

Diplomarbeit

Bewertungsverfahren zur Analyse der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Evaluation method for the analysis of tram travel speed

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Paul Steinwiddler, BSc

Matr.Nr.: 01430457

Betreuung: Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Markus Lagler**, BSc BA
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Spurgebundene Verkehrssysteme
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/230-2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Dezember 2023

Kurzfassung

Diese Arbeit verfolgt vorrangig das Ziel, eine umfassende Evaluierungsmethode zur Analyse der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen zu entwickeln. Dabei strebt sie die Schaffung eines Bewertungssystems an, das verschiedene Kriterien und Faktoren berücksichtigt, die sich sowohl auf die Infrastruktur als auch auf die betrieblichen Merkmale von Straßenbahnen beziehen. Der erste Schritt besteht in der Analyse des gegenwärtigen Zustands. Einerseits werden die geplanten Geschwindigkeiten in Wien anhand von GTFS-Datensätzen der Wiener Linien ermittelt. Andererseits erfolgt eine Analyse der Geschwindigkeiten anhand von Echtzeitdaten, um potenzielle Diskrepanzen aufzudecken. Die Gewinnung einer soliden Datenbasis für das Bewertungssystem erfordert die Identifikation relevanter Einflussgrößen und Kriterien, die die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen beeinflussen. Eine umfassende Untersuchung potenzieller Störfaktoren für die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen wird daher durchgeführt, wobei sowohl interne als auch externe Störfaktoren ermittelt werden, die den Betriebsablauf negativ beeinträchtigen können. Interne Störfaktoren umfassen Aspekte wie die Gestaltung von Fahrwegen und Haltestellen sowie die Ausführung der Straßenbahnfahrzeuge. Externe Störfaktoren können durch Mängel an Lichtsignalanlagen, Konflikte mit dem motorisierten Individualverkehr oder das Verhalten der Fahrgäste entstehen. Eine detaillierte Untersuchung dieser Störfaktoren ist von Bedeutung, um geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Betriebsabläufe und der Reisegeschwindigkeit ableiten zu können. Ebenso wird die Reduzierung von Verlustzeiten als entscheidender Aspekt bei der Optimierung der Reisegeschwindigkeit thematisiert. Im Rahmen dieser Analyse werden Strategien und Maßnahmen zur Minimierung von Verlustzeiten erörtert. Die erlangten Erkenntnisse dienen als Grundlage für das Bewertungssystem, bei dem die einzelnen Kriterien und Einflussgrößen mit entsprechenden Punktwerten versehen und gegebenenfalls gewichtet werden, um ihre relative Bedeutung im Gesamtkontext angemessen zu berücksichtigen. Diese werden dann in einer übersichtlichen Scorecard zusammengeführt. Anhand der erzielten Punktwerte in den verschiedenen Kategorien können Schlussfolgerungen hinsichtlich potenzieller Defizite gezogen werden. Abschließend wird das entwickelte Bewertungsverfahren exemplarisch an Straßenbahnlinie 42 angewendet, wobei anhand der resultierenden Erkenntnisse Optimierungspotenziale aufgezeigt werden.

Abstract

This thesis primarily aims to develop a comprehensive evaluation method for analyzing the travel speed of trams. It endeavors to create an assessment system that considers various criteria and factors related to both the infrastructure and operational characteristics of trams. The initial step involves analyzing the current state. On one hand, planned speeds in Vienna are determined using GTFS datasets from Wiener Linien. On the other hand, a real-time data analysis is conducted to identify potential discrepancies. Establishing a solid data foundation for the assessment system requires identifying relevant variables and criteria influencing tram travel speed. A thorough examination of potential disrupting factors for tram travel speed is therefore undertaken, identifying both internal and external disruptors that could adversely impact operational processes. Internal disruptors encompass aspects such as track and stop design, as well as tram vehicle execution. External disruptors may arise from deficiencies in traffic signal systems, conflicts with motorized traffic, or passenger behavior. A detailed investigation of these disruptors is crucial to derive appropriate measures for improving operations and travel speed. The reduction of downtime is also highlighted as a crucial aspect in optimizing travel speed. Within this analysis, strategies and measures to minimize downtime are discussed. The insights gained serve as the basis for the assessment system, where individual criteria and variables are assigned corresponding point values and, if necessary, weighted to adequately consider their relative importance in the overall context. These are then consolidated in a clear scorecard. Conclusions regarding potential deficiencies can be drawn based on the achieved point values in various categories. Finally, the developed assessment procedure is applied exemplarily to tram line 42, revealing optimization potentials based on the resulting insights.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, um meinen aufrichtigen Dank auszusprechen an alle, die mich während meiner Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Ein besonderer Dank geht an DI Markus Lagler, der mich mit fachlicher Expertise und wertvollen Ratschlägen durch den gesamten Prozess geleitet hat. Die konstruktiven Diskussionen und Anregungen haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich den Wiener Linien danken, vor allem meinem Ansprechpartner, DI Stefan Edlinger, der durch Einblicke und Informationen aus erster Hand einen bedeutenden Beitrag zur Qualität und Tiefe meiner Arbeit beigetragen hat.

Zuletzt möchte ich meiner Familie einen großen Dank aussprechen, besonders meinen Eltern, die mich während meines Studiums an der Universität in vielerlei Hinsicht unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Hintergrund und Motivation	11
1.2	Methodik und Aufbau der Arbeit	11
2	Theoretische Grundlagen	13
2.1	Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen	13
2.1.1	Rechtliche Grundlagen	13
2.1.2	Reisezeit und Reisegeschwindigkeit	13
2.2	Ermittlung der Geschwindigkeiten nach Fahrplan in Wien	14
2.2.1	General Transit Feed Specification - Static	14
2.2.2	Durchschnittliche Geschwindigkeit pro Linie und Richtung	16
2.3	Ermittlung der Geschwindigkeiten nach Echtzeitdaten	17
2.4	Städtevergleich der Geschwindigkeiten von Straßenbahnen	19
3	Analyse der Störquellen	20
3.1	Interne Störquellen	20
3.1.1	Liniengestaltung	20
3.1.2	Fahrweg	20
3.1.3	Fahrplan	21
3.1.4	Haltstellen	22
3.1.5	Fahrzeug	24
3.2	Externe Störquellen	26
3.2.1	Verhalten der Fahrgäste	26
3.2.2	Kreuzungsbereiche	27
3.2.3	Abgestellte Fahrzeuge am Streckenrand	28
3.3	Trassierung	29
4	Reduktion von Verlustzeiten	31
4.1	Standzeiten an Knotenpunkten	31
4.1.1	Haltezeit an Haltstellen	31
4.1.2	Maßnahmen an Lichtsignalanlagen	40
4.2	Standzeiten außerhalb festgelegter Knotenpunkte	46
4.2.1	Fahrweg	46
4.2.2	Reduzierung von Unfällen	49
4.3	Dynamische Verlustzeiten	50
4.3.1	Maßnahmen gegen Pulkbildung	50
5	Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Analyse der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen	51
5.1	Ansatz und Konzept	51
5.2	Datenbasis und Indikatoren	51
5.3	Limitationen	52

5.4	Bewertungskriterien	53
5.4.1	Freie Strecke	53
5.4.2	Haltestellen	54
5.4.3	Fahrzeug	56
5.4.4	Knotenpunkte	58
5.4.5	Betrieb	59
5.5	Scorecard	61
6	Anwendung des Bewertungsverfahrens	62
6.1	Analyse der Straßenbahnlinie 42	62
6.1.1	Freie Strecke	63
6.1.2	Haltestellen	65
6.1.3	Fahrzeug	67
6.1.4	Knotenpunkte	69
6.1.5	Betrieb	71
6.2	Ergebnis	73
6.3	Fazit und Optimierungspotential der Linie 42	74
6.3.1	Freie Strecke	74
6.3.2	Haltestellen	74
6.3.3	Fahrzeug	75
6.3.4	Knotenpunkte	75
6.3.5	Betrieb	75
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	76
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	76
7.2	Limitationen und Empfehlungen für weitere Forschung	77
A	Python-Skript zur Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeiten anhand von GTFS-Datensätzen	84

Abkürzungen

CSV comma-separated values

EisbBBV Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung

EisbG Eisenbahngesetz

FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.

GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft

GTFS general transit feed specification

IV Individualverkehr

Kfz Kraftfahrzeug

LSA Lichtsignalanlage

MIV motorisierter Individualverkehr

ÖPNV öffentlicher Personennahverkehr

ÖV öffentlicher Verkehr

StrabVO Straßenbahnverordnung

StVO Straßenverkehrsordnung

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

In städtischen Ballungsräumen spielt der öffentliche Nahverkehr eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung des wachsenden Verkehrsaufkommens und der Reduzierung von Umweltbelastungen. Insbesondere die Straßenbahn hat sich als zuverlässige und umweltfreundliche Verkehrsoption etabliert und trägt maßgeblich zur Mobilität vieler Bürgerinnen und Bürger in urbanen Gebieten bei. Die Reisegeschwindigkeit der Straßenbahnen steht dabei im Fokus, da sie einen direkten Einfluss auf die Effizienz, Pünktlichkeit und Attraktivität des öffentlichen Nahverkehrs hat. Eine verbesserte Reisegeschwindigkeit kann dazu beitragen, die Gesamtfahrzeit zu verkürzen und somit die Wettbewerbsfähigkeit des öffentlichen Nahverkehrs im Vergleich zum Individualverkehr zu stärken. Speziell in Zeiten zunehmender Umweltprobleme ist eine effiziente Straßenbahninfrastruktur von entscheidender Bedeutung für die nachhaltige Mobilität. In Anbetracht dieser Tatsachen ist die Entwicklung eines adäquaten und umfassenden Bewertungsverfahrens von großer Relevanz. Ein solches Verfahren ermöglicht es, die Faktoren, die die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen beeinflussen, systematisch zu erfassen und zu bewerten. Durch eine detaillierte Analyse und Bewertung dieser Faktoren können potenzielle Engpässe und Schwachstellen identifiziert und geeignete Maßnahmen abgeleitet werden, um die Reisegeschwindigkeit zu optimieren und die Gesamteffizienz des Straßenbahnverkehrs zu steigern. In diesem Zusammenhang stellen sich verschiedene zentrale Fragestellungen, die im Verlauf dieser Arbeit adressiert werden:

- Anhand welcher Kriterien und Leistungsindikatoren kann eine umfassende Bewertung der Reisegeschwindigkeit vorgenommen und ein Bewertungsmodell erstellt werden?
- Wie können die einzelnen Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Bedeutung und Auswirkungen gewichtet und priorisiert werden, um eine ausgewogene und gerechte Bewertung zu gewährleisten?
- Welche Schlussfolgerungen lassen sich auf Grundlage der Bewertungsergebnisse über die Qualität und Leistungsfähigkeit spezifischer Straßenbahnlinien ableiten?

1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit

Zunächst erfolgt eine eingehende Analyse des Ist-Zustands der Reisegeschwindigkeit. Diese umfasst die Berechnung der Geschwindigkeit anhand von general transit feed specification (GTFS)-Daten für Wien und Städte. Parallel dazu wird die Reisegeschwindigkeit der Straßenbahnen in Wien anhand von Echtzeitdaten analysiert, um eine umfassende Einsicht in die aktuelle Performance und eventuelle Diskrepanzen mit den anhand der GTFS-Daten ermittelten Ergebnisse zu erhalten. Anschließend wird eine detaillierte Analyse der potenziellen Störquellen durchgeführt, die maßgeblich die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen beeinflussen können. Hierbei werden potenzielle Engpässe und Störungen identifiziert, um gezielte Maßnahmen zur Reduzierung von

Verlustzeiten abzuleiten und die Betriebsstabilität zu verbessern. Darauf aufbauend wird ein Bewertungsverfahren entwickelt, das auf den Ergebnissen der vorangegangenen Analysen der Störquellen und Verlustzeiten basiert. Hierbei werden relevante Kriterien und Leistungsindikatoren definiert, die zur umfassenden Bewertung der Reisegeschwindigkeit herangezogen werden. Abschließend erfolgt die Anwendung des entwickelten Bewertungsverfahrens, wobei konkrete Erkenntnisse und mögliche Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Reisegeschwindigkeit abgeleitet werden sollen.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen

2.1.1 Rechtliche Grundlagen

In Österreich regelt das Eisenbahngesetz (EisbG), die Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung (EisbBBV) und die Straßenbahnverordnung (StrabVO) die Bestimmungen für den Betrieb von Straßenbahnen. Die zulässige Geschwindigkeit eines Zuges hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen die Bauart der einzelnen Schienenfahrzeuge, die Bremsleistung des jeweiligen Zuges, die Beschaffenheit der Strecke, betriebliche Verhältnisse, dynamische Effekte durch Schienenfahrzeuge sowie in Gleisbögen der Bogenradius und der festgelegte Überhöhungsfehlbetrag (§ 113 EisbBBV). Laut § 53 StrabVO kann die Höchstgeschwindigkeit beschränkt werden, basierend auf der Bauart der Fahrzeuge und den Streckenbedingungen sowie aus besonderem Anlass. Darüber hinaus gibt es spezifische Geschwindigkeitsbegrenzungen, wie beispielsweise 40 km/h bei Vorbeifahrt an Bahnsteigen ohne Halt und 15 km/h bei Fahrt gegen die Weichenspitze von nicht formschlüssig festgelegten Weichen.

2.1.2 Reisezeit und Reisegeschwindigkeit

Die Reisezeit und die Reisegeschwindigkeit spielen eine entscheidende Rolle für die Attraktivität, Effizienz und Zuverlässigkeit des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNVs). Im Allgemeinen versteht man unter der Reisezeit die Gesamtdauer, die benötigt wird, um eine Ortsveränderung von einem Ausgangspunkt zu einem Zielort zu erreichen. Dabei wird nicht nur die reine Fahrzeit berücksichtigt, sondern auch jegliche anfallende Rüstzeiten. Der Zeitaufwand für die Reisezeit eines öffentlichen Personenverkehrs setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Zugangszeit
Zeitaufwand von Startpunkt zu Starthaltestelle des ÖPNV
- Wartezeit
Wartezeit an der Haltestelle des ÖPNV
- Beförderungszeit
Reine Fahrzeit, Haltestellenaufenthalte zum Fahrgastwechsel, Zwangshalte aus betrieblichen Gründen und Störzeiten infolge Behinderungen anderer Verkehrsteilnehmer
- Abgangszeit
Zeitaufwand von Zielhaltestelle des ÖPNV zu Zielpunkt

Die Bestandteile der Reisezeit (vgl. Abb. 2.1) können je nach gewähltem Verkehrsmittel variieren. Bei einer Fahrt mit dem Pkw entfällt beispielsweise der Zeitanteil für Wartezeiten. Allerdings muss in diesem Fall auch die Parkplatzsuchzeit zur Reisezeit hinzugerechnet werden. [1, 2]

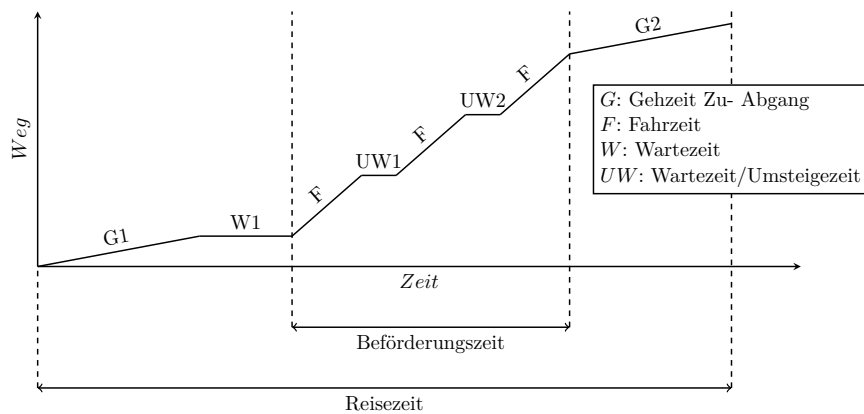


Abb. 2.1: Weg-Zeit-Diagramm Reisezeit

Die Reisegeschwindigkeit ist definiert als die durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der sich eine Person oder ein Transportmittel von einem Ausgangspunkt zu einem Ziel bewegt. Dabei werden ebenfalls die verschiedenen Komponenten der Reisezeit berücksichtigt. Die Reisegeschwindigkeit ergibt sich folglich aus dem Quotienten der zurückgelegten Reiseweite und der benötigten Reisezeit.

$$\text{Reisegeschwindigkeit} = \frac{\text{Reiseweite}}{\text{Reisezeit}}$$

In dieser Arbeit beziehen sich die Begriffe Reisegeschwindigkeit und Reisedauer spezifisch auf Straßenbahnen. Sie sind daher als äquivalent zu den Konzepten Beförderungsgeschwindigkeit und Beförderungszeit anzusehen, wobei auch hier etwaige Umsteigezeiten entfallen.

2.2 Ermittlung der Geschwindigkeiten nach Fahrplan in Wien

2.2.1 General Transit Feed Specification - Static

Die general transit feed specification ist ein weit verbreitetes Datenformat, das von Google entwickelt wurde und dazu dient, den öffentlichen Nahverkehr für den Einsatz in verschiedenen Anwendungen und Diensten zugänglich zu machen. Das Prinzip von GTFS beruht auf einer standardisierten Struktur, die es Verkehrsbehörden und -betreibern ermöglicht, ihre Fahrplandaten, Routeninformationen und geografischen Informationen in einem einheitlichen Format zu präsentieren.

Der GTFS-Feed setzt sich aus einer Sammlung von comma-separated values (CSV) -Dateien zusammen. Diese Dateien enthalten detaillierte Informationen über Fahrpläne, Stationen, Routen, Fahrzeugtypen, Tarife und vieles mehr. Ein solcher Feed bildet somit eine vollständige Darstellung des öffentlichen Nahverkehrssystems einer bestimmten Region oder Stadt ab.

Die Struktur von GTFS basiert auf bestimmten Entitäten und deren Eigenschaften, die in den einzelnen CSV-Dateien repräsentiert werden. Zum Beispiel werden Informationen zu den einzelnen Stationen und deren geografischen Koordinaten in einer Datei abgebildet, während die Fahrpläne und Routen in separaten Dateien angegeben sind. Diese Entitäten sind über eindeutige Schlüssel wie beispielsweise die Station-ID oder Routen-ID miteinander verknüpft, was eine konsistente Referenzierung und Integration der Daten ermöglicht. Aufschluss darüber, welche Entitäten erforderlich, welche optional und wie diese miteinander verknüpft sind, liefert Abbildung 2.2.

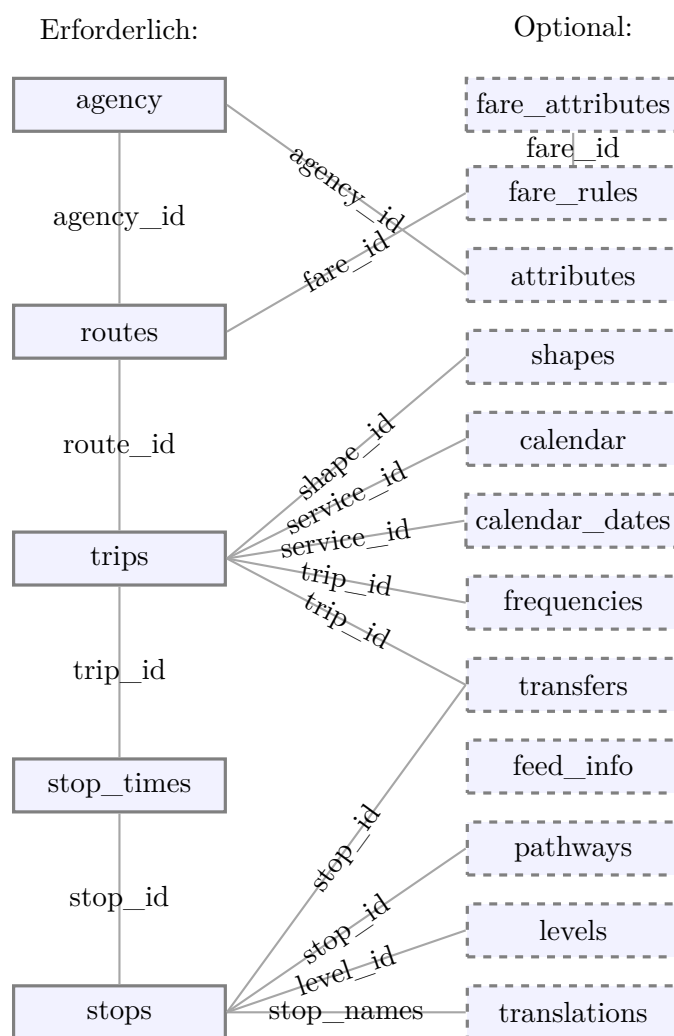


Abb. 2.2: Klassendiagramm eines GTFS-Feeds

GTFS hat sich zu einem Standardformat entwickelt, das von vielen Verkehrsunternehmen auf der ganzen Welt verwendet wird, um ihre Daten zu teilen. Dies fördert die Interoperabilität und ermöglicht es Entwicklern, innovative Anwendungen und Dienste zu entwickeln, die auf umfassenden und aktuellen öffentlichen Verkehrsdaten basieren. Durch die Vereinheitlichung und den weit verbreiteten Einsatz von GTFS wird die Reiseplanung für die Öffentlichkeit erheblich vereinfacht und trägt zur Förderung der Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs bei. [3, 4]

2.2.2 Durchschnittliche Geschwindigkeit pro Linie und Richtung

Mithilfe des GTFS-Datasets der Wiener Linien können die durchschnittlichen Beförderungsgeschwindigkeiten laut Fahrplan für Straßenbahnen in Wien ermittelt werden. Dies geschieht mittels eines Python-Skripts (Anhang A). Zunächst werden die Daten bereinigt, um nur noch die Straßenbahnfahrten zu berücksichtigen. Anschließend werden die Dateien routes.csv, trips.csv und stop_times.csv über die Referenzierungen trip_id und stop_id miteinander verknüpft (siehe Abbildung 2.2). Dadurch können basierend auf den Entfernungen und Ankunftszeiten die Gesamtentfernung und die Gesamtzeit pro Linie und Richtung zwischen der ersten und letzten Haltestelle berechnet werden, und somit auch die Beförderungszeit. Die Berechnung liefert folgendes Ergebnis:

Tab. 2.1: Durchschnittsgeschwindigkeit pro Linie und Richtung (Stand Nov. 2023)

Linie	Richtung*	v_{mittel} [km/h]	Linie	Richtung*	v_{mittel} [km/h]
1	0	14,28	⋮	⋮	⋮
1	1	14,62	40	0	13,33
2	0	15,81	40	1	13,68
2	1	15,21	41	0	15,09
5	0	14,26	41	1	14,84
5	1	13,89	42	0	14,91
6	0	14,66	42	1	13,13
6	1	13,83	43	0	15,68
9	0	13,65	43	1	14,80
9	1	13,64	44	0	14,45
10	0	16,16	44	1	13,88
10	1	15,16	46	0	13,85
11	0	17,22	46	1	14,33
11	1	16,99	49	0	15,99
18	0	14,94	49	1	15,59
18	1	13,95	52	0	16,36
25	0	18,10	52	1	15,86
25	1	18,20	60	0	18,58
26	0	19,57	60	1	18,22
26	1	19,39	62	0	16,66
30	0	18,68	62	1	16,18
30	1	17,36	71	0	17,76
31	0	18,07	71	1	17,22
31	1	17,34	BB	0	25,44
33	0	14,89	BB	1	25,75
33	1	13,46	D	0	14,88
37	0	14,43	D	1	14,93
37	1	14,98	O	0	14,27
38	0	14,99	O	1	14,10
38	1	15,08	U2Z	0	11,40
⋮	⋮	⋮	U2Z	1	12,99

* Fahrtrichtungen der Straßenbahnstrecken durch die Werte 0 (Hin) und 1 (Retour) angegeben

Die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit der Straßenbahnen in Wien (exklusive Badner Bahn) beläuft sich auf 15,44 km/h. Bei der Badner Bahn (BB) handelt es sich um eine Lokalbahn, die im Großraum Wien verkehrt. Diese erreicht dabei eine Durchschnittsgeschwindigkeit von über 25 km/h. Entlang der ersten 16 Stationen teilt sie sich die Strecke mit der Straßenbahn Wien und verläuft dann, ab der Wiener Stadtgrenze, als Eisenbahnabschnitt auf einem selbstständigen Gleiskörper, auf dem Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 80 km/h erreicht werden. Die Badner Bahn ist in ihrer Gesamtheit, einschließlich des Eisenbahnabschnitts, in Tabelle 2.1 angeführt.

2.3 Ermittlung der Geschwindigkeiten nach Echtzeitdaten

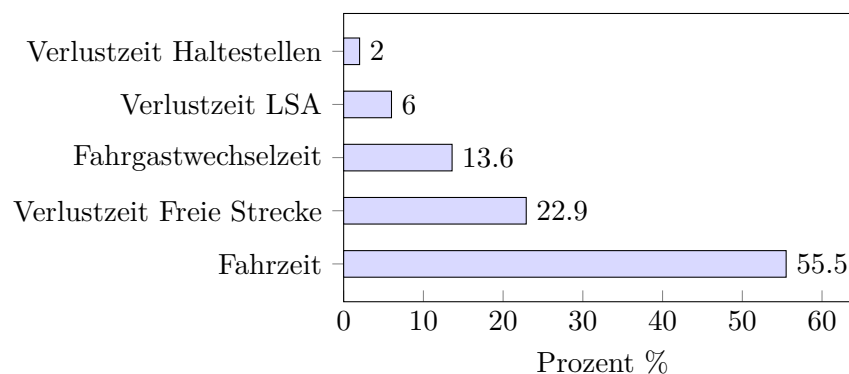
Mit GTFS-Realtime ist eine Erweiterung des in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Standards geschaffen worden, die speziell für die Bereitstellung von Echtzeitinformationen im öffentlichen Verkehr entwickelt wurde. Während GTFS-static ausschließlich statische Fahrplandaten beschreibt, ermöglicht GTFS Realtime die Übertragung dynamischer Informationen in Echtzeit. Das Format umfasst Daten wie aktuelle Fahrzeugpositionen, Verspätungen, Fahrzeugauslastung und Änderungen im Fahrplan. Die Wiener Linien arbeiten allerdings nicht mit diesem Standard, sondern haben mit Wiener-Linien-Realtime ihre eigene Schnittstelle geschaffen. Diese Echtzeitdatenschnittstelle enthält ausschließlich Informationen über Abfahrtszeiten („Abfahrtsmonitor“), Störungen und Aufzugausfälle. Bei der Berechnung der Geschwindigkeiten nach Echtzeitdaten mittels der Wiener-Linien-Realtime-Schnittstelle stößt man auf folgende Problemstellung: Es lassen sich Grundsätzlich keine vergangenen Daten abrufen. Jede Abfrage liefert nur eine Momentaufnahme bzw. eine Schätzung der tatsächlichen Abfahrt zum momentanen Zeitpunkt. Somit kann eine etwaige zu späte oder zu frühe Abfahrt ausschließlich zum Zeitpunkt der tatsächlichen Abfahrt exakt erfasst werden. Folglich müssten konstant Abfragen an allen Haltestellen einer Linie gesendet werden und anschließend die tatsächliche Abfahrt an der Haltestelle herausgefiltert werden. Darüber hinaus mangelt es an einer eindeutigen Fahrzeugidentifikation. Dies bedeutet, dass zur Berechnung der durchschnittlichen Geschwindigkeit eines Kurses lediglich die Option besteht, die Abfragen der Echtzeitschnittstelle mit den Fahrplandaten zu vergleichen und daraus Rückschlüsse auf den jeweiligen Kurs zu ziehen. Aufgrund der damit verbundenen Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten wurde auf die Durchführung einer Berechnung anhand der Echtzeitdatenschnittstelle verzichtet und stattdessen auf eine Literaturanalyse zurückgegriffen.

Im Zuge ihrer Bachelorarbeit hat Stroh [5] das Geschwindigkeitsprofil von ausgewählten Bus- und Straßenbahnlinien in Wien analysiert. Dazu wurden die Fahrzeuge mit GPS-Geräten ausgestattet, um kontinuierlich die Bewegungsprofile zu erfassen. Stroh ist dabei zu folgendem Ergebnis gekommen:

Tab. 2.2: Geschwindigkeiten nach GPS-Daten (Stand 2015) (adaptiert nach [5])

Linie	v_{mittel} [km/h]	kumulierte Häufigkeit [%]		
		$v \leq 1$ km/h	$v \leq 30$ km/h	$v \leq 50$ km/h
D	14,22	33,56	82,84	99,61
1	13,86	33,65	86,11	99,84
2	15,12	29,48	82,20	99,75
5	14,77	29,28	83,54	99,47
25	17,77	31,45	74,25	96,54
26	19,67	25,99	70,64	97,67
37	15,09	27,18	90,88	99,59
38	15,20	28,04	81,35	99,16
41	15,56	32,84	78,06	99,32
42	13,86	28,33	85,89	99,71
43	15,05	29,56	85,76	99,76
44	14,96	27,07	84,95	99,55
46	14,30	37,40	79,93	98,75
49	15,01	25,37	83,41	99,93
52	14,47	39,21	78,90	98,94
58	15,44	37,05	81,27	97,05

Anzumerken ist, dass diese Auswertung eine vergleichsweise geringe Stichprobengröße aufweist, mit lediglich etwa ein bis zwei Fahrten pro Linie. Darüber hinaus wurden die Messungen ausschließlich zu sogenannten „off-peak“-Zeiten durchgeführt, also außerhalb der Hauptverkehrszeiten. Dennoch ist eine gute Übereinstimmung mit den im vorigen Kapitel (2.2.2) ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten zu erkennen. Das bedeutet, dass der Fahrplan sehr gut den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst ist. Weiters lässt sich aus Tabelle 2.2 ableiten, dass etwa 31 % der gesamten Fahrzeit als Standzeiten ($v \leq 1$ km/h) anzusehen sind. Dieses Ergebnis wird auch von Dinkic in ihrer Diplomarbeit [6] bestätigt. In ihrer detaillierten Analyse der Wiener Straßenbahnlinie 6 hat sie die Gesamtbeförderungszeit einschließlich der anfallenden Verlustzeiten ermittelt. Aus Abbildung 2.3 geht hervor, dass die theoretisch mögliche Fahrzeit lediglich knapp über 55 % beträgt und der größte Anteil der Verlustzeit auf freier Strecke entsteht, was großteils auf Behinderungen durch den motorisierten Individualverkehr (MIV) zurückzuführen ist.

**Abb. 2.3:** Zusammensetzung der Gesamtfahrzeitzeit (adaptiert nach [6])

Pauschal lässt sich aus der Analyse einer einzelnen Straßenbahnlinie nicht auf die Gesamtheit aller Straßenbahnen schließen. Zur Identifizierung von Verlustzeiten und somit auch zur Ableitung möglicher Beschleunigungsmaßnahmen ist stets eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Linie, unter Berücksichtigung ihrer individuellen Charakteristika und betrieblichen Gegebenheiten, erforderlich. Abbildung 2.3 verdeutlicht jedoch die Relevanz der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Gesamtfahrzeit. Eine detaillierte Untersuchung dieser Faktoren ist erforderlich, um Problemstellen zu identifizieren und somit Verlustzeiten auf ein Minimum zu reduzieren.

2.4 Städtevergleich der Geschwindigkeiten von Straßenbahnen

Auch basierend auf GTFS-Datensätzen (vgl. Kapitel 2.2.1) war beabsichtigt, die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit in zahlreichen Städten in Österreich und anderen Ländern zu ermitteln. Allerdings stellt sich das in der Praxis als durchaus schwierig heraus. Hier treten zwei Problematiken auf. Einerseits ist die Bereitstellung von GTFS-Datensätzen für Verkehrsbetriebe keineswegs verpflichtend und andererseits sind nicht alle für die Berechnung erforderlichen Informationen, die in den einzelnen Entitäten (siehe Abb. 2.2) anzugeben sind, zwingend anzuführen. Letztere Problemstellung ergibt sich aus dem optionalen Attribut der `stop_times` Entität. In dieser sind unter anderem Informationen über Ankunfts- und Abfahrtszeitpunkt an den Haltestellen enthalten aber auch das optionale Attribut „`shape_dist_traveled`“, welches die kumulativen Abstände der Haltestellen beinhaltet. Aufgrund der optionalen Natur dieses Attributs, fehlt dieses oft oder ist mit dem Wert „0“ versehen, was eine Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit wie in Kapitel 2.2.2 unmöglich macht. Dennoch stellen jedenfalls die Verkehrsbetriebe in Österreich einheitlich für die Berechnung „vollständige“ Datensätze zur Verfügung. Die nachfolgende Tabelle gibt Auskunft über die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Straßenbahnnetze in relevanten Städten, die solche Datensätze bereitstellen.

Tab. 2.3: Durchschnittsgeschwindigkeiten verschiedener Städte (Stand Nov. 2023)

Stadt	Geschwindigkeit [km/h]
Österreich:	
Linz	21,02
Gmunden*	20,99
Graz	16,75
Innsbruck	16,56
Wien	15,78
Andere:	
Toulouse (FR)	19,40
Budapest (HU)	18,01
Zürich (CH)	17,55
Melbourne (AU)	16,78
Toronto (CA)	13,22
Palermo (IT)	12,52
Rom (IT)	12,29

* Die Traunseetram in Gmunden verkehrt als Lokalbahn mit einem Eisenbahnabschnitt zwischen Gmunden Seebahnhof und Bahnhof Vorchdorf.

Kapitel 3

Analyse der Störquellen

Eine umfassende Analyse der Reisezeit von Straßenbahnen erfordert eine sorgfältige Betrachtung der potenziellen Störeinflüsse, die auf diese Transportmittel einwirken können. In diesem Kapitel konzentrieren wir uns darauf, diese Störquellen zu identifizieren und zu erfassen, um ein tiefgreifendes Verständnis für die Faktoren zu entwickeln, die die Geschwindigkeit des Straßenbahnverkehrs beeinflussen. Grundsätzlich wird in interne und externe Störquellen unterschieden. Als interne Störquellen bezeichnet man Faktoren, die innerhalb des ÖPNV-Systems selbst auftreten und die Betriebsabläufe negativ beeinflussen können, wohingegen externe Störquellen außerhalb des direkten Einflussbereichs des ÖPNV-Betriebes liegen und nur in Abstimmung mit anderen Instanzen behoben werden können.

3.1 Interne Störquellen

3.1.1 Liniengestaltung

Die Gestaltung eines Verkehrsnetzes übt einen entscheidenden Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit aus. Linienbündelungen stellen eine strategische Maßnahme dar, um Ressourcen effizient zu nutzen, können jedoch insbesondere bei spurgebundenen Verkehrsmitteln zu wechselseitigen Beeinträchtigungen führen, wenn die Fahrtenhäufigkeit die Grenzwerte der Streckenleistungsfähigkeit übersteigt. Ohne Überholungsmöglichkeiten kann diese Situation zu Verzögerungen und einer reduzierten Betriebsgeschwindigkeit führen. Ebenfalls nachteilig kann sich ein engmaschiges Netz mit vielen Umsteigepunkten auswirken, da hierdurch Anschlussabwarten entstehen kann. Verspätungen auf einer Linie können sich auf andere Linien übertragen und somit das gesamte Netzwerk beeinflussen. Die Betrachtung dieser Faktoren bei der Netzgestaltung ist von großer Bedeutung, um eine optimale Reisegeschwindigkeit und einen zuverlässigen Betrieb im öffentlichen Nahverkehr sicherzustellen. [7]

3.1.2 Fahrweg

Als mögliche Ursache für eine Minderung der Reisegeschwindigkeit können auch Mängel im Verlauf des Fahrwegs oder ein Blockieren des Gleiskörpers durch den Individualverkehr ausgemacht werden. Besonders nachteilig wirken sich eingleisige Streckenabschnitte aus. Die gemeinsame Nutzung von Gleisen für beide Richtungen erfordert Ausweichstellen, welche oft das Verlangsamen oder Anhalten des Fahrzeugs erfordern. Zusätzlich können sich Betriebsstörungen aufgrund der gemeinsamen Nutzung negativ auf die zunächst ungestörte Gegenrichtung übertragen und somit zu weiteren Verzögerungen führen. Auch Mängel im baulichen Zustand oder eine unzureichende Breite des Fahrwegs führen zu Einschränkungen der zulässigen Fahrgeschwindigkeiten, da infolgedessen die angestrebte Sollgeschwindigkeit nicht mehr erreicht werden kann.

Ebenso direkte Auswirkungen auf die Geschwindigkeit und die Betriebseffizienz hat die Art der Streckenführung. Das Fehlen eines eigenen Gleiskörpers kann dazu beitragen, dass die Reisegeschwindigkeit erheblich eingeschränkt wird. Denn in diesem Fall wird der Fahrweg

der Straßenbahn mit dem des MIVs geteilt, was unweigerlich ein erhöhtes Konfliktpotenzial bedeutet und spezielle Verkehrsmanagement- und Vorrangregelungen erfordert, um eine optimale Geschwindigkeit zu gewährleisten. Hierbei werden folgende Unterscheidungen getroffen:

3.1.2.1 Straßenbündiger Gleiskörper unter Mitbenützung durch den motorisierten Individualverkehr

Hier wird der Straßenbahnbetrieb im Mischverkehr geführt. Als Folge dessen kommt es zu Behinderungen durch den Individualverkehr, was häufiges Bremsen, Verlangsamen oder Anhalten erfordert und die Reisegeschwindigkeit verlangsamen kann. Sind Parkplätze neben dem Fahrweg angeordnet, können Ein- und Ausparkvorgänge, Liefer- und Ladevorgänge oder fehlende Spurtreue bei geparkten Fahrzeugen weitere Behinderungen verursachen. [8, 9]

3.1.2.2 Straßenbündiger Gleiskörper mit Bodenmarkierung und/oder überfahrbarer Schwelle

Der Gleiskörper befindet sich auf demselben Niveau wie die Fahrbahnen für den motorisierten Individualverkehr und wird durch zwei Schwellenreihen oder Sperrlinien von diesen getrennt. Vorteil der Abgrenzung ist eine Minimierung der Wechselwirkungen mit dem Individualverkehr, und somit weniger Behinderungen. Allerdings ist bei Verkehrsbehinderungen ein Überfahren der Sperrlinien bzw. der Schwellenreihen durch den Individualverkehr möglich. [9]

3.1.2.3 Selbstständiger Gleiskörper

Ein eigener Gleiskörper für Straßenbahnen bezieht sich auf einen speziell reservierten Bereich entlang einer Straße, der exklusiv für den Schienenverkehr der Straßenbahnen vorgesehen ist. Dieser Bereich ist räumlich von anderen Verkehrsträgern getrennt. Grundsätzlich wird in selbstständige Gleiskörper in Mittellage und Seitenlage unterschieden. Vorteil des Systems ist, dass der Straßenbahnverkehr vom restlichen Verkehr isoliert wird, und somit Behinderungen durch den motorisierten Individualverkehr ausgeschlossen werden können. Lediglich bei Ausführung in Seitenlage kann es zu Störungen bei Grundstückszufahrten oder Behinderungen durch Ladetätigkeiten kommen, da letztere über die Gleistrasse erfolgen. [9]

3.1.3 Fahrplan

Die Festlegung des Fahrplans spielt eine wesentliche Rolle bei der Bestimmung der Gesamtreisezeit von Straßenbahnen. Eine großzügige Zeitplanung kann einerseits dazu führen, dass Fahrzeuge zu früh ankommen oder dass die Geschwindigkeit gedrosselt werden muss. Andererseits kann ein knapp bemessener Fahrplan zu Verzögerungen und damit zu Pulkbildung führen. Unter Pulkbildung versteht man das Phänomen, bei dem sich Schwankungen in den Zugfolgezeiten fortlaufend verstärken. Dies geschieht durch die schrittweise Akkumulation kleiner Verzögerungen, wodurch sich bei Straßenbahnen eine Ansammlung von Verspätungsminuten ergibt und der Abstand zwischen den Fahrzeugen zunimmt. Infolge der Verzögerungen wächst die Wartezeit an den Haltestellen, was zu einer Zunahme der wartenden Fahrgäste führt. Das erhöhte Fahrgastaufkommen führt zu längeren Fahrgastwechselzeiten, was wiederum zu weiteren Verzögerungen führt (vgl. Abb. 3.1). Gleichzeitig kann der nachfolgende Zug auf nahezu leere Haltestellen treffen und seinen Zeitplan einhalten, was schließlich dazu führt, dass er den verspäteten Zug einholt und ein Fahrzeugpulk entsteht.

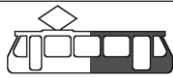
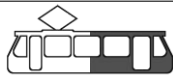
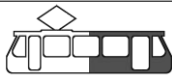
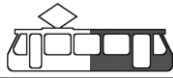
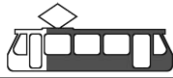
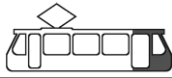
Normalzustand			
Verspätung des 2. Fahrzeugs			

Abb. 3.1: Folge von Verspätungen auf den Besetzungsgrad (adaptiert nach [8])

3.1.4 Haltestellen

Haltestellen sind entscheidende Punkte im Streckenverlauf, die dem Fahrgastwechsel dienen. Haltestellenabstände, Haltestellenform, Haltestellenanlage und der Zeitaufwand für den Fahrgastwechsel, welcher teilweise aus den Gegebenheiten der Haltestelle resultiert, können die Geschwindigkeit und die Gesamteffizienz des Straßenbahnverkehrs maßgeblich beeinflussen.

3.1.4.1 Haltestellabstände

Bei kurzen Haltestellenabständen tritt das Problem auf, dass bei definierter Linienlänge mehr Haltestellen als bei längeren Abständen angeordnet werden müssen. Hinsichtlich der Reisezeit entsteht so ein Fahrzeitmehrbedarf für Brems- und Beschleunigungsvorgänge und es kann gegebenenfalls die Streckenhöchstgeschwindigkeit zwischen den Halten nicht oder nur sehr kurz erreicht werden. Des Weiteren bringt laut der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) „jeder Halt gegenüber einer Durchfahrt ohne Halt einen Fahrzeitmehrbedarf von mindestens 30 Sekunden“. [8, S. 7]

Größere Haltestellenabstände haben wiederum den Vorteil, dass auf längeren Abschnitten konstant mit der erlaubten Streckenhöchstgeschwindigkeit gefahren werden kann, was zu einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit führt. Allerdings resultiert aus den größeren Abständen auch eine höhere Auslastung, was sich wiederum negativ auf die Fahrgastwechselzeit auswirkt. Werden zusätzlich auch die Zugangswege zu den Haltestellen länger, resultiert dies in einer erhöhten Fahrgastreisezeit.

3.1.4.2 Haltestellenform

Die Ausführungsart der Haltestelle selbst übt wesentlichen Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit. Insofern kommt auch diesen in Bezug auf Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit besondere Bedeutung zu. Grundsätzlich kann im Straßenbahnverkehr in Haltestellen am Fahrbahnrand und in Mittellage unterschieden werden. Als besonders problematisch erweisen sich dabei Haltestellen mit Notwendigkeit der Fahrbahnquerung.

Haltestellen am Fahrbahnrand

Bei Haltestellen am Fahrbahnrand, oft auch als Kaphaltestellen ausgeführt, kommt es in der Regel zu keiner Beeinträchtigung beim Fahrgastwechsel, da ein sicheres und rasches Ein- und Aussteigen direkt möglich ist. Wird allerdings der motorisierte Individualverkehr ebenfalls auf dem Fahrweg der Straßenbahn geführt, kann es zu Behinderungen durch Fahrzeuge im Haltestellenbereich kommen, vor allem wenn dieser im Kreuzungsbereich angeordnet ist.

Inselhaltestellen

Bei Inselhaltestellen befindet sich der Haltestellenbereich zwischen den Fahrbahnen des Individualverkehrs. Wenn ein separater Gleiskörper vorhanden ist, treten in der Regel keine Probleme im Zusammenhang mit dem Individualverkehr (IV) auf. Andernfalls ist zu erwarten, dass es im Bereich der Haltestellen aufgrund des IVs zu Behinderungen kommt. Darüber hinaus sind die verfügbaren Bewegungsflächen auf Inselhaltestellen oft begrenzt. Dies kann zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Fahrgäste auf der Haltestelle führen und somit die Dauer des Fahrgastwechsels verlängern. Weiters kommt es beim betreten der Haltestelle zu Problemen zwischen Kraftfahrzeugen und Fahrgästen, da bei Zu- und Abgang die Fahrbahn gequert werden muss. Besonderes Augenmerk muss dabei auf Nachläufer gelegt werden.

Haltestellen mit Fahrbahnquerung

Bei dieser Art von Haltestelle liegt die Fahrbahn zwischen dem Wartebereich der Haltestelle und der Gleistrasse der Straßenbahn. Fahrgäste steigen direkt auf die Fahrbahn aus, bzw. müssen die Fahrbahn queren, um einzusteigen. Dies führt unweigerlich zu einem erhöhtem Konfliktpotential. Laut Straßenverkehrsordnung (StVO) darf an stehenden oder in die Haltestelle einfahrenden Straßenbahnen, auf der Seite, die für das Ein- und Aussteigen bestimmt ist, nicht vorbeigefahren werden. Es darf erst in Schrittgeschwindigkeit weitergefahren werden, wenn alle Türen wieder geschlossen und es sich vergewissert wurde, dass keine Fahrgäste mehr zulaufen (§ 17 Absatz 2 StVO). Somit sollte es in der Theorie zu keinen Behinderungen der Passagiere kommen. In der Praxis allerdings, tritt manchmal der Fall ein, dass Fahrzeuge bereits im Haltestellenbereich stehen, bevor die Straßenbahn einfährt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Haltestelle unmittelbar vor einem Kreuzungsbereich angeordnet ist. Weiters können schlicht undisziplinierte Kraftfahrzeugführer eine Haltezeitverlängerung herbeiführen, wenn trotz des Verbots in den Haltestellenbereich eingefahren wird. Dies wird besonders durch schlecht erkennbare Haltestellen begünstigt. Nicht nur der motorisierte Individualverkehr stört den Fahrgastwechsel, sondern auch die längeren Zu- und Abwege wirken sich negativ auf die Fahrgastwechselzeit und somit auf die Reisezeit aus.

3.1.4.3 Haltestellenanlage

Eine ungleichmäßige Verteilung der Fahrgäste an der Haltestelle hat erheblichen Einfluss auf die Fahrgastwechselzeit. Laut Weidmann [10] wird diese durch zwei Variablen gesteuert: der Anordnung der Zu- und Abgänge und der Ausstattung der Haltestellenflächen. Im Straßenbahnverkehr ist allerdings der Zu- bzw. Abgang oft nicht präzise definiert. Zusätzlich ist die Dimension des Systems so klein, dass sich die Fahrgäste nicht nach den Gegebenheiten der Zielhaltestelle positionieren, da kein wesentlicher Reisezeitvorteil erzielt wird. Letztendlich ist die Ausstattung der Haltestelle der maßgebende Faktor. So kann beispielsweise ein schlecht positionierter Fahrgastunterstand die Reisezeit beeinflussen, wenn die Wege zum haltenden Fahrzeug zu lange sind. Ebenso kommt es im Bereich der Fahrgastunterstände, vor allem bei Schlechtwetter, zu Fahrgastkonzentrationen, was dazu führt, dass nicht alle Türen der Straßenbahn gleichmäßig genutzt werden und es somit zu einem erhöhtem Zeitbedarf für den Fahrgastwechsel kommt. Auch Hindernisse im Bereich der Haltestelle sind problematisch. So können beispielsweise Ticket-Automaten, Masten, Bäume, Schilder, Sitzbänke oder ähnliches den Fahrgastfluss behindern, besonders wenn diese im Türbereich situiert sind.

Des Weiteren erwähnt Weidmann [10], dass auf die Höhendifferenz zwischen Haltestelle und Fahrzeug Rücksicht genommen werden muss. Große Niveauunterschiede oder Spaltbreiten

verlängern die Fahrgastwechselzeiten erheblich. Messungen haben ergeben, dass ein Spalt von mehr als 15 cm Breite pro Fahrgast einen Zeitmehrbedarf von 0,5 s bedeutet [11].

3.1.5 Fahrzeug

Fahrzeiten verlängern sich, wenn das Fahrzeug selbst nicht den betrieblichen Anforderungen entspricht. Diese Problematik tritt auf, wenn die Motoren nicht die notwendige Leistungstärke aufweisen, um den topografischen Gegebenheiten angemessen zu begegnen oder wenn Fahrzeugkonzepte schlichtweg unzureichend durchdacht sind. Hinsichtlich der Fahrzeugkonzeption gilt es zu berücksichtigen, dass die Haltestellenaufenthaltszeit ein wesentlicher Faktor der Beförderungszeit ist und somit einzelne Komponenten der Fahrzeuge diese auch verlängern können. So beeinflusst die Ausführung des Fahrzeugs als Hoch- oder Niederflurfahrzeug die Dauer des Fahrgastwechsels. Bei Hochflurfahrzeugen befindet sich der Fahrgastraum auf einer höheren Ebene, was für Fahrgäste ein zusätzliches Hindernis darstellt, welches beim Ein- und Ausstiegsvorgang überwunden werden muss.

3.1.5.1 Fahrzeugtür

Eine der wesentlichsten Komponenten des Fahrzeugs ist die Fahrzeugtür. Denn diese ist das ausschlaggebende Element für den Fahrgastwechsel und beeinflusst durch Faktoren wie die Anordnung und Anzahl der Türen, Türbreiten, Türöffnungs- und -schließzeiten, Türsteuerungs- und -sicherungstechnik sowie die Anzahl und Höhe der Stufen im Türbereich dessen Dauer. In einer Untersuchung von Weidmann [12] wurden Durchschnittswerte für die Zeiten des Fahrgastwechsels (Zeitbedarf in Sekunden pro Person) bezogen auf Türbreite und Einstiegsbauart ermittelt:

Tab. 3.1: Fahrgastwechselzahl in Abhängigkeit der Türbreite [12]

Einstiegsbauart	Türabstand	Spurzahl und Türbreite		Fahrgastwechselzahl [s/P]				
				5P	10P	20P	50P	100P
Ebener Einstieg	groß	1	800 mm	1,89	1,69	1,51	1,29	-
		2	1250 mm	1,30	1,16	1,04	0,89	-
		3	1900 mm	0,92	0,82	0,73	0,63	0,56
	klein	1	800 mm	1,47	1,43	1,38	1,33	-
		2	1250 mm	0,96	0,93	0,90	0,88	-
		3	1900 mm	0,65	0,63	0,61	0,58	0,56
Treppen Einstieg	groß	1	800 mm	2,56	2,28	2,04	1,75	-
		2	1250 mm	1,76	1,57	1,40	1,21	-
		3	1900 mm	1,24	1,11	0,99	0,85	0,76
	klein	1	800 mm	1,99	1,93	1,87	1,80	-
		2	1250 mm	1,30	1,26	1,22	1,17	-
		3	1900 mm	0,87	0,85	0,82	0,79	0,76

Als ebene Einstiege werden Einstiege mit bis zu 25 cm Höhendifferenz bezeichnet, als kleine Türabstände solche unter 10 m.

In Tabelle 3.1 wird deutlich ersichtlich, dass schmale Türbreiten und das Vorhandensein von Treppen im Einstiegsbereich den pro Person benötigten Zeitaufwand für den Fahrgastwechsel erhöhen. Aber auch die Bauart der Tür selbst kann einen Zeitmehrbedarf bedeuten. Grundsätzlich wird hinsichtlich der Türmechanik in Schwenk-, Falt-, Innenschwenk- und Außenschwenktüren unterschieden. Innenschwenktüren schwenken beim Öffnen in das Fahrzeuginnere. Es bedarf also einer Nutzfläche im Fahrzeug, die ausschließlich für die Tür reserviert ist. Wird dieser Bereich

beispielsweise durch Fahrgäste aufgrund von sehr hoher Auslastung gestört, so kann die Tür nicht ordnungsgemäß öffnen oder schließen und es kommt zu einer Verlängerung des Haltestellenaufenthalts. Ähnliches gilt für die Sicherungstechnik der Türen. Bei Lichtschrankensystemen tritt das Problem auf, dass es zu Fehlmeldungen kommt, wenn sich Gegenstände im Bereich des Lichtschranks befinden. In diesem Fall öffnet die Tür nochmal und behindert die Weiterfahrt.

3.1.5.2 Fahrzeuggestaltung

Aus fahrzeugtechnischer Sicht ist auch auf die Gestaltung der Innenräume zu achten. Das Fehlen von Ticketautomaten und Entwertern verlängert die Haltestellenaufenthaltszeit erheblich, da dann meist das Fahrpersonal für diese Aufgaben zuständig ist, und die Fahrt erst fortgesetzt werden kann, wenn dieser Vorgang abgeschlossen ist. Weiters erschweren schlecht dimensionierte Gangbreiten Längsbewegungen im Inneren des Fahrzeugs. [8]

3.1.5.3 Fahrzeugwartung und -verfügbarkeit

Schlecht gewartete Straßenbahnen sind anfälliger für technische Problemen und Ausfälle, was zu einer Störung des regulären Betriebs und einer insgesamt niedrigeren Zuverlässigkeit führen kann. Ist es zu einer Störung gekommen, ist ebenso die Fahrzeugverfügbarkeit und der Fahrzeugtyp ausschlaggebend. Erfordert beispielsweise eine technische Störung einen Zugwechsel, so kann eine geringe Kapazität, aufgrund eines anderen Fahrzeugtyps des Folgezugs zu Problemen führen.

3.2 Externe Störquellen

3.2.1 Verhalten der Fahrgäste

Unter normalen (Wiener) Umständen ist es üblich, dass Fahrgäste, die in ein öffentliches Verkehrsmittel einsteigen möchten, warten, bis alle aussteigenden Fahrgäste das Fahrzeug verlassen haben. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die einsteigenden Fahrgäste Sichtkontakt zu den aussteigenden Fahrgästen haben können. Dieses Verhalten ist jedoch auch von der damit verbundenen Stressbelastung abhängig. Wenn die einsteigenden Fahrgäste besorgt sind, dass der Zug ohne sie abfahren könnte oder dass es nicht ausreichend Sitzplätze gibt, steigt das Stresslevel, und das Prinzip des „guten Verhaltens“ wird nach und nach aufgegeben. Das erste Anzeichen hierfür zeigt sich, wenn die einsteigenden Fahrgäste beginnen, sich immer mehr dem Türbereich zu nähern und sich letztendlich in die Straßenbahn drängen. Dies hat zur Folge, dass der effektiv nutzbare Türquerschnitt verringert wird (vgl. Abb. 3.2) und somit die Fahrgastwechselzeit verlängert. [11]

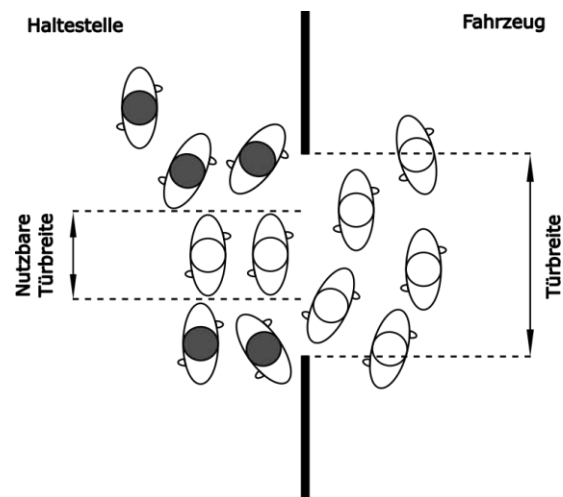


Abb. 3.2: Effektiv nutzbare Türbreite (in Anlehnung an [11])

Eine ähnliche Problematik tritt auf, wenn sich Fahrgäste im Auffangbereich der Straßenbahn aufhalten, ohne am Fahrgastwechsel teilnehmen zu wollen. Weidmann [12] hat festgestellt, dass ein erhöhter Besetzungsgrad eines Fahrzeugs zu einer verstärkten Auslastung der Stehplatzflächen im Bereich der Türen führt. Dies verringert wiederum die Leistungsfähigkeit der Türen und führt zu längeren Fahrgastwechselzeiten. Laut Heinz [11] gilt als Faustregel, dass die Dichte an Fahrgästen mit zunehmendem Abstand zur Eingangstür abnimmt. Dies liegt daran, dass niemand riskieren will, den Ausstieg zu verpassen, weil der Türbereich blockiert ist und sich deshalb bereits nahe diesem anordnet. Begünstigt wird dieses Phänomen ebenfalls dadurch, dass auf große Auffangbereiche oft schmale Gänge folgen. Heinz [11] erläutert auch, dass Menschen dazu neigen, eine geordnete Schlange zu bilden, wenn erkannt wird, dass aufgrund eines Hindernisses jeweils nur ein Fahrgast passieren kann. Dies ist auch abhängig vom Stresslevel der Fahrgäste. Denn wenn das Stresslevel steigt und Hektik ausbricht oder wenn die Befürchtung besteht, dass der Zug ohne sie abfährt oder dass kein Sitzplatz mehr verfügbar ist, wird aus der geordneten Schlange schnell ein ungeordnetes Gedränge. Daraus resultiert eine vergleichbare Situation wie in Abbildung 3.2, da sich nun übermäßig viele Personen im Türbereich aufhalten. Dies führt zu einer Verringerung der effektiv nutzbaren Türbreite, stört den Fahrgastfluss erheblich und verlängert somit die Dauer des Fahrgastwechsels (vgl. Abb. 3.3).

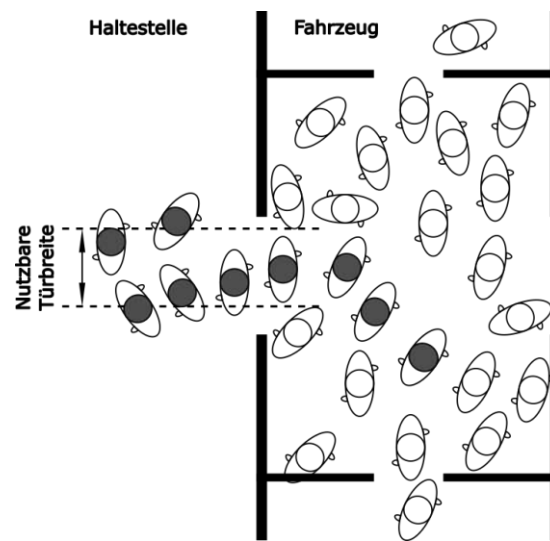


Abb. 3.3: Fahrgastdichte im Auffangbereich (in Anlehnung an [11])

3.2.2 Kreuzungsbereiche

Wenn sich verschiedene Verkehrsachsen an einem Knotenpunkt treffen, erhöht sich das Konfliktpotenzial erheblich, da an diesen Straßenbahnen und MIV zwangsläufig aufeinandertreffen. Diese Konfliktbereiche lassen sich grundlegend in zwei Gruppen einteilen: Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen und Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen.

Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen

Diese Knotenpunkte sind durch das Fehlen von Lichtsignalanlagen definiert. Es gelten prinzipiell die Verkehrsregeln des jeweiligen Landes. Hier treten oft Behinderungen auf, wenn die Vorfahrtsregelungen im Kreuzungsbereich nicht zugunsten der Straßenbahn ausgelegt sind. So kommt es beispielsweise beim Linksabbiegen zu Problemen, da vorfahrt-berechtigte Verkehrsströme abgewartet werden müssen. Eine ähnliche Situation entsteht, wenn der Fahrweg der Straßenbahn im Mischverkehr mit dem MIV geführt wird, und der Zug aufgrund von Linksabbiegern, die auf das Freiwerden der Fahrspur warten, zum Stillstand kommt. [8]

Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen

Mit Lichtsignalanlagen (LSAs) lässt sich das Verhalten der Verkehrsteilnehmer steuern. Allerdings ist das nur von Vorteil, wenn dies auch zugunsten des Straßenbahnverkehrs geschieht. Die Zeitverluste im Straßenbahnverkehr werden von verschiedenen Faktoren maßgeblich beeinflusst, darunter die Ausbauform, die Lichtsignalanlagen-Steuerung und der Verkehrsablauf.

Behinderungen, die aus der Ausbauform eines signalisierten Verkehrsknotens resultieren, treten oft aufgrund von umfangreichen Ausbaumaßnahmen auf. Diese erfordern in der Regel sehr lange Intervalle und komplizierte Signalprogramme, was für den öffentlichen Nahverkehr in der Regel kontraproduktiv ist. [8]

Signalprogramme, die auf Festzeitsteuerungen basieren, sind prinzipiell nicht in der Lage, reibungslose Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Verkehrsabhängig gesteuerte Signalanlagen haben die Fähigkeit, Verkehrsbehinderungen zu verringern, können sie jedoch niemals gänzlich

ausschließen. Durch Defizite im Signalprogramm und in der technischen Ausstattung können folgende Störungen hervorgerufen werden:

- Freigabezeichen zum falschen Zeitpunkt, zu kurz oder zu selten
- Koordinierung der Freigabezeiten ist nicht auf den ÖPNV abgestimmt
- Die zeitliche und räumliche Positionierung der An- und Abmeldepunkte ist nicht optimal auf den Fahrtverlauf abgestimmt.
- An- und Abmeldesysteme erfassen nicht alle Fahrzeuge

Wird beispielsweise die „Grüne Welle“ für den MIV konzipiert, liegt die Progressionsgeschwindigkeit dieser meist über der Beförderungsgeschwindigkeit der Straßenbahn und wirkt sich somit nachteilig auf dessen Geschwindigkeit aus. [8]

Darüber hinaus sind an LSA die Bedürfnisse aller Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass für Fahrzeuge des MIVs, Radfahrer oder Fußgänger, trotz Bevorrechtigungsmaßnahmen des ÖPNV ein Mindestmaß an Qualität gewährleistet werden muss. So kann beispielsweise durch die Vorgabe von Mindestfreigabe- bzw. Mindestsperrzeiten oder maximalen Wartezeiten eine verlustfreie Durchfahrt der Straßenbahn gestört werden.

Durch Überlastungen des Knotenpunkts durch den Individualverkehr und/oder den öffentlichen Nahverkehr kann der Verkehrsablauf gestört werden. Insbesondere bei Linksabbiegern, die über keine eigene Fahrspur verfügen oder denen keine angemessenen Signalphasen zugewiesen wurden, können Verzögerungen auftreten. Zusätzlich können Verzögerungen im Verkehrsfluss auftreten, wenn abbiegende Verkehrsteilnehmer auf querende Fußgänger warten müssen. [8]

3.2.3 Abgestellte Fahrzeuge am Streckenrand

Widerrechtlich abgestellte Fahrzeuge können den Betrieb von Straßenbahnen erheblich beeinträchtigen, indem sie den Fahrweg der Straßenbahn blockieren und dadurch zu Verzögerungen im Fahrplan führen. Dies kann zu längeren Wartezeiten und unvorhersehbaren Störungen im Betriebsablauf führen. Laut einer Erhebung der Wiener Linien im Jahr 2022 wurde die Straßenbahn insgesamt 1.535 Mal blockiert [13]. Das entspricht etwa vier Blockierungen pro Tag. Aufgrund der dadurch notwendigen Feuerwehr- und Abschlepp-Einsätze, kommt es teilweise zu erheblichen Verzögerungen von bis zu 40 Minuten. Neben widerrechtlich abgestellten Fahrzeugen können auch ordnungsgemäße Parkstände am Streckenrand zu Problemen führen. Hierbei sind besonders zwei Szenarien in Bezug auf die Reisegeschwindigkeit von Bedeutung. Einerseits können Ein- und Ausparkvorgänge die Fahrt der Straßenbahn behindern. Andererseits, wenn die Parkplätze sehr nah am Fahrweg der Straßenbahn angeordnet sind, können unsachgemäß abgestellte Fahrzeuge in den Fahrweg der Straßenbahn hineinragen und so die Weiterfahrt behindern.

3.3 Trassierung

Die Trassierung, welche die konkrete Streckenführung und Ausgestaltung der Gleisanlagen umfasst, stellt einen entscheidenden limitierenden Faktor für die Reisegeschwindigkeit dar. Ihre Zuordnung zu internen oder externen Störquellen ist nicht immer eindeutig, da sie einerseits durch die Auswahl der Trassierungselemente beeinflusst werden kann, andererseits jedoch durch Zwangspunkte, städtebauliche Gegebenheiten und Topografie teilweise vorgegeben ist. Dies führt häufig zu engen Bogenradien, die aus fahrzeugdynamischen Gründen nicht mit der maximal zulässigen Streckengeschwindigkeit befahren werden können. Laut Trassierungsvorschrift für die Wiener Straßenbahnen der Wiener Linien [14] müssen Gleisbögen so angelegt sein, dass die nicht ausgeglichenen Seitenbeschleunigungen und deren Änderung je Zeiteinheit möglichst gering sind. Dabei dürfen die aus folgender Tabelle geltenden Grenzwerte, für Gleise, die im Regelfall mit Fahrgästen befahren werden, nicht überschritten werden:

Tab. 3.2: Maximal zulässige Seitenbeschleunigung in Gleisbögen

Seitenbeschleunigung a_q	
nicht ausgeglichene Seitenbeschleunigung	$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$
nicht ausgeglichene Seitenbeschleunigung je Zeiteinheit (Querruck)	$\leq 0,7 \text{ m/s}^3$
nicht ausgeglichene Seitenbeschleunigung bei unvermittelten Krümmungsänderungen	$\leq 0,7 \text{ m/s}^2$

Anhand dieser Grenzwerte lässt sich die maximale Geschwindigkeit, mit der ein Bogen direkt aus einer Geraden befahren werden kann, bei bekanntem Bogenradius wie folgt ableiten:

$$V_{zul} = \sqrt{\frac{R \cdot I}{11,8}} \quad (3.1)$$

mit:

V_{zul} = zulässige Geschwindigkeit [km/h]

R = Bogenradius [m]

I = Überhöhungsfehlbetrag [mm] ($I=110$ mm bei unmittelbarem Krümmungswechsel)

Bei einem Bogenradius von 30 m beläuft sich die zulässige Geschwindigkeit nach Formel 3.1 lediglich auf 16,72 km/h. Bei Straßenbahnen kommen gelegentlich Krümmungshalbmesser von bis zu 12 m zum Einsatz [15], was folglich erheblich zu einer Geschwindigkeitsreduktion beiträgt.

Allerdings kann durch positive Überhöhungen, eine Reduktion der nicht ausgeglichenen Seitenbeschleunigung a_q erreicht werden. Als positive Überhöhung ist der gegen die Waagrechte gemessene Höhenunterschied zwischen den Fahrschienen zu verstehen, wobei, im Bogen, die äußere Schiene höher liegt als die innere. Weiters lässt sich die abrupt auftretende Seitenbeschleunigung (Querruck) im Übergang von Gerade und Kreisbogen durch die Anordnung von Übergangsbögen vermeiden. Formel 3.1 lässt sich durch diese beiden Maßnahmen erweitern zu

$$V_{zul} = \sqrt{\frac{R \cdot (I + D)}{11,8}} \quad (3.2)$$

mit:

I = Überhöhungsfehlbetrag [mm] ($I=153$ mm bei stetigem Krümmungswechsel)

D = Überhöhung [mm]

Durch die Einführung von Überhöhungen und Übergangsbögen lässt sich so die zulässige Geschwindigkeit in einem Bogen mit dem Radius von 30 m unter der Annahme einer maximal zulässigen Überhöhung von 150 mm von 16,72 km/h auf 27,75 km/h erhöhen. Jedoch ist zu beachten, dass Überhöhungen ausschließlich bei der Anordnung eigener Fahrwege umgesetzt werden können. Im Mischverkehr ist dies daher nicht realisierbar.

Neben den Gleisbögen spielt auch die Längsneigung bei der Wahl bzw. der möglichen Geschwindigkeit eine Rolle. Längsneigungen sind immer mit der Steigfähigkeit und dem Bremsvermögen der Fahrzeuge abzustimmen. Einerseits kann eine unzureichende Motorleistung bei Steigungen zu einer verlangsamen Fahrt führen und andererseits muss bei Bergabfahrten auf den verlängerten Bremsweg Rücksicht genommen werden, was ebenfalls in einer Geschwindigkeitsreduktion resultieren kann. Da Längsneigungen in der Regel nicht über die gesamte Strecke konstant sind, treten Neigungswechsel auf. Ist der Unterschied zweier aufeinander folgender Neigungen größer als 2,5 ‰, so ist der Neigungswechsel aus fahrdynamischen Gründen auszurunden. Dabei ist der Radius der Ausrundung abhängig von der zulässigen Geschwindigkeit (siehe Formel 3.3).

$$R_a \geq \max\{0,4 \cdot V_{zul}^2; 1000\} \quad (3.3)$$

mit:

R_a = Ausrundungsradius [m]

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass eingeschränkte Möglichkeiten den Ausrundungsradius in ausreichender Größe umzusetzen unweigerlich zu einer Reduktion der Geschwindigkeit führen.

Im Kontext der Trassierung ist es ebenso von Bedeutung, eine ausreichende Sichtweite zu gewährleisten. Begrenzte Sichtverhältnisse führen häufig zu einer Verlangsamung der Fahrt. Nach [14] ist die Sichtweite als ausreichend zu betrachten, wenn von der Fahrerposition aus eine den gesamten Anhalteweg umfassende Sicht auf die vom Fahrzeug beanspruchte Breite (Lichtraumumgrenzung) vorliegt. Der Anhalteweg s kann näherungsweise mit einer Bremsverzögerung von $a = 1,0 \text{ m/s}^2$ und der Berücksichtigung einer Reaktions- bzw. Bremssystemansprechzeit von 3 Sekunden wie folgt berechnet werden:

$$s = \frac{V}{1,2} + \frac{V^2}{25,92} + 2 \quad (3.4)$$

In Tabelle 3.3 ist dabei sehr gut ersichtlich, dass geringe Sichtweiten auch in niedrigen Geschwindigkeiten resultieren.

Tab. 3.3: Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Sichtweite

Sichtweite [m]	Geschwindigkeit [km/h]
34	20
62	30
97	40
140	50
191	60
249	70

Kapitel 4

Reduktion von Verlustzeiten

Die oberste Priorität von Optimierungsmaßnahmen sollte grundsätzlich darauf abzielen, Verlustzeiten zu minimieren. Deshalb gilt es zuerst zu ermitteln, wie sich die Verlustzeit zusammensetzt, um gezielt Maßnahmen setzen zu können. Laut Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [16] setzt sich diese aus drei wesentlichen Bestandteilen zusammen: Standzeiten an festgelegten Knotenpunkten (t_{KP}), Standzeiten auf der Strecke außerhalb festgelegter Knotenpunkte (t_{SS}) und einem dynamischen Anteil (t_D) aufgrund der betrieblichen Gegebenheiten. Unter festgelegten Knotenpunkten werden beispielsweise Haltestellen oder Lichtsignalanlagen verstanden. Die dynamische Verlustzeit lässt sich durch Vergleich der tatsächlichen Fahrzeit mit der theoretisch möglichen idealen Fahrzeit ermitteln. Die gesamte Verlustzeit (t_{VZ}) kann als Summe dieser drei Bestandteile angesehen werden.

$$t_{VZ} = t_{SS} + t_{KP} + t_D \tag{4.1}$$

4.1 Standzeiten an Knotenpunkten

Aufenthaltszeiten an Knotenpunkten müssen nicht zwangsläufig als Verlustzeiten betrachtet werden, da bestimmte Unterbrechungen der Fahrt, wie beispielsweise an Haltestellen für den Fahrgastwechsel, erforderlich sind, um einen zweckmäßigen Betrieb aufrechtzuerhalten. Dennoch können Maßnahmen ergriffen werden, um die Standzeiten zu minimieren und Verlustzeiten während dieser teilweise notwendigen Aufenthalte zu reduzieren.

4.1.1 Haltezeit an Haltestellen

Laut Buchmüller et al. [17] lässt sich die Haltezeit an Haltestellen in Teilprozesse unterteilen: Zeit für die Türentriegelung, der Türöffnungszeit, Fahrgastwechselzeit und der Türschließzeit.

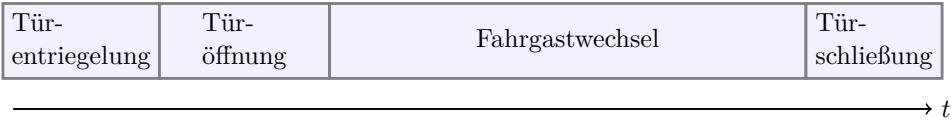


Abb. 4.1: Haltezeit (adaptiert nach [17])

Die Haltezeit beginnt ab dem Zeitpunkt der Entriegelung der Türen und endet, wenn alle Türen eines Zuges wieder sicher geschlossen sind. Der Fahrgastwechsel beansprucht dabei den längsten Zeitraum und bietet das größte Optimierungspotenzial. Dieser lässt sich durch gezielte Anpassung folgender Parameter optimieren:

4.1.1.1 Haltestellenform

Bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Platzierung einer Haltestelle im Straßenraum, sei es im Seitenraum oder in Insellage, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Hierbei sind insbesondere die Charakteristik des Straßenraums sowie die verfügbaren Raum- und Verkehrsbedingungen von Bedeutung. Wird die Straßenbahn im Mischverkehr geführt, sind prinzipiell Haltestellen in Seitenlage empfehlenswert. Allerdings gilt es hier zu differenzieren, ob für den Vorgang des Fahrgastwechsels ein Queren der Fahrspur des MIVs notwendig ist oder nicht.

Haltestellen in Seitenlage

Im Kontext von Haltestellen in Seitenlage sind zwei Arten zu unterscheiden: Haltestellen am Fahrbahnrand und Kaphaltestellen.

Bei Haltestellen am Fahrbahnrand (siehe Abbildung 4.2) wird in der Regel unmittelbar an diesem auch gehalten. Hier ist es zielführend, die Gleise aus der Fahrbahnmitte an die Bahnsteigkante zu verschwenken, um den Spalt zwischen Bahnsteig und Fahrzeug zu minimieren. Um dennoch eine schlanke Trassierung zu erreichen, empfiehlt es sich, die Haltestelle leicht in den Straßenraum zu versetzen. Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [18] empfiehlt weiters, dass von Parkplätzen am Fahrbahnrand abgesehen wird, da diese einerseits eine größere Gleisverziehung erfordern würden und andererseits Störungen durch Kraftfahrzeuge nicht auszuschließen sind.

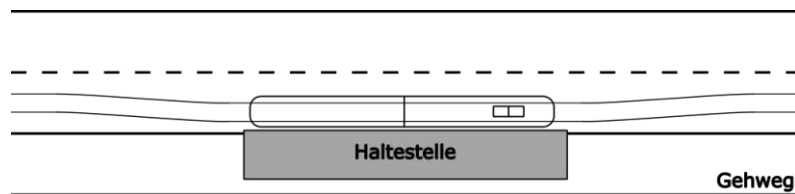


Abb. 4.2: Haltestelle am Fahrbahnrand

Als Kaphaltestelle (Abb. 4.3) wird eine Haltestelle bezeichnet, bei der der Fahrbahnrand bis an den durchgehenden Fahrstreifen an den Verkehrsraum der Straßenbahn vorgezogen ist. [19] Im Allgemeinen ermöglicht diese Ausführung dem Nahverkehrsfahrzeug ein geradliniges Ein- und Ausfahren in bzw. aus dem Haltestellenbereich. Besonders bei großem Parkdruck erweisen sich Haltestellenkaps gegenüber Haltestellen in Seitenlage als vorteilhaft, da in unmittelbarer Nähe Parkplätze angeordnet werden können. Dennoch sollten Parkplätze in unmittelbarer Nähe von ÖPNV-Anlagen immer als potenzielle Störquelle angesehen werden. Ein großer Vorteil von Kaphaltestellen ist die vergrößerte Wartefläche. Diese ist nicht nur förderlich für den Fahrgastwechsel, sondern ermöglicht auch das Aufstellen von beispielsweise Witterungsschutz oder Ticketautomaten, ohne dabei die Bewegungsfreiheit der Fahrgäste einzuschränken. [18]

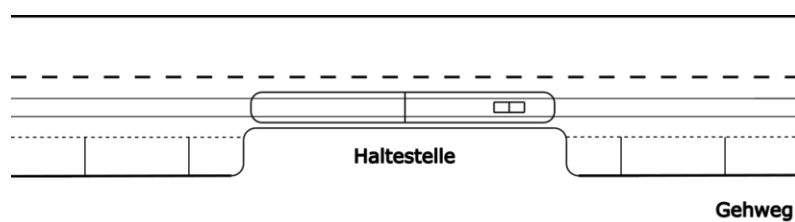


Abb. 4.3: Haltestellenkap

Generell gilt es, das Linksvorbeifahren an haltenden Fahrzeugen zu unterbinden. Neben Markierungslösungen empfiehlt sich hier die Errichtung von Mittelinseln. Mittelinseln bedienen auch einen sicherheitstechnischen Aspekt, denn diese erfüllen gleichzeitig die Funktion einer Überquerungshilfe, um die Sicherheit für ein- und aussteigende Fahrgäste zu erhöhen.

Fahrbahnquerung

Eine besondere Situation ergibt sich bei Haltestellen mit Erfordernis der Fahrbahnquerung (Abb. 4.4) für den Fahrgastwechsel. Diese Bauart ist hinsichtlich der Verlustzeitoptimierung grundsätzlich zu vermeiden. Denn allein aufgrund der längeren Wegbeziehungen für den Fahrgastwechsel und der potenziellen Störungen durch den MIV ist der Zeitaufwand für den Fahrgastwechsel deutlich höher als bei anderen Haltestellendesigns. Ist im Straßenraum genügend Platz vorhanden, sollten Haltestelleninseln (Abschnitt Haltestellen in Insellage) in Betracht gezogen werden, um eine Fahrbahnquerung auszuschließen. Lässt sich ein Ein- und Aussteigen auf der Fahrbahn nicht vermeiden, bieten sich dennoch Möglichkeiten an, diesen Vorgang sicherer und störungsfreier zu gestalten. Generell gilt es, den gesamten Haltestellenbereich frei von parkenden, haltenden oder rückstauenden Fahrzeugen zu halten. Durch Rechtsvorschriften sollte sichergestellt sein, dass an einem in die Haltestelle einfahrenden oder dort stehenden Fahrzeug nicht vorbeigefahren werden darf. In Österreich ist es beispielsweise Fahrgästen erlaubt die Fahrbahn bereits beim Einfahren des Straßenbahnfahrzeugs in die Haltestelle zu betreten. Zusätzlich empfehlen sich Fahrbahnanhebungen und Zeitinseln. [18]

Fahrbahnanhebungen erfüllen zwei Aufgaben. Einerseits dienen sie dem Individualverkehr als optisches Signal, um auf eine Haltestelle hinzuweisen, und andererseits ermöglichen sie den Fahrgästen einen niveaugleichen Ein- und Ausstieg. Um die Verkehrssicherheit zu verbessern, kann die Fahrbahnanhebung durch eine Zeitinsel ergänzt werden.

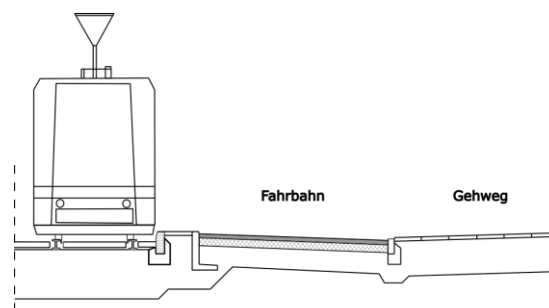


Abb. 4.4: Querschnitt einer Fahrbahnanhebung [18]

Bei Zeitinseln wird der Abschnitt der Straße, der für den Fahrgastwechsel benötigt wird, kurzzeitig für den Individualverkehr gesperrt. Dies erfolgt durch eine Ampelregelung, bei der die Lichtsignale für den motorisierten Verkehr automatisch durch die herannahende Straßenbahn, gesteuert werden. Teilt sich die Straßenbahn mit dem MIV den Fahrweg, wird das Signal erst mit der Einfahrt in den Haltebereich geschaltet. Das kann dazu führen, dass parallel zur Straßenbahn fahrende Fahrzeuge noch in den Haltestellenbereich einfahren und Fahrgäste behindern. Wenn Störungen des Individualverkehrs auszuschließen sind, ist es empfehlenswert, die Ampelschaltung auszulösen, bevor die Bahn den Haltestellenbereich erreicht. So können Fahrzeuge im Bereich der Haltestelle gänzlich vermieden werden. Umsetzbar ist das beispielsweise, wenn ein eigener Fahrweg für die Straßenbahn mittig zwischen den Fahrspuren für den Individualverkehr verläuft. Darüber hinaus kann durch Zeitinseln ein Vorlauf gegenüber dem Individualverkehr und ein Freihalten des Fahrwegs erreicht werden. [18]

Haltestellen in Insellage

Auch bei Haltestellen in Insellage muss zunächst die Fahrbahn gequert werden. Allerdings mit dem entscheidenden Vorteil, dass für den Prozess des Fahrgastwechsels selbst keine Fahrspur mehr gekreuzt werden muss, da das ÖPNV-Fahrzeug direkt an den Haltestellenbereich, die Haltestelleninsel, heranfahren kann. Gegenüber Haltestellen mit Notwendigkeit der Fahrbahnquerung erlaubt diese Ausführung wesentlich kürzere Fahrgastwechselzeiten. Haltestellen in Insellage sind folglich in der Fahrbahnmitte situiert. Bezogen auf die Lage in Fahrbahnmitte lässt sich eine Unterscheidung in Mittelbahnsteige und Seitenbahnsteige treffen. Bei Seitenbahnsteigen befinden sich Haltestellenbereiche jeweils zwischen der Fahrspur für den MIV und der Trasse für die Straßenbahn, wohingegen der Bahnsteig bei Mittelbahnsteigen mittig zwischen den Fahrwegen der Straßenbahn angeordnet ist (siehe Abbildung 4.5). Letztere erfordern in der Regel Zweirichtungsfahrzeuge und haben den Nachteil, dass zum Erreichen des Bahnsteigs zusätzlich die Gleisanlage der Straßenbahn überquert werden muss. Dies erfordert eine durchgehende Signalisierung durch Lichtsignalanlagen zwischen Gehweg und Bahnsteig oder zumindest einen Fußgängerüberweg mit Aufstellflächen zwischen MIV-Fahrbahn und ÖPNV-Trasse. In Bezug auf die Präferenz zwischen Seitenlage und Mittellage ist es vorzuziehen, Bahnsteige in Seitenlage anzuordnen, da dies dazu beiträgt, potenzielle Konflikte beim Überqueren der Gleise zu minimieren. [18]

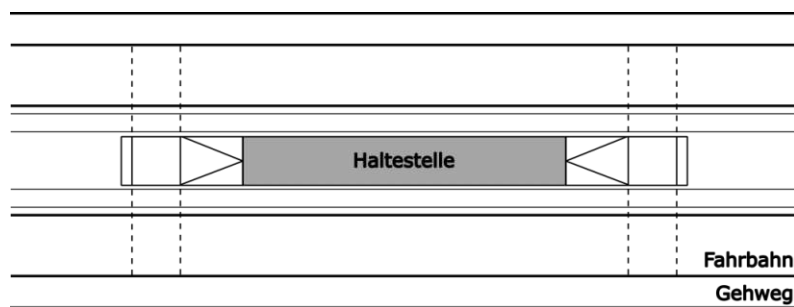


Abb. 4.5: Mittelbahnsteig mit besonderem Gleiskörper

4.1.1.2 Verkehrsorganisatorische Maßnahmen

Bei gleichzeitigem Halt mehrerer öffentlicher Verkehrsmittel an einer Haltestelle ist es von Bedeutung, sicherzustellen, dass ausreichend viele Haltepositionen zur Verfügung stehen. Die Anzahl der erforderlichen Haltepositionen richtet sich hierbei nach der maximalen Anzahl der gleichzeitig haltenden Fahrzeuge. Es ist ratsam, Überholungsmöglichkeiten an den Haltestellen zu implementieren oder mehrere liniengebundene Haltestellen einzurichten, um Staus und gegenseitige Behinderungen zu vermeiden. An Haltestellen ohne Überholungsmöglichkeiten sollte generell von längeren Aufenthaltszeiten abgesehen werden.

4.1.1.3 Haltestellenanlage

Länge

Im Allgemeinen sollte die Nutzlänge einer Straßenbahnhaltestelle ausreichend sein, um das längste an der Haltestelle haltende Fahrzeug vollständig aufzunehmen. Hierbei werden Rampen oder Bereiche für Querungen nicht zur Nutzlänge gezählt. Der Platzbedarf für diese Anlagen muss zur Nutzlänge addiert werden. Es wird auch empfohlen, einen zusätzlichen Sicherheitsabstand von 1,00 m für eventuelles ungenaues Halten zu berücksichtigen. Bei Doppelhaltestellen sollte zwischen

aufeinanderfolgenden haltenden Fahrzeugen ein Sicherheitsabstand von 1,00 m eingehalten werden. [18]

Breite

Eine ausreichend breite Haltestelle ist von entscheidender Bedeutung, um einen reibungslosen und zügigen Fahrgastwechsel zu gewährleisten. Die benötigte Breite hängt in erster Linie von der erwarteten Fahrgastanzahl sowie dem Raumbedarf für erforderliche Einbauten ab. Es ist sicherzustellen, dass eine Mindestbreite von 2,50 m nicht unterschritten wird. Die optimale Haltestellenbreite b lässt sich wie folgt berechnen:

$$b \geq \frac{A_e + M_{max} \cdot A_f}{L_n} \quad [\text{m}] \quad (4.2)$$

mit: A_e = Fläche für Einbauten [m^2]
 M_{max} = Spitzenbelastung der ankommenden, abfahrenden und wartenden Personen
 A_f = Fahrgast-Platzbedarf [m^2/P]
 L_n = Haltestellenlänge [m]

Der Fahrgast-Platzbedarf sollte mit $A_f \geq 1,50$ [m^2/P] angesetzt werden. Wird hinter dem Haltestellenbereich eine MIV-Fahrbahn geführt, ist ein zusätzlicher Sicherheitsabstand von 0,50 m empfehlenswert [18].

Oberfläche

Die Gestaltung von Bahnsteigen und Warteflächen erfordert eine Oberfläche, die sowohl eben als auch rutschfest ist. Gleichzeitig ist es von großer Bedeutung, dass Warteflächen so gestaltet sind, dass Regenwasser effizient abgeleitet wird und wartende Fahrgäste nicht von vorbeifahrenden Fahrzeugen bespritzt werden. Hierbei wird eine Querneigung von idealerweise 2 % empfohlen, die von der Fahrbahn bzw. Gleisen wegführt [18]. Weiters können Bodenmarkierungen an den Haltestellen im Bereich Fahrzeugtüren (siehe Abbildung 4.6) dazu beitragen, den Fahrgastwechsel zu beschleunigen. Diese Maßnahme ist jedoch nur unter zwei Bedingungen umsetzbar: Zum einen muss ein präzises Halten des Fahrzeugs an der Haltestelle möglich sein, und zum anderen kann entweder nur ein bestimmter Fahrzeugtyp oder mehrere Fahrzeugtypen mit dem gleichen Türabstand eingesetzt werden.



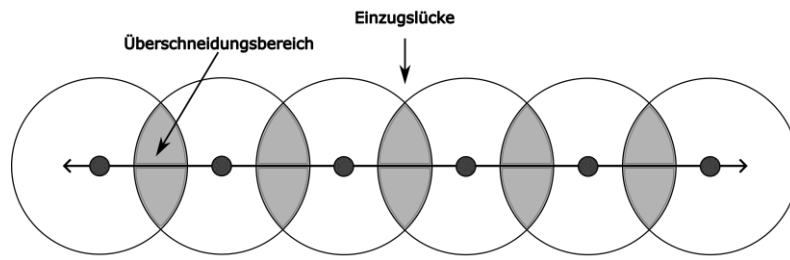
Abb. 4.6: Türbereichsmarkierung am Bahnsteig (Wien)

4.1.1.4 Einstiegsverhältnisse

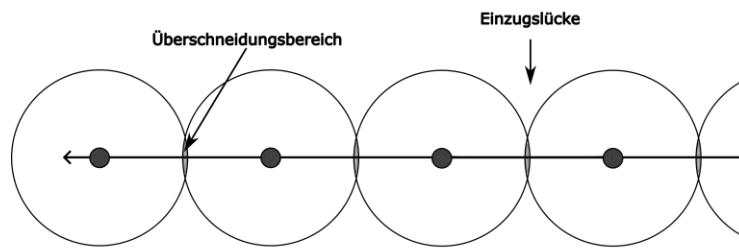
Laut Weidmann [10] verringern niveaugleiche Einstiege die Fahrgastwechselzeit um bis zu 30 % gegenüber gestuften Einstiegsverhältnissen. Daher ist eine Höhenangleichung zwischen Wagenboden und Bahnsteig anzustreben. Dies kann einerseits durch eine Erhöhung der Haltestelle oder andererseits durch das Absenken des Fahrzeugs oder einer Kombination beider Möglichkeiten erreicht werden. Ist eine exakte Höhenangleichung nicht möglich, empfiehlt sich eine Höhendifferenz von ± 30 mm bis ± 80 mm. Diese sogenannten quasi-ebenen Einstiegsverhältnisse wirken sich nur geringfügig auf die Leistungsfähigkeit der Türen aus. Gleichzeitig sind sie jedoch ausreichend hoch, um von sehbehinderten Fahrgästen als Hindernis wahrgenommen zu werden, und niedrig genug, um bewegungsbehinderten Menschen den Einstieg ohne Erschwernisse zu ermöglichen. Zusätzlich sollte der Abstand zwischen Fahrzeug und Bahnsteig so gering wie möglich gehalten werden. Große Spaltbreiten stören den Bewegungsablauf beim Fahrgastwechsel und verlangsamen diesen. Idealerweise sollten Spaltbreiten im Bereich von 50 – 100 mm angestrebt werden. Wenn die Spaltbreite jedoch den Abstand von 200 Millimetern überschreitet, kann dies die Fahrgastwechselzeit um mehr als 18 % verlängern und einige der positiven Effekte eines barrierefreien Einstiegs aufheben [10]. Folglich sind niveaugleiche Einstiegsverhältnisse anzustreben. In den Schweizer FAP [20] werden Einstiegsverhältnisse dann als niveaugleich bezeichnet, wenn diese zwischen der Bahnsteigkante und dem Schienenfahrzeugeinstieg eine maximale Spaltbreite von 50 mm bei einer maximalen Höhendifferenz von 30 mm (zuzüglich Toleranz von 20 mm in eine Richtung, d. h. max. 50 mm/50 mm oder 70 mm/30 mm) aufweisen. Diese Werte für Spaltbreite und Höhendifferenz stimmen sehr gut mit den von Weidmann [10] genannten überein.

4.1.1.5 Haltestellenabstände

Bezieht man sich allein auf die Reisezeit und auf die Reduktion von Verlustzeiten, ist ein größtmöglicher Haltestellenabstand von Vorteil. Das beste Ergebnis würde man mit lediglich einer Start- und einer Zielhaltestelle erreichen. Da dies aber unweigerlich keine gute Systemeigenschaft wäre, muss ein Mittelweg zwischen einer möglichst geringen Beförderungszeit und einer geringen (Tür-zu-Tür-) Reisezeit der Fahrgäste gefunden werden. Die Bestimmung des optimalen Haltestellenabstands erfordert zunächst die Ermittlung der von den Fahrgästen tolerierten Wegweite. Also welchen Weg sind Fahrgäste bereit zurückzulegen, um die nächstgelegene Haltestelle zu erreichen. Dabei stößt man auf folgende Problemstellung: Kleinere Stationsabstände führen zu größeren Überschneidungsgebieten, in denen sich mehr als eine Station in Gehweite befindet. Diese doppelte Abdeckung ist nicht notwendig und erlaubt daher die Vergrößerung des Haltestellenabstands. Auf der anderen Seite führen größere Stationsabstände zu größeren Lücken in den Einzugsgebieten. Abbildung 4.7 verdeutlicht dieses Phänomen. Da es nicht möglich ist, gleichzeitig die Überschneidungsgebiete und die Einzugsrücken zu minimieren, erfordert die Entscheidung letztendlich eine Abwägung zwischen der Maximierung der Fahrgastzahl und einer flächenmäßig großen Abdeckung. In Bezug auf die Reisezeit von Straßenbahnen ist eine Tendenz in Richtung Maximierung der Fahrgastzahlen von Vorteil, da die Konfiguration größere Haltestellenabstände aufweist. In der Literatur (vgl. [21], [22], [23], [24]) hat sich ein optimaler Haltestellenabstand für Straßenbahnen mit ca. 300 – 500 m herausgestellt. Dieser sollte jedenfalls nicht unterschritten werden.



(a) Enge Haltestellenabstände, große Überschneidungsbereiche, kleine Einzugsrücken



(b) Große Haltestellenabstände, kleine Überschneidungsbereiche, große Einzugsrücken

Abb. 4.7: Auswirkungen der Haltestellenabstände

4.1.1.6 Fahrzeug

Die Konstruktion und Gestaltung der Fahrzeuge selbst, insbesondere im Türbereich, üben einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand des Fahrgastwechsels aus. In seiner Doktorarbeit hat Weidmann [12] intensiv die Berechnung der Fahrgastwechselzeit untersucht und dabei diesen Prozess mit verschiedenen Faktoren wie Türbelastung, Türbreite, Einstiegshöhe, Richtungsanteil und Abstand der Türen in Beziehung gesetzt. In diesem Kontext hat er folgende Zusammenhänge für Einzeltüren definiert:

$$L_s = \frac{F}{t_{h,f} \cdot \sum l_{T,bi}} \quad (4.3)$$

$$L_s = \underbrace{\left(0,93 + 0,14 \cdot \frac{A}{F}\right)}_{\text{Richtungsanteil}} \cdot \underbrace{\left(\frac{0,9608 - 0,3878 \cdot l_{T,v}}{0,9608}\right)}_{\text{Höhendifferenz}} \cdot \underbrace{0,781 \cdot \left(\frac{F}{l_{T,b}}\right)^{0,0450}}_{\text{Türbelastung}} \quad (4.4)$$

mit: L_s = Spezifische Leistungsfähigkeit der Türe [P/(s · m)]

F = Fahrgastwechselzahl der Türe [P]

$t_{h,f}$ = Erwartungswert der Fahrgastwechselzeit an der Türe bei einer Fahrgastwechselzahl F [s]

$l_{T,b}$ = Türbreite [m]

A = Anzahl der Aussteiger an der Türe [P]

$l_{T,v}$ = Einstiegshöhe [m]

Durch Einsetzen von (4.4) in (4.3) und Umstellen nach $t_{h,f}$ lässt sich die Fahrgastwechselzeit wie folgt berechnen:

$$t_{h,f} = \frac{F^{1,955}}{l_{T,b}^{0,955} \cdot (0,756 \cdot F + 0,114 \cdot A) \cdot (0,961 - 0,388 \cdot l_{T,v})} \quad (4.5)$$

Zu erwähnen ist, dass Weidmann lediglich eine Unterteilung in Türabstände von über und unter 10 m trifft. Die oben genannte Formel (4.4) bezieht sich auf einen Türabstand von unter 10 m, da dies im Allgemeinen auf Straßenbahnen zutrifft.

Die oben aufgeführten Zusammenhänge verdeutlichen, dass sich die Fahrgastwechselzeit maßgeblich durch die spezifische Leistungsfähigkeit der Türe beeinflussen lässt. Da es nicht zweckmäßig wäre, die Fahrgastzahlen (A , F) zu beeinflussen, bleiben als steuerbare Parameter noch die Türbreite ($l_{T,b}$) und die Einstieghöhe ($l_{T,v}$). Im Idealfall ist die Höhendifferenz des Einstiegs gleich 0 (siehe Abschnitt 4.1.1.4). Bei Betrachtung eines Einzeleinstiegs lässt sich die Fahrgastwechselzeit durch Verbreiterung der Tür minimieren. In der Realität muss die Betrachtungsweise aber auf einen gesamten Kurs ausgeweitet werden. Hinzu kommen Faktoren wie die Verteilung der Fahrgäste am Bahnsteig /im Fahrzeug bzw. die Einzugsgebiete der Türen, Türanzahl und Türabstände. Die optimale Breite einer Tür eines Kurses lässt sich anhand der genannten Faktoren bestimmen und kann vor allem mittels Vergleich des Verhältnisses des Türeinzugsgebietes und der jeweiligen Türleistungsfähigkeit ermittelt werden. In zwei separaten Versuchsreihen (Fernández et al. [25] - 1650 mm und Thoreau et al. [26] - 1700 mm) wurde der Personenfluss abhängig von unterschiedlichen Türbreiten untersucht. Dabei hat sich eine Türbreite von ca. 1700 mm als optimal herausgestellt. In einer weiteren Studie [27] wurde die empfohlene Türbreite mit > 1250 mm beschrieben.

Die Verteilung der Türen kann in gewissem Maße durch die Bauweise der Fahrzeuge, insbesondere durch die Anordnung der Fahrwerke und Gelenke, eingeschränkt sein. Dennoch sollte angestrebt werden, die Türen möglichst gleichmäßig über die gesamte Länge des Fahrzeugs anzuordnen. Falls es aufgrund der Fahrzeuggestaltung zu einer ungleichmäßigen Türverteilung kommt, kann dies durch Anpassungen der Türleistungsfähigkeit berücksichtigt werden.

Fahrkartenverkauf und -kontrolle

Die Praxis des Fahrkartenverkaufs durch das Fahrpersonal kann Haltestellenaufenthaltszeiten erheblich verlängern, insbesondere wenn der Verkaufsvorgang mehr Zeit in Anspruch nimmt als der parallel stattfindende Fahrgastwechsel. Zusätzlich kann es zu Sicherheitsrisiken kommen, wenn Fahrgäste, die ein Ticket benötigen, den hinteren Teil des Fahrzeugs für den Einstieg benutzen und folglich erst nach Wiederaufnahme der Fahrt das Fahrpersonal erreichen. Neben dem Verkaufsprozess führt auch die Kontrolle der Gültigkeit der Fahrtausweise durch das Fahrpersonal zu Verzögerungen. In diesem Fall findet der Einstieg der Fahrgäste ausschließlich geordnet in einer Reihe und an der Fahrertüre statt. Ein simultanes Einsteigen mehrerer Fahrgäste ist in der Regel nicht möglich, da nur ein Ticket nach dem anderen überprüft werden kann. Hinzu kommt der Zeitaufwand für die Kontrolle der Fahrtausweise. Aus diesen Gründen ist es empfehlenswert, die Abfertigung der Fahrgäste durch das Fahrpersonal zu vermeiden. Stattdessen sollte der Ticketverkauf vor Fahrtantritt idealerweise an Haltestellen mittels Ticketautomaten oder im Vorverkauf erfolgen. Dennoch besteht auch die Möglichkeit, Fahrkarten in den Fahrzeugen über Automaten zu erwerben. An stark frequentierten Haltestellen empfiehlt sich eine Kombination aus Ticketverkauf im Fahrzeug und an den Haltestellen. Die Entwertung der Fahrkarten sollte in der Regel von den Fahrgästen selbst durchgeführt werden, wobei ausreichend Entwerter bereitgestellt werden sollten. Die Positionierung von Fahrkartenautomaten und Entwertern sollte nicht in unmittelbarer Nähe der Türen erfolgen, sondern mittig zwischen zwei Türen angeordnet sein, um

Verzögerungen beim Fahrgasteinstieg durch Rückstau zu vermeiden und eine bessere Verteilung der Fahrgäste im Fahrzeuginneren zu erreichen.

4.1.1.7 Verhalten der Fahrgäste

Aufgrund von ungleichmäßiger Verteilung der Fahrgäste auf dem Bahnsteig ergeben sich auch ungleichmäßige Belastungen der Türen, was wiederum zu einer Verzögerung des Fahrgastwechsels führen kann. Dieses Verhalten lässt sich nur begrenzt steuern, da es teilweise auch durch Zufälligkeiten geprägt ist. Abgesehen von der zufälligen Komponente ist die Verteilung abhängig von der Positionierung der Zugänge sowie der Haltestelleneinrichtung und lässt sich somit auch über diese steuern. Es ist empfehlenswert, mehrere Zugänge anzuordnen und diese gleichmäßig zu verteilen, um Fahrgastkonzentrationen zu vermeiden. Jedoch ist die Umsetzung dieser Maßnahme nur begrenzt möglich, da nicht alle Haltestellen (z.B. Haltestellen in Seitenlage) über klar definierte Zugänge verfügen. Darüber hinaus kann der Fahrgastfluss durch geschickte Anordnung von Haltestelleneinrichtungen gelenkt werden. Dazu zählen beispielsweise Ticketautomaten und Überdachungen bzw. Fahrgastunterstände, da im Bereich dieser mit größeren Fahrgastkonzentrationen zu rechnen ist. Um einen möglichst raschen Fahrgastwechsel zu gewährleisten, sollten alle Bewegungen auf dem Bahnsteig, die vor Ankunft der Straßenbahn abgeschlossen werden können, auch abgeschlossen sein. Dazu empfiehlt es sich, die zu erwartenden Türbereiche an der Haltestelle zu markieren. So können sich Fahrgäste bereits vor Ankunft des Zuges um diesen anordnen. Dies ist allerdings lediglich dann zweckmäßig, wenn genaues Anhalten und einheitlicher Fahrzeugeinsatz garantiert werden kann. Um das Aussteigen zu beschleunigen, gilt es auch hier, die Fahrgäste bereits vor dem Halt in den Türbereich zu lenken. Dabei haben sich frühzeitige Haltestellendurchsagen als nützlich erwiesen.

Um gegen das in Kapitel 3.2.1 beschriebene ungünstige Verhalten vorzugehen und eine einheitliche Nutzung der Türen zu fördern, bieten sich Informationskampagnen als Lösung an. Zudem kann auf stationäre Lautsprecherdurchsagen zurückgegriffen werden, wobei diese eher als letzte Maßnahme betrachtet werden sollten, da der Verteilungsprozess am Bahnsteig bereits vor Eintreffen des Fahrzeugs abgeschlossen sein sollte.

4.1.2 Maßnahmen an Lichtsignalanlagen

Um Verzögerungen an Knotenpunkten zu reduzieren, ist es wichtig, Vorrangregelungen für den Zu- bzw. Ablauf zu implementieren. Dies kann durch die Verwendung einer geeigneten verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung realisiert werden. Im folgenden Abschnitt werden Beschleunigungsmaßnahmen von Straßenbahnen an Lichtsignalanlagen und dessen Voraussetzungen näher erläutert. Dazu ist es dienlich, mit einigen Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit LSA vertraut zu sein.

Die *Phase* repräsentiert einen bestimmten Signalisierungszustand, währenddessen keine feindlichen Verkehrsströme zugeschaltet sind. Der Begriff feindliche Verkehrsströme bezieht sich auf Verkehrsströme mit gemeinsamer Konfliktfläche. Somit sind an einem Knotenpunkt mindestens zwei Phasen erforderlich. Die *Phasenfolge* ist die festgelegte Reihenfolge der verschiedenen Phasen. [7]

Der *Umlauf* beschreibt den einmaligen Ablauf aller Phasen eines Signalprogramms. Die *Umlaufzeit* ist folglich dessen Dauer. [7]

Die *Freigabezeit* ist der Zeitraum innerhalb einer Phase, in dem eine bestimmte Fahrtrichtung oder Verkehrsströmung das Recht hat, zu passieren. Dies wird durch das Grünlicht in der jeweiligen Richtung signalisiert. [7]

Unter *Sperrzeit* versteht man den Zeitraum innerhalb einer Phase, in dem eine bestimmte Fahrtrichtung oder Verkehrsströmung gesperrt ist. Dies wird durch Rotlicht signalisiert. [7]

Die *Übergangszeit* ist der Zeitraum zwischen Freigabezeitende und Sperrzeitanfang bzw. Sperrzeitende und Freigabezeitanfang. Üblicherweise durch ein Übergangssignal begleitet (gelb bzw. rotgelb). [7]

Die *Zwischenzeit* kennzeichnet den Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Phasen zweier Verkehrsströme, mit derselben Konfliktfläche. Sie erstreckt sich vom Ende der Grünphase eines Verkehrsstroms bis zum Beginn der Grünphase eines nachfolgenden Verkehrsstroms und hat den Zweck, Konfliktsituationen während des Phasenwechsels zu vermeiden. [7]

Eine vergleichsweise einfache Optimierungsmaßnahme an Lichtsignalanlagen besteht in der Anpassung des Umlaufs der LSA an die Fahrkurve der Straßenbahn. Dies bedeutet, dass an Zeitpunkten, an denen laut Fahrkurve ein Eintreffen der Straßenbahn am Knotenpunkt erwartet wird, ohnehin eine Grünphase vorgesehen wird. Allerdings setzt diese Anpassung voraus, dass sich die Straßenbahnen stets nach dem vorgegebenen Zeitplan bewegen. Unvorhergesehene Verzögerungen führen dazu, dass gegebenenfalls ein gesamter Umlauf abgewartet werden muss. Abhilfe kann eine zusätzliche Anordnung einer Freigabezeitmodifikation (siehe Kapitel 4.1.2.4) schaffen.

Um eine effiziente und gezielte Steuerung der Lichtsignalanlagen zugunsten der Straßenbahn durchführen zu können, ist eine präzise Erfassung des Standorts des ÖPNV-Fahrzeugs bzw. die Kenntnis des voraussichtlichen Ankunftszeitpunkts am Knotenpunkt grundlegend. Der öffentlicher Verkehr (ÖV) braucht nicht viel Grünzeit, aber das bisschen genau zum richtigen Zeitpunkt.

4.1.2.1 Erfassungssysteme

Die Positionsbestimmung der Fahrzeuge erfordert den Einsatz geeigneter Erfassungssysteme, die idealerweise ohne das Eingreifen des Fahrpersonals aktiviert werden. Diese Systeme müssen in der Lage sein, Standortdaten automatisch und mit hoher Zuverlässigkeit zu erfassen und zu übertragen, auch über längere Strecken hinweg. Zusätzlich ist es ratsam, in Situationen, in denen Freigabezeiten nur auf Anforderung aktiviert werden, eine alternative Anforderungsoption als Backup einzurichten. Als Rückfallebene können Schlüsselkontakte zur Ersatzanforderung oder eine softwaremäßige Überwachung der Funktionsfähigkeit eingerichtet werden. Einen Überblick der gängigen ÖPNV-Erfassungssysteme bietet nachfolgende Tabelle:

Tab. 4.1: ÖPNV-Erfassungssysteme (adaptiert nach [28])

System	Funktionsweise	Bewertung
Funksysteme:		
Mit Infrarotbaken	- Bake am Fahrbahnrand mit Empfänger (und Sender) - Sender und Empfänger am Fahrzeug - Bordrechner und Funkgerät im Fahrzeug - Funkempfänger und Auswerteeinheit separat oder im LSA-Steuergerät - Datenaustausch zwischen Bake und Fahrzeug bei Vorbeifahrt - Weiterleitung von Informationen über Funktelegramm vom Fahrzeug zur Empfangseinheit	- Mehrere Meldepunkte pro Bake möglich - bei serieller Übertragung weiter Informationen (z.B. Linie, Fahrtrichtung) möglich - Größter Informationsgehalt - Standardisierte Telegramme - Wartungsaufwand (Batterie, Grünschnitt) - Sofortreaktion auf Änderungen, z.B. Baumaßnahmen, Umleitungen; aber: Änderung vor Ort notwendig
Über Datenversorgung des Bordrechners	- Datenversorgung von Linie bzw. Kurs - Sender und Bordrechner im Fahrzeug - Empfang LSA wie oben - Funktelegramme zur LSA werden vom Fahrzeug anhand der im Linienfahrweg programmierten Meldepunktkette ausgelöst	- Mehrere Meldepunkte möglich - bei serieller Übertragung weiter Informationen (z.B. Linie, Fahrtrichtung) möglich - Größter Informationsgehalt - Standardisierte Telegramme - Reaktion auf Änderungen, z.B. Baumaßnahmen, Umleitungen erst nach Anlaufen eines Betriebshofes möglich
GPS-basiert	- Virtuelle Baken in Form von GPS-Aktivierungspunkten - GPS-Empfänger, Sender und Bordrechner im Fahrzeug - Empfang LSA wie oben - Sobald das Fahrzeug einen GPS-Aktivierungspunkt erkennt, werden LSA-Telegramme gemäß der in der Datenversorgung hinterlegten Meldepunktkette ausgelöst	- Mehrere Meldepunkte pro Bake möglich - bei serieller Übertragung weiter Informationen (z.B. Linie, Fahrtrichtung) möglich - Größter Informationsgehalt - Standardisierte Telegramme - Reaktionen auf Änderungen im Regelfall erst nach Anlaufen eines Betriebshofes möglich, da die Aktivierung der überspielten Daten einen Neustart des Fahrzeugs bedingt - Genauigkeit geringer als bei Infrarotbaken
Leitungsgebundene Systeme:		
Oberleitungskontakt	- Kontakt auf der Strecke - Fahrzeugerkennung durch Auslösen der Streckeneinrichtung - Leitungsgebundene Übertragung zum Steuergerät - Meldeeingang im LSA-Steuergerät	- Nur für Straßenbahn, O-Bus - Nur An- bzw. Abmeldung - Traktionsbetrieb mit mehreren Stromabnehmern muss in LSA-Steuerung berücksichtigt werden
Weichenkontakt	- Kontakt auf der Strecke - Fahrzeugerkennung durch Auslösen der Streckeneinrichtung - Leitungsgebundene Übertragung zum Steuergerät - Meldeeingang im LSA-Steuergerät	- Nur für Straßenbahn - An- bzw. Abmeldung und Fahrtrichtung
Schlüsselkontakt (SK) Induktiver Taster	- Fahrzeugerkennung durch manuelles Auslösen der Streckeneinrichtung - Leitungsgebundene Übertragung zum Steuergerät - Meldeeingang im LSA-Steuergerät, Kontakt meist am zugehörigen Signalmast	- Nur Anmeldung - Pro Fahrtrichtung ein separater SK notwendig - In der Regel nur als Notlösung

Tab. 4.1 – Fortsetzung

System	Funktionsweise	Bewertung
Induktivschleife (IS)	- Schleife auf der Strecke - Fahrzeugetfassung während der Dauer des Überfahrens der IS - Leitungsgebundene Übertragung zum Steuergerät - Meldeeingang im LSA-Steuergerät	- An- bzw. Abmeldung, zusätzlich Anwesenheit bzw. Anwesenheitsdauer - Nur bei eigenem Verkehrsraum anwendbar, da keine Fahrzeugartenunterscheidung
Induktivschleife/Sender - Kopplungsspule - Empfangsschleife	- Sender am Fahrzeug - Schleife auf der Strecke - Informationsübertragung vom Sender des Fahrzeugs über die Koppelspule oder Empfangsschleife	- An- bzw. Abmeldung, zusätzlich Erkennung von Liniennummer, Kursnummer, Fahrtziel - aktive Komponente im Fahrzeug notwendig
Sonstige Systeme:		
GSM-Modem-Lösung	- Sender im Fahrzeug, GSM-Modem (Empfänger) in der LSA - Bei Anwahl über ein festgelegtes Mobiltelefon wird über das Modem ein potenzialfreier Kontakt ausgelöst	- Nur Anmeldung - Nur im Stand bzw. mit fest eingebautem Mobiltelefon und Kurzwahlen auszulösen - öffentliches Mobilfunknetz als Voraussetzung - Mit Risiken verbunden (Zeitversatz, Überlastung, Sicherheitsstandards)

Grundsätzlich lässt sich bei Funksystemen der Ablauf der LSA-Steuerung in mehrere sogenannte Meldepunkte aufteilen. An den Meldepunkten werden die Datentelegramme an den Steuerrechner der LSA gesendet. Diese Datentelegramme enthalten Informationen zur Steuerung der LSA (z. B. die Bakennummer (eindeutige Zuordnung zur jeweiligen LSA), Fahrtrichtung, Linie, Kurs). Der erste Meldepunkt in diesem Kontext ist die *Voranmeldung*. Hier wird erstmalig ein Datentelegramm vom Fahrzeug an die LSA gesendet. Um etwaige Standzeiten zu minimieren, sollte die Voranmeldung in ausreichend großem Abstand vor dem Knotenpunkt angeordnet werden, um feindlichen Verkehrsströmen noch das Abschließen der jeweiligen Phase zu ermöglichen. Mit der folgenden *Hauptanmeldung* wird ein weiteres Funktelegramm gesendet und anschließend die Daten nochmal verglichen und eventuell korrigiert, um das Annäherungsverhalten des Fahrzeugs so präzise wie möglich darzustellen. Als letzten Meldepunkt, die *Abmeldung*, erfolgt die Fahrzeugabmeldung durch Übermittlung eines weiteren Funktelegramms. Damit signalisiert das Fahrzeug der Steuerung, dass es die Kreuzung passiert hat und die Signalphasen wieder auf den normalen Verkehrsfluss umgestellt werden können. Darüber hinaus, kann bei Haltestellen unmittelbar vor LSA das *Türschließsignal* als weiterer Meldepunkt dienen. So wird mit Ende des Fahrgastwechsels die Abfahrtbereitschaft des Fahrzeuges angemeldet.

Bei der Anwendung von Infrarotbaken (vgl. Abb. 4.8) erfolgt beispielsweise ein Informationsaustausch beim Passieren dieser Baken. Das Fahrzeug empfängt alle relevanten Kreuzungsdaten zur Steuerung der Lichtsignalanlage, einschließlich der festgelegten Meldepunkte. Die Abstände zwischen den Meldepunkten werden in der Regel mithilfe eines im Fahrzeug verbauten Wegstreckenzählers gemessen, und beim Erreichen jedes Meldepunktes wird das entsprechende Datentelegramm abgesendet. (Siehe Abb. 4.8) Bei leitungsgebundenen Systemen hingegen wird durch Auslösen einer Streckeneinrichtung (z.B. Oberleitungskontakt, Weichenkontakt) ein Impuls über eine direkte Kommunikationsleitung an das Steuergerät der LSA gesendet. Systembedingt ist deshalb oft nur eine An- bzw. Abmeldung möglich. Leitungsgebundene Systeme erfordern einen beträchtlichen Aufwand in Bezug auf Verkabelung und Tiefbau. Deswegen und aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten und der begrenzten Flexibilität für spätere Änderungen sind Funksysteme, insbesondere auch aufgrund des größeren Informationsgehalts,

im Allgemeinen den leitungsgebundenen Systemen vorzuziehen. In Einzelfällen kann aufgrund ihrer höheren Zuverlässigkeit dennoch die Anwendung leitungsgebundener Systeme in Betracht gezogen werden. Allerdings sollten dabei Lösungen, die ein Aussteigen des Fahrpersonals erfordern (Schlüsselkontakte, induktive Taster) nicht angewandt werden, da durch die Notwendigkeit des manuellen Eingreifens wiederum zusätzliche Verzögerungen entstehen. Diese sollten daher nur in Ausnahmefällen oder als Ersatzanforderung bei Ausfällen Anwendung finden.

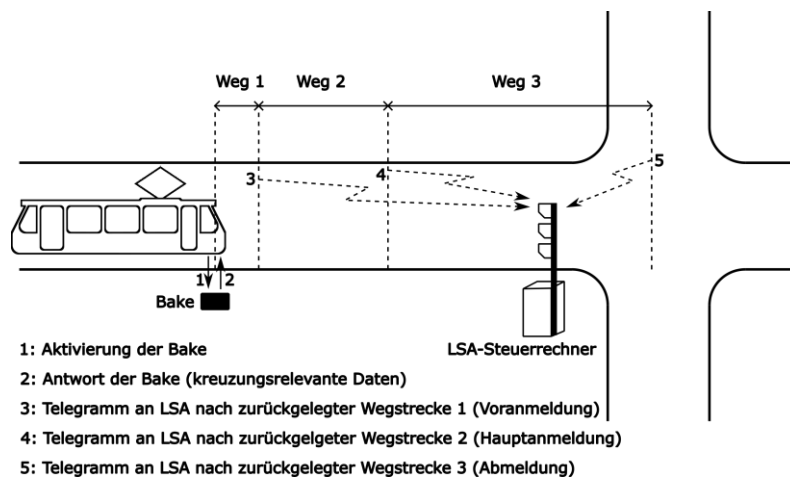


Abb. 4.8: Systemskizze Infrarotbaken (adaptiert nach [28])

4.1.2.2 Lage der Meldepunkte

Die Anordnung der Meldepunkte im Straßenraum ist in erster Linie abhängig von den gewünschten Beschleunigungs- bzw. Beeinflussungsmaßnahmen und den Bedingungen am jeweiligen Knotenpunkt selbst. Wenn beispielsweise ein Passieren des Knotenpunkts ohne Halt gewünscht ist, sollte die Anmeldung in einem Abstand vor der Kreuzung platziert werden, der sicherstellt, dass eine gerade begonnene feindliche Phase noch vollständig abgeschlossen werden kann, bevor die Straßenbahn den Knotenpunkt erreicht. Befindet sich eine Haltestelle unmittelbar vor dem Knotenpunkt, ist es denkbar, das Vorsignal mit dem Eintreffen des Straßenbahnfahrzeugs in der Haltestelle zu senden und anschließend das Türschließsignal als Hauptsignal zu nutzen. Hingegen bei einer Grünzeitverlängerung ist der Abstand zur LSA mit der gewünschten Verlängerung abzuwägen. Folglich ist es generell nicht möglich, eine eindeutige Aussage darüber zu treffen, wo die Meldepunkte genau positioniert werden sollten. Die genaue Platzierung ist abhängig von den spezifischen Anforderungen des gewünschten LSA-Steuerungsprozesses und sollte stets unter Berücksichtigung des ungünstigsten Szenarios erfolgen. Es gilt dabei einen Kompromiss zwischen möglichst früher Anmeldung und der Genauigkeit der erwarteten Ankunftszeit zu finden. Die Abmeldung sollte im Allgemeinen erfolgen, sobald das Fahrzeug den Signalstandort passiert hat, um die Behinderung des restlichen Verkehrs auf ein Minimum zu reduzieren.

4.1.2.3 Signalisierung an das Fahrpersonal

Hinsichtlich der Steuerung von Lichtsignalanlagen ist die Übermittlung der zu erwartenden Signalphasen an das Fahrpersonal ebenso von Bedeutung. Nur durch eine rechtzeitige Signalisierung kann ein sicheres und effizientes Überfahren des Knotenpunktes sichergestellt werden. Dabei sind folgende Signale von Bedeutung:

Vorsignal

Das Vorsignal bei Straßenbahnen hat die Funktion, das Fahrpersonal rechtzeitig auf das folgende Hauptsignal vorzubereiten. Es zeigt an, welches Signalbild bei Eintreffen am Hauptsignal zu erwarten ist. Dadurch kann das Fahrpersonal angemessen auf anstehende Signaländerungen reagieren. Die Anordnung von Vorsignalen ist nicht zwingend erforderlich, es sei denn, das Hauptsignal ist aufgrund örtlicher Gegebenheiten erst innerhalb des Anhalteweges erkennbar (§ 54 Abs. 5 StrabVO). Dennoch wird die Anordnung solcher Signale empfohlen, um eine vorausschauende Fahrweise zu unterstützen.

Abfertigungssignal

Das Ankündigungs- oder auch Abfertigungssignal kündigt eine Freiphase an. Dieses leuchtet für 8 Sekunden auf, bevor das Hauptsignal auf frei schaltet. An Haltestellen vor LSA-gesteuerten Knotenpunkten signalisiert dieses Signal dem Fahrpersonal den Fahrgastwechsel abzuschließen und sich auf die Fahrt vorzubereiten.

Anmeldesignal

Das Anmeldesignal zeigt die Anmeldung in der Sicherungsanlage an. Bei einer erfolgreichen Anmeldung leuchtet ein Pfeil in die entsprechende Fahrtrichtung auf. Dies ist vor allem von Bedeutung, wenn ausschließlich durch Anmeldung eine Freiphase geschaltet wird. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Anmeldung ordnungsgemäß erfasst wurde, und im Bedarfsfall kann eine Ersatzanforderung (z.B. mittels Schlüsselkontakt) ausgelöst werden.

4.1.2.4 Steuerungsverfahren

Grundsätzlich lassen sich LSA-Steuerungsverfahren in Festzeitsteuerungen und verkehrsabhängige Steuerungen unterscheiden. Hinsichtlich der eingeschränkten Möglichkeiten der Priorisierung einzelner Verkehrsströme ist eine Festzeitsteuerung nicht zur ÖPNV-Beschleunigung geeignet. Denn diese führen ein vorab definiertes Signalprogramm mit festgelegten Signalzeiten aus und bieten keine Möglichkeit für Änderungen.

Tab. 4.2: Übersicht der Steuerungsverfahren (adaptiert nach [29])

Oberbegriff		Veränderbarkeit	veränderbare Elemente			
			Umlaufzeit	Phasenfolge	Phasenanzahl	Freigabezeiten
Festzeitsteuerung		keine				
verkehrsabhängige Steuerung	Signalprogramm-anpassung	Freigabezeit-modifikation				•
		Bedarfs-anforderung			•	•
	Signalprogramm-bildung	Phasentausch		•		
		freie Veränderbarkeit	•	•	•	•

Freigabezeitmodifikation

Bei der Freigabezeitmodifikation sind die Umlaufzeit und die Anzahl sowie die Reihenfolge der Phasen bereits vorab fest definiert. Eine Möglichkeit, die VLISA zugunsten der Straßenbahn zu optimieren, besteht darin, die Dauer der einzelnen Signalphasen anzupassen. Durch eine Verkürzung der Freigabezeiten für feindliche Verkehrsströme können die Wartezeiten von Straßenbahnfahrzeugen an Knotenpunkten reduziert werden, da das Fahrtsignal durch die verkürzte Wartezeit früher aktiviert wird. Ist das in der Phasenfolge folgende Fahrtsignal das der Straßenbahn, so kann je nach Lage der Meldepunkte auch eine unterbrechungsfreie Durchfahrt des Knotenpunkts ermöglicht werden. Dies erfordert jedoch die Berücksichtigung bestimmter Mindestzeiten der Phasen und eine dementsprechend rechtzeitige Anmeldung. Umgekehrt kann auch durch eine gezielte Verlängerung einer Signalphase der gewünschte Beschleunigungseffekt erzielt werden. Durch eine verlängerte Freigabezeit kann beispielsweise das Passieren des Knotenpunkts ermöglicht werden, was andernfalls nicht mehr möglich gewesen wäre. Dies kann Standzeiten wesentlich reduzieren, da ansonsten ein kompletter Umlauf der LISA abgewartet werden müsste. Ebenfalls kann die Verlängerung der Freigabezeit der Räumung blockierender Fahrzeuge dienen. Teilt sich die Straßenbahn mit dem MIV eine Fahrspur und befindet sich die Haltestelle in unmittelbarer Kreuzungsnähe, kann so das Abfließen des MIVs und das störungsfreie Einfahren in die Station gewährleistet werden. Aber auch in Situationen, in denen Fahrspuren des MIVs, mit denen des ÖV zusammengeführt werden, bietet die Anpassung der Freigabephasen einen effektiven Lösungsansatz. Bei gleicher Fahrtrelation wird die ansonsten gleichzeitig geschaltete Freigabephase des MIVs verzögert, sodass sie erst Sekunden nach der Freigabephase der Straßenbahn geschaltet wird. Somit befindet sich das Straßenbahnfahrzeug nun als Pulkführer vor den restlichen Verkehrsteilnehmern, was das potenzielle Konfliktniveau mindert.

Freigabephasen nach Bedarf

Durch eine Anmeldung der Straßenbahn am LISA-Steuergerät können zusätzliche Freigabephasen geschaltet werden. Einerseits ermöglicht dies eine bedarfsabhängige Steuerung der Freigabephase. Das Fahrtsignal folgt also nur nach Anmeldung. Andererseits kann neben der üblichen Freigabephase in jedem Umlauf eine zusätzliche Freigabephase zugeschaltet werden. Das bedeutet, dass im Falle von Verspätungen oder einem zu frühen Eintreffen am Knotenpunkt die Standzeit an der Lichtsignalanlage durch das Hinzuschalten einer weiteren Freigabephase minimiert werden kann.

Phasentausch

Beim Phasentausch wird der vordefinierte Phasenablauf nach Anforderung der Straßenbahn verändert, wobei die Gesamtanzahl der Phasen aber unverändert bleibt. So kann die Freigabephase nach Bedarf vorgereiht werden, um Verzögerungen zu verhindern. Infolge eines solchen Eingriffs können sich die Wartezeiten für zeitlich verschobene Verkehrsströme im aktuellen Umlauf erhöhen, jedoch gleichen sie sich im nachfolgenden Umlauf aus, sofern kein weiterer Phasentausch angefordert wird.

Freie Veränderbarkeit

Der Vollständigkeit wegen soll an dieser Stelle auch noch die Möglichkeit der freien Veränderbarkeit der Signalprogrammierung erwähnt werden. Bei diesem Steuerungsverfahren sind weder eine fixe Umlaufzeit noch die Phasenfolge und -anzahl oder Freigabezeiten fest definiert. Die

Signalprogrammbildung geschieht auf Anforderung aller Verkehrsteilnehmer. Als Beschleunigungs- bzw. Priorisierungsmaßnahme für den öffentlichen Verkehr lässt sich das Prinzip der freien Veränderbarkeit nur bedingt nutzen, kann aber bei Kreuzungen mit geringer Auslastung dennoch Anwendung finden. Das Problem der verkehrsabhängigen Signalprogrammbildung ist, dass bei gleichzeitiger Anmeldung verschiedener Verkehrsströme die Freigabezeiten nach den im System hinterlegten Prioritäten gereiht werden. Bei hoher Auslastung nähert sich so das Signalprogramm dem einer Festzeitsteuerung an, was wiederum zu langen Wartezeiten für den ÖPNV führen kann.

4.2 Standzeiten außerhalb festgelegter Knotenpunkte

4.2.1 Fahrweg

Um Standzeiten auf der freien Strecke zu minimieren, ist die Errichtung eigenständiger Bahnkörper äußerst sinnvoll. Diese gewährleisten einen ungestörten Verkehrsfluss und verhindern die Konkurrenz mit dem Individualverkehr. Eine eigene Bahntrasse macht die Straßenbahn unabhängig vom übrigen Verkehr, wodurch sie weder von Staus noch von dichtem Verkehr beeinträchtigt wird. Ein weiterer Vorteil von selbstständigen Gleiskörpern besteht darin, dass die Straßenbahn nicht auf die Geschwindigkeiten des MIVs angewiesen ist und daher eine eigene Geschwindigkeitsbegrenzung für die Straßenbahn festgelegt werden kann. Um eine möglichst große Beschleunigungswirkung zu erzielen, sollte der selbstständige Gleiskörper stets optimal mit einer Vorrangschaltung an Lichtsignalanlagen koordiniert werden (siehe Kapitel 4.1.2). Hinsichtlich der Anordnung im Straßenraum wird in eigenständige Bahnkörper in Seiten- und Mittellage unterschieden, wobei letztere aufgrund ihrer weitgehenden Unabhängigkeit die bevorzugte Wahl darstellen. Die Straßenraumgegebenheiten können erfordern, dass der ÖPNV-Fahrstreifen entweder von der Mittellage in die Seitenlage wechselt oder sich auf die allgemeine Fahrbahn einfädelt. In solchen Fällen ist es entscheidend, besonderes Augenmerk auf die Gestaltung des Übergangsbereichs zu legen, wobei eine signaltechnische Regelung grundsätzlich sinnvoll ist. Die Verwendung von signalgeschützten Knotenpunkten kann hierfür in Erwägung gezogen werden.

4.2.1.1 Selbstständiger Gleiskörper in Mittellage

Eigenständige Gleiskörper in der Mittellage (siehe Abb. 4.9) erfordern einen größeren Platzbedarf im Vergleich zu Gleiskörpern in Seitenlage. Dies ist auf die Notwendigkeit zurückzuführen, ausreichend breite Haltestelleninseln für den Fahrgastwechsel zu schaffen und zusätzliche Flächen für linksabbiegende Fahrzeuge bereitzustellen. Ein Vorteil der Mittellage besteht darin, dass es weniger Unterbrechungen des eigenständigen Gleiskörpers gibt, insbesondere in Bezug auf Hauszufahrten, und, dass Behinderungen durch am Straßenrand parkender Fahrzeuge in der Regel auszuschließen sind.

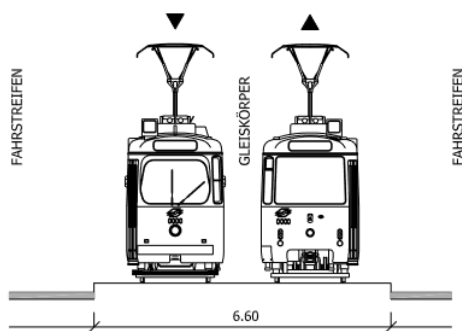


Abb. 4.9: Selbstständiger Gleiskörper in Mittellage [9]

4.2.1.2 Selbstständiger Gleiskörper in Seitenlage

Ist aufgrund beengter Platzverhältnisse keine Anordnung in Mittellage möglich, empfiehlt sich, die ÖPNV-Fahrstreifen in Seitenlage (siehe Abb. 4.10) zu platzieren. Aufgrund der Seitenlage kommt es allerdings häufig zu Unterbrechungen der Trasse, insbesondere an Kreuzungsbereichen und Grundstückszufahrten. Um potenzielle Konflikte zu vermeiden, sollte die Sicherung von Kreuzungsbereichen idealerweise durch Signaltechnik erfolgen. Es ist von grundlegender Bedeutung sicherzustellen, dass mögliche Störungen des Fahrtablaufs, wie beispielsweise durch abgestellte Fahrzeuge, vermieden werden.

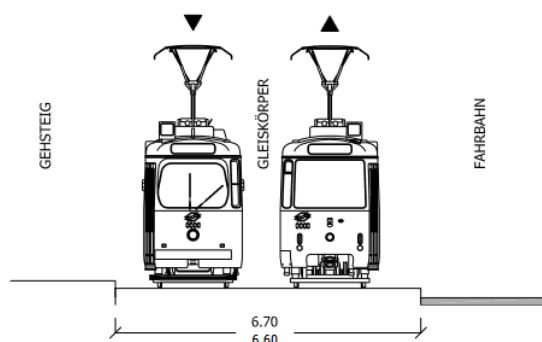


Abb. 4.10: Selbstständiger Gleiskörper in Seitenlage [9]

4.2.1.3 Sonderformen

Die nachfolgend beschriebenen Sonderformen sind nicht mit den Vorzügen eigenständiger Bahnkörper vergleichbar, da Konflikte mit dem Individualverkehr nicht restlos vermieden werden können. Dennoch weisen sie einige Vorteile gegenüber reinen Mischverkehrsfahrbahnen auf.

Einrichtungsbetrieb

Bei beengten Platzverhältnissen kann auch nur eine der beiden Fahrspuren als eigenständiger Bahnkörper ausgeführt werden. Generell sollte die Fahrtrichtung ausgewählt werden, in der die Wahrscheinlichkeit von Störungen am höchsten ist. In Kreuzungsbereichen ist es empfehlenswert, den Fahrstreifen, der auf den Knotenpunkt zuläuft, als eigenen Bahnkörper auszuführen.

Dies dient der Staauraumumfahrung und in Kombination mit einer optimalen Steuerung der Lichtsignalanlagen kann eine Priorisierung der Straßenbahn erreicht werden.

Dynamische Straßenraumfreigabe

Ist die Einrichtung eines eigenständigen Bahnkörpers nicht möglich, so kann die Möglichkeit einer dynamischen Straßenraumfreigabe in Betracht gezogen werden. Hier wird mittels einer Lichtsignalanlage der Mischverkehrsfahstreifen zeitlich begrenzt ausschließlich für Straßenbahnen reserviert. Dies bietet sich vor allem zu Hauptverkehrszeiten an, um Verzögerungen durch den MIV zu reduzieren. Die dynamische Spurfreigabe erfordert allerdings eine gut sichtbare und klar verständliche Signalisierung. In Österreich wird die Fahstreifensignalisierung mittels roten gekreuzten Schrägbalken, für Fahstreifen gesperrt, und grün nach unten zeigendem Pfeil, Nutzung dieses Fahstreifen gestattet, umgesetzt. Darüber hinaus empfehlen sich Hinweistafeln (siehe Abbildung 4.11) und gelb blinkende, schräg nach unten zeigende Pfeile, die ein ehestmögliches Verlassen des Fahstreifens in die jeweilige Richtung signalisieren. Hinsichtlich der Signalisierung ist zu beachten, dass ein rechtzeitiges Abfließen des Kraftfahrzeugverkehrs sichergestellt werden sollte. Umzusetzen ist dies durch entsprechende Übergangsphasen vor dem Rotlicht und/oder in ausreichendem Abstand angeordnete Spurwechselanzeiger (gelb blinkende, schräg nach unten zeigende Pfeile).



Abb. 4.11: Hinweistafel zur dynamischen Straßenraumfreigabe (Wien)

4.2.1.4 Abgrenzung der ÖPNV-Fahstreifen

Eine klare Abgrenzung der ÖPNV-Fahstreifen von der übrigen Fahrbahn muss für alle Verkehrsteilnehmer gut erkennbar ausgeführt sein, um eine exklusive Nutzung für das öffentliche Verkehrsmittel sicherzustellen. Dies kann durch bauliche Trennungen, Fahrspurmarkierungen, Schwellen und Verkehrszeichen sichergestellt werden. Als Fahrspurmarkierungen empfehlen sich neben den klassischen Sperrlinien auch Sperrflächen, da diese eine bessere Sichtbarkeit bieten. Schwellen sind Sperrlinien aufgrund der verbesserten Trennwirkung vorzuziehen. Die ideale Lösung besteht jedoch in baulichen Trennungen, die je nach Bauweise das Überfahren durch den MIV ausschließen können. Selbstständige Gleiskörper erfordern per Definition ohnedies bauliche Einrichtungen als Trennung von der übrigen Fahrbahn (§ 2 Abs. 14 StVO). Dies ist vor allem dann von Bedeutung, wenn höhere zulässige Geschwindigkeiten als auf der IV-Fahrbahn angestrebt

werden oder wenn der Gleiskörper als offener Oberbau ausgeführt wird. Diese Trennung lässt sich beispielsweise durch eine leicht erhöhte Bauweise abgegrenzt von Randsteinen erreichen (Abb. 4.13). Darüber hinaus empfehlen sich als Begleitmaßnahme zu allen genannten Möglichkeiten Verkehrszeichen zur weiteren Verdeutlichung der exklusiven Nutzung der ÖPNV-Fahrstreifen.



Abb. 4.12: Stuttgarter Schwellen als Fahrbahnabgrenzung (Wien)



Abb. 4.13: selbstständiger Gleiskörper in Mitellage (Wien)

4.2.2 Reduzierung von Unfällen

Unfälle mit Straßenbahnbeteiligung sind zwar absolut betrachtet vergleichsweise selten, können jedoch erhebliche Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit haben. Daher ist es ratsam, umfassende Sicherheitsmaßnahmen zur Minimierung potenzieller Risiken zu berücksichtigen. Insbesondere stellen Knotenpunkte das größte Unfallrisiko dar. Gemäß einer Analyse zur Reduzierung von Unfällen mit Straßenbahnen durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) [30] ereignen sich 86 % der Unfälle mit Straßenbahnbeteiligung in den Einflussbereichen von Knotenpunkten. Diese Unfälle werden hauptsächlich durch den MIV verursacht. Darüber hinaus zeigt sich eine Häufung von Unfällen mit Radfahrern und Fußgängern, vorwiegend im Bereich von Querungshilfen. Daher empfehlen sich folgende Maßnahmen zur Reduktion von Unfällen [30]:

- Lage und Anzahl der Querungshilfen erst nach ermitteltem Bedarf festlegen
- Anordnung von Z-Übergängen (sowohl für Fußgänger als auch für Radfahrer)
- Umwegfreie Haltestellenzugänge
- Lichtsignalanlagen mit Bedarfsanforderung und sehr geringen Wartezeiten für Fußgänger (hohe Akzeptanz) bevorzugen
- Schaffung von Sichtfeldern zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit bevorzogter Straßenbahnfahrzeuge
- Technische Sicherung durch Signalisierung von Knotenpunkten jeglichen Typs ab 100 Kfz/Tag (auch Grundstückszufahrten z.B. von Parkplatzzufahrten)
- Erkennbarkeit/ Begreifbarkeit von Haltestellen oder Knotenpunkten erhöhen
- Zusätzliche Sicherungseinrichtungen (akustische Signale, Signalgeber in geringer Höhe) bei unübersichtlichen Querungsstellen, gradliniger Führung, hohem Querungsbedarf an Lichtsignalknoten

- Zusätzliche Signalgeber für Radfahrer bei gleichzeitiger Signalisierung mit dem Kfz-Verkehr
- Keine Senkrechtparkstände an Fahrstreifen mit Straßenbahnen
- Angehobene Fahrbahnen oder Zeitinseln sollten bei Haltestellen in Mittellage und getrennten Warte- und Halteflächen die Regellösung darstellen

4.3 Dynamische Verlustzeiten

Die dynamische Verlustzeit entsteht aufgrund von Störungen im sogenannten „slow and go“ Verkehr, bei dem es zu Verzögerungen auf der Strecke kommt, die jedoch kein vollständiges Anhalten erfordern. Diese Verlustzeiten resultiert aus der Differenz zwischen der tatsächlichen (unter Betrieb gemessenen) Rollzeit und der theoretisch möglichen idealen Rollzeit. Ursächlich für diese Verzögerungen sind verschiedene Faktoren, wie beispielsweise Verkehrsstaus, Baustellen, Unfälle und das Verhalten der Verkehrsteilnehmer. Es ist daher unerlässlich, Baustellen sorgfältig zu planen und mit dem öffentlichen Nahverkehr abzustimmen. Sofern möglich, sollte der Straßenbahnbetrieb während der Bauarbeiten aufrechterhalten werden. Andernfalls sind angemessene Ersatzverkehre zu organisieren. Obwohl verschiedene Faktoren zu diesen Verlustzeiten beitragen können, ist der Hauptverursacher in den meisten Fällen der MIV. Daher ist die Bereitstellung eines eigenen Fahrwegs (siehe Kapitel 4.2.1) die wirksamste Möglichkeit, die Verlustzeiten auf ein Minimum zu reduzieren. Die Vermeidung von Unfällen ist ebenfalls von großer Bedeutung, da Unfälle nicht nur aus sicherheitstechnischer Sicht relevant sind, sondern auch zu Verzögerungen führen können, die über die dynamische Verlustzeit hinausgehen.

4.3.1 Maßnahmen gegen Pulkbildung

Das Phänomen der Pulkbildung ist eine Herausforderung, die sich nur schwer auflösen oder vermeiden lässt. Da Pulkfahrten durch eine Anhäufung kleiner Verzögerungen ausgelöst werden, gilt es auch genau da anzusetzen. Die effektivste Lösung zur Vermeidung von Störungen besteht in der Trennung der Verkehrsarten, was durch eigene Fahrwege realisiert wird und somit auch das Konfliktpotenzial mit anderen Verkehrsteilnehmern verringert. Da Verzögerungen in der realen Welt nicht immer restlos ausgeschlossen werden können, müssen auch andere Lösungsansätze gefunden werden. Eine Möglichkeit besteht in der Einführung von Mindest- und Maximalaufenthaltszeiten an Haltestellen, um eine möglichst hohe Betriebsstabilität zu gewährleisten [31]. Allerdings muss dazu gesagt werden, dass hinsichtlich der Reisegeschwindigkeit Mindestaufenthaltszeiten sicher nicht das Optimum darstellen. Darüber hinaus sollten diese festgeschriebenen Aufenthaltszeiten den Fahrgästen kommuniziert werden, um die Akzeptanz für das Halten an Haltestellen trotz fehlenden Fahrgastwechselbedarfs oder das vorzeitige Beenden des Fahrgastwechsels, obwohl weitere Fahrgäste zusteigen möchten, zu erhöhen. Es ist nicht zwingend erforderlich, diese Maßnahmen an allen Haltestellen anzuwenden. Die Einführung von längeren Haltezeitfenstern an ausgewählten Haltestellen ist ebenfalls eine Option, die im Falle von Verspätungen als Pufferzeit genutzt werden kann. Eine weitere Möglichkeit liegt in einer effektiven Kommunikation mit den Fahrgästen. Durch gezielte Informationskampagnen können Fahrgäste dazu ermutigt werden, bei vollen und verspäteten Fahrzeugen auf das nächste weniger stark besetzte Fahrzeug zu warten. Um dies umzusetzen, ist es entscheidend, den Fahrgästen verlässliche Informationen über die Wartezeit auf das nächste Fahrzeug sowie dessen Auslastung zu vermitteln.

Kapitel 5

Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Analyse der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen

5.1 Ansatz und Konzept

Im folgenden Teil der Diplomarbeit wird ein fundiertes Bewertungssystem zur Analyse der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen entwickelt und präsentiert. Als Basis soll dafür ein Punktesystem dienen, das eine umfassende und präzise Einschätzung der Leistungsfähigkeit und Effizienz des Straßenbahnbetriebs ermöglicht. Der Ansatz des Bewertungssystems basiert auf einer systematischen Berücksichtigung verschiedener Kriterien und Faktoren, die sowohl die Infrastruktur als auch die Betriebsmerkmale einbeziehen. Um eine fundierte Datenbasis für das Bewertungssystem zu erhalten, gilt es relevante Einflussgrößen und Kriterien zu identifizieren, die die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen beeinflussen. Die einzelnen Kriterien und Einflussgrößen werden dazu mit entsprechenden Punktwerten versehen und gegebenenfalls gewichtet, um ihre relative Bedeutung im Gesamtkontext angemessen zu berücksichtigen. Berechnete Punktwerte sind auf zwei Nachkommastellen zu runden. Die ermittelten Punktwerte werden in einer übersichtlichen Scorecard zusammengeführt und anschließend addiert, um eine Gesamtpunktzahl zu ermitteln. So lassen sich insgesamt 100 Punkte erreichen. Die Scorecard lässt sich in 5 große Kategorien unterteilen: „freie Strecke“, „Haltestellen“, „Fahrzeug“, „Knotenpunkte“ und „Betrieb“. Mit Ausnahme der Kategorie „Betrieb“ werden allen Kategorien die gleiche Punktzahl (22 Punkte) zugeteilt, da deren Bedeutung und kollektiver Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit als gleichermaßen relevant eingeschätzt wird. Lediglich in der Kategorie „Betrieb“ kann eine reduzierte Punktzahl von 12 Punkten erreicht werden. Dies resultiert aus der überwiegend qualitativen Natur der Kriterien in dieser Kategorie, wobei die Punkte teilweise ohne gezielte Gewichtung vergeben werden. Die Punkte innerhalb der Kategorien werden entsprechend ihrer Relevanz und ihres Einflusses auf die Reisegeschwindigkeit zugeteilt, wobei auch Punktabzüge möglich sind. Innerhalb jeder Kategorie werden Zwischensummen berechnet, um auf einen Blick erkennbar zu machen, ob Defizite in bestimmten Bereichen vorliegen oder ob herausragende Leistungen erzielt wurden. Dieser Ansatz ermöglicht eine präzise Analyse und Identifikation von Stärken und Schwächen in den einzelnen Aspekten, was wiederum die Grundlage für gezielte Optimierungsmaßnahmen bildet. Generell gilt: Je höher der erzielte Punktwert ist, desto positiver wird das Gesamtergebnis bewertet.

5.2 Datenbasis und Indikatoren

Die Analyse und Bewertung der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen erfordert eine fundierte und umfassende Datenbasis. Die Resultate und Erkenntnisse aus den vorangegangenen Abschnitten sollen als Grundlage für ein effektives Bewertungsverfahren dienen.

In Kapitel 3, „Analyse der Störquellen“, wurden verschiedene Faktoren identifiziert, die zu Störungen des Betriebs und zu Verzögerungen führen können. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem Mängel am Fahrweg oder an Haltestellen, die sich nachteilig auf die Reisegeschwindigkeit und den Betriebsablauf von Straßenbahnen auswirken. Die genaue Untersuchung dieser Störquellen und die Erfassung der auftretenden Probleme sind von zentraler Bedeutung für die Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Verbesserung des Betriebs und somit auch der Reisegeschwindigkeit. In Kapitel 4, „Reduktion von Verlustzeiten“, wurden verschiedene Strategien und Maßnahmen diskutiert, um Verlustzeiten zu minimieren. Hierbei standen Anpassungen der ermittelten Problemstellen sowie andere präventive Maßnahmen im Fokus. Die Diskussion konzentrierte sich darauf, wie sich diese Maßnahmen auf den Betriebsablauf auswirken und welche Folgen sie auf die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen haben können.

Die gesammelten Daten und Erkenntnisse aus den genannten Kapiteln bilden die Grundlage für die Entwicklung geeigneter Indikatoren zur Bewertung der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen. Auf Grundlage dieser Datenbasis wird ein Bewertungsverfahren entwickelt, das nicht nur den aktuellen Zustand der Reisegeschwindigkeit bewertet, sondern auch als Grundlage für die Identifizierung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Optimierung des Straßenbahnbetriebs dient.

5.3 Limitationen

Die Trassierung wurde in diesem Bewertungssystem als Limitation identifiziert und fließt nicht direkt in die Bewertung ein. Dies liegt daran, dass die Trassierung von Straßenbahnstrecken nicht ausnahmslos als frei wählbar angesehen werden kann. Sie wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, darunter steuerbare Elemente, aber auch externe nicht steuerbare Einflüsse wie städtebauliche Gegebenheiten, relevante Zwangspunkte und Topografie. Diese Vielfalt an Einflussfaktoren erschwert eine einheitliche und standardisierte Bewertung. Zudem ist jede Straßenbahnlinie individuell in Bezug auf ihre Trassierung, was eine standardisierte Erfassung und Bewertung zusätzlich erschwert. Kurze, kurvenreiche Linien könnten im Hinblick auf die Geschwindigkeitsbewertung einen enormen Nachteil gegenüber geradlinigeren Linien haben. Ohne eine differenzierte Betrachtung spezifischer Trassierungselemente sowie einer Anpassung an die individuellen Charakteristika der Straßenbahnlinien ist eine objektive Bewertung der Trassierung ohne weitere Parameter nicht möglich.

5.4 Bewertungskriterien

5.4.1 Freie Strecke

Fahrweg

Die Gestaltung der Fahrwegeninfrastruktur spielt eine entscheidende Rolle bei der Optimierung der Reisegeschwindigkeit und der effizienten Abwicklung des Straßenbahnbetriebs. Werden Straßenbahnen auf separaten Fahrwegen geführt, lassen sich Störungen durch den MIV überwiegend vermeiden.

Bewertungshinweis: Die jeweiligen Punktwerte der Fahrwegeninfrastruktur werden mit dem prozentualen Anteil dieser an der Gesamtstrecke multipliziert. Ist die entsprechende Fahrwegeninfrastruktur einseitig angeordnet, so wird die Hälfte des jeweiligen Punktwertes für die Berechnung herangezogen. Anschließend werden die Ergebnisse addiert, um die Gesamtpunktzahl zu ermitteln.

Tab. 5.1: Bewertung: Fahrwegeninfrastruktur

Fahrwegeninfrastruktur	Punkte	Gewichtung
Eigener Bahnkörper, physisch getrennt	22	% der Trasse
Eigene Fahrspur, durch Schwellen getrennt	20	
Eigene Fahrspur, durch Bodemarkierungen getrennt	16	
Keine eigene Fahrspur	0	

Parkplätze

Jedes Jahr kommt es zu zahlreichen Situationen, in denen Straßenbahnen durch unsachgemäß abgestellte Fahrzeuge blockiert werden, was zu erheblichen Verzögerungen im Betrieb führt. Aufgrund der Gefahr von in den Fahrweg der Straßenbahn ragenden Fahrzeugen bei sehr knapp an diesem angeordneten Parkständen wird eine Unterscheidung in über bzw. unter 1,00 m Abstand der Parkplätze zum Fahrweg getroffen. Gemessen wird der horizontale Abstand von der Parkplatzmarkierung bis zum nächstgelegenen Punkt der Lichtraumumgrenzung.

Bewertungshinweis: Ein Punkteabzug wird für Parkplätze direkt angrenzend an den Straßenbahnfahrweg vorgenommen. Die Anzahl der abzuziehenden Punkte ergibt sich aus der Summe des jeweiligen prozentualen Anteils der Gesamtstrecke, an dem sich unmittelbar Parkplätze befinden, multipliziert mit dem Punktwert.

Tab. 5.2: Bewertung: Parkplätze

Parkplätze	Punkte	Gewichtung
MIV Parkplätze, direkt angrenzend an Fahrweg der Straßenbahn (Abstand ≤ 1 m)	-8	% der Trasse
MIV Parkplätze, direkt angrenzend an Fahrweg der Straßenbahn (Abstand > 1 m)	-4	

5.4.2 Haltestellen

Ausführungsart der Haltestellen

Die Ausführungsart der Haltestellen kann erheblichen Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen haben, da diese den Fahrgastwechsel maßgeblich beeinflussen. Eine effiziente und reibungslose Abfertigung ist essenziell, um Verzögerungen zu vermeiden. Insbesondere Haltestellen, an denen nicht direkt gehalten werden kann und eine Fahrbahnquerung notwendig ist, um das Fahrzeug zu erreichen, wirken sich allein schon durch die größeren Wegbeziehungen negativ auf die Fahrgastwechselzeit aus. Daher sollten solche Haltestellen nur mit begleitenden Maßnahmen angeordnet werden. Haltestellen in Seitenlage, die mit einer eigenen Fahrspur bzw. einem eigenen Bahnkörper kombiniert sind, sind mit dem maximal möglichem Punktwert (10 Punkte) zu bewerten.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Ausführungsarten an der Gesamtanzahl der Haltestellen multipliziert. Anschließend werden diese Ergebnisse addiert, um die Gesamtpunktzahl zu ermitteln.

Tab. 5.3: Bewertung: Ausführungsart der Haltestellen

Haltestellentyp	Punkte	Gewichtung
Seitenlage:		
Kaphaltestelle	10	% der Haltestellen
In Seitenlage, direkt am Fahrbahnrand/Gehweg	8	
Haltestelle in Seitenlage mit Erfordernis der Fahrbahnquerung	-6	
Mittellage:		
Haltestelleninsel	6	% der Haltestellen

Haltestellenabstände

Beschränkt man sich lediglich auf die Reisegeschwindigkeit, wäre ein größtmöglicher Haltestellenabstand bzw. lediglich jeweils eine Start- und Endhaltestelle das Optimum. Da dies für einen qualitativ hochwertigen Straßenbahnbetrieb nicht besonders zielführend ist, wird im Rahmen dieses Bewertungssystems der im Kapitel 3.1.4.1 ermittelte durchschnittliche Haltestellenabstand von 200 bis 500 m als Grundlage herangezogen. Punkteabzüge werden bei Haltestellenabständen unter 300 m vergeben.

Bewertungshinweis: Der Punktwert wird mit dem prozentualen Anteil der Haltestellenabstände unter 300 m an der Gesamtanzahl der Haltestellenabstände multipliziert.

Tab. 5.4: Bewertung: Haltestellenabstand

Haltestellenabstand	Punkte	Gewichtung
Haltestellenabstand unter 300 m	-4	% der Haltestellenabstände

Haltestellenanlage

Eine angemessen dimensionierte Haltestellenanlage ist entscheidend für eine reibungslose und effiziente Abfertigung der Fahrgäste. Zu gering bemessene Warteflächen führen zu Behinderungen zwischen ein- und aussteigenden Fahrgästen und verlängern die Fahrgastwechselzeit.

Bewertungshinweis: Der Punktwert für Breite bzw. Länge wird mit dem prozentualen Anteil der nicht unterschrittenen Mindestmaße der Haltestellen an der Gesamtanzahl der Haltestellen multipliziert.

Tab. 5.5: Bewertung: Haltestellenanlage

Maße	Punkte	Gewichtung
Breite:		
Mindestbreite nach Formel 4.2 (Kapitel 4.1.1.3) nicht unterschritten	2	% der Haltestellen
Länge:		
Mindestlänge = Länge des längsten haltenden Fahrzeuges + 1,00 m nicht unterschritten	2	% der Haltestellen

Spaltbreite zwischen Haltestelle und Fahrzeug

Große Spaltbreiten führen zu erheblichen Verzögerungen beim Fahrgastwechsel. Daher ist es von essenzieller Bedeutung, den Abstand zwischen Fahrzeug und Bahnsteig sowohl für eine zügige Abfertigung der Fahrgäste als auch im Hinblick auf Barrierefreiheit so gering wie möglich zu halten.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Einstiegsverhältnisse an den Haltestellen mit der Gesamtanzahl der Haltestellen multipliziert und anschließend summiert.

Tab. 5.6: Bewertung: Spaltbreite

Spaltbreite	Punkte	Gewichtung
≤ 50 mm	8	% Haltestellen
50 – 100 mm	6	
> 100 mm	0	

Zusatzmaßnahmen an Haltestellen

Durch die Implementierung zusätzlicher Maßnahmen können weitere Punkte generiert werden. So kann beispielsweise eine Reduzierung des Punkteabzugs an Haltestellen mit Fahrbahnquerung von -6 auf -1 durch die Einführung von Zeitinseln und Fahrbahnanhebungen erreicht werden.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Maßnahmen an der Gesamtanzahl der Haltestellen multipliziert. Anschließend werden diese Ergebnisse addiert, um die Gesamtpunktzahl zu ermitteln.

Tab. 5.7: Bewertung: Zusatzmaßnahmen an Haltestellen

Maßnahme	Punkte	Gewichtung
An Haltestellen mit Erfordernis der Fahrbahnquerung:		
Zeitinsel	3	% der Haltestellen
Fahrbahnanhebung	2	
An Haltestellen in Seitenlage:		
Verkehrsinsel zwischen gegenüberliegenden Haltestellen	2	% der Haltestellen

5.4.3 Fahrzeug

Türbreite

Die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugtüren ist in erster Linie abhängig von der Türbreite. Zu schmale Türen können Verzögerungen beim Ein- und Ausstieg der Fahrgäste begünstigen, was wiederum zu längeren Aufenthalten an den Haltestellen führt. Um eine effiziente und schnelle Fahrgastwechselzeit zu gewährleisten, sollte das in Kapitel 4.1.1.6 ermittelte Maß von 1250 mm nicht unterschritten werden.

Bewertungshinweis: Bei Fahrzeugen mit unterschiedlichen Türbreiten, ist der Mittelwert der Türbreiten heranzuziehen. Der Punktwert ist mit dem prozentualen Anteil der Fahrzeuge, die die Mindesttürbreite nicht unterschreiten, zu multiplizieren. Beim Einsatz verschiedener Fahrzeugtypen ist die Berechnung für jeden Fahrzeugtyp auszuführen und anschließend zu summieren.

Tab. 5.8: Bewertung: Türbreite

Türbreite	Punkte	Gewichtung
Türbreite $\geq$ 1250 mm	4	% Fahrzeuge

Einstiegsverhältnisse

Der Zugang zu Straßenbahnen erfolgt in der Regel von Haltestellen, die sich auf Straßenniveau befinden. Aufgrund der Fahrzeugkonstruktion entstehen dabei oft Höhenunterschiede zwischen dem Fahrgastraum und der Haltestelle. Diese Höhendifferenz stellt ein Hindernis für den Fahrgastwechsel dar und verlängert diesen wesentlich. Durch verschiedene Maßnahmen wie den Einsatz von Niederflurfahrzeugen oder die Anhebung von Haltestellen kann der Höhenunterschied reduziert werden, um einen reibungslosen Einstieg zu gewährleisten.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Einstiegsverhältnisse der Fahrzeuge an der Gesamtanzahl der Fahrzeuge multipliziert. Bei Einsatz verschiedener Fahrzeugtypen ist die Berechnung für jeden Fahrzeugtyp auszuführen und anschließend zu summieren.

Tab. 5.9: Bewertung: Einstiegsverhältnisse

Einstiegsverhältnisse	Punkte	Gewichtung
Eben (≤ 30 mm)	8	% Fahrzeuge
Quasi-eben (30 – 80 mm)	6	
Eine Stufe (> 80 mm)	2	
Mehrere Stufen	0	

Ticketverkauf

Der Erwerb gültiger Fahrtausweise sollte idealerweise vor Fahrtantritt abgeschlossen sein. Es ist jedoch ratsam, sowohl Kauf- als auch Entwertungsmöglichkeiten im Fahrzeug anzubieten. Um Verzögerungen zu vermeiden, sollten jedoch der Fahrkartenkauf und die Entwertung nicht vom Fahrtpersonal durchgeführt werden.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Fahrkartenkaufoptionen der Fahrzeuge an der Gesamtanzahl der Fahrzeuge multipliziert. Bei Einsatz verschiedener Fahrzeugtypen ist die Berechnung für jeden Fahrzeugtyp auszuführen und anschließend zu summieren. Die maximal zu erreichende Negativpunktzahl beträgt -4.

Tab. 5.10: Bewertung: Fahrkartenverkauf

Fahrkartenverkauf	Punkte	Gewichtung
Ticketautomaten und Entwerter im Fahrzeug	6	% Fahrzeuge
Fahrkartenverkauf beim Fahrpersonal	-2	
Fahrtausweiskontrolle beim Fahrpersonal	-4	

5.4.4 Knotenpunkte

Knotenpunkte ohne LSA-Regelung

An Knotenpunkten ohne Lichtsignal-Regelung sollte eine Vorfahrtsregelung zugunsten der Straßenbahn angewandt werden. Zusätzlich ist es wichtig, eine ausreichende Anzahl von Fahrspuren zu berücksichtigen, um zu vermeiden, dass die Straßenbahn auf die Abwicklung anderer Fahrbeziehungen warten muss. Punkteabzüge für das Fehlen von Linksabbiegestreifen werden nur dann vergeben, wenn dies auch potenziell Fahrtbehinderungen zur Folge hat.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Verkehrsregelungen an den Knotenpunkten an der Gesamtanzahl der Knotenpunkte multipliziert und anschließend addiert, um die Gesamtpunktezahl zu erhalten.

Tab. 5.11: Bewertung: Knotenpunkte ohne LSA-Regelung

Verkehrsregelung	Punkte	Gewichtung
Straßen des Straßenbahnverkehrs als Vorfahrtsstraße definiert	12	% der Knotenpunkte
Kein eigener Linksabbiegestreifen für den MIV	-4	
Keine vorfahrtregelnden Maßnahmen bzw. Rechts-vor-Links-Regelung	-6	

Knotenpunkte mit LSA-Regelung

Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen können ein effektives Instrument zur Priorisierung und somit auch Beschleunigung von Straßenbahnen darstellen. Im Rahmen dieses Bewertungssystems wird hinsichtlich der Beeinflussung der LSA zwischen der Modifikation der Phasenfolge bzw. -zahl und der Modifikation der Freigabezeiten unterschieden, wobei beide Varianten hohe Punktzahlen erzielen. Die Modifikation der Phasenfolge bzw. -zahl erreicht dabei einen minimal höheren Punktwert aufgrund des direkten Eingriffs in die Signalprogrammbildung und der dadurch theoretisch früher möglichen Freigabezeitfenster. Darüber hinaus kann für das Abstimmen des Umlaufs der LSA an die Fahrkurve der Straßenbahn ein Punktwert von 15 Punkten erreicht werden. Punkteabzüge für das Fehlen von Linksabbiegestreifen werden nur dann vergeben, wenn dies auch potenziell Fahrtbehinderungen zur Folge hat.

Bewertungshinweis: Wird nur eine Fahrtrichtung berücksichtigt, so wird die Hälfte der jeweiligen Punkte für die Bewertung herangezogen. Wird zusätzlich zur Anpassung des Umlaufs der LSA an die Fahrkurve der Straßenbahn eine Beeinflussung der LSA angeordnet, so ist der höhere der Punktwerte (Beeinflussung) für die Bewertung zu verwenden. Die Punktwerte werden mit den prozentualen Anteilen der jeweiligen Verkehrsregelungen an den Knotenpunkten an der Gesamtanzahl der Knotenpunkte multipliziert und anschließend addiert, um die Gesamtpunktezahl zu erhalten.

Tab. 5.12: Bewertung: Knotenpunkte mit LSA-Regelung

Verkehrsregelung	Punkte	Gewichtung
Beeinflussung an LSA durch Modifikation der Phasenfolge oder Phasenanzahl	22	% der Knotenpunkte
Beeinflussung an LSA durch Modifikation der Freigabezeit	20	
Umlauf der LSA an Fahrkurve der Straßenbahn angepasst	15	
Keine Berücksichtigung der Straßenbahn an LSA	0	
Kein eigener Linksabbiegestreifen für den MIV	-4	

5.4.5 Betrieb

In diesem Abschnitt dominieren größtenteils qualitative Beurteilungskriterien. Es obliegt dem Anwender, eigenverantwortlich und sorgfältig einzuschätzen, ob die spezifischen Kriterien vorwiegend und in relevanter Weise auftreten.

Intervalldichte

Eine sorgfältige Abstimmung der Intervalle je nach Fahrgastaufkommen ist entscheidend. Zu große Intervalle während Stoßzeiten können zu längeren Fahrgastwechselzeiten und somit zu Verzögerungen aufgrund des erhöhten Fahrgastaufkommens führen.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden vergeben, sofern das jeweilige Betriebsbild vorhanden ist. Die erreichten Punkte werden anschließend addiert, um die Gesamtpunktzahl zu ermitteln.

Tab. 5.13: Bewertung: Intervalldichte

Betriebsbild	Punkte
Intervalldichte an Fahrgastauslastung angepasst	4
Pulkbildung beobachtbar	-2

Zusatzpunkte

Durch folgende Lösungen die zur Optimierung der Reisegeschwindigkeit beitragen, können eine Reihe an Zusatzpunkten generiert werden. So können unter anderem durch Informationskampagnen für Themen wie Aussteigen vor Einsteigen und zur Vermeidung von Pulkbildung. Weiters kann eine hohe Fahrzeugverfügbarkeit im Falle von Störungen ebenfalls zur Verbesserung der Gesamtbewertung beitragen.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden vergeben, sofern die jeweilige Maßnahme vorhanden ist. Hierfür ist es nicht zwingend erforderlich, dass die Maßnahme an jeder einzelnen Anlage angeordnet ist, sondern es reicht aus, wenn sie an den meisten bzw. den relevanten Anlagen

vorhanden ist. Die erreichten Punkte werden anschließend addiert, um die Gesamtpunktzahl zu ermitteln. Es können maximal 5 Punkte erreicht werden.

Tab. 5.14: Bewertung: Zusatzpunkte

Maßnahme	Punkte
Überholungsmöglichkeiten an Mehrfachhaltestellen	2
Markierte Türbereiche an Haltestellen	2
Ticket-Automaten an Haltestellen	1
Informationskampagnen (Aussteigen vor Einsteigen, Pulkbildung, ...)	1
Hohe Fahrzeugverfügbarkeit	1

Sicherheit

Durch die Implementierung von Sicherheitsmaßnahmen an den Anlagen und Strecken der Straßenbahnen kann das Unfallrisiko reduziert werden. Jeder vermiedene Unfall trägt zur Beschleunigung des Straßenbahnbetriebs bei, da Unfälle häufig zu längeren Wartezeiten und erheblichen Verzögerungen führen. Aus diesem Grund können zusätzliche Punkte für Sicherheitseinrichtungen erzielt werden.

Bewertungshinweis: Die Punktwerte werden vergeben, sofern die jeweilige Maßnahme vorhanden ist. Hierfür ist es nicht zwingend erforderlich, dass die Maßnahme an jeder einzelnen Anlage angeordnet ist, sondern es reicht aus, wenn sie an den meisten bzw. den relevanten Anlagen vorhanden ist. Die erreichten Punkte werden anschließend addiert, um die Gesamtpunktzahl zu ermitteln.

Tab. 5.15: Bewertung: Sicherheit

Maßnahme	Punkte
Bei Haltestelleninseln Anordnung von Z-Übergängen	1
Bei definierten Haltestellenzugängen Zugänge an jeweils beiden Bahnsteigenden	1
Zusätzliche Sicherungseinrichtungen (Umlaufgitter, zusätzliche Signalgeber in geringer Höhe, akustische Signale) bei unübersichtlichen Querungsstellen oder hohem Querungsbedarf	1
Sichteinschränkung durch abgestellte Fahrzeuge	-1
Umwegebehaftete Anbindung der Haltestelle für Fußgänger	-1

5.5 Scorecard

Die erreichten Punktwerte der jeweiligen Kategorien können in folgender Tabelle zusammengetragen werden. Durch die Summierung der Punkte jedes Kriteriums ergibt sich eine Gesamtpunktzahl, die Aufschluss über die Qualität der Reisegeschwindigkeit oder dessen Defizite gibt. Je höher der erzielte Punktwert, desto besser das Gesamtergebnis.

Tab. 5.16: Beurteilungsblatt für das Gesamtergebnis

Scorecard	
Kategorie	Punkte
Freie Strecke:	
Fahrweg	
Parkplätze	
Zwischensumme	/ 22
Haltestellen:	
Ausführungsart der Haltestellen	
Haltestellenabstände	
Haltestellenanlage	
Spaltbreite	
Zusatzmaßnahmen an Haltestellen	
Zwischensumme	/ 22
Fahrzeug:	
Türbreite	
Einstiegsverhältnisse	
Ticketverkauf	
Zwischensumme	/ 22
Knotenpunkte:	
Knotenpunkte ohne LSA-Regelung	
Knotenpunkte mit LSA-Regelung	
Zwischensumme	/ 22
Betrieb:	
Intervalldichte	
Zusatzpunkte	
Sicherheit	
Zwischensumme	/ 12
Summe	/ 100

Kapitel 6

Anwendung des Bewertungsverfahrens

6.1 Analyse der Straßenbahnlinie 42

Die Linie 42 ist mit einer Linienlänge von 3,38 km, neben der Linie U2Z, die temporär als Ersatzverkehr der U-Bahnlinie U2 verkehrt, die kürzeste Straßenbahnlinie in Wien. Sie verbindet die Endhaltestellen Schottentor und Antonigasse. Trotz der kurzen Linienlänge, weist diese eine Vielzahl von Charakteristika auf, die repräsentativ für typische Herausforderungen im Straßenbahnverkehr sind. Ein interessantes Merkmal ist die Asymmetrie in der Anzahl der Haltestellen zwischen den beiden Fahrtrichtungen. Während in Fahrtrichtung Antonigasse 10 Haltestellen bedient werden, sind es in Fahrtrichtung Schottentor 11 (zusätzlich Sensengasse) Haltestellen. Unter anderem darauf ist die Diskrepanz in den Geschwindigkeiten der beiden Fahrtrichtungen, wie in Kapitel 2.2.2 ersichtlich, zurückzuführen. Darüber hinaus bestehen an drei Haltestellen (Schottentor, Währinger Straße, Volksoper und Michelbeuern-AKH) Umsteigemöglichkeiten auf die U-Bahn. Ein weiterer relevanter Aspekt ist die unterschiedliche Verkehrsführung, da die Linie 42 sowohl im Mischverkehr als auch auf eigenen Fahrwegen verläuft. Dieser Mix aus Verkehrsbedingungen trägt zur Vielseitigkeit der Bewertung bei und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Reisegeschwindigkeit.

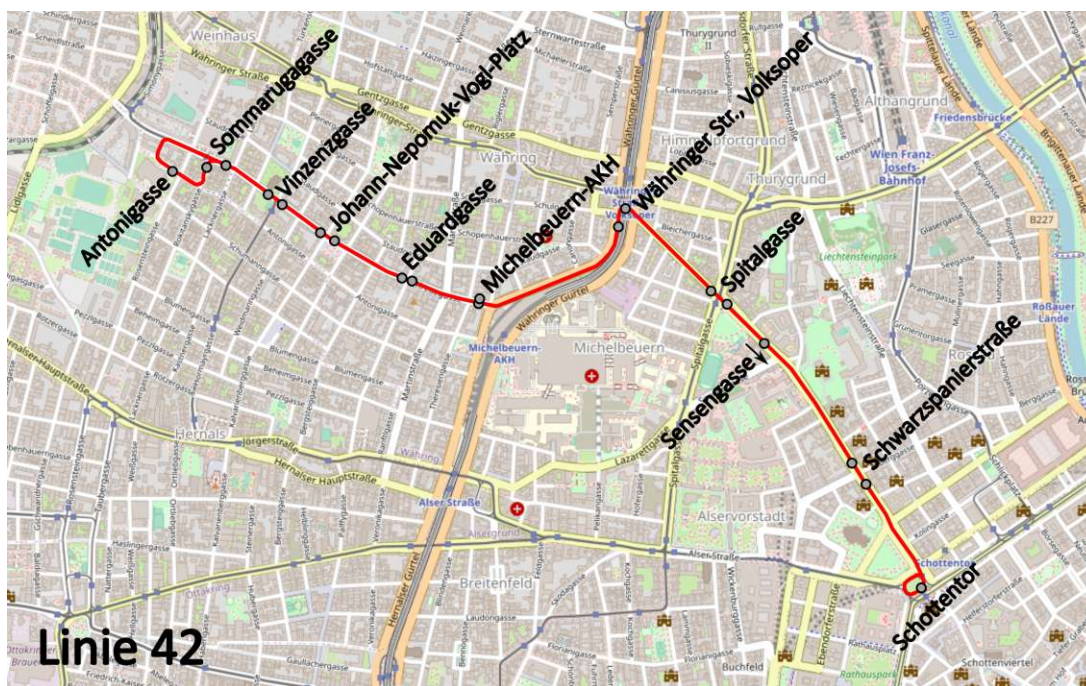


Abb. 6.1: Streckenführung der Linie 42, Kartenhintergrund: ViennaGIS, CC BY 4.0, url: <https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/> (Zugriff am 27.11.2023)

6.1.1 Freie Strecke

6.1.1.1 Fahrweg

Der Fahrweg der Linie 42 gliedert sich in verschiedene Abschnitte (siehe Abb. 6.2). Etwa 10 % der Strecke verlaufen auf eigenständigem Bahnkörper, 13,2 % auf eigenem Fahrweg, der durch Schwellen abgetrennt ist, 22,6 % auf eigenem Fahrweg, der durch Bodenmarkierungen gekennzeichnet ist, und 12,3 % auf einseitig geführtem eigenem Fahrweg, der ebenfalls durch Bodenmarkierungen begrenzt ist. Die verbleibenden 41,9 % des Fahrwegs werden im Mischverkehr geführt.

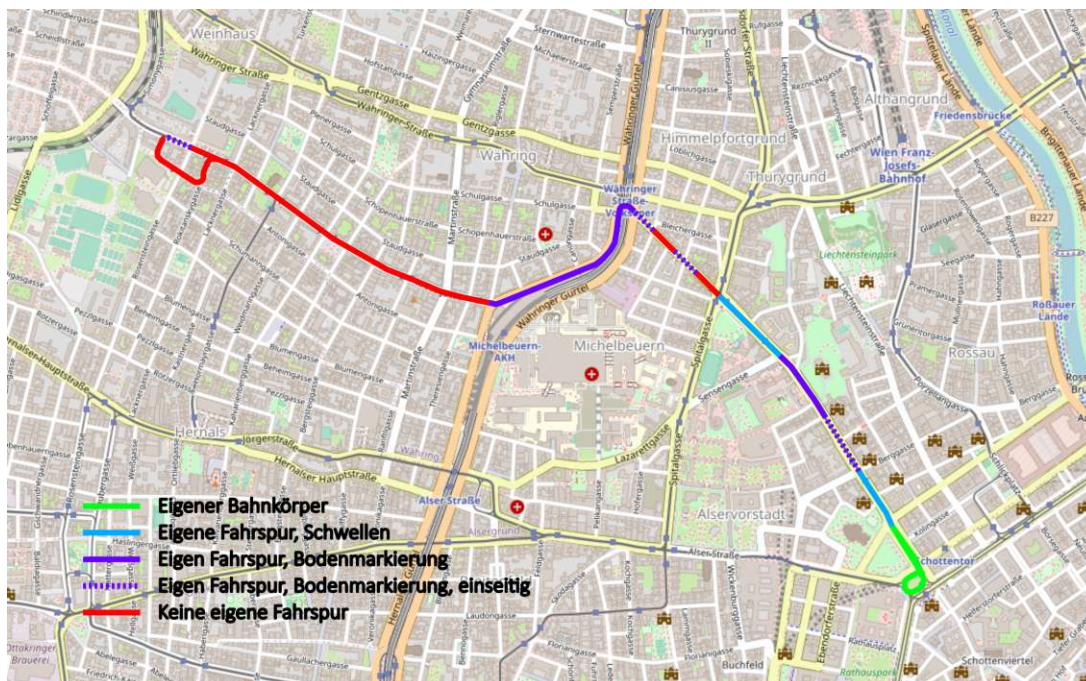


Abb. 6.2: Verteilung der Fahrweginfrastruktur der Linie 42, Kartenhintergrund: ViennaGIS, CC BY 4.0, url: <https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/> (Zugriff am 27.11.2023)

Mit den ermittelten prozentualen Anteilen der verschiedenen Fahrweginfrastrukturen lässt sich folgender Punktwert erzielen:

Tab. 6.1: Linie 42: Fahrweginfrastruktur

Typ des Fahrwegs	Punkte	Gewichtung
Eigener Bahnkörper, physisch getrennt	22	% der Trasse
Eigene Fahrspur, durch Schwellen getrennt	20	
Eigene Fahrspur, durch Bodemarkierungen getrennt	16	
Keine eigene Fahrspur	0	
	9,45	

6.1.1.2 Parkplätze

Die Analyse der Parkplatzsituation (Begehung sowie Luftbildmessungen im Dez. 2023) ergab folgende Ergebnisse: An 21,6 % der Strecke befinden sich Parkplätze in unmittelbarer Nähe des Fahrwegs der Straßenbahn. Eine genauere Analyse zeigt, dass rund 14,9 % dieser Parkplätze einen äußerst geringen Abstand von unter 1,00 m zum Fahrweg der Straßenbahn aufweisen, während etwa 6,2 % einen etwas größeren Abstand von über 1,00 m haben (siehe Abb. 6.3).

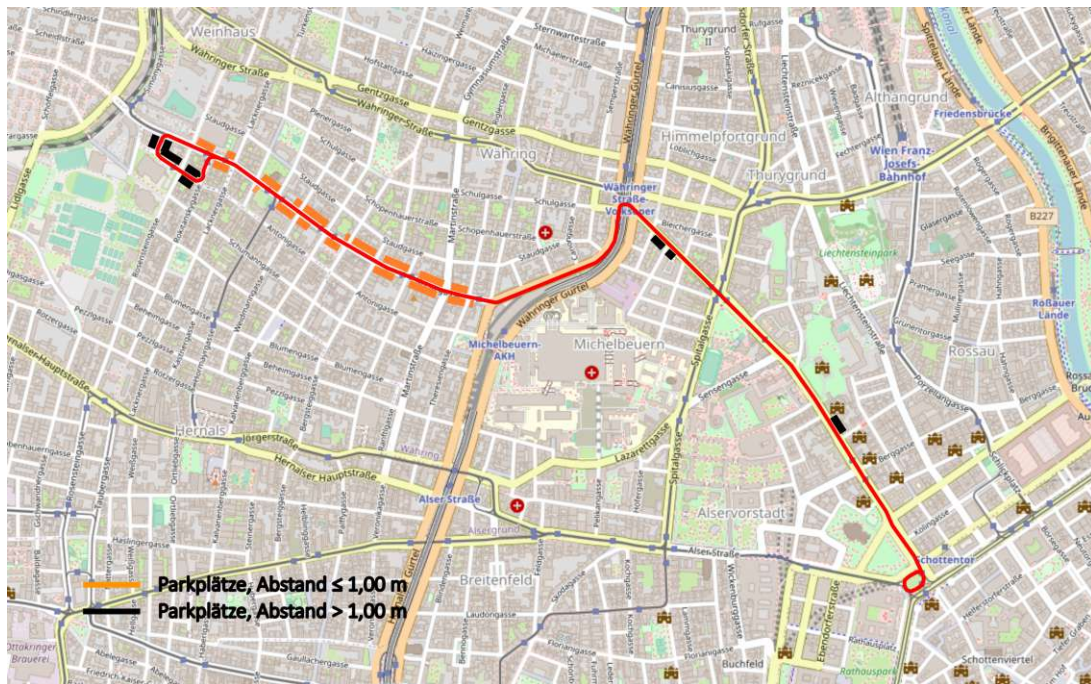


Abb. 6.3: Verteilung der Parkstände am Fahrbahnrand der Linie 42, Kartenhintergrund: Vienna-GIS, CC BY 4.0, url: <https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/> (Zugriff am 27.11.2023)

Hinsichtlich der Bewertung resultiert die Verteilung der Parkplätze in folgendem Punktwert:

Tab. 6.2: Linie 42: Parkplätze

Parkplätze	Punkte	Gewichtung
MIV Parkplätze, direkt angrenzend an Fahrweg der Straßenbahn (Abstand ≤ 1 m)	-8	% der Trasse
MIV Parkplätze, direkt angrenzend an Fahrweg der Straßenbahn (Abstand > 1 m)	-4	
	-1,44	

6.1.2 Haltestellen

6.1.2.1 Ausführungsart der Haltestellen

Entlang der Strecke der Linie 42 befinden sich insgesamt 19 Haltestellen, bestehend aus 11 Kaphaltestellen, 3 Seitenlage-Haltestellen, 3 Inselhaltestellen und 2 Haltestellen, die das Überqueren der Fahrbahn erfordern. Zu beachten sind dabei die drei Seitenlage-Haltestellen (Schottentor, Währinger Straße-Volksoper), die einem eigenen Fahrweg zugeordnet sind und daher die maximale Punktzahl erhalten. Dies führt zu folgendem Ergebnis:

Tab. 6.3: Linie 42: Ausführungsart der Haltestellen

Haltestellentyp	Punkte	Gewichtung
Seitenlage:		
Kaphaltestelle	10	% der Haltestellen
In Seitenlage, direkt am Fahrbahnrand/Gehweg	8	
Haltestelle in Seitenlage mit Erfordernis der Fahrbahnquerung	-6	
Mittellage:		
Haltestelleninsel	6	% der Haltestellen
	7,68	

6.1.2.2 Haltestellenabstände

In den GTFS-Datensätzen (Kapitel 2.2.1) der Wiener Linien sind die kumulierten Haltestellenabstände hinterlegt. Daraus ergibt sich für die Linie 42 ein durchschnittlicher Haltestellenabstand von 356,2 Metern. Von den 19 Haltestellenabständen weisen wiederum 10 einen Abstand von unter 300 Metern auf. Daraus resultiert folgender Punktwert:

Tab. 6.4: Linie 42: Haltestellenabstand

Haltestellenabstand	Punkte	Gewichtung
Haltestellenabstand unter 300 m	-4	% der Haltestellenabstände
	-2,11	

6.1.2.3 Haltestellenanlage

Die Festlegung der Haltestellenbreite erfolgte durchgehend unter Berücksichtigung des Fahrgastaufkommens. An keinem Punkt entlang der Strecke wird die optimale Haltestellenbreite b (siehe Kapitel 4.2) unterschritten, und somit kann der maximale Punktwert von 2 Punkten erreicht werden. Auch im Hinblick auf die Haltestellenlängen wird der Mindestwert von der Länge des längsten haltenden Fahrzeugs + 1,00 m nicht unterschritten. Der Gesamtpunktwert setzt sich demnach wie folgt zusammen:

Tab. 6.5: Linie 42: Haltestellenanlage

Maße	Punkte	Gewichtung
Breite:		
Mindestbreite nach Formel 4.2 nicht unterschritten	2	% der Haltestellen
Länge:		
Mindestlänge von der Länge des längsten haltenden Fahrzeuges + 1,00 m nicht unterschritten	2	% der Haltestellen
	4	

6.1.2.4 Spaltbreite

Die Sichtung vor Ort inklusive eigener Messungen hat ergeben, dass die Spaltbreite an den Haltestellen entlang der Linie 42 durchgängig im Bereich von 50 bis 100 mm liegt. In Übereinstimmung mit den Bewertungskriterien erhält dieser Aspekt einen Punktwert von 6 Punkten.

Tab. 6.6: Linie 42: Spaltbreite

Spaltbreite	Punkte	Gewichtung
≤ 50 mm	8	% Haltestellen
50 – 100 mm	6	
> 100 mm	0	
	6	

6.1.2.5 Zusatzmaßnahmen an Haltestellen

An beiden Haltestellen, Sensengasse und Schwarzspanierstraße, die ein Überqueren der Fahrbahn zum Ein- und Aussteigen erfordern, sind Fahrbahnanhebungen angeordnet. Entlang der Strecke sind keine Zeitinseln situiert. Aus dieser Konfiguration ergibt sich folgender Punktwert für die Bewertung:

Tab. 6.7: Linie 42: Zusatzmaßnahmen an Haltestellen

Maßnahme	Punkte	Gewichtung
An Haltestellen mit Erfordernis der Fahrbahnquerung:		
Zeitinsel	3	% der Haltestellen
Fahrbahnanhebung	2	
An Haltestellen in Seitenlage:		
Verkehrinsel zwischen gegenüberliegenden Haltestellen	2	% der Haltestellen
	0,21	

6.1.3 Fahrzeug

Auf der Linie 42 kommen zwei verschiedene Fahrzeugtypen zum Einsatz: der Niederflurwagen ULF Typ A und der ULF Typ A₁. Die beiden Fahrzeugtypen sind weitgehend identisch und unterscheiden sich hauptsächlich durch die Implementierung einer Temperaturabsenkanlage, die Art der Sitzgelegenheiten sowie kleinere technische Modifikationen. Dazu gehört unter anderem die Integration schwächerer, luftgekühlter Motoren, die aufgrund der Übermotorisierung des Vorgängertyps A vorgenommen wurde.

6.1.3.1 Türbreite

Die Türbreite der beiden eingesetzten Fahrzeugtypen ist ident und beläuft sich auf ca. 1380 mm. Mit dieser Türbreite erfüllen beide Fahrzeugtypen die Anforderung von über 1250 mm und es ergibt sich die maximale Punktzahl von 8 Punkten.

Tab. 6.8: Linie 42: Türbreite

Türbreite	Punkte	Gewichtung
Türbreite $\geq$ 1250 mm	8	% Fahrzeuge
	8	

6.1.3.2 Einstiegsverhältnisse

Die Einstiegshöhe entlang der Strecke der Linie 42 bewegen sich im Bereich von 30 bis 80 mm, was gemäß den vorgegebenen Bewertungskriterien zu einer Zuordnung in die Kategorie „quasi-eben“ führt. Auch die Haltestellen mit Erfordernis der Fahrbahnquerung fallen aufgrund der Fahrbahnanhebungen in diesen Bereich. Diese Klassifizierung verleiht den Haltestellen 6 Punkte, entsprechend dem definierten Bewertungsschema.

Tab. 6.9: Linie 42: Einstiegsverhältnisse

Einstiegsverhältnisse	Punkte	Gewichtung
Eben (≤ 30 mm)	8	% Fahrzeuge
Quasi-eben (30 – 80 mm)	6	
Eine Stufe (> 80 mm)	2	
Mehrere Stufen	0	
	6	

6.1.3.3 Ticketverkauf

Bei beiden auf der Linie 42 eingesetzten Fahrzeugtypen (ULF Typ A, ULF Typ A₁) obliegt dem Fahrpersonal weder der Fahrkartenverkauf noch die Kontrolle der Gültigkeit. Der Fahrkartenverkauf findet vor Fahrtantritt an Ticketautomaten, Verkaufsstellen oder im Fahrzeug selbst an Ticketautomaten statt. Ebenso kann die Entwertung eigenständig im Fahrzeug durchgeführt werden. Daraus resultiert der folgende Punktwert:

Tab. 6.10: Linie 42: Fahrkartenverkauf

Fahrkartenverkauf	Punkte	Gewichtung
Ticketautomaten und Entwerter im Fahrzeug	6	% Fahrzeuge
Fahrkartenverkauf beim Fahrpersonal	-2	
Fahrtausweiskontrolle beim Fahrpersonal	-4	
	6	

6.1.4 Knotenpunkte

Die in Abbildung 6.4 dargestellte Verteilung der relevanten Knotenpunkte entlang der Strecke der Linie 42 verdeutlicht die geringe Präsenz von Knotenpunkten mit Lichtsignal-Steuerung, die grau markiert sind. Die orangefarbenen Punkte hingegen kennzeichnen Knotenpunkte ohne Lichtsignal-Steuerung, an denen voraussichtlich mit Störungen zu rechnen ist. Dies resultiert entweder aus zu erwartenden Linksabbiegern vor der Straßenbahn, die abgewartet werden müssen, bzw. dem Fehlen einer separaten Linksabbiegespur für den MIV oder dem Mangel an vorfahrtsregelnden Maßnahmen.

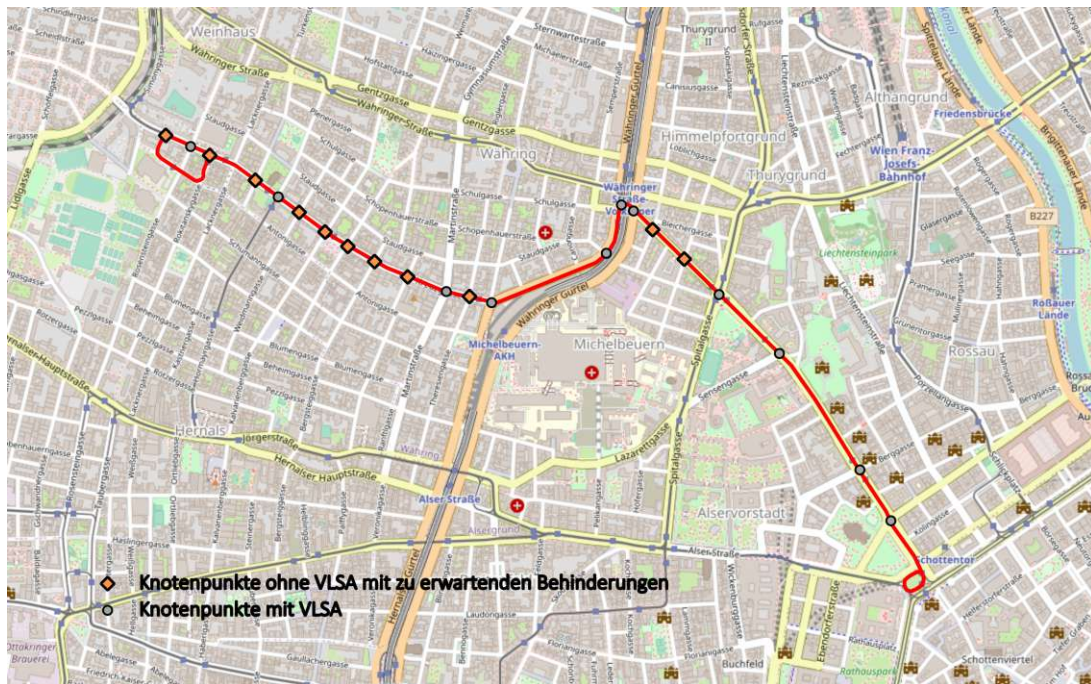


Abb. 6.4: Relevante Knotenpunkte der Linie 42, Kartenhintergrund: ViennaGIS, CC BY 4.0, url: <https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/> (Zugriff am 27.11.2023)

6.1.4.1 Knotenpunkte ohne LSA-Regelung

Im Allgemeinen sind die Verkehrswege der Linie 42 als Vorrangstraßen definiert. Die einzige Ausnahme bildet dabei die Wendeschleife um die Antonigasse. Sowohl beim Linksabbiegen von der Kreuzgasse in die Antonigasse als auch beim Rechtsabbiegen von der Sommeragasse in die Kreuzgasse müssen meist feindliche Verkehrsbeziehungen abgewartet werden. Hier wird ein Punkteabzug vergeben. An 9 weiteren Knotenpunkten ist mindestens eine Fahrtrelation durch das Fehlen eines Linksabbiegestreifens für den MIV gekennzeichnet. Aufgrund dieser Gegebenheiten ermitteln sich die Punkte wie folgt:

Tab. 6.11: Linie 42: Knotenpunkte ohne LSA-Regelung

Verkehrsregelung	Punkte	Gewichtung
Straßen des Straßenbahnverkehrs als Vorfahrtsstraße definiert	12	% der Knotenpunkte
Kein eigener Linksabbiegestreifen für den MIV	-4	
Keine vorfahrtregelnden Maßnahmen bzw. Rechts-vor-Links-Regelung	-6	
	5,41	

6.1.4.2 Knotenpunkte mit LSA-Regelung

Entlang der Strecke befinden sich 11 Knotenpunkte mit Lichtsignal-Regelung. Diese sind laut Wiener Linien wie folgt ausgeführt: Die LSAs entlang der Währinger Straße zwischen Schottentor bis exklusive Kreuzung Spitalgasse sind in beide Fahrtrichtungen an die Fahrkurve aller an diesem Abschnitt fahrenden Linien angepasst. An der LSA Währinger Straße/Spitalgasse gibt es eine Starrschaltung, welche an alle Linien, auch querende Linien entlang der Spitalgasse/Nußdorfer Straße, angepasst ist. Zwischen den LSAs Währinger Gürtel/Währinger Straße und Währinger Gürtel/Schulgasse, befindet sich eine Haltestelle für die Linie 42. Hier sind die Anlagen so geschaltet (Phasenmodifikation), dass die Straßenbahn in die Haltestelle einfährt, genug Zeit für den Fahrgastwechsel hat und danach, ohne großen Zeitverlust, wieder weiterfahren kann. Die LSA Währinger Gürtel/Severingasse ist prinzipiell auf Dauergrün. Es gibt hier allerdings Schleifen in der Severingasse für den MIV, welche dafür sorgen, dass diese Relation frei bekommt, während der Währinger Gürtel gesperrt ist. Bei gleichzeitiger Anmeldung der Straßenbahn und des MIV (Severingasse) wird die Straßenbahn bevorrangt. Circa 100 Meter vor der LSA Währinger Gürtel/Kreuzgasse gibt es einen Meldekontakt (Oberleitungskontakt) für die Straßenbahn, um sich bei dieser Anlage anzumelden und das Abbiegen zu ermöglichen. An den LSAs Kreuzgasse/Martinstraße und Kreuzgasse/Vinzenzgasse ist eine Freigabezeitbeeinflussung per Datenfunk möglich. Die LSA Kreuzgasse/Paulinengasse ist durch einen Oberleitungskontakt beeinflussbar.

Weiters wird an dem Knotenpunkt Währingerstraße/Sensengasse der Linksabbiegestreifen in Fahrtrichtung Schottentor auf dem Fahrweg der Straßenbahn geführt. Die Knotenpunkte Martinstraße/Kreuzgasse, Vinzenzgasse/Kreuzgasse und Paulinengasse/Kreuzgasse sind ebenfalls durch das Fehlen von Linksabbiegestreifen gekennzeichnet.

Somit ergibt sich die Punktezahl zu:

Tab. 6.12: Linie 42: Knotenpunkte mit LSA-Regelung

Verkehrsregelung	Punkte	Gewichtung
Beeinflussung an LSA durch Modifikation der Phasenfolge oder Phasenanzahl	22	% der Knotenpunkte
Beeinflussung an LSA durch Modifikation der Freigabezeit	20	
Umlauf der LSA an Fahrkurve der Straßenbahn angepasst	15	
Keine Berücksichtigung der Straßenbahn an LSA	0	
Kein eigener Linksabbiegestreifen für den MIV	-4	
	6,06	

6.1.5 Betrieb

6.1.5.1 Intervalldichte

Die Intervalle der Linie 42 sind entsprechend der Nachfrage flexibel gestaltet. Während der Morgen- und Nachmittagsspitzen im Fahrplan wird ein Intervall von 5 bis 9 Minuten berücksichtigt, während es außerhalb dieser Spitzenzeiten auf 12 Minuten erhöht wird. Ebenso erfolgt eine Anpassung des Intervalls während der Ferien, an Wochenenden und an Feiertagen. Pulkbildung war im Zuge der Bewertung (am 1.12.2023) keine beobachtbar. Es ergibt sich folgender Punktwert:

Tab. 6.13: Linie 42: Intervalldichte

Maßnahme	Punkte
Intervalldichte an Fahrgastauslastung angepasst	4
Pulkbildung beobachtbar	-2
	4

6.1.5.2 Zusatzpunkte

Abgesehen von den Endhaltestellen bietet die Linie 42 keine Üholungsmöglichkeiten. Auf Ticket-Automaten und markierte Türbereiche an Haltestellen wurde ebenfalls weitestgehend verzichtet. Zum Zeitpunkt der Bewertung gab es keine laufenden Informationskampagnen. Bei unvorhergesehenen Fahrzeugausfällen kann linienübergreifend auf Ersatzfahrzeuge zurückgegriffen werden. Somit kann 1 Punkt für die Fahrzeugverfügbarkeit vergeben werden.

Tab. 6.14: Linie 42: Zusatzpunkte

Maßnahme	Punkte
Überholungsmöglichkeiten an Mehrfachhaltestellen	2
Markierte Türbereiche an Haltestellen	2
Ticket-Automaten an Haltestellen	1
Informationskampagnen (Aussteigen vor Einsteigen, Pulkbildung, ...)	1
Hohe Fahrzeugverfügbarkeit	1
	1

6.1.5.3 Sicherheit

Im Verlauf der Strecke der Linie 42 sind drei Inselhaltestellen positioniert. An allen drei Inselhaltestellen wurde auf die Implementierung von Z-Übergängen verzichtet. Die Mehrheit der Haltestellen besteht aus Haltestellen in Seitenlage, die üblicherweise am Gehweg platziert sind. Dementsprechend existieren keine definierten Zugänge zu diesen Haltestellen, und somit lassen sich diese in Bezug auf Haltestellenzugänge nicht bewerten. Die Ausnahmen sind die drei Inselhaltestellen sowie die Haltestelle Schottentor. Die Haltestellen Spitalgasse und Schottentor haben jeweils zwei festgelegte Zugänge. Die Haltestelle Antonigasse weist keine festgelegten Haltestellenzugänge auf. Bei der Haltestelle Schwarzspanierstraße, die über zwei definierte Zugänge verfügt, ergibt sich jedoch die Problematik, dass aufgrund ihrer Länge (Doppelhaltestelle) die Straße oft abseits des Schutzweges überquert wird, da sich die Zugänge lediglich an den Enden der Haltestelle befinden. Aufgrund dieser Gegebenheiten werden keine Punkte für die Haltestellenzugänge vergeben. Auf zusätzliche Sicherungseinrichtungen wurde weitestgehend verzichtet. Sichteinschränkungen oder umwegebehaftete Anbindungen wurden keine beobachtet. Somit beläuft sich der Punktwert dieser Kategorie zu:

Tab. 6.15: Linie 42: Sicherheit

Maßnahme	Punkte
Bei Haltestelleninseln Anordnung von Z-Übergängen	1
Bei definierten Haltestellenzugängen Zugänge an jeweils beiden Bahnsteigenden	1
Zusätzliche Sicherungseinrichtungen (Umlaufgitter, zusätzliche Signalgeber in geringer Höhe, akustische Signale) bei unübersichtlichen Querungsstellen oder hohem Querungsbedarf	1
Sichteinschränkung durch abgestellte Fahrzeuge	-1
Umwegebehaftete Anbindung der Haltestelle für Fußgänger	-1
	0

6.2 Ergebnis

Nach Übertragung der ermittelten Punktwerte in die Scorecard ergibt sich folgendes Resultat:

Tab. 6.16: Gesamtergebnis der Linie 42

Scorecard	
Kategorie	Punkte
Freie Strecke:	
Fahrweg	9,45
Parkplätze	-1,44
Zwischensumme	8,01 / 22
Haltestellen:	
Ausführungsart der Haltestellen	7,68
Haltestellenabstände	-2,11
Haltestellenanlage	4
Spaltbreite	6
Zusatzmaßnahmen an Haltestellen	0,21
Zwischensumme	15,78 / 22
Fahrzeug:	
Türbreite	8
Einstiegsverhältnisse	6
Ticketverkauf	6
Zwischensumme	20 / 22
Knotenpunkte:	
Knotenpunkte ohne LSA-Regelung	5,41
Knotenpunkte mit LSA-Regelung	6,06
Zwischensumme	11,47 / 22
Betrieb:	
Intervalldichte	4
Zusatzpunkte	1
Sicherheit	0
Zwischensumme	5 / 12
Summe	60,26 / 100

6.3 Fazit und Optimierungspotential der Linie 42

Die Bewertung der Linie 42 nach dem entwickelten Scorecard-System ergab eine Gesamtpunktzahl von 60,35 von 100 möglichen Punkten. Die Analyse der Einzelkategorien zeigt Stärken und Schwächen auf, die im Folgenden näher erläutert werden.

6.3.1 Freie Strecke

Die Kategorie „Freie Strecke“ erzielt eine Gesamtpunktzahl von 8,01 von 22 möglichen Punkten. Die bescheidene Gesamtpunktzahl dieser Kategorie ist primär auf die Tatsache zurückzuführen, dass 41,9 % der Gesamtstrecke im Mischverkehr verlaufen, wodurch entsprechende Bewertungspunkte entfallen. Zusätzlich resultieren Punktabzüge aus der Präsenz von *Parkplätzen* entlang der Strecke, insbesondere im Bereich der Kreuzgasse. Die verbleibenden rund 58 % verlaufen auf separaten Fahrwegen, wenn auch teilweise nur einseitig, was zu hohen Punktzahlen führt. Als besonders vorbildlich kann der Bereich des Währinger Gürtel erachtet werden. Hier lassen sich aufgrund der störungsfreien Natur sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen.

Eine durchaus vorstellbare Optimierungsmaßnahme wäre, anstelle der aktuellen Parkplatzkonfiguration eine dedizierte Fahrspur für die Straßenbahn zu implementieren. Eine solche Modifikation birgt das Potenzial, Konfliktpotenziale mit dem MIV erheblich zu reduzieren, sei es auf freier Strecke, durch ungeeignet abgestellte Fahrzeuge oder während Ein- und Ausparkmanövern, und somit die Reisegeschwindigkeit nachhaltig zu steigern. An Abschnitten mit begrenzten Platzverhältnissen ist eine einseitige Führung einer exklusiven Fahrspur für die Straßenbahn denkbar.

6.3.2 Haltestellen

Das Bewertungskriterium „Haltestellen“ verzeichnet eine Gesamtpunktzahl von 15,78 von 22 möglichen Punkten. Dabei erzielt der Unterpunkt *Haltestellentyp* eine durchaus positive Bewertung von 7,68 von 10 Punkten, die aufgrund der mehrheitlichen Anordnung von Kaphaltestellen zustande kommt. Einzig an drei Haltestellen wurde ein Punktabzug verhängt, bedingt durch die Notwendigkeit einer Fahrbahnquerung. Hier wäre eine sinnvolle Maßnahme die Implementierung von Haltestelleninseln an diesen Standorten.

Die Bewertung der *Haltestellenabstände* führt zu einem leichten Punktabzug von -2,11. Dies deutet darauf hin, dass in bestimmten Abschnitten möglicherweise Optimierungen in Bezug auf die Distanz zwischen den Haltestellen vorgenommen werden könnten. Hierbei wäre eine Feinabstimmung der Haltestellenpositionen, vor allem im Bereich der Kreuzgasse, denkbar, um eine gleichmäßigere Verteilung und möglicherweise eine Verbesserung der Reisegeschwindigkeit zu erreichen.

Die Gesamtpunktzahl für die *Haltestellenanlage* beläuft sich auf 4 Punkte, was auf eine insgesamt zufriedenstellende Dimensionierung der Haltestellenanlagen hindeutet. Die *Spaltbreite* wurde mit 6 Punkten (50 – 100 mm) bewertet, was zwar Spielraum für Verbesserungen (8 Punkte bei ≤ 50 mm) offen lässt, jedoch ein erheblicher Aufwand erforderlich wäre. Es stellt sich die Frage, ob der potenzielle Nutzen einen solchen Aufwand rechtfertigt.

Zusatzmaßnahmen an Haltestellen beschränken sich ausschließlich auf den Bereich der Haltestellen mit der Notwendigkeit einer Fahrbahnquerung, die in Form von Fahrbahnanhebungen realisiert sind. In diesem Zusammenhang könnten Zeitinseln eine durchaus sinnvolle ergänzende Maßnahme darstellen, was sich zudem in einer höheren Punktzahl niederschlagen könnte.

6.3.3 Fahrzeug

Die Kategorie „Fahrzeuge“ erzielt eine bemerkenswerte Gesamtpunktzahl von 20 von 22 möglichen Punkten. Lediglich im Unterpunkt *Einstiegsverhältnisse* wurde nicht die volle Punktzahl erreicht. Zurückzuführen ist dies auf quasi-ebene (30 – 80 mm) Einstiegshöhen. Mit Einstiegshöhen von unter 30 mm würden sich auch in diesem Unterpunkt die volle Punktzahl erreichen lassen. Allerdings stellt sich auch hier die Frage, ob der damit verbundene Aufwand der Bestandsänderung im Verhältnis zum potenziellen Nutzen gerechtfertigt wäre.

6.3.4 Knotenpunkte

Die Analyse der „Knotenpunkte“ resultiert in einer Gesamtpunktzahl von 11,47 von 22 möglichen Punkten. Dabei fällt vor allem ins Gewicht, dass der Großteil der Knotenpunkte durch das Fehlen von Lichtsignalanlagen gekennzeichnet ist und somit an diesen Knotenpunkten nur maximal 12 der ansonsten möglichen 22 Punkte erreicht werden können. Weiters wird an zwei Knotenpunkten ohne LSA-Regelung, Kreuzgasse/Antonigasse und Sommeragugasse/Kreuzgasse, auf vorfahrtsregelnde Maßnahmen verzichtet, was meist zwangsweise ein Anhalten der Straßenbahn erfordert. An diesen beiden Kreuzungen wäre eine bedarfsgesteuerte LSA-Regelung äußerst sinnvoll.

An allen lichtsignalgeregelten Knotenpunkten wurde bereits der Straßenbahnbetrieb berücksichtigt. In den Fällen, in denen nur der Umlauf der LSA an die Fahrkurve der Straßenbahn angepasst wurde, bietet sich die zusätzliche Implementierung einer Freigabezeitmodifikation an. Dadurch wird sichergestellt, dass Fahrzeuge, die mit geringfügigen Abweichungen von der Fahrkurve den Knotenpunkt erreichen, diesen ebenfalls problemlos passieren können. Bei etwaigen Anpassungen ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, auch andere an den jeweiligen Knotenpunkten verkehrende Linien zu berücksichtigen und diese miteinander abzustimmen.

Allgemein sollten etwaige Linksabbiegebeziehungen des MIVs vom Fahrweg der Straßenbahn getrennt ausgeführt werden. Ein Negativbeispiel hierfür ist der Knotenpunkt Währinger Straße/Boltzmannngasse. Hier wird der Linksabbiegestreifen explizit von neben dem Fahrweg der Straßenbahn auf den Fahrweg der Straßen verschwenkt. Dies gilt es zu vermeiden.

6.3.5 Betrieb

Die Kategorie „Betrieb“ verzeichnet eine Gesamtpunktzahl von 5 von 12 möglichen Punkten. Die *Intervalldichte* erreicht eine Bewertung von 4 von 4 Punkten, was darauf hindeutet, dass der Fahrplan der Straßenbahnlinie 42 eine sehr gute Intervallgestaltung aufweist. In den Kategorien *Sicherheit* und *Zusatzpunkte* wird insgesamt lediglich 1 Punkt erreicht. Diese Bewertung lässt den Schluss zu, dass hinsichtlich Verkehrssicherheit und zusätzlicher Maßnahmen Raum für Verbesserungen besteht. Ein niedrigeres Unfallrisiko trägt immer zu einem stabileren Betriebsablauf bei. In dieser Hinsicht ist die Implementierung sicherheitsrelevanter Maßnahmen entlang der Linie 42 empfehlenswert. Darüber hinaus können Zusatzmaßnahmen wie beispielsweise die Installation von Ticketautomaten an stark frequentierten Haltestellen oder Informationskampagnen erhebliche Vorteile bieten und ohne größeren Aufwand umsetzbar sein. Als Inhalte für Informationskampagnen sind die Hinweise zum Fahrgastwechsel („Aussteigen vor Einsteigen“) und Maßnahmen gegen Pulkbildung („Auf das nächste Fahrzeug warten, anstatt in das überfüllte und verspätete Fahrzeug einzusteigen“) empfehlenswert.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ein Bewertungsverfahren zur Analyse der Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen stellt ein äußerst nützliches Instrument für Planungs- und Optimierungszwecke dar. Die Untersuchung der maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Reisegeschwindigkeit hat gezeigt, dass es unzureichend ist, sich lediglich auf negative Einflüsse zu konzentrieren. Vielmehr ist es entscheidend, auch Kriterien zu erforschen, die die Reisegeschwindigkeit positiv beeinflussen, um somit eine umfassende Bewertung zu gewährleisten. Die ermittelten Parameter lassen sich in fünf Gruppen zusammenfassen: „freie Strecke“, „Haltestellen“, „Fahrzeuge“, „Knotenpunkte“ und „Betriebsaspekte“.

Die Kategorie *freie Strecke* berücksichtigt alle relevanten Kriterien entlang der Strecke abseits von Haltestellen und Knotenpunkten. Hierbei gilt besonderes Augenmerk der Fahrweginfrastruktur und deren Abgrenzung von der MIV-Fahrspur (vgl. Kapitel 4.2.1). Der Bereich *Haltestellen* beinhaltet Parameter, die den Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit im Bereich der Haltestellen selbst ausüben (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Analyse zeigt, dass die Ausführungsart der Haltestellen und die Spaltbreite zwischen Fahrzeug und Haltestelle entscheidende Faktoren sind. Zudem kann die Anpassung von Haltestellenabständen und -anlagen die Effizienz steigern. Die Untersuchung der Kategorie *Fahrzeuge* (vgl. Kapitel 3.1.5 & 4.1.1.6) verdeutlicht, dass Türbreite, Einstiegshöhe und Fahrgastabfertigung maßgeblichen Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit haben. Ebenso trägt eine effektive Verkehrsregelung an *Knotenpunkten* zur Minimierung von Störungen und zur Erhöhung der Reisegeschwindigkeit bei (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Analyse des *Betriebs* offenbart, dass Intervalldichte (vgl. Kapitel 3.1.3) und Sicherheitsaspekte (vgl. Kapitel 4.2.2) relevante Kriterien sind. Die kontinuierliche Anpassung der Fahrpläne an die Nachfrage und gezielte Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung fördern die Effizienz und Qualität des Straßenbahnverkehrs.

Die strukturierte Unterteilung der Bewertungskriterien in übergeordnete Gruppen ermöglicht nicht nur eine umfassende Gesamtbewertung, sondern erlaubt auch eine detaillierte Analyse der individuellen Unterpunkte. Durch diese differenzierte Herangehensweise wird die schnelle Identifikation konkreter Stärken und Optimierungspotenziale ermöglicht. Die Ergebnisse dieser differenzierten Bewertung stellen eine solide und präzise Grundlage dar, die fundierte Entscheidungen zur Optimierung der Reisegeschwindigkeit unterstützt.

Die angewandte Bewertungsmethodik auf die untersuchte Straßenbahnlinie 42 in Wien hat nicht nur spezifische Einblicke in deren Leistungsfähigkeit gewährt, sondern auch die Effektivität des entwickelten Bewertungsinstruments als universelles Analysewerkzeug betont. Die Anwendbarkeit des entwickelten Systems geht über die spezifische Linie hinaus und verdeutlicht seine Vielseitigkeit als Instrument zur systematischen Evaluierung verschiedener Straßenbahnrouen. Diese Erkenntnisse stärken die Glaubwürdigkeit und Anwendbarkeit als entscheidendes Werkzeug für die effiziente Gestaltung und Optimierung von Straßenbahnverkehrssystemen.

7.2 Limitationen und Empfehlungen für weitere Forschung

Die Anwendung des Bewertungssystems verdeutlichte jedoch auch die Herausforderungen einer standardisierten Bewertung. Die Vielfalt städtischer Gegebenheiten, Verkehrsdynamiken und individueller Anforderungen jeder Straßenbahnlinie erfordern eine kontinuierliche Anpassung des Bewertungsinstruments. Hierbei spielen auch die Interaktionen zwischen den verschiedenen Kategorien eine bedeutende Rolle, die in zukünftigen Entwicklungen des Systems weiter ausdifferenziert werden sollten. Außerdem ist es wichtig zu betonen, dass die Qualität der Analyse stark von der Qualität der zugrunde liegenden Daten abhängt. Eine sorgfältige Überprüfung und Optimierung der Daten ist unerlässlich, um belastbare und verlässliche Ergebnisse zu erzielen. In diesem Kontext erscheint die Festlegung eines Mindeststandards für die Datenqualität als sinnvoll. Ein solcher Standard könnte wesentlich dazu beitragen, Fehlinterpretationen zu vermeiden und die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse zu stärken. Weiters könnte daraus abgeleitet werden, wie im Falle unzureichender Datenqualität umgegangen werden muss.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Streckenführung bzw. der Trassierungselemente weitestgehend aus der Bewertung ausgenommen. Dies ist damit begründet, dass diese nicht nur durch interne Faktoren, wie die Auswahl der Trassierungselemente selbst, sondern auch durch externe Faktoren wie städtebauliche Gegebenheiten, Zwangspunkte und Topografie beeinflusst wird und daher nicht immer direkt steuerbar ist. Um dieser Limitation Rechnung zu tragen, ist es notwendig, spezifische Kriterien und Indikatoren zu entwickeln, die die Auswirkungen der Trassierung auf die Reisegeschwindigkeit erfassen können. Eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Trassierungselemente sowie eine Berücksichtigung der individuellen Charakteristika der Straßenbahnlinien könnten dabei entscheidend sein. Denkbar wäre etwa der Ansatz mit dem Maß der Kurvigkeit, also dem Verhältnis aus den Winkeländerungen einer Trasse bezogen auf ihre Länge, zu arbeiten. Die so ermittelte Kurvigkeit könnte dann in Verbindung mit den entlang der Strecke auftretenden Zwangspunkten, also Punkten an denen die Linienführung jedenfalls verlaufen muss, gebracht werden. Dies würde eine genauere Einschätzung der Trassierungseinflüsse und eine Integration in das Gesamtbewertungssystem ermöglichen.

Eine weitere vielversprechende Richtung für zukünftige Forschungsaktivitäten könnte darin bestehen, eine detaillierte Korrelation zwischen den einzelnen Bewertungskriterien und den damit verbundenen tatsächlichen Geschwindigkeitssteigerungen bzw. -einbußen herzustellen. Durch eine vertiefte Analyse dieser Zusammenhänge könnten präzisere Einblicke gewonnen werden, die nicht nur die Ursachen von Geschwindigkeitsänderungen aufzeigen, sondern auch die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien quantifizieren. Infolgedessen könnte anhand der Ergebnisse der Bewertung ein Maßnahmenkatalog erstellt werden, der konkrete Geschwindigkeitssteigerungen abhängig der gewählten Maßnahmen aufzeigt.

Neben der Verknüpfung des Bewertungsverfahrens mit absoluten Geschwindigkeitswerten, könnte selbiges auch in Bezug auf Finanzen umgesetzt werden. Durch die Verknüpfung der aus der Bewertung resultierenden Optimierungspotenziale mit Kostenaspekten entsteht eine umfassende Grundlage für eine gezielte und effiziente Verbesserung des Straßenbahnverkehrs. Diese Synthese erlaubt nicht nur die Quantifizierung der voraussichtlichen Kosten einzelner Maßnahmen, sondern ermöglicht auch eine priorisierte Auswahl von Maßnahmen, die nicht nur effektiv, sondern auch wirtschaftlich sind. Dieser Ansatz eröffnet die Möglichkeit, fundierte Entscheidungen für die Allokation von Ressourcen zu treffen und unterstützt die Verantwortlichen dabei, gezielte Investitionen in Bereiche mit dem größten Verbesserungspotenzial zu tätigen.

Letztendlich eröffnen sich auch Perspektiven für die Verallgemeinerung und Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens. Eine vielversprechende Option besteht darin, das entwickelte Instrument nicht nur auf die Reisegeschwindigkeit von Straßenbahnen zu begrenzen, sondern es auf die allgemeine Qualität auszudehnen oder auf andere Formen des ÖPNVs anzuwenden.

Eine solche Erweiterung hätte nicht nur praktische Implikationen, indem sie umfassendere Einblicke in die Leistung von Nahverkehrssystemen ermöglicht, sondern könnte auch den Weg für weitere vergleichende Studien und Analysen im Bereich des öffentlichen Verkehrs bahnen. Durch die Ausdehnung der Anwendbarkeit auf verschiedene ÖPNV-Systeme eröffnet sich zudem die Möglichkeit, diese untereinander zu vergleichen.

Literatur

- [1] J. Gerlach. *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung : RIN*. ger. Ausg. 2008. Köln: FGSV Verl., 2008. ISBN: 3939715794.
- [2] *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen : RVS*. ger. Wien, 1972.
- [3] Google. *Google Transit*. Hrsg. von G. Developers. URL: <https://developers.google.com/transit?hl=de> (Zugriff am 25.07.2023).
- [4] Google. *General Transit Feed Specification*. Hrsg. von G. Developers. URL: <https://gtfs.org/> (Zugriff am 25.07.2023).
- [5] A. Stroh. „Untersuchung des Geschwindigkeitsprofils von Bussen und Straßenbahnen in Wien“. Bachelorarbeit. Technische Universität Wien, 2015.
- [6] S. Dinkic. „Möglichkeiten zur Beschleunigung von Öffentlichen Verkehrsmitteln, wenn die Grenze der Intervalldichte erreicht ist am Beispiel der Straßenbahnlinie 6 in Wien“. ger. Masterarbeit. Wien: Technische Universität Wien, 2018.
- [7] P. Cerwenka, G. Hauger, B. Hörl und M. Klamer. *Einführung in die Verkehrssystemplanung*. ger. Neuauflage. Wien: TUVerlag an der Technischen Universität Wien, 2017. ISBN: 3903024384.
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, [Arbeitsausschuß: Öffentlicher Verkehr, Arbeitskreis: ÖPNV-Beschleunigungsmaßnahmen im Oberflächenverkehr]. *Merkblatt für Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personennahverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen*. ger. Ausg. 1999. Köln: FGSV-Verl., 1999.
- [9] A. Nuß. *Projektierungshandbuch Öffentlicher Raum*. Forschungsber. Stadt Wien, Magistratsabteilung 18 - Stadtentwicklung und Stadtplanung, 2011. URL: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008199.pdf> (Zugriff am 19.08.2023).
- [10] U. Weidmann. *Grundlagen zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit*. ger. Schriftenreihe des IVT. Zürich: IVT, 1995.
- [11] W. Heinz. „Passenger service times on trains“. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2003. ISBN: 9173230626.
- [12] U. Weidmann. *Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr*. ger. Schriftenreihe des IVT. Zürich: IVT, 1994.
- [13] Wiener Linien. *Künftig kostet Bus- und Bim-Blockieren mindestens 365 Euro - so viel wie eine Öffi-Jahreskarte*. 29. Sep. 2023. URL: <https://www.wienerlinien.at/news/kuenftig-kostet-bus-und-bim-blockieren-mindestens-365-euro-so-viel-wie-eine-oeffi-jahreskarte>.
- [14] *Trassierungsvorschrift für die Wiener Straßenbahn*. Techn. Ber. Wiener Linien, 2017.
- [15] N. Ostermann und W. Rollinger. *Handbuch ÖPNV : Schwerpunkt Österreich*. ger. 1. Auflage. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2016. ISBN: 3871545503.

- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, [Arbeitsausschuß: Öffentlicher Verkehr, Arbeitskreis: ÖPNV-Beschleunigungsmaßnahmen im Oberflächenverkehr]. *Hinweise für die Bewertung von Maßnahmen zur Beeinflussung der ÖPNV-Abwicklung*. ger. Ausg. 1991. Köln: Forschungsges. für Straßen- u. Verkehrswesen, 1991.
- [17] S. Buchmueller, U. Weidmann und A. Nash. „Development of a dwell time calculation model for timetable planning“. In: Aug. 2008, S. 525–534. ISBN: 9781845641269. DOI: 10.2495/CR080511.
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf. *Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs : EAÖ*. ger. Ausg. 2013. Köln: FGSV-Verl., 2013. ISBN: 3864460549.
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. *Begriffsbestimmungen : Teil. Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb*. ger. Ausg. 2012. Köln, 2012. ISBN: 3864460247.
- [20] *Behindertenkonzept Tram und Busse im Linienverkehr: funktionale Anforderungsprofile*. Techn. Ber. Fachstelle VöV / BAV / BÖV, 2006.
- [21] D. Vallée, B. Engel und W. Vogt. *Stadtverkehrsplanung Band 3 : Entwurf, Bemessung und Betrieb*. ger. 3rd ed. 2021. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 3662596970. URL: 10.1007/978-3-662-59697-5.
- [22] W. Reinhardt. *Öffentlicher Personennahverkehr : Technik – rechts- und betriebswirtschaftliche Grundlagen*. ger. 2. Aufl. 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 3658220597.
- [23] V. R. Vuchic. *Urban transit systems and technology*. eng. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 2007. ISBN: 047175823X.
- [24] Verkehrsbetriebe Zürich - Unternehmensbereich Infrastruktur. *Empfehlungen für die Planung von Strassenbahnanlagen auf dem Netz der Verkehrsbetriebe Zürich*. 1. März 2014.
- [25] R. Fernández, A. Valencia und S. Seriani. „On passenger saturation flow in public transport doors“. eng. In: *Transportation research. Part A, Policy and practice* 78 (2015), S. 102–112. ISSN: 0965-8564.
- [26] R. Thoreau, C. Holloway, G. Bansal, K. Gharatya, T.-R. Roan und N. Tyler. „Train design features affecting boarding and alighting of passengers“. eng. In: *Journal of advanced transportation* 50.8 (2016), S. 2077–2088. ISSN: 0197-6729.
- [27] N. G. Harris, Ø. Risan und S.-J. Schrader. „The Impact of Differing Door Widths on Passenger Movement Rates“. In: Apr. 2014. DOI: 10.2495/CRS140051.
- [28] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement. *Hinweise zu Bevorrechtigungsmaßnahmen für den ÖPNV im städtischen Verkehrsmanagement*. ger. Ausgabe 2018. FGSV. Köln: FGSV Verlag, 2018. ISBN: 3864462126.
- [29] D. Kobbeloer. *Dezentrale Steuerung von Lichtsignalanlagen in urbanen Verkehrsnetzen*. ger. Schriftenreihe Verkehr. Kassel: Kassel Univ. Press, 2007. ISBN: 389958323X.
- [30] A. Griessbach, N. Seiler, U. Brannolte, U. Plank-Wiedenbeck, J. E. Bakaba und J. Ortlepp. *Maßnahmen zur Reduzierung von Unfällen mit Straßenbahnen*. Berlin, Germany: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Juni 2016.
- [31] C. Gershenson und L. A. Pineda. „Why Does Public Transport Not Arrive on Time? The Pervasiveness of Equal Headway Instability“. In: *PLoS ONE* 4.10 (Okt. 2009). Hrsg. von E. Scalas, e7292. DOI: 10.1371/journal.pone.0007292.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Weg-Zeit-Diagramm Reisezeit	14
2.2	Klassendiagramm eines GTFS-Feeds	15
2.3	Zusammensetzung der Gesamtfahrzeitzeit (adaptiert nach [6])	18
3.1	Folge von Verspätungen auf den Besetzungsgrad (adaptiert nach [8])	22
3.2	Effektiv nutzbare Türbreite (in Anlehnung an [11])	26
3.3	Fahrgastdichte im Auffangbereich (in Anlehnung an [11])	27
4.1	Haltezeit (adaptiert nach [17])	31
4.2	Haltestelle am Fahrbahnrand	32
4.3	Haltestellenkap	32
4.4	Querschnitt einer Fahrbahnanhebung [18]	33
4.5	Mittelbahnsteig mit besonderem Gleiskörper	34
4.6	Türbereichsmarkierung am Bahnsteig (Wien)	35
a	Enge Haltestellenabstände, große Überschneidungsbereiche, kleine Einzugs- lücken	37
4.7	Auswirkungen der Haltestellenabstände	37
b	Große Haltestellenabstände, kleine Überschneidungsbereiche, große Einzugs- lücken	37
4.8	Systemskizze Infrarotbaken (adaptiert nach [28])	43
4.9	Selbstständiger Gleiskörper in Mittellage [9]	47
4.10	Selbstständiger Gleiskörper in Seitenlage [9]	47
4.11	Hinweistafel zur dynamischen Straßenraumfreigabe (Wien)	48
4.12	Stuttgarter Schwelle als Fahrbahnabgrenzung (Wien)	49
4.13	selbstständiger Gleiskörper in Mittellage (Wien)	49
6.1	Streckenführung der Linie 42, Kartenhintergrund: ViennaGIS, CC BY 4.0, url: https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/ (Zugriff am 27.11.2023) .	62
6.2	Verteilung der Fahrweginfrastruktur der Linie 42, Kartenhintergrund: ViennaGIS, CC BY 4.0, url: https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/ (Zugriff am 27.11.2023)	63
6.3	Verteilung der Parkstände am Fahrbahnrand der Linie 42, Kartenhintergrund: Vi- ennaGIS, CC BY 4.0, url: https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/ (Zugriff am 27.11.2023)	64
6.4	Relevante Knotenpunkte der Linie 42, Kartenhintergrund: ViennaGIS, CC BY 4.0, url: https://www.wien.gv.at/ma41datenviewer/public/ (Zugriff am 27.11.2023) .	69

Tabellenverzeichnis

2.1	Durchschnittsgeschwindigkeit pro Linie und Richtung (Stand Nov. 2023)	16
2.2	Geschwindigkeiten nach GPS-Daten (Stand 2015) (adaptiert nach [5])	18
2.3	Durchschnittsgeschwindigkeiten verschiedener Städte (Stand Nov. 2023)	19
3.1	Fahrgastwechselzahl in Abhängigkeit der Türbreite [12]	24
3.2	Maximal zulässige Seitenbeschleunigung in Gleisbögen	29
3.3	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Sichtweite	30
4.1	ÖPNV-Erfassungssysteme (adaptiert nach [28])	41
4.2	Übersicht der Steuerungsverfahren (adaptiert nach [29])	44
5.1	Bewertung: Fahrwegeninfrastruktur	53
5.2	Bewertung: Parkplätze	53
5.3	Bewertung: Ausführungsart der Haltestellen	54
5.4	Bewertung: Haltestellenabstand	54
5.5	Bewertung: Haltestellenanlage	55
5.6	Bewertung: Spaltbreite	55
5.7	Bewertung: Zusatzmaßnahmen an Haltestellen	56
5.8	Bewertung: Türbreite	56
5.9	Bewertung: Einstiegsverhältnisse	57
5.10	Bewertung: Fahrkartenverkauf	57
5.11	Bewertung: Knotenpunkte ohne LSA-Regelung	58
5.12	Bewertung: Knotenpunkte mit LSA-Regelung	59
5.13	Bewertung: Intervalldichte	59
5.14	Bewertung: Zusatzpunkte	60
5.15	Bewertung: Sicherheit	60
5.16	Beurteilungsblatt für das Gesamtergebnis	61
6.1	Linie 42: Fahrwegeninfrastruktur	63
6.2	Linie 42: Parkplätze	64
6.3	Linie 42: Ausführungsart der Haltestellen	65
6.4	Linie 42: Haltestellenabstand	65
6.5	Linie 42: Haltestellenanlage	66
6.6	Linie 42: Spaltbreite	66
6.7	Linie 42: Zusatzmaßnahmen an Haltestellen	67
6.8	Linie 42: Türbreite	67
6.9	Linie 42: Einstiegsverhältnisse	68
6.10	Linie 42: Fahrkartenverkauf	68
6.11	Linie 42: Knotenpunkte ohne LSA-Regelung	70
6.12	Linie 42: Knotenpunkte mit LSA-Regelung	71
6.13	Linie 42: Intervalldichte	71
6.14	Linie 42: Zusatzpunkte	72
6.15	Linie 42: Sicherheit	72

6.16 Gesamtergebnis der Linie 42	73
--	----

Anhang A

Python-Skript zur Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeiten anhand von GTFS-Datensätzen

Program Code A.1: Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeiten

```
1  import pandas as pd
2  import csv
3  import os
4  from datetime import datetime, timedelta
5
6
7  # Pfad zum GTFS-Datensatz angeben
8  path_to_gtfs = 'C:\\Pfad\\zu\\GTFS\\Daten'
9
10
11 # GTFS-Datensatz laden
12 print(f"Daten einlesen...")
13 routes = pd.read_csv(path_to_gtfs + "routes.txt")
14 trips = pd.read_csv(path_to_gtfs + "trips.txt")
15 stop_times = pd.read_csv(path_to_gtfs + "stop_times.txt")
16
17
18 # GTFS Daten bereinigen, sodass nur mehr Straßenbahn-Routen enthalten sind
19 print(f"Bereinigen der Datensätze auf Straßenbahnen...")
20
21 # Behalte nur route_type = 0 (Straba) in Routes
22 routes_tram = routes.loc[routes['route_type'] == 0]
23 # Vergleiche route_id in Routes und Trips
24 trips_tram = trips.loc[trips['route_id'].isin(routes_tram['route_id'])]
25 # Vergleiche trip_id in Trips und Stop_Times
26 stop_times_tram = stop_times.loc[stop_times['trip_id'].isin(trips_tram['trip_id'])]
27
28 # Füge die route_short_name Spalte aus der routes.txt hinzu
29 trips_tram = pd.merge(trips_tram, routes_tram[['route_id', 'route_short_name']], on='route_id')
30 stop_times_tram = pd.merge(stop_times_tram, trips_tram[['trip_id', 'route_short_name', 'direction_id']], on='trip_id')
31
32 # Erstelle neue bereinigte stop_times_tram.txt Datei
33 stop_times_tram.to_csv('stop_times_tram.txt', index=False)
34
35
36 # Mit der neuen GTFS stop_times_tram.txt-Datei:
37 with open('stop_times_tram.txt', 'r', encoding='utf8') as stop_times_file:
```



```

38     stop_times_reader = csv.DictReader(stop_times_file)
39
40     # Ein leeres Dictionary für die Berechnung der
41     Durchschnittsgeschwindigkeiten erstellen
42     trip_speeds = {}
43
44     for row in stop_times_reader:
45         trip_id = row['trip_id']
46         shape_dist_traveled = float(row['shape_dist_traveled'])
47         stop_sequence = int(row['stop_sequence'])
48         arrival_time_str = row['arrival_time']
49
50         # Wenn die Stundenangabe größer als 23 ist, subtrahiere 24 und erhö
51         he den Tag um 1
52         if int(arrival_time_str[:2]) > 23:
53             arrival_time_str = f"{int(arrival_time_str[:2])-24}{
54                 arrival_time_str[2:]}"
55             arrival_time = datetime.strptime(arrival_time_str, '%H:%M:%S')
56             + timedelta(days=1)
57         else:
58             arrival_time = datetime.strptime(arrival_time_str, '%H:%M:%S')
59
60         # Wenn diese trip_id noch nicht im trip_speeds-Dictionary vorhanden
61         ist, erstelle eine neue Liste
62         if trip_id not in trip_speeds:
63             trip_speeds[trip_id] = []
64
65         # Füge die Entfernung und die Ankunftszeit am aktuellen Stop zur
66         trip_speeds-Liste hinzu
67         trip_speeds[trip_id].append((shape_dist_traveled, arrival_time))
68
69     # Ein leeres DataFrame erstellen
70     df = pd.DataFrame(columns=[ 'trip_id', 'trip_speed'])
71
72     # Berechne die Durchschnittsgeschwindigkeit für jede trip_id
73     print(f"Berechne die Geschwindigkeiten...")
74
75     for trip_id, data in trip_speeds.items():
76         # Sortiere die Liste der Entfernungen und Zeiten nach aufsteigenden
77         Ankunftszeiten
78         # nur notwendig wenn Reihenfolge nicht korrekt
79         # data.sort(key=lambda x: x[1])
80
81         # Berechne die Gesamtentfernung zwischen der ersten und letzten
82         Haltestelle
83         total_distance = data[-1][0] - data[0][0]
84
85         # Berechne die Gesamtzeit zwischen der ersten und letzten
86         Haltestelle
87         total_time = (data[-1][1] - data[0][1]).total_seconds()
88
89         # Berechne die Durchschnittsgeschwindigkeit (in km/h)
90         trip_speed = (total_distance / total_time) * 3.6
91
92         # Füge trip_id und Durchschnittsgeschwindigkeit dem DataFrame hinzu
93         df = pd.concat([df, pd.DataFrame({'trip_id': [trip_id], 'trip_speed
94             ': [trip_speed]})], ignore_index=True)
95
96
97

```

```

88     # Füge die Spalte 'route_short_name' zum DataFrame hinzu
89     df = pd.merge(stop_times_tram[['trip_id', 'route_short_name', '
        direction_id']].drop_duplicates(), df, on='trip_id')
90
91
92     # Ein leeres DataFrame erstellen
93     df1 = pd.DataFrame(columns=[ 'route_short_name', 'direction_id', '
        avg_speed'])
94
95     # Gruppierung nach route_short_name und direction_id durchführen und
        Durchschnittsgeschwindigkeit berechnen
96     print(f"Berechne die Durchschnittsgeschwindigkeiten pro
        route_short_name und direction_id...")
97
98     grouped = df.groupby(['route_short_name', 'direction_id'])
99
100    for name, group in grouped:
101        # Berechne die Durchschnittsgeschwindigkeit für diese Gruppe
102        avg_speed = group['trip_speed'].mean()
103
104        # Füge die Informationen zu dieser Gruppe (route_short_name,
            direction_id und Durchschnittsgeschwindigkeit) dem DataFrame
            hinzu
105        df1 = pd.concat([df1, pd.DataFrame({'route_short_name': [name[0]],
            'direction_id': [name[1]], 'avg_speed': [avg_speed]})],
            ignore_index=True)
106
107
108    # Sortieren nach route_short_name
109    num_df = df1[pd.to_numeric(df1['route_short_name'], errors='coerce').
        notnull()] # wählt numerische Werte aus
110    str_df = df1[pd.to_numeric(df1['route_short_name'], errors='coerce').
        isnull()] # wählt nicht-numerische Werte aus
111    sorted_num_df = num_df.astype(float).sort_values(by=['route_short_name',
        'direction_id']).reset_index(drop=True) # sortiert numerische
        Werte
112    sorted_num_df['route_short_name'] = sorted_num_df['route_short_name'].
        astype(int) # wandelt die Spalte "route_short_name" in den Integer-
        Datentyp um
113    sorted_num_df['direction_id'] = sorted_num_df['direction_id'].astype(
        int) # wandelt die Spalte "direction_id" in den Integer-Datentyp
        um
114    sorted_str_df = str_df.sort_values(by='route_short_name') # sortiert
        nicht-numerische Werte
115    df1_sorted = pd.concat([sorted_num_df, str_df]) # kombiniert sortierte
        DataFrames
116
117
118    # Schreibe den DataFrame in eine Excel-Datei
119    print(f"Schreibe Excel...")
120    if not os.path.exists(path_to_gtfs + 'results'):
121        os.makedirs(path_to_gtfs + 'results')
122    df1_sorted.to_excel(path_to_gtfs + 'results\\
        sorted_trip_speeds_route_direction' + str(datetime.now().strftime('
        _%d_%m_%Y')) + '.xlsx', index=False)
123    df1_sorted.to_latex(path_to_gtfs + 'results\\
        trip_speeds_route_direction' + str(datetime.now().strftime('_%d_%m_
        %Y')) + '.tex', index=False)

```