kfz-Signale (Zeit zwischen Kfz-Anmeldung am Detektor bis Grün-Beginn). Für den Kfz-Verkehr werden maximale Sperrzeiten von 120 Sekunden für einzelne Fahrzeuge meist noch als akzeptabel angenommen. Diese Grenze wird im ausgewerteten Zeitbereich (Spitzenstunde am Morgen) schon teilweise überschritten. Als Qualitätsstufen definiert das HBS 2015 eine mittlere Wartezeit von maximal 50 Sekunden für LOS C und von maximal 70 Sekunden für LOS D. Unter Ansatz der in der Zählung ermittelten Kfz-Aufkommen und der Signalprogramme wurde zur Bewertung des Kfz-Verkehrs vereinfacht die sogenannte Grundwartezeit berechnet, die sich aus dem Signalprogramm ohne Berücksichtigung des Reststaus am Grünzeitende ergibt. Diese Grundwartezeit liefert dementsprechend ein etwas positiveres Bild als die tatsächliche mittlere Gesamtwarezeit, die sich jedoch ohne weiterführende aufwändigere Analysen nicht ermitteln lässt. Im Gegensatz zu den Qualitätsstufen bei den anderen Verkehrsarten ergibt sich beim Kfz-Verkehr auf dieser Basis ein positiveres Bild mit einem LOS B bis D. Problematisch sind jedoch auch hier die teilweise sehr langen maximalen Sperrzeiten. Die ungünstigsten Werte ergeben sich nach beiden Kriterien für den Linksabbieger K4 von Süden aus dem Breiten Weg.

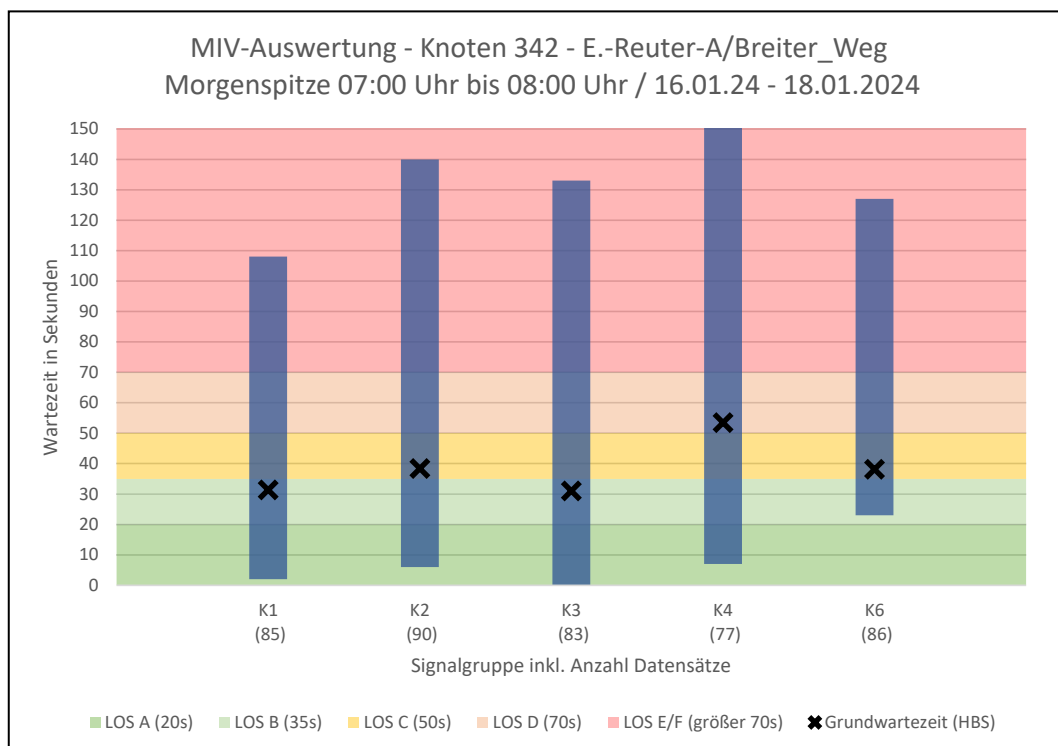


Abbildung 45: Auswertung der Kfz-Wartezeiten – Knoten 342 Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg

6.2.4 Fazit aus den quantitativen Auswertungen

Zusammenfassend wurde mit dem Beispielknoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg sicher ein Knoten mit höchster Komplexität sowie einem sehr hohen Fahrtenaufkommen im ÖPNV mit vielen konkurrierenden Anforderungen auch der ÖPNV-Fahrzeuge untereinander herausgegriffen. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an die Lichtsignalsteuerung und im Vergleich mit anderen Anlagen auch die Verlustzeiten einzelner Verkehrsteilnehmer.

Insbesondere an den Fußgänger- und Radsignalen traten jedoch an allen untersuchten Knoten maximale Wartezeiten im Bereich des LOS F auf. Die Situation des ÖPNV zeigte sich an den anderen untersuchten Knoten an den einzelnen Signalen meist etwas günstiger im Bereich des LOS C und D. Am Jerichower Platz (Knoten 354) sowie am Knoten Herrenkrugstraße / Tessenowstraße (Knoten 367) traten an allen untersuchten ÖPNV-Signalen relativ kurze mittlere Verlustzeiten unterhalb von 20 Sekunden und damit überwiegend mit einem guten LOS B auf.

Nach Aussage des Fachdienstes Verkehrstechnik sind insbesondere die Knotenpunkte Lübecker Straße / Kastanienstraße (Knoten 143), Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (Knoten 342) sowie Leipziger Straße / Wiener Straße / Raiffeisenstraße (Knoten 572) Fremdplanungen, die noch nicht nach aktuellen Standards programmiert sind. Eine Aktualisierung und Optimierung der Steuerungen wäre demnach wünschenswert und würde voraussichtlich ein Beschleunigungspotenzial für den ÖPNV heben können. Diese Einschätzung des Fachdienstes Verkehrstechnik zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der quantitativen Auswertungen für die ÖPNV-Signale. Die komplexer (mit übergeordneten Logiken) gesteuerten Anlagen Jerichower Platz (Knoten 354) und Herrenkrugstraße / Tessenowstraße (Knoten 367) liefern demgegenüber bereits deutlich günstigere Ergebnisse für die ÖPNV-Signale.

Wenngleich die verschiedenen Verkehrsarten hinsichtlich der Freigabezeiten teilweise in einer Konkurrenzsituation zueinanderstehen und einer Erfüllung aller Optimierungswünsche aufgrund der Knotenkomplexität ohne Zweifel auch Grenzen gesetzt sind, sind durch eine Optimierung der Anmeldetechnik und eine Anpassung bzw. Modernisierung der Steuerungen an allen Knoten gewisse Potenziale für die ÖPNV-Beschleunigung zu erwarten. Ein besonderes Augenmerk sollte auch auf die Verbesserung der Situation des Fußgänger- und Radverkehrs gelegt werden.

Hinsichtlich der Programmierung der ÖPNV-Priorisierung wird vor allem die Tatsache, dass die Fahrzeugführer bei einem Versagen der Anmeldetechnik aussteigen und zeitaufwendig einen Schlüsselschalter bedienen müssen, als problematisch eingeschätzt. Eine Rückfallebene, mit der bei Versagen der normalen Fahrzeuganmeldung zuverlässig und automatisiert bzw. manuell aus der Fahrerkabine heraus eine Notanmeldung an die

Lichtsignalsteuerung abgesetzt werden kann, würde unseres Erachtens deutlich größere Spielräume für eine effiziente und zielgerichtete ÖPNV-Priorisierung ermöglichen. Die einfache Definition zusätzlicher Meldepunkte könnte dies ggf. weiter unterstützen. Beide Voraussetzungen sind an den betrachteten Knoten gegenwärtig nicht oder nur teilweise gegeben. Eine kurzfristige Umsetzung einer Notanmeldung über das aktuell von der MVB getestete Verfahren, Meldepunkte über das Betriebsleitsystem an den Verkehrsrechner abzusetzen, könnte zusammen mit der vom Fachdienst Verkehrstechnik angestrebten Aktualisierung der Programmierung entsprechend dem Stand der Technik ggf. auch kurz- bis mittelfristig einige Potenziale zur ÖPNV-Priorisierung heben. Die größten Potenziale für den ÖPNV sind auf Basis der aktuell vorliegenden Auswertungen voraussichtlich an den Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (Knoten 342) und Lübecker Straße / Kastanienstraße (Knoten 143) zu erwarten.

6.3 Fahrtverlaufsanalysen

Die Analyse des Streckennetzes erfolgte in Form einer Fahrtverlaufsanalyse und Darstellung der Ergebnisse dieser in Weg-Geschwindigkeits-Diagrammen. Anhand der Diagramme kann der Fahrtverlauf auf einer Strecke detailliert betrachtet und bewertet werden.

Als Datengrundlage dienten hierbei die sekundlich aufgenommen Messwerte für GPS-Positionen und Geschwindigkeiten durch in den Straßenbahnen verbauten Messgeräten im Januar und Februar 2024. Durch einen Abgleich mit den Fahrplandaten wurden diese Messwerte den einzelnen Straßenbahnlinien bzw. -routen zugeordnet. Daraufhin erfolgte die Erstellung der Weg-Geschwindigkeits-Diagramme routen- und richtungsfein für die acht Magdeburger Straßenbahnlinien.

Im Detail wurden die Messwerte sowie die Haltestellenpositionen durch Meterwerte entlang des Routenverlaufs verortet.

Zusätzlich zum Abgleich mit den Fahrplandaten sowie mit Hilfe von Bordrechnerlogs aller Straßenbahnen erfolgte die Bestimmung der Fahrplanlage aller Linien routen- und richtungsfein. Als Ergebnis der Auswertung konnte die durchschnittliche Fahrplanlage an allen Haltestellen sowie deren Streuung und die Änderung der Fahrplanlage zwischen Haltestellen ausgegeben werden.

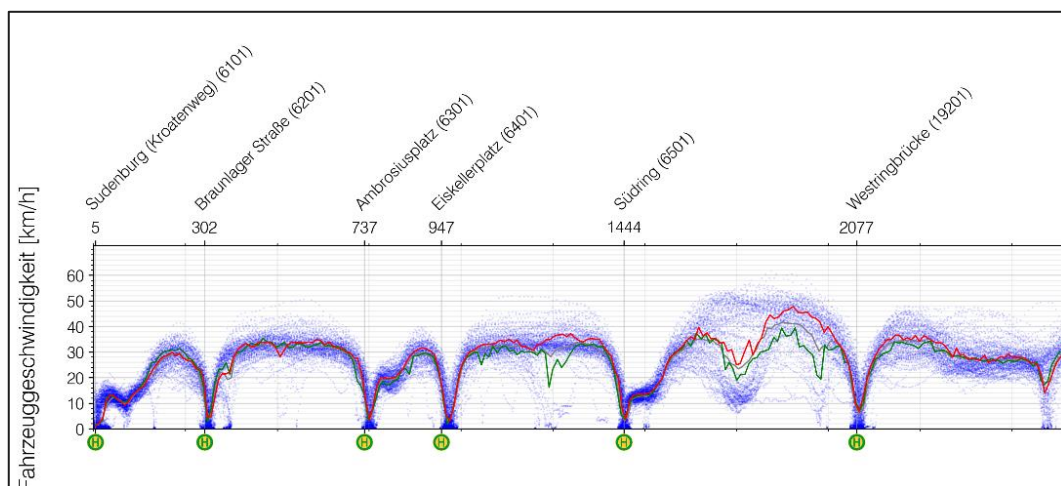


Abbildung 46: Weg-Geschwindigkeits-Diagramm der Linie 1

In Abbildung 46 ist das Weg-Geschwindigkeits-Diagramm der Linie 1 dargestellt. Auf der Abszissenachse ist der Weg des Linienvverlaufs in Metern aufgetragen und auf der Ordinatenachse die Geschwindigkeiten in Kilometer pro Stunde. Die einzelnen Messwerte aller Fahrten auf dieser Route sind im Diagramm mit blauen Punkten eingezeichnet.

Zusätzlich gibt es noch drei Linien in unterschiedlichen Farben, welche den Mittelwert unterschiedlicher Zeitbereiche abbilden:

- grau: Mittelwert über alle Fahrten
- grün: Mittelwert aller Fahrten von 7 bis 9 Uhr
- rot: Mittelwert aller Fahrten von 15 bis 17 Uhr

Durch die Analyse der Diagramme können unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen werden. Zunächst lassen sich typische Geschwindigkeitsprofile erkennen, z.B. konstante Geschwindigkeitsbereiche, Beschleunigungs- und Bremsphasen oder auch Halte. Des Weiteren sind Anomalien ersichtlich, d.h. beispielsweise Halte oder verminderte Geschwindigkeiten ohne ersichtlichen Grund. Durch die Dichte der blauen Punkte entlang des Fahrtverlaufs lässt sich erkennen, ob es sich um grundlegende Ursachen handelt, die jede Fahrt betreffen, wodurch sich hier ein potentieller Lösungsbedarf ableitet, oder nur einzelne Fahrten betroffen sind. Außerdem helfen die Mittelwerte für die Morgen- und Nachmittagsstunden bei der näheren Eingrenzung von Ursachen.

In weiteren Schritten können somit anhand der Weg-Geschwindigkeits-Diagramme Stellen im Fahrtverlauf herausgestellt werden, welche ausführlich analysiert werden müssen, um konkrete Störungsursachen benennen zu können. Dies erfolgt durch die Einbeziehung der Erfahrungen des Fahrpersonals in Workshops (siehe Kapitel 6.5).

6.4 Analyse der Knotenpunktzufahrten

Neben der Knotenpunktanalyse (siehe Kapitel 6.2), basierend auf Daten des Verkehrsrechners der Stadt Magdeburg, erfolgte eine Auswertung der sekundlich aufgenommen GPS-Messungen der Straßenbahnen streckenbezogen auf den Zufahrten der zu untersuchende Knotenpunkte ohne Berücksichtigung der ÖPNV-Linie.

Als Grundlage wurden die im System urbic® hinterlegten Meldepunktstrecken und die angebenen Soll-Reisezeiten für die einzelnen Zufahrten verwendet. Die Analyse erfolgte nicht linienfein, sondern alle Fahrten die eine Zufahrt nutzten, wurden unabhängig ihrer Linie aggregiert.

Neben den so bestimmten Ist- und Verlustzeiten für jede Zufahrt wurden die Orte bestimmt, an denen es zu Häufungen von Halten kommt. Dazu wurde für jede einzelne Fahrt bestimmt, ob und, wenn ja, wo es zu einem Halt kam und wie lange dieser dauerte. Anschließend wurden alle Halte anhand ihrer geografischen Position gruppiert und kategorisiert (Haltestelle, LSA oder Strecke).

Zusätzlich ist in den Kartendarstellungen (siehe Abbildung 47) noch das Geschwindigkeitsband für den jeweiligen Streckenabschnitt der Zufahrt eingezeichnet (jeweils aggregiert auf 20m Abschnitte). Für jede Zufahrt wird die Verteilung der einzelnen

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Qualitätsanalysen

Fahrzeiten in einem Histogramm sowie zur Ausweisung der statistischen Kennwerte in einem Boxplotdiagramm (siehe Abbildung 48) dargestellt.

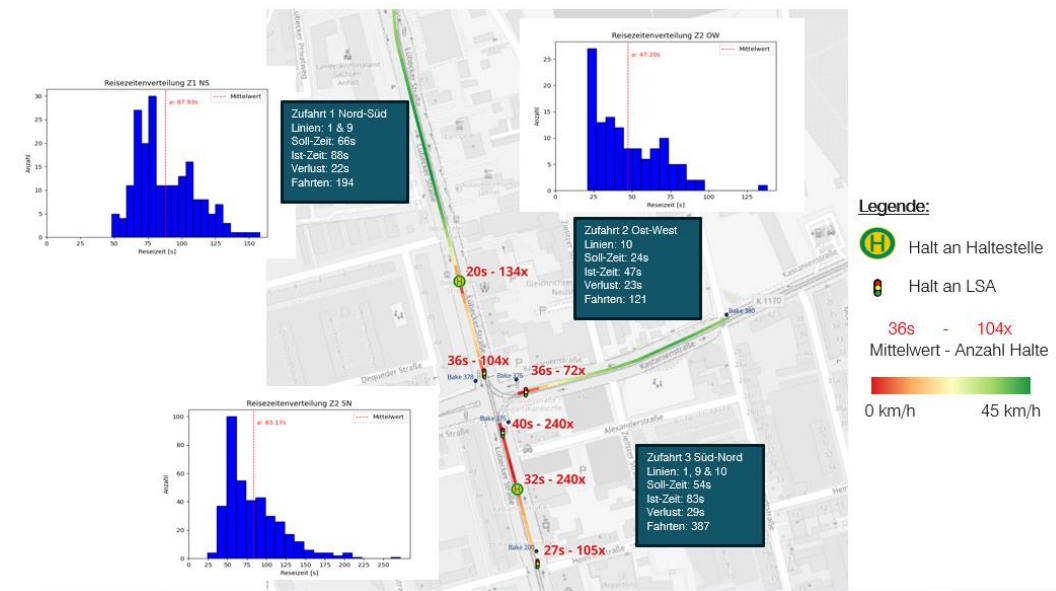


Abbildung 47: Auswertung der Knotenpunktzufahrten – Knoten 143 Kastanienstraße / Lübecker Str.

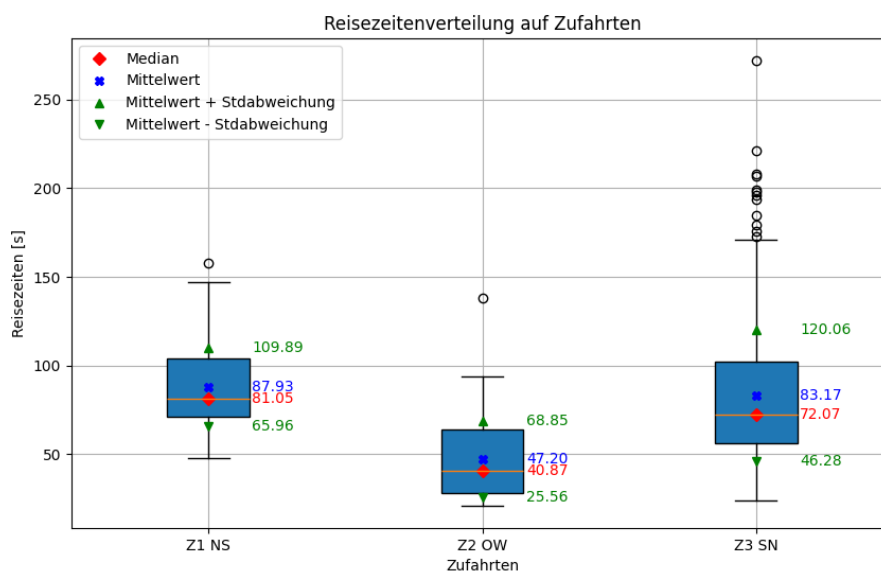


Abbildung 48: Reisezeitenverteilung auf Knotenpunktzufahrten – Knoten 143 Kastanienstraße / Lübecker Str.

Es ist zu beachten, dass theoretisch mögliche Fahrzeiten für die behinderungsfreie Fahrt nicht in verwertbarem Umfang vorliegen. Das Fahrpersonal ist angehalten, Fahrten vor der Fahrplanzeit zu vermeiden. Aus der Auswertung geht daher nicht hervor, wenn aus diesem

Grund langsamer als möglich gefahren wurde oder Abfahrten verzögert wurden, um Verfrühungen zu vermeiden.

6.5 Workshops mit dem Fahrpersonal

Auf der Grundlage der Geschwindigkeits-Weg-Diagramme aller Straßenbahnlinien wurde dem Fahrpersonal die erfasste Betriebsqualität nachvollziehbar vor Augen geführt. Mit Hilfe der Expertise des Fahrpersonals wurden die Ursachen zu Auffälligkeiten (Geschwindigkeitsstreuungen oder -einbrüche) erörtert, Häufigkeiten (systematische oder zufällige Ursachen) diskutiert sowie besprochen, ob das in der Datenerfassung gewonnene Bild typisch für die durch das Fahrpersonal alltäglich erlebte Situation ist oder nicht.

Die Befahrung des eigenen Bahnkörpers ist bei der Straßenbahn meist behinderungsfrei, aber es gibt viele Langsamfahrstellen im Liniennetz. Die Lichtsignalanlagen (LSA) sind für die Straßenbahnen teilweise sehr gut, aber viele Schaltungen verursachen hohe Wartezeiten. Es besteht ein Wunsch nach Anpassung der Fahrplanlage auf einigen Strecken im Liniennetz, beispielsweise zwischen dem Hauptbahnhof/Kölner Platz und dem Wilhelmstädter Platz.

Es gibt jedoch auch einige Probleme, die die Bahnen behindern. So verursachen linksabbiegender Individualverkehr, parkende Fahrzeuge sowie Rückstau vom Individualverkehr an Knotenpunkten große Behinderungen. Außerdem ist der Umstieg an der Haltestelle Südring problematisch für Fahrgäste, da aufgrund der vielen Überwegen an der Lichtsignalanlage für den Umstieg etwa 4 bis 5 Minuten benötigt werden, was dazu führt, dass Fahrgäste bei "Rot" laufen.

Des Weiteren gibt es Probleme mit den Infrarotbaken. Die Fahrer berichten von fehleranfälligen Anmeldungen, die möglicherweise durch die tiefstehende Sonne beeinflusst werden. Wenn viele Fahrgäste ein- & aussteigen und die Bahn dadurch längere Zeit stehen bleibt, ist die erste Freigabe oft schon abgelaufen, danach erfolgt keine zweite Freigabe. Eine manuelle Anmeldung via Schlüssel ist notwendig. Ein ähnliches Problem tritt auf, wenn mehrere Bahnen hintereinander an der Lichtsignalanlage warten und nur die erste Bahn eine Freigabe erhält.

6.6 Handlungsansätze

Im Ergebnis der qualitativen und quantitativen Analysen können den identifizierten Problembereichen des ÖPNV Ursachen zugeordnet werden und damit Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sowie Maßnahmenansätze abgeleitet werden.

In der nachfolgenden Abbildung ist Auszug eines im Workshop mit dem Fahrpersonal qualifizierten Geschwindigkeits-Weg-Diagramm abgebildet.

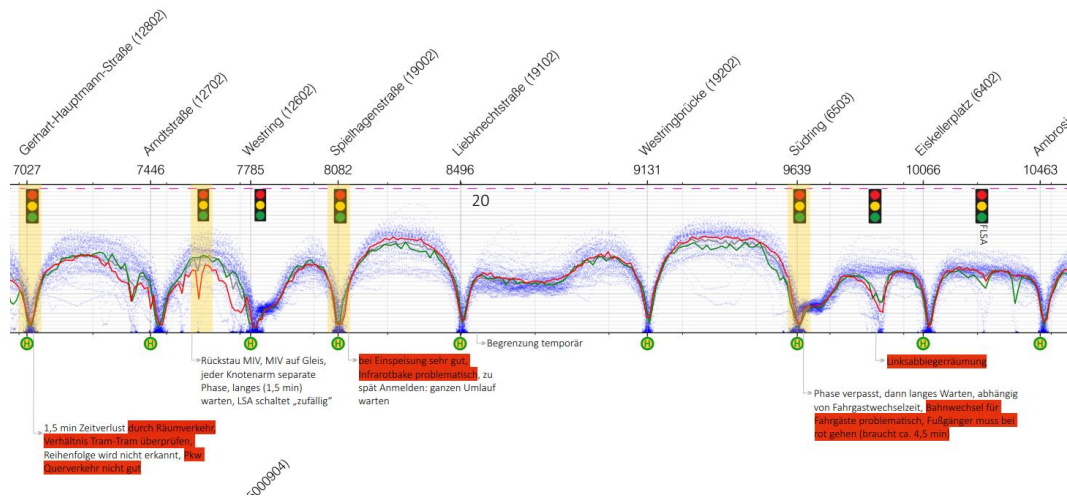


Abbildung 49: Auszug eines kommentierten Geschwindigkeit-Weg-Diagramms

In Kombination mit der Fachexpertise der beteiligten Planungsbüros konnten in der folgenden Projektphase mögliche Handlungsansätze zur Behebung der erkannten Defizite und anhand der Geschwindigkeitseinbrüche und -unstetigkeiten die Umfänge möglicher Verbesserungen abgeschätzt werden.

Im dargestellten Bereich ergingen Hinweise zu den LSA-Steuerungen, zur Lage und Funktion von Infrarotbaken und zu Behinderungen durch den parallelen Kfz-Verkehr.

Zielführende Handlungsansätze wurden im finalen Schritt zu Maßnahmen qualifiziert, die nachfolgend mit dem Auftraggeber erörtert wurden (siehe Kapitel 7).

7 Maßnahmen

7.1 Maßnahmenstruktur

Die im Projekt zu entwickelnden Maßnahmen dienen dem Ziel, den ÖPNV in Magdeburg und hier insbesondere den Straßenbahnverkehr in seiner Betriebsqualität zu stärken.

Die Maßnahmen weisen unterschiedlichen Charakter auf. Einerseits sind sie aus den konzeptionellen Untersuchungen (siehe Kapitel 3 und Kapitel 4) und den hierfür erforderlichen Voraussetzungen abgeleitet. Diese Maßnahmen weisen die Signatur A (Maßnahmen mit allgemeinem Hintergrund) auf.

Andererseits wurden Maßnahmen entwickelt, die konkrete Verbesserungen an Lichtsignalanlagen (Signatur L) und konkrete Vorschläge zur Verbesserung der Verkehrsorganisation in bestimmten Straßenabschnitten der Landeshauptstadt Magdeburg zum Inhalt haben (Signatur I).

Die Maßnahmen vom Typ L und I eint, dass sie aus den Erkenntnissen der Bordrechnerdatenauswertungen abgeleitet wurden und im Workshop mit dem Fahrpersonal entsprechend untersetzt/qualifiziert wurden.

7.2 Maßnahmenübersicht

In der nachfolgenden Abbildung sind die im Projekt untersuchten Maßnahmen und verortbaren Maßnahmen dargestellt.

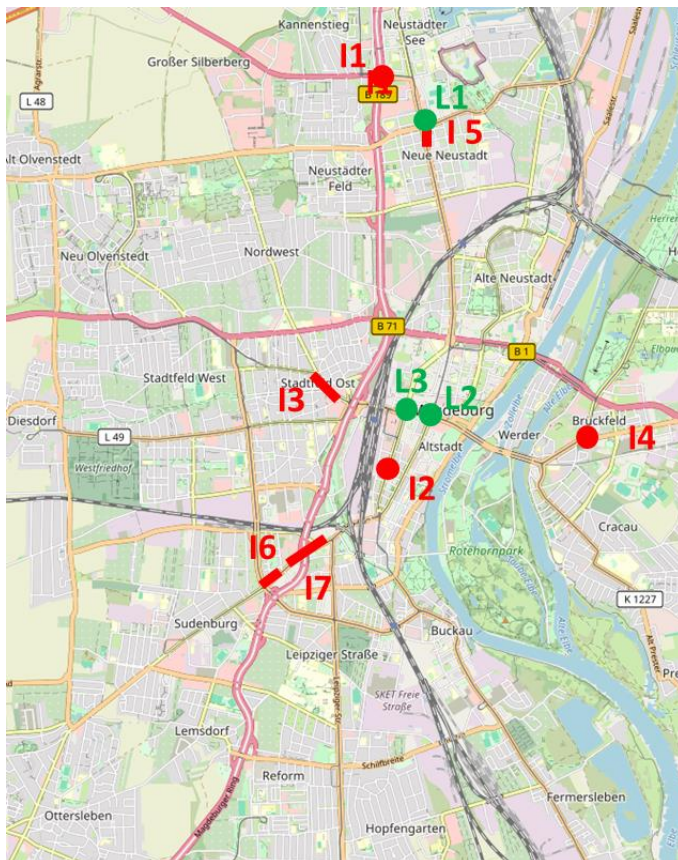


Abbildung 50: Übersicht der räumlich verortbaren Maßnahmen

Zu jede Maßnahme existiert im Anhang ein Maßnahmenblatt, in der die Intention der Maßnahmen, die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sowie die wichtigsten Eigenschaften beschrieben und in einen Gesamtkontext eingeordnet werden.

7.3 LSA-bezogene Maßnahmen

Für die fünf in Abschnitt 6.2.1 genannten Einzelknoten erfolgte eine erste quantitative Bewertung und qualitative Einschätzung zunächst auf Basis von Daten des Verkehrsrechners und von Auswertungen der ÖPNV-Qualität mit Hilfe des Qualitätstools urbic® (vgl. Abschnitte 6.1 und 6.2). Diese Einschätzungen der aktuellen Situation wurden im weiteren Projektverlauf durch die auf einer größeren räumlichen Ebene angelegten Fahrtverlaufsanalysen (Abschnitt 6.3 und 6.4) und durch die Workshops mit dem Fahrpersonal (Abschnitt 6.5) in vollem Umfang bestätigt.

Um abschätzen zu können, bei welchen Knoten durch die Umsetzung von kurzfristig möglichen Optimierungsmaßnahmen die größten Verbesserungen für den ÖPNV zu erzielen wären, wurden für fünf Knoten unter Berücksichtigung der vorhandenen Kfz-Belastungen und der konkreten Knotengeometrie erste konzeptionelle Überlegungen

ausgearbeitet. Für den Knoten Herrenkrugstraße / Tessenowstraße (LSA 367) wurde auf diese Betrachtung verzichtet, da bereits die vorliegenden quantitativen Auswertungen nur ein geringes Optimierungspotential erwarten ließen und diese Einschätzung von allen beteiligten Projektpartnern geteilt wurde.

Am Jerichower Platz (LSA 354) zeigte sich für den Kfz-Verkehr bereits ohne Berücksichtigung von ÖPNV und Fußgängerverkehr eine sehr hohe Auslastung von rund 87 Prozent nahe der Sättigungsbelastung. Nur bei rund 4 Prozent aller Straßenbahnfahrten am Knoten traten im Tagesverlauf entsprechend der urbic®-Auswertung Behinderungen von mehr als 40 Sekunden auf, womit die ÖPNV-Beschleunigung im Vergleich mit den anderen Knoten bereits auf einem relativ hohen Niveau liegt. Lange Fußgängerfurten und die Nord-Süd-Querung der Straßenbahn im Konflikt mit der Hauptlast des Kfz-Verkehrs entlang der B1 reduzieren die Möglichkeit von ÖPNV-Eingriffen in den Signalprogrammablauf. Eingriffe in die LSA-Programmierung zur ÖPNV-Beschleunigung würden voraussichtlich bei verhältnismäßig geringen Effekten starke Auswirkungen auf den Kfz-Verkehr haben. Die prioritäre Umsetzung einer weiterführenden ÖPNV-Beschleunigung wurde für den Knoten aus diesen Gründen nicht empfohlen.

Eine ähnliche Einschätzung ergibt sich für den Knoten Große Diesdorfer Straße / Europaring (Knoten 523). Auch dieser Knoten weist für den Kfz-Verkehr bereits ohne Berücksichtigung von ÖPNV und Fußgängerverkehr eine sehr hohe Auslastung von rund 87 Prozent nahe der Sättigungsbelastung auf. Bei starken Linksabbiegeströmen von der Großen Diesdorfer Straße erschweren die auf der Straßenbahntrasse liegenden Mischspuren in Verbindung mit den Haltestellenbereichen eine optimale ÖPNV-Beschleunigung bei gleichzeitiger Gewährleistung einer ausreichenden Kfz-Kapazität. Bei einem Anteil von rund 21 Prozent der Straßenbahnfahrten mit Behinderungen über 40 Sekunden besteht ohne Zweifel ein erhebliches Optimierungspotenzial. Wegen der ungünstigen Rahmenbedingungen würde eine stärkere ÖPNV-Beschleunigung voraussichtlich restriktiv auf den Kfz-Verkehr wirken und einen größeren – ggf. auch baulichen – Aufwand erfordern. Die prioritäre und kurzfristige Umsetzung einer weiterführenden ÖPNV-Beschleunigung wurde für den Knoten aus diesen Gründen zunächst nicht empfohlen. Mittelfristig sollte der Bereich jedoch ohne Zweifel noch einmal vertieft untersucht werden, um Möglichkeiten zur ÖPNV-Beschleunigung sowie für eine Verbesserung der gesamten Verkehrssituation auszuloten.

Eine deutlich geringere Kfz-Auslastung ohne Berücksichtigung von ÖPNV und Fußgängerverkehr lässt sich mit 62 Prozent Auslastung am Knoten Leipziger Straße / Raiffeisenstraße (LSA 572) feststellen. Das Beschleunigungspotenzial für den Straßenbahnverkehr ist bei einem Anteil von 20 Prozent aller Fahrten mit einer Behinderung von mehr als 40 Sekunden auch hier recht hoch. Unter den gegebenen Randbedingungen der heutigen Anmelde-technik für die ÖPNV-Priorisierung erwies sich insbesondere das effiziente und gezielte „Abräumen“ der Linksabbieger von der Straßenbahntrasse als problematisch. Potenziale durch eine Verbesserung des Anmeldevorgangs bei zeitgleicher Überarbeitung der Signalprogrammsteuerung lassen ein Verbesserungspotenzial für die ÖPNV-Beschleu-

nigung erwarten. Darüber hinaus wurden weiterführende Überlegungen zu einer modifizierten Führung der Linksabbieger über andere Knoten diskutiert. Insbesondere wegen der zu erwartenden Probleme bei einer großräumigeren alternativen Führung der Linksabbiegeströme und darüber hinaus auch der Zweckbindung von Fördermitteln an dem neu gebauten Knoten wird der Knoten in der Abstimmung mit allen beteiligten Projektpartnern jedoch ebenfalls nicht für eine kurzfristige prioritäre Umsetzung zurückbehalten.

Eine andere Situation ergibt sich an den beiden verbleibenden Knoten, die einer detaillierten Voruntersuchung unterzogen wurden. Am Knoten Lübecker Straße / Kastanienstraße (LSA 143) liegt die Auslastung der Kfz-Ströme bei einer angenommenen Umlaufzeit von 90 Sekunden ohne Berücksichtigung von ÖPNV-Signalen und Fußgängerfurten bei nur 53 Prozent. Für die Signalsteuerung und die Auslastung maßgebend werden die teilweise langen Fußgängerfurten sowie die für den ÖPNV erforderlichen Freigabezeiten auf der Nord-Süd-Achse, welche den Hauptstrom des Kfz-Verkehrs queren. Rund ein Drittel aller Straßenbahnfahrten hat am Knoten eine Behinderungszeit von mehr als 40 Sekunden. Die Ursache dafür liegt zu einem großen Teil in den Behinderungen zwischen den ÖPNV-Fahrzeugen selber. Wechselwirkungen zwischen der Haltestelle im Knotenzulauf, der Mischnutzung der Gleistrasse für Busse und Bahnen, einer veralteten Anmeldetechnik und einem darauf basierenden Signalprogramm führen zu erheblichen Zeitverlusten für den ÖPNV. Eine kurzfristige Verbesserung der Situation durch überschaubare Maßnahmen bei der ÖPNV-Anmeldung begleitet von einer Aktualisierung des Signalprogramms unter Berücksichtigung der Modulbibliothek „Standard MD“ lassen an diesem Knoten erhebliches Verbesserungspotenzial für die ÖPNV-Priorisierung erwarten, ohne dass sich die Situation für die Fußgängerströme und den Kfz-Verkehr maßgeblich verschlechtert. Auf der Grundlage dieser Einschätzung besteht bei allen Projektbeteiligten Konsens darüber, den Knoten Lübecker Straße / Kastanienstraße (LSA 143) im Rahmen des Arbeitspaketes 7 – Neuprogrammierung einzelner Knotenpunkte – zeitnah zu vertiefen und mit einer optimierten Anmeldetechnik sowie einem aktualisierten Signalprogramm als Beispielknoten in Betrieb zu nehmen.

Ähnlich stellt sich die Situation am Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (LSA 342) dar. Die Auslastung der Kfz-Ströme ohne Berücksichtigung von ÖPNV-Strömen und Fußgängerfurten liegt bei rund 40 Prozent und lässt gewisse Freiräume für die Optimierung des Ablaufes der ÖPNV-Signalisierung. Maßgebend werden wieder die langen Fußgängerfurten sowie die Freigabezeiten für die verschiedenen Richtungen der zahlreichen Straßenbahnbewegungen mit mehr als 1 Fahrt pro 90 Sekunden (angenommene Umlaufzeit) in den Spitzenstunden. Mehr als 60 Prozent aller Straßenbahnfahrten haben am Knoten entsprechend den urbic®-Auswertungen eine Behinderungszeit von mehr als 40 Sekunden. Aufgrund der örtlichen Situation ist davon auszugehen, dass diese Behinderungszeiten gegenüber einer optimalen Fahrzeit nicht vollständig durch die Lichtsignalsteuerungen, sondern auch durch externe Störungen (z. B. Behinderungen durch Fußgänger auf dem Gleis) und betriebliche Abläufe (z. B. Fahrerwechsel) verursacht werden. Dennoch lässt dieser Anteil

von Straßenbahnfahrten mit sehr hohen Zeitverlusten ein erhebliches Optimierungspotenzial erwarten. Die Einschätzung ist ähnlich zum Knoten Kastanienstraße: Wechselwirkungen zwischen der Haltestelle im Knotenzulauf sowie eine veralteten Anmeldetechnik und ein darauf basierendes Signalprogramm führen zu erheblichen Zeitverlusten für den ÖPNV. Mit exakteren Informationen zum Eintreffen der ÖPNV-Fahrzeuge durch eine verbesserte Anmeldetechnik ergänzt durch ein aktualisiertes und angepasstes Signalprogramm lassen auch an diesem Knoten ein erhebliches Verbesserungspotenzial für die ÖPNV-Priorisierung erwarten, ohne dass sich die Situation für die Fußgängerströme und den Kfz-Verkehrs maßgeblich verschlechtert. Es besteht in der Projektgruppe Konsens, diesen Knoten in die vertiefende Betrachtung in Arbeitspaket 7 aufzunehmen und zeitnah mit einer optimierten Anmeldetechnik sowie einem angepassten aktualisierten Signalprogramm in Betrieb zu nehmen.

Der dritte Knoten, der im Rahmen des Arbeitspaketes 7 vertieft zu untersuchen ist und mit einer optimierten Anmeldetechnik sowie einem optimierten Programm ausgestattet werden soll, ist der Knoten Ernst-Reuter-Allee / Otto-von-Guericke-Straße (LSA 334). Insbesondere aus der zeitgleichen Optimierung mit dem Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg wird auf Basis der Fahrtverlaufsanalysen und den Einschätzungen der MVB ein Synergieeffekt hinsichtlich der Straßenbahnbeschleunigung zwischen beiden Knoten erwartet. Aufgrund der Einbindung des Knotens in die Tunnelsteuerung existieren sehr viele Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Betriebszuständen. Das Zusammenspiel zwischen den Schranken und dem LSA-Steuergerät wurde vor Inbetriebnahme umfangreichen Tests unterzogen. Um die Arbeiten nicht neu durchführen zu müssen, wurde mit dem Fachdienst Verkehrstechnik abgestimmt, die Optimierung auf die Anmeldetechnik und die Parameteränderung zu begrenzen, ohne grundsätzliche Modifikationen an der Logik und den Phasenabläufen vorzunehmen.

Für die Bearbeitung im Rahmen des Arbeitspaketes 7 – Neuprogrammierung einzelner Knotenpunkte – wurde im Projektverlauf in Abstimmung mit allen Projektbeteiligten also folgende drei Knoten zurückbehalten:

- Lübecker Straße / Kastanienstraße (LSA 143) – Maßnahme L1
- Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (LSA 342) – Maßnahme L2
- Ernst-Reuter-Allee / Otto-von-Guericke-Straße (LSA 334) – Maßnahme L3

Hinsichtlich der Möglichkeiten einer kurzfristigen Optimierung an den Knoten ergeben sich aus den Analysen drei mögliche Handlungsfelder. Das erste Handlungsfeld betrifft die Umsetzung einer verbesserten Anmeldung der ÖPNV-Fahrzeuge an den Lichtsignalsteuerungen mittels LIVEtsp (vgl. Maßnahme A7 (verstärkte Nutzung LIVEtsp)). Das zweite Handlungsfeld betrifft eine Erweiterung der Modulbibliothek „Standard MD“ (vgl. Maßnahme A). Das dritte Handlungsfeld betrifft die Steuerungslogiken selber und die Umsetzung an konkreten Knoten (vgl. Maßnahme , Maßnahme und Maßnahme). Alle drei

Handlungsfelder werden für die drei zurückbehaltenen Knoten im Rahmen des Arbeitspaketes 7 des Projektes vertieft untersucht und in der Mikrosimulation umgesetzt.

7.4 Ansätze zur Verkehrsanlagengestaltung

Gemeinsam mit den Projektbeteiligten fand im November eine Erörterung der Maßnahmenvorschläge statt. In der nachfolgenden Tabelle ist die Konklusion des Termins dokumentiert, aus der sich die im Projekt betrachteten Maßnahmen ableiten lassen sowie darüberhinausgehender Untersuchungsbedarf erkennbar wird.

Maßnahmenvorschlag	Stellungnahme LH Magdeburg	Konklusion der Abstimmungen	Maßnahmennummer im Projekt
Linie 1: Ebendorfer Chaussee/ Ringzufahrten – Auflösung der 10 km/h	Möglicher Maßnahmenvorschlag H	Bestandteil des Projektes	M I1
Linie 1: Otto-von-Guericke Straße/ Danzstraße – Wegnahme der Linksabbiegerspur aus dem Gleisbereich	Möglicher Maßnahmenvorschlag - kein genereller Entfall, nur möglich mit anderer Verkehrsorganisation und Nachweis hierfür	Bestandteil des Projektes	M I2
Linie 4: Olvenstedter Straße/ Goethestraße – Entfall der Linksabbiegerspur in die Goethestraße	Möglicher Maßnahmenvorschlag mit der Bedingung, dass das direkte Linksabbiegen für Radfahrende weiterhin möglich ist	Bestandteil des Projektes	M I3

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Maßnahmen

Maßnahmenvorschlag	Stellungnahme LH Magdeburg	Konklusion der Abstimmungen	Maßnahmennummer im Projekt
Linie 6: Herrenkrugstraße/ Brückstraße (Neuordnung des Haltestellenbereiches und des Bereiches vor der ehemaligen Hauptwerkstadt mit der Option 1, den Haltestellenbereich für den MIV zu sperren (bis Biederitzer Weg) und der Option 2, eine Abstell- und Wendemöglichkeit für Sonderverkehre (Sportstätten) einzurichten)	Im Normalverkehr ist hier kein Handlungsbedarf zu sehen. Während Sonderverkehr/Veranstaltungsfall ist mit Ringverkehren das erhöhte Fahrgastaufkommen geregelt	Aus der Perspektive der MVB ist dies ein wichtiger Ansatz, um einerseits die Verknüpfung der ÖPNV-Angebote im Regelverkehr zu verbessern und um andererseits für Veranstaltungsverkehre eine wirtschaftlich zielführende Variante entwickeln zu können. Der Vorschlag wird Bestandteil des Projektes geführt.	M 14
Linie 1/9: Lübecker Straße – Entwicklung einer geeigneten Haltestelle in Höhe Kastanienstraße mit Sperrung für den MIV bis Haldenslebener Straße	Frage nach Wechselwirkungen zum Projekt Netzstudie (GVFG-Vorhaben), zudem komplexe Rahmenbedingungen, die in diesem Projekt nicht ausreichend genug abgedeckt werden könnten	Die Intention des Ansatzes wird befürwortet, ggf. werden mehrere Maßnahmenbudgets zusammengelegt, um einen möglichen Grundsatz im Projekt bearbeiten zu können (ggf. auch im Zusammenhang mit einer zweiten Signalisierungsvariante) Bestandteil des Projektes	M 15 und M 16
Linie 10: Halberstädter Straße/ Brunnenstraße – Entfall Parken auf der Halberstädter Straße und Vergrößerung der Sperrflächen	Möglicher Maßnahmenvorschlag	Bestandteil des Projektes	M 17

Maßnahmenvorschlag	Stellungnahme LH Magdeburg	Konklusion der Abstimmungen	Maßnahmennummer im Projekt
Linie 10: Halberstädter Straße/ Bereich Ringzufahrten und Sudenburger Wuhne – Linksabbieger zwischen die Gleise, Neutrassierung des stadtwärtigen Gleises	Möglicher Maßnahmenvorschlag	Bestandteil des Projektes	M 18

Tabelle 7: Weiterzuverfolgende Maßnahmen der Verkehrsanlagengestaltung*

7.4.1 Maßnahme I1

Die Maßnahme I1 beinhaltet auf der Ebendorfer Chaussee die Auflösung der Langsamfahrstelle der Straßenbahn (aktuell ist die zulässige Geschwindigkeit auf 10 km/h begrenzt) auf dem besonderen Bahnkörper im Bereich der Ringabfahrten.

Die Geschwindigkeitsbegrenzungen wurden festgelegt, um im Zusammenspiel mit der Signalisierung der Gleisüberfahrten (inklusive Gleisfurt) die in zurückliegender Zeit registrierten Unfälle auszuschließen. Die Geschwindigkeitsbegrenzungen resultieren somit nicht aus baulichen, infrastrukturellen oder sonstigen betrieblichen Erfordernissen.

Die vorhandene Signalisierung in Verbindung mit der vorhandenen Beschilderung sichert an den Gleisquerungen alle zulässigen Fahr- oder Gehbeziehungen gegenüber dem Straßenbahnverkehr.

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und damit zur Schaffung der Voraussetzung für die Beseitigung der Langsamfahrstelle muss eine Erweiterung der Radverkehrssignalisierung in der Zufahrt Ebendorfer Chaussee Ost (vor der Ringzufahrt) erfolgen. Hier sollte selektiv eine Signalisierung (Sperrung) des nach rechts über die Gleise in Richtung Ringauffahrt abbiegenden Radverkehrs in Betracht gezogen werden. Da sich das Verkehrszeichen VZ 331.1 (Kraftfahrstraße) erst hinter den Straßenbahngleisen befindet, kann diese Radfahrbeziehung nicht ausgeschlossen werden. Ergänzend kann an dieser Ringzufahrt auch über die Positionierung zusätzlicher Verkehrszeichen VZ 201 (Andreaskreuz) zwischen der Gleistrasse und der parallelen Fußgängerfurt über die Ringzufahrt diskutiert werden, sofern davon auszugehen ist, dass Fußgänger widerrechtlich die Ringzufahrt zur Querung der Gleise nutzen.

* In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ausgangslagen, die Maßnahmenansätze sowie die Maßnahmen mit ihren Wirkungen beschrieben.

Im Zusammenhang mit der Auflösung der Langsamfahrstelle sollte eine Überprüfung der LSA-Steuerung hinsichtlich der dann anzuwendenden fahrdynamischen Parameter der Straßenbahn und der versorgten ÖV-Priorisierung erfolgen.

Der Wegfall der aktuellen Langsamfahrstelle (10 km/h) inklusive der Beschleunigungs-/Bremsbereiche hat bei ungehinderter Durchfahrt der Straßenbahn mit einer Geschwindigkeit von konstant 50 km/h ohne Berücksichtigung von LSA-Verlustzeiten ein Beschleunigungspotential von mehr als 30 Sekunden zur Konsequenz.

7.4.2 Maßnahme I2

Die Maßnahme I2 betrifft die Linie 9 im Kreuzungsbereich Otto-von-Guericke-Straße/Danzstraße in beiden Richtungen. Im Bestand wird die Straßenbahn in der Mittellage gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt. In beiden Richtungen wird die Straßenbahn durch den linksabbiegenden Verkehrsstrom von der Otto-von-Guericke-Straße in die Danzstraße behindert. Die Behinderung lässt sich im entsprechenden Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der Linie 9 durch den stärkeren Geschwindigkeitseinbruch zwischen der Haltestellen Haeckelstraße/Museum und Haltestelle Verkehrsbetriebe erkennen. Aus dieser Erkenntnis lässt sich schlussfolgern, dass eine getrennte Straßenbahn- und Kfz-Führung zu einer Verringerung des Geschwindigkeitsabfall führt.

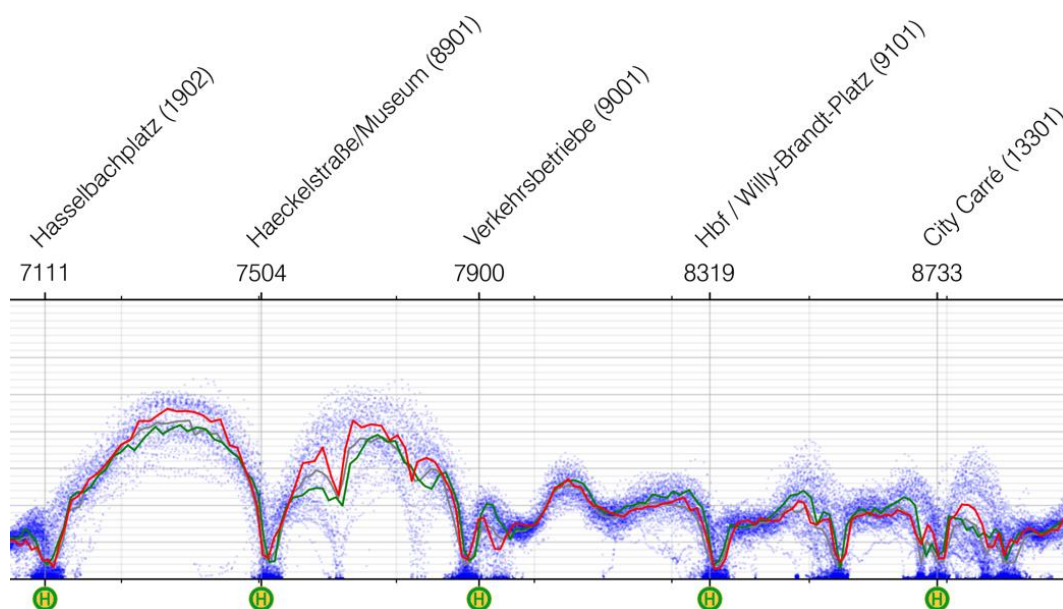


Abbildung 51: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Haeckelstraße/Museum und Verkehrsbetriebe

Initial der Maßnahme I2 ist der Entfall der Linksabbiegerfahrstreifen aus dem Gleisbereich in beiden Richtungen, um die Behinderung am entsprechenden Knotenpunkt zu minimieren. Um Linksabbiegerspuren einzurichten, muss die Verkehrsfläche für den Kfz

auf eine Breite von 6,50 m erweitert werden (gegenwärtige Bestandsbreite 5,72 m in der stadteinwärtige Richtung und 5,85 m in der stadtauswärtigen Richtung). Daraus erwächst die Konsequenz eines separaten Linksabbiegestreifens und eines gemeinsamen Geradeaus-Rechtsabbiegestreifens mit jeweils 3,25 m Breite. Unter Beachtung der Minimierung des Eingriffes wird die Aufweitung an den Bestand angrenzend entwickelt. Es ergibt sich eine Warteflächenlänge der Linksabbiegerspuren von 40 m am südlichen Ast und 30 m am nördlichen Ast. In der südlichen Zufahrt müssen aufgrund der Aufweitung vier Bäume gefällt und der Radweg entsprechend angepasst werden. Ein Sicherheitstrennstreifen wird zwischen der Fahrbahn und dem Radweg mit einer Breite von 0,50 m entsprechend der Richtlinien eingeordnet. Anschließend wird die Ausrundung in die Danzstraße angepasst, um einen passfähigen Anschluss zum neuen Bord zu gestalten. Aufgrund der Aufweitung entfallen in der nördlichen Zufahrt die bestehenden Längsparkstände vor dem Haus 31 – 32. Drei Bäume müssen hier gefällt werden. Der Bord wird entsprechend der Aufweitung angepasst. Zusätzlich zur baulichen Maßnahme muss eine Optimierung der Signalisierung des Knotenpunktes erfolgen, damit die Priorisierung der Straßenbahn wirksam realisiert werden kann.

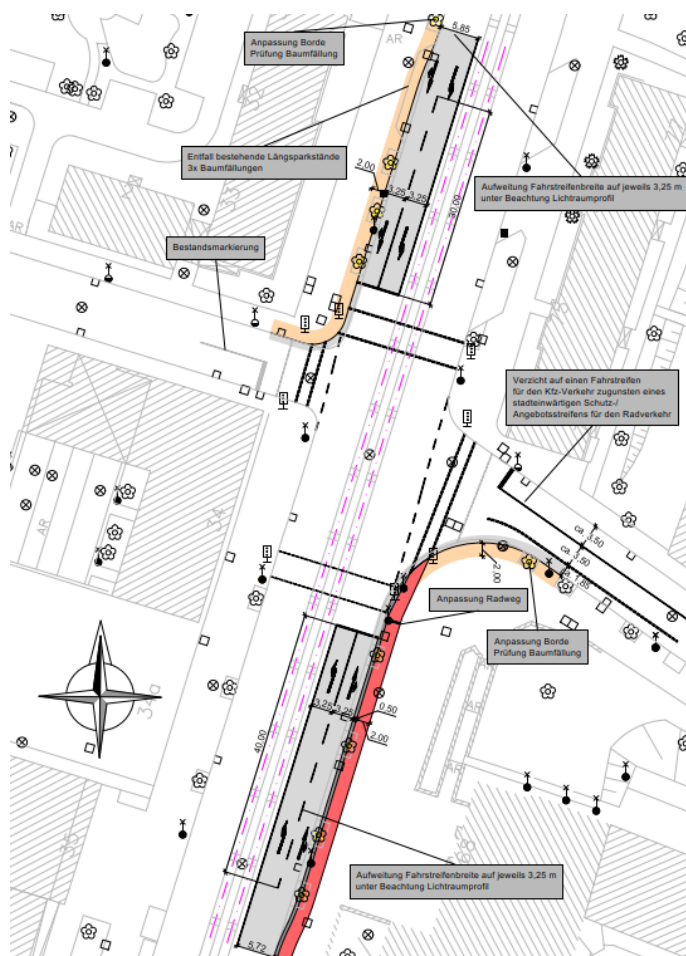


Abbildung 52: Lageplan Maßnahme I2

In der Danzstraße (östliche Zufahrt) wird in Fahrtrichtung Ost ein Angebots-/Schutzstreifen für den Radverkehr eingeordnet. Um dies zu ermöglichen wird das Angebot für Kfz-Verkehre auf das verkehrlich notwendige Maß (eine Zu- und eine Abfahrtsspur) begrenzt.

7.4.3 Maßnahme I3

Die Maßnahme I3 betrifft die Linie 4 entlang der Olvenstedter Straße in stadtauswärtiger Richtung und hier den Knotenpunktbereich mit der Goethestraße. Im Bestand wird die Straßenbahn in beiden Richtungen in der Mittellage auf einem besonderen Bahnkörper geführt. Dieser ist durch eine Sperrflächenmarkierung von der Kfz-Fahrbahn abgetrennt. Durch den linksabbiegenden Verkehrsstrom von der Olvenstedter Straße in die Goethestraße wird die Sperrfläche unterbrochen und die Straßenbahn behindert. Diese Behinderungen lassen sich im entsprechenden Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der Linie 4 erkennen. Zwischen den Haltestellen Wilhelmstädter Platz und Friesenstraße ist ein Absinken der Geschwindigkeit der Straßenbahn erkennbar. Im entsprechenden Geschwindigkeits-Weg-Diagramm in entgegengesetzter, stadteinwärtiger Richtung ist eine solche Absenkung der Geschwindigkeit nicht erkennbar.

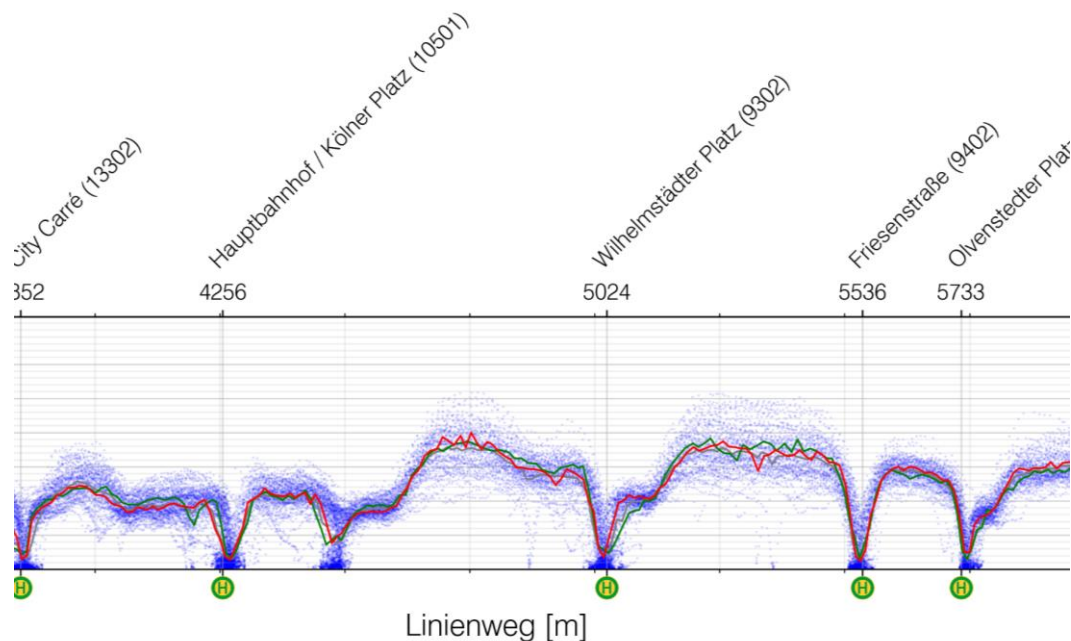


Abbildung 53: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Magdeburg Hauptbahnhof und Wilhelmstädter Platz

Die Behinderung der Straßenbahn kommt durch die wartenden Fahrzeuge, die von der Olvenstedter Straße in die Goethestraße links abbiegen und den entgegenkommenden Verkehr die Vorfahrt gewähren müssen, zustande.

Der Entfall des Linksabbiegestreifens führt zu einer Vergrößerung der Fläche des Gehweges, der Radverkehr wird im Zuge der Olvenstedter Straße zunächst an den Fahrbahnrand und im weiteren Verlauf unter Anwendung einer Regellösung in den Fahrstreifen des MIV geführt. Durch diese Mischverkehrsführung bleibt das direkte Linksabbiegen für den Radverkehr weiterhin möglich. Das Unterbinden des direkten Linksabbiegens durch den Kfz-Verkehr erfolgt durch das Aufstellen der Schilderkombination VZ 214 mit Zusatzzeichen 1022-10.

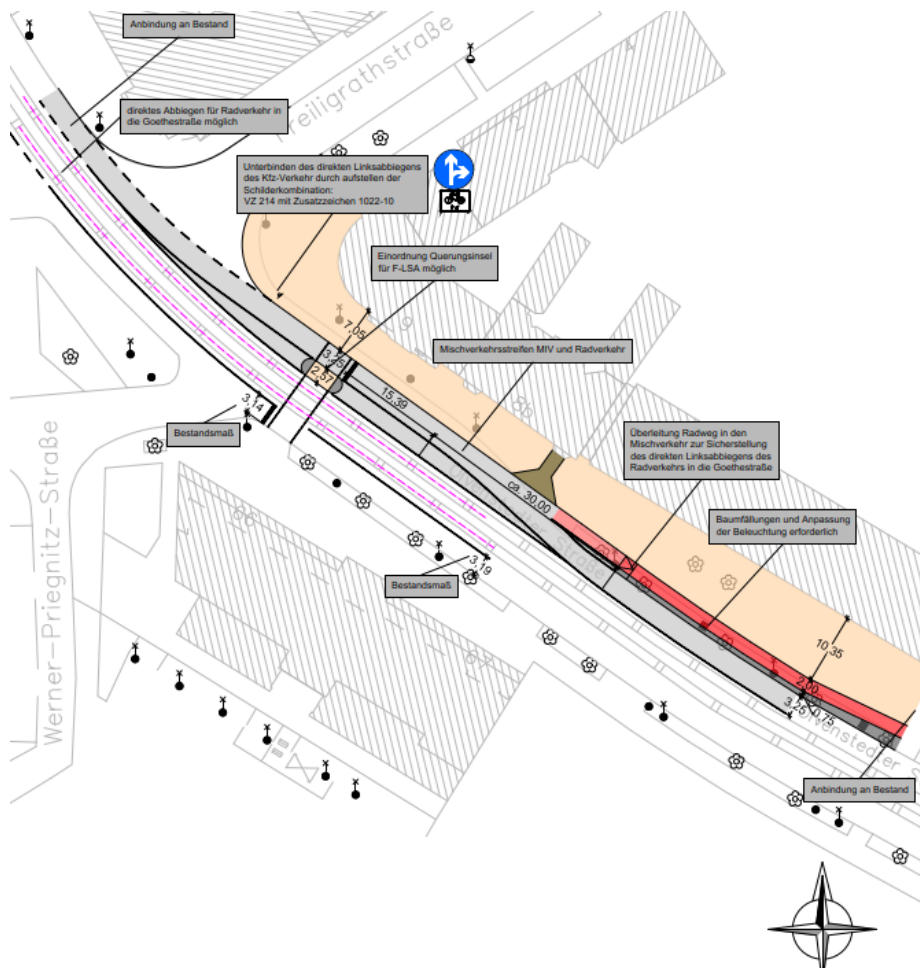


Abbildung 54: Lageplan Maßnahme I3 – direktes Linksabbiegen des Radverkehrs

Ein versetzter Freigabebeginn zwischen Straßenbahn und paralleler Spur für den Individualverkehr sorgt dafür, dass die Straßenbahn die Konfliktfläche mit den linksabbiegenden Radfahrern vor diesen erreicht.

Eine andere Möglichkeit ergibt sich durch die regelkonforme Errichtung eines Radweges auf der verbreiterten Gehwegfläche. Die Führung des Radverkehrs erfolgt im Zuge der Olvenstedter Straße über die Einmündung der Freiligrathstraße und von dort aus in die Goethestraße. Für das indirekte Linkabbiegen des Radverkehrs in die Goethestraße wird die bestehende Lichtsignalanlage genutzt.

7.4.4 Maßnahme I4

Insbesondere für die Bewältigung des höheren Fahrgastaufkommens während einer Veranstaltung in den Magdeburger Arenen östlich der Elbe wird die Maßnahme 4 entworfen. Die Maßnahme berührt die Linie 6 an der Haltestelle Arenen und die dort verkehrende Buslinie 51.

Schwerpunkt ist eine verkehrstechnische Umgestaltung der Haltestelle Arenen. Um das gleichzeitige Anhalten von Straßenbahn und Bus zu ermöglichen wird der Haltestellenbereich verlängert. Es ergibt sich eine Bahnsteiglänge von ca. 62 m wodurch in Richtung Norden eine zusätzliche Anpassung des Gehwegs notwendig ist. Ergänzend entfallen die Grünflächen und ein Baum durch die Anpassung. An der südlichen Seite der Haltestelle wird eine ähnliche Geländeangleichung für die Rampe benötigt. Dadurch, dass die Straßenbahn eine Wendemöglichkeit benötigt, wird in die stadtauswärtige Richtung eine neue zusätzliche Gleisverbindung zur ehemaligen Hauptwerkstatt (Brückfeld) geplant. Damit wird das Wenden von Straßenbahnen via Gleisdreieck möglich und die (mit niedrigen Geschwindigkeiten verbundene) Spitzbefahrung von Weichen hinfällig.

Grundsätzlich sollten in diesem Bereich alle nicht mehr benötigten Weichen im Bereich der Herrenkrugstraße ausgebaut werden und die noch benötigten Weichen mit einer Verriegelung versehen werden, damit die Streckengeschwindigkeit der Straßenbahnen erhöht werden kann.

Im Bereich der Haltestelle ist es Ziel, zur Verbesserung der Verkehrsqualität den ÖPNV-Betrieb vom Kfz-Verkehr zu separieren. Vorzugsweise erfolgt dies durch eine zeitliche Entflechtung der Verkehrsströme. Zu diesem Zweck sollte die Pförtnerung mittels Haltlicht-LSA im Bereich des Knotenpunktes Herrenkrugstraße/ Am Unterbär/ Biederitzer Straße erfolgen. Südwärts fahrende Straßenbahnen halten den Kfz-Verkehr an dieser Haltestelle entsprechend zurück. Eine Behinderung der Busse der Linie 51 ist hierdurch möglich, sie sollte durch entsprechende Fahrplangestaltung auf das Mindestmaß reduziert werden. Für den umsteigenden Fahrgast ist sie nicht relevant, da ein Umstieg im Regelfall von der Straßenbahn in den Richtung Biederitz verkehrenden Bus erfolgt.

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Maßnahmen

Die Errichtung einer Sperrfläche für den stadteinwärtigen Verkehr wird als Untervariante 2 hierzu betrachtet, der Haltestellenbereich wird diesem Fall für Kfz in stadteinwärtige Richtung gesperrt.

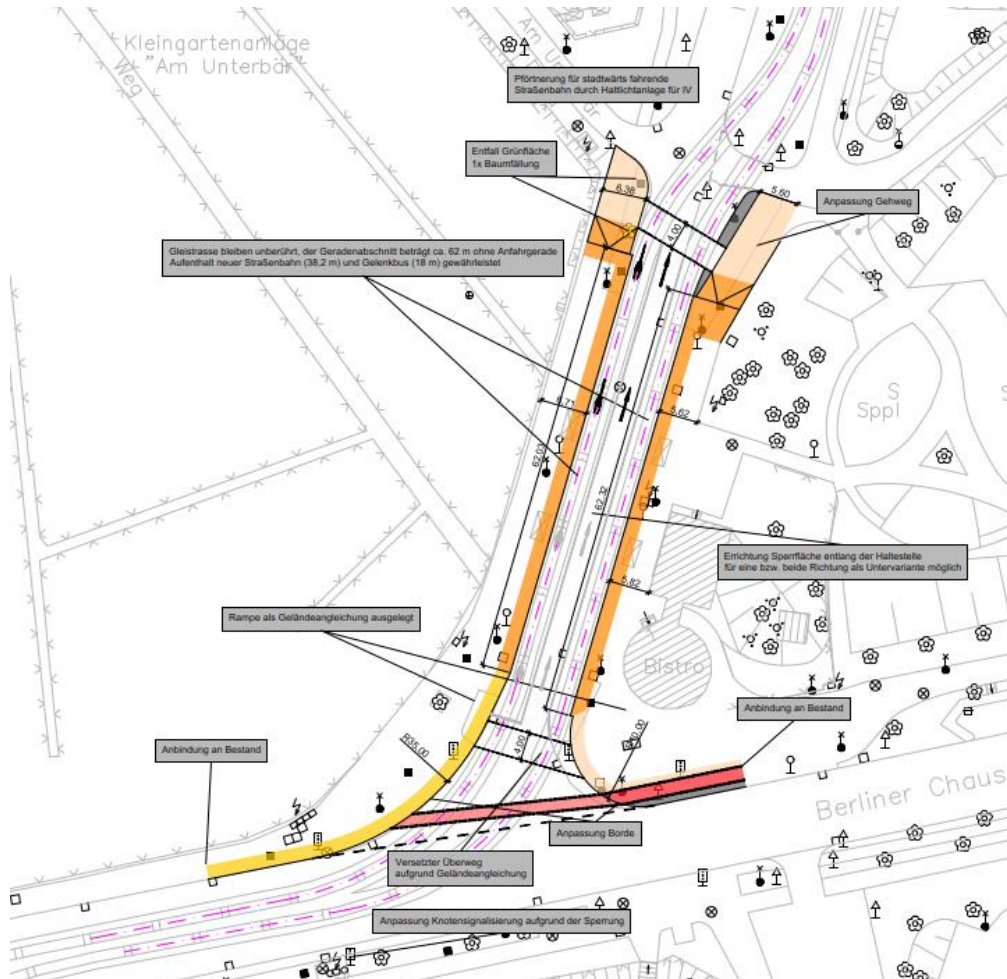


Abbildung 55: Lageplan Maßnahme I4 (Hauptvariante)

Zur Optimierung wurden mit dem Ziel der Entflechtung von MIV und ÖPNV im Bereich der Haltestellen Arenen weitere Untervarianten mit jeweils voneinander abweichender Verkehrsführung in der südlichen Herrenkrugstraße entwickelt.

Für alle Untervarianten gilt, dass für konkrete Aussagen zu resultierenden Leistungsfähigkeitsminderungen an den vorgenannten Knotenpunkten/LSA detailliertere Betrachtungen zur Verkehrsumlegung mit anschließender Leistungsfähigkeitsuntersuchung erforderlich sind. In diesem Zusammenhang sind zudem mögliche, nicht erwünschte Auswirkungen auf ÖPNV-Angebote (Linie 51 in der Georg-Heidler-Straße) zu untersuchen.

Untervariante 1 - Sperrung Herrenkrugstraße für Kfz-Verkehr zwischen Brückstraße und Am Unterbär / Biederitzer Weg

Der Bereich der Haltestellen Arenen wird für den Kfz-Verkehr in beiden Fahrtrichtungen gesperrt. Die Einfahrt in die südliche Herrenkrugstraße ist für den Kfz-Verkehr nur noch aus Richtung Jerichower Platz bis in Höhe Biederitzer Weg zulässig. Da eine Nutzung des Biederitzer Weg für den Durchgangsverkehr nicht angestrebt wird, erhält die südliche Herrenkrugstraße somit Sackgassencharakter.

Neben dem Entfall des Kfz-Verkehrs im Bereich der Haltestellen Arenen ergeben sich am Knotenpunkt bzw. an der LSA Berliner Chaussee / Brückstraße / Herrenkrugstraße (derzeit Kfz-Signalisierung über Vollscheibe in allen drei Zufahrten) folgende verkehrliche Vorteile:

- keine ein-/ausbiegende Kfz in/aus der Herrenkrugstraße
- Vereinfachung der Verkehrsabläufe am Knotenpunkt und damit Potential zur flexibleren LSA-Steuerung
- Minimierung der Konfliktfälle
- Entfall Linksabbieger Brückstraße auf Gleisbereich in Richtung Herrenkrugstraße, Minimierung ÖV-Behinderung bzw. Entfall Abräumschaltung
- Verminderte Unterbrechung Verkehrsfluss Brückstraße – Berliner Chaussee, Unterbrechung nur infolge von Straßenbahnfahrten und Fußgängeranforderungen

Nachteilig ist die sich ergebende Verkehrsumlegung/-leitung der beiden Kfz-Richtungen aus der Herrenkrugstraße. Durch die entsprechend erhöhten Verkehrsmengen sind insbesondere an den nachfolgend aufgeführten Knotenpunkten/LSA zusätzliche Verkehrsbelastungen in Richtung der Verkehrsumleitung zu erwarten:

- KP/LSA Herrenkrugstraße / Jerichower Straße B1 (Jerichower Platz)
- KP/LSA Jerichower Straße B1 / Georg-Heidler-Straße (Abbiegeverkehr)
- KP/LSA Georg-Heidler-Straße / Berliner Chaussee (Abbiegeverkehr)
- KP/LSA Berliner Chaussee - Brückstraße

Untervariante 2 - Sperrung Herrenkrugstraße für Kfz-Verkehr Richtung Süd (stadtwärts) zwischen Brückstraße und Am Unterbär / Biederitzer Weg (Kfz-Verkehr in Richtung Nord verbleibt)

Der Bereich der Haltestellen Arenen wird nur für den Kfz-Verkehr in Richtung Süden gesperrt. Die Einfahrt des stadteinwärtigen Kfz-Verkehrs aus Richtung Jerichower Platz in die südliche Herrenkrugstraße ist für den Kfz-Verkehr resultierend nur noch bis in Höhe Biederitzer Weg zulässig. Da eine Nutzung des Biederitzer Weg für den Durchgangsverkehr nicht angestrebt wird, erhält die südliche Herrenkrugstraße für den von Norden einfließenden Kfz-Verkehr Sackgassencharakter. Weiterhin zulässig ist der Kfz-Verkehr aus der Berliner Chaussee und der Brückstraße in die Herrenkrugstraße.

Für den Knotenpunkt bzw. die LSA Berliner Chaussee / Brückstraße / Herrenkrugstraße (derzeit Kfz-Signalisierung über Vollscheibe in allen drei Zufahrten) ergeben sich mit dem Entfall des Kfz-Zuflusses Herrenkrugstraße folgende verkehrliche Vorteile:

- keine ausbiegende Kfz aus der Herrenkrugstraße
- Vereinfachung der Verkehrsabläufe am Knotenpunkt und damit Potential zur flexibleren LSA-Steuerung
- Minimierung der Konfliktfälle
- Verminderte Unterbrechung Verkehrsfluss Brückstraße – Berliner Chaussee durch entfallende Kfz-Zuflusssignalisierung in der Herrenkrugstraße, Unterbrechung nur infolge von Straßenbahnfahrten und Fußgängeranforderungen

Negativ zu bewerten ist am Knotenpunkt der Verbleib der Kfz-Linksabbieger Brückstraße in Richtung Herrenkrugstraße auf dem Richtungsgleis. Wie im Bestand ergibt sich daraus das Erfordernis einer erweiterten Abräumschaltung bei gleichgerichteter Straßenbahnannäherung, woraus wiederum zusätzliche Sperrzeiten für den Kfz-Verkehr in der Zufahrt Berliner Chaussee resultieren.

Mit der richtungsspezifischen Sperrung der südlichen Herrenkrugstraße ergeben sich infolge der Verkehrsumlegung/-leitung insbesondere an den nachfolgend aufgeführten Knotenpunkten/LSA zusätzliche Verkehrsbelastungen, durch erhöhte Abbiegeverkehrsströme in Richtung der Verkehrsumleitung:

- KP/LSA Herrenkrugstraße / Jerichower Straße B1 (Jerichower Platz)

- KP/LSA Jerichower Straße B1 / Georg-Heidler-Straße (Rechtsabbiegeverkehr)
- KP/LSA Georg-Heidler-Straße / Berliner Chaussee (Rechtsabbiegeverkehr)
- KP/LSA Berliner Chaussee - Brückstraße

Untervariante 3 - Sperrung Herrenkrugstraße für Kfz-Verkehr Richtung Nord (landwärts) zwischen Brückstraße und Am Unterbär / Biederitzer Weg (Kfz-Verkehr Richtung Süd verbleibt)

Der Bereich der Haltestellen Arenen wird nur für den Kfz-Verkehr in Richtung Norden gesperrt. Die Zufahrt aus der Berliner Chaussee und der Brückstraße in die Herrenkrugstraße entfällt. Zulässig ist der Kfz-Verkehr aus Richtung Jerichower Platz in Richtung Berliner Chaussee und Brückstraße.

Für den Knotenpunkt bzw. die LSA Berliner Chaussee / Brückstraße / Herrenkrugstraße (derzeit Kfz-Signalisierung über Vollscheibe in allen drei Zufahrten) ergeben sich mit dem Entfall der Kfz-Knotenabfahrt Herrenkrugstraße folgende verkehrliche Vorteile:

- keine abbiegenden Kfz aus der Brückstraße in Richtung Herrenkrugstraße
- Entfall der Linksabbieger im Gleisbereich Brückstraße, Entfall Abräumschaltung bei gleichgerichteter Straßenbahnannäherung
- Vereinfachung der Verkehrsabläufe am Knotenpunkt und damit Potential zur flexibleren LSA-Steuerung
- Minimierung der Konfliktfälle
- Verminderte Unterbrechung Verkehrsfluss Brückstraße – Berliner Chaussee durch Entfall Abräumschaltung

Mit der richtungsspezifischen Sperrung der südlichen Herrenkrugstraße ergeben sich infolge der Verkehrsumlegung/-leitung insbesondere an den nachfolgend aufgeführten Knotenpunkten/LSA zusätzliche Verkehrsbelastungen, durch erhöhte Abbiegeverkehrsströme in Richtung der Verkehrsumleitung (überwiegend Rechtsabbieger):

- KP/LSA Herrenkrugstraße / Jerichower Straße B1 (Jerichower Platz)
- KP/LSA Jerichower Straße B1 / Georg-Heidler-Straße (Linksabbiegeverkehr)
- KP/LSA Georg-Heidler-Straße / Berliner Chaussee (Linksabbiegeverkehr)
- KP/LSA Berliner Chaussee - Brückstraße

Die Maßnahme I4, insbesondere die Untervarianten 1-3, ist eine rein konzeptionelle Maßnahme mit weiterem Prüfbedarf.

7.4.5 Maßnahmen I5

Die Maßnahme I5 betrifft die Linien 1 und 9 entlang der Lübecker Straße zwischen der Kastanienstraße und der Haldensleber Straße. Im Bestand wird die Straßenbahn in Mittellage geführt. Neben den untermaßigen Inselbahnsteigen (Breite < 3,18 m) verläuft je ein Kfz-Fahrstreifen in stadtein- und stadtauswärtiger Richtung. Beide Fahrstreifen sind ebenfalls untermaßig (Breite < 3,00 m). Das Ziel für diesen Bereich der Lübecker Straße ist die Errichtung einer geeigneten Doppelhaltestelle mit Sperrung für den MIV in beiden Richtungen.

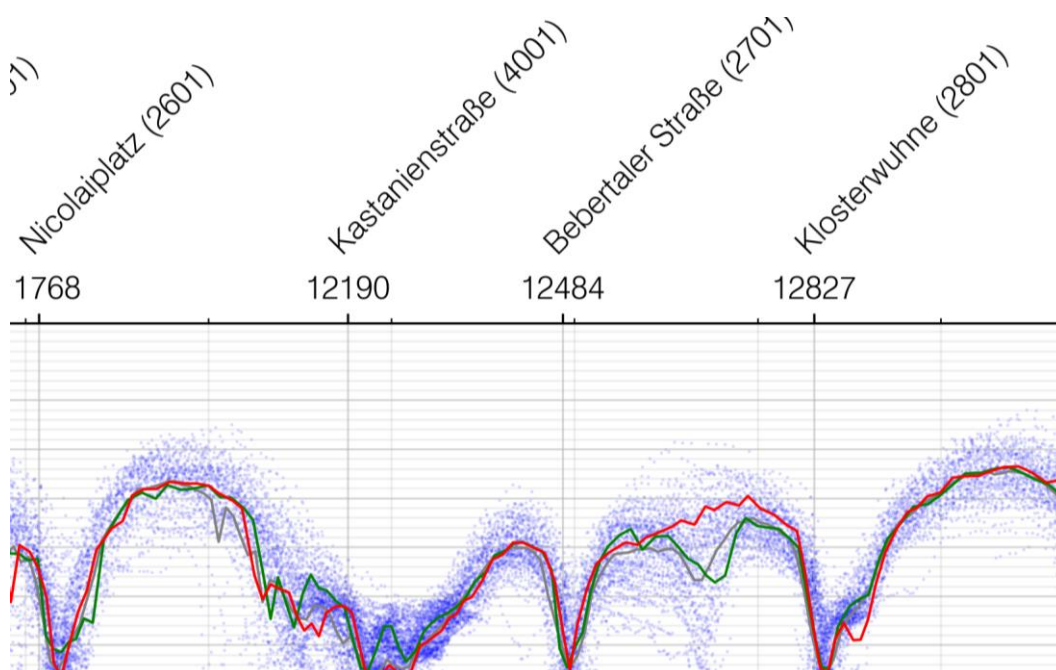


Abbildung 56: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Nicolaiplatz und Kastanienstraße

Auf der östlichen Seite der Lübecker Straße befinden sich verschiedene Geschäfte und Wohnhäuser, deren Erreichbarkeit auch bei der Sperrung der Lübecker Straße für den MIV zwischen der Kastanienstraße und der Haldensleber Straße gewährleistet sein muss.

Aus diesem Grund wird anschließend an den östlichen Gehweg, der aufgrund seiner Funktion eine Breite von ca. 6,50 m aufweist, eine Nebenfahrbahn inklusive Lieferzonen errichtet. Die Befahrung der Nebenfahrbahn für den Anlieger-, Liefer- und Radverkehr ist nur in stadteinwärtiger Richtung erlaubt. Nördlich der Alexanderstraße ist eine Befahrung ausschließlich für den Radverkehr erlaubt. Der restliche Verkehr wird in die Alexanderstraße geführt. Der östliche Gehweg, die Nebenfahrbahn und der östliche Haltestellenbereich befinden sich auf derselben Höhe, abgetrennt mit 3 cm Borden.

Eine Befahrung des Haltestellenbereiches ist möglich aber nur für den ÖPNV vorgesehen und muss entsprechend ausgeschildert werden.

Auf der westlichen Seite in stadtauswärtiger Richtung wird der Radverkehr zusammen mit dem Fußverkehr auf einem gemeinsamen Geh- und Radweg geführt. Der bestehende Grünstreifen mit Altbaumbestand zwischen Gehweg und Haltestelle bleibt erhalten.

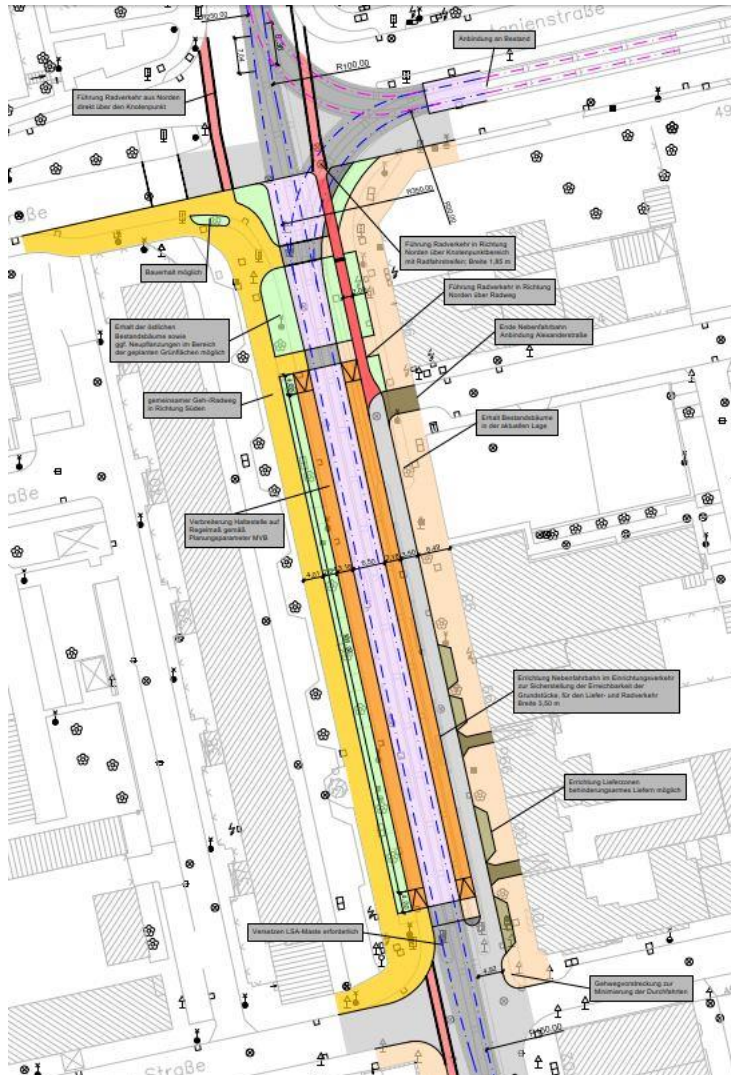


Abbildung 57: Lageplan Maßnahme 15

Die Maßnahme I5 ist eine rein konzeptionelle Maßnahme mit weiterem Prüfbedarf.

7.4.6 Maßnahme I6

Die Maßnahme I6 betrifft die Linie 10 entlang der Halberstädter Straße zwischen dem Südring und der Brunnenstraße. Im Bestand wird die Straßenbahn in Mittellage geführt. In stadtauswärtiger Richtung auf einem besonderen Bahnkörper, der durch Markierungen gekennzeichnet ist. In stadteinwärtiger Richtung wird die Straßenbahn auf dem linken der beiden Kfz-Fahrbahnen geführt. Der rechte Fahrbahn wird im Bestand hauptsächlich

zum Parken der Kfz genutzt. Dadurch kommt es zu Behinderungen der Straßenbahn, da Fahrzeuge unmittelbar nach dem Knotenpunkt vom rechten in den linken Fahrstreifen wechseln. Im untenstehenden Diagramm ist das durch eine Stagnation der Geschwindigkeit der Straßenbahn kurz nach der Haltestelle Südring in stadteinwärtiger Richtung zu erkennen.

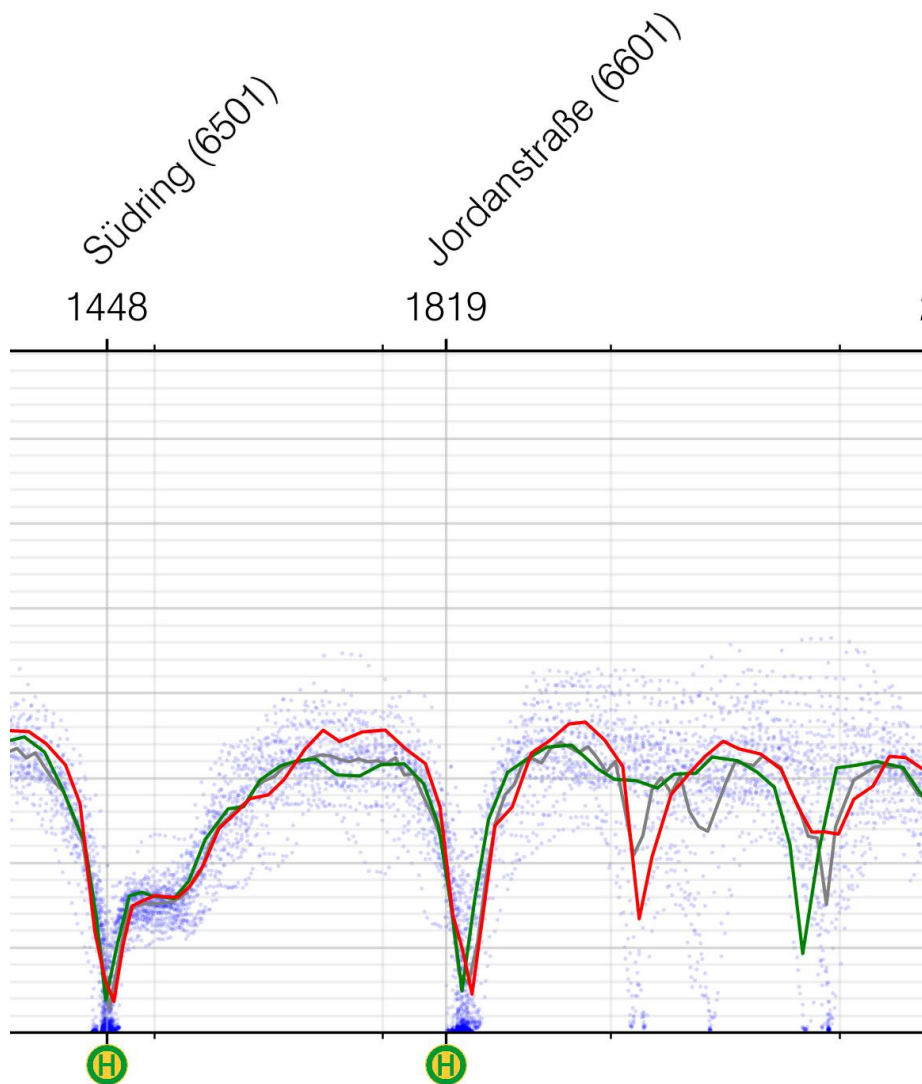


Abbildung 58: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Südring und Jordanstraße

Die Vergrößerung der Sperrfläche bis nördlich der Einmündung der Brunnerstraße und dem damit einhergehenden Parkverbot auf dem rechten Fahrstreifen minimiert die Behinderungen der Straßenbahn durch vorausfahrende oder die Spur wechselnde Kfz. Die Verkehrsbelastung in der Spitzenstunde von ca. 380 – 440 Kfz/h erlaubt nach RAS 06 den Entfall des zweiten Fahrstreifens. Zusammen mit der Anpassung der Signalisierung am Knotenpunkt Südring/Halberstädter Straße kann dafür Sorge getragen werden, dass die

Straßenbahn als Pulkführer in den Abschnitt nördlich des Südringes einfährt und die Behinderungen durch den Kfz-Verkehr so weiter minimiert werden können.

Zur Kompensation der entfallenden Längsparkstände im Zuge der Halberstädter Straße wird die Nutzung des Parkplatzes der Spielhalle vorgeschlagen.

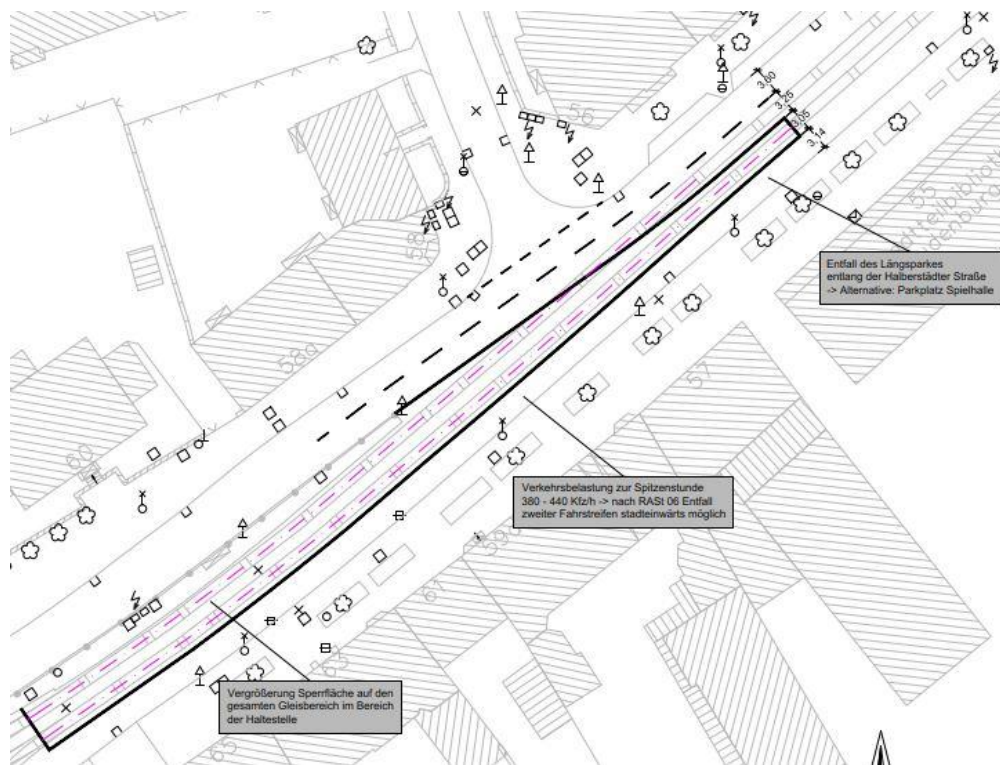


Abbildung 59: Lageplan Maßnahme I6

7.4.7 Maßnahme I7

Die Maßnahme I7 betrifft die Linie 10 entlang der Halberstädter Straße in stadteinwärtiger Richtung im Bereich der Magdeburger Ringzufahrt. Im Bestand wird die Straßenbahn in beiden Richtungen in der Mittellage gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt. Durch den linksabbiegenden Verkehrsstrom von der Halberstädter Straße auf den Magdeburger Ring in Richtung der BAB 2 wird die Straßenbahn behindert. Diese Behinderungen lassen sich im entsprechenden Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der Linie 10 Trasse 604 erkennen. Zwischen den Haltestellen Jordanstraße und Halberstädter Straße/Leipziger Straße gibt es zwei Einbrüche in der Geschwindigkeit der Straßenbahn. Im entsprechenden Geschwindigkeits-Weg-Diagramm in entgegengesetzter, stadtauswärtiger Richtung ist nur eine Absenkung der Geschwindigkeit der Straßenbahn im Knotenpunktbereich Halberstädter Straße/Sudenburger Wuhne erkennbar. Daraus lässt sich schlussfolgern,

dass die Linksabbieger, die sich im Gleisbereich aufstellen, der Hauptgrund für den entsprechenden Abfall der Geschwindigkeit sind.

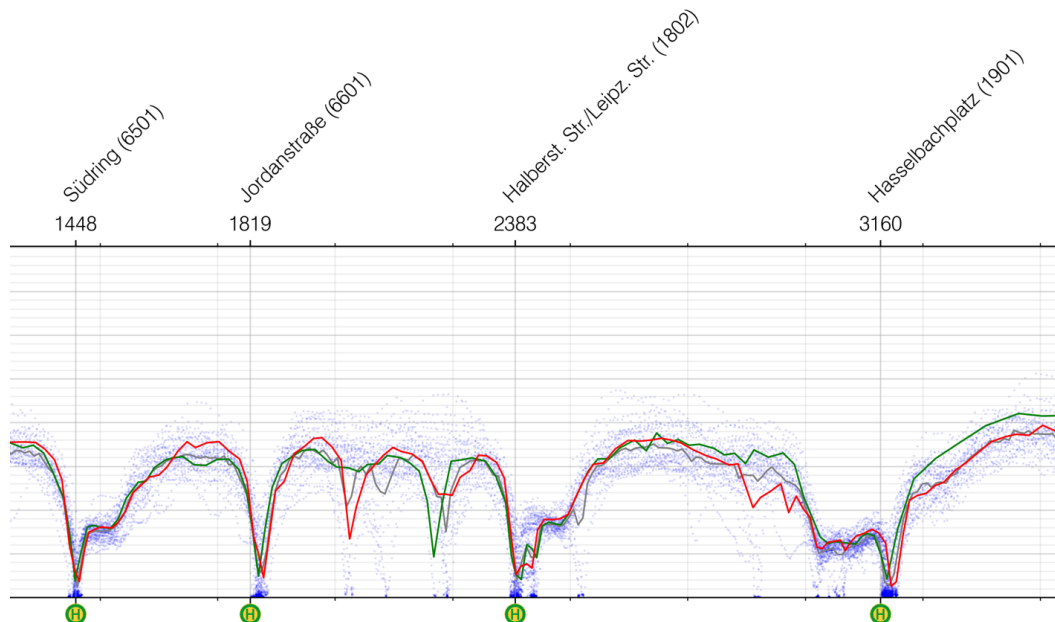


Abbildung 60: Geschwindigkeits-Weg-Diagramm zwischen Jordanstraße und Halberstädter Straße / Leipziger Straße

Die Verziehung des stadteinwärtigen Gleises in die Seitenlage (Geradeausfahrstreifen) liegt in der ersten Variante unmittelbar vor dem Knotenpunkt Halberstädter Straße/Hellestraße. Dadurch wird die Straßenbahn nach dem Knotenpunkt zusammen mit dem Geradeausverkehr geführt. Bei einem Ausfall der LSA an diesem Knotenpunkt entsteht jedoch ein hohes Konfliktpotential aufgrund dessen, dass die Straßenbahn von der Mittellage in die Seitenlage geführt wird. Des Weiteren muss die Haltlinie des Geradeaus-/Rechtsabbiegestreifens um ca. 10 m in stadtauswärtige Richtung versetzt werden, damit die Straßenbahn profilfrei an wartenden Kfz vorbeifahren kann. Das Abrücken der Haltlinie verlängert die Räumzeiten und führt somit ggf. zu einer geringen Senkung der Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes. Der im weiteren Verlauf der Halberstädter Straße bereits im Bestand vorhandenen Linksabbiegestreifen auf den Magdeburger Ring wird beibehalten. Dieser liegt jedoch in der vorliegenden Variante zwischen den Gleisen. Dies führt zu einer signifikanten Reduzierung der Behinderungen der Straßenbahn durch den MIV. Zusätzlich muss durch die Optimierung der Signalisierung am Knotenpunkt Halberstädter Straße/Hellestraße Sorge getragen werden, dass die Straßenbahn als Pulkführer in den sich nördlich der Hellestraße befindenden Streckenabschnitt einfahren kann. Auch diese Maßnahme führt zu einer Reduzierung der Behinderungen der Straßenbahn durch den MIV. Unmittelbar nach der Ringzufahrt wird die Straßenbahn wieder in die Mittellage geführt, um den Eingriff in den Verkehrsraum zu minimieren. Der

separate Linksabbiegestreifen in die Sudenburger Wuhne entfällt. Dadurch kann es zu Behinderungen innerhalb des MIV durch abbiegende Fahrzeuge kommen. In dieser Variante gibt es für den stadteinwärtigen Radverkehr keine separate Radverkehrsanlage. Der Radverkehr wird ab dem Knotenpunkt Halberstädter Straße/Hellestraße zusammen mit dem Fußverkehr geführt (analog Bestand).

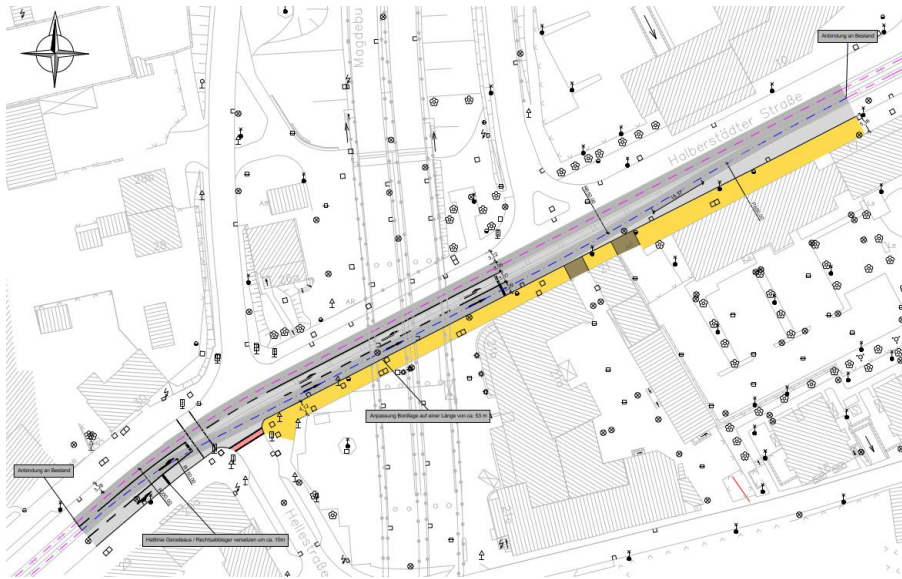


Abbildung 61: Lageplan Maßnahme I7 Variante 1

Um die in Variante 1 beschriebenen Konflikte zu lösen wurde eine zweite Variante entwickelt. In dieser wird der Linksabbiegestreifen in Richtung des Magdeburger Rings ebenfalls zwischen dem stadtein- und stadtauswärtigen Gleis geführt. Der Konfliktbereich am Knotenpunkt Halberstädter Straße/Hellestraße wird gelöst, in dem die Verschwenkung des stadteinwärtigen Gleises bereits im Knotenpunktbereich Halberstädter Straße/Jordanstraße/Buckauer Straße erfolgt. Durch diese muss jedoch die Haltestelle Jordanstraße ca. 15 m in stadteinwärtige Richtung verschoben werden, um auch die Barrierefreiheit sicherzustellen. Des Weiteren erfolgt die Rückverziehung des stadteinwärtigen Gleises nach dem Knotenpunkt Halberstädter Straße/Sudenburger Wuhne und bindet an die Planung/Verkehrsuntersuchung der BERNARD Gruppe ZT GmbH an (Stand Lageplan: 05.06.2023, Stand Verkehrsuntersuchung: 16.08.2024). Durch diese Maßnahmen und eine Optimierung der Signalisierung am Knotenpunkt Halberstädter Straße/Jordanstraße/Buckauer Straße, wodurch die Straßenbahn als Pulkführer in den nachfolgenden Streckenabschnitt einfahren kann, wird eine Reduzierung der Behinderungen der Straßenbahn erreicht. Der Eingriff in den Verkehrsraum ist in der Variante 2 deutlich umfangreicher als in der ersten Variante. So werden in Variante 2 auch beidseitige, separate Radverkehrsanlagen errichtet. Ausnahme bildet hier der Abschnitt der Unterführung des Magdeburger Rings in stadtauswärtiger Richtung und der Abschnitt nördlich des Knotenpunktes Halberstädter Straße/Hellestraße und Halberstädter

Straße/Sudenburger Wuhne, wo lediglich ein Angebotsraum für den Radverkehr vorgehalten werden kann.



Abbildung 62: Lageplan Maßnahme I7 Variante 2

Die Maßnahme I7 ist eine rein konzeptionelle Maßnahme mit weiterem Prüfbedarf.

7.4.8 Stellungnahme SPA Magdeburg zu den Maßnahmen I1 bis I7

Im Nachgang der Maßnahmenerörterung nahm der Fachbereich Stadtplanung und Vermessung der Landeshauptstadt Magdeburg Stellung zu den dargestellten Infrastrukturmaßnahmen. Diese Stellungnahme umfasst Prämissen zum weiteren Umgang mit den Maßnahmenvorschlägen, sie ist nachfolgend dokumentiert:

- Maßnahme I1: Maßnahme ist prioritär umzusetzen
Im Ausnahmefall muss bei Sperrung der B71 (Brücke) auch geradeaus gefahren werden können (Flexibilität bei baulichen Einrichtungen)
- Maßnahme I2: Baumfällungen sind zu vermeiden. Genehmigung wird derzeit als unrealistisch eingestuft
- Maßnahme I3: Linksabbieger für Radverkehr ist zu gewährleisten.
- Maßnahme I4 Untervarianten: Es ist zu klären, welche Auswirkungen eine Sperrung des MIV in Richtung Süden (auch bei Veranstaltungen) hätte. Bei Abwägung ist die Höhe der Behinderungszeit zu berücksichtigen

(erfahrungsgemäß keine hohen Verlustzeiten); Klärung, ob diese Verkehrsanlage nach BO Strab zulässig ist; Eine Sperrung der Herrenkrugstraße in beiden Fahrtrichtungen für den MIV erscheint unverhältnismäßig. Im Alltagsverkehr sind in Fahrtrichtung Norden keine nennenswerten Behinderungen des ÖPNV durch den MIV bekannt. Welche Vorteile entstehen hierdurch? Klärung inwieweit hier ein Problem besteht.

- Maßnahme I5: Die Auswirkungen durch Sperrung für MIV ist zu prüfen (Schleichverkehre in Wohngebieten vermeiden). Attraktive Führung des Radverkehrs wichtig. Es muss eine gesamtheitliche integrierte Betrachtung erfolgen.
- Maßnahme I6: Der Entfall von Parkplätzen ist ggf. kritisch. Der Nutzen ist zu quantifizieren (bspw. Fahrzeitgewinne). An dieser Stelle befindet sich eine Post-Filiale. Diese erhält Lieferungen (5-10 Minuten). Verlagerung nicht möglich.
- Maßnahme I7 Variante 1: Vorteile genau beschreiben. Was soll mit dieser Varianten bezweckt werden.
- Maßnahme I7 Variante 2: Sehr hoher Aufwand. Prüfung von normgerechten Radverkehrsanlagen. Probleme mit den Linksabbiegern sind nicht bekannt. Erläuterung zur Problemlage und Vorteile durch Maßnahme.

Die Anmerkungen wurden vollständig umgesetzt, der vorliegende Bericht reflektiert die revidierte Fassung (also mit Berücksichtigung der Anmerkungen).

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Maßnahmenarbeit in der Tiefe einer Machbarkeitsuntersuchung erfolgte und in jeweils fortfolgenden Planungsprozessen (Leistungsphasen 2 ff. gemäß HOAI) vertiefenden Betrachtungen bedürfen.

7.4.9 Maßnahme A1 (Festschreibung C-ITS als Zielsystem)

Kooperative intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) ermöglichen den bidirektionalen Informationsaustausch über digitale Kommunikationstechnologien sowohl zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern (V2V) als auch von Fahrzeugen zur Verkehrsinfrastruktur (V2X). Der Austausch von aktuellen Verkehrsinformationen und Gefahrenmeldungen im unmittelbaren verkehrlichen Umfeld bringt das Potenzial mit sich, die Anzahl und damit auch die Wahrscheinlichkeit von Verkehrsunfällen signifikant zu verringern.

C-ITS verfügt über mehrere interne Betriebsmodi, die als Rückfallebene dienen können – es kommt nicht zum Ausfall. Bei einem Defekt einer RSU können benachbarte RSUs aktiviert werden, um die Nachrichtенbearbeitung und -weiterleitung zu übernehmen, C-ITS bietet zudem sehr gute Möglichkeiten zur Ferndiagnose

Da weder die Infrastruktur noch die Fahrzeuge der MVB derzeit über eine eingebaute Ausrüstung für den C-ITS-Funk verfügen, müssen On-Board-Units und Road-Side-Units beschafft und entsprechend in den Fahrzeugen und entlang der Strecke installiert werden.

Hierfür kann ein Förderantrag gestellt werden (siehe Maßnahme A3).

7.4.10 Maßnahme A2 (Etablierung Mobilfunk als Rückfallebene)

Die ÖPNV-Priorisierung mithilfe von öffentlichem bietet sich für kleinere Verkehrsunternehmen an, da die bereits vorhandene Mobilfunk-Infrastruktur verwendet werden kann. Die Datenübertragung erfolgt als IP-Datentelegramm – das kann direkt an die LSA oder über eine zentrale Serverinstanz erfolgen. Ein Mobilfunksystem besitzt alternative Übertragungsebenen innerhalb des Systems, um bei Störungen (des C-ITS) bessere Kommunikationszuverlässigkeit zu garantieren.

Bei Störungen im 4G Netz kann in das 2G Netz gewechselt werden um weiterhin eine ÖPNV-Bevorrechtigung zu realisieren, Latenzen und Zuverlässigkeit sind abhängig vom Mobilfunkstandard

7.4.11 Maßnahme A3 (Förderantrag)

Die Einführung von C-ITS-Systemen wird derzeit durch verschiedene Förderinstrumente unterstützt, eine Förderung ist teilweise sogar in Kombination der folgenden Förderinstrumente möglich:

- Förderprogramm "Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme" des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
- EU: Connecting Europe Facility (CEF)
- Bundesförderung für Forschungs- und Entwicklungsprojekte
- EFRE-Mittel

Nachfolgend werden wesentliche Eckpunkte der jeweiligen Förderprogramme skizziert:

- Förderprogramm "Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme" des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
 - umfasst die Einführung von C-ITS zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und Effizienz
 - Möglichkeit, eine Förderung von 65% bis 80% der Investitionskosten
- EU: Connecting Europe Facility (CEF)
 - fördert die Entwicklung hochwertiger, nachhaltiger und effizienter transeuropäischer Netze in den Bereichen Verkehr, Energie und digitale Dienste
- Bundesförderung für Forschungs- und Entwicklungsprojekte
 - Ziel ist es, innovative Mobilitätslösungen zu entwickeln und die Digitalisierung des Verkehrssektors voranzutreiben.
- EFRE-Mittel

- Durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) können möglicherweise Fördermittel über das Bundesland Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt werden.

7.4.12 Maßnahme A4 (Leitstelle Stufe 1)

Die Maßnahme A4 umfasst die technische Kopplung der verschiedenen Magdeburger Leitstellensysteme. Folgende Schritte sind hierfür maßgebend:

- Planung der Umsetzung inklusive Herbeiführung der strategisch übergeordneten Entscheidung
- Beantragung von Fördermitteln, Sicherstellung der Finanzierung
- Analyse der Schnittstellen und Systemarchitekturen und möglichen Schnittstellen, Beschreibung der Machbarkeit, Erstellung der Ausschreibungsunterlagen sowie Ausschreibung der technischen Kopplung
- Umsetzung der technischen Kopplung inklusive Abnahme

Ziel der Maßnahme ist die Verbesserung des Datenaustauschs zwischen den Leitstellen Tunnel, MVB sowie Verkehrsmanagement und damit die Schaffung einer einheitlichen Entscheidungsgrundlage zwischen den Verkehrsträgern des Individualverkehrs und des Öffentlichen Verkehrs in Magdeburg. Damit wird eine konsistente Steuerung des Verkehrs auf Basis identischer Datengrundlage und hinsichtlich verkehrspolitischer Zielstellungen möglich. Die zusätzliche Einbindung von BOS kann zusätzlich zu abgestimmten Managementstrategien im Verkehr und einer erhöhten Sicherheit führen.

7.4.13 Maßnahme A5 (Leitstelle Stufe 2)

Gegenstand der Maßnahme A5 ist basierend auf der vollständigen Umsetzung der Maßnahme A4 die räumlich-physische Zusammenführung der Leitstellen. Damit verbunden sind folgende Schritte:

- Analyse und Suche nach geeigneten Räumlichkeiten
- Beantragung von Fördermitteln, Sicherstellung der Finanzierung
- Erstellen des spezifischen physischen Leitstellenkonzepts inklusive
 - Analyse der Anforderungen, der Prozessabläufe, Synergien
 - Analyse von Personaleinsatz, Fortbildung und Schulungsbedarf
- Umsetzung der physischen Zusammenlegung durch Erstellen der Ausschreibungsunterlagen, Ausschreibung der Leistung, Begleitung bei der Umsetzung und Abnahme inkl. Überführung in den Produktivbetrieb

Die mit der Maßnahme A5 verbundenen Zielstellungen lauten wie folgt:

- direkte Abstimmungen führen im Kontext der gemeinsamen Prozesse (siehe hierzu auch Maßnahme A4) zu einer gesamtheitlich konsistenten Steuerung der Mobilität im Individualverkehr und Öffentlichen Verkehr.
- konsistente Steuerung des Verkehrs auf Basis identischer Entscheidungen und hinsichtlich verkehrspolitischer Zielstellungen

7.4.14 Maßnahme A6 (Qualitätserfassung an Lichtsignalanlagen)

Eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung der Verkehrsqualitäten von im System abgebildeten Lichtsignalanlagen ist wesentliche Grundlage

- für die weiterführende Analyse der aktuellen Verkehrssituation in der Landeshauptstadt Magdeburg
- für die Planung, Optimierung und Validierung von LSA-Steuerungen sowie
- als eine fundierte Grundlage für die Verbesserung der ÖPNV-Qualität bzw. auch der Verkehrsqualitäten anderer Verkehrsteilnehmer.

In diesem Projekt wurde das System urbic[®] eingesetzt. Es ermöglicht bspw. vorher-/nachher Vergleiche bei Änderungen an den Programmlogiken der Steuerungen für die Beschleunigungsmaßnahmen und dient der Überwachung der neu zu integrierenden Meldesysteme bis zur Produktivsetzung.

Das System urbic[®] basiert auf der täglichen Bereitstellung der Telegrammdateien (Export als *.pu2 Datei) aus dem Verkehrsrechner der Stadt Magdeburg.

7.4.15 Maßnahme A7 (verstärkte Nutzung LIVEtsp)

Die Definition neuer zusätzlicher Meldepunkte und Lageveränderungen vorhandener Meldepunkte sind auf Basis der aktuell verwendeten Funk-Bake-Technik wegen der fehlenden Hardwareverfügbarkeit und der fehlenden Zukunftsfähigkeit der Technik nicht sinnvoll bzw. auch nur begrenzt möglich. Nach Aussage des Fachdienstes Verkehrstechnik und der MVB laufen derzeit Versuche an einem Beispielknoten, über das RBL-System der Fahrzeuge sogenannte LIVEtsp -Meldepunkte zu definieren und zu versorgen. Sobald sich das Fahrzeug räumlich in einem bestimmten Gleisabschnitt befindet, kann das RBL-System ein R09-Funk-Telegramm an ein definiertes LSA-Steuergerät absetzen. Auf diesem Wege können ohne zusätzliche Hardware weitere Meldepunkte definiert und genutzt werden. Problematisch ist für bestimmte Fälle ggf. die Latenzzeit zwischen Auslösung des Impulses und dem Eintreffen an der Lichtsignalsteuerung. Für bestimmte Meldepunkte ist dies jedoch nicht problematisch. Unter anderem kann damit sinnvoll eine einfache und schnelle Rückfallebene für die Freigabeanforderung aus dem Führerstand realisiert werden, ohne dass das Fahrpersonal bei Ausfall einer automatischen Anforderung aussteigen und den Schlüsselschalter bedienen muss. Nach Aussage der Stadt Magdeburg befindet sich dieses System in der Testphase und kann zeitnah für die drei Knoten genutzt werden. Die

Definition solcher zusätzlicher Meldepunkte und die Verarbeitung in den Signalprogrammen ist grundsätzlich weiter verwendbar bei einer späteren sukzessiven Umsetzung einer digitalen Anmeldetechnik.

7.4.16 Maßnahme A8 (Erweiterung Modulbibliothek)

Diese Maßnahme betrifft eine Erweiterung der Modulbibliothek „Standard MD“ zur Programmierung der Steuergeräte. Ab den Steuergeräten der YUNEX-Serie C900 ist eine Erweiterung der Bibliothek um die Steuerungsebenen „VOR-SCHALTEN“ und „NACH-SCHALTEN“ mit einer gezielten Einflussnahme auf die Schaltzyklen und Phasenübergänge möglich. Weiterhin ist die Integration einer automatisierten Zwischenzeitprüfung in den Funktionen zum Start eines Phasenübergangs sinnvoll. Auf dieser Basis kann in der Logik eine punktgenauere und flexiblere Reaktion auf die ÖPNV-Anforderungen bei gleichzeitiger Vereinfachung der Logiken umgesetzt werden. Es wird empfohlen, diese Verfahren in die Standardbibliothek aufzunehmen.

7.4.17 Maßnahme L1 (LSA 143)

Die Maßnahme L1 umfasst kurzfristige die Umsetzung einer optimierten Steuerungslogik am Knoten Lübecker Straße / Kastanienstraße (LSA 143).



Abbildung 63: Haltestelle Kastanienstraße / Situation der ÖPNV-Anmeldung

Aktuell befindet sich am Knoten für ÖPNV-Fahrzeuge aus Richtung Süden eine Anmeldebake vor dem Haltestellenbereich Kastanienstraße, an der sich sowohl Busse als auch Straßenbahnen mit einer Richtungsanforderung anmelden (schwarzer Punkt in der Abbildung bezeichnet mit „Anmeldung deaktiviert“). Aufgrund der Tatsache, dass Busse und Straßenbahnen auf dem Gleis in zufälliger Reihenfolge eintreffen und im Haltestellenbe-

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Maßnahmen

reich einen Fahrgastwechsel realisieren müssen, ist eine punktgenaue Schätzung des Eintreffens eines bestimmten Fahrzeugs mit einer bestimmten Richtungsanforderung im Moment nicht möglich. Die Streuung der Haltestellenaufenthaltszeiten und die gegenseitigen Behinderungen in den Haltestellen sind einfach zu groß. Aktuell schaltet die Lichtsignalanlage deshalb alle ÖV-Richtungen systematisch nacheinander.

Abhilfe kann eine Verschiebung des Anmeldepunktes hinter den Haltestellenbereich (in der Grafik mit „Anmeldung neu“ bezeichnet) schaffen. Hierdurch kann der Lichtsignalanlage eine sichere Information darüber gegeben werden, welche Richtung für den ÖPNV als nächstes benötigt wird und dass das entsprechende Fahrzeug abfahrtsbereit ist. Unter Berücksichtigung dieser Modifikation der Anmeldung wurde die Steuerungslogik auf Basis der Modulbibliothek „Standard MD“ neu programmiert, um zielgerichtet die erforderliche ÖPNV-Signalgruppe in der korrekten Reihenfolge freizugeben. Auf die Einbindung des Knotens in die Kfz-Koordinierung wurde zugunsten der ÖPNV-Priorisierung verzichtet. Zudem läuft der Knoten mit einer dynamischen flexiblen Umlaufzeit, die sich abhängig von den Kfz- und den ÖPNV-Anforderungen situationsabhängig einstellt.

Die Maßnahme wurde mithilfe einer Mikrosimulation getestet und bewertet. Die Ergebnisse (mittlere Verlustzeiten) für die verschiedenen Verkehrsarten finden sich als Gegenüberstellung von vorher („B“ wie Bestand) und nachher („S“ wie „Standard MD“) in der folgenden Abbildung 64.

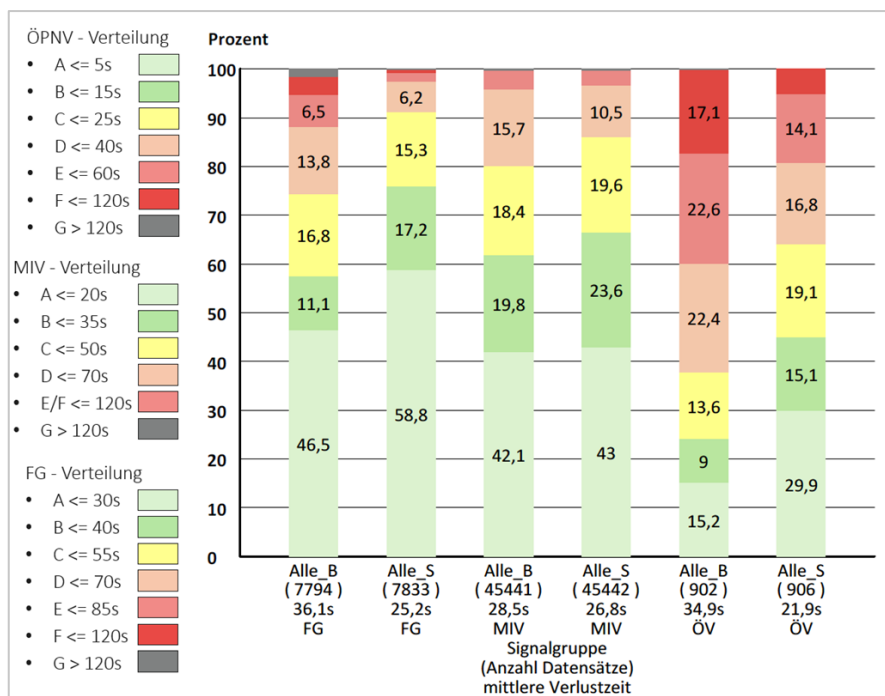


Abbildung 64: Effekte der kurzfristigen Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung (LSA 143)

In der Simulation zeigt sich durch diese einfache Maßnahme eine deutliche Reduktion der mittleren Verlustzeiten des ÖPNV in den Spitzenstunden von 34,9 Sekunden auf 21,9 Sekunden. Parallel konnten die Freigabezeiten für den Kfz-Verkehr und den Fußgängerverkehr gegenüber dem Status quo verbessert werden. Insbesondere die sehr langen Wartezeiten im Fußgängerverkehr von über 120 Sekunden treten im Prinzip nicht mehr auf. Im Planfall müssen nur noch 2,5 Prozent länger als 40 Sekunden warten gegenüber 11,8 Prozent im Analysefall.

Als kurzfristige Maßnahme wird empfohlen, den Meldepunkt zu verlegen und die modifizierte Lichtsignalsteuerung am Knoten einzuspielen. Zur Minimierung des Aufwandes sollte die Versorgung des Meldepunktes im Haltestellenbereich mit LIVEtsp erfolgen. Um die umfassende alternative Anwendung des LIVEtsp-Verfahrens als Zwischenlösung bis zur langfristigen Umsetzung des Digitalfunks zu etablieren, können alle am Knoten vorhandenen Meldepunkte (aus dem Funk-Bake-System) zunächst parallel mit LIVEtsp-Meldepunkten versorgt werden. Die Zuverlässigkeit der LIVEtsp-Meldepunkte kann während einer Testphase mit des Qualitätsmanagementtool urbic® getestet werden. Bei hinreichender Zuverlässigkeit und geringer Latenzzeit können Funk-Bake-Anmeldungen durch LIVEtsp-Meldepunkte ersetzt werden, um die Geräte für andere Verwendungen (Ersatz von defekten Geräten an anderen Knoten u. ä.) abzubauen.

7.4.18 Maßnahme L2 (LSA 342)

Die Maßnahme L2 beinhaltet die Umsetzung einer optimierten Lichtsignalsteuerung für den Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (LSA 342). Aufgrund der hohen ÖPNV-Belastung des Knotens ist eine optimale Freigabe der benötigten ÖPNV-Richtungen von essentieller Bedeutung für die effiziente Nutzung vorhandener Freigabezeiten. Aktuell treten durch Leerlaufzeiten in nicht genutzten Grünzeitfenstern sehr hohe Verluste im ÖPNV und sehr lange Wartezeiten für den Fußgängerverkehr sowie Behinderungen für die Abbiegerströme am Knoten auf. Die ungünstige Lage der wenigen ÖPNV-Meldepunkte macht in Verbindung mit starken Fahrzeitstreuungen (aus externen Behinderungen und den Fahrgastwechselzeiten in den Haltestellen) eine punktgenaue Anmeldung an der Lichtsignalsteuerung praktisch unmöglich.

Zur Optimierung der ÖPNV-Anmeldungen werden die Fahrzeiten zwischen den vorhandenen Meldepunkten und den Signalquerschnitten mit Hilfe von urbic® zunächst neu kalibriert. Zusätzlich werden in jeder Haltestelle ein LIVEtsp-Meldepunkt als Türschließsignal (ggf. als manuelle Auslösung durch den Fahrer umzusetzen) und an jedem Signalquerschnitt ein LIVEtsp-Meldepunkt als Rückfallebene ergänzt. Darüber hinaus werden zusätzlich die Weichenkontakte im Zulauf auf den Knoten als Hauptanmeldung und zur Neuberechnung der Restfahrzeiten herangezogen. Dies vorausgesetzt wurde eine neue Programmierung mit geänderten Phasenablauf und gezielter Richtungsansteuerung der angeforderten ÖPNV-Richtungen programmiert. Auf die Einbindung des Knotens in die Kfz-Koordinierung wurde zugunsten der ÖPNV-Priorisierung verzichtet. Zudem läuft der

Knoten mit einer dynamischen flexiblen Umlaufzeit, die sich abhängig von den Kfz- und den ÖPNV-Anforderungen situationsabhängig einstellt.

Die Neuprogrammierung der Signalsteuerung und die Simulation erfolgte dabei für drei jeweils stärker priorisierende Varianten, um die durch die Programmierung zu erreichenden Effekte vergleichend nebeneinander stellen zu können. Die Basisprogrammierung erfolgte unter Nutzung der zur Verfügung gestellten Modulbibliothek „Standard MD“. In einer zweiten Variante wurden die Modulbibliothek entsprechend Maßnahme L1 teilweise (ohne Zugriff auf die Zusatzebenen Vor-Schalten und Nach-Schalten) angepasst. Als dritte Variante wurde eine Signalsteuerung mit freier Logik unabhängig von der Modulbibliothek „Standard MD“ umgesetzt. Alle Varianten wurde jeweils mithilfe einer Mikrosimulation getestet und bewertet.

Unter der Voraussetzung, dass Wartezeiten von mehr als 120 Sekunden im Fußgänger-verkehr zu vermeiden sind, konnte eine signifikante Reduzierung der ÖPNV-Verluste mit der Basisversion von „Standard MD“ nicht erreicht werden.

Durch die Erweiterung der Modulbibliothek „Standard MD“ entsprechend Maßnahme L1 konnten die mittleren Verlustzeiten des ÖPNV um 20 Prozent von rund 29 Sekunden pro Fahrzeug auf rund 23 Sekunden pro Fahrzeug reduziert werden. Die mittleren Verlustzeiten des Kfz-Verkehrs sind bei moderaten Auslastungsgeraden von 40,7 auf 42,4 Sekunden gestiegen. Die Verlustzeiten des Fußgängerverkehrs haben sich von 36,7 Sekunden auf 29 Sekunden verringert, wobei extreme Spitzen über 120 Sekunden nicht mehr auftreten.

In der letzten Signalprogrammvariante mit einer frei programmierten signalgruppenorientierten Logik konnte die Verlustzeit des ÖPNV gegenüber der Variante mit optimiertem „Standard MD“ noch einmal geringfügig um eine Sekunde verringert werden. Zu berücksichtigen ist jedoch eine Harmonisierung der ÖPNV-Verluste zwischen den Fahrzeugen mit gleichmäßigen mittleren Verlustzeiten in allen Richtungen unter 25 Sekunden. Die mittleren Verlustzeiten des Fußgängerverkehrs haben sich ebenfalls noch einmal reduziert. Die mittleren Verluste des Kfz-Verkehrs sind bei nahezu gleichbleibender Verkehrsqualität und Auslastung leicht gestiegen.

Die Ergebnisse (mittlere Verlustzeiten) für die verschiedenen Verkehrsarten finden sich als Gegenüberstellung von vorher („B“ wie Bestand) und nachher („T“ mit freier Programmierung) in der folgenden Abbildung 65.

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Maßnahmen

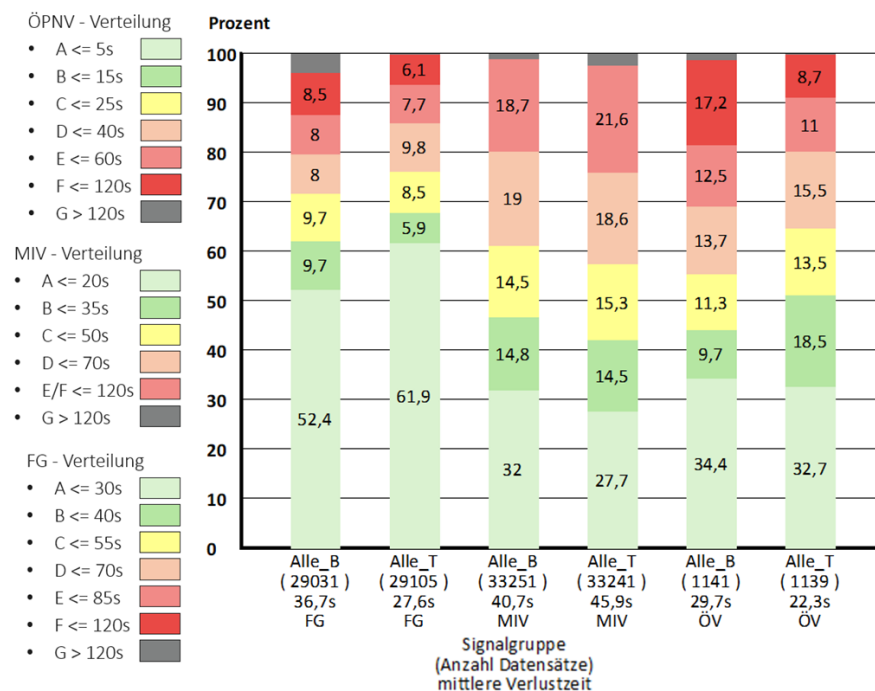


Abbildung 65: Effekte der kurzfristigen Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung (LSA 342)

In der Simulation zeigt sich insgesamt eine deutliche Reduktion der mittleren Verlustzeiten des ÖPNV in den Spitzenstunden von 29,7 Sekunden auf 22,3 Sekunden. ÖPNV-Verluste von mehr als 60 Sekunden traten nur noch bei rund 9 Prozent aller Fahrten gegenüber rund 18 Prozent im Status Quo. Ausreißer von mehr als 120 Sekunden Verlustzeiten treten im ÖPNV im Prinzip nicht mehr auf. Parallel konnten auch die Freigabezeiten für den Fußgängerverkehr gegenüber dem Status quo verbessert und die sehr langen Wartezeiten von 120 Sekunden eliminiert werden. Die mittleren Verlustzeiten des Kfz-Verkehrs steigen leicht. Sie liegen jedoch mit 45,9 Sekunden ohne wesentliche Spitzen über 60 Sekunden und ohne eine signifikante Verschlechterung der Verkehrsqualität im Kfz-Verkehr noch in einem recht komfortablen Bereich.

Als kurzfristige Maßnahme wird empfohlen, den Meldepunkt zu verlegen und die modifizierte Lichtsignalsteuerung am Knoten einzuspielen. Die besten Ergebnisse lassen sich dabei mit der signalgruppenorientierten freien Programmierung erreichen. Eine Umsetzung der Programmierung mit modifizierter Modulbibliothek „Standard MD“ erlaubt zumindest am Knoten Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg ähnlich gute Ergebnisse.

7.4.19 Maßnahme L3

Die Maßnahme L3 beinhaltet die Umsetzung einer optimierten Lichtsignalsteuerung für den Knoten Ernst-Reuter-Allee / Otto von Guericke Straße (LSA 334). Aufgrund der hohen ÖPNV-Belastung des Knotens ist eine optimale Freigabe der benötigten ÖPNV-Richtungen

von essentieller Bedeutung für die effiziente Nutzung vorhandener Freigabezeiten. Aktuell treten durch Leerlaufzeiten in nicht genutzten Grünzeitfenstern sehr hohe Verluste im ÖPNV und sehr lange Wartezeiten für den Fußgängerverkehr sowie Behinderungen für die Abbiegerströme am Knoten auf. Die ungünstige Lage der wenigen ÖPNV-Meldepunkte in Verbindung mit nichtzutreffenden Schätzungen der aktuellen Restfahrzeiten macht eine punktgenaue ÖPNV-Anmeldung in der aktuellen Steuerungslogik der Lichtsignalsteuerung praktisch unmöglich.

Zur Optimierung der ÖPNV-Anmeldungen werden die Fahrzeiten zwischen den vorhandenen Meldepunkten und den Signalquerschnitten mit Hilfe von urbic® zunächst neu kalibriert. Zusätzlich werden in jeder Haltestelle ein LIVEtsp-Meldepunkt als Türschließsignal und an jedem Signalquerschnitt ein LIVEtsp-Meldepunkt als Rückfallebene ergänzt. Darüber hinaus werden zusätzlich die Weichenkontakte im Zulauf auf den Knoten als Hauptanmeldung und zur Neuberechnung der Restfahrzeiten herangezogen. Insbesondere aus westlicher Richtung werden zusätzlich weitere Kalibrierungspunkte im Knotenzulauf definiert. Dies vorausgesetzt wurde die bestehende Programmierung neu kalibriert. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch, dass für die Ermittlung der erforderlichen Kfz-Freigaben lediglich veraltete Knotenstromdaten vorlagen, welche sich nur begrenzt anhand aktueller Daten hochrechnen ließen. Eine Aktualisierung der Knotenstromzählung zur präzisen Festlegung der Kfz-Freigabezeiten wäre vor einer Umsetzung sinnvoll.

Die Neukalibrierung der Signalsteuerung und der ÖV-Meldungen wurden zur Bewertung der erreichbaren Effekte simuliert. Als Referenzfall wurde eine Basisvariante unter Nutzung der aktuellen unveränderten Steuerungslogik simuliert. Die Ergebnisse beider Simulationen wurde vergleichend gegenübergestellt und bewertet.

Durch die Implementierung von zusätzlichen ÖV-Meldepunkten und die Kalibrierung der aktuellen Logik auf neue Verkehrsdaten und Anmeldezeiten konnte die mittlere Verlustzeit des ÖPNV um rund 25 Prozent von rund 46 Sekunden pro Fahrzeug auf rund 32 Sekunden pro Fahrzeug reduziert werden. Die mittleren Auslastungsgrade im Kfz-Verkehr konnten dabei ebenfalls auf allen Relationen verbessert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass es während der Simulation in der Steuerungslogik teilweise zu unschlüssigen Signalzyklen gekommen ist. Da die Steuerungslogik aufgrund der Tunnelproblematik und somit entsprechend den Vorgaben nicht modifiziert werden sollte, wurde dieses Verhalten als gegeben hingenommen.

Die Ergebnisse (mittlere Verlustzeiten) für die verschiedenen ÖV-Richtungen finden sich als Gegenüberstellung von vorher („B“ wie Bestand) und nachher („O“ optimiert) in der folgenden Abbildung .

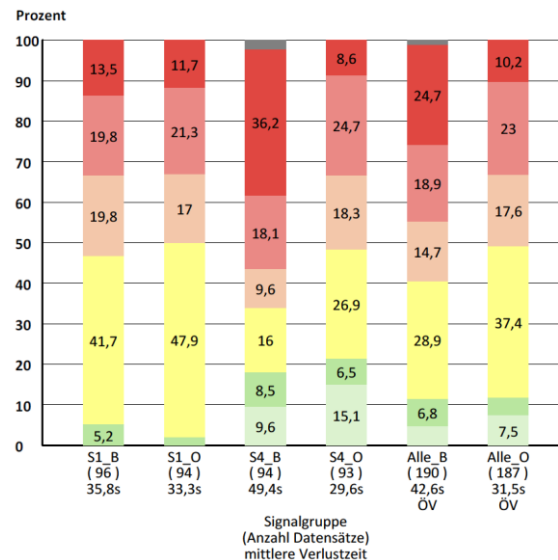


Abbildung 66: Effekte der kurzfristigen Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung (LSA 334)

In der Simulation zeigt sich insgesamt eine deutliche Reduktion der mittleren Verlustzeiten des ÖPNV in den Spitzenstunden von 42,6 Sekunden auf 31,5 Sekunden. ÖPNV-Verluste von mehr als 60 Sekunden traten nur noch bei rund 10 Prozent aller Fahrten auf gegenüber rund 25 Prozent im Status quo. Ausreißer von mehr als 120 Sekunden Verlustzeiten traten im ÖPNV im Prinzip nicht mehr auf. Parallel konnten auch die Auslastungsgrade für den KFZ-Verkehr gegenüber dem Status quo reduziert werden. Die Anlage ist jedoch mit den gegebenen Verkehrsaufkommen weiterhin überlastet.

Als kurzfristige Maßnahme wird empfohlen, den Meldepunkt zu verlegen und die optimierte Lichtsignalsteuerung am Knoten einzuspielen.

7.5 Nutzenbetrachtung

Die Maßnahmenbetrachtung wurde durch eine Nutzenbetrachtung abgeschlossen. Bestandteil der Nutzenbetrachtung waren Berechnungen der verlagerten und induzierten Personenfahrten gemäß dem Verfahren der Standardisierten Bewertung¹³ unter Nutzung des integrierten Verkehrsmodells der Landeshauptstadt Magdeburg¹⁴

¹³ Quelle | Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr Version 2016+; BMDV; Juni 2022

¹⁴ Quelle | VISUM-Verkehrsmodell der Landeshauptstadt Magdeburg, Prognose 2030; übergeben im Dezember 2024

Für die Berechnungen wurde der Ansatz des im Verfahren implementierten Mit- und Ohnefallprinzips verwendet. Der Ohnefall stellt dabei die Ausgangslage mit den heute maßgebenden Fahrzeiten dar.

Die Kennziffern des Mitfall wurden wie folgt ermittelt

- Eingabe der ermittelten/abgeschätzten Fahrzeitpotenziale
- Berechnung einer über die Belastung gewichteten Beschleunigungsmatrix (Zeitmatrix)
- Berechnung der verlagerten und induzierten ÖV-Personenfahrten gemäß dem Verfahren der Standardisierten Bewertung
- Umlegung aller ÖV-Personenfahrten in das VISUM-Verkehrsmodell – Zuordnung der ÖV-Fahrten zu dem vorhandenen Fahrplanangebot (Wegewahl)

Die Zeitpotenziale, welche an den Knotenpunkten durch verbesserte LSA-Steuerungen gehoben werden können, wurden basierend auf den gutachterlichen Erfahrungen und im Zuge der Betrachtung der Knotenpunkte 143, 334 und 342 gewonnenen Erkenntnisse abgeleitet. Für die verschiedenen Knotenpunkttypen wurden die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Zeitpotenziale zu Grunde gelegt.

Anzahl Arme Knotenpunkt	Ohne im Konflikt stehende Straßenbahn	Mit im Konflikt stehende Straßenbahn
2-armig	5 s	5 s
3-armig	5 s	10 s
4-armig	10 s	20 s
5-armig	-	30 s

Tabelle 8: Zeitpotenziale pro Knotenpunkt

Für die drei im Projekt detailliert untersuchten Knotenpunkte wurden somit folgende durchschnittlichen Zeitpotenziale (pro dem Knotenpunkt passierender ÖV-Fahrt) durch eine Verbesserung der ÖPNV-Abläufe am Knotenpunkt herausgearbeitet

- Lübecker Straße / Kastanienstraße (LSA 143): 4-armig, mit Konflikt 20 s
- Ernst-Reuter-Allee / Breiter Weg (LSA 342): 4-armig, mit Konflikt 20 s
- Ernst-Reuter-Allee / Otto-von-Guericke-Straße: 4-armig, ohne Konflikt 10 s

In Summe können somit pro durchschnittlichen Werktag über 220.500 s eingespart werden, was gleichbedeutend mit einem Einsparpotenzial von über 60 Fahrzeugstunden pro Werktag ist.

Studie „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“

Maßnahmen

Bezogen auf das Magdeburger Straßenbahnnetz ergeben sich durch die Verbesserungspotenziale an den Knotenpunkten ca. 100 Fahrplanstunden, was bei einem Zeitpotenzial von 30.000 Fahrplanstunden pro Jahr entspricht.¹⁵

Mittel des in der Standardisierten Bewertung implementierten Nachfrageberechnungsverfahrens können pro durchschnittlichen Werktag aufgrund der Zeiteffekte im ÖPNV folgende Nachfragepotenziale ausgewiesen werden:

- Ca. 800 vom MIV zum ÖPNV verlagerte Personenfahrten
- Ca. 400 innerhalb des Umweltverbund zum ÖPNV verlagerte und zusätzliche Personenfahrten
- Somit ca. 1.200 Personenfahrten im ÖV zusätzlich an einem durchschnittlichen Werktag (ca. 360.000 Personenfahrten pro Jahr)

¹⁵ Hochrechnungsfaktor von durchschnittlichem Werktag auf ein Jahr: 300

8 Fazit

Das Projekt „Straßenbahn-Bevorrechtigung durchsetzen“ dient als zentraler Rahmen, um die aktuelle Situation des Straßenbahnbetriebs zu evaluieren und maßgeschneiderte Maßnahmen zur Optimierung zu entwickeln. Dabei wurden umfassende Analysen der Infrastruktur, der Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern sowie der heutigen Betriebsqualität und Verkehrsorganisation durchgeführt. Ein zentrales Anliegen ist die Stärkung des öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV) durch eine ganzheitliche Betrachtung der infrastrukturellen, technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen.

Das aktuelle Infrarot-Bake-System zur Beschleunigung des ÖPNV in Magdeburg ist technisch veraltet und aufgrund hoher Wartungskosten sowie der Schwierigkeit, Ersatzteile zu beschaffen, nicht zukunftsfähig. Eine weitere Verwendung der Infrarottechnik wurde 2018 strategisch abgelehnt. Daher wurden aus dem Überblick über die derzeit verfügbaren und zukünftig zu erwartenden Produkte und Dienste zur Beschleunigung des Öffentlichen Verkehrs drei moderne Systemvarianten (Digitalfunk via TETRA, öffentlicher Mobilfunk und C-ITS) vorausgewählt, um zukünftige Anforderungen an die ÖPNV-Beschleunigung zu erfüllen. Die Bewertung der Systeme erfolgte über ein Punktesystem, wobei Investitions- und Betriebskosten doppelt gewichtet wurden. C-ITS wird als zukunftsweisendes System empfohlen, da es durch EU-Standardisierung, Kompatibilität mit regionalen Verkehrsbetreibern und zusätzliche Anwendungen (z. B. GLOSA, Baustellenwarnung) überzeugt. Mobilfunk wird als Rückfallebene und Übergangslösung betrachtet. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit eines klaren Entscheidungsprozesses für das zukünftige Anmeldesystem und die Entwicklung eines detaillierten Finanzierungs- und Migrationsplans. Hierzu wurden den Akteuren der Landeshauptstadt Magdeburg Hinweise gegeben, für das Anmeldesystem der Zukunft eine entsprechende Förderung zu erlangen.

Die Untersuchung der drei Leitstellenvarianten (Status Quo, datentechnische Kopplung, integrale Gesamtleitstelle) für die Leitstellen der MVB, des Fachdienstes Verkehrstechnik / LSA-Dienst und der Betriebszentrale für die Straßentunnel mithilfe der SWOT-Analyse zeigt, dass die Einzelleitstellen (Variante 1) nicht zukunftsfähig sind. Die langfristige Zielarchitektur ist die integrale Gesamtleitstelle (Variante 3), wobei der Weg über eine datentechnische Kopplung (Variante 2) als praktikable Zwischenlösung empfohlen wird. Die Analyse betont die strategische Bedeutung einer zentralisierten Steuerung für die Mobilitätswende und die Notwendigkeit einer schrittweisen Umsetzung.

Die Grundlage der Untersuchung bildeten umfangreiche Daten aus dem System urbic®, das für die Erfassung und Analyse von Steuerungsdaten der Lichtsignalanlagen (LSA) genutzt wird, sowie Fahrtverläufen und Betriebsdaten. Die Aktualisierung und Optimierung der LSA-Steuerungen versprechen deutliche Verbesserungen für alle Verkehrsteilnehmende, insbesondere aber für den ÖPNV. Wichtige Aspekte sind die Verbesserung der Anmeldetechnik für den ÖPNV sowie die Berücksichtigung der Bedürfnisse aller

Verkehrsteilnehmer. Eine Modernisierung der LSA-Steuerungen und eine Anpassung an den Stand der Technik könnten kurz- bis mittelfristig Potenziale zur ÖPNV-Priorisierung heben. Die größten Verbesserungen werden voraussichtlich an den Knoten Ernst-Reuter-Allee/Breiter Weg und Lübecker Straße/Kastanienstraße erreicht werden.

Die Fahrtverlaufsanalysen ermöglichten es, präzise Einblicke in die aktuelle Betriebsabläufe zu gewinnen, insbesondere hinsichtlich Geschwindigkeitsstreuungen, Halte- und Fahrzeiten und Verkehrsbeeinträchtigungen. Diese Daten wurden durch gutachterliche Analysen und die fachkundige Einschätzung des Fahrpersonals ergänzt. Die Zusammenarbeit mit dem Fahrpersonal war entscheidend, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu identifizieren und die Daten mit praktischen Erfahrungen zu verknüpfen. So konnten beispielsweise systematische Probleme wie unzureichende Priorisierung für Straßenbahnen in der Lichtsignalsteuerung besser verstanden und in die Maßnahmenvorschläge einbezogen werden.

Die Ableitung von Maßnahmen erfolgte auf der Grundlage einer tiefen Analyse der Ursachen und der Zielsetzung, den Straßenbahnbetrieb in Magdeburg nachhaltig zu verbessern. Die vorgeschlagenen Maßnahmen weisen dabei unterschiedlichen Charakter auf – von der Weiterentwicklung und Ergänzung bestehender Systeminfrastrukturen (Leitstellen, Anmeldesystem, Qualitätserfassungstool) über empfohlene Veränderungen von Lichtsignalsteuerungen (allgemein und an systemisch relevanten Beispielknoten) bis hin zu einer veränderten Verkehrsorganisation an in der Analyse auffälligen Streckenabschnitten.

Die Nutzenbetrachtung der vorgeschlagenen Maßnahmen zeigt, dass die Implementierung dieser Lösungen nicht nur die Betriebsqualität, sondern auch die Attraktivität des ÖPNV für die Bevölkerung steigern kann. Die Ergebnisse des Projekts bieten zudem konkrete Handlungsempfehlungen für die Landeshauptstadt Magdeburg, um für das zukünftige Anmeldesystem Fördermittel zu sichern und die technologische Infrastruktur zu modernisieren.

Im Ergebnis wird deutlich, dass eine datenbasierte, koordinierte und zukunftsorientierte Entwicklung des Straßenbahnverkehrs notwendig ist, um die Herausforderungen des modernen Verkehrs zu meistern. Die vorgestellten Maßnahmen sind nicht nur auf den kurzfristigen Nutzen ausgerichtet, sondern auch auf eine nachhaltige Verbesserung der Verkehrssituation in Magdeburg. Der Bericht unterstreicht zudem die Bedeutung der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren – von der Stadt Magdeburg über die Magdeburger Verkehrsbetriebe bis hin zu dem Fahrpersonal –, um eine effektive und zielgerichtete Umsetzung der Maßnahmen zu gewährleisten.

Durch die Kombination aus technischer Innovation, organisatorischer Anpassung und datengetriebener Entscheidungsfindung wird der Straßenbahnverkehr in Magdeburg zukünftig besser in das gesamte Verkehrsnetz integriert und seine Rolle als Schlüsselkomponente des ÖPNV gestärkt.

Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Verkehrszählung Knotenpunkt Breiter Weg / Ernst-Reuter-Allee
- Anhang 2: Maßnahmenblätter zu Maßnahmen (Kapitel 7)
- Anhang 3: Lagepläne zu den Maßnahmenblättern