

Diploma Thesis

***Bi-directional tram vehicles
in Vienna's tram network***

*Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering*

DIPLOMARBEIT

***Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen
im Straßenbahnnetz der Wiener Linien***

*ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen*

von

Matthias Umfahrer BSc

Matr.Nr.: 09771347

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann

Projektass. Dipl.-Ing. Johannes Kehrer BSc

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Benno Schmieder BSc

*Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, A-1040 Wien*

Wien, im Juni 2020



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Aus Gründen der übersichtlicheren Lesbarkeit wird in vorliegender Diplomarbeit die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Herr Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann hat es mir dankenswerter Weise ermöglicht, am für mich fakultätsfremden Institut für Verkehrswissenschaften meine Diplomarbeit zu verfassen. Für wertvolle Denkanstöße möchte ich mich auch bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig bedanken. Herr Dipl.-Ing. Benno Schmieder und Herr Dipl.-Ing. Johannes Kehrer haben sich in vielen Diskussionen meinen Fragen gewidmet, wofür ich sehr dankbar bin.

Im Entwurfsstadium dieser Arbeit waren einige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Wiener Linien beteiligt, die mir in unzähligen Gesprächen den Wiener Straßenbahnbetrieb erläutert und nähergebracht haben. Besonders bedanken möchte ich mich in diesem Zusammenhang bei Herrn DI Thomas Kritzer und Herrn DI Robert Gradwohl, die es mir ermöglicht haben, vorliegende Diplomarbeit in Kooperation mit den Wiener Linien zu verfassen und mir in allen Phasen des Arbeitsfortschritts mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Besonders großer Dank gilt meinen Eltern, ohne deren vielseitige Unterstützung eine studentische Laufbahn nicht möglich gewesen wäre.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

In vorliegender Arbeit werden grundlegende Unterschiede zwischen einem Ein- und Zweirichtungsbetrieb untersucht. Es wird analysiert, ob Zweirichtungsfahrzeuge in einem historisch gewachsenen Straßenbahnbetrieb neue Potentiale für Betrieb und Fahrgäste eröffnen. Außerdem wird beurteilt, ob zusätzliche dispositive Möglichkeiten mit Zweirichtungsfahrzeugen mit einhergehenden Einschränkungen im Betriebsablauf verbunden sind.

Hierfür werden verschiedene Ausführungen von Wendeanlagen dargestellt und Wendevorgänge von Fahrzeugen über diese parametrisch abgebildet. Anhand der ermittelten Größen von Wendeparametern werden neu geschaffene dispositive Möglichkeiten im Zweirichtungsbetrieb mittels empirisch abgeleiteter Formeln untersucht und mit den dispositiven Möglichkeiten im Einrichtungsbetrieb verglichen.

Fahrzeuginnenraumgestaltungen von Zweirichtungsfahrzeugen können sich aufgrund eines zweiten Fahrerstandes und Türen an beiden Wagenseiten von jenen eines Einrichtungsfahrzeuges unterscheiden. Anhand von Fahrzeugplänen moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge werden Gesamt-Fahrgastkapazitäten von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen derselben Länge verglichen.

Die erforschten Grundlagen werden auf den Wiener Straßenbahnbetrieb angewandt. Hierbei werden sowohl betriebliche, als auch ökonomische Aspekte betrachtet. Es wird gezeigt, dass der Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen entlang verschiedener Straßenbahnlinien sowohl Vorteile in betrieblicher oder ökonomischer Hinsicht, als auch ungewünschte Effekte erzielen kann.

Schlagworte: Disposition, Fahrzeuglayout

Abstract

This paper deals with fundamental differences between one- and two-way-operation. It is analyzed whether bi-directional vehicles offer new potentials for both tramway operation and passengers. It is assessed whether additional dispatching options with bi-directional vehicles are associated with restrictions in the operational process.

For this purpose, different types of turnaround systems are shown and turning procedures of vehicles are demonstrated parametrically. Based on the determined values of turning parameters, new dispatching options in bi-directional operation are investigated using empirically derived formulas. The dispatching options are compared with those in one-directional operation.

Interior designs of bi-directional vehicles may differ from those of a one-directional vehicle due to a second driver's cabin and doors on both sides of the vehicle. Based on vehicle plans of modern one- and bi-directional vehicles, total passenger capacities of one- and bi-directional vehicles of the same length are compared.

The researched fundamentals are applied to Vienna's tram network. Hereby both operational and economic aspects are considered. It is shown that the use of bi-directional vehicles along different tram lines can achieve advantages in both operational and economic terms but can also lead to undesired effects.

keywords: dispatchment, vehicle layout

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen	v
Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Fragestellungen	2
2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge	3
2.1 Bombardier <i>Flexity</i> (Berlin).....	3
2.2 Škoda <i>For City Plus</i> (Bratislava)	6
2.3 Pesa <i>Swing</i> (Warschau)	9
2.4 Vergleich der Fahrzeuge	11
3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge.....	14
3.1 Wendevorgang	15
3.2 Wendezeit	15
3.2.1 Grundlagen der Fahrkinematik zur Wendezeitberechnung.....	15
3.2.2 Berechnung der Wendezeit einer Wendeschleifenfahrt.....	16
3.2.3 Berechnung der Wendezeit einer Wende über ein Stumpfgleis.....	19
3.3 Betriebliche Auswirkungen des Wendens von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen.....	25
3.3.1 Wendezeit und zurückgelegter Weg beim Wenden	25
3.3.2 Zugfolgezeit	27
3.3.3 Anzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen	28
3.3.4 Fahrzeugauslauf.....	34
4 Analyse dispositiver Maßnahmen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb.....	36
4.1 Dispositive Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung	37
4.1.1 Gleiswechselbetrieb	37
4.1.2 Betrieb mit Stichfahrten	39
4.1.3 Pendelbetrieb als Inselbetrieb.....	40
4.1.4 Kehrbetrieb bei zweigleisiger Laufwegunterbrechung	42

4.1.5	Kehrbetrieb mittels Kletterweiche.....	44
4.1.6	Umleitungsfahrt bei Laufwegunterbrechung	45
4.2	Wirkung dispositiver Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung im Liniennetz und Auswirkung auf die Fahrgäste.....	45
4.3	Vergleich der dispositiven Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung	47
4.4	Kurzwenden einzelner Fahrzeuge bei Verspätungen	49
4.5	Rahmenbedingungen für die Umsetzung dispositiver Maßnahmen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb	50
5	Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes ...	53
5.1	Linie 26.....	53
5.1.1	Gleis- und Haltestellenschema für einen Zweirichtungsbetrieb.....	58
5.1.2	Dispositive Möglichkeiten im Zweirichtungsbetrieb.....	66
5.1.3	Berechnung eines Störungsbetriebs bei Laufwegunterbrechung	73
5.1.4	Fazit zum Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 26	77
5.2	Linie 9.....	78
5.2.1	Wendevorgang der Fahrzeuge in Gersthof.....	78
5.2.2	Vergleich der Laufleistung: Wendeschleifenfahrt – Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel.....	82
5.2.3	Fazit zum Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 9	87
5.3	Linie 49.....	88
5.3.1	Fahrgastzahlen und Auslastung	89
5.3.2	Optimiertes Linienkonzept mittels Zweirichtungsfahrzeugen.....	91
5.3.3	Vergleich der Laufleistung: Linie 49 – überlagertes Linienkonzept der Linien 49 & 50	92
5.3.4	Zusätzliche dispositive Möglichkeiten für Zweirichtungsfahrzeuge	96
5.3.5	Fazit zum Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 49	101
6	Nutzwertanalyse	103
6.1	VDI-Norm 2225	103
6.2	Nutzwertanalyse: Linie 9.....	107
6.3	Nutzwertanalyse: Linie 49.....	108
7	Zusammenfassung & Schlussfolgerungen	111
	Abbildungsverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis.....	119
	Literatur- & Quellenverzeichnis	120

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	-	Aufstufaktor
a_{ab}	m/s^2	mittlere Bremsverzögerung
a_{an}	m/s^2	mittlere Anfahrtsbeschleunigung
a_m	m/s^2	mittlere Beschleunigung
F	-	Anzahl an Fahrten
g	-	Gewichtung
H	€	tatsächliche Kosten
H_{GV}	-	Anzahl an Haltestellen, in deren Abstand Gleisverbindungen vorgesehen sind
$H_{H,GV,min}$	-	Haltestellenanzahl zwischen Wendehaltestelle und nächstgelegener Gleisverbindung
H_i	€	ideale Kosten
H_p	-	Anzahl an Haltestellen des Pendelverkehrs in eine Richtung (exkl. Starthaltestelle)
i	-	Zählerindex
$K_{ER,ges}$	€	Instandhaltungskosten im Einrichtungsbetrieb
$\Delta K_{ER,ZR}$	€	Kostendifferenz zwischen Ein- und Zweirichtungsbetrieb
K_{FW}	€	Instandhaltungskosten pro Kilometer am Fahrweg
$K_{FZG,ER}$	€	Instandhaltungskosten pro Kilometer für Einrichtungsfahrzeuge
$K_{FZG,ZR}$	€	Instandhaltungskosten pro Kilometer für Zweirichtungsfahrzeuge
ΔK_{WW}	€	Weicheninstandhaltungskosten pro Fahrt
$K_{ZR,ges}$	€	Instandhaltungskosten im Zweirichtungsbetrieb
l_{FZG}	m	Fahrzeuglänge
n	-	Anzahl an Gleisverbindungen [1;2]
N	-	Haltestellenanzahl
p	-	Bewertung technischer Merkmale
s	m	Weg
s_{Lin}	$km = m \cdot 10^3$	doppelte Linienlänge
s_{WL}	m	Weichenlänge
s_{WS}	m	Länge der Wendeschleife
$s_{WS,ab}$	m	Weg vom Einsetzen der Bremsverzögerung bis zum Stillstand
$s_{WS,an}$	m	Weg bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit in der Wendeschleife v_{WS}
$s_{WS,const}$	m	Weg, den das Fahrzeug mit Maximalgeschwindigkeit in der Wendeschleife fährt
t	s	Zeit
$t_{FZF,über}$	s	Zeit, die das Fahrpersonal benötigt, um den Fahrerstand zu wechseln
$t_{FZG,ab}$	s	Zeit für das Abrüsten des Fahrerstandes
$t_{FZG,auf}$	s	Zeit für das Aufrüsten des Fahrerstandes
$t_{FZG,aus}$	s	Fahrzeit vom Stumpfgleis bis in die Starthaltestelle
$t_{FZG,ein}$	s	Fahrzeit von der Endhaltestelle bis in das Stumpfgleis
t_{H1H2}	$min = s \cdot 60$	durchschnittliche Reisezeit zwischen zwei Haltestellen
t_{int}	$min = s \cdot 60$	Intervall
$t_{int,PB}$	$min = s \cdot 60$	Abfahrtsintervall je Richtung eines Pendelverkehrs
t_{pa}	$min = s \cdot 60$	Pausenzeit bei einer vollen Linienbefahrung
t_{pu}	$min = s \cdot 60$	Pufferzeit pro Endhaltestelle
t_{RZ}	$min = s \cdot 60$	Gesamt-Reisezeit pro Fahrtrichtung

$t_{\text{Stör}}$	$\text{min} = s \cdot 60$	Zeit für Störeinflüsse
t_{Syn}	$\text{min} = s \cdot 60$	Synchronisationszeit pro Endhaltestelle
$t_{\text{Vers,FZG}}$	$\text{min} = s \cdot 60$	gehäufte Verspätung aller Fahrzeuge einer Linie
t_{WZ}	$\text{min} = s \cdot 60$	Wendezeit pro Endhaltestelle
$t_{\text{WZ,delta}}$	$\text{min} = s \cdot 60$	Zeitdifferenz: Wenden an der Endhaltestelle – Kurzwenden
$t_{\text{WZ,kurz,SG}}$	$\text{min} = s \cdot 60$	verkürzte Wendezeit (Fahrtrichtungswechsel in der Haltestelle)
$t_{\text{WZ,SG}}$	$\text{min} = s \cdot 60$	Wendezeit entlang einer Kehranlage mit Stumpfgleis
$t_{\text{WZ,WS}}$	$\text{min} = s \cdot 60$	Wendezeit entlang einer Wendeschleife
$t_{\text{WZ,WS,ab}}$	s	Zeit vom Einsetzen der Bremsverzögerung bis zum Stillstand
$t_{\text{WZ,WS,an}}$	s	Zeit bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit in der Wendeschleife v_{WS}
$t_{\text{WZ,WS,const}}$	s	Zeit, die das Fahrzeug mit Maximalgeschwindigkeit in der Wendeschleife fährt
t_{ZF}	$\text{min} = s \cdot 60$	minimale Zugfolgezeit laut Fahrplan
v	$\text{km/h} = (\text{m/s})/3,6$	Geschwindigkeit
v_{SG}	$\text{km/h} = (\text{m/s})/3,6$	Maximalgeschwindigkeit bei Befahren des Stumpfgleises
v_{WS}	$\text{km/h} = (\text{m/s})/3,6$	Maximalgeschwindigkeit bei Befahren der Wendeschleife
v_0	$\text{km/h} = (\text{m/s})/3,6$	Ausgangsgeschwindigkeit
v_1	$\text{km/h} = (\text{m/s})/3,6$	Endgeschwindigkeit (Maximalgeschwindigkeit)
X	-	technische Wertigkeit
X_g	-	gewichtete technische Wertigkeit
X_{FZG}	-	Anzahl an Fahrzeugen im Umlauf
Y	-	wirtschaftliche Wertigkeit

Abkürzungsverzeichnis

AAZ	Auf- und Abrüstzeit
BS	Betrieb mit Stichfahrten
ER	Einrichtungsfahrzeug
FZL	Fahrzeuglänge
GWB	Gleiswechselbetrieb
KF	Kurzwendemöglichkeit mittels Fahrtrichtungswechsel unmittelbar nach einer Gleisverbindung
KS	Kurzwendemöglichkeit mittels Fahrtrichtungswechsel nach erfolgter Stichfahrt
MIV	motorisierter Individualverkehr
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PB	Pendelbetrieb
RBL	rechnergestütztes Betriebsleitsystem
UM	Umleitungsfahrt
VLSA	Verkehrslichtsignalanlagen
WS	Kurzwendemöglichkeit mittels Wendeschleifenfahrt
ZR	Zweirichtungsfahrzeug

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Straßenbahnen sind spurgeführte Personennahverkehrsmittel. Daher benötigen sie zum Wenden eine entsprechende Gleisinfrastruktur, um auf das Gegengleis zu gelangen. Aus betrieblicher Sicht wird zwischen einem Ein- und Zweirichtungsbetrieb unterschieden.

Einrichtungsfahrzeuge (ER) besitzen nur an einem Wagenende einen Fahrerstand und können somit zum Wenden ausschließlich Wendeschleifen benutzen. Im Fahrgastbetrieb befindet sich der Fahrerstand stets an der Zugspitze. Die meisten Einrichtungsfahrzeuge sind am Heck mit einem zusätzlichen Hilfsfahrerstand ausgestattet, der es erlaubt mit verminderter Geschwindigkeit zu rangieren. Dieser Hilfsfahrerstand wird beispielsweise im Bahnhofsbereich oder zum Wenden über ein Gleisdreieck verwendet. Ein vorhandener Hilfsfahrerstand am Heck eines Fahrzeuges bedeutet jedoch nicht, dass es sich um ein Zweirichtungsfahrzeug (ZR) handelt (Schnieder, 2018, S.111). Türen für den Fahrgastwechsel sind bei Einrichtungsfahrzeugen meist an nur einer Wagenseite vorhanden (Steierwald, 2005, S.600).

Im Zweirichtungsbetrieb werden Zweirichtungsfahrzeuge eingesetzt, die an beiden Wagenenden über einen Fahrerstand verfügen. Zweirichtungsfahrzeuge haben zusätzlich zum Wenden über eine Wendeschleife die Möglichkeit über ein Stumpfgleis zu wenden und die Fahrt im Regelbetrieb in die Gegenrichtung fortzusetzen. Hierbei muss der Fahrer den Fahrerstand wechseln. Mittels Gleisverbindungen kann eine platzsparende Umkehrmöglichkeit entlang einer Strecke für Zweirichtungsfahrzeuge geschaffen werden, die neue Möglichkeiten in der Betriebsabwicklung eröffnet.

Zweirichtungsfahrzeuge besitzen fast immer an beiden Wagenseiten Türen (Steierwald, 2005, S.600). Dadurch ergeben sich im Gegensatz zum Einrichtungsfahrzeug andere Fahrzeuginnenraumgestaltungen sowie mögliche neue Anordnungen und Gestaltungsmöglichkeiten von Bahnsteigen. Auch der Fahrgastzugang zu den Bahnsteigen kann neu angeordnet werden. Vorliegender Arbeit wird zugrundegelegt, dass Einrichtungsfahrzeuge nur an einer Seite, Zweirichtungsfahrzeuge hingegen an beiden Wagenseiten Türen für den Fahrgastwechsel besitzen. Zweirichtungsfahrzeuge verfügen an beiden Wagenenden über Fahrerstände. Meist kann daher im Zweirichtungsfahrzeug zumindest ein Teil der Fläche des zweiten Fahrerstandes nicht den Fahrgästen zur Verfügung gestellt werden.

Eingangs werden unterschiedliche Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge europäischer Verkehrsbetriebe miteinander verglichen. Anhand von Daten der Gesamtfahrgastkapazität der Fahrzeuge wird eine Aussage darüber getroffen, wie sich die Beförderungskapazitäten von Einrichtungsfahrzeugen zu Zweirichtungsfahrzeugen unterscheiden und welche Änderungen in der Innenraumgestaltung zwischen den beiden Ausführungen zu erkennen sind.

Aufgrund ihrer Spurführung ist ein Ausweichen der Straßenbahnfahrzeuge vor Hindernissen nicht möglich. Unregelmäßigkeiten nach auftretenden Störungen im Betriebsablauf (Unfall, defektes Fahrzeug, etc.) können durch das Wenden von Straßenbahnfahrzeugen vor einem Hindernis auf der Strecke behoben werden.

Der Vorgang des Wendens und die damit einhergehenden dispositiven Möglichkeiten von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen werden untersucht. Die flexiblen Einsatzmöglichkeiten von Zweirichtungsfahrzeugen sollen anhand verschiedener Aspekte aus betrieblicher Sicht sowie aus Sicht des Fahrgastes aufgezeigt werden. Es sollen betriebliche Potentiale von Zweirichtungsfahrzeugen und etwaige Einschränkungen und Betriebserschwernisse gegenüber Einrichtungsfahrzeugen in Hinblick auf einen flexiblen Einsatz dargestellt werden. Nach einer allgemeinen Betrachtung der Möglichkeiten und Potentiale, die sich durch Zweirichtungsfahrzeuge im Betrieb ergeben, werden die Ergebnisse auf den Straßenbahnbetrieb der Wiener Linien angewandt und überprüft.

Folgende Fragestellungen werden in der vorliegenden Diplomarbeit beantwortet:

1.2 Fragestellungen

- 1) Welche Unterschiede weist die Fahrzeuginnenraumgestaltung eines Zweirichtungsfahrzeuges zu einem Einrichtungsfahrzeug auf und wie wirken sich diese Unterschiede auf die Fahrgäste aus?
- 2) Welche Potentiale und Grenzen ergeben sich durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen im Vergleich zu Einrichtungsfahrzeugen im Regelbetrieb?
- 3) Welche betrieblichen Aspekte ergeben sich im Störfall durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen?
- 4) Welche Eigenschaften müssen Straßenbahnlinien aufweisen, um ein möglichst großes Potential durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen zu erzielen?
- 5) Welche Linien im Straßenbahnnetz der Wiener Linien eignen sich für den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen und welche betrieblichen Potentiale können dadurch erschlossen werden?

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Fahrerstände an beiden Fahrzeugenden sowie die Anordnung von Türen für den Fahrgastwechsel an beiden Wagenseiten bedingen, dass Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge derselben Länge unterschiedliche Fahrzeuginnenraumkonzepte aufweisen. In diesem Kapitel werden anhand moderner Fahrzeuge, die bei europäischen Verkehrsbetrieben in einer Ein- und Zweirichtungsvariante im Einsatz sind, fahrzeugbezogene Parameter miteinander verglichen. Um Vergleiche in Bezug auf die Gesamt-Fahrgastkapazität ziehen zu können, werden Verkehrsbetriebe ausgewählt, bei denen Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge einer Baureihe dieselbe Fahrzeuglänge aufweisen.

Die Anzahl an zugelassenen Personen pro Quadratmeter auf den ausgewiesenen Stehplätzen kann in Abhängigkeit des Betreibers variieren. Daher werden alle Werte, die die Stehplatzkapazität eines Fahrzeuges angeben, auf die Dichte von vier Personen pro Quadratmeter umgerechnet. Je nach Angabe des jeweiligen Herstellers werden Klappsitze zu den Sitzplätzen hinzugerechnet bzw. die vorhandene Fläche bei hochgeklappten Sitzen zur Stehplatzfläche addiert.

Im Folgenden werden Fahrzeuginnenraumgestaltungen von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen der Verkehrsbetriebe Berlin, Bratislava und Warschau miteinander verglichen und bezüglich ihrer Gesamt-Fahrgastkapazität bei vier stehenden Personen pro Quadratmeter bewertet.

2.1 Bombardier *Flexity* (Berlin)

Seit dem Jahr 2008 verkehren in Berlin Straßenbahnfahrzeuge der *Flexity*-Familie des Herstellers *Bombardier* mit den Baureihenbezeichnungen *GT6-08* (fünfteiliges Fahrzeug) und *GT8-08* (siebenteiliges Fahrzeug) in jeweils einer Ein- und Zweirichtungsvariante.

Abbildung 2.1 zeigt, dass die Fahrzeuginnenraumgestaltung des siebenteiligen Fahrzeuges der mittleren Module ohne Türen in der Ein- und Zweirichtungsausführung unverändert bleibt. Unterhalb dieser Module sind die Drehgestelle positioniert, wobei eines davon als Trieb-, das andere als Laufdrehgestell ausgeführt ist. Dies zeigt die Achsformel in Tabelle 2.1. Sitzplätze, die in der Ausführung als Zweirichtungsfahrzeug (rechts) nicht vorhanden sind, sind in linker Abbildung des Einrichtungsfahrzeuges mit einer runden Markierung hervorgehoben. Rollstuhl- bzw. Fahrradstellplätze sind in beiden Abbildungen rechteckig markiert.

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

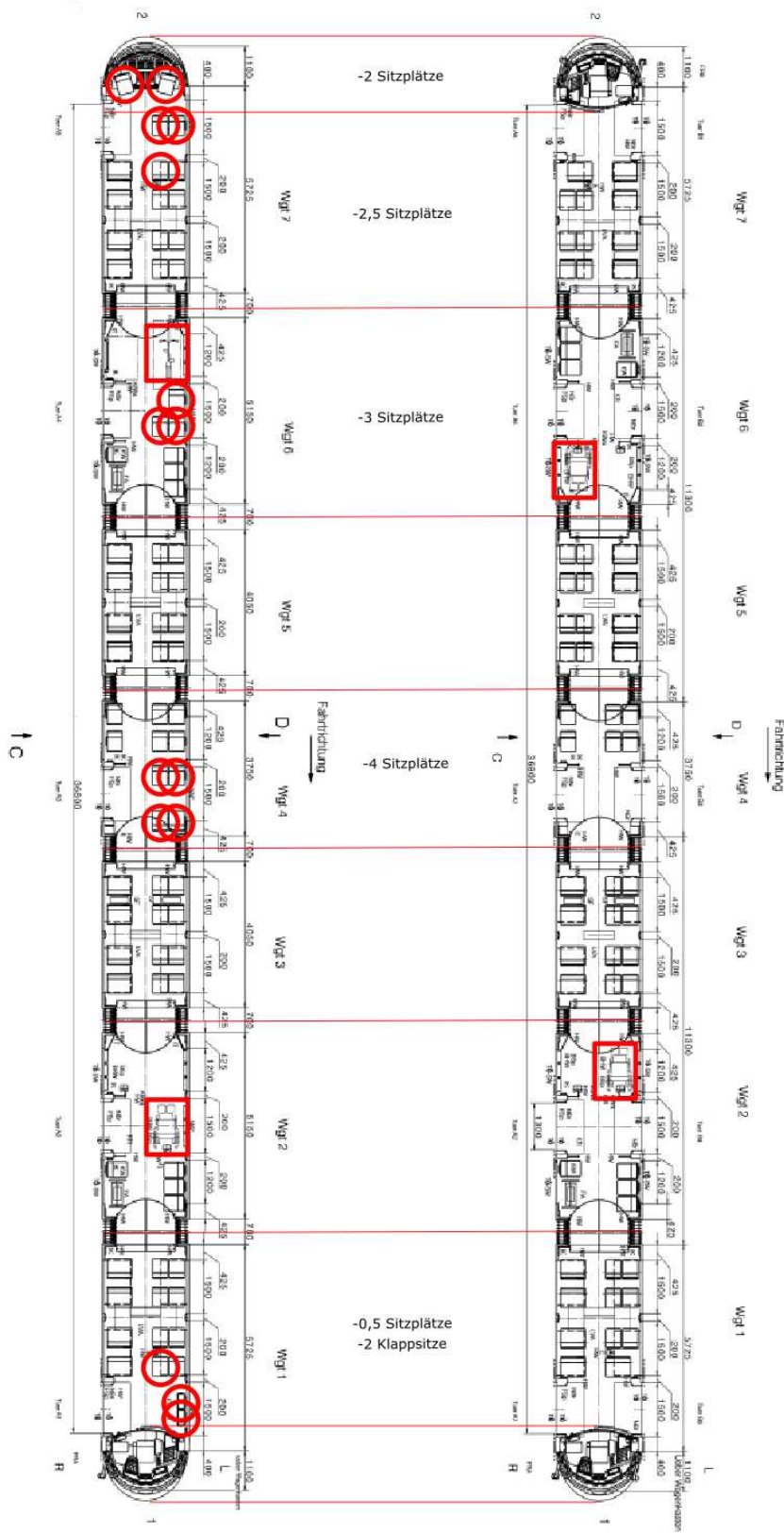


Abbildung 2.1: Innenraumlayout des sieben teiligen Straßenbahnfahrzeuges *Flexity Berlin* als Einrichtungsfahrzeug links und Zweirichtungsfahrzeug rechts (Quelle: BVG)

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Zweirichtungsfahrzeuge dieser Bauart besitzen doppelt so viele Türen wie das Einrichtungsfahrzeug derselben Länge, da Türen an beiden Wagenseiten vorhanden sind. Unterschiede in der Sitzplatzanzahl und ihrer Anordnung sind bei Fahrzeugmodulen mit Seitentüren ersichtlich. Die zusätzlichen Türen bedingen, dass das Zweirichtungsfahrzeug um 12 Sitzplätze und zwei Klappsitze weniger als das Einrichtungsfahrzeug derselben Länge besitzt. Die Fläche im Bereich der zusätzlichen Türen kann als Stehplatzfläche genutzt werden. Der erforderliche zweite Fahrerstand beim Zweirichtungsfahrzeug ergibt eine Reduktion um zwei Sitzplätze zuzüglich einer vernachlässigbar kleinen Stehplatzfläche, da sich diese hauptsächlich im Fußbereich der beiden sitzenden Fahrgäste befindet. Die Gesamt-Fahrgastkapazität des Zweirichtungsfahrzeuges liegt bei vier stehenden Personen pro Quadratmeter mit 245 beförderbaren Personen 1,21 % unter jener des Einrichtungsfahrzeuges, das 248 Personen befördern kann.

Tabelle 2.1 zeigt die Parameter des siebenteiligen Ein- und Zweirichtungsfahrzeuges. Bei gleichbleibender Achsformel und Motorleistung erlaubt das Zweirichtungsfahrzeug eine geringere mittlere Anfahrtsbeschleunigung als das Einrichtungsfahrzeug. Dies ist auf die größere Masse des Zweirichtungsfahrzeuges zurückzuführen, da es über einen zweiten Fahrerstand verfügt.

Tabelle 2.1: Datenblatt des siebenteiligen Straßenbahnfahrzeuges *Flexity Berlin* (Datenquelle: BVG)

		Bombardier Flexity GT8- 08 ER	Bombardier Flexity GT8-08 ZR	
Ort	Stadt, Land	Berlin, Deutschland		
	Verkehrsunternehmen	BVG	BVG	
Fahrzeugdaten	Einrichtungsfahrzeug (ER)/Zweirichtungsfahrzeug (ZR)	ER	ZR	
	Fahrzeuginnenlänge [m]	40,000	40,000	
	Fahrzeugbreite [m]	2,400	2,400	
	Aufrüstzeit [s]	k.A.	k.A.	
	Abrüstzeit [s]	k.A.	k.A.	
	mittleres Beschleunigungsvermögen [m/s^2]	0,67	0,65	
	Achsformel	Bo'2'Bo'Bo'	Bo'2'Bo'Bo'	
Türanzahl Gesamt		5	10	
Fahrgastkapazitätsdaten	lit. Betreiber	Anzahl an Sitzplätzen (inkl. Klappsitze)	84	72
		Anzahl an Stehplätzen bei vorgegebener Personendichte	164	173
		Dichte für Anzahl an Stehplätzen [Pers./m ²]	4	4
		Gesamt-Fahrgastkapazität bei vorgegebener Dichte	248	245
		berechnete Stehplatzfläche [m ²]	41,000	43,250
	4 Pers./m ²	Anzahl an Stehplätzen	164,0	173,0
		Gesamt-Fahrgastkapazität bei 4 Pers./m ²	248,0	245,0
		Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [Anz.]		-3,0
		Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [%]		-1,21%
		Gesamt-Fahrgastkapazität pro Fahrzeugmeter	6,20	6,13

Vergleicht man in Tabelle 2.2 die Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge der fünfteiligen Variante, so wird ersichtlich, dass das Zweirichtungsfahrzeug fünf Personen weniger als das

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Einrichtungsfahrzeug derselben Länge transportieren kann. Dies entspricht einer Reduktion der Fahrgastkapazität um 2,65 %.

Tabelle 2.2: Datenblatt des fünfteiligen Straßenbahnfahrzeuges *Flexity Berlin* (Datenquelle: BVG)

		Bombardier Flexity GT6-08 ER	Bombardier Flexity GT6-08 ZR
Ort	Stadt, Land	Berlin, Deutschland	
	Verkehrsunternehmen	BVG	BVG
Fahrzeugdaten	Einrichtungsfahrzeug (ER)/Zweirichtungsfahrzeug (ZR)	ER	ZR
	Fahrzeuginnenlänge [m]	30,800	30,800
	Fahrzeuginnenbreite [m]	2,400	2,400
	Aufrüstzeit [s]	k.A.	k.A.
	Abrüstzeit [s]	k.A.	k.A.
	mittleres Beschleunigungsvermögen [m/s ²]	0,75	0,73
	Achsformel	Bo'2'Bo'	Bo'2'Bo'
	Türanzahl Gesamt	4	8
Fahrgastkapazitätsdaten	lt. Betreiber		
	Anzahl an Sitzplätzen (inkl. Klappsitze)	60	52
	Anzahl an Stehplätzen bei vorgegebener Personendichte	129	132
	Dichte für Anzahl an Stehplätzen [Pers./m ²]	4	4
	Gesamt-Fahrgastkapazität bei vorgegebener Dichte	189	184
	berechnete Stehplatzfläche [m ²]	32,250	33,000
	Anzahl an Stehplätzen	129,0	132,0
	Gesamt-Fahrgastkapazität bei 4 Pers./m ²	189,0	184,0
	Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn)		-5,0
	Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [%]		-2,65%
Gesamt-Fahrgastkapazität pro Fahrzeugmeter	6,14	5,97	

Bei Betrachtung der Gesamt-Fahrgastkapazitäten der langen und kurzen Fahrzeugvariante zeigt sich Folgendes: Das 40 Meter lange Zweirichtungsfahrzeug weist absolut und prozentuell geringere Verluste der Gesamt-Fahrgastkapazität gegenüber dem gleich langen Einrichtungsfahrzeug auf, als das 30,8 Meter lange Zweirichtungsfahrzeug gegenüber dem Einrichtungsfahrzeug derselben Länge.

2.2 Škoda For City Plus (Bratislava)

Die Straßenbahnfahrzeuge der Baureihen 29T und 30T des Herstellers *Škoda* werden im Stadtverkehr von Bratislava in einer Ein- und Zweirichtungsvariante eingesetzt. Beide haben jeweils eine Länge von 32,495 Metern. Daten zum Fahrzeug sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Man kann erkennen, dass das Zweirichtungsfahrzeug 204 Fahrgäste transportieren kann. Dies sind drei Fahrgäste weniger, als das Einrichtungsfahrzeug derselben Länge fasst und entspricht einer Reduktion der Gesamt-Fahrgastkapazität um 1,45 %.

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Tabelle 2.3: Datenblatt des Straßenbahnfahrzeuges *Škoda For City Plus* (Datenquelle: DPB)

		<i>Škoda For City Plus 29T</i>	<i>Škoda For City Plus 30T</i>	
Ort	Stadt, Land	Bratislava, Slowakei		
	Verkehrsunternehmen	DPB	DPB	
Fahrzeugdaten	Einrichtungsfahrzeug (ER)/Zweirichtungsfahrzeug (ZR)	ER	ZR	
	Fahrzeuglänge [m]	32,495	32,495	
	Fahrzeugbreite [m]	2,480	2,480	
	Aufrüstzeit [s]	unmittelbar	unmittelbar	
	Abrüstzeit [s]	unmittelbar	unmittelbar	
	mittleres Beschleunigungsvermögen [m/s ²]	k.A.	k.A.	
	Achsformel	Bo'2'Bo'Bo'	Bo'2'Bo'Bo'	
	Türanzahl Gesamt	5	10	
Fahrgastkapazitätsdaten	lt. Betreiber	Anzahl an Sitzplätzen	69	52
		Anzahl an Stehplätzen bei vorgegebener Personendichte	138	152
		Dichte für Anzahl an Stehplätzen [Pers./m ²]	4	4
		Gesamt-Fahrgastkapazität bei vorgegebener Dichte	207	204
	4 Pers./m ²	berechnete Stehplatzfläche [m ²]	34,500	38,000
		Anzahl an Stehplätzen	138,0	152,0
		Gesamt-Fahrgastkapazität bei 4 Pers./m ²	207,0	204,0
		Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [Anz.]		-3,0
		Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [%]		-1,45%
		Gesamt-Fahrgastkapazität pro Fahrzeugmeter	6,37	6,28

Abbildung 2.2 zeigt die Innenraumgestaltung des *Škoda*-Straßenbahnfahrzeuges. Links ist das Einrichtungsfahrzeug, rechts das Zweirichtungsfahrzeug abgebildet. Die Sitzplatzanordnung und Anzahl der Plätze ändern sich bei jenen Modulen ohne Seitentüren nicht. Unter diesen sind die Drehgestelle angeordnet, wobei eines davon ein Lauf-, das andere ein Triebdrehgestell ist. Bei der „Zwei-Plus-Zwei-Bestuhlung“ dieser beiden Module ist zu beachten, dass der Bereich des Stehplatzes zwischen den Sitzplätzen zu schmal ist, um einen Fahrgastfluss an in diesem Bereich stehenden Personen vorbei zu ermöglichen. Ein optimiertes Fahrgastkonzept schafft die Entfernung der acht blau markierten Sitzplätze, die so in eine Stehplatzfläche umgewandelt werden könnten. Hierbei muss insbesondere darauf geachtet werden, dass die zulässigen Achslasten nicht überschritten werden.

Sitzplätze, die in der jeweils anderen Ausführung nicht vorhanden sind, sind rot eingerahmt. Die größte Reduktion an Sitzplätzen findet man beim Zweirichtungsfahrzeug im ersten und letzten Modul. Zudem ist ersichtlich, dass im Zweirichtungsfahrzeug im Bereich der Stehplatzfläche doppelt so viele Rollstuhlplätze vorgesehen sind wie im Einrichtungsfahrzeug.

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

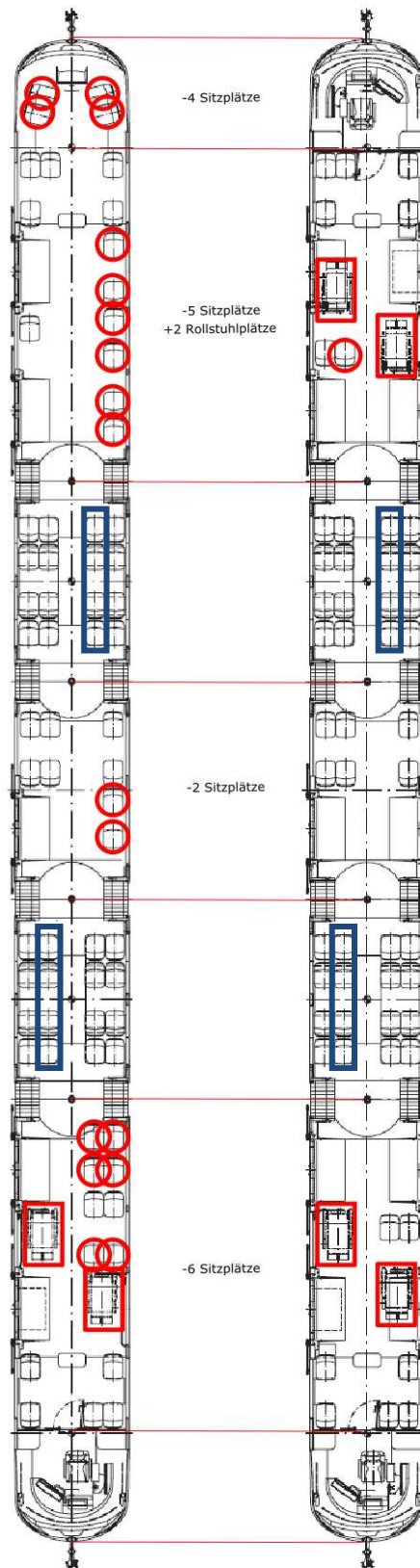


Abbildung 2.2: Innenraumlayout des Straßenbahnfahrzeuges Škoda For City Plus als Einrichtungsfahrzeug links und Zweirichtungsfahrzeug rechts (Quelle: DPB)

2.3 Pesa Swing (Warschau)

Der Betreiber der Straßenbahn der Stadt Warschau setzt Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge des Herstellers *Pesa* ein. Diese verfügen anteilig an der Gesamt-Fahrgastkapazität im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Fahrzeugen über weniger Sitzplätze. Der Fahrerstand des Zweirichtungsfahrzeuges nimmt eine Fläche ein, die beim Einrichtungsfahrzeug für fünf Sitzplätze zuzüglich einer kleinen Stehplatzfläche genutzt werden kann. Diese Stehplatzfläche ist zudem die Fahrgastwechselfläche, da sie sich im Türbereich befindet. Abbildung 2.3 zeigt außerdem, dass die Rückwand des Fahrerstandes im Zweirichtungsfahrzeug eine leicht abgeänderte Bauweise aufweist, um Platz für eine weitere Fahrgasttür zu schaffen.

Die Berechnung der Gesamt-Fahrgastkapazität erfolgt laut Betreiber bei einer Stehplatzbelegung von fünf Personen pro Quadratmeter. Um auch zu den zuvor dargestellten Fahrzeugen Vergleiche ziehen zu können, wird die Kapazität für stehende Personen auf vier Personen pro Quadratmeter umgerechnet. Hier liegt die Gesamt-Fahrgastkapazität des Zweirichtungsfahrzeuges 1,9 % unter jener des Einrichtungsfahrzeuges. Das Zweirichtungsfahrzeug verfügt über einen Rollstuhlplatz mehr als das Einrichtungsfahrzeug. Weitere, auf das Fahrzeug bezogene Werte sind Tabelle 2.4 zu entnehmen.

Tabelle 2.4: Datenblatt des Straßenbahnfahrzeuges *Pesa Swing* (Datenquelle: TW)

		Pesa Swing 120Na	Pesa Swing 120Na DUO	
Ort	Stadt, Land	Warschau, Polen		
	Verkehrsunternehmen	TW		
Fahrzeugdaten	Einrichtungsfahrzeug (ER)/Zweirichtungsfahrzeug (ZR)	ER	ZR	
	Fahrzeuglänge [m]	30,120	30,120	
	Fahrzeugbreite [m]	2,400	2,400	
	Aufrüstzeit [s]	k.A.	k.A.	
	Abrüstzeit [s]	k.A.	k.A.	
	mittleres Beschleunigungsvermögen [m/s^2]	1,40	1,40	
	Achsformel	Bo'2'Bo'	Bo'2'Bo'	
	Türanzahl Gesamt	6	12	
Fahrgastkapazitätsdaten	lt. Betreiber	Anzahl an Sitzplätzen (exkl. Klappsitze)	40	28
		Anzahl an Stehplätzen bei vorgegebener Personendichte	161	172
		Dichte für Anzahl an Stehplätzen [Pers./m ²]	5	5
		Gesamt-Fahrgastkapazität bei vorgegebener Dichte	201	200
	4 Pers./m ²	berechnete Stehplatzfläche [m ²]	32,200	34,400
		Anzahl an Stehplätzen	128,8	137,6
		Gesamt-Fahrgastkapazität bei 4 Pers./m ²	168,8	165,6
		Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [Anz.]	-3,2	
		Differenz Fahrgastkapazitäten auf Basis ER (- Verlust, + Zugewinn) [%]	-1,90%	
		Gesamt-Fahrgastkapazität pro Fahrzeugmeter	5,60	5,50

2 Fahrzeugkonzepte moderner Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

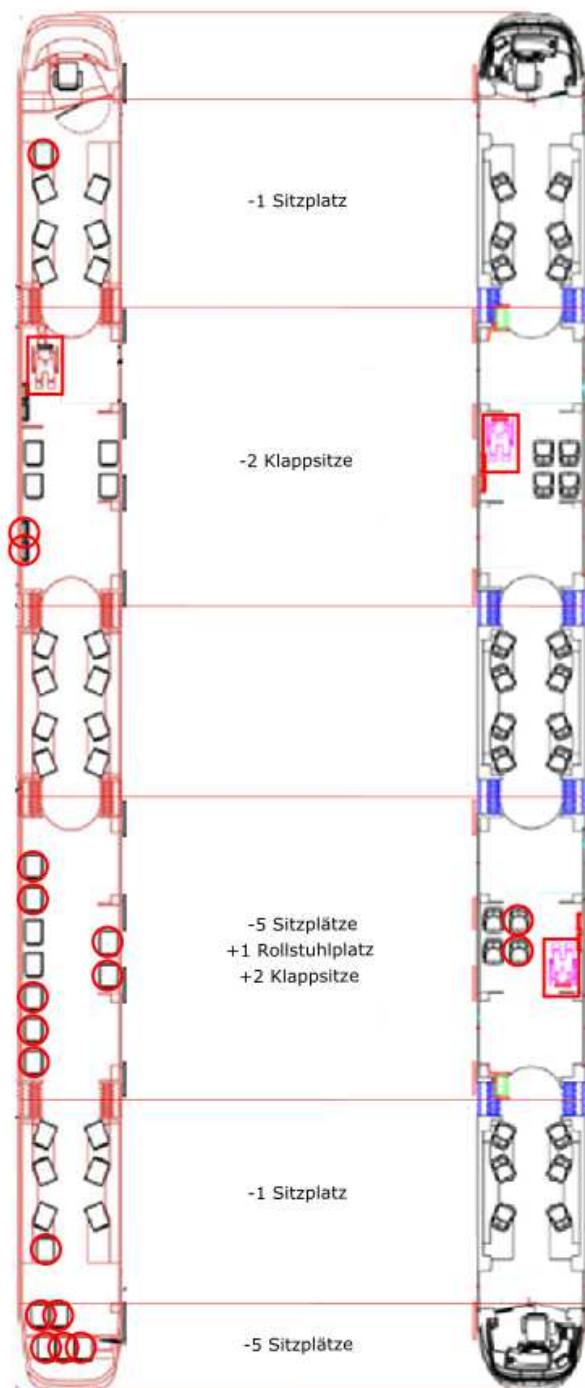


Abbildung 2.3: Innenraumlayout des Straßenbahnfahrzeuges *Pesa Swing* als Einrichtungsfahrzeug links und Zweirichtungsfahrzeug rechts (Quelle: TW)

2.4 Vergleich der Fahrzeuge

Bei allen dargestellten Zweirichtungsfahrzeugen ist bei einer Personendichte von vier stehenden Personen pro Quadratmeter ein Kapazitätsverlust gegenüber dem Einrichtungsfahrzeug zu beobachten. Dieser liegt gegenüber dem Einrichtungsfahrzeug zwischen 1,21 % (siebenteiliger *Bombardier Flexity Berlin*) und 2,65 % (fünfteiliger *Bombardier Flexity Berlin*). In absoluten Zahlen bedeutet das einen Verlust der Gesamt-Fahrgastkapazität von drei bis fünf Personen. Der Kapazitätsverlust ist im erforderlichen zweiten Fahrerstand des Zweirichtungsfahrzeuges begründet, der zusätzlichen Raum in Anspruch nimmt. Dieser Platz steht im Einrichtungsfahrzeug den Fahrgästen zur Verfügung. Die Fahrerkabine des Škoda-Fahrzeuges ragt beispielsweise aufgrund der gerade verlaufenden Trennwand weiter in den Fahrgastraum hinein, als die Fahrerkabine des *Bombardier-Flexity-Berlin*-Fahrzeuges.

Einen Überblick über die Beförderungskapazitäten der zuvor dargestellten Fahrzeuge bei einer Dichte von vier stehenden Personen pro Quadratmeter gibt Abbildung 2.4. Vergleicht man die beiden *Bombardier*-Fahrzeuge unterschiedlicher Länge, erkennt man, dass das längere Fahrzeug eine höhere Fahrgastdichte pro Fahrzeugmeter als das kürzere Fahrzeug aufweist. Bei längeren Fahrzeugen steht der zusätzliche Raum zu einem Großteil ausschließlich den Fahrgästen zur Verfügung. Der benötigte Platz für den Fahrerstand wirkt sich daher bei längeren Fahrzeugen weniger stark in der Reduktion der Gesamt-Fahrgastkapazität von Zweirichtungsfahrzeugen aus. Diesen Umstand verdeutlichen auch Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2.

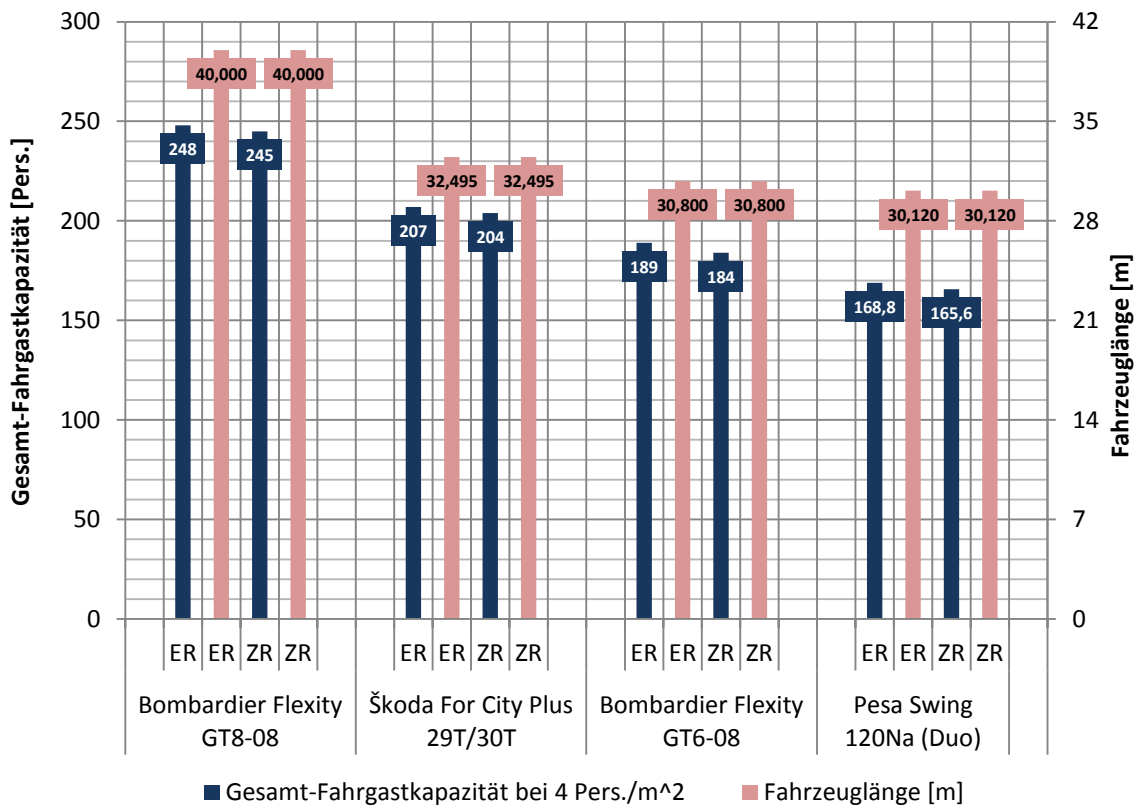


Abbildung 2.4: Überblick über die Gesamt-Fahrgastkapazitäten im Zusammenhang zur Fahrzeuglänge

Bei allen untersuchten Fahrzeugen weist das Zweirichtungsfahrzeug eine größere Stehplatzfläche und zugleich weniger Sitzplätze als das Einrichtungsfahrzeug auf. Daraus folgt, dass die rechnerische Gesamt-Fahrgastkapazität des Zweirichtungsfahrzeuges gegenüber dem Einrichtungsfahrzeug durch eine Erhöhung der Anzahl an stehenden Personen pro Quadratmeter gesteigert werden könnte, sofern dies die Festigkeitsberechnungen¹ und die maximal zulässigen Achslasten zuließen.

Die Tabellen der vorherigen Kapitel zu den Fahrzeugdaten haben gezeigt, dass Betreiber unterschiedliche Belegungsdichten am Stehplatz annehmen. Der Betreiber des Straßenbahnnetzes in Warschau nimmt beispielsweise fünf stehende Personen pro Quadratmeter in seinen Fahrzeugen an (Tabelle 2.4). In Berlin und Bratislava hingegen wird von vier stehenden Personen pro Quadratmeter ausgegangen (Tabelle 2.1, Tabelle 2.2 und Tabelle 2.3).

Abbildung 2.5 zeigt, wie sich die Gesamt-Fahrgastkapazität bei einer rechnerischen Veränderung der Dichte an stehenden Personen bei einem Ein- und Zweirichtungsfahrzeug derselben Länge ändert. In dieser Abbildung ist auf der vertikalen Achse die Gesamt-Fahrgastkapazität der Fahrzeuge über der variierenden Dichte an stehenden Personen entlang der horizontalen Achse dargestellt. Jene Schnittpunkte, bei deren Personendichte im Bereich der Stehplätze das Ein- und Zweirichtungsfahrzeug derselben Länge die gleiche Gesamt-Fahrgastkapazität aufweisen, sind mittels eines schwarzen Punktes markiert. Dieser Schnittpunkt liegt beim *Škoda*-Fahrzeug bei etwa 4,8 stehenden Personen pro Quadratmeter, beim *Pesa*-Fahrzeug und siebenteiligen *Bombardier*-Fahrzeug bei etwa 5,4 Personen pro Quadratmeter. Das fünfteilige *Bombardier*-Fahrzeug weist in der Einrichtungsvariante im betrachteten Ausschnitt der Personendichte durchwegs höhere Gesamt-Fahrgastkapazitäten als das Zweirichtungsfahrzeug auf. Der geringe Unterschied in der Steigung dieser beiden Geraden ist durch die geringe Differenz in der Stehplatzfläche des Ein- und Zweirichtungsfahrzeuges zu erklären.

Untenstehende Abbildung verdeutlicht, dass sich Gesamt-Fahrgastkapazitäten zwischen Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen aufgrund unterschiedlicher Verhältnisse zwischen Steh- und Sitzplätzen verändern können. Die meisten europäischen Betreiber von Straßenbahnnetzen nehmen bei Kapazitätsberechnungen vier stehende Personen pro Quadratmeter an. Eine höhere Dichte ist in Europa meist nicht üblich und daher unzumutbar.

Abschließend soll erwähnt werden, dass die Behebung von Schäden aufgrund von Auffahrunfällen zweier Straßenbahnfahrzeuge bei Zweirichtungsfahrzeugen aufwändiger und teurer sein kann. Dies ist darin begründet, dass bei Auffahrunfällen zweier Zweirichtungsfahrzeuge zwei Fahrerstandsmodule in den Unfall involviert sind.

¹ Festigkeitsberechnungen dienen im Maschinenbau dem rechnerischen Nachweis der Sicherheit einer Konstruktion.

² Eine mögliche Maßnahme bei großer Verspätung eines Fahrzeuges einer Linie ist das Kurzwenden. Dabei wird das

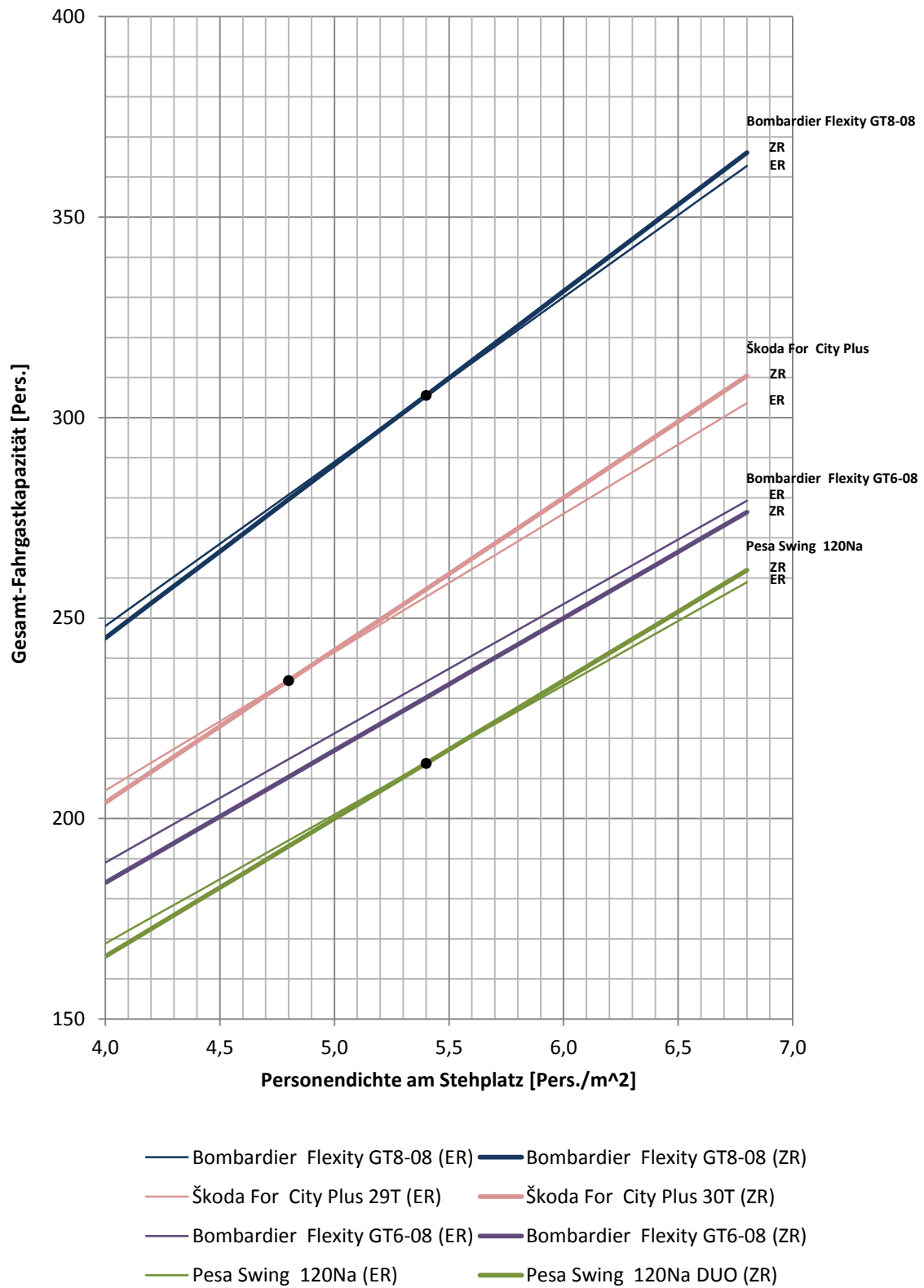


Abbildung 2.5: Rechnerische Gesamt-Fahrgastkapazitäten bei unterschiedlicher Personendichte

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Die in vorherigem Kapitel dargestellten Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge benötigen aufgrund ihrer Spurführung zum Wenden eine geeignete Infrastruktur. In allen folgenden Betrachtungen wird eine zweigleisige Strecke vorausgesetzt. In der zeitlichen Quantifizierung des Wendevorganges wird von einer minimal erforderlichen Anzahl an Weichen ausgegangen, um das Wenden über die dargestellte Infrastruktur zu ermöglichen.

Zum einen kann als Wendemöglichkeit eine Wendeschleife benutzt werden. In Abbildung 3.1 ist schematisch eine Wendeschleife am Streckenende dargestellt. Diese Wendeschleife ermöglicht es sowohl Ein- als auch Zweirichtungsfahrzeugen zu wenden und die Fahrt in die Gegenrichtung fortzusetzen.

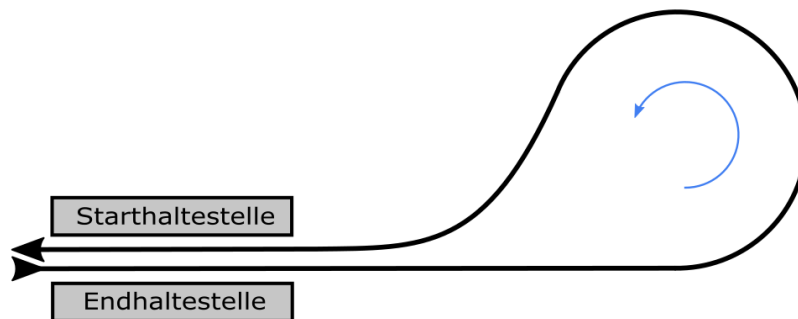


Abbildung 3.1: Wendeschleife am Streckenende

In Abbildung 3.2 ist das Gleisschema eines Stumpfgleises am Streckenende dargestellt. Im Regelbetrieb ist es nur Zweirichtungsfahrzeugen möglich über ein Stumpfgleis umzukehren, da beim Wendevorgang ein Fahrtrichtungswechsel stattfindet und somit bei einem Einrichtungsfahrzeug der Hilfsfahrerstand für die Fahrt in die Gegenrichtung verwendet werden müsste.

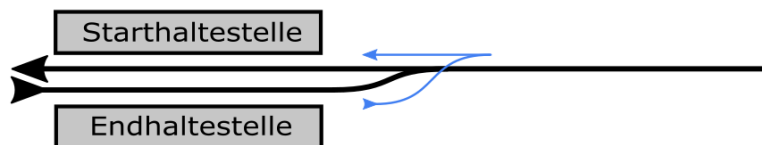


Abbildung 3.2: Stumpfgleis am Streckenende

Der Wendevorgang wird im Folgenden in Teilbereiche untergliedert.

3.1 Wendevorgang

Der Wendevorgang entspricht der Zeitdauer zwischen Ankunft an einer Endhaltestelle und anschließender Abfahrt desselben Fahrzeuges in die entgegengesetzte Richtung und beinhaltet folgende Unterpunkte (Schnieder, 2018, S.88):

- **Pausenzeit:** Die Pausenzeit des Personals kann Bestandteil des Wendevorganges sein.
- **Pufferzeit:** Die auch *Ausgleichszeit* genannte Pufferzeit, die an der Endhaltestelle eingehalten werden muss, dient dazu, die Streuung der Beförderungszeit entlang einer Linie auszugleichen. Dies ist notwendig, um Folgeverspätungen auf der Linie zu vermeiden.
- **Synchronisationszeit:** Die Synchronisationszeit ist die erforderliche Wartezeit nach erfolgter Pausen- und Pufferzeit, um die Abfahrt des Fahrzeuges aus der Endhaltestelle an einen vorgegebenen Takt anpassen zu können. Sind zum Beispiel an der Endhaltestelle fünf Minuten Pausen- und fünf Minuten Pufferzeit einzuplanen, erfolgt die nächste Abfahrt laut Fahrplan jedoch erst 12 Minuten nach planmäßiger Ankunft des Fahrzeuges in der Endhaltestelle, so sind zwei Minuten Synchronisationszeit aufzuschlagen.

Für nachfolgende Betrachtungen muss zusätzlich folgender Punkt beachtet werden:

- **Wendezeit:** Die Wendezeit beschreibt die zeitliche Dauer des Befahrens einer Wendeschleife bzw. einer Wende über ein Stumpfgleis. Das Befahren einer Wendeschleife entspricht einer Fahrt entlang des blauen Pfeils in Abbildung 3.1. Eine Wende über ein Stumpfgleis ist in Abbildung 3.2 anhand eines blauen Pfeils dargestellt. Pausen-, Puffer und Synchronisationszeit werden in der Wendezeit nicht berücksichtigt.

Auf betrieblich erforderliche Prozesse, die während der Zeit des Wendevorganges durchgeführt werden (z. B. Wagenum Sicht), wird nicht näher eingegangen. Diese werden in weiterer Folge nicht betrachtet.

3.2 Wendezeit

3.2.1 Grundlagen der Fahrkinematik zur Wendezeitberechnung

Um eine Wendeschleifenfahrt beziehungsweise eine Wende über ein Stumpfgleis zeitlich quantifizieren zu können, bedarf es grundlegender Zusammenhänge der Kinematik.

Der Quotient aus der Änderung der Geschwindigkeit Δv und einem Zeitintervall Δt ergibt die mittlere Beschleunigung a_m .

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$$

Umgeformt ergibt sich folgender Ausdruck, mit dem die Zeit für einen Beschleunigungsvorgang mit gegebener Anfangsgeschwindigkeit v_0 und Endgeschwindigkeit v_1 sowie gegebener mittlerer Beschleunigung berechnet werden kann.

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a_m} = \frac{v_1 - v_0}{a_m} \quad (2)$$

Mit der in Formel 2 berechneten Zeitdifferenz Δt kann – zusammen mit einer gegebenen mittleren Beschleunigung a_m – jener Weg s berechnet werden, der im Laufe des Beschleunigungsvorganges zurückgelegt wird:

$$s = a_m \frac{t^2}{2} \quad (3)$$

Bei der Herleitung von Formel 3 wurden beide Integrationskonstanten zu Null. Formel 3 kann daher nur zur Anwendung kommen, wenn die Anfangsgeschwindigkeit bzw. die Endgeschwindigkeit gleich Null ist.

3.2.2 Berechnung der Wendezeit einer Wendeschleifenfahrt

Wendeschleifen können sowohl für das Kurzwenden² von Fahrzeugen verwendet werden, als auch für das planmäßige Wenden von Linienzügen am Ende einer Strecke. Eine Wendeschleife wird ohne Fahrtrichtungswechsel des Fahrzeuges durchfahren. Besteht kein Bedarf an Überholgleisen, so sind bei einer Wendeschleife und einer daran anschließenden zweigleisigen Strecke keine Weichenverbindungen erforderlich.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird angenommen, dass die Wendeschleife und die dazugehörigen Haltestellen wie in Abbildung 3.3 dargestellt konzipiert sind. An der Endhaltestelle steigen sämtliche Fahrgäste aus dem Fahrzeug aus. Danach durchfährt das Fahrzeug ohne Fahrgäste die Wendeschleife und nimmt an der Starthaltestelle neue Fahrgäste für die Linienfahrt in die Gegenrichtung auf. Zusätzliche Zeit für Störeinflüsse (z. B.: Weiche muss vom Fahrer per Hand gestellt werden, Sichtkontrolle des Fahrzeuges, Kontrolle der Fahrscheinautomaten und Entwerter, etc.) wird nicht berücksichtigt.

² Eine mögliche Maßnahme bei großer Verspätung eines Fahrzeuges einer Linie ist das Kurzwenden. Dabei wird das Fahrzeug vor der planmäßigen Endhaltestelle gewendet und von dort als Linienfahrt in der Gegenrichtung eingesetzt (Schneider, 2018, S.160). Hiermit kann zum einen die Verspätung des Fahrzeuges reduziert oder zur Gänze eliminiert werden. Zum anderen kann damit eine mögliche Intervallücke in der Gegenrichtung geschlossen werden.

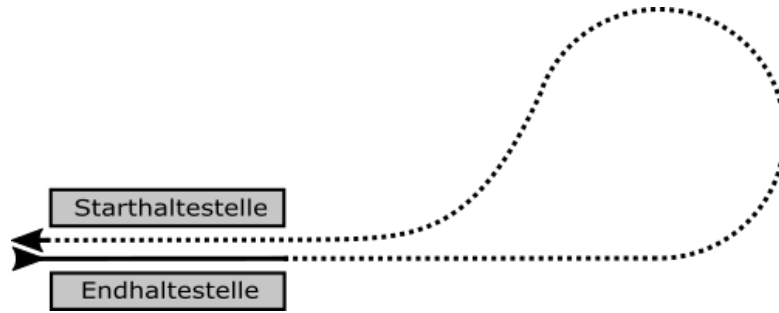


Abbildung 3.3: Wendeschleife am Streckenende, Wendeschleifenlänge strichliert dargestellt

Die Wendezeit bei Befahren einer Wendeschleife $t_{WZ,WS}$ ist eine Funktion von:

- Fahrgeschwindigkeit auf den Gleisen der Wendeschleife v_{WS}
- Beschleunigungsvermögen/Bremsverzögerung des Fahrzeuges a_{an}/a_{ab}
- **Wendeschleifenlänge s_{WS}**

Die Wendeschleifenlänge ist jene Gleislänge, die in Abbildung 3.3 strichliert dargestellt ist. Eine Differenz in der Fahrzeuglänge Δl_{FZG} wird bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Dies ist zulässig, da sie klein gegenüber der Wendeschleifenlänge ist und sich daher nicht wesentlich auf die Dauer des Befahrens auswirkt.

$$\Delta l_{FZG} \ll s_{WS} \quad (4)$$

Für folgende Betrachtung wird eine Wendeschleife herangezogen, wie sie in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Ein Fahrzeug fährt nach erfolgtem Fahrgastwechsel aus der Endhaltestelle aus und beschleunigt mit a_{an} auf die maximal zulässige Geschwindigkeit in der Wendeschleife v_{WS} . Das Fahrzeug fährt dann mit konstanter Geschwindigkeit durch die Wendeschleife und verzögert zuletzt die Geschwindigkeit mit a_{ab} , um am Ende der Wendeschleifenfahrt in der zur Endhaltestelle gegenüberliegenden Starthaltestelle zum Stillstand zu kommen. Der Vorgang der Wendeschleifenfahrt unterteilt sich demnach in die drei Bereiche:

1) Anfahren

Mit einer mittleren Anfahrbeschleunigung a_{an} , einer Ausgangsgeschwindigkeit v_0 von 0 km/h und einer konstanten Maximalgeschwindigkeit zur Wendeschleifenfahrt v_{WS} ergibt sich nach Formel 2 ein Δt ($t_{WZ,WS,an}$) zur Beschleunigung auf die Geschwindigkeit v_{WS} .

$$t_{WZ,WS,an} = \frac{v_{WS}}{a_{an}} \quad (5)$$

Im Laufe des Beschleunigungsvorganges wird bis zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit nach Formel 3 ein Weg $s_{WS,an}$ zurückgelegt.

$$s_{WS,an} = \frac{a_{an}}{2} * t_{WZ,WS,an}^2 \quad (6)$$

2) Bremsen

Bei der Berechnung des Weges $s_{WS,ab}$ und der Zeit $t_{WZ,WS,ab}$ für die konstante Bremsverzögerung a_{ab} wird analog zu Punkt 1) vorgegangen.

3) Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Nach Subtraktion der Wege zur Beschleunigung und Verzögerung vom gesamten Weg der Wendeschleifenfahrt s_{WS} erhält man in Formel 7 jenen Weg $s_{WS,const}$, der im Zuge der Wendeschleifenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit v_{WS} durchfahren wird. Die hierzu benötigte Zeit $t_{WZ,WS,const}$ wird in Formel 8 berechnet.

$$s_{WS,const} = s_{WS} - (s_{WS,an} + s_{WS,ab}) \quad (7)$$

$$t_{WZ,WS,const} = \frac{s_{WS,const}}{v_{WS}} \quad (8)$$

In Abbildung 3.4 ist die Wendezeit über der Wendeschleifenlänge $t_{WZ,WS}$ aufgetragen, die sich durch folgende Formel ergibt:

$$t_{WZ,WS} = t_{WZ,WS,an} + t_{WZ,WS,const} + t_{WZ,WS,ab} \quad (9)$$

Bei der Berechnung wurde nach oben dargestellten Formeln vorgegangen und folgende Parameter als gegeben angenommen:

- **Fahrgeschwindigkeit auf den Gleisen der Wendeschleife v_{ws}**

Aufgrund von engen Bögen wird eine maximale konstante Fahrgeschwindigkeit entlang der Wendeschleife von 25 km/h angenommen. Da bei einer Wendeschleife aus technischer Sicht keine Weichen erforderlich sind, muss bei der einfachsten Ausführung auf eine reduzierte maximale Fahrgeschwindigkeit (Spitzbefahrung von Weichen) nicht geachtet werden.

- **Beschleunigungsvermögen/Bremsverzögerung des Fahrzeuges a_{an}/a_{ab}**

Es wird ein mittlerer Beschleunigungs- und Verzögerungswert von $0,6 \text{ m/s}^2$ angenommen.

Die Wendezeit ergibt sich in Abhängigkeit der Wendeschleifenlänge s_{WS} . Abbildung 3.4 lässt erkennen, dass der Zusammenhang zwischen der Dauer des Befahrens der Wendeschleife und der Wendeschleifenlänge im betrachteten Bereich ein linearer ist. Dies ergibt sich, da der Beschleunigungsvorgang abgeschlossen und die Maximalgeschwindigkeit erreicht wurde, bevor das Fahrzeug wieder verzögert wird. Der hinzukommende Zeitanteil bei längeren Wendeschleifen ist daher nur jene Strecke, die zusätzlich mit konstanter Maximalgeschwindigkeit durchfahren wird. Dieser Zusammenhang ist laut Formel 8 linear.

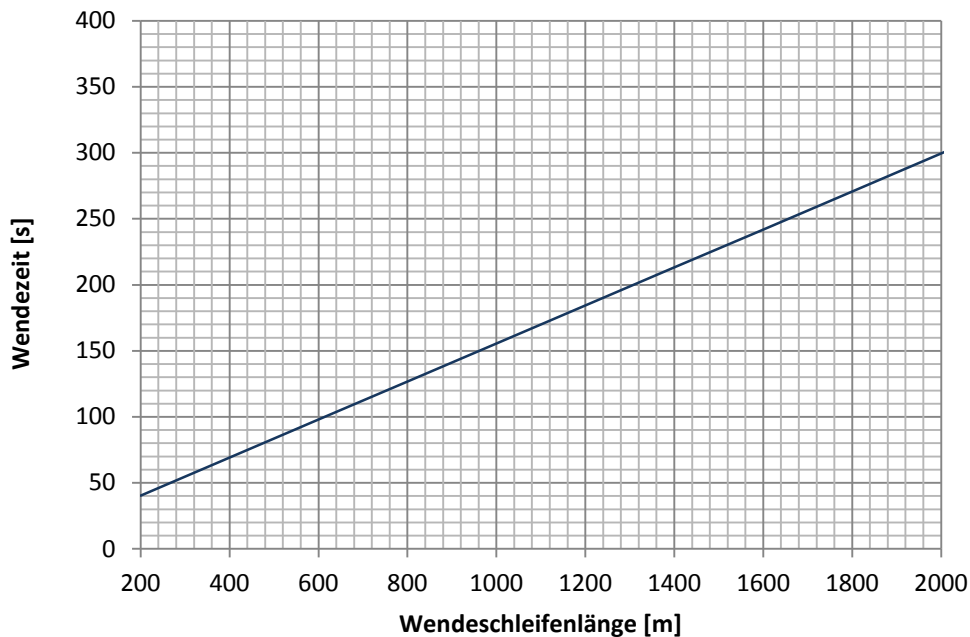


Abbildung 3.4: Wendezeit beim Wenden über eine Wendeschleife in Abhängigkeit der Wendeschleifenlänge

3.2.3 Berechnung der Wendezeit einer Wende über ein Stumpfgleis

Beim Wenden über eine Kehranlage mit Stumpfgleis wird die Fahrtrichtung des Fahrzeuges gewechselt. Im Gegensatz zu einer Wendeschleife am Streckenende ist bei einer Kehranlage am Streckenende mit einem Stumpfgleis aus technischer Sicht zumindest eine Weiche notwendig. Bei leistungsfähigeren Wendeanlagen können auch mehrere Weichen vorhanden sein. Details hierzu finden sich in Kapitel 3.3.3.

Ist die Kehranlage mit Stumpfgleis und die Anordnung der End- und Starthaltestelle wie in Abbildung 3.2 ausgeführt, verlassen an der Endhaltestelle sämtliche Fahrgäste das Fahrzeug. Der Fahrer fährt dann in das Stumpfgleis ein, rüstet den Fahrerstand ab, geht entlang des Fahrzeuges zum Fahrerstand der anderen Fahrtrichtung und fährt nach erfolgtem Aufrüsten des Fahrzeuges in die Starthaltestelle ein. Es wird angenommen, dass das Weichenstellen im Regelfall automatisch erfolgt und das Fahrpersonal nur im Störfall eingreifen muss. Sobald das Fahrzeug in der Starthaltestelle zum Stillstand gekommen ist, kann das darauffolgende Zweirichtungsfahrzeug mit der Fahrt in das Stumpfgleis starten.

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3.1 beschriebene Wendezeit als Teil des Wendevorganges eines Fahrzeuges detailliert betrachtet, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Zugfolgezeit entlang der Strecke nimmt (siehe Kapitel 3.3.2).

Die Wendezeit bei einer Wende über ein Stumpfgleis $t_{wz,sg}$ lässt sich von der Abfahrt eines Fahrzeuges aus der Linienendhaltestelle bis zum Eintreffen in der Starthaltestelle in folgende Teil-Wendezeiten unterteilen, die in Abbildung 3.5 dargestellt sind:

- 1) $t_{FZG,ein}$: Fahrzeit von der Endhaltestelle bis in das Stumpfgleis

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

- 2) $t_{FZG,ab}$: Zeitdauer, um den Fahrerstand abzurüsten
- 3) $t_{FZF,über}$: Zeitdauer für Fahrpersonal : aus dem Fahrerstand begeben, Fahrerstandtüre versperren, entlang des Fahrzeuges zum anderen Fahrerstand gehen, Fahrerstandtüre öffnen, in den Fahrerstand begeben
- 4) $t_{FZG,auf}$: Zeitdauer, um den Fahrerstand aufzurüsten (beinhaltet Fahrstraßenbildezeit)
- 5) $t_{FZG,aus}$: Fahrzeit aus dem Stumpfgleis bis zur Starthaltestelle
- 6) $t_{Stör}$: Zeit für Störeinflüsse (z. B.: Weiche muss vom Fahrer per Hand gestellt werden, Sichtkontrolle des Fahrzeuges, Kontrolle der Fahrscheinautomaten und Entwerter, etc.)

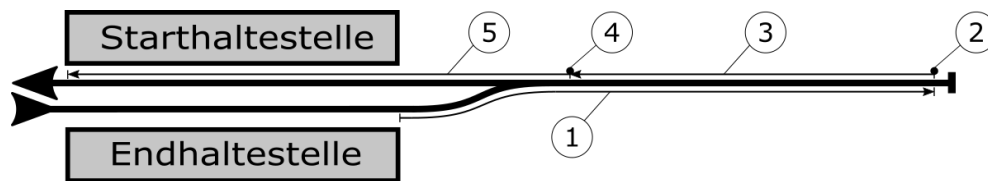


Abbildung 3.5: Teil-Wendzeiten bei einer Wende über ein Stumpfgleis

Die Fahrkinematischen Berechnungen erfolgen nach den Formeln aus Kapitel 3.2.2. In Formel 10 werden die dargestellten Teil-Wendzeiten für das Wenden über ein Stumpfgleis zur Wendezeit $t_{WZ,SG}$ aufsummiert. Da Störeinflüsse betriebsspezifisch zu erfassen sind, werden sie in der allgemeinen Betrachtung nicht berücksichtigt.

$$t_{WZ,SG} = t_{FZG,ein} + t_{FZG,ab} + t_{FZF,über} + t_{FZG,auf} + t_{FZG,aus} \quad (10)$$

Die Wendezeit für das Wenden eines Zweirichtungsfahrzeuges über ein Stumpfgleis $t_{WZ,SG}$ ist demnach von folgenden Parametern abhängig:

- Fahrgeschwindigkeit auf den Gleisen der Kehranlage v_{SG}
- Beschleunigungsvermögen/Bremsverzögerung des Fahrzeuges a_{an}/a_{ab}
- **Fahrzeugtechnik (Auf- und Abrüstzeit, AAZ)**
- **Fahrzeuglänge (FZL) l_{FZG}**
- Weichenlänge s_{WL}
- Fahrer (Schrittgeschwindigkeit beim Gehen zum anderen Fahrerstand, Vorgang des Türöffnens/Türversperrens)

Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich das Variieren der Parameter FZL sowie AAZ auf die Wendezeit eines Zweirichtungsfahrzeuges auswirkt, wenn dieses über ein Stumpfgleis mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet wird. Bei der Berechnung der Ein- und Ausfahrt in das Stumpfgleis wird wie bei der fahrkinematischen Berechnung einer Wendeschleifenfahrt in Kapitel 3.2.2 vorgegangen. Folgende Parameter werden bei allen Betrachtungen als unveränderlich angenommen:

- **Fahrgeschwindigkeit auf den Gleisen der Kehranlage**

Da bei einer Wende über ein Stumpfgleis und einer daran anschließenden zweigleisigen Strecke zumindest eine Weiche spitz befahren werden muss, wird eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h angenommen.

- **Beschleunigungsvermögen des Fahrzeuges**

Um einen optimalen Vergleich zur Wende über eine Wendeschleife ziehen zu können, wird auch hier ein mittlerer Beschleunigungs- und Verzögerungswertwert a_m von $0,6 \text{ m/s}^2$ angenommen.

- **Weichenlänge und Zuschläge**

Die Fahrstrecke von der Linienendhaltestelle bis zum Beginn des Stumpfgleises wird mit 40 Metern Länge angenommen. Diese Länge ergibt sich aus stichprobenartigen Vermessungen von Straßenbahngleisnetzen. Das Fahrzeug muss diese Strecke bei einer Kehrfahrt zweimal zusätzlich zur Fahrzeuglänge zurücklegen.

- **Schrittgeschwindigkeit des Fahrers**

Bei einer Wendefahrt über ein Stumpfgleis legt der Fahrer einmal den Weg einer Fahrzeuglänge mit einer Schrittgeschwindigkeit von 4 km/h zurück.

- **Dauer des Betretens/Verlassens des Fahrerstandes und öffnen/versperren der Türe**

Dieser Wert wird mit 15 Sekunden pro Vorgang angenommen. Da das Fahrpersonal bei einem Wenden mit Fahrtrichtungswechsel einen Fahrerstand versperren und jenen am anderen Fahrzeugende öffnen muss, wird dieser Wert mit dem Faktor zwei multipliziert.

In Tabelle 3.1 sind die untersuchten Teil-Wendzeiten einer Kehrfahrt über ein Stumpfgleis mit ihren jeweiligen funktionalen Abhängigkeiten von anderen Parametern zusammengefasst. Beispielsweise ist das Auf- und Abrüsten eines Fahrzeuges nur vom Parameter *Fahrzeugtechnik* abhängig. Die Fahrt in das Stumpfgleis ist hingegen eine Funktion von den vier Parametern *Geschwindigkeit*, *Beschleunigung*, *Fahrzeuglänge* und *Weichenlänge*.

Tabelle 3.1: Funktionale Abhängigkeiten der Teil-Wendezeiten über ein Stumpfgleis

Teil-Wendezeiten der Kehrfahrt über ein Stumpfgleis		Abhängigkeit					
		Geschwindigkeit	Beschleunigung	Fahrzeugtechnik	Fahrzeuglänge	Weichenlänge	Fahrer
$t_{FZG, ein}$	Fahrt von der Endhaltestelle in das Stumpfgleis	ja	ja	nein	ja	ja	nein
$t_{FZG, ab}$	Fahrerstand abrüsten	nein	nein	ja	nein	nein	nein
$t_{FZF, über}$	Fahrerstandtüre versperren, Gehen zum anderen Fahrerstand, Fahrerstandtüre öffnen	nein	nein	nein	ja	nein	Ja
$t_{FZG, auf}$	Fahrerstand aufrüsten	nein	nein	ja	nein	nein	nein
$t_{FZG, aus}$	Fahrt aus dem Stumpfgleis bis zur Starthaltestelle	ja	ja	nein	ja	ja	nein

Abbildung 3.6 stellt jene Teil-Wendezeiten aus Formel 10 dar, die sich in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge verändern. Zum einen ist dies die Zeitdauer, die das Fahrzeug benötigt, um von der Endhaltestelle in das Stumpfgleis einzufahren ($t_{FZG, ein}$) und aus dem Stumpfgleis in die Starthaltestelle auszufahren ($t_{FZG, aus}$). Der Übersichtlichkeit halber wurden diese beiden Teil-Wendezeiten in der Abbildung addiert. Zum anderen benötigt der Fahrer mehr Zeit, um bei einem längeren Fahrzeug den Fahrerstand zu wechseln ($t_{FZF, über}$).

Es ist ersichtlich, dass die positive Steigung der Geraden $t_{FZF, über}$ größer als jene von $t_{FZG, ein} + t_{FZG, aus}$ ist, da sich der Fahrer mit einer geringeren Geschwindigkeit bewegt als das Fahrzeug. Dementsprechend steigt mit länger werdenden Fahrzeugen der prozentuelle Zeitanteil von $t_{FZF, über}$ an der Wendezeit.

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

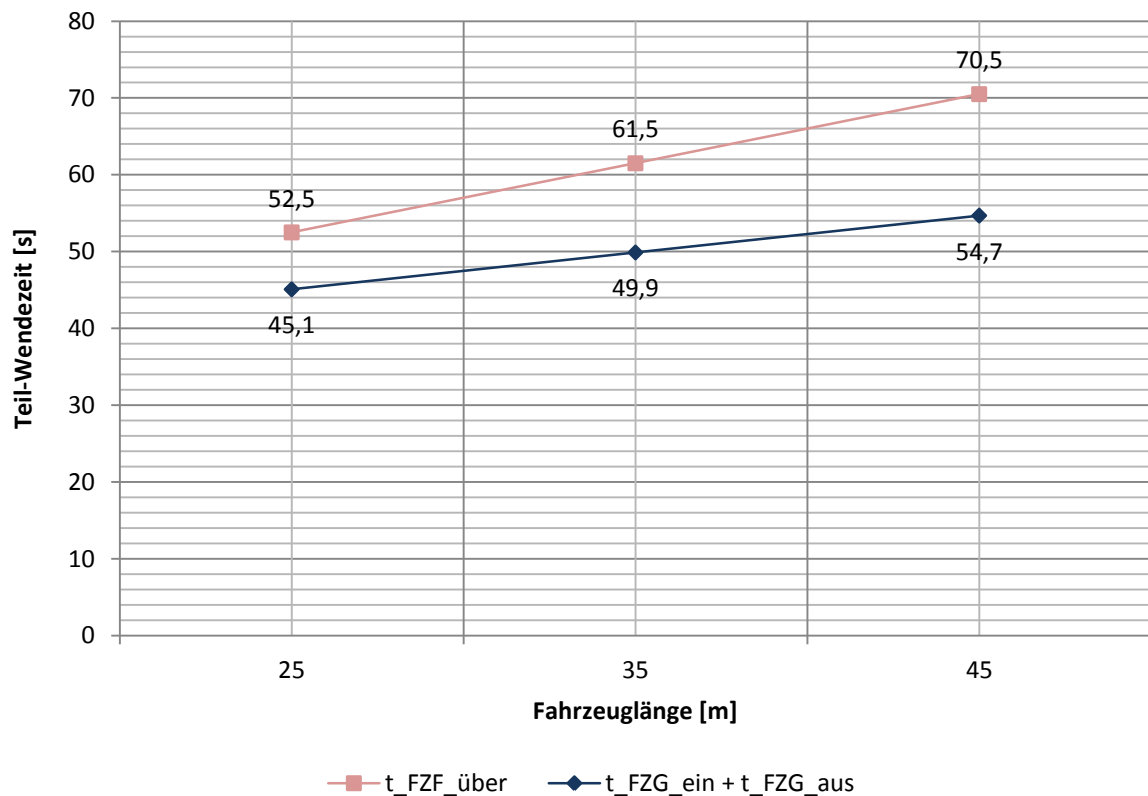


Abbildung 3.6: Veränderliche Teil-Wendezeiten in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge

In Abbildung 3.7 ist für eine Fahrzeuglänge in Meter und die notwendige Auf- und Abrüstzeit in Sekunden die benötigte Wendezeit $t_{WZ,SG}$ in Sekunden von Fahrzeugen unterschiedlicher Länge mit verschiedenen Auf- und Abrüstzeiten zusammengefasst. Zudem sind die jeweiligen Teil-Wendezeiten abgebildet. Die kürzeste Wendezeit von etwa zwei Minuten wird bei einem Zweirichtungsfahrzeug von 25 Metern Länge mit einer Auf- und Abrüstzeit von 15 Sekunden erzielt. Ein Fahrzeug von 45 Metern Länge mit einer Auf- und Abrüstzeit von 105 Sekunden benötigt etwa fünfeinhalb Minuten um zu wenden.

Der Vergleich zweier Zweirichtungsfahrzeuge unterschiedlicher Baureihen aus Abbildung 3.8 zeigt, dass durch ein Verkleinern des Parameters *Auf- und Abrüstzeit* die Wendezeit kurz gehalten werden kann. Die beiden in Abbildung 3.7 hellrot markierten Fahrzeuge verschiedener Baureihen verdeutlichen, dass die Wendezeit kurzer Fahrzeuge bei Reduktion der Auf- und Abrüstzeit länger sein kann als die Wendezeit langer Fahrzeuge.

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

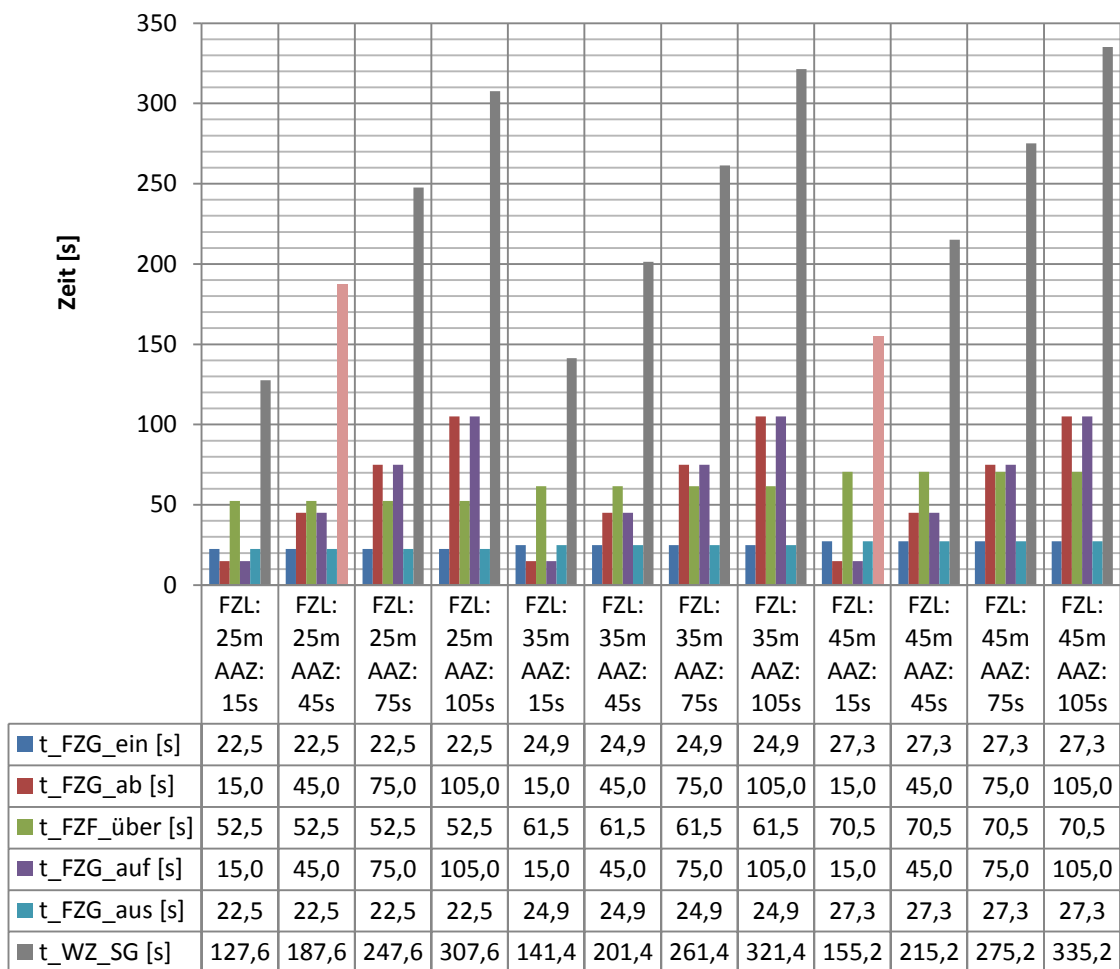


Abbildung 3.7: Vergleich der Wendezeiten und Teil-Wendezeiten von Zweirichtungsfahrzeugen, die Wendezeiten der in Abbildung 3.8 verglichenen Fahrzeuge sind hellrot hervorgehoben

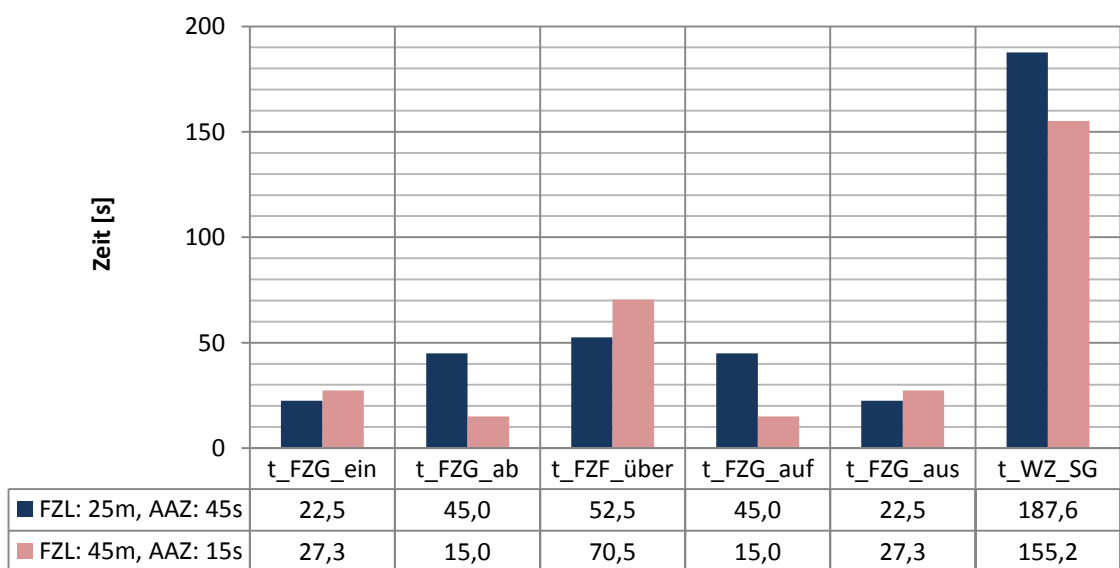


Abbildung 3.8: Vergleich der Teil-Wendezeiten von zwei Zweirichtungsfahrzeugen unterschiedlicher FZL und AAZ

3.3 Betriebliche Auswirkungen des Wendens von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen

3.3.1 Wendezeit und zurückgelegter Weg beim Wenden

Die Wendezeit ist bei einer Wende über eine Wendeschleife oder eine Kehranlage mit Stumpfgleis stets eine Funktion der zulässigen Fahrgeschwindigkeit auf den Gleisen der Wendeanlage sowie des Beschleunigungsvermögens des Fahrzeuges. Wird das Fahrzeug über ein Stumpfgleis mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet, so ist die Wendezeit zusätzlich von den Parametern *Fahrzeuglänge*, *Weichenlänge*, *Fahrzeugtechnik (AAZ)* sowie *Schrittgeschwindigkeit des Fahrers* abhängig. Die beschriebenen funktionalen Abhängigkeiten einer Wendeschleifenfahrt und eines Wendens über ein Stumpfgleis sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Funktionale Abhängigkeiten einer Wendeschleifenfahrt und eines Wendens über eine Kehranlage mit Stumpfgleis

Parameter	Abhängigkeit	
	Wendeschleife	Kehranlage mit Stumpfgleis
Fahrgeschwindigkeit in der Wendeanlage	ja	ja
Beschleunigungsvermögen des Fahrzeuges	ja	ja
Fahrzeugtechnik (AAZ)	nein	ja
Fahrzeuglänge	bedingt (Formel 4)	ja
Weichenlänge	ja	ja
Fahrer (Schrittgeschwindigkeit und Vorgang des Betretens/Verlassens der Fahrerkabine)	nein	ja

Das Befahren einer Wendeanlage verfolgt den betrieblichen Zweck, das Fahrzeug nach dem Wenden in der Gegenrichtung einsetzen zu können. Eine Wendeschleifenfahrt mit Zwischenhaltestellen wird in diesem Kapitel nach Abbildung 3.3 nicht berücksichtigt. Daher bringt der beim Wenden zurückgelegte Weg des Straßenbahnfahrzeuges dem Fahrgast keinen Nutzen. Die Differenz im gefahrenen Weg des Fahrzeuges zwischen einer Wendeschleifenfahrt und einer Wende über ein Stumpfgleis errechnet sich nach Abbildung 3.9 aus der Differenz der Wendeschleifenlänge s_{WS} zur Weichenlänge s_{WL} sowie der Fahrzeuglänge l_{FZG} :

$$\Delta s = s_{WS} - 2 * (s_{WL} + l_{FZG}) \tag{11}$$

In Abbildung 3.9 ist der Weg Δs , der bei einer Wendeschleifenfahrt zusätzlich zu einer Wende über ein Stumpfgleis zurückgelegt werden muss, strichliert dargestellt.

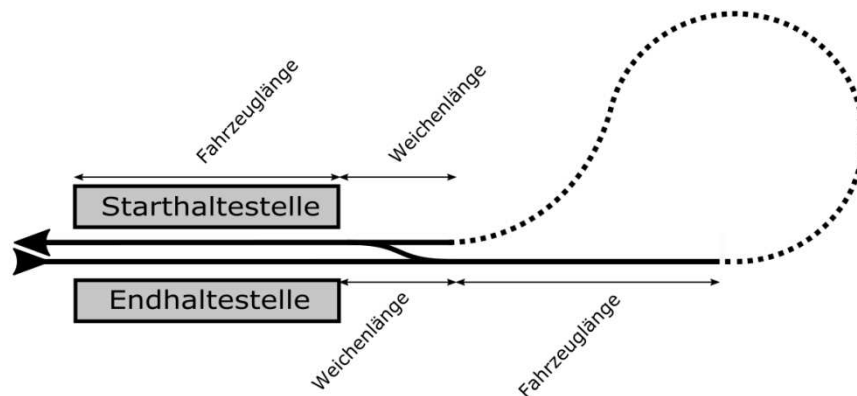


Abbildung 3.9: Vergleich der zurückgelegten Strecke beim Wenden

In Abbildung 3.10 ist die Wendezeit für das Wenden über eine Wendeschleife in Abhängigkeit der Wendeschleifenlänge rot dargestellt. Blau strichliert ist die Wendezeit für ein Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel zu sehen. Unterschiedliche Fahrzeuglängen sind jeweils mittels eigener Geraden dargestellt. Die Dauer des Auf- und Abrüstvorganges von Zweirichtungsfahrzeugen wird auf der Sekundärachse abgelesen. Die Wendezeitgeraden von Zweirichtungsfahrzeugen weisen einen horizontalen Versatz auf. Die Zeitdifferenz entspricht jener Zeitdauer, die bei einem längeren Fahrzeug für die Wendezeit beaufschlagt werden muss. Sie ergibt sich zum einen aus einer längeren Zeitdauer für die Fahrt von der Endhaltestelle in das Stumpfgleis sowie vom Stumpfgleis in die Starthaltestelle (in Summe 4,8 Sekunden pro zehn Meter Fahrzeuglänge). Zum anderen muss der Fahrer für den Wechsel des Fahrerstandes entlang eines längeren Fahrzeuges einen längeren Weg zurücklegen (neun Sekunden pro zehn Meter Fahrzeuglänge).

Durch die vertikal strichlierten Achsen wird ersichtlich, dass ein 25 Meter langes Zweirichtungsfahrzeug mit einer Auf- und Abrüstzeit von jeweils 15 Sekunden bei einem Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel dieselbe Wendezeit erzielt wie bei Befahren einer 806 Meter langen Wendeschleife. Ein 45 Meter langes Zweirichtungsfahrzeug mit einer Auf- und Abrüstzeit von jeweils 105 Sekunden benötigt bei Befahren eines Stumpfgleises dieselbe Zeit, wie wenn es über eine etwa 2,25 Kilometer lange Wendeschleife wenden müsste. Hierfür wurde die Annahme aus Kapitel 3.2 getroffen, dass die Wendeschleife über ihre gesamte Länge nach dem Anfahren und vor dem Bremsvorgang mit einer konstanten Geschwindigkeit von 25 km/h befahren wird.

Die dünnen Geraden zeigen verkürzte Wendezeiten ($t_{WZ, kurz, SG}$) von Zweirichtungsfahrzeugen, bei denen direkt in der Haltestelle mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet wird und daher eine Weiterfahrt in das Stumpfgleis nicht erforderlich ist. Die in Abbildung 3.5 dargestellten Punkte 1) und 5) entfallen bei dieser Betrachtung. In diesem Fall liegen die Geraden der Wendezeiten näher beieinander, da die Fahrzeit in das Stumpfgleis und aus dem Stumpfgleis heraus entfällt.

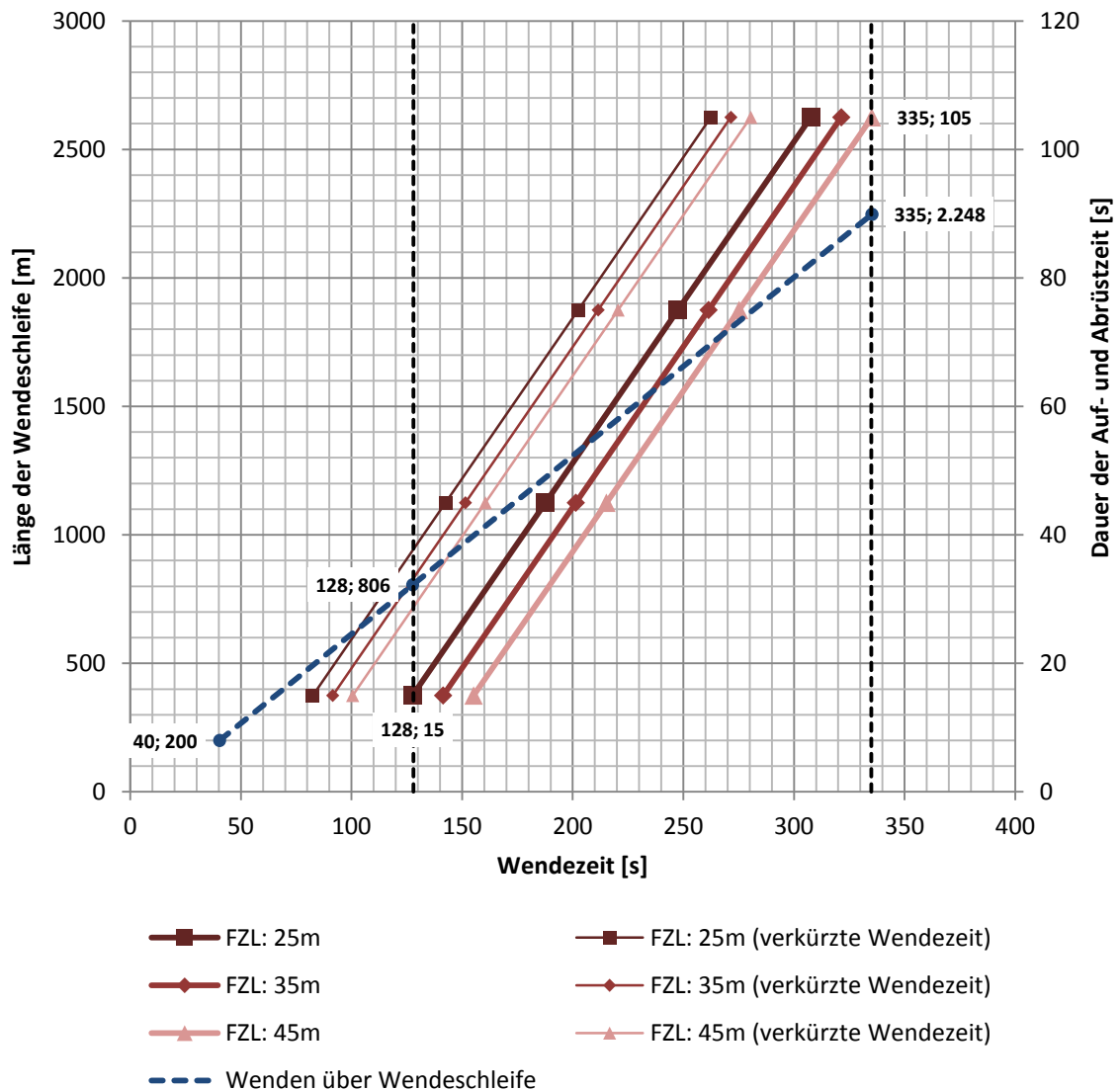


Abbildung 3.10: Vergleich der Wendezeiten einer Wendeschleifenfahrt und eines Wendens mittels Fahrtrichtungswechsel

3.3.2 Zugfolgezeit³

Wird nur die Wendezeit betrachtet, kann eine Wendeschleife vereinfacht als ein Abschnitt zwischen zwei Haltestellen entlang einer Linie angesehen werden. Daher lässt sich beim Wenden über eine Wendeschleife eine minimale Zugfolgezeit erzielen, wie sie auch entlang der Strecke realisiert werden kann. Rollinger (Ostermann, Rollinger, 2016, S.173) beschreibt, dass Fahrzeuge entlang einer Strecke mit Einfachhaltestellen in einem Abstand von 50 Sekunden folgen können. Werden keine Pufferzeiten, Synchronisationszeiten, Pausenzeiten und Zeiten für die Inspektion

³ Die Zugfolgezeit definiert, in welchem Zeitabstand Fahrzeuge auf einer Strecke folgen können. Minimale Zugfolgezeiten zeigen daher die technischen Grenzen der vorhandenen Gleis-Infrastruktur auf. Beispielsweise können Zugfolgezeiten im Linienbetrieb durch den Einsatz von Doppelhaltestellen verkleinert werden (Ostermann, Rollinger, 2016, S.173). Die Zugfolgezeit kann Einfluss auf das Intervall (Zeitabstand zwischen zwei Zügen einer Linie) haben.

des Fahrzeuges o.Ä. berücksichtigt, so stellen Wendeschleifen technisch gesehen keinen limitierenden Faktor in der Zugfolgezeit dar, da die Fahrtrichtung des Fahrzeuges nicht gewechselt werden muss.

Wird das Wenden von Zweirichtungsfahrzeugen über ein Stumpfgleis ausgeführt, wie es in Abbildung 3.2 dargestellt ist, so entspricht die kleinste, technisch realisierbare Zugfolgezeit entlang der angrenzenden Strecke der in Kapitel 3.2.3 berechneten Wendezeit. Dabei wird angenommen, dass ein Fahrzeug die Fahrt in das Stumpfgleis erst startet, sobald das vorhergehende Fahrzeug in der Starthaltestelle angekommen ist. Die realisierbare Zugfolgezeit entlang der angrenzenden Strecke ändert sich demnach direkt mit den veränderlichen Fahrzeugparametern *Fahrzeuglänge* und *Auf- und Abrüstzeit*. Es können, wie im folgenden Kapitel 3.3.3 beschrieben, zusätzliche Stumpfgleise an der Wendestelle vorgesehen werden. Dadurch ändert sich zwar die Wendezeit pro Fahrzeug nicht, jedoch können zwei oder mehrere Fahrzeuge parallel wenden, weshalb eine kleinere Zugfolgezeit entlang der Strecke erzielt werden kann.

Ist entlang einer Strecke in einem Zeitraum eine geringere Zugfolgezeit erforderlich (z. B. Sonderverkehre), so kann die Kapazität einer Wendeanlage mit Stumpfgleisen erhöht werden, indem zusätzliches Fahrpersonal eingesetzt wird. Sobald ein Fahrzeug im Stumpfgleis angekommen ist, kann ein zusätzlicher Fahrer den Fahrerstand für die Fahrt in die Gegenrichtung betreten. Dadurch kann die Teil-Wendezeit $t_{\text{FZ,über}}$ (siehe Punkt 3) in Abbildung 3.5) verkürzt werden. Je länger die eingesetzten Fahrzeuge sind, umso stärker wirkt sich diese Maßnahme prozentuell auf die Wendezeit aus.

3.3.3 Anzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen

Ob zum Wenden von Fahrzeugen eine Wendeschleife oder eine Kehranlage für ein Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel verwendet wird, wirkt sich auch in der Anzahl an notwendigen Weichen und Kreuzungen aus, die verbaut sein müssen, um das Wenden technisch realisieren zu können. In allen folgenden Betrachtungen wird angenommen, dass an die Wendeanlagen zweigleisige Strecken anschließen.

Wendeanlagen am Streckenende

Wendeanlagen am Streckenende wurden in ihrer jeweils einfachsten Ausführung bereits in Abbildung 3.1 (Wendeschleife) und Abbildung 3.2 (Stumpfgleis für das Wenden von Zweirichtungsfahrzeugen) schematisch dargestellt. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die minimal erforderliche Infrastruktur in Abhängigkeit der Ausführung der Wendeanlage. In Klammer ist die Anzahl an Wendegleisen angegeben.

Tabelle 3.3: Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen am Streckenende

Wendeanlage			minimal erforderliche Infrastruktur		dargestellt in
Platzierung	Nr.	Wendeanlagenart	Weichen	Kreuzungen	
STRECKENENDE	1	Wendeschleife (1)	0	0	Abbildung 3.1
	2	Wendeschleife (2)	2	0	-
	3	Wendeschleife (3)	4	0	-
	4	Wendeschleife (4)	6	0	-
	5	Kehranlage (1)	1	0	Abbildung 3.2
	6	Kehranlage (2)	2	0	-
	7	Kehranlage (3)	3	0	-
	8	Kehranlage (4)	4	0	-

Wendeanlagen in Streckenmitte mit Wendemöglichkeit in eine/beide Fahrrichtungen, Wendegleise neben den Hauptfahrgleisen

In Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 sind die Gleisschemata einer Wendeschleife sowie einer Kehranlage für Zweirichtungsfahrzeuge entlang einer Strecke dargestellt, wobei sich die Wendegleise neben den Hauptfahrgleisen befinden. Mit „W“ sind Weichen, mit „K“ Kreuzungen gekennzeichnet. Strichlierte Gleise sowie grau hinterlegte Weichen und Kreuzungen sind für Wendeanlagen vorzusehen, bei denen das Wenden von Fahrzeugen von und nach beiden Fahrrichtungen erforderlich ist. In den beiden Darstellungen sind beispielhaft jeweils zwei Wendegleise vorhanden, die neben den Hauptfahrgleisen angeordnet sind.

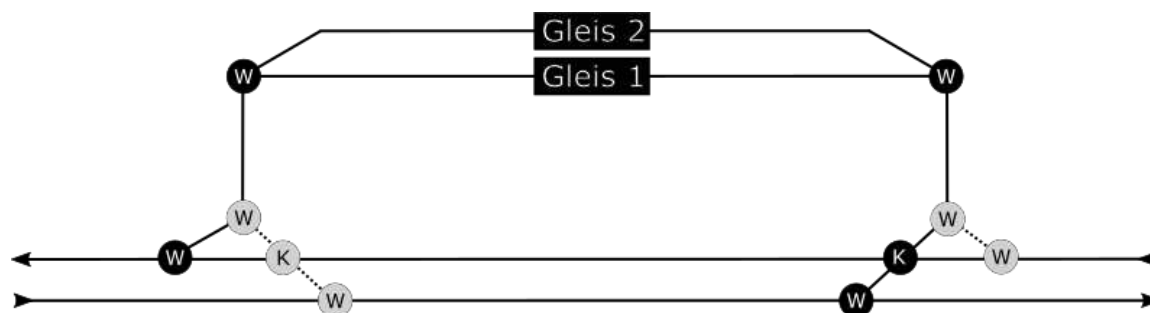


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung einer Wendeschleife mit zwei Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen (graue sowie strichlierte Infrastruktur für ein Wenden aus beiden Fahrrichtungen)

Bei Wendeschleifen bewirkt ein zusätzliches Gleis (Gleis 2) im Allgemeinen keine Änderung in der erzielten Wendezeit, da diese ohne Fahrtrichtungswechsel durchfahren werden. Das weitere Gleis kann jedoch genutzt werden, um zum Beispiel erforderliche Ausgleichszeiten zu halten, während ein weiteres Fahrzeug in die Wendeschleife einfahren kann.

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

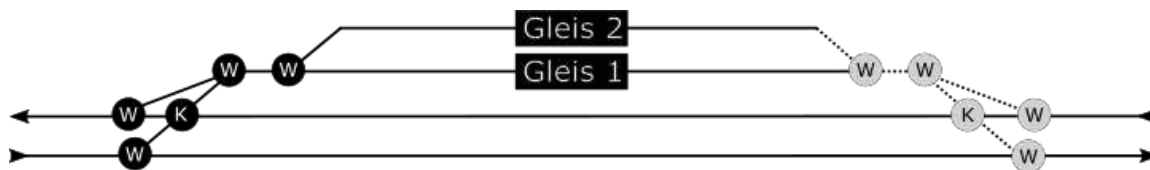


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung einer Kehranlage für Zweirichtungsfahrzeuge mit zwei Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen (graue sowie strichlierte Infrastruktur für ein Wenden aus beiden Fahrrichtungen)

Da die Wendezeit von Zweirichtungsfahrzeugen mehrere Minuten betragen kann, kann bei Kehranlagen mit Stumpfgleisen ein weiteres Gleis (Gleis 2) benötigt werden, um die Zugfolgezeit auf der angrenzenden Strecke zu reduzieren. Muss an dieser Stelle z. B. eine Pufferzeit eingehalten werden, so sind zusätzlich zu den für das Wenden notwendigen Gleisen weitere Gleise vorzusehen. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick darüber, welche Anzahl an Weichen und Kreuzungen je nach Art der Wendeanlage zumindest erforderlich sind.

Das Gleisschema der Wendeschleife mit zwei Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen aus Abbildung 3.11 entspricht Nr. 10 (Wendemöglichkeit aus einer Fahrtrichtung) bzw. Nr. 18 (Wendemöglichkeit aus beiden Fahrrichtungen) der Übersicht aus Tabelle 3.4. Das Gleisschema der Kehranlage mit zwei Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen aus Abbildung 3.12 entspricht Nr. 14 (Wendemöglichkeit aus einer Fahrtrichtung) bzw. Nr. 22 (Wendemöglichkeit aus beiden Fahrrichtungen) der Übersicht aus Tabelle 3.4.

Tabelle 3.4: Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen in Streckenmitte und Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen

Wendeanlage			minimal erforderliche Infrastruktur		dargestellt in
Platzierung	Nr.	Wendeanlagenart	Weichen	Kreuzungen	
STRECKENMITTE, NEBEN HAUPTFAHRGLEISEN, EINE FAHRTRICHTUNG	9	Wendes Schleife (1)	2	1	-
	10	Wendes Schleife (2)	4	1	Abbildung 3.11
	11	Wendes Schleife (3)	6	1	-
	12	Wendes Schleife (4)	8	1	-
	13	Kehranlage (1)	3	1	-
	14	Kehranlage (2)	4	1	Abbildung 3.12
	15	Kehranlage (3)	5	1	-
	16	Kehranlage (4)	6	1	-
STRECKENMITTE, NEBEN HAUPTFAHRGLEISEN, ZWEI FAHRTRICHTUNGEN	17	Wendes Schleife (1)	6	2	-
	18	Wendes Schleife (2)	8	2	Abbildung 3.11
	19	Wendes Schleife (3)	10	2	-
	20	Wendes Schleife (4)	12	2	-
	21	Kehranlage (1)	6	2	-
	22	Kehranlage (2)	8	2	Abbildung 3.12
	23	Kehranlage (3)	10	2	-
	24	Kehranlage (4)	12	2	-

Wendeanlagen in Streckenmitte mit Wendemöglichkeit in eine/beide Fahrtrichtungen, Wendegleise zwischen den Hauptfahrgleisen

In Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 sind die schematischen Gleispläne von Wendeanlagen dargestellt, bei denen die Gleise der Wendeanlage zwischen den Hauptfahrgleisen angeordnet sind. Dies ist in Tabelle 3.5 durch ein „z“ nach der Anzahl der Gleise für Ausgleichszeiten angegeben. Strichlierte Gleise sowie grau hinterlegte Weichen und Kreuzungen sind für Wendeanlagen vorzusehen, bei denen das Wenden von Fahrzeugen von und nach beiden Fahrtrichtungen erforderlich ist.

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Tabelle 3.5: Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen in Streckenmitte und Wendegleis zwischen den Hauptfahrgleisen

Wendeanlage			minimal erforderliche Infrastruktur		dargestellt in
Platzierung	Nr.	Wendeanlagenart	Weichen	Kreuzungen	
STRECKENMITTE, ZWISCHEN HAUPTFAHRGLEISEN, EINE FAHRTRICHTUNG	25	Wendeschleife (1z)	2	0	Abbildung 3.13
	26	Kehranlage (1z)	2	0	Abbildung 3.14
STRECKENMITTE, ZWISCHEN HAUPTFAHRGLEISEN, ZWEI FAHRTRICHTUNGEN	27	Wendeschleife (1z)	4	0	Abbildung 3.13
	28	Kehranlage (1z)	2	0	Abbildung 3.14

Die in Abbildung 3.13 dargestellte Wendeschleife mit Wendegleisen zwischen den beiden Hauptfahrgleisen erlaubt es sowohl Ein- als auch Zweirichtungsfahrzeugen zu wenden. Hierbei ist es jedoch erforderlich, dass beide parallel geführten Hauptfahrgleise im Bereich der Weichen den Mindestabstand von zweimal dem minimalen Bogenradius aufweisen. Liegen die Hauptfahrgleise im Bereich der Wendemöglichkeit so weit voneinander entfernt, dass die Länge des Verbindungsgleises eine Fahrzeuglänge übersteigt, so kann es zudem als Gleis für Ausgleichszeiten genutzt werden, sofern dadurch der übrige Verkehr nicht behindert wird.

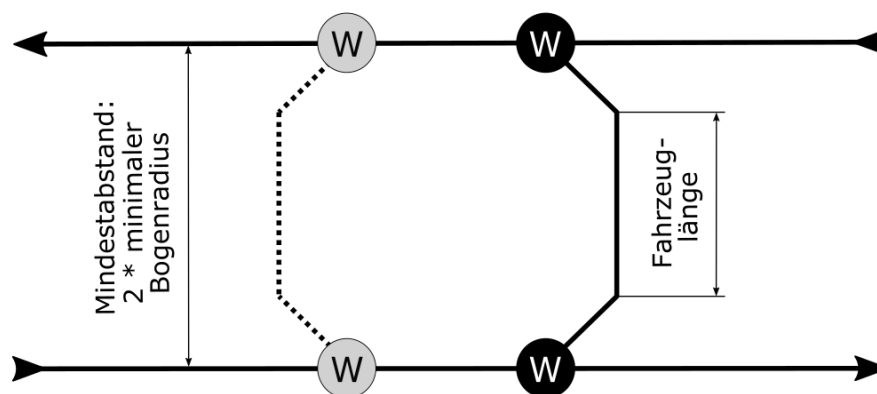


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung einer Wendeschleife zwischen den Hauptfahrgleisen

Der in Abbildung 3.14 dargestellte einfache Gleiswechsel erlaubt es, mit Zweirichtungsfahrzeugen aus beiden Richtungen kommend zu wenden und die Fahrt in die Gegenrichtung fortzusetzen. Werden die Hauptfahrgleise im Bereich des Gleiswechsels gespreizt, so kann das verlängerte Verbindungsgleis als Gleis für Ausgleichszeiten verwendet werden. Dieses muss hierzu frei von sonstigem Verkehr gehalten werden. Bei Rechtsfahrordnung müssen die Weichen aus Abbildung 3.14 im Regelbetrieb nie spitz befahren werden. Folglich sind bei der Geradeausfahrt höhere Geschwindigkeiten zulässig.

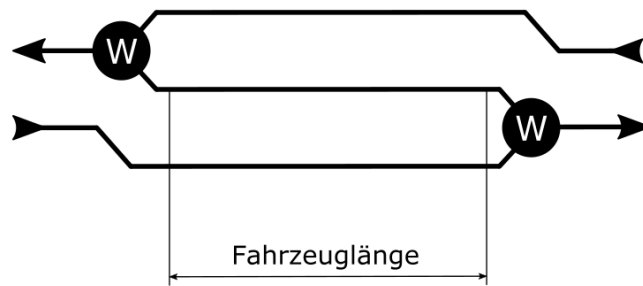


Abbildung 3.14: Schematische Darstellung eines einfachen Gleiswechsels zwischen den Hauptfahrgleisen mit Gleisspreizung und verlängertem Verbindungsgleis für Ausgleichszeiten

Vergleich

In Abbildung 3.15 ist die technisch notwendige Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen je nach Art der zuvor beschriebenen Wendeanlagen grafisch dargestellt. Diese Abbildung lässt erkennen, dass sowohl Wendeschleifen als auch Kehranlagen für Zweirichtungsfahrzeuge am Ende der Gleisinfrastruktur nicht zwingend Kreuzungen erfordern. Grundsätzlich gilt, dass für jedes zusätzliche Wendegleis bei einer Wendeschleife zwei weitere Weichen erforderlich sind, da aufgrund der Durchfahrt ohne Fahrtrichtungswechsel pro Gleis eine Verzweigungs- und Vereinigungsweiche vorhanden sein muss.

In der technisch einfachsten Ausführung einer Kehranlage für Zweirichtungsfahrzeuge am Streckenende (Nr. 5 – Nr. 8) ist für ein weiteres Stumpfgleis daher nur eine weitere Weiche erforderlich, da mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet wird und über dieselbe Weiche in das Stumpfgleis ein- und ausgefahren werden kann. Eine Wendeschleife hingegen erfordert für ein zusätzliches Wendegleis zwei weitere Weichen (Nr. 1 – Nr. 4), wobei bei einem einzelnen Wendegleis keine Weichen erforderlich sind.

Bei Wendeanlagen, die das Wenden von Fahrzeugen von und in einer Fahrtrichtung entlang einer Straßenbahnstrecke neben den Hauptfahrgleisen erlauben, ist bei einem einzelnen Wendegleis die Anzahl an Weichen bei einer Kehranlage für Zweirichtungsfahrzeuge (Nr. 13) höher als bei einer Wendeschleife (Nr. 9). Ab drei erforderlichen Wendegleisen ist hier die Anzahl an Weichen bei Wendeschleifen (Nr. 11) höher als bei einer Kehranlage mit Stumpfgleisen (Nr. 15).

Wendeanlagen entlang einer Straßenbahnstrecke, die für das Wenden neben den Hauptfahrgleisen aus beiden Fahrtrichtungen kommend verwendet werden können, haben in ihrer jeweils einfachsten Ausführung sowohl als Wendeschleife (Nr. 17 – Nr. 20) als auch als Kehranlage für Zweirichtungsfahrzeuge (Nr. 21 – Nr. 24) dieselbe Anzahl an Weichen und Kreuzungen.

Ein zwischen den Hauptfahrgleisen angeordnetes Wendegleis (Nr. 27 und Nr. 28) benötigt in der Ausführung, bei der Zweirichtungsfahrzeuge aus beiden Fahrtrichtungen kommend wenden können, nur zwei Weichen. Dies entspricht der Hälfte an Weichen, die in der Ausführung für Einrichtungsfahrzeuge (Wendeschleife zwischen Hauptfahrgleisen für ein Wenden aus beiden

3 Analyse von Wendeanlagen für Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge

Fahrtrichtungen) notwendig wären. Muss eine Wendeanlage zwischen den Hauptfahrgeleisen nur für Fahrzeuge aus einer Richtung kommend verwendet werden, so ist die Anzahl an Weichen für die Wendeschleife (Nr. 25) gleich hoch wie für eine erforderliche Gleisverbindung (Nr. 26). Über die Gleisverbindung aus Abbildung 3.14 kann jedoch mittels Zweirichtungsfahrzeugen grundsätzlich aus beiden Richtungen kommend gewendet werden.

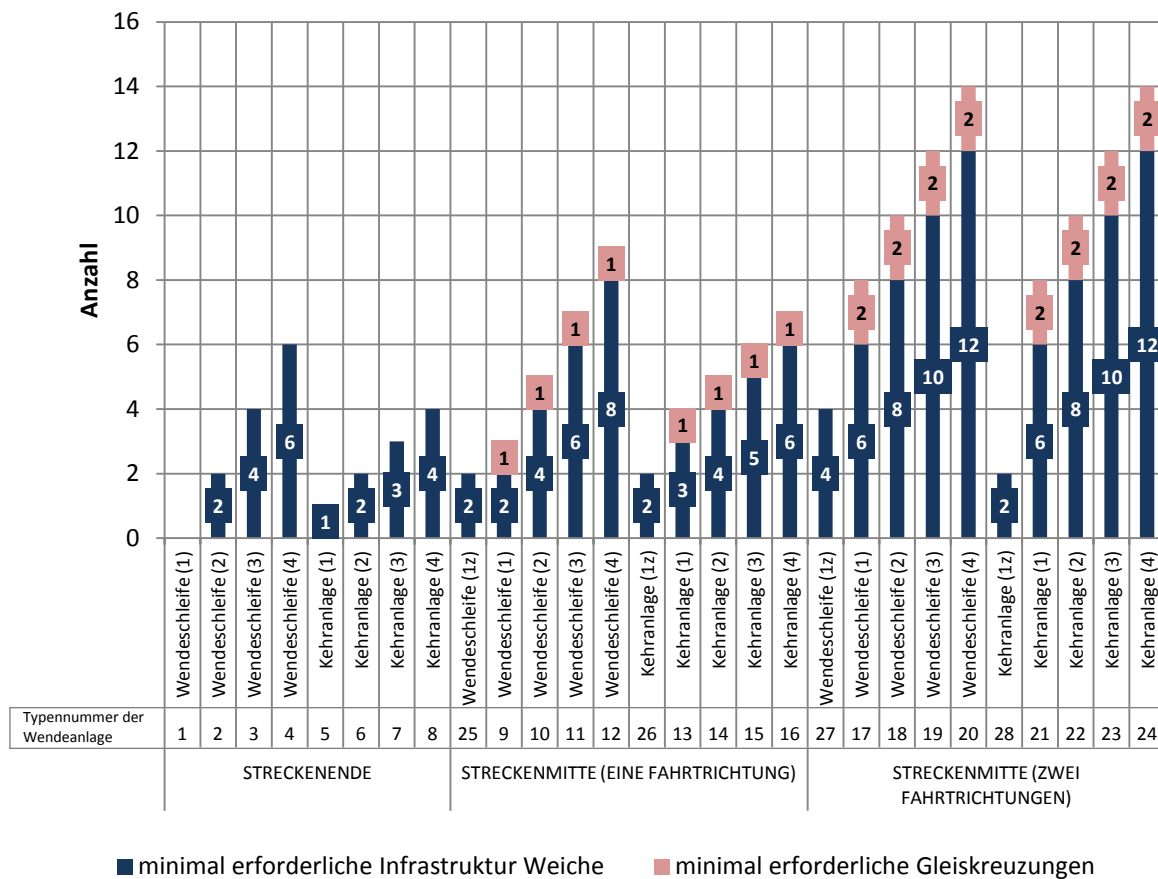


Abbildung 3.15: Anzahl der Weichen und Kreuzungen in Abhängigkeit der Art der Wendeanlage, in Klammer Anzahl an Wendegleisen, Typennummer der Wendeanlage (1 – 28) verweist auf Darstellung in Tabellen

Die Realisierbarkeit unterschiedlicher dispositiver Maßnahmen (siehe Kapitel 4) ist jedenfalls anhand der Wendezeit sowie der auf der Strecke vorhandenen Zugfolgezeit t_{ZF} zu überprüfen.

3.3.4 Fahrzeugauslauf

Die Anzahl an Fahrzeugen, die im Linienbetrieb im Umlauf sein müssen, ergibt sich aus der mittleren Gesamt-Reisezeit auf der Linie von Endhaltestelle zu Endhaltestelle t_{RZ} in eine Fahrtrichtung dividiert durch das Intervall. Nach Kapitel 3.1 müssen zudem die Pausenzeit t_{Pa} , Pufferzeit t_{Pu} , Synchronisationszeit t_{Syn} und Wendezeit t_{WZ} an beiden Endhaltestellen addiert und ebenso durch das Intervall dividiert werden. Untenstehende, empirisch hergeleitete Formel ergibt die notwendige Anzahl an Fahrzeugen X_{FZG} für eine Linie bei vorgegebenen Parametern.

$$X_{FZG} = \frac{2 * t_{RZ} + t_{Pa} + 2 * t_{Pu} + 2 * t_{Syn} + 2 * t_{WZ}}{t_{Int}} \quad (12)$$

Werden Zweirichtungsfahrzeuge nicht über eine Wendeschleife, sondern mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet, so hat Abbildung 3.10 gezeigt, dass sich dieser Umstand sowohl in einer längeren als auch kürzeren Wendezeit auswirken kann.

Beispiel

In Kapitel 3 wurde gezeigt, dass unterschiedliche Ausführungen von Zweirichtungsfahrzeugen bzw. unterschiedliche Wendeschleifenlängen Auswirkung auf die Wendezeit der jeweiligen Fahrzeuge haben. Dieses Beispiel soll den Einfluss von zwei unterschiedlichen Wendezeiten A und B auf die notwendige Anzahl an Fahrzeugen im Umlauf einer Linie verdeutlichen.

Gesamt-Reisezeit pro Fahrtrichtung t_{RZ}	30min
Intervall entlang der Linie t_{Int}	6min
Pausenzeit t_{Pa}	0min
Pufferzeit pro Endhaltestelle t_{Pu}	5min
Synchronisationszeit pro Endhaltestelle t_{Syn}	0min
Wendezeit A pro Endhaltestelle t_{WZ}	1min
Wendezeit B pro Endhaltestelle t_{WZ}	4min

Für Wendezeit A ergibt sich nach Formel 12 ein notwendiger Auslauf X_{FZG} von 12 Fahrzeugen. Wird an beiden Endhaltestellen eine Wendezeit B angenommen, so müssen 13 Fahrzeuge auf der Linie unterwegs sein, um den Linienbetrieb zuverlässig aufrecht erhalten zu können.

4 Analyse dispositiver⁴ Maßnahmen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb

Aufgrund ihrer Spurführung können Straßenbahnsysteme Störeinflüsse weniger flexibel kompensieren als Autobussysteme (Steierwald, 2005, S.600). Um dispositiv in den Betrieb eingreifen zu können, müssen Wendemöglichkeiten entlang einer Linie vorgesehen werden. Bei einem Betrieb mit Zweirichtungsfahrzeugen können Wendemöglichkeiten entweder Gleisverbindungen oder Wendeschleifen sein. Einrichtungsfahrzeuge können im Fahrgastbetrieb nur mittels Befahren von Wendeschleifen kehren. Die erforderliche Zeitdauer, um Fahrzeuge über Wendeschleifen oder Stumpfgleise wenden zu können, wurde in Kapitel 3 in Abhängigkeit der baulichen Infrastruktur gezeigt. Grundsätzlich empfiehlt Rollinger, im Abstand von drei bis vier Haltestellen eine Wendemöglichkeit vorzusehen (Ostermann, Rollinger, 2016, S.159).

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV (Müller-Eberstein, 2001, S.3-35 f.) definiert eine „Betriebsstörung durch Behinderung“ als ein Ereignis, bei dem die Straßenbahn entweder durch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, durch besondere Vorkommnisse (z. B. Feuer), oder durch polizeiliche Maßnahmen an der Weiterfahrt gehindert wird. Bei einer Betriebsstörung infolge eines Unfalls oder Schäden an Fahrzeugen ist die Straßenbahn selbst in den Unfall involviert. Bei länger andauernden, punktuell auftretenden Störungen (z. B. ein im Gleisbereich parkendes Fahrzeug) muss der betroffene Abschnitt der Linie außer Betrieb genommen werden. In diesem Fall spricht man von einer Unterbrechung des Laufweges. Sämtliche Fahrzeuge müssen beidseitig vor der Unterbrechung kurzgewendet werden.

Ein weiterer Störeinfluss kann laut FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2017, S.44) eine Überlastung des Systems infolge einer zu hohen Anzahl an Fahrgästen sein. Dies kann zu Verspätungen auf der betroffenen Linie führen. Dichte Intervalle können in diesem Zusammenhang zusätzlich Pulkbildungen⁵ verursachen (Hartl-Benz, 2017, S.3).

⁴ Disposition bezeichnet die Beeinflussung des Betriebsablaufes auf Grundlage der Erfassung des aktuellen Betriebszustandes (Schnieder, 2018, S.155). Bei auftretenden Störungen soll die Disposition die Auswirkungen einer Störung auf Betrieb und Fahrgäste so gering wie möglich halten. Der Betrieb kann im Falle einer Laufwegunterbrechung, von Verspätungen einzelner Fahrzeuge, etc. so weit wie möglich aufrechterhalten werden.

⁵ Als Pulkbildung bezeichnet man das ungewollte, direkte Hintereinanderfahren zweier oder mehrerer Fahrzeuge derselben Linie (Hartl-Benz, 2017, S.8).

Im Folgenden werden dispositive Maßnahmen dargestellt und in Hinblick auf den Störungsbetrieb mittels Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen analysiert. Sämtliche Formeln dieses Kapitels wurden empirisch aufgestellt.

4.1 Dispositive Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung

Die im Folgenden dargestellten dispositiven Maßnahmen eignen sich für einen Störungsbetrieb bei einer Laufwegunterbrechung. Für die Beschreibung der jeweiligen dispositiven Maßnahme wird jedem Unterkapitel dieselbe Anzahl an Weichen zugrunde gelegt.

4.1.1 Gleiswechselbetrieb

Liegt auf einer zweigleisigen Straßenbahnstrecke eine punktuelle Unterbrechung auf einem Gleis vor, so kann auf dem durchgehend befahrbaren Gleis zwischen zwei Gleisverbindungen ein Gleiswechselbetrieb (GWB) eingerichtet werden.

In Abbildung 4.1 ist ein zweigleisiger Streckenabschnitt mit vier Haltestellen dargestellt. Unmittelbar rechts nach den Haltestellen A und C ist eine Gleisverbindung vorhanden. Auf dem oberen Richtungsgleis liegt eine punktuelle Laufwegunterbrechung vor (rotes Kreuz auf gelbem Hintergrund). Daher werden alle Fahrzeuge beider Fahrtrichtungen zwischen den beiden Gleisverbindungen über das untere Richtungsgleis geführt.

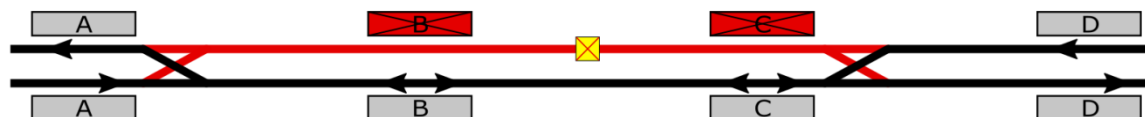


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines Gleiswechselbetriebs

Bei einem Gleiswechselbetrieb ist zu beachten:

- Der betroffene Abschnitt der Straßenbahnstrecke muss leit- und sicherungstechnisch auf einen eingleisigen Betrieb ausgelegt sein.
- Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Die Strecke muss unabhängig von sonstigem Verkehr geführt werden.
- Ein Gleiswechselbetrieb kann sowohl mittels Ein- als auch Zweirichtungsfahrzeugen durchgeführt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass Haltestellen entlang des eingleisig befahrenen Abschnittes nur von Zweirichtungsfahrzeugen in beiden Fahrtrichtungen bedient werden können, da diese Türen an beiden Fahrzeugseiten besitzen. Einrichtungsfahrzeuge können im Bereich des Gleiswechselbetriebs Haltestellen nur bei Fahrt auf ihrem Stammgleis bedienen, da Türen meist nur an einer Fahrzeugseite vorgesehen sind. Die in Abbildung 4.1 dargestellten Haltestellen B und C können daher von Einrichtungsfahrzeugen im dargestellten Gleiswechselbetrieb nur in Fahrtrichtung von links nach rechts bedient werden.

- Der Abstand der Gleisverbindungen zueinander (Fahrtdauer entlang des eingleisigen Abschnitts) bestimmt die minimal mögliche Zugfolgezeit entlang der Strecke.

Im Folgenden ist eine Berechnungsformel angegeben, mit der abgeschätzt werden kann, ob bei vorgegebener Zugfolgezeit t_{ZF} , Anzahl an Haltestellen zwischen zwei Gleisverbindungen H_{GV} und einer durchschnittlichen Reisezeit zwischen zwei Haltestellen (inklusive Haltezeiten) t_{H1H2} ein Gleiswechselbetrieb ohne große Verzögerungen im Betrieb möglich ist. Ergibt sich ein Faktor A kleiner als eins, ist auf der Infrastruktur mit den vorgegebenen Parametern grundsätzlich ein Gleiswechselbetrieb möglich, ohne, dass es zu einem sich aufbauenden Rückstau von Fahrzeugen vor der eingleisigen Strecke kommt.

$$A = \frac{2 * H_{GV} * t_{H1H2}}{t_{ZF}} \leq 1 \quad (13)$$

Ist der Faktor A größer als eins, so gibt A minus eins an, wie viele Fahrzeuge sich im Zeitabstand der Zugfolgezeit vor dem eingleisigen Abschnitt zusätzlich einseitig aufstauen. Formel 13 wird im Folgenden durch ein Beispiel veranschaulicht.

Beispiel

Anzahl an Haltestellen zwischen Gleisverbindungen H_{GV}	2
Reisezeit zwischen zwei Haltestellen t_{H1H2}	2 min
Zugfolgezeit t_{ZF}	4 min

Nach Formel 13 ergibt sich Faktor A zu zwei.

Im Beispiel wird aus $A-1=1$ ersichtlich, dass sich auf jeder Seite des eingleisigen Abschnitts alle vier Minuten ein weiteres Fahrzeug aufstaut. Bei länger andauernden Laufwegunterbrechungen muss daher die Zugfolgezeit vergrößert werden ($A \leq 1$), um einen sich aufbauenden Rückstau zu verhindern.

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Bei einem Rückstau von Fahrzeugen vor dem eingleisig befahrbaren Abschnitt kann es zu Verspätungen kommen. Zudem können Einrichtungsfahrzeuge nur Haltestellen bei Befahren des Stammgleises bedienen. Zweirichtungsfahrzeuge können Haltestellen in beide Richtungen einhalten. Um den Abschnitt der Laufwegunterbrechung durchfahren zu können, ist kein Umsteigen erforderlich.

Wartende Fahrgäste an den Haltestellen B und C des oberen Richtungsgleises in Abbildung 4.1 müssen im Falle eines Gleiswechselbetriebs darüber informiert werden, dass sämtliche Züge beider Fahrtrichtungen von der Haltestelle des zweiten Richtungsgleises abfahren. Es müssen daher geeignete Möglichkeiten zur Querung der Gleise geschaffen werden. Sind die Haltestellen B und C als Haltestellen mit Mittelbahnsteigen ausgeführt, muss der Bahnsteig im Falle eines Gleiswechselbetriebs nicht gewechselt werden.

4.1.2 Betrieb mit Stichfahrten

Wird ein Zweirichtungsfahrzeug an einer Haltestelle mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet, in deren unmittelbarer Umgebung keine Gleisverbindung vorhanden ist, so spricht man von einem Betrieb mit Stichfahrten (BS).

Liegen auf beiden Gleisen versetzte, punktuelle Laufwegunterbrechungen vor, so kann mit derselben Gleisinfrastruktur, wie sie in Abbildung 4.1 dargestellt ist, ein Betrieb mit Stichfahrten eingerichtet werden. Hierbei wird die Linie geteilt geführt.

In Abbildung 4.2 ist ein Betrieb mit Stichfahrten schematisch dargestellt: Der linke Linienast verkehrt am unteren Gleis bis zur Haltestelle C. Der rechte Linienast verkehrt am oberen Gleis ebenfalls bis zur Haltestelle C. Fahrgäste müssen zur Weiterfahrt entlang derselben Linie an der Haltestelle C umsteigen und das Fahrzeug wechseln.

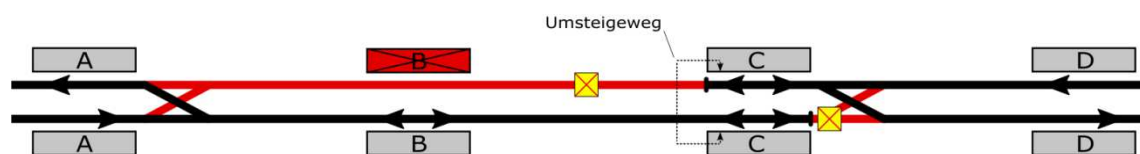


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Betriebs mit Stichfahrten

Bei einem Betrieb mit Stichfahrten ist zu beachten:

- Der betroffene Abschnitt der Straßenbahnstrecke muss leit- und sicherungstechnisch auf einen eingleisigen Betrieb ausgelegt sein.
- Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Die Strecke muss unabhängig von sonstigem Verkehr geführt werden.
- Ein Betrieb mit Stichfahrten kann ausschließlich mit Zweirichtungsfahrzeugen erfolgen, da diese in der temporären Endhaltestelle ihre Fahrtrichtung wechseln müssen.
- Die kleinstmögliche Zugfolgezeit ergibt sich einerseits aus dem Abstand der Gleisverbindungen zueinander, sowie aus der Lage der Umsteigehaltestelle (in Abbildung 4.2: Haltestelle C).

Ergibt sich aus untenstehender Formel 14 mit dem Parameter $H_{H,GV,min}$ (Haltestellenanzahl zwischen temporärer Endhaltestelle und nächstgelegener Gleisverbindung; in Abbildung 4.2 ist dieser Wert gleich null) ein Faktor A kleiner als eins, so ist ein Betrieb mittels Stichfahrten unter Aufrechterhaltung der Zugfolgezeit des Normalbetriebs möglich. Die jeweils längere Stichstrecke bestimmt die kleinstmögliche Zugfolgezeit, da entlang dieser das Hauptfahrgleis länger belegt ist als entlang der kürzeren Stichstrecke. Daher gibt Formel 14 lediglich an, ob entlang der längeren Stichstrecke ein Betrieb ohne Aufstauen von Fahrzeugen (Faktor $A \leq 1$) möglich ist. Dies impliziert, dass auch entlang der kürzeren Stichstrecke der Betrieb ohne Aufstauen von Fahrzeugen aufrechterhalten werden kann.

Bei einem Betrieb mit Stichfahrten wird das Fahrzeug in der Haltestelle gewendet. Daher entfällt bei der Berechnung der Wendezeit die Fahrt in das Stumpfgleis und aus dem Stumpfgleis heraus, weshalb die in Kapitel 3.3.1 beschriebene verkürzte Wendezeit über ein Stumpfgleis $t_{WZ, kurz, SG}$ zur Anwendung kommt.

$$A = \frac{(2 * (H_{GV} - H_{H, GV, min}) * t_{H1H2}) + t_{WZ, kurz, SG}}{t_{ZF}} \leq 1 \quad (14)$$

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Trotz eingleisiger Laufwegunterbrechung können Fahrgäste ihr Ziel im Bereich der Laufwegunterbrechung erreichen. Alle Haltestellen der Linie werden auch im dargestellten Störfall bedient. Wartende Fahrgäste an der oberen Haltestelle B in Abbildung 4.2 müssen bei einem Betrieb mit Stichfahrten darüber informiert werden, dass sämtliche Fahrzeuge in beide Fahrrichtungen vom Bahnsteig des zweiten Richtungsgleises abfahren. Bei Seitenbahnsteigen müssen Fahrgäste beim Umsteigevorgang die Gleise queren. Wird, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, die Haltestelle C als Haltestelle mit Mittelbahnsteig ausgeführt, so kann bei einem Betrieb mit Stichfahrten der Umsteigeweg verkürzt und für Fahrgäste komfortabler und übersichtlicher gestaltet werden. Zudem wird die Sicherheit erhöht, da Fahrgäste bei einem notwendigen Umsteigevorgang keine Gleise queren müssen. Aufgrund des erforderlichen Umsteigevorganges muss eine höhere Reisezeit als im Normalbetrieb in Kauf genommen werden.

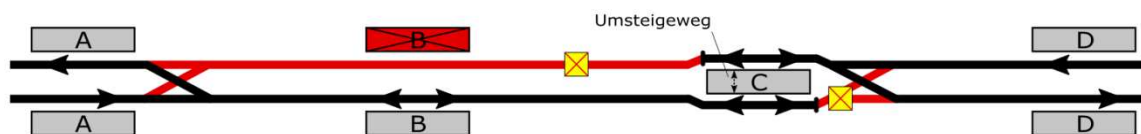


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Betriebs mit Stichfahrten, Ausführung der Umsteigehaltestelle C mit Mittelbahnsteig

Kann aufgrund einer weiteren Laufwegunterbrechung der in Abbildung 4.3 dargestellte rechte Linienast nicht betrieben werden, so ermöglicht eine Stichfahrt entlang des linken Linienastes zumindest die Erschließung der Haltestellen B und C.

4.1.3 Pendelbetrieb als Inselbetrieb

Ist es aufgrund mehrerer punktueller Laufwegunterbrechungen nur möglich einen Inselbetrieb aufrechtzuerhalten, so kann ein Pendelbetrieb (PB) eingerichtet werden. Hierbei fährt ein Fahrzeug zwischen zwei Pendelendstellen auf und ab. Ein Pendelbetrieb ist meist keine kurzfristige dispositive Maßnahme, sondern kann beispielsweise bei geplanten Baustellen einen eingeschränkten Betrieb der Straßenbahn ermöglichen (Schnieder, 2018, S.162).

In Abbildung 4.4 erfolgt der Pendelbetrieb am oberen Gleis zwischen den Haltestellen B und C. In der Haltestelle B wenden am unteren Gleis sämtliche Linienfahrzeuge des linken Linienastes; in der Haltestelle C wenden am unteren Gleis alle Fahrzeuge des rechten Linienastes.

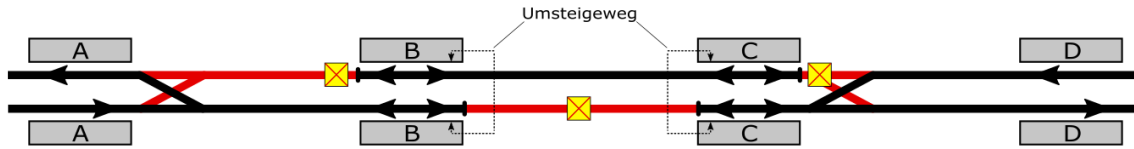


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung eines Pendelbetriebs als Inselbetrieb

Bei einem Pendelbetrieb als Inselbetrieb ist zu beachten:

- Der betroffene Abschnitt der Straßenbahnstrecke muss leit- und sicherungstechnisch auf einen eingleisigen Betrieb ausgelegt sein.
- Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Die Strecke muss unabhängig von sonstigem Verkehr geführt werden.
- Der Betrieb kann nur mittels Zweirichtungsfahrzeugen erfolgen, da alle Fahrzeuge an den Endhaltestellen der Pendelstrecke einen Fahrtrichtungswechsel vornehmen müssen.
- Die minimale Zugfolgezeit auf der Pendelstrecke ist eine Funktion der Pendelstreckenlänge sowie der Wendezeit. Die minimale Zugfolgezeit auf den äußeren Linienästen ist abhängig von der Wendezeit.
- Es ist zu beachten, dass auf der eingleisigen Strecke des Pendelbetriebs nur ein Fahrzeug unterwegs sein kann (vgl. Berliner U-Bahn-Linie U55 (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2015, S.40 f.)).
- Der Pendelbetrieb ist unter Berücksichtigung einer eventuell notwendigen Instandhaltung am Fahrzeug durchzuführen, da das Fahrzeug im Allgemeinen in der Zeit der Bauarbeiten/Streckensperre, etc. keinen Anschluss an das restliche Gleisnetz besitzt.
- Gegebenenfalls müssen Ersatzfahrzeuge am Ende der Pendelstrecke bereitgestellt werden.
- Unter Umständen müssen Fahrzeuge in der betriebslosen Zeit bewacht werden, da sie im Allgemeinen in keinem Betriebsbahnhof abgestellt werden können.

Es wird eine Formel für den Bereich des Pendelverkehrs mit einem Abfahrtsintervall je Richtung ($t_{Int,PB}$) und eine Formel mit der Zugfolgezeit der äußeren Linienäste angegeben. Ist der Faktor A kleiner als eins, kann ein Pendelbetrieb mit den vorgegebenen Parametern eingerichtet werden.

- **Pendelverkehr**

$$A = \frac{2 * H_P * t_{H1H2} + 2 * t_{WZ, kurz, SG}}{t_{Int, PB}} \leq 1 \quad (15)$$

H_p bezeichnet die Anzahl der Haltestellen des Pendelbetriebs ohne Starthaltestelle. Da die Fahrt von und in die Endhaltestelle bereits in die Reisezeit t_{H1H2} eingeht, wird hier – wie bereits in Formel 14 in Kapitel 4.1.2 – nur die verkürzte Wendezeit $t_{WZ, kurz, SG}$ herangezogen.

- **Äußere Linienäste**

Da es sich bei dem Betrieb der äußeren Linienäste um Stichfahrten handelt, kann die minimale Zugfolgezeit anhand von Formel 14 berechnet werden.

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Bei Befahren der abgebildeten Strecke aus Abbildung 4.4 im Pendelbetrieb wird Fahrgästen ein zweimaliges Umsteigen zugemutet. Durch Abstimmung der Anschlussrelationen kann der Zeitverlust dennoch gering gehalten werden. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben, können die Umsteigehaltestellen (in Abbildung 4.4: Haltestellen B und C) als Haltestellen mit Mittelbahnsteig ausgeführt werden. Alternativ zu einem Pendelbetrieb kann ein unterbrochener Bereich mittels eines Schienenersatzverkehrs umfahren werden. Wenn diese Autobusse bis zum Linienende verlängert werden, fällt für Fahrgäste ein zweifaches Umsteigen weg.

4.1.4 Kehrbetrieb bei zweigleisiger Laufwegunterbrechung

Sind zuvor beschriebene dispositive Maßnahmen nicht möglich, müssen Wendemöglichkeiten gesucht werden, die beidseitig nahe der Unterbrechung liegen. Über diese werden sämtliche Fahrzeuge kurzgewendet.

Abbildung 4.5 zeigt einen geteilten Linienbetrieb bei einer zweigleisigen Laufwegunterbrechung. In dieser Abbildung sind als Wendemöglichkeiten Gleisverbindungen vorgesehen, weshalb im hier dargestellten Störungsbetrieb zwingend Zweirichtungsfahrzeuge eingesetzt werden müssen. Mittels der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Stichfahrt mit Zweirichtungsfahrzeugen kann auch an Haltestellen ohne in unmittelbarer Umgebung vorhandene Weichen gewendet werden. Die Abbildung stellt zudem dar, dass im Zweirichtungsbetrieb durch die Möglichkeit von Stichfahrten grundsätzlich an jener Haltestelle gewendet werden kann, die unmittelbar vor der punktuellen Störung liegt. Im betrachteten Störfall bleibt daher eine größtmögliche Anzahl an Haltestellen bedient. Da Fahrzeuge in den Haltestellen C bzw. D abwechselnd am oberen und unteren Gleis einfahren und dort mittels Fahrtrichtungswechsel wenden, schaffen Mittelbahnsteige einen für Fahrgäste übersichtlicheren Betrieb.

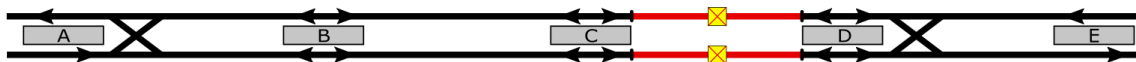


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs mit Zweirichtungsfahrzeugen bei Laufwegunterbrechung

Werden im Betrieb ausschließlich Einrichtungsfahrzeuge eingesetzt, so müssen an definierten Wendepunkten (Wendeschleifen) stets Weichen vorhanden sein. In Abbildung 4.6 ist im Einrichtungsbetrieb ein Kehrbetrieb mit Wendeschleifen aufgrund einer Laufwegunterbrechung

dargestellt. Einrichtungsfahrzeuge müssen jedenfalls an der letzten Wendeschleife vor der Laufwegunterbrechung wenden; ein Betrieb bis zu den Haltestellen C bzw. D ist nicht möglich.

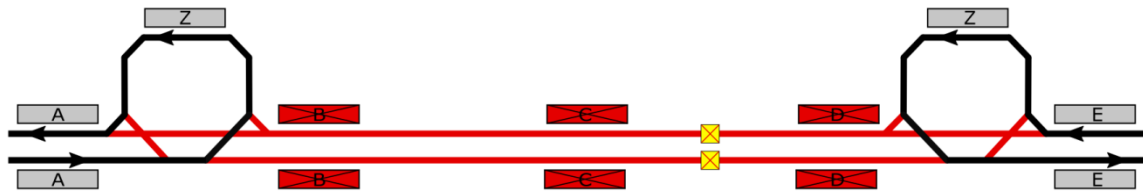


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs mit Einrichtungsfahrzeugen bei Laufwegunterbrechung

Bei einem Kehrbetrieb mit **Einrichtungsfahrzeugen** aufgrund einer Laufwegunterbrechung ist zu beachten:

- An allen potentiellen Wendemöglichkeiten sind Wendeschleifen und daher Weichen erforderlich. Das Gleisschema aus Abbildung 4.6 beinhaltet 12 Weichen und vier Kreuzungen. Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Der Bereich der Haltestelle in der Wendeschleife (Haltestelle Z) muss von sonstigem Verkehr freigehalten werden, wenn eine Synchronisationszeit, Pausenzeit oder Pufferzeit einhalten werden soll (Überholmöglichkeit für andere Verkehrsteilnehmer).

Bei einem Kehrbetrieb mit **Zweirichtungsfahrzeugen** aufgrund einer Laufwegunterbrechung ist zu beachten:

- Es kann über eine Wendeschleife oder eine Gleisverbindung gewendet werden. Bei Stichfahrten können Wendemöglichkeiten auch einige Haltestellen vor/nach einer Gleisverbindung eingerichtet werden. Das Gleisschema aus Abbildung 4.5 enthält acht Weichen und zwei Kreuzungen.
- Bei einem Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel über eine Gleisverbindung muss der betroffene Abschnitt der Straßenbahnstrecke leit- und sicherungstechnisch auf einen eingleisigen Betrieb ausgelegt sein.
- Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Pausen-, Puffer- und Synchronisationszeiten können nur dann eingehalten werden, wenn es die Zugfolgezeit zulässt und die Hauptfahrgleise dadurch nicht blockiert werden.
- Die Strecke muss unabhängig von sonstigem Verkehr geführt werden.

Wird das Wenden über Gleisverbindungen auf den Hauptfahrgleisen mit Zweirichtungsfahrzeugen durchgeführt, ist die Wendezeit mit einer minimal erforderlichen Zugfolgezeit auf der Strecke in Beziehung zu setzen. Die Variable n beschreibt, welche Gleisanzahl zum Wenden verwendet werden kann.

$$A = \frac{t_{WZ,SG}}{t_{ZF} * n} \leq 1 \quad (16)$$

Wird erst nach einer erfolgten Stichfahrt gewendet, muss die verkürzte Wendezeit um die Reisezeit von der Gleisverbindung bis in die temporäre Endhaltestelle erweitert werden. Da in die Reisezeit bereits die Fahrt von und in die Endhaltestelle eingeht, wird – wie bereits in Formel 14 (Kapitel 4.1.2) – die verkürzte Wendezeit $t_{WZ, kurz, SG}$ herangezogen.

$$A = \frac{t_{WZ, kurz, SG} + 2 * t_{RZ}}{t_{ZF} * n} \leq 1 \quad (17)$$

Ein Faktor A kleiner als eins bedeutet, dass in regelmäßigem Zeitabstand ankommende Fahrzeuge vor der temporären Endhaltestelle nicht auf die Einfahrt in die Haltestelle warten müssen.

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Fahrzeuge können den Bereich der Laufwegunterbrechung nicht mehr durchfahren. Für eine Durchquerung des unterbrochenen Abschnitts müssen Fahrgäste auf andere Linien des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) umsteigen. Mittels dieser Linien kann die Unterbrechung umfahren werden. Haltestellen können jedoch bis zur jeweils letzten Wendemöglichkeit beidseitig der Laufwegunterbrechung bedient werden.

4.1.5 Kehrbetrieb mittels Kletterweiche

Bei geplanten Baustellen und Kurzführungen von Linien kann ein Kurzwenden aller Fahrzeuge auch mittels einer Kletterweiche realisiert werden. Kletterweichen sind temporäre Gleisverbindungen und können an jener Stelle eingebaut werden, an der Zweirichtungsfahrzeuge für die Dauer der Kurzführung wenden sollen. Sie werden nach Fertigstellung der Baustelle wieder abgebaut. Bei Kurzführungen aufgrund von Baustellen, Veranstaltungen, etc. kann mittels Kletterweichen und Zweirichtungsfahrzeugen eine möglichst große Anzahl an Haltestellen von der Straßenbahn bedient werden. Im Bereich des Wendepunktes bedarf es hierzu einer geeigneten Leit- und Sicherungstechnik.

Abbildung 4.7 zeigt eine temporäre Endhaltestelle der Straßenbahn der Stadt Bratislava. Die Verkehrsbetriebe richteten im Jahr 2016 mit Hilfe einer Kletterweiche und neu beschaffter Zweirichtungsfahrzeuge, die in Kapitel 2.2 gezeigt wurden, eine temporäre Kurzführung einer Linie ein. Alle Fahrzeuge der Linie 6 wendeten unmittelbar vor einer notwendigen Streckensperre (mhd, 2016). Das rote Kreuz auf gelbem Hintergrund in Abbildung 4.7 zeigt, dass das Befahren entlang des links dargestellten Hauptfahrgleises im Bereich der Kletterweiche nicht mehr möglich ist.



Abbildung 4.7: Kletterweiche im Einsatz beim Straßenbahnbetrieb der Stadt Bratislava (eigene Aufnahme, 2016)

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Durch den Einsatz von Kletterweichen wird es Fahrgästen ermöglicht, mit der Straßenbahn bis unmittelbar vor eine temporäre Laufwegunterbrechung (z. B. Baustelle) zu gelangen. Unter Umständen ist dadurch ein Umstieg in einen Schienenersatzverkehr nicht erforderlich.

4.1.6 Umleitungsfahrt bei Laufwegunterbrechung

Bei einer Laufwegunterbrechung kann – alternativ zu einem Kehrbetrieb – die Linie über eine geeignete Strecke umgeleitet werden. Diese Maßnahme erfordert Gleisverbindungen zwischen den jeweiligen Strecken.

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Bei einer Laufwegunterbrechung können Fahrgäste ohne erforderliches Umsteigen den unterbrochenen Abschnitt der Linie umfahren. Haltestellen zwischen den Abzweigungspunkten der Umleitungsstrecke von der Linienstammstrecke können jedoch nicht bedient werden. Liegt die Umleitungsstrecke nahe an der Stammstrecke, kann die Bedienung des Einzugsbereiches der Haltestellen der Stammstrecke teilweise gewährleistet werden.

4.2 Wirkung dispositiver Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung im Liniennetz und Auswirkung auf die Fahrgäste

Ob bei Laufwegunterbrechung ein Kehrbetrieb oder eine Umleitungsfahrt die geeignete dispositive Maßnahme darstellt, muss für jeden Störfall im Zusammenhang mit dem vorliegenden Liniennetz untersucht werden. In Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.11 ist entlang der unteren Horizontalen eine Straßenbahnlinie dargestellt. Weitere Linien des ÖPNV sind

dunkelgrau gefärbt. Haltestellen sind durch schwarze Punkte markiert. Haltestellen mit Wendemöglichkeit in beide Fahrrichtungen sind zudem mit einem „W“ gekennzeichnet. Wendemöglichkeiten können hier durch Wendeschleifen oder Gleisverbindungen gegeben sein. Kommt es zu einer Unterbrechung des Laufweges, kann der rot strichlierte Abschnitt der Linie zwischen den beiden letzten Wendemöglichkeiten beidseitig der Laufwegunterbrechung nicht mehr betrieben werden.

Als Teil des dargestellten Liniennetzes ist an Platzierung der Wendemöglichkeiten in Abbildung 4.8 nachteilig, dass Fahrgäste im Störfall in eine der beiden vertikal kreuzenden Linien nicht umsteigen können, um die Störung kleinräumig zu umfahren.

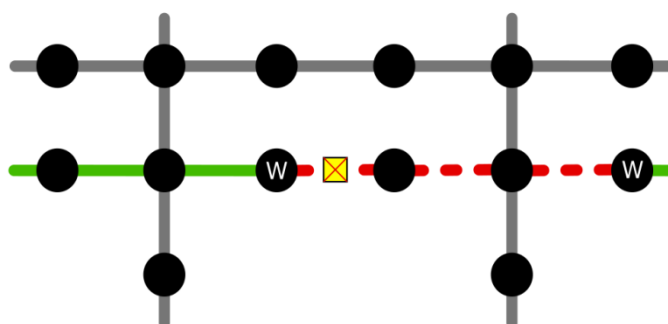


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines geteilten Liniennetzes bei einer Laufwegunterbrechung, Wendemöglichkeiten („W“) an Unterwegshaltestellen

Werden die Wendemöglichkeiten wie in Abbildung 4.9 dargestellt platziert, bleibt im Störfall zwar dieselbe Anzahl an Haltestellen von der Linie nicht bedient, jedoch haben Fahrgäste die Möglichkeit, mittels Umstieg in kreuzende Linien die Störung zu umfahren.

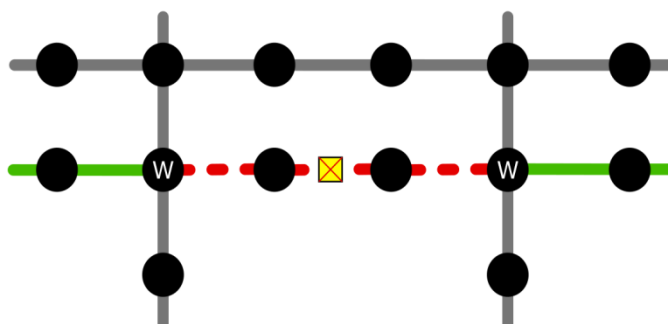


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung eines geteilten Liniennetzes bei einer Laufwegunterbrechung, Wendemöglichkeiten („W“) an Knotenpunkten

Sind die umliegenden, dunkelgrau dargestellten Linien ebenfalls Straßenbahnlinien, so kann die betrachtete Straßenbahnlinie im Falle einer Laufwegunterbrechung umgeleitet werden, sofern zwischen den Strecken Gleisverbindungen vorhanden sind. Die schematische Darstellung einer Umleitungsfahrt zeigt Abbildung 4.10. Es bleibt dieselbe Anzahl an Haltestellen wie beim in Abbildung 4.9 dargestellten Störfallbetrieb nicht bedient. Die Laufwegunterbrechung kann jedoch ohne erforderliche Umsteigevorgänge umfahren werden.

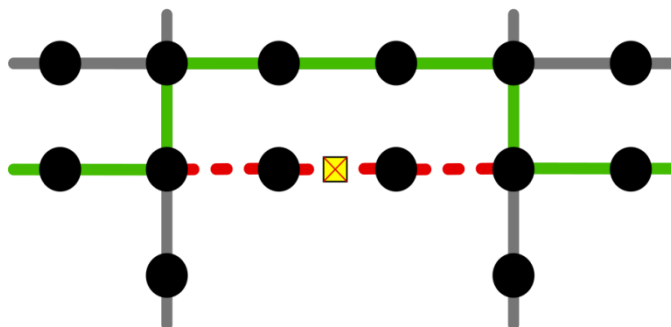


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung einer Umleitungsfahrt bei einer Laufwegunterbrechung

Sind jene Wendemöglichkeiten vorhanden, die in Abbildung 4.11 zu sehen sind, ist Fahrgästen zum einen ein Umstieg an Knotenpunkten zur Umfahrung der Laufwegunterbrechung möglich. Zum anderen ist eine Weiterfahrt – beispielsweise durch eine Stichfahrt mittels Zweirichtungsfahrzeugen – bis unmittelbar vor die Laufwegunterbrechung möglich. Dies kann insbesondere in Gebieten mit einem wenig dichten ÖPNV-Netz von Vorteil sein, da Fahrgästen auch im Störungsbetrieb eine möglichst hohe Zahl an Haltestellen zur Verfügung steht.

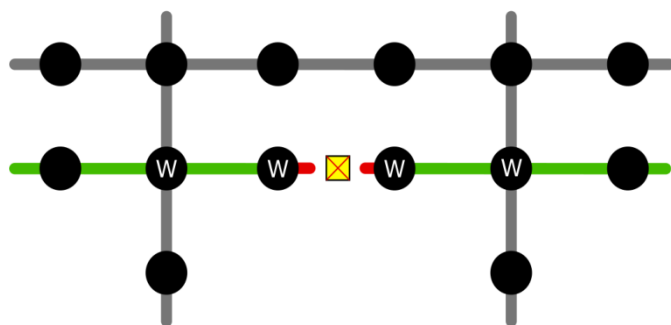


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs bei einer Laufwegunterbrechung, Wendemöglichkeiten („W“) an Knotenpunkten und an Unterwegshaltestellen

Fahrgäste, die sich im Einzugsgebiet einer nicht bedienten Haltestelle befinden oder deren Fahrziel sich in diesem Bereich befindet, müssen auf umliegende Haltestellen des ÖPNV ausweichen. Daher kann es erforderlich sein, im betroffenen Abschnitt einen Schienenersatzverkehr einzurichten. Stichfahrten bis unmittelbar vor das Hindernis oder eine hohe Netzdichte können einen Schienenersatzverkehr überflüssig machen.

4.3 Vergleich der dispositiven Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung

Sämtliche zuvor beschriebenen dispositiven Maßnahmen werden nun miteinander verglichen. Tabelle 4.1 zeigt, dass im Falle einer eingleisigen Laufwegunterbrechung ein Gleiswechselbetrieb die geringsten Auswirkungen für den Fahrgast bedeutet, da keine Umsteigevorgänge notwendig sind und die gewünschte Linie befahren wird. Wird der Gleiswechselbetrieb mit Einrichtungsfahrzeugen ausgeführt, so können, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, Haltestellen im

4 Analyse dispositiver Maßnahmen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb

Bereich des Gleiswechselbetriebs nur in einer Fahrtrichtung eingehalten werden, sofern keine Behelfsbahnsteige vorhanden sind.

Umleitungsfahrten erfordern zwar keine Umsteigevorgänge der Fahrgäste, jedoch werden abschnittsweise andere Linien befahren und daher nicht alle Haltestellen entlang der Stammlinie bedient. Die Reisezeit kann sich für Fahrgäste, die ihr Fahrziel jenseits der Laufwegunterbrechung haben, bei Umleitungsfahrten gegenüber dem Gleiswechselbetrieb erhöhen.

Bei einem Betrieb mit Stichfahrten oder einem Pendelbetrieb müssen aus zuvor beschriebenen Gründen Zweirichtungsfahrzeuge eingesetzt werden. Die Anzahl an notwendigen Umsteigevorgängen für den Fahrgast ist hier meist kleiner verglichen mit einem Kehrbetrieb, bei dem auf Streckenabschnitte anderer Linien des ÖPNV ausgewichen und die Störung umfahren werden muss.

Tabelle 4.1: Einsatzmöglichkeiten und Auswirkungen von dispositiven Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung in Bezug auf Ein- und Zweirichtungsbetrieb

Dispositive Maßnahme bei Laufwegunterbrechung	Durchführung mit		Strecke unabhängig von sonstigem Verkehr	Anzahl an Umsteigevorgängen (Fahrziel jenseits der Laufwegunterbrechung)
	Einrichtungsfahrzeugen	Zweirichtungsfahrzeugen		
Umleitungsfahrt	ja	ja	nein	0
Gleiswechselbetrieb	ja (Unterwegshalte nur in eine Fahrtrichtung)	ja	ja	0
Betrieb mit Stichfahrten	nein	ja	ja	1
Pendelbetrieb als Inselbetrieb	nein	ja	ja	2
Kehrbetrieb bei Laufwegunterbrechung	ja (Wendeschleife)	ja (Wendeschleife oder Gleisverbindung)	ER: nein ZR: abhängig von Wendepunkt	≥ 2

Zusammenfassend ist ersichtlich, dass alle dargestellten dispositiven Maßnahmen mit Zweirichtungsfahrzeugen durchgeführt werden können. Für alle dispositiven Maßnahmen, die ausschließlich im Zweirichtungsbetrieb erfolgen können, muss die Strecke unabhängig von sonstigem Verkehr geführt werden. Einrichtungsfahrzeuge bringen Einschränkungen in der Disposition mit sich, da sie nicht für alle Dispositionsmaßnahmen eingesetzt werden können. Bei einer vorliegenden Störung muss unter Berücksichtigung des Liniennetzes und der zugrundeliegenden Betriebsform (Ein- oder Zweirichtungsbetrieb) eine geeignete Maßnahme getroffen werden.

4.4 Kurzwenden einzelner Fahrzeuge bei Verspätungen

Nicht nur Laufwegunterbrechungen können den Betrieb einer Linie beeinträchtigen, sondern auch verspätete Fahrzeuge. Verspätungen und Pulkbildungen jeglicher Ursache können unter anderem dadurch behoben werden, indem ausgewählte Fahrzeuge kurzgewendet werden. Unter „Disposition ohne Ersatzfahrzeuge“ versteht man nach Schnieder ein Kurzwenden von verspäteten Fahrzeugen vor der eigentlichen Endhaltestelle. Die verspäteten Fahrzeuge können von dort pünktlich in die Gegenrichtung verkehren (Schnieder, 2018, S.171 f.). Dazu werden die zuvor beschriebenen Wendemöglichkeiten unter Beachtung der genannten Voraussetzungen bei einem Ein- oder Zweirichtungsbetrieb genutzt.

Ein Wenden auf den Hauptfahrgleisen mittels Zweirichtungsfahrzeugen und Gleisverbindungen kann nur dann durchgeführt werden, wenn Fahrzeuge in der Gegenrichtung bzw. Folgefahrzeuge durch den Wendevorgang nicht an der Weiterfahrt gehindert werden.

Die optimale Lage der letzten Wendemöglichkeit (Anzahl der Stationen N vor dem Linienende) kann mit Hilfe der statistischen Verteilung der Fahrzeugverspätungen der Fahrzeuge einer Linie berechnet werden. Soll eine in der Verteilung häufig auftretende Verspätung $t_{Vers,FZG}$ in der Gegenrichtung abgebaut werden, kann die Lage eines Wendepunktes wie folgt berechnet werden:

$$N = \frac{t_{Vers,FZG} + t_{WZ,delta} - t_{Pu} - t_{Pa} - t_{Syn}}{2 * t_{H1H2}} \quad (18)$$

Zur Berechnung wird zudem die Zeitdifferenz $t_{WZ,delta}$ benötigt, die ausdrückt, ob das Kurzwenden mehr (positiver Wert) oder weniger (negativer Wert) Zeit in Anspruch nimmt, als ein Wenden in der Linienendhaltestelle. Beispielsweise kann das Kurzwenden eines Zweirichtungsfahrzeuges mittels Fahrtrichtungswechsel fünf Minuten benötigen. An der Linienendhaltestelle wird jedoch eine Wendeschleife mit einer Wendezeit von einer Minute befahren. Die positive Zeitdifferenz $t_{WZ,delta}$ würde in diesem Fall vier Minuten betragen.

Auswirkungen auf die Fahrgäste

Fahrgästen eines kurzgewendeten Zuges wird ein Umstieg in den Folgezug zugemutet. Das Intervall entlang der Linien ist maßgebend dafür, wie lange Fahrgäste auf den Folgezug warten müssen. Bei Radial- und Durchmesserlinien nimmt die Fahrgastbelegung in Richtung Endhaltestelle meist ab. Je näher die Wendemöglichkeit für ein Kurzwenden verspäteter Fahrzeuge an der Linienendhaltestelle liegt, umso weniger Fahrgäste sind daher im Allgemeinen von der Kurzwende betroffen.

4.5 Rahmenbedingungen für die Umsetzung dispositiver Maßnahmen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb

Welche Voraussetzungen bei den oben beschriebenen dispositiven Maßnahmen beachtet werden müssen, zeigen folgende Punkte:

- **Wendeschleifen möglichst nahe beieinander vorsehen**
Nutzen bei folgenden dispositiven Maßnahmen:
 - **Kehrbetrieb bei Laufwegunterbrechung (E⁶, Z⁷):** möglichst wenige Haltestellen bleiben im Falle einer Laufwegunterbrechung nicht bedient.
 - **Kehren verspäteter Fahrzeuge (E, Z):** gezieltes Kurzwenden möglichst nahe vor der Endhaltestelle. Möglichst wenige Haltestellen bleiben vom kurzgewendeten Kurs einer Linie nicht bedient.

- **Gleisverbindungen möglichst nahe beieinander vorsehen**
Nutzen bei folgenden dispositiven Maßnahmen:
 - **Gleiswechselbetrieb (E, Z), Betrieb mit Stichfahrten (Z), Pendelbetrieb (Z):** dichtere Zugfolgezeiten möglich (kein Aufstauen an Fahrzeugen)
 - **Kehrbetrieb bei Laufwegunterbrechung (Z):** dichtere Zugfolgezeiten im Falle einer zweigleisigen Laufwegunterbrechung möglich
 - **Kehren verspäteter Fahrzeuge (Z):** gezieltes Kurzwenden möglichst nahe vor der Endhaltestelle, möglichst wenige Haltestellen bleiben vom kurzgewendeten Kurs einer Linie nicht bedient

- **Wendeschleifen an Umsteigeknoten anordnen**
Nutzen bei folgenden dispositiven Maßnahmen:
 - **Kehrbetrieb bei Laufwegunterbrechung (E, Z):** Fahrgäste können bei einer Laufwegunterbrechung den unterbrochenen Abschnitt durch Umsteigen auf andere Linien des ÖPNV umfahren.
 - **Kehren verspäteter Fahrzeuge (E, Z):** Fahrgäste haben die Möglichkeit, entweder auf das Folgefahrgeschäft derselben Linie zu warten, oder in andere Linien des ÖPNV umzusteigen.

- **Gleisverbindungen an Umsteigeknoten anordnen**
Nutzen bei folgenden dispositiven Maßnahmen:
 - **Gleiswechselbetrieb (E, Z), Betrieb mit Stichfahrten (Z):** Bei einem Rückstau an Fahrzeugen können Fahrgäste auf andere Linien des ÖPNV ausweichen.
 - **Pendelbetrieb (Z):** Endet der Pendelbetrieb an einem Umsteigeknoten, können Fahrgäste auch auf andere Linien des ÖPNV ausweichen.
 - **Kehrbetrieb bei Laufwegunterbrechung (Z):** kürzere Zugfolgezeiten möglich, da keine Stichfahrten erforderlich sind

⁶ Dispositive Maßnahme mit Einrichtungsfahrzeugen möglich

⁷ Dispositive Maßnahme mit Zweirichtungsfahrzeugen möglich

- **Kehren verspäteter Fahrzeuge (Z):** Fahrgäste haben die Möglichkeit, entweder auf das Folgefahrzeug derselben Linie zu warten, oder in andere Linien des ÖPNV umzusteigen.
- **Gleisbereich im gesamten Bereich zwischen sowie vor/nach Gleisverbindungen frei von sonstigem Verkehr (E, Z)**

Eine Strecke, die zwischen zwei Gleisverbindungen frei von sonstigem Verkehr ist, ist eine notwendige Bedingung für die Umsetzung der dispositiven Maßnahmen *Gleiswechselbetrieb*, *Betrieb mit Stichfahrten* und *Pendelbetrieb*.
- **Gleisbereich unmittelbar vor und nach Gleisverbindungen frei von sonstigem Verkehr (Z)**

Wird nur der Bereich im Bereich von Gleisverbindungen von sonstigem Verkehr freigehalten, kann mittels Zweirichtungsfahrzeugen über diese Gleisverbindungen ausschließlich gewendet werden.
- **Bahnsteige im Bereich von möglichem Pendelbetrieb, Betrieb mit Stichfahrten, Gleiswechselbetrieb und Kehrbetrieb als Mittelbahnsteige ausführen (Z)**

Müssen aufgrund einer Laufwegunterbrechung alle Fahrzeuge kurzgewendet werden, kann der Betrieb für Fahrgäste mittels Mittelbahnsteigen übersichtlicher gestaltet werden, wenn Fahrzeuge in der temporären Endhaltestelle abwechselnd auf beiden Hauptfahrgleisen einfahren und dort mittels Fahrtrichtungswechsel wenden. Bei dispositiven Maßnahmen, die ein Umsteigen der Fahrgäste erfordern (z. B. Stichfahrt), wird der Umsteigeweg über einen Mittelbahnsteig für Fahrgäste verkürzt und sicher gestaltet. Durch einen verkürzten Umsteigeweg kann der Zeitbedarf für das Umsteigen verringert werden. Abbildung 4.12 zeigt den erforderlichen Umsteigeweg von Fahrgästen an Haltestellen mit Seitenbahnsteigen bei einem Betrieb mittels Stichfahrten. Die Länge und Dauer des Umsteigeweges für Fahrgäste bei Seitenbahnsteigen ist unter anderem von folgenden Punkten abhängig:

 - Versetzte Bahnsteige/gegenüberliegende Bahnsteige
 - Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA) zur Querung der Gleise
 - Bahnsteighöhe (erforderliche Rampenlänge)
 - Bahnsteiglänge

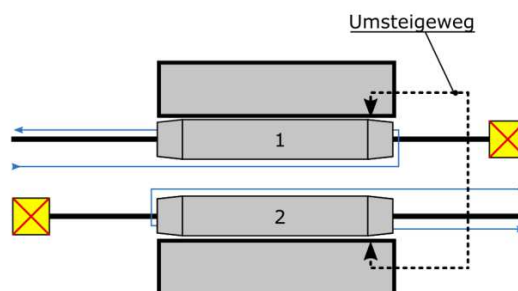


Abbildung 4.12: Schematische Detaildarstellung einer Stichfahrt an einer Haltestelle mit Seitenbahnsteigen

- **Zusätzliche Ausstiegshaltestellen vor der Gleisverbindung vorsehen**

Können Fahrzeuge bei Laufwegunterbrechungen aufgrund unregelmäßiger Intervalle noch nicht in die temporäre Endhaltestelle einfahren, da diese von wendenden Fahrzeugen belegt ist, kann es Fahrgästen dennoch ermöglicht werden, an einer Ausstiegshaltestelle vor der Gleisverbindung auszusteigen. Diese Ausstiegshaltestelle wird nur bei Bedarf genutzt und kann – je nach Zugfolgezeit entlang der Strecke – als Einfach- oder Doppelhaltestelle ausgeführt werden.

Den möglichen Bedarf einer Ausstiegshaltestelle zeigt Abbildung 4.13. Fahrzeug 1 beendet den Wendevorgang und fährt aus der temporären Endhaltestelle aus. Fahrzeug 2 ist soeben in diese Haltestelle eingefahren. Aufgrund von Pulkbildung folgt Fahrzeug 3 unmittelbar auf Fahrzeug 2. Fahrzeug 3 kann Fahrgästen daher in der Ausstiegshaltestelle ein Aussteigen ermöglichen.

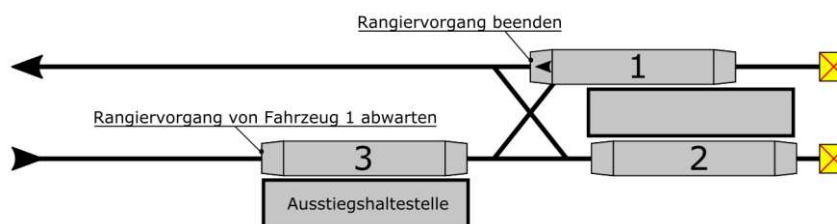


Abbildung 4.13: Schematische Detaildarstellung eines Kehrbetriebs bei Laufwegunterbrechung, Endhaltestelle mit Ausstiegshaltestelle

Nutzen bei dispositiven Maßnahmen:

- **Gleiswechselbetrieb (E, Z), Betrieb mit Stichfahrten (Z), Pendelbetrieb (Z), Kehrbetrieb bei Laufwegunterbrechung über Hauptfahrgleise (Z):** Bei einem Rückstau an Fahrzeugen vor der Gleisverbindung wird Fahrgästen ein Aussteigen ermöglicht.
- **Kehren verspäteter Fahrzeuge über Hauptfahrgleise (Z):** Muss ein Fahrzeug aus dispositiven Gründen (z.B. Gegengleis ist noch nicht frei) vor der Gleisverbindung warten, wird allen Fahrgästen ein vorzeitiges Aussteigen ermöglicht.

Der bauliche Aufwand der beschriebenen Maßnahmen ist von der Lage der jeweiligen Strecke (Oberflächenverkehr, Tunnel) abhängig.

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

Zuvor erforschte Grundlagen eines Zweirichtungsbetriebs werden in diesem Kapitel auf den Wiener Straßenbahnbetrieb angewandt. Dazu werden die Straßenbahnlinien 26, 9 und 49 der Wiener Linien in Bezug auf einen möglichen Zweirichtungsbetrieb auf unterschiedliche Parameter hin untersucht. Jeweils zusammenfassend wird erläutert, ob sich die untersuchte Linie aufgrund betrieblicher oder ökonomischer Vorteile für einen Zweirichtungsbetrieb eignet. Derzeit verkehren im Wiener Straßenbahnnetz im Fahrgastbetrieb ausschließlich Einrichtungsfahrzeuge. Alle angestellten Betrachtungen beziehen sich auf Mai 2020.

5.1 Linie 26

In Kapitel 4.2 wurde gezeigt, dass Umleitungsfahrten entlang von Abschnitten anderer Linien das Wenden von Fahrzeugen vor Laufwegunterbrechungen überflüssig machen können. Die Straßenbahnlinie 26 der Wiener Linien, die entlang von etwa 12 Kilometern größtenteils Gebiete mit mehrgeschossigen Wohnbauten sowie Industrie- und Gewerbegebiete in peripherer Lage erschließt, besitzt entlang ihres Streckenverlaufes nur eine Umleitungsmöglichkeit. Zudem stellt die Linie eine wichtige tangentielle Verbindung zwischen der U- und Schnellbahnstation *Florisdorf*, der U-Bahnstation *Kagraner Platz* sowie der U-Bahnstation *Hausfeldstraße* dar. In Abbildung 5.1 ist die Linie 26 mit weiteren Straßenbahnlinien sowie U- und S-Bahnstrecken dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind in diesen Abbildungen nur ausgewählte Haltestellen beschriftet.

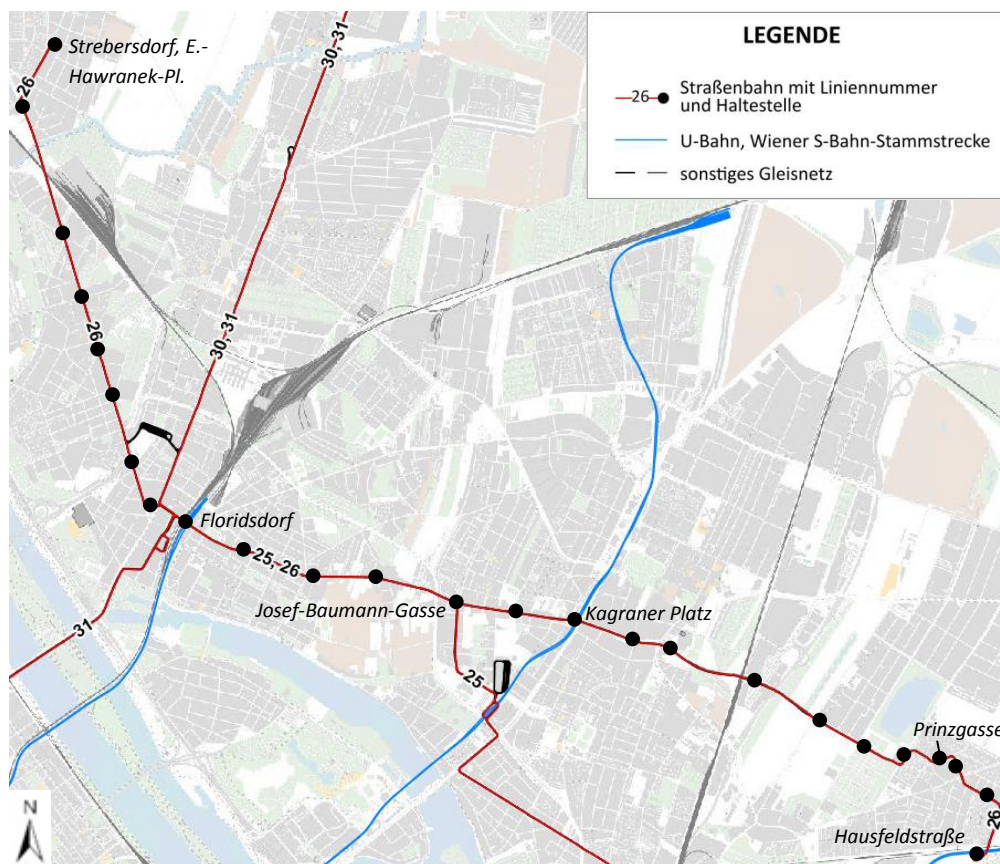


Abbildung 5.1: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 26 (Quelle: Wiener Linien)

In Abbildung 5.2 ist der aktuelle Linienverlauf inklusive aller Kurzführungs- und Umleitungsmöglichkeiten dargestellt. Der Hauptfahrweg ist als breite Linie dargestellt. Die dispositiven Maßnahmen einer Kurzwende oder Umleitungsfahrt sind mittels dünner Linien dargestellt, wobei dadurch nicht die Lage der Gleisverbindungen dargestellt wird. Ein Kurzwenden im Bereich des Betriebsbahnhofes *Floridsdorf* erfolgt stets ohne Fahrgäste.

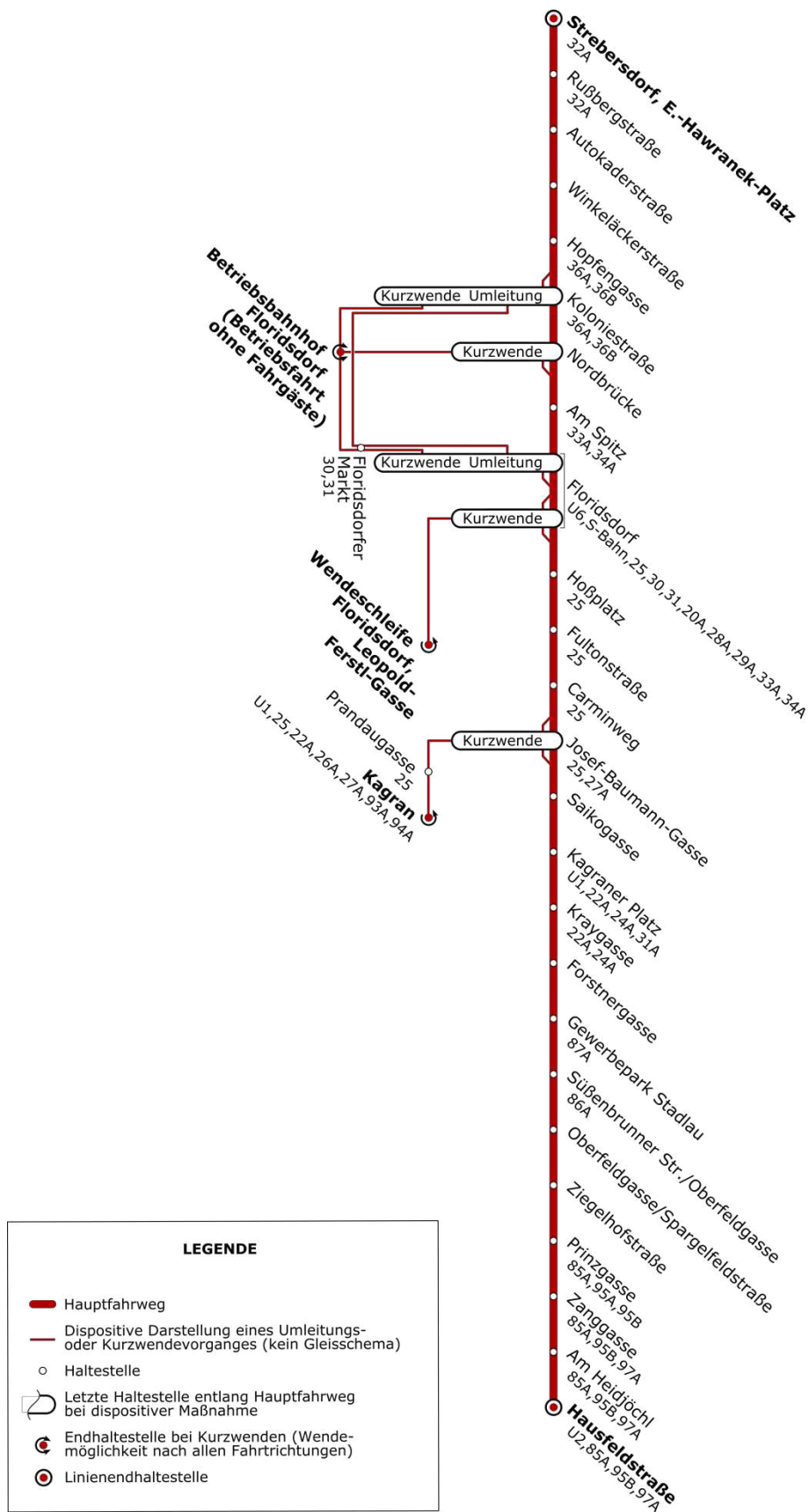


Abbildung 5.2: Linienverlauf der Wiener Straßenbahnlinie 26 inklusive aller derzeitigen Dispositionsmöglichkeiten

Aus Abbildung 5.2 können folgende betriebliche Erschwernisse entlang der Linie 26 abgeleitet werden:

- **Unzureichende Wendemöglichkeiten für das Kurzwenden von Fahrzeugen**
Zwischen der Haltestelle *Josef-Baumann-Gasse* und der östlichen Endhaltestelle *Hausfeldstraße* ist entlang von elf Haltestellen keine Wendemöglichkeit vorhanden. Dies entspricht der drei- bis vierfachen empfohlenen Distanz zwischen zwei Wendemöglichkeiten (Ostermann, Rollinger, 2016, S.159). In diesem Bereich kann dispositiv mittels der in Kapitel 4 beschriebenen Maßnahmen nicht eingegriffen werden. Fahrzeuge in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* können zuletzt bei der Haltestelle *Josef-Baumann-Gasse* kurzgewendet werden.
- **Betrieblich ungeeignete Positionierung der vorhandenen Wendemöglichkeiten**
Zwischenwendemöglichkeiten sind an jener Stelle zu positionieren, an der zum einen bei einer Laufwegunterbrechung in andere Linien des ÖPNV umgestiegen werden kann. Zum anderen sollen durch die Position einer Wendeanlage im Linienverlauf gehäufte Verspätungen durch ein Kurzwenden möglichst exakt eliminiert werden. In diesem Kapitel wird u.a. gezeigt, dass für verspätete Fahrzeuge, insbesondere in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße*, keine geeignete Kurzwendemöglichkeit vorhanden ist.
- **Lange Wendeschleifenfahrten**
Eine Kurzführung bis zur Haltestelle *Josef-Baumann-Gasse* beinhaltet eine etwa 2,2 Kilometer lange Wendeschleifenfahrt bis zur Haltestelle Kagran. Zum einen ermöglicht diese Wendeschleifenfahrt einen Kehrbetrieb bei einer Laufwegunterbrechung (Kapitel 4.1.4). In diesem Fall wird Fahrgästen in der Station *Kagran* ein Umsteigen in die U-Bahnlinie U1 sowie in weitere Linien des ÖPNV ermöglicht. Zum anderen kann die Wendeschleife für das Kurzwenden stark verspäteter Fahrzeuge verwendet werden (Kapitel 4.4). Hierbei dient die Wendeschleifenfahrt ausschließlich dem Wenden des Fahrzeuges. Aufgrund der Wendeschleifenlänge von 2,2 Kilometern ist diese Wendeschleife für das Kurzwenden verspäteter Fahrzeuge nicht geeignet, da das gewendete Fahrzeug für die Dauer der Wendeschleifenfahrt den Fahrgästen der Linie 26 nicht zur Verfügung steht. In weiterer Folge wird gezeigt, dass ein Kurzwenden an der Haltestelle *Josef-Baumann-Gasse* für derzeit gehäuft auftretende Verspätungen eine dispositive Maßnahme ohne überwiegende Vorteile darstellt.
- **Wenige Umleitungsmöglichkeiten**
Lokale Umleitungsmöglichkeiten entlang anderer Straßenbahnlinien können dispositive Maßnahmen wie beispielsweise einen Kehrbetrieb oder eine Stichfahrt überflüssig machen. Da die Linie 26 nur eine Umleitungsmöglichkeit besitzt, schaffen dispositive Maßnahmen im Zweirichtungsbetrieb zusätzliche Möglichkeiten in der Disposition.

Disponenten wird es durch u.a. Wende- und Umleitungsmöglichkeiten ermöglicht, bei Laufwegunterbrechungen, Verspätungen von Fahrzeugen, etc. steuernd in den Betriebsablauf

eingreifen. Anhand von Abbildung 5.3 wird gezeigt, dass entlang der gesamten Linie 26 ein Bedarf an dispositiven Möglichkeiten besteht. In einer Heatmap⁸ sind kumulierte Aufenthalte aller Kurse der Linie 26 infolge Laufwegunterbrechungen jeglicher Art vom 01.09.2018 bis zum 31.08.2019 mit einer Aufenthaltsdauer von jeweils größer als drei Minuten pro Kurs und Standort veranschaulicht. Streckenabschnitte mit hohen kumulierten Aufenthaltsdauern befinden sich

- zwischen den Haltestellen *Strebersdorf*, *E.-Hawranek-Platz* und *Rußbergstraße*,
- zwischen den Haltestellen *Hopfengasse* und *Koloniestraße*,
- zwischen den Haltestellen *Am Spitz* und *Floridsdorf*,
- um die Haltestelle *Kagrner Platz*, sowie
- im Haltestellenbereich *Am Heidjöchl*.

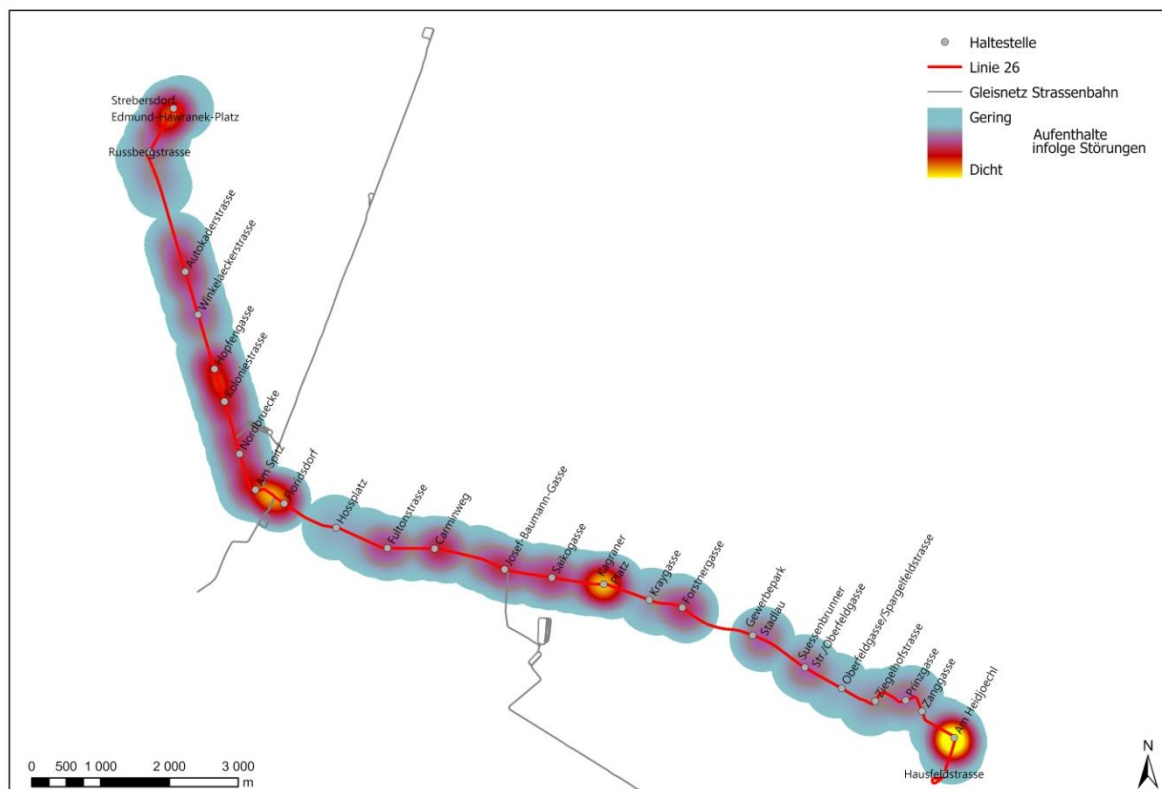


Abbildung 5.3: Heatmap der kumulierten Aufenthalte größer drei Minuten infolge einer Betriebsstörung aller Kurse der Linie 26 (Erhebungszeitraum: 01.09.2018 – 31.08.2019, Datenquelle: Wiener Linien)

Im Folgenden sollen nicht die Ursachen für diese Laufwegunterbrechungen untersucht werden, sondern die zusätzlichen Möglichkeiten durch einen Zweirichtungsbetrieb, bei Abweichungen vom Regelbetriebszustand einen für Fahrgäste möglichst uneingeschränkten Betrieb bereitstellen zu können. Abbildung 5.3 verdeutlicht in diesem Zusammenhang, dass auch entlang von Abschnitten der Linie 26, in denen zurzeit keinen dispositiven Eingriffsmöglichkeiten vorhanden sind, ein erhöhter Bedarf an Dispositionsmaßnahmen besteht.

⁸ Eine Heatmap stellt lagespezifisch kumulierte Häufigkeiten farblich dar.

5.1.1 Gleis- und Haltestellenschema für einen Zweirichtungsbetrieb

Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, können die dispositiven Maßnahmen *Betrieb mit Stichfahrten* und *Pendelbetrieb* nur im Zweirichtungsbetrieb und entlang von Streckenabschnitten angewandt werden, die frei von sonstigem Verkehr sind. In weiterer Folge werden diese Streckenabschnitte als „selbstständiger Gleiskörper“ bezeichnet. Auch ein Gleiswechselbetrieb kann nur entlang eines selbstständigen Gleiskörpers erfolgen. Sollen im Gleiswechselbetrieb Haltestellen in beide Richtungen bedient werden, sind auch hier Zweirichtungsfahrzeuge erforderlich. Mittels der genannten dispositiven Maßnahmen kann bei punktuellen Laufwegunterbrechungen die Haltestellenerschließung erhöht werden. Entlang von Abschnitten der Linie 26, die als selbstständiger Gleiskörper ausgeführt werden können, werden daher Gleisverbindungen vorgesehen, mittels derer – in Kombination mit einem entsprechenden Leit- und Sicherungssystem – neue dispositive Maßnahmen möglich sind (die Abkürzungen beziehen sich auf Abbildung 5.4). In der Darstellung dispositiver Maßnahmen wird eine mögliche Umleitungsfahrt bei Laufwegunterbrechung zwischen den Haltestellen *Koloniestraße* und *Floridsdorf* nicht berücksichtigt, da die dispositive Maßnahme der Umleitungsfahrt nicht durch einen Zweirichtungsbetrieb, sondern durch eine Verdichtung des Gleisnetzes ermöglicht wird.

- *BS*: Betrieb mit Stichfahrt
- *KF*: Kurzwendemöglichkeit mittels Fahrtrichtungswechsel unmittelbar nach einer Gleisverbindung
- *KS*: Kurzwendemöglichkeit mittels Fahrtrichtungswechsel nach einer Stichfahrt
- *GWB*: Gleiswechselbetrieb
- *PB*: Pendelbetrieb

Kurzwenden über Wendeschleifen ist eine weitere mögliche dispositive Maßnahme, die bereits im Einrichtungsbetrieb eingesetzt wird:

- *WS*: Kurzwendemöglichkeit mittels Wendeschleifenfahrt

Abbildung 5.4 stellt die Änderungen im Gleis- und Haltestellenschema gegenüber dem derzeit vorhandenen schematisch dar. Grau hinterlegte Gleisbereiche sind bereits als selbstständiger Gleiskörper ausgeführt. Rot hinterlegte Gleisbereiche müssen für den dargestellten Zweirichtungsbetrieb zur Gänze von sonstigem Verkehr freigehalten werden. Rot dargestellte Gleisverbindungen und Gleisanlagen sind neu zu errichten. Haltestellen, die als Mittelbahnsteige auszuführen sind, sind rot hervorgehoben. In diesem Zusammenhang wird nicht näher auf eine geänderte Trassierung im Bereich der neu zu errichtenden Mittelbahnsteige eingegangen. Beispielsweise können die jeweiligen Gleisabschnitte am Ende ihrer Lebensdauer unter Berücksichtigung der gezeigten Randbedingungen neu trassiert werden.

Durch die dargestellte Anordnung der Wendemöglichkeiten wird es Fahrgästen bei einem geteilten Linienbetrieb ermöglicht, mittels anderer Linien des ÖPNV die Störung kleinräumig zu umfahren. Diese Umleitungsmöglichkeiten sind unterhalb des Linienverlaufes der Linie 26 dargestellt. Sämtliche Dispositionsmöglichkeiten, die sich durch das gezeigte Konzept im

Zweirichtungsbetrieb ergeben, sind blau hinterlegt dargestellt. Im Folgenden werden die Änderungen – in vier Linienabschnitte unterteilt – detailliert beschrieben.

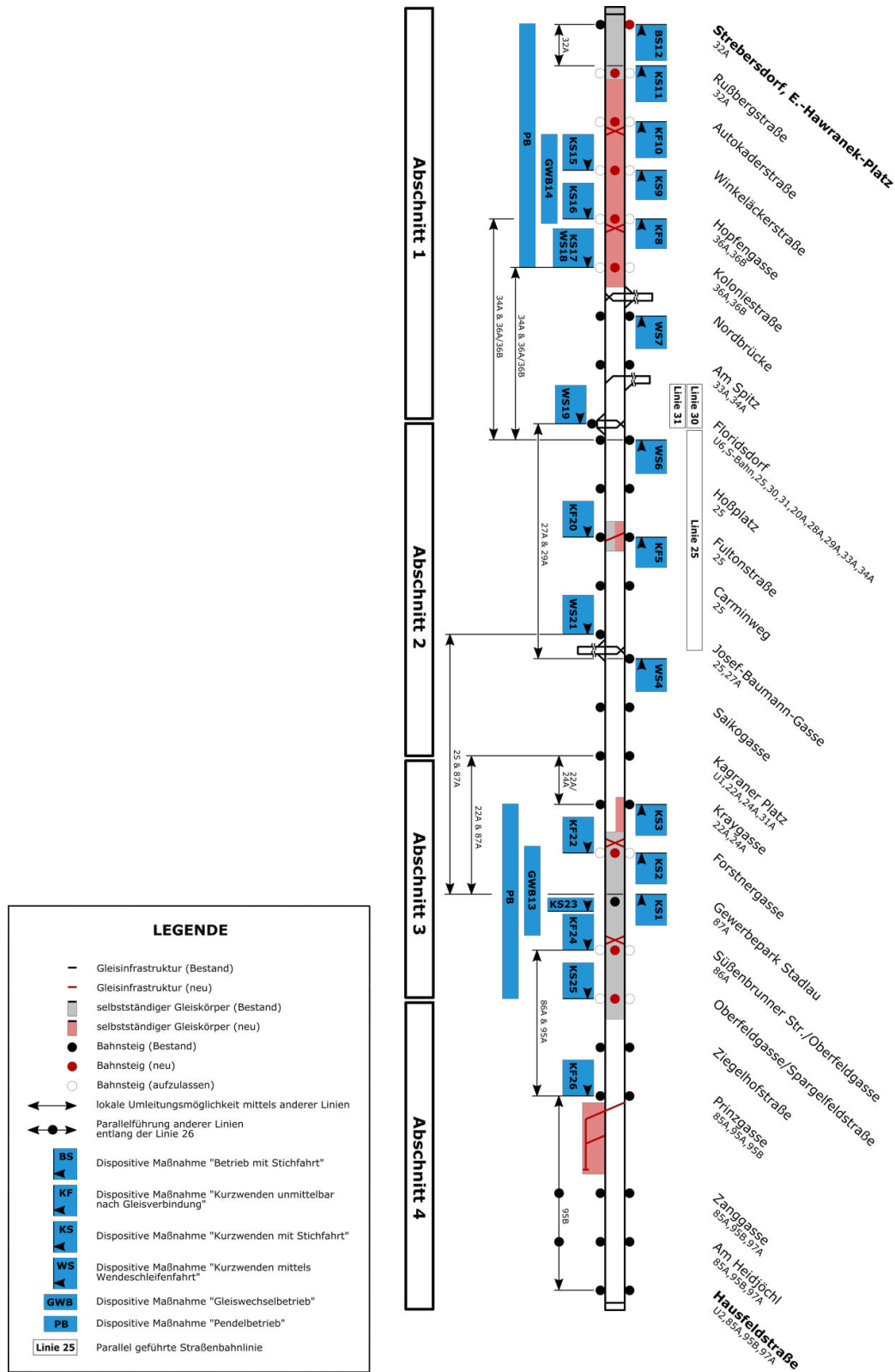


Abbildung 5.4: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26

Abschnitt 1

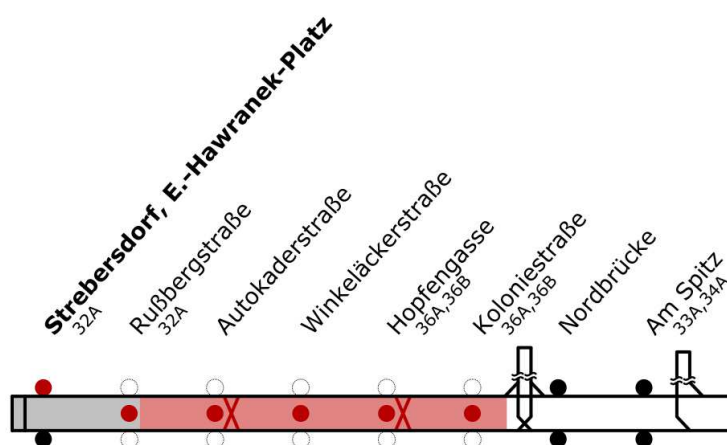


Abbildung 5.5: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 1

Das Gebiet entlang der Prager Straße weist zwischen den Haltestellen *Rußbergstraße* und *Hopfengasse* keine weiteren Linien des ÖPNV auf. Daher sind Fahrgäste im Falle einer Laufwegunterbrechung insbesondere in diesem Abschnitt auf eine möglichst große Anzahl an bedienten Haltestellen angewiesen. Mit geringem Aufwand, u.a. durch Anbringen von Bodenmarkierungen und entsprechender Signalisierung, kann entlang einiger Haltestellen ein durchgehend selbstständiger Gleiskörper geschaffen werden. In diesem Bereich ist die Straßenbahn bereits jetzt zum Großteil getrennt von sonstigem Verkehr unterwegs. Durch das Schaffen eines durchgehend selbstständigen Gleiskörpers können Stichfahrten und ein Gleiswechselbetrieb den Betrieb im Falle von Laufwegunterbrechungen weitestgehend aufrecht erhalten.

Folgende bauliche Maßnahmen sind in diesem Bereich erforderlich:

- Gleisverbindungen zwischen den Hauptfahrgleisen südöstlich unmittelbar vor der Haltestelle *Autokaderstraße* und Gleisverbindungen zwischen den Hauptfahrgleisen südöstlich unmittelbar vor der Haltestelle *Hopfengasse*
 - Die Lage der Gleisverbindungen wurde in Hinblick auf eine optimale Erschließung sowie eine Zugfolgezeit im Störungsbetrieb von sechs Minuten oder darunter mittels Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 berechnet.
 - Um das Kurzwenden zu beschleunigen, sind die Gleisverbindungen in Fahrtrichtung *Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz* jeweils vor der Haltestelle angeordnet. Dadurch entfällt in dieser Fahrtrichtung die zum Wenden erforderliche Fahrt über die Haltestelle hinaus.
 - Die Sicherung beweglicher Fahrwegelemente muss gewährleistet werden. Bei einer Kehrfahrt muss sichergestellt werden, dass das gesamte Fahrzeug den Weichenbereich verlassen hat.
 - Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.

- Zwischen der Abzweigung zum Betriebsbahnhof Floridsdorf und der Endhaltestelle *Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz*:
 - Gleisbereich getrennt von sonstigem Verkehr, alle Querungen mittels Verkehrslichtsignalanlagen signalisieren, Gleisbereich und die Haltestellen in diesem Abschnitt von Regionalbussen und Autobussen der „Nightline“ nicht mitbenutzbar, da als Mittelbahnsteig ausgeführt
 - Leit- und Sicherungssystem für Gleiswechselbetrieb, Betrieb mit Stichfahrten und Pendelbetrieb (Leit- und Sicherungssysteme werden in dieser Arbeit vorausgesetzt, jedoch nicht näher beschrieben.)

Abschnitt 2

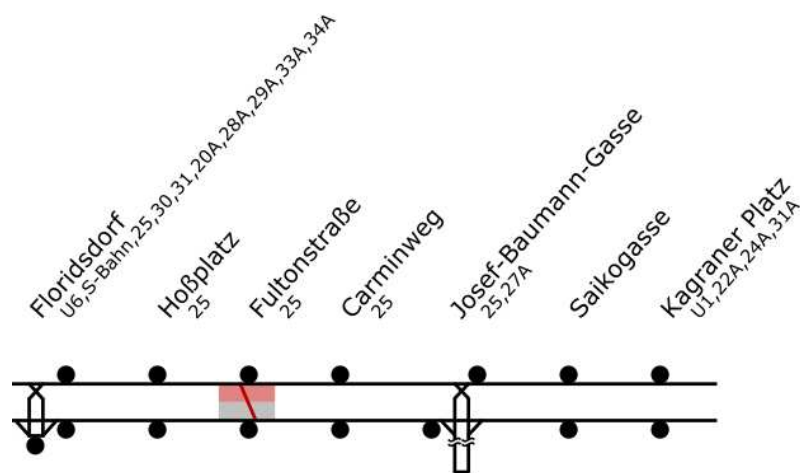


Abbildung 5.6: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 2

Alle Haltestellen der Linie 26 zwischen den Haltestellen *Floridsdorf* und *Josef-Baumann-Gasse* werden ausschließlich von der Straßenbahn bedient. Im Falle einer Laufwegunterbrechung in diesem Bereich können Fahrgäste auf keine anderen Linien des ÖPNV ausweichen. Daher wird an der Haltestelle *Fultonstraße* eine Wendemöglichkeit für Zweirichtungsfahrzeuge vorgesehen, bei der im Falle einer Laufwegunterbrechung kurzgewendet werden kann. Durch diese Wendemöglichkeit kann bei einer punktuellen Laufwegunterbrechung die Anzahl an bedienten Haltestellen im Störungsbetrieb vergrößert werden.

Da dieser Abschnitt auch von Fahrzeugen der Linie 25 befahren wird, kann ein Kurzwenden nur dann durchgeführt werden, wenn auch die Linie 25 mit Zweirichtungsfahrzeugen betrieben wird. Einrichtungsfahrzeuge der Linie 25 können ansonsten das Wenden von darauffolgenden Zweirichtungsfahrzeugen der Linie 26 behindern. Bei einer Zugfolgezeit von drei Minuten (überlagertes Intervall der Linien 25 und 26 zur Hauptverkehrszeit) kann es bei der angenommenen FZL und AAZ zu einem sich aufbauenden Rückstau an Fahrzeugen kommen (siehe Kapitel 3.2.3). Das Intervall der beiden Linien muss daher im Störungsbetrieb gegebenenfalls angepasst werden.

Für die Wendeanlage bedarf es folgender baulicher Veränderungen:

- Gleisverbindung im Doppelhaltestellenbereich *Fultonstraße* und Anpassung der Seitenbahnsteige. Dies bedingt eine Verlängerung des Haltestellenbereichs. Um im Normalbetrieb höhere Geschwindigkeiten gewährleisten zu können, werden die Weichen im Regelbetrieb stumpf befahren.
 - Die Sicherung beweglicher Fahrweegelemente muss gewährleistet werden. Bei einer Kehrfahrt muss sichergestellt werden, dass das gesamte Fahrzeug den Weichenbereich verlassen hat.
- Gleise im und vor dem Haltestellenbereich frei von sonstigem Verkehr (hellrot dargestellt in Abbildung 5.7)
- Leit- und Sicherungssystem für einen Wendebetrieb mittels Fahrtrichtungswechsel im und um den Haltestellenbereich

Abbildung 5.7 zeigt eine mögliche neue Anordnung der Doppelhaltestelle *Fultonstraße*. Durch den Einbau von zwei Weichen ist es möglich, Zweirichtungsfahrzeuge aus beiden Richtungen kommend zu wenden. Befindet sich bereits ein Fahrzeug in der Haltestelle, darf das Folgefahrzeug nicht unmittelbar auf dieses aufschließen, sondern muss den Verzweigungsbereich der Weiche freihalten, um einen etwaigen Wendevorgang des vorderen Zweirichtungsfahrzeuges auf das Hauptfahrgleis der Gegenrichtung zu ermöglichen. Hierzu werden Haltepunkte angebracht. Bei einem Wendevorgang des links dargestellten Fahrzeuges werden die Bahnsteige H_1 , H_2 und H_4 bedient. Daher ist für Fahrgäste bei einem Kurzwenden das Queren der Gleise nicht erforderlich.

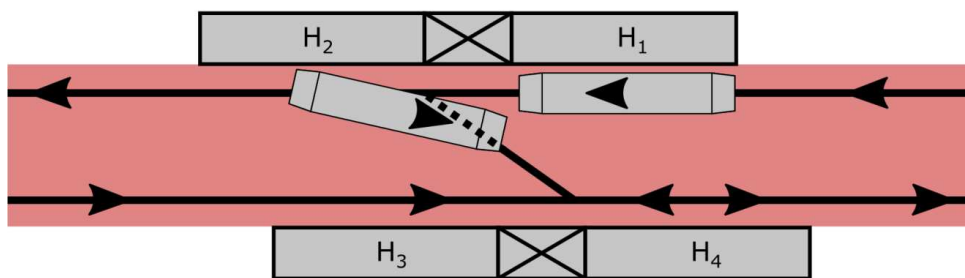


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung der Doppelhaltestelle *Fultonstraße*, das linke Fahrzeug wendet mittels Fahrtrichtungswechsel

Abschnitt 3

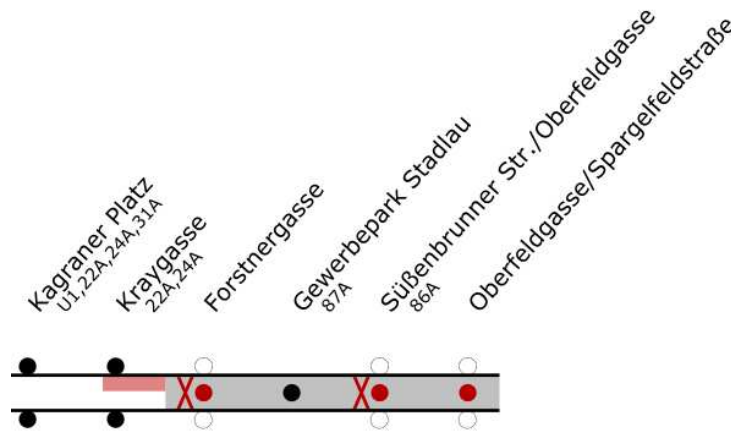


Abbildung 5.8: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 3

Zwischen den Haltestellen *Forstnergasse* und *Oberfeldgasse/Spargelfeldstraße* wird die Straßenbahnlinie 26 derzeit auf einem selbstständigen Gleiskörper geführt. Die Querung mit der Süßenbrunner Straße ist mittels einer unvollständigen Verkehrslichtsignalanlage gesichert. Um Fahrzeuge kurzwenden zu können und zugleich – mit derselben Gleisinfrastruktur – in diesem Bereich alle weiteren dispositiven Möglichkeiten mit Zweirichtungsfahrzeugen ausschöpfen zu können, ist folgende Infrastruktur erforderlich:

- Gleisverbindung zwischen den Hauptfahrgleisen westlich unmittelbar vor der Haltestelle *Forstnergasse* und Gleisverbindungen zwischen den Hauptfahrgleisen westlich unmittelbar vor der Haltestelle *Süßenbrunner Straße/Oberfeldgasse*
 - Die Sicherung beweglicher Fahrweegelemente muss gewährleistet werden. Bei einer Kehrfahrt muss sichergestellt werden, dass das gesamte Fahrzeug den Weichenbereich verlassen hat.
 - Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Zwischen den Haltestellen *Forstnergasse* und *Süßenbrunner Straße/Oberfeldgasse* überquert die Straßenbahn auf einer Hochtrasse eine Eisenbahnstrecke, ein Gewerbegebiet sowie eine Autobahn. Um mit Einrichtungsfahrzeugen den vorhandenen Mittelbahnsteig an der Haltestelle *Gewerbepark Stadlau* einhalten zu können, ist die Straßenbahn in diesem Bereich bereits jetzt im Linksverkehr unterwegs. Die Gleiskreuzungen vor und nach der Hochtrasse sind mittels einer Signalanlage gesichert. Ein Linksverkehr mittels der Gleiskreuzungen ist im dargestellten Konzept bei einem Zweirichtungsbetrieb nicht mehr erforderlich.
- Leit- und Sicherungssystem für einen Gleiswechselbetrieb, Betrieb mit Stichfahrten und Pendelbetrieb
- Selbstständiger Gleiskörper des nördlichen Richtungsgleises im Verlauf der *Forstnergasse*

- Für den dargestellten Zweirichtungsbetrieb der Linie 26 ist es erforderlich, dass die Autobuslinien 22A und 24A in Fahrtrichtung *Kagranner Platz* erst nach der Haltestelle *Kraygasse* auf den Gleiskörper auffahren. Die Haltestelle *Kraygasse* der beiden Autobuslinien in Fahrtrichtung *Kagranner Platz* kann auf der vorhandenen KFZ-Spur errichtet werden. Im Haltestellenbereich muss der Mehrzweckstreifen verlegt werden. Linienbusse in östlicher Fahrtrichtung können nach wie vor die Haltestelle *Kraygasse* im Mischbetrieb mit der Straßenbahn verwenden. Durch die teilweise geänderte Linienführung der Autobusse wird es Zweirichtungsfahrzeugen der Straßenbahnlinie 26 ermöglicht, bei einer Laufwegunterbrechung westlich der Haltestelle *Kraygasse* mittels einer Stichfahrt zwischen den Haltestellen *Forstnergasse* und *Kraygasse* auf dem nördlich gelegenen Richtungsgleis bis zur Haltestelle *Kraygasse* zu fahren und dort mittels Fahrtrichtungswechsel zu wenden. Bei punktuellen Laufwegunterbrechungen im Haltestellenbereich *Kagranner Platz* wird die Anbindung an die U-Bahnlinie U1 durch ein Umsteigen von bzw. in die Autobuslinien 22A oder 24A in der Haltestelle *Kraygasse* ermöglicht. Abbildung 5.9 gibt hierzu einen schematischen Überblick, wobei in oberer Abbildung die derzeitige verkehrliche Situation dargestellt ist und die untere Grafik die veränderte Linienführung zeigt.

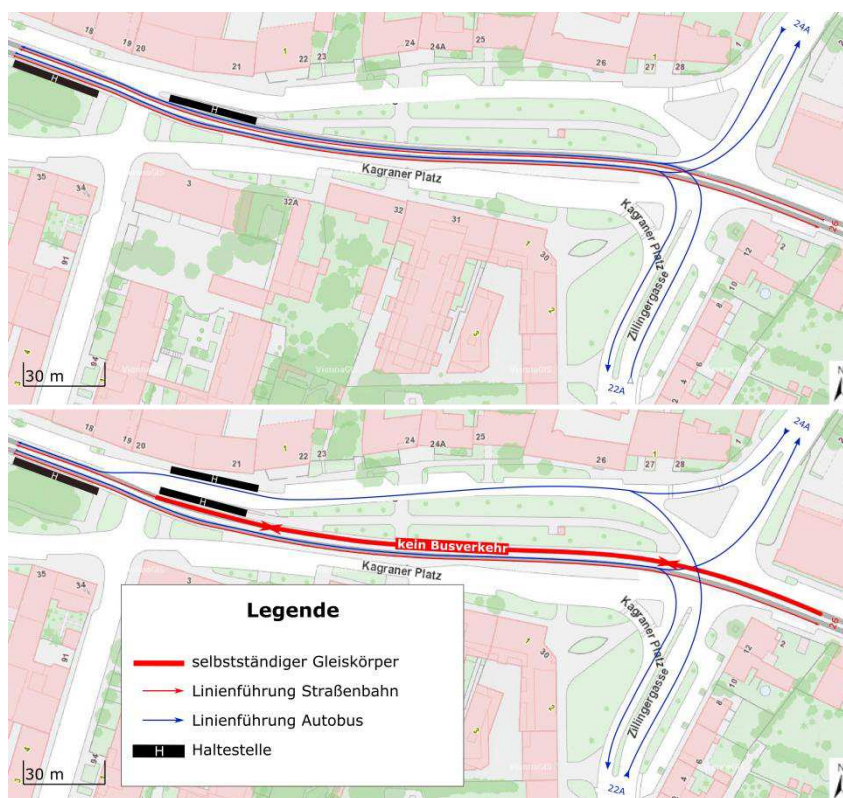


Abbildung 5.9: Haltestellenbereich *Kraygasse*, oberes Bild: Ist-Zustand, unteres Bild: mögliche Stichfahrten der Straßenbahn durch geänderte Autobuslinienführung

Abschnitt 4

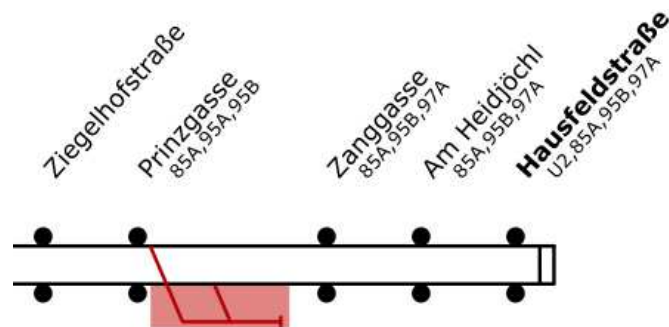


Abbildung 5.10: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 4

Für das Kurzwenden verspäteter Fahrzeuge ist eine Wendeanlage unmittelbar nach der Haltestelle *Prinzgasse* erforderlich. Ein mögliches Schema der Wendeanlage ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Während ein Fahrzeug auf seine Abfahrt wartet, kann ein weiteres in die Wendeanlage einfahren. Die Notwendigkeit dieser Wendeanlage wird in Kapitel 5.1.2 begründet. Für die Wendeanlage ist folgende Infrastruktur erforderlich:

- Ein Stumpfgleis für das Wenden in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* unmittelbar nach der Haltestelle *Prinzgasse*
 - Die Sicherung beweglicher Fahrweegelemente muss gewährleistet werden. Bei einer Kehrfahrt muss sichergestellt werden, dass das gesamte Fahrzeug den Weichenbereich verlassen hat.
 - Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben.
- Wendegleis frei von sonstigem Verkehr (hellrot dargestellt in Abbildung 5.11)
- Leit- und Sicherungssystem für Straßenbahn, Fuß- und Radverkehr und motorisierten Individualverkehr (MIV) für einen Wendebetrieb mittels Fahrtrichtungswechsel sowie ein Einfahren in die Wendeanlage

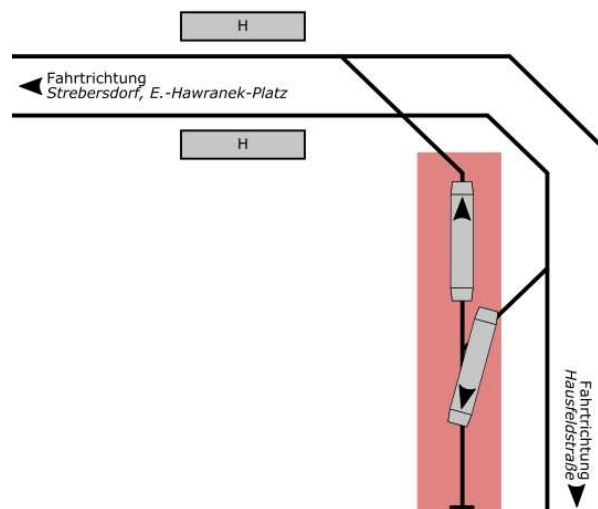


Abbildung 5.11: Wendeanlage für Zweirichtungsfahrzeuge im Haltestellenbereich *Prinzgasse*

Mittelbahnsteige in den Abschnitten 1 und 3

Mittelbahnsteige bringen bei sämtlichen dispositiven Maßnahmen entlang von Abschnitten mit selbstständigem Gleiskörper Vorteile für Fahrgäste, die in Kapitel 4 detailliert beschrieben wurden.

- An den Haltestellen *Rußbergstraße*, *Autokaderstraße*, *Winkeläckerstraße*, *Hopfengasse*, *Koloniestraße*, *Forstnergasse*, *Süßenbrunner Straße/Oberfeldgasse* und *Oberfeldgasse/Spargelfeldstraße* ermöglichen neu zu errichtende Mittelbahnsteige im Falle von Betriebsstörungen und damit einhergehenden notwendigen dispositiven Maßnahmen kürzere Fußwege für Fahrgäste bei Umsteigevorgängen sowie einen übersichtlicheren Betrieb bei einem Kehrbetrieb. Die Haltestelle *Gewerbepark Stadlau* ist bereits als Haltestelle mit Mittelbahnsteig ausgeführt.

Zusätzliche Bahnsteige

- Um bei einem Betrieb mit Stichfahrten entlang beider Hauptfahrgleise bis zur Endhaltestelle *Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz* die Wendeschleife nicht befahren zu müssen, wird unmittelbar vor der Wendeschleife ein zusätzlicher Bahnsteig vorgesehen.
- An Haltestellen vor Gleisverbindungen (z. B. südöstlich der Haltestelle *Hopfengasse*) kann eine in Abbildung 4.13 gezeigte Ausstiegshaltestelle vorgesehen werden. Diese ermöglicht Fahrgästen bei einem etwaigen Rückstau an Fahrzeugen im Störungsbetrieb das Aussteigen.

5.1.2 Dispositive Möglichkeiten im Zweirichtungsbetrieb

Abbildung 5.12 zeigt, welche dispositiven Möglichkeiten mit Zweirichtungsfahrzeugen auf der in Abbildung 5.4 dargestellten Infrastruktur entlang der Linie 26 gegeben sind. Die neu geschaffenen Maßnahmen im Zweirichtungsbetrieb sind gelb markiert und werden im

Folgenden detailliert erläutert. Da die Wendezeiten von Zweirichtungsfahrzeugen bei unterschiedlichen FZL und AAZ variieren, wird bei allen folgenden Betrachtungen in diesem Kapitel angenommen:

- FZL: 35m
- AAZ: 75s

Die Wendezeit mittels Fahrtrichtungswechsel $t_{WZ,SG}$ liegt nach Kapitel 3.2.3 bei einem Zweirichtungsfahrzeug mit diesen Parametergrößen bei 261,4 Sekunden, die auf 4,5 Minuten aufgerundet werden. Für die um die Ein- und Ausfahrt verkürzte Wendefahrt $t_{WZ,kurz,SG}$ werden im Folgenden gerundet 3,5 Minuten herangezogen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

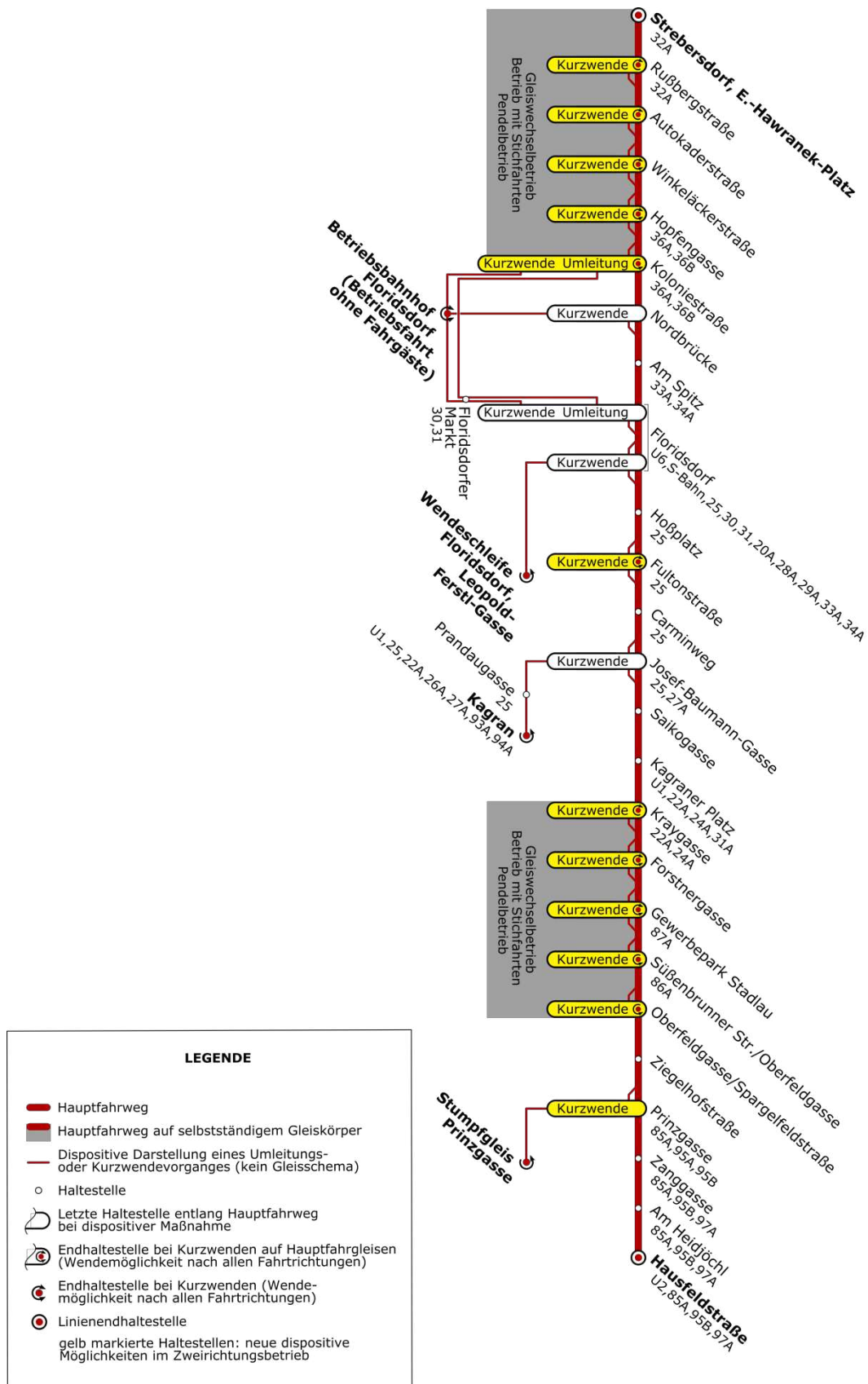


Abbildung 5.12: Dispositive Möglichkeiten entlang der Wiener Straßenbahnlinie 26 im Zweirichtungsbetrieb

Kurzwenden verspäteter Fahrzeuge

Werden verspätete Fahrzeuge kurzgewendet, so bedeutet diese Maßnahme für Fahrgäste, dass zur Weiterfahrt in das Folgefahrzeug umgestiegen werden muss. Daher ist es von Vorteil, Fahrzeuge erst an jener Haltestelle kurzzuwenden, an der Verspätungen möglichst exakt kompensiert werden können. Die in Kapitel 4.4 empirisch aufgestellte Formel 18 wird hier umgeformt und adaptiert angewandt. Pausen- und Synchronisationszeit an der Endhaltestelle werden nicht berücksichtigt.

$$t_{Vers,FZG} = 2 * N * t_{H1H2} - t_{WZ,delta} + t_{Pu} \quad (19)$$

Der Ausdruck $N * t_{H1H2}$ (durchschnittlich Reisezeit zwischen zwei Haltestellen t_{H1H2} multipliziert mit der Anzahl der Haltestellen einer Fahrtrichtung N) wird im Folgenden durch die Gesamt-Reisezeit pro Fahrtrichtung t_{RZ} ersetzt.

$$t_{Vers,FZG} = 2 * t_{RZ} - t_{WZ,delta} + t_{Pu} \quad (20)$$

Zwischen den Haltestellen *Prinzgasse* und der Endhaltestelle *Hausfeldstraße* benötigt ein Zug der Linie 26 in beide Fahrtrichtungen etwa acht Minuten ($2 * t_{RZ}$). Das Wenden eines Zweirichtungsfahrzeuges mittels Fahrtrichtungswechsel in der Haltestelle *Prinzgasse* (siehe Abbildung 5.11) wird, aufgrund einer geringfügig längeren Fahrt in das Stumpfgleis als in Kapitel 3.2.3 beschrieben, mit fünf Minuten angenommen. Die exakte Wendezeit ist von der Platzierung der Wendeanlage abhängig. Die Wendezeit entlang der 350 Meter langen Wendeschleife in der Endhaltestelle Hausfeldstraße beträgt nach Kapitel 3.2.2 etwa eine Minute ($t_{WZ,delta}$). Mit einer angenommenen Pufferzeit von vier Minuten pro Kurs und Endhaltestelle ergibt sich durch Einsetzen in Formel 20:

$$t_{Vers,FZG} = 8 - (5 - 1) + 4 \quad (21)$$

Bei einem Kurzwenden im Zweirichtungsbetrieb nach der Haltestelle *Prinzgasse* kann demnach eine Verspätung von maximal acht Minuten abgebaut werden. Tabelle 5.1 stellt den Zeitgewinn für das Kurzwenden von verspäteten Kursen der Linie 26 in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* an weiteren ausgewählten Haltestellen dar. Die grau hinterlegten Kurzwendemöglichkeiten sind ausschließlich im Zweirichtungsbetrieb zu befahren. Die Abkürzungen nach dem Haltestellennamen verweisen auf die möglichen dispositiven Maßnahmen in Abbildung 5.4.

Verspätete Fahrzeuge sollen im unmittelbaren Bereich einer Gleisverbindung kurzgewendet werden, da sie bei einer Stichfahrt das Hauptfahrgleis länger belegen und somit den übrigen, pünktlichen Betrieb behindern würden.

Tabelle 5.1: Verspätungsabbau durch Kurzwenden an ausgewählten Haltestellen (Abkürzungen nach Abbildung 5.4)

	Haltestelle mit Kurzwendemöglichkeit in Fahrtrichtung <i>Hausfeldstraße</i>	Gesamt-Reisezeit bis und von Endhaltestelle <i>Hausfeldstraße</i> ($2 \cdot t_{RZ}$) [min]	Betragsmäßige Differenz der Wendezeiten $t_{WZ,delta}$ bei 35m FZL und 75s AAZ, gerundet [min]	Pufferzeit t_{Pu} [min]	Möglicher Verspätungsabbau durch Kurzwenden des Fahrzeuges $t_{Vers,FZG}$ [min]
Zurzeit keine Wende-möglichkeit (ZR)	<i>Prinzgasse</i> (KF26)	8,0	3,5	4,0	8,5
	<i>Süßenbrunner Str./ Oberfeldgasse</i> (KF24)	17,0	2,5	4,0	18,5
	<i>Forstnergasse</i> (KF22)	23,0	2,5	4,0	24,5
Derzeitige Wende-möglichkeit (ER & ZR)	<i>Josef-Baumann-Gasse</i> (WS21)	36,0	8,0	4,0	32,0
	<i>Floridsdorf</i> (WS19)	49,0	2,0	4,0	51,0
	<i>Koloniestraße</i> (WS18)	59,0	5,0	4,0	58,0

Abbildung 5.13 stellt auf der vertikalen Achse den prozentuellen Anteil aller verspäteten Kurse der Linie 26 in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* dar. Auf der horizontalen Achse sind die Verspätungsgrößen angegeben. Die Verspätungswerte wurden über das RBL-System⁹ der Wiener Linien eine Haltestelle vor der Endhaltestelle an der Haltestelle *Am Heidjöchl* ausgewertet, um Verfälschungen infolge Rückstauung vor der Wendeschleife in der Endhaltestelle *Hausfeldstraße* ausschließen zu können. Die Daten wurden von 01.10.2018 bis 30.09.2019 erhoben. In die Berechnung wurden alle Fahrten mit einem Verspätungswert größer null Minuten einbezogen. Bei allen Betrachtungen wird angenommen, dass die Verspätungswerte der einzelnen Kurse zwischen der derzeit letzten Wendemöglichkeit *Josef-Baumann-Gasse* und der Endhaltestelle *Hausfeldstraße* unverändert bleiben. Es ist ersichtlich, dass die Häufung von Verspätungen im unteren einstelligen Minutenbereich liegt und diese Häufung bei größeren Verspätungswerten stark abnimmt.

Jene verspäteten Kurse, die in Abbildung 5.13 durch dunkelblaue Balken abgebildet werden (Verspätungsgrößen 0,01 bis 3,99 Minuten), können bei einer angenommenen Pufferzeit von vier Minuten unter Einhaltung der planmäßigen Endhaltestelle *Hausfeldstraße* pünktlich in die Gegenrichtung starten. Dies entspricht etwa 93,6 % aller verspäteten Kurse.

Die beiden hellrot markierten Balken zeigen etwa 5,1 % aller verspäteten Kurse, die nach Formel 20 mittels Kurzwenden im Bereich der Haltestelle *Prinzgasse* pünktlich in die Gegenrichtung verkehren können. Die kurzgewendeten Fahrzeuge in der Haltestelle *Prinzgasse* entsprechen etwa 2,5 % aller in Richtung *Hausfeldstraße* verkehrenden, pünktlichen und verspäteten Kurse.

Bei einer Kurzwende über Wendeanlagen, die weiter von der Endhaltestelle *Hausfeldstraße* entfernt sind als die Wendeanlage *Prinzgasse*, kann zwar ein Band an größeren Verspätungswerten in die Gegenrichtung eliminiert werden. Der prozentuelle Anteil aller Verspätungswerte größer als acht Minuten (hellblaue Balken) entspricht jedoch nur etwa 1,3 % aller verspäteten Kurse. Bei 98,7 % aller verspäteten Kurse (Verspätungsband zwischen 0,01 und

⁹ rechnergestütztes Betriebsleitsystem

7,99 Minuten) erfordert ein Verspätungsabbau keine Kurzwende an Haltestellen vor der Haltestelle *Prinzgasse*.

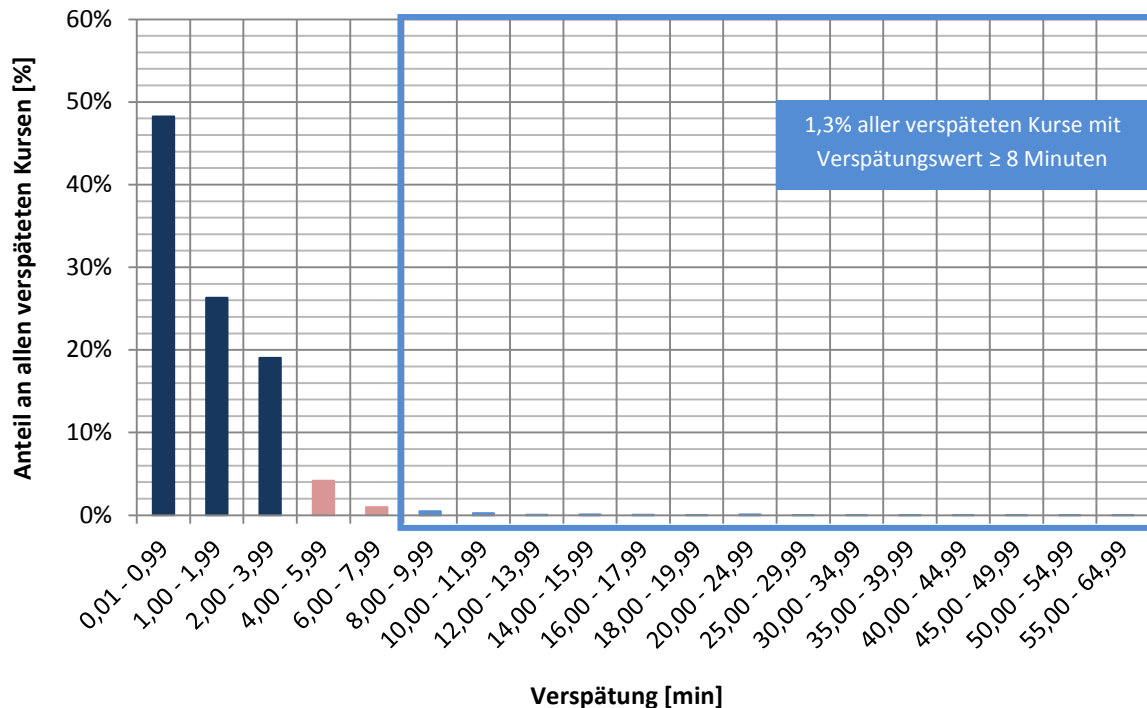


Abbildung 5.13: Darstellung aller verspäteten Kurse der Linie 26 in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* an der Haltestelle *Am Heidjöchl* (Erhebungszeitraum: 01.10.2018 – 30.09.2019, Datenquelle: Wiener Linien)

Aus Sicht des Fahrgastes bedeutet das Kurzwenden eines verspäteten Fahrzeuges in der Haltestelle *Prinzgasse* im Vergleich zu einem Kurzwenden an einer anderen Haltestelle in näherer Umgebung geringe Auswirkungen, da die Haltestelle *Prinzgasse* als Umsteigeknoten konzipiert ist und einen Anschluss an drei Autobuslinien bietet. Abbildung 5.14 zeigt die Fahrgastbelegung im Verlauf der Linie 26. Pro Haltestelle sind die ein- und aussteigenden Fahrgäste abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die Haltestelle *Prinzgasse* (rot umrahmt) im Vergleich zu anderen Haltestellen in näherer Umgebung die höchste Zahl an aus- und einsteigenden Fahrgästen aufweist. Außerdem nimmt die Fahrzeugbelegung in Richtung Endhaltestelle *Hausfeldstraße* stetig ab.

Wird ein verspätetes Fahrzeug bereits in der Haltestelle *Josef-Baumann-Gasse* kurzgewendet, kann dies zu einer Überfüllung des Folgefahrzeuges führen. Dadurch können weitere Verspätungen hervorgerufen werden.

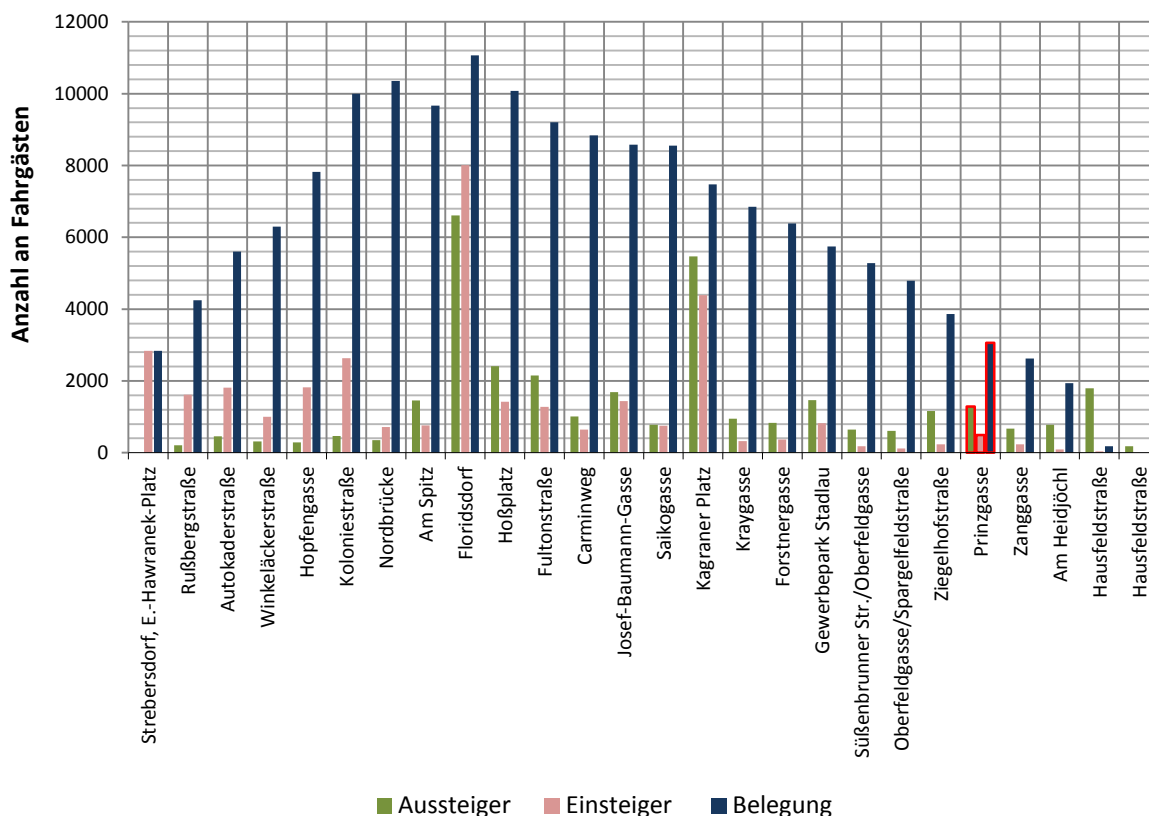


Abbildung 5.14: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 26 in Fahrrichtung *Hausfeldstraße* (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien)

Kurzwenden bei Laufwegunterbrechung

Bei einer Laufwegunterbrechung im östlichen Linienabschnitt kann zurzeit etwa die Hälfte der Haltestellen der Linie 26 nicht bedient werden, da sich die letzte Wendemöglichkeit in Fahrrichtung *Hausfeldstraße* bei der Haltestelle *Josef-Baumann-Gasse* befindet.

Wenn möglich sollten Wendemöglichkeiten – wie in Kapitel 4.2 gezeigt wurde – an Umsteigeknoten platziert sein. Dadurch wird es Fahrgästen ermöglicht, bei einer Laufwegunterbrechung auf andere Linien des ÖPNV umzusteigen. Abbildung 5.4 zeigt sämtliche Kurzwendemöglichkeiten, die mit Hilfe der abgebildeten Infrastruktur und Zweirichtungsfahrzeugen bedient werden können. Bei auftretenden Störungen können Fahrgäste mit ein bis zwei anderen Linien des ÖPNV den unterbrochenen Linienabschnitt kleinräumig umfahren. Dadurch verlängert sich die Gesamt-Reisezeit um bis zu 20 Minuten.

Gleiswechselbetrieb, Betrieb mit Stichfahrten

In Bereichen geringer Erschließungsdichte kann es notwendig sein, den Betrieb einer Linie trotz einer punktuellen Laufwegunterbrechung so weit wie möglich aufrecht erhalten zu können. Im Falle einer eingleisigen Laufwegunterbrechung kann dies mittels eines Gleiswechselbetriebs geschehen.

Sind beide Richtungsgleise punktuell nicht befahrbar, kann mittels einer Stichfahrt bis unmittelbar vor die Laufwegunterbrechung gefahren und dort gewendet werden. Durch einen Störungsbetrieb mit Stichfahrten steht den Fahrgästen nach wie vor ein Großteil der Linie zur Verfügung. Zudem wird durch das Kehren an Umsteigeknoten Fahrgästen ein Umsteigen in andere Linien des ÖPNV zur Umfahrung der Störung ermöglicht.

Pendelbetrieb

Entlang der Linienabschnitte, die frei von sonstigem Verkehr sind, kann ein in Kapitel 4.1.3 beschriebener Pendelbetrieb eingerichtet werden. Die minimale Zugfolgezeit ist von der Länge der Pendelstrecke abhängig.

5.1.3 Berechnung eines Störungsbetriebs bei Laufwegunterbrechung

Anhand von adaptierten Berechnungsformeln aus Kapitel 4 wird der Zweirichtungsbetrieb entlang der Linie 26 mit seinen dispositiven Möglichkeiten und daraus resultierenden Zugfolgezeiten mittels Formelzusammenhängen dargestellt. Sämtliche Haltestellenaufenthalte werden mit einer halben Minute angenommen. Die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen sind Richtwerte und können bei entsprechender Bevorrangung der Straßenbahn an VLSA angepasst werden. Die in Kapitel 4 aufgestellten Formeln werden im Folgenden umgeformt.

- **Gleiswechselbetrieb**

Formel 13 in Kapitel 4.1.1 gibt an, ob bei einer vorgegebenen, regelmäßigen Zugfolgezeit ein Gleiswechselbetrieb ohne Aufstauen an Fahrzeugen vor dem eingleisig befahrbaren Abschnitt möglich ist (Faktor $A \leq 1$). Die Anzahl an Haltestellen zwischen zwei Gleisverbindungen H_{GV} mal der durchschnittlichen Reisezeit zwischen zwei Haltestellen t_{H1H2} wird durch die tatsächliche Reisezeit pro Fahrtrichtung t_{RZ} ersetzt. Dadurch ergibt sich:

$$A = \frac{2 * t_{RZ}}{t_{ZF}} \leq 1 \quad (22)$$

Die minimal mögliche Zugfolgezeit ($A=1$) pro Richtung im Gleiswechselbetrieb errechnet sich daher mittels folgender Formel.

$$t_{ZF} = 2 * t_{RZ} \quad (23)$$

- **Kehren bei Laufwegunterbrechung & Betrieb mit Stichfahrten**

Findet das Wenden in einer Haltestelle unmittelbar nach einer Gleisverbindung statt, so kann das Wenden anhand der verkürzten Wendezeit $t_{WZ, kurz, SG}$ aus Kapitel 3.2.3 beschrieben werden. Formel 14 in Kapitel 4.1.2 errechnet, ob ein Betrieb mit einer Stichfahrt entlang des längeren Gleises zwischen zwei Gleisverbindungen ohne Aufstauen von Fahrzeugen vor der Gleisverbindung möglich ist. Hier wird nun die tatsächliche Reisezeit pro Fahrtrichtung (t_{RZ}) und

Gleisabschnitt verwendet. Da die Fahrzeit bis in die Haltestelle, in der mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet wird, in t_{RZ} enthalten ist, wird die verkürzte Wendezeit ($t_{WZ, kurz, SG}$) addiert. Diese enthält nur die AAZ des Fahrzeuges sowie den Fußweg des Fahrers.

$$A = \frac{2 * t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}}{t_{ZF}} \leq 1 \quad (24)$$

Die minimal mögliche Zugfolgezeit ($A=1$) bei einem Betrieb mit Stichfahrten errechnet sich mittels folgender Formel:

$$t_{ZF} = 2 * t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG} \quad (25)$$

Formel 25 wird herangezogen, wenn bei einer Laufwegunterbrechung ein Richtungsgleis zum Wenden zur Verfügung steht (z. B. Kurzwenden in der Haltestelle *Kraygasse* entlang des in Abbildung 5.9 oben dargestellten Richtungsgleises). Kann ein Kehren bei Laufwegunterbrechung abwechselnd über beide Richtungsgleise erfolgen (Anzahl der Gleise n , siehe auch Formel 17 in Kapitel 4.1.4), halbiert sich die minimal mögliche Zugfolgezeit.

$$t_{ZF} = (2 * t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) * \frac{1}{2} \quad (26)$$

- **Überblick mittels Tabellen**

Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 wenden die zuvor ermittelten Formeln auf den Verlauf der Linie 26 an. Neben der verwendeten Formel ist der Zahlenwert der erzielbaren Zugfolgezeit pro Richtung für die jeweilige Dispositionsmaßnahme angegeben. Diese Werte beziehen sich auf einen Betrieb mit Zweirichtungsfahrzeugen mit einer FZL von 35 Metern und einer AAZ von 75 Sekunden. Rot markiert sind jene Dispositionsmaßnahmen im Bereich der Haltestelle *Fultonstraße*, bei denen es aufgrund der Überlagerung der Linien 25 und 26 zu einem sich aufbauenden Rückstau an Fahrzeugen kommen kann. Eine Anpassung der Zugfolgezeit und vorzeitiges Wenden der Linie 25 bei Laufwegunterbrechungen wirkt einem Rückstau entgegen. Die Abkürzungen der jeweiligen Dispositionsmaßnahme bezieht sich auf Abbildung 5.4.

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

Tabelle 5.2: Erzielbare Zugfolgezeiten der Linie 26 in Fahrtrichtung Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz bei dispositiven Maßnahmen im Zweirichtungsbetrieb

Linienverlauf: Hausfeldstraße – Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz		Dispositive Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung: Kurzwenden & Stichfahrt			Dispositive Maßnahme bei Laufwegunterbrechung: Gleiswechselbetrieb		
Haltestelle	Zeit [min]	Kürzel	Formel für minimale Zugfolgezeit t_{ZF} im Zweirichtungsbetrieb	Zugfolgezeit [min]	Kürzel	Formel für minimale Zugfolgezeit t_{ZF} im Zweirichtungsbetrieb	Zugfolgezeit [min]
Hausfeldstraße	0,5						
Fahrzeit	1,5						
Am Heidjöchl	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Zanggasse	0,5						
Fahrzeit	0,5						
Prinzgasse	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Ziegelhofstraße	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Oberfeldgasse/ Spargelfeldstraße	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Süßenbrunner Str./ Oberfeldgasse	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Gewerbepark Stadlau	0,5	KS1	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	2,75	GWB13	$2 \cdot t_{RZ}$	6,00
Fahrzeit	1,0						
Forstnergasse	0,5	KS2	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	4,25			
Fahrzeit	1,0						
Kraygasse	0,5	KS3	$2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}$	5,50			
Fahrzeit	1,0						
Kagraner Platz	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Saikogasse	0,5						
Fahrzeit	1,5						
Josef-Baumann-Gasse	0,5	WS4	Wendeschleife kein limitierender Faktor für Zugfolgezeit				
Fahrzeit	1,0						
Carminweg	0,5						
Fahrzeit	1,5						
Fultonstraße	0,5	KF5	$t_{WZ, SG}$	4,50			
Fahrzeit	1,0						
Hoßplatz	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Floridsdorf	0,5	WS6	Wendeschleife kein limitierender Faktor für Zugfolgezeit				
Fahrzeit	1,5						
Am Spitz	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Nordbrücke	0,5	WS7	Wendeschleife kein limitierender Faktor für Zugfolgezeit				
Fahrzeit	1,0						
Koloniestraße	0,5						
Fahrzeit	1,0						
Hopfengasse	0,5	KF8	$t_{WZ, SG} \cdot 0,5$	2,25	GWB14	$2 \cdot t_{RZ}$	6,00
Fahrzeit	1,0						
Winkeläckerstraße	0,5	KS9	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	3,25			
Fahrzeit	1,0						
Autokaderstraße	0,5	KF10	$t_{WZ, SG} \cdot 0,5$	2,25			
Fahrzeit	2,0						
Rußbergstraße	0,5	KS11	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	4,25			
Fahrzeit (exkl. Wendeschleifenfahrt)	1,0						
Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz	0,5	BS12	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	5,75			

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

Tabelle 5.3: Erzielbare Zugfolgezeiten der Linie 26 in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* bei dispositiven Maßnahmen im Zweirichtungsbetrieb

Linienverlauf: <i>Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz – Hausfeldstraße</i>		Dispositive Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung: Kurzwenden & Stichfahrt			Dispositive Maßnahme bei Laufwegunterbrechung: Gleiswechselbetrieb		
Haltestelle	Zeit [min]	Kürzel	Formel für minimale Zugfolgezeit t_{ZF} im Zweirichtungsbetrieb	Zugfolgezeit [min]	Kürzel	Formel für minimale Zugfolgezeit t_{ZF} im Zweirichtungsbetrieb	Zugfolgezeit [min]
<i>Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz</i>	0,5						
Fahrzeit (exkl. Wendeschleifenfahrt)	1,0						
<i>Rußbergstraße</i>	0,5						
Fahrzeit	2,0						
<i>Autokaderstraße</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Winkeläckerstraße</i>	0,5	KS15	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	2,75	GWB14	$2 \cdot t_{RZ}$	6,00
Fahrzeit	1,0						
<i>Hopfengasse</i>	0,5	KS16	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	4,25			
Fahrzeit	1,0						
<i>Koloniestraße</i>	0,5	KS17 WS18	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$; <i>Wendeschleife kein limitierender Faktor für Zugfolgezeit</i>	2,75			
Fahrzeit	1,0						
<i>Nordbrücke</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Am Spitz</i>	0,5						
Fahrzeit	1,5						
<i>Floridsdorf</i>	0,5	WS19	<i>Wendeschleife kein limitierender Faktor für Zugfolgezeit</i>				
Fahrzeit	1,0						
<i>Hoßplatz</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Fultonstraße</i>	0,5	KF20	$t_{WZ, SG}$	4,50			
Fahrzeit	1,5						
<i>Carminweg</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Josef-Baumann-Gasse</i>	0,5	WS21	<i>Wendeschleife kein limitierender Faktor für Zugfolgezeit</i>				
Fahrzeit	1,5						
<i>Saikogasse</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Kagranner Platz</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Kraygasse</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Forstnergasse</i>	0,5	KF22	$t_{WZ, SG} \cdot 0,5$	2,25	GWB13	$2 \cdot t_{RZ}$	6,00
Fahrzeit	1,0						
<i>Gewerbepark Stadlau</i>	0,5	KS23	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	3,25			
Fahrzeit	1,0						
<i>Süßenbrunner Str./Oberfeldgasse</i>	0,5	KF24	$t_{WZ, SG} \cdot 0,5$	2,25			
Fahrzeit	1,0						
<i>Oberfeldgasse/Spargelfeldstraße</i>	0,5	KS25	$(2 \cdot t_{RZ} + t_{WZ, kurz, SG}) \cdot 0,5$	3,25			
Fahrzeit	1,0						
<i>Ziegelhofstraße</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Prinzgasse</i>	0,5	KF26	$t_{WZ, SG}$	4,50			
Fahrzeit	0,5						
<i>Zanggasse</i>	0,5						
Fahrzeit	1,0						
<i>Am Heidjöchl</i>	0,5						
Fahrzeit	1,5						
<i>Hausfeldstraße</i>	0,5						

5.1.4 Fazit zum Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 26

Anhand der in Kapitel 3.2.3 untersuchten Parameter für das Wenden eines Zweirichtungsfahrzeuges sowie unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 dargestellten dispositiven Möglichkeiten wurden in Kapitel 5.1 Potentiale eines Zweirichtungsbetriebs der Straßenbahnlinie 26 aufgezeigt. Durch die in Abbildung 5.4 dargestellte Gleisinfrastruktur und Zweirichtungsfahrzeuge wird die Anzahl an möglichen dispositiven Maßnahmen in etwa verdreifacht. Hierfür muss abschnittsweise ein selbstständiger Gleiskörper geschaffen werden. In diesem Bereich können Fahrzeuge im Falle einer punktuellen Laufwegunterbrechung unmittelbar vor einem Hindernis mittels Fahrtrichtungswechsel wenden, da im Zweirichtungsbetrieb Gleisverbindungen nicht unbedingt an einem Wendepunkt platziert sein müssen. Dies schafft neue Möglichkeiten in der Disposition sowie die Erschließung zusätzlicher Haltestellen im Vergleich zum derzeitigen Störungsbetrieb. Mit der dargestellten Gleisinfrastruktur kann zusätzlich zu einem Kurzwenden auch abschnittsweise ein Gleiswechselbetrieb sowie Pendelbetrieb ermöglicht werden.

Es wurde gezeigt, dass sich entlang der Linie 26 in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* Verspätungen im einstelligen Minutenbereich häufen. Diese Verspätungsgrößen können durch ein Kurzwenden wenige Haltestellen vor der Endhaltestelle abgebaut werden. Folglich sind Wendemöglichkeiten für verspätete Fahrzeuge möglichst in der Nähe der Endhaltestelle zu platzieren. Ein Großteil der Verspätungen lassen sich in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* durch ein Kurzwenden drei Haltestellen vor der Endhaltestelle abbauen. Durch ein neu zu errichtendes Stumpfgleis im Bereich der Haltestelle *Prinzgasse* können 98,7% aller verspäteten Kurse pünktlich in die Gegenrichtung verkehren.

Fahrgäste profitieren von einem Zweirichtungsbetrieb einerseits durch die Erschließung zusätzlicher Haltestellen im Störungsbetrieb. Andererseits bietet der dargestellte Zweirichtungsbetrieb Kurzwendemöglichkeiten an Haltestellen mit Umsteigerelationen zu anderen Linien des ÖPNV, mit denen eine zweigleisige Laufwegunterbrechung umfahren werden kann. Durch das Wenden verspäteter Fahrzeuge kann die Anzahl an verspäteten Kursen bei gleichzeitig geringen Auswirkungen auf Fahrgäste reduziert werden.

Der Gesamtaufwand für den dargestellten Zweirichtungsbetrieb lässt sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- ca. drei Kilometer durchgehend, neu zu schaffender selbstständiger Gleiskörper zwischen den Haltestellen *Rußbergstraße* und *Koloniestraße*
- 21 zusätzliche Weichen, fünf zusätzliche Gleiskreuzungen
- acht neue Mittelbahnsteige in Bereichen neuer oder bestehender selbstständiger Gleiskörper, ein neuer Seitenbahnsteig vor der Wendeschleife in Strebersdorf
- Ausstiegshaltestellen vor Gleisverbindungen an geeigneten Stellen, deren Standorte mittels weiterer Untersuchungen erforscht werden müssen
- neue Anordnung der Bahnsteige inklusive neuer Weichen in der Haltestelle *Fultonstraße*
- Änderung der Autobuslinienführung im Haltestellenbereich *Kraygasse*

- Wendeanlage mit Stumpfgleis im Bereich der Haltestelle *Prinzgasse*
- Leit- und Sicherungssystem für einen Gleiswechselbetrieb, Betrieb mit Stichfahrten und Pendelbetrieb im Bereich des selbstständigen Gleiskörpers sowie im Bereich der Haltestellen *Fultonstraße* und *Prinzgasse*

5.2 Linie 9

In Kapitel 5.1 wurde ein Zweirichtungsbetrieb der Linie 26 mit all seinen dispositiven Möglichkeiten dargestellt, bei dem die Wendeschleifen an den Endhaltestellen unverändert beibehalten werden. Vorliegendes Kapitel soll im Gegensatz dazu ausschließlich die Wendeschleifenfahrt am Linienende in einem monetären Zusammenhang betrachten.

Es soll eine Aussage darüber getroffen werden, ob im Betrieb durch das Einsparen einer Wendeschleifenfahrt der Linie 9 mittels Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen höhere oder niedrigere laufende Kosten anfallen.

5.2.1 Wendevorgang der Fahrzeuge in Gersthof

Die Linie 9 der Wiener Linien befährt in beiden Fahrrichtungen eine Länge von rund 12,6 Kilometern und verbindet dabei den Westbahnhof mit dem Bezirksteil Gersthof. Der Linienverlauf ist in Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind in diesen Abbildungen nur ausgewählte Haltestellen beschriftet.



Abbildung 5.15: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 9, Abschnitt Nord (Quelle: Wiener Linien)



Abbildung 5.16: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 9, Abschnitt Süd (Quelle: Wiener Linien)

An der Haltestelle *Gersthof* bestehen Umsteigemöglichkeiten zu den Straßenbahnlinien 40 und 41, zur Autobuslinie 10A, sowie zur Schnellbahnlinie S45. Danach befährt die Linie 9 eine Wendeschleife, wobei die Wendeschleifenfahrt eine Parallelführung zur Straßenbahnlinie 40 darstellt. An der Endhaltestelle der Linie 9 (*Gersthof, Wallrißstraße*) besteht eine Überholmöglichkeit für Fahrzeuge der Linie 40, welche diese Haltestelle nicht einhalten. Nach der Abfahrt aus der Endhaltestelle *Gersthof, Wallrißstraße* wird in Fahrtrichtung *Westbahnhof* nach etwa 100 Metern an der Haltestelle *Schöffelgasse* gehalten, die auch von der Linie 40 bedient wird. Die Wendeschleifenfahrt der Straßenbahnlinie 9 mit ihren Haltestellen und Umsteigerelationen ist in Abbildung 5.17 rot strichliert dargestellt. Weitere im Haltestellenbereich *Gersthof* verkehrende Straßenbahnlinien sind grün (Linie 40) und blau (Linie 41) markiert.

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

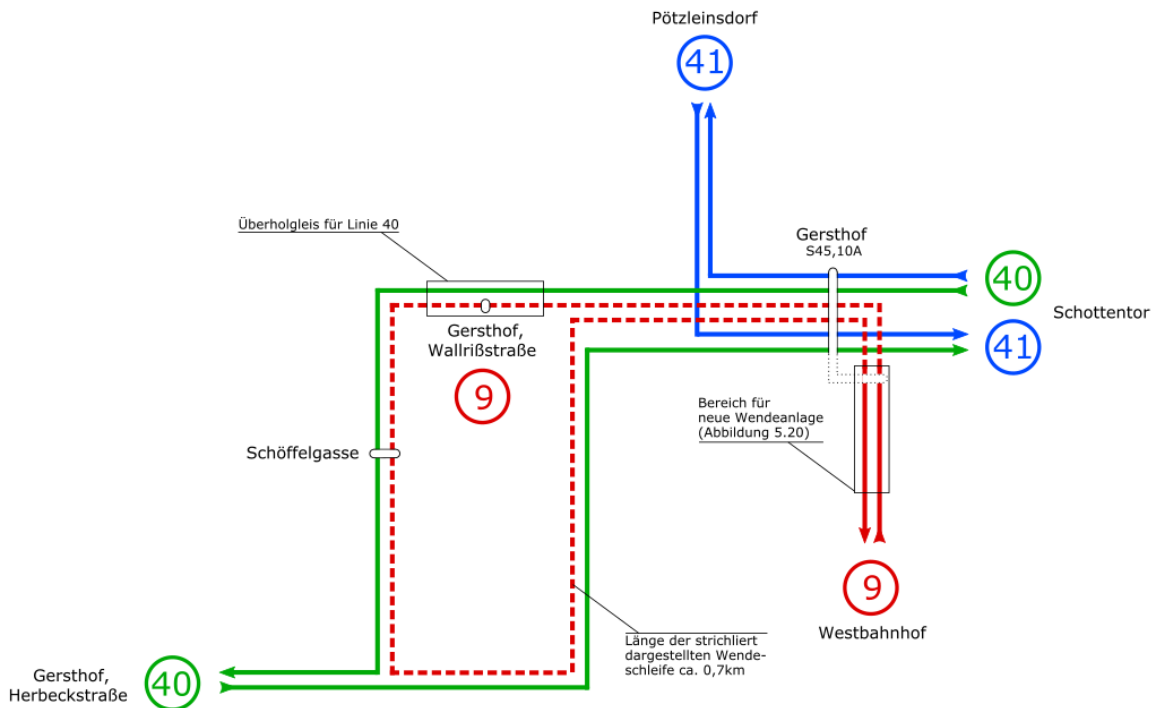


Abbildung 5.17: Schematische Darstellung der Wendeschleifenfahrt der Linie 9 in Gersthof rot strichliert und weitere Straßenbahnlinien

Die durchschnittliche Fahrgastbelegung der Fahrzeuge der Linie 9 ist in Abbildung 5.18 (Fahrtrichtung *Gersthof, Wallrißstraße*) und in Abbildung 5.19 (Fahrtrichtung *Westbahnhof*) dargestellt. In beiden Abbildungen ist im Bereich der Wendeschleife in Gersthof eine Sprungstelle in der Fahrgastbelegung zu erkennen. Die Datenbalken jener Haltestellen im Bereich der Wendeschleifenfahrt sind in Abbildung 5.18 und Abbildung 5.19 rot umrahmt. Im Verlauf der Wendeschleife ist die Fahrgastbelegung wesentlich niedriger als entlang der restlichen Linie. Dies lässt darauf schließen, dass die Wendeschleife hauptsächlich aus betrieblichen Gründen befahren werden muss, um Fahrzeuge wenden zu können.

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

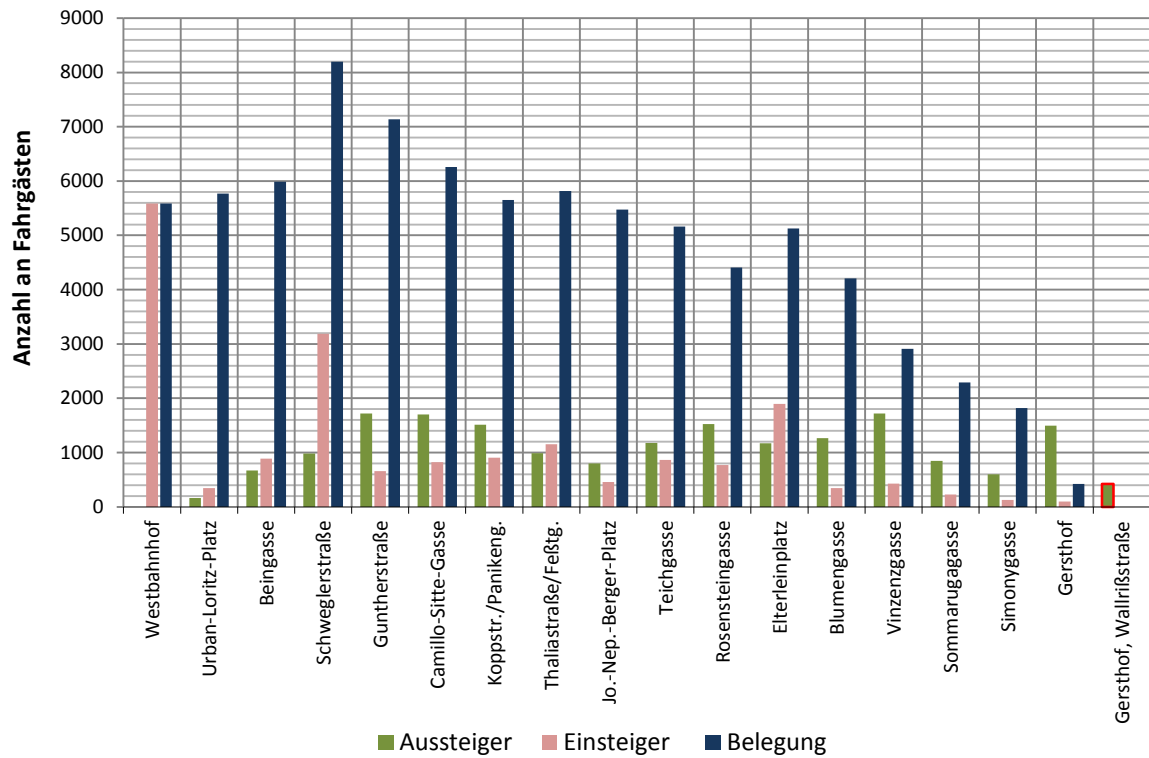


Abbildung 5.18: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 9 in Fahrrichtung *Gersthof, Wallrißstraße* (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien)

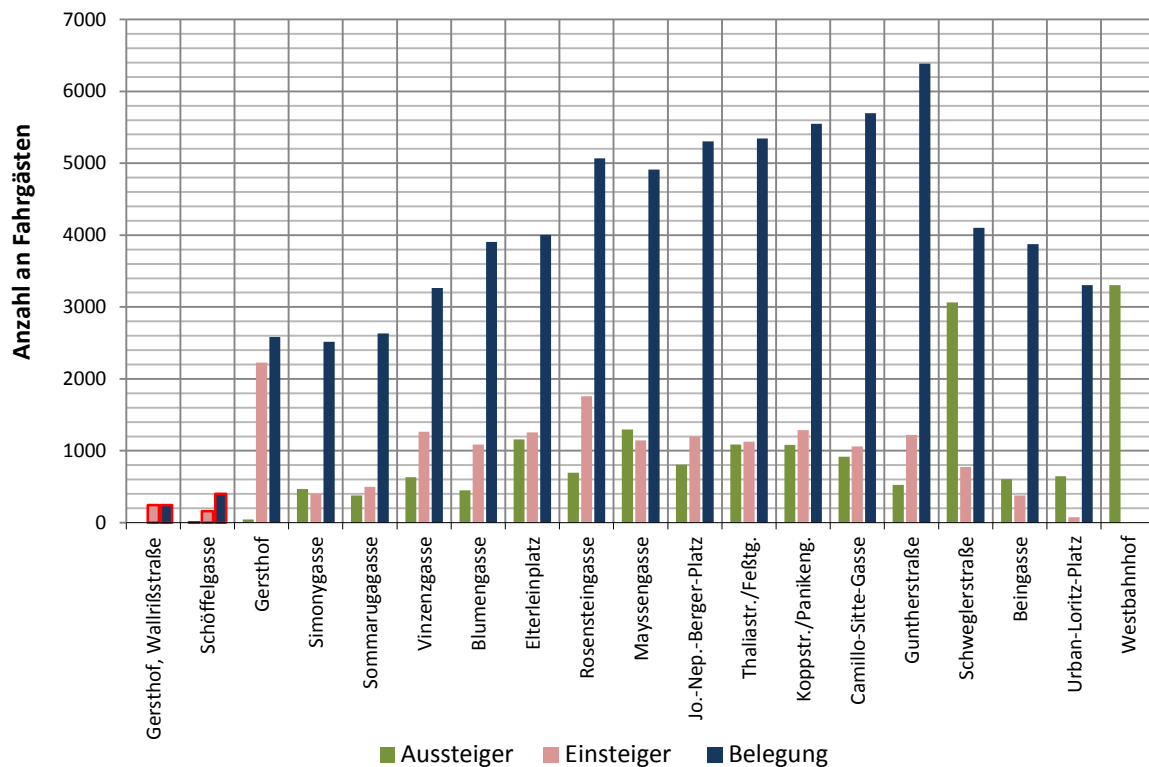


Abbildung 5.19: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 9 in Fahrrichtung *Westbahnhof* (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien)

Die Linie 40 verfügt in jenem Streckenabschnitt, der parallel zur Linie 9 betrieben wird, über ausreichend zusätzliche Fahrgastkapazitäten, sodass Fahrgäste der Linie 9 aufgenommen werden könnten.

Wird eine neue Wendeanlage für Zweirichtungsfahrzeuge im Osten der Schnellbahnhaltestelle *Gersthof* platziert, die in Abbildung 5.20 schematisch dargestellt ist, können pro Fahrt etwa 0,7 Kilometer entlang der in Abbildung 5.17 strichliert eingezeichneten Wendeschleife eingespart werden. Fahrzeuge der Linie 9 können über Gleis 2 und Gleis 3 wenden. Der hellrot hinterlegte Bereich muss von sonstigem Verkehr freigehalten werden. Eine Verbindung (Gleis 1 und Gleis 2) zwischen den Gleisen der Straßenbahnlinien 40 und 41 und der Straßenbahnlinie 9 muss aufgrund von erforderlichen Betriebsfahrten erhalten bleiben (siehe auch Abbildung 5.17). Dadurch kann zum einen im Bedarfsfall die Wendeschleife von der Linie 9 befahren werden, über die derzeit alle Fahrzeuge dieser Linie wenden. Zum anderen können im Fall von Laufwegunterbrechungen Umleitungsfahrten der Linien 40 und 41 ermöglicht werden. Schadhafte Fahrzeuge können im Bereich des Stumpfgleises abgestellt werden. Derzeit befinden sich in diesem Bereich zwei Hauptfahrgleise.

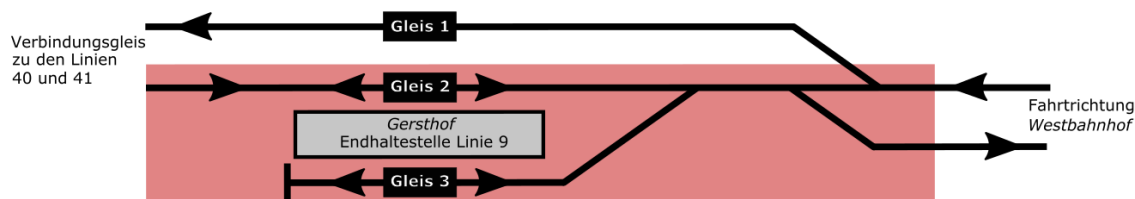


Abbildung 5.20: Schematisches Gleisschema im Haltestellenbereich *Gersthof* (Bereich *Simonygasse*) für einen möglichen Zweirichtungsbetrieb

5.2.2 Vergleich der Laufleistung¹⁰: Wendeschleifenfahrt – Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel

Formelzusammenhänge

Kann Fahrgästen der Linie 9, die ihr Fahrziel im Bereich der derzeitigen Wendeschleife haben, grundsätzlich ein Umstieg in die Linie 40 zugemutet werden, kann die Überlegung angestellt werden, welche Kosten durch ein Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel im Bereich der Haltestelle *Gersthof* eingespart werden können und welche Kosten bei einem Zweirichtungsbetrieb zusätzlich anfallen. Diese Kosten werden in einmalige und laufende Kosten unterteilt. Wesentliche einmalige Kosten sind:

- Höhere Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen im Vergleich zu Einrichtungsfahrzeugen

¹⁰ Als Laufleistung wird die Bewegung von Fahrzeugen, gemessen in Wagenkilometer je Zeiteinheit, bezeichnet (Adler, Fenner, Franke, Hofmann, Schümborg, Töpfer, 1976).

- Kosten für den Umbau des Bahnhofvorplatzes in Gersthof inklusive veränderter Gleisinfrastruktur und neuer Weichen (Abbildung 5.20)
- Kosten für ein Leit- und Sicherungssystem für einen Wendebetrieb mittels Fahrtrichtungswechsel im Haltestellenbereich *Gersthof*
- Gegebenenfalls Kosten für den Abbau beider Weichen des Überholgleises im Haltestellenbereich *Gersthof, Wallrißstraße*

Als laufende Kosten sind anzuführen:

- Höhere Instandhaltungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen im Gegensatz zu Einrichtungsfahrzeugen (zusätzliche Türen bei gleicher Fahrzeuglänge, zweiter Fahrerstand), jedoch Einsparung der Wendeschleifenfahrt im Zweirichtungsbetrieb und dadurch geringere Gesamtleistung aller Fahrzeuge der Linie 9
- Instandhaltungskosten einer zusätzlichen Weiche unter der Annahme, dass beide Weichen des derzeitigen Überholgleises in der derzeitigen Endhaltestelle abgebaut werden.

Eine Kehrfahrt auf den unteren beiden Gleisen aus Abbildung 5.20 kann annähernd mit jener in Kapitel 3.2.3 verglichen werden. Nachfolgenden Berechnungen für ein Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel werden Zweirichtungsfahrzeuge mit einer FZL von 25 Metern und einer AAZ von 75 Sekunden zugrundegelegt, da zurzeit 24,2 Meter lange Fahrzeuge auf der Linie 9 unterwegs sind. Bei Zweirichtungsfahrzeugen ergibt sich bei einem Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel nach Kapitel 3.2.3 eine Wendezeit von etwa vier Minuten. Sämtliche Fahrzeuge der Linie 9 mit einer regelmäßigen Zugfolgezeit von etwa zwei Minuten oder mehr können nach Formel 16 in Kapitel 4.1.4 mittels des abgebildeten Layouts in Abbildung 5.20 über die Gleise 2 und 3 mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet werden. Da das Wenden über die derzeitige Wendeschleife mit Einrichtungsfahrzeugen etwa fünf Minuten (Haltestellen und VLSA im Verlauf der Wendeschleife) beträgt, sind grundsätzlich keine zusätzlichen Fahrzeuge im Umlauf erforderlich.

Um die laufenden Kosten eines Zweirichtungsbetriebs monetär mit einem Einrichtungsbetrieb vergleichen zu können, werden im Folgenden empirische Formeln aufgestellt. Formel 27 berechnet anfallende Fahrzeug-Instandhaltungskosten im Einrichtungsbetrieb $K_{ER,ges}$, die sich aufgrund der Laufleistung aller Fahrzeuge ergeben. Die Anzahl an Fahrten in einem definierten Zeitraum wird mit F bezeichnet. Die Linienlänge in beide Fahrtrichtungen (doppelte Linienlänge¹¹) exklusive der betrachteten Wendeschleife gibt s_{Lin} an, die Wendeschleifenlänge ist durch s_{WS} gegeben. $K_{FZG,ER}$ definiert Instandhaltungskosten für Einrichtungsfahrzeuge pro gefahrenem Kilometer. Die pro Kilometer anfallenden Instandhaltungskosten am Fahrweg werden im Faktor K_{FW} berücksichtigt.

$$K_{ER,ges} = F * (s_{Lin} + s_{WS}) * (K_{FZG,ER} + K_{FW}) \quad (27)$$

¹¹ Doppelte Linienlänge: Fahrt von einer Endhaltestelle bis zur Endhaltestelle am anderen Linienende und retour

In der Betrachtung der Fahrzeug-Instandhaltungskosten eines Zweirichtungsbetriebs $K_{ZR,ges}$ entfällt zwar die Wendeschleifenfahrt, jedoch sind die Instandhaltungskosten eines Zweirichtungsfahrzeuges $K_{FZG,ZR}$ im Allgemeinen höher als jene eines Einrichtungsfahrzeuges.

$$K_{ZR,ges} = F * s_{Lin} * (K_{FZG,ZR} + K_{FW}) \quad (28)$$

Sind im Zweirichtungsbetrieb im Vergleich zum Einrichtungsbetrieb zusätzliche Weichen erforderlich, so müssen in der Gesamtbetrachtung die Instandhaltungskosten der Weichen pro Fahrt für alle zusätzlichen Weichen ΔK_{WW} abgezogen werden. Die Kostendifferenz $\Delta K_{ER,ZR}$ zwischen Fahrzeug-Instandhaltungskosten eines Ein- und Zweirichtungsbetriebs ergibt sich daher zu Formel 29. Ein positives $\Delta K_{ER,ZR}$ bedeutet, dass ein Zweirichtungsbetrieb die kostengünstigere Variante darstellt.

$$\Delta K_{ER,ZR} = K_{ER,ges} - (K_{ZR,ges} + \Delta K_{WW} * F) \quad (29)$$

Annahme von Parametergrößen

Für Kostengrößen werden geschätzte Annahmen getroffen. Im Folgenden finden sich die angenommenen Größen der verwendeten Parameter:

- Bandbreite für Instandhaltungskosten von Einrichtungsfahrzeugen $K_{FZG,ER}$: 1,00 €/km bis 3,00 €/km
- Kostenzuschlag von 4 % bis 10 % für die Instandhaltung von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen derselben Länge
 - Bandbreite für Instandhaltungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen $K_{FZG,ZR}$: 1,04 €/km bis 3,30 €/km
- Mehrkosten in der Anschaffung von Zweirichtungsfahrzeugen im Vergleich zu Einrichtungsfahrzeugen derselben Länge: 200.000 €/Fahrzeug bis 400.000 €/Fahrzeug
- Anzahl der Fahrten F der Linie 9 innerhalb eines Jahres über die Wendeschleife: 45.000 (Wiener Linien, 2020)
- Doppelte Linienlänge s_{lin} der Straßenbahnlinie 9 (beide Fahrtrichtungen) ohne der Wendeschleife in Gersthof: 11,9 Kilometer
- Kosten für die Instandhaltung des Fahrweges K_{FW} und zusätzliche Weicheninstandhaltungskosten ΔK_{WW} werden nicht berücksichtigt.

Kostenvergleich: Betrieb

Obige Formelzusammenhänge werden in Abbildung 5.21 mit den konstanten Parametern *Linienlänge* s_{Lin} sowie *Anzahl an Fahrten* F grafisch dargestellt. Auf der horizontalen Achse ist die Distanz pro Kurs dargestellt, die mittels Zweirichtungsfahrzeugen aufgrund einer nicht befahrenen Wendeschleifenlänge s_{WS} (Linie 9 nach Abbildung 5.17: 0,7 Kilometer) eingespart werden kann. Die betrachtete Wendeschleifenlänge der Linie 9 in Gersthof ist mittels einer schwarzen, vertikalen Geraden dargestellt. Auf der vertikalen Achse lässt sich entlang dieser

Geraden die mittels der angenommenen Parameter monetäre Einsparung (positiv) bzw. der monetäre Zusatzaufwand (negativ) für einen Zweirichtungsbetrieb gegenüber einem Einrichtungsbetrieb ablesen.

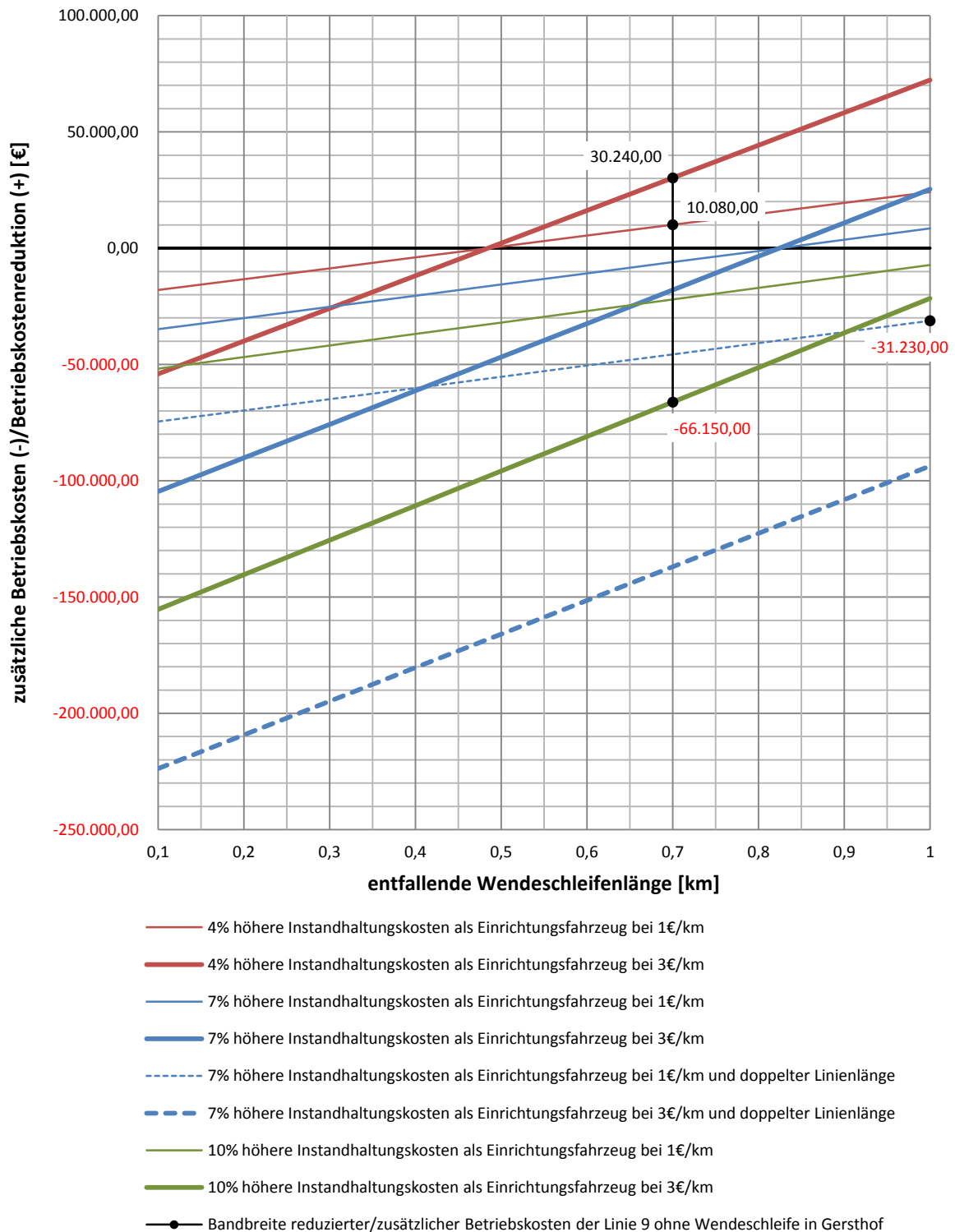


Abbildung 5.21: Jährliche zusätzliche Betriebskosten/Betriebskostenreduktion durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 9

Roten Geraden in Abbildung 5.21 liegt die Annahme von 4 %, blauen Geraden jene von 7 % und grünen Geraden jene von 10 % höheren Instandhaltungskosten am Zweirichtungsfahrzeug gegenüber einem Einrichtungsfahrzeug derselben Länge zugrunde. Die unterschiedlichen Steigungen der Geraden ergeben sich durch unterschiedliche Annahmen von Instandhaltungskosten pro Kilometer am Einrichtungsfahrzeug.

Durch das Einsparen der Fahrten der Linie 9 über die 700 Meter lange Wendeschleife in Gersthof ergibt sich bei Instandhaltungskosten von 3 €/km am Einrichtungsfahrzeug und 4 % höheren Instandhaltungskosten am Zweirichtungsfahrzeug derselben Länge eine höchstmögliche Einsparung von 30.240 € Instandhaltungskosten pro Jahr. Auch bei Instandhaltungskosten von 1 €/km am Einrichtungsfahrzeug und 4 % höheren Instandhaltungskosten am Zweirichtungsfahrzeug wird eine Einsparung von 10.080 € pro Jahr erzielt.

Liegen die Instandhaltungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen 7 % bzw. 10 % über jenen des Einrichtungsfahrzeuges, ergibt sich im Betrieb der Linie 9, deren 0,7 Kilometer lange Wendeschleife in Gersthof aufgrund eines Zweirichtungsbetriebs nicht befahren wird, in allen untersuchten Fällen ein Verlust. Dieser Verlust kann bis zu 66.150 € pro Jahr betragen.

Strichliert dargestellte, blaue Geraden stellen exemplarisch das monetäre Ergebnis für 7 % höhere Instandhaltungskosten des Zweirichtungsfahrzeuges bei einer doppelt so langen Linie dar, wenn dieselbe Wendeschleifenlänge von 0,7 Kilometer eingespart werden könnte. Im betrachteten Ausschnitt der eingesparten Wendeschleifenlänge würde dies zu zusätzlichen Betriebskosten von zumindest 31.230 € pro Jahr führen.

Kostenvergleich: Fahrzeuge

Entlang der Linie 9 sind zur Hauptverkehrszeit 13 Einrichtungsfahrzeuge im Umlauf (Wiener Linien, 2020). Zuzüglich einer Fahrzeugreserve für die Instandhaltung von zehn Prozent werden in Summe 15 Fahrzeuge benötigt. Um ein Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel im Bereich der Schnellbahnhaltestelle *Gersthof* realisieren zu können, müssen daher zumindest 15 Zweirichtungsfahrzeuge angeschafft werden. Die Anschaffung von Zweirichtungsfahrzeugen bedingt Mehrkosten gegenüber Einrichtungsfahrzeugen im Bereich zwischen 200.000 € und 400.000 € je Fahrzeug.

Kostenvergleich: Betrieb – Fahrzeuge

Abbildung 5.22 zeigt drei horizontale Geraden, die die einmalig anfallenden, höheren Kosten von 15 Zweirichtungsfahrzeugen abbilden. Die rote Gerade stellt die höchstmöglichen kumulierten Einsparungen aus Abbildung 5.21 (30.240 €/Jahr) des Betriebs der Linie 9 bei einem Entfall aller Fahrten über die Wendeschleife dar. Nach erst etwa 100 Jahren Betrieb erreichen die kumulierten, höchstmöglich einzusparenden Kosten die zusätzlichen Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen, für die um 200.000 € pro Stück mehr aufgewendet werden müssen als bei einem Einrichtungsfahrzeug derselben Länge. Die höchstmöglichen Einsparungen im Zweirichtungsbetrieb sowie die geringsten zusätzlichen Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen nach einer Betriebsdauer von 30 Jahren sind mittels schwarzer Rauten

dargestellt. Etwaige, zusätzlich erforderliche Kosten für die notwendige Neuerrichtung der Wendeanlage in Gersthof inklusive Leit- und Sicherungssystem sowie Weicheninstandhaltungskosten werden nicht berücksichtigt. Sie würden jedoch den Schnittpunkt der beiden Geraden weiter nach rechts verschieben.

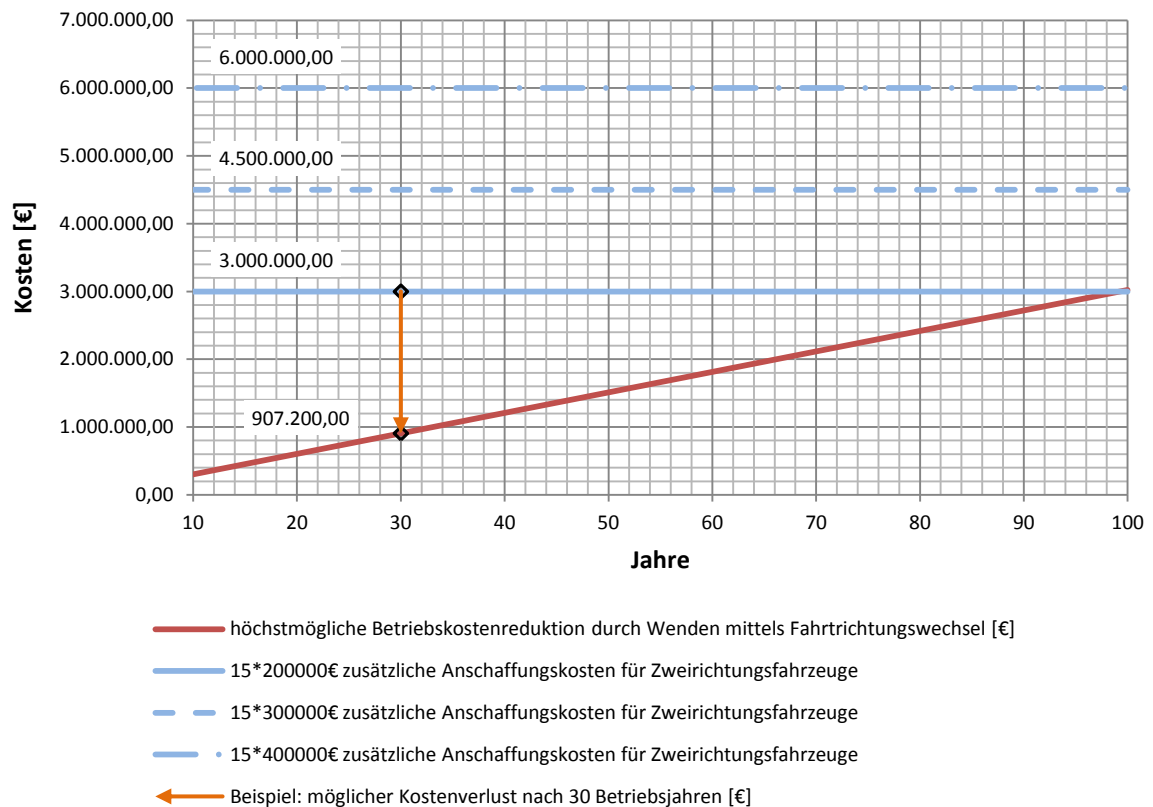


Abbildung 5.22: Kostenvergleich der Linie 9: zusätzliche Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen – Betriebskostenreduktion durch Einsparung einer Wendeschleifenfahrt

5.2.3 Fazit zum Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 9

Diesem Kapitel wurde zugrundegelegt, dass Zweirichtungsfahrzeuge für den Betrieb der Linie 9 ausschließlich zum Zweck beschafft werden, um eine Wendeschleifenfahrt einsparen zu können. Betrachtet man den erzielten wirtschaftlichen Effekt mit den angenommenen Größen der verwendeten Parameter, zeigt sich Folgendes: Die höchstmöglichen Einsparungen durch eine entfallende Wendeschleifenfahrt liegen bei 30.240 € pro Jahr. Die kumulierten Kosten der höchstmöglichen Einsparung liegen jedoch nach einer üblichen Einsatzdauer eines Straßenbahnfahrzeuges (30 – 40 Jahre) bei etwa einem Drittel der geringsten, zusätzlichen Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen (schwarze Rauten in Abbildung 5.22). Weitere einmalige Kosten (Umbau des Bahnhofsvorplatzes für eine neue Wendeanlage, zusätzliche Weichen) sowie höhere Weicheninstandhaltungskosten aufgrund einer höheren Anzahl an Weichen sowie laufende Kosten im Bereich der baulichen Infrastruktur werden nicht berücksichtigt.

Mittels Umstellung auf einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 9, der zum Wenden in Gersthof kein Befahren der 0,7 Kilometer langen Wendeschleife erfordert, kann daher kein wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden. Werden im weiteren Linienverlauf der Linie 9 keine baulichen Änderungen für neue dispositive Möglichkeiten im Zweirichtungsbetrieb vorgenommen, wie sie in Kapitel 5.1.1 für die Linie 26 dargestellt wurden, können mittels der eingesetzten Zweirichtungsfahrzeuge keine Vorteile für Fahrgäste und Betrieb geschaffen werden.

5.3 Linie 49

In Kapitel 5.1 und 5.2 wurde ein Zweirichtungsbetrieb der Tangentiallinien 26 und 9 analysiert. Die in diesem Kapitel dargestellte Radiallinie 49 wird zum Großteil in Parallelführung zu anderen Straßenbahn-, U-Bahn- und Autobuslinien geführt. Den Verlauf der Linie 49 zeigen Abbildung 5.23 und Abbildung 5.24. Der Übersichtlichkeit halber sind in diesen Abbildungen nur ausgewählte Haltestellen beschriftet.

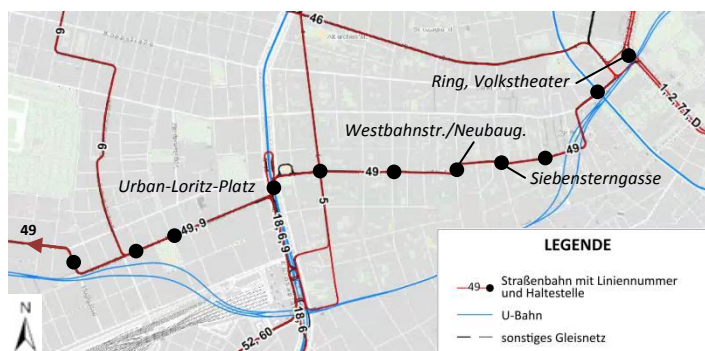


Abbildung 5.23: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 49, Abschnitt Ost (Quelle: Wiener Linien)



Abbildung 5.24: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 49, Abschnitt West (Quelle: Wiener Linien)

Abbildung 5.21 in vorherigem Kapitel 5.2 verdeutlicht die Kostenentwicklung, wenn Wendeschleifenfahrten durch ein vorzeitiges Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel ersetzt werden. Diese Überlegung kann nicht nur auf eine Wendeschleifenfahrt, sondern auch auf den Verlauf einer Linie angewandt werden, die sich durch stark variierende Fahrgastbelegungen entlang ihres Linienverlaufes für eine abschnittsweise Anpassung des Intervalls durch vorzeitiges Wenden einiger Fahrzeuge eignet.

5.3.1 Fahrgastzahlen und Auslastung

Abbildung 5.25 und Abbildung 5.26 zeigen, dass die Änderung in der Fahrgastbelegung der Straßenbahnlinie 49 an der Haltestelle *Hütteldorfer Straße* in beiden Fahrrichtungen besonders groß ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass an dieser Haltestelle eine Umsteigemöglichkeit zur U-Bahnlinie U3 besteht und die Straßenbahnlinie 49 von dort bis zur östlichen Endhaltestelle *Ring, Volkstheater* in naher Parallelführung zur U-Bahnlinie U3 geführt wird. Die Bereiche der höchsten Fahrgastbelegungen sind rot markiert.

Abbildung 5.25 zeigt, dass mehr als 98 % der Fahrgäste, die sich nach der Haltestelle *Breitensee* in Fahrtrichtung *Ring, Volkstheater* in den Fahrzeugen der Linie 49 befinden, an der Haltestelle *Hütteldorfer Straße* aussteigen. Der Sprung in der Fahrgastbelegung lässt darauf schließen, dass ein Großteil der Fahrgäste die Straßenbahnlinie 49 im Linienabschnitt zwischen *Hütteldorf, Bujattigasse* und *Hütteldorfer Straße* als Zubringer zur U-Bahnlinie U3 benützt. Zur Hauptverkehrszeit liegt das Intervall entlang der Linie 49 bei etwa drei Minuten. Dieses richtet sich nach der erforderlichen Personenleistungsfähigkeit¹² im Bereich der Haltestellen *Breitensee* und *Hütteldorfer Straße*.

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Personenleistungsfähigkeit entlang der Linie 49 an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden kann. Zweirichtungsfahrzeuge ermöglichen in diesem Zusammenhang neue, kompakte Wendeanlagen. Die Errichtung neuer Wendeschleifen ist nicht erforderlich.

¹² Anzahl an Fahrgästen, die in einem definierten Zeitraum mittels Fahrzeugen einer Linie transportiert werden können (Ostermann, Rollinger, 2016, S.156).

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

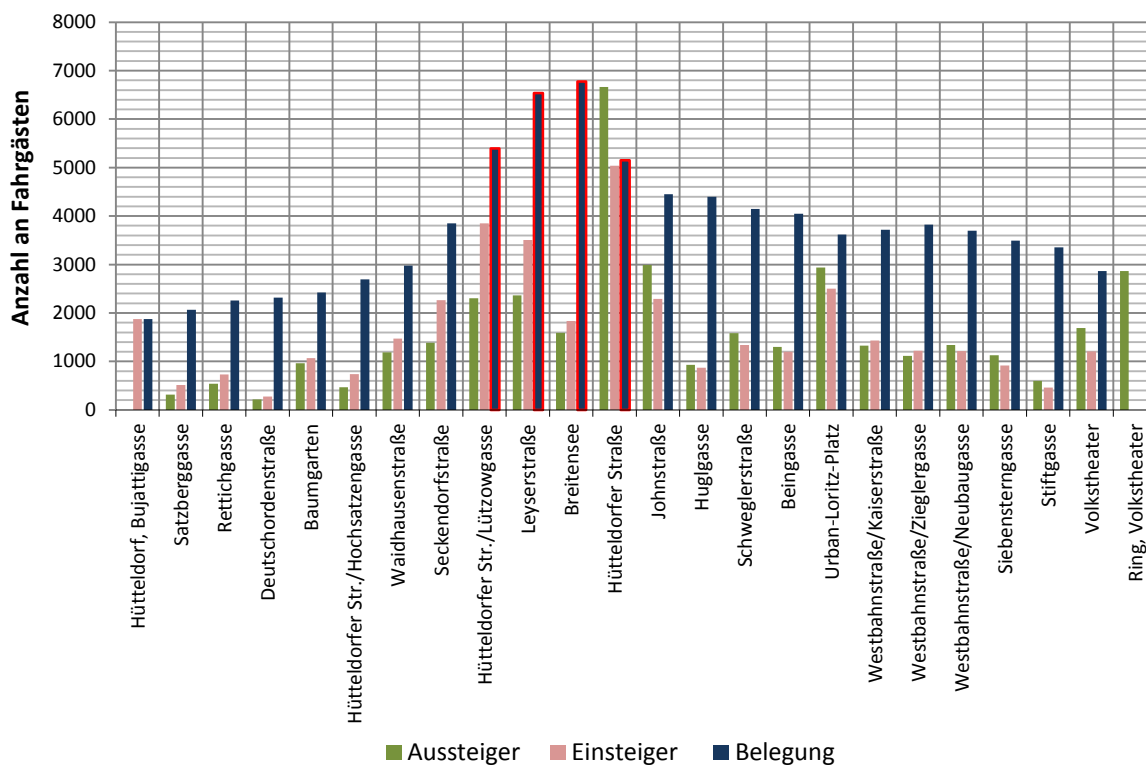


Abbildung 5.25: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 49 in Fahrtrichtung *Ring, Volkstheater* (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien)

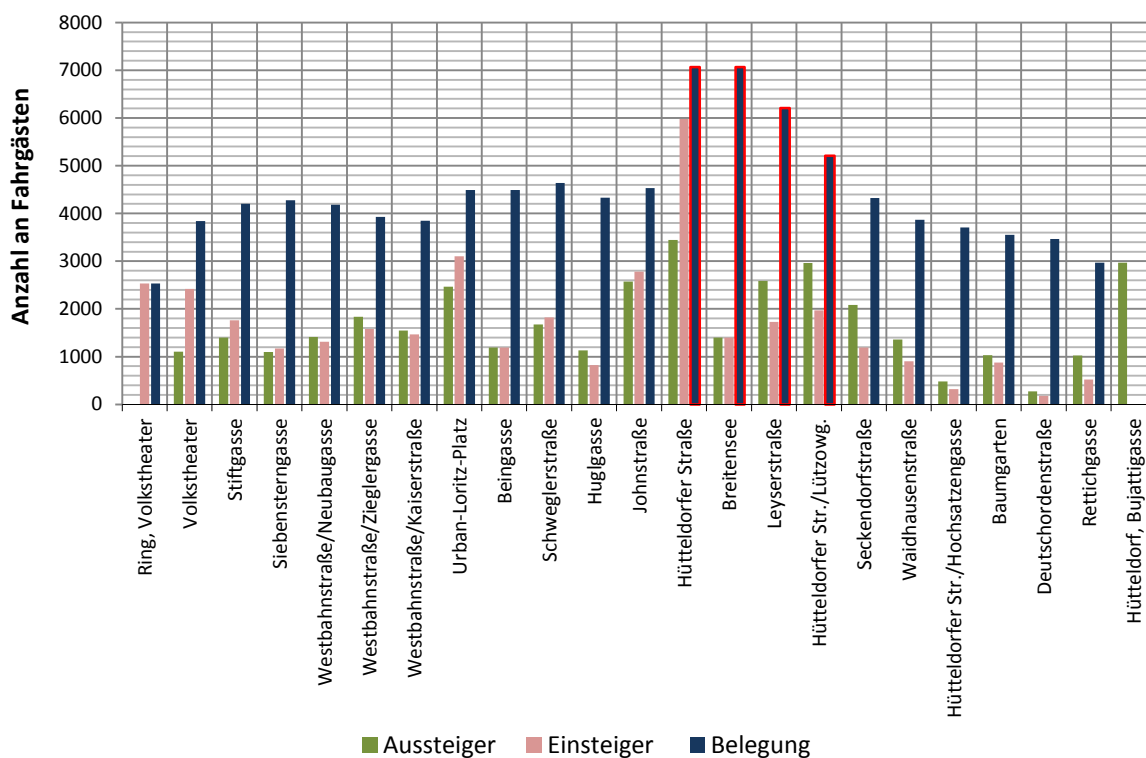


Abbildung 5.26: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 49 in Fahrtrichtung *Hütteldorf, Bujattiggasse* (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien)

5.3.2 Optimiertes Linienkonzept mittels Zweirichtungsfahrzeugen

Im Bereich der höchsten Fahrgastbelegung zwischen den Haltestellen *Baumgarten* und *Johnstraße* wird für folgende Untersuchung die bestehende Linie 49 durch eine Linie 50 überlagert. Die Linie 50 verstärkt den Zubringerverkehr in Richtung der U-Bahnlinie U3. Werden die Linien 49 und 50 zur Hauptverkehrszeit jeweils im Sechs-Minutentakt betrieben, ergibt dies zwischen den Haltestellen *Baumgarten* und *Johnstraße* einen überlagerten Drei-Minutentakt. Die Haltestellen des restlichen Linienastes der Linie 49 können im Sechs-Minutentakt bedient werden.

Abbildung 5.27 gibt einen schematischen Überblick über den Linienverlauf, wobei in dieser Grafik ausschließlich die U-Bahnlinie U3 als weitere Linie des ÖPNV dargestellt ist. Unterhalb der Linienverläufe der beiden Straßenbahnlinien sind die Gesamt-Reisezeiten je Straßenbahnlinie und Fahrtrichtung angegeben. Zum Wenden an der westlichen Endhaltestelle *Baumgarten* befährt die Linie 50 die Wendeschleife der Straßenbahnlinie 52. Diese Wendeschleife verfügt derzeit über zwei Gleise. Um im Haltestellenbereich *Johnstraße* auch im Falle von Laufwegunterbrechungen wenden zu können, werden auf beiden Linien Zweirichtungsfahrzeuge eingesetzt.

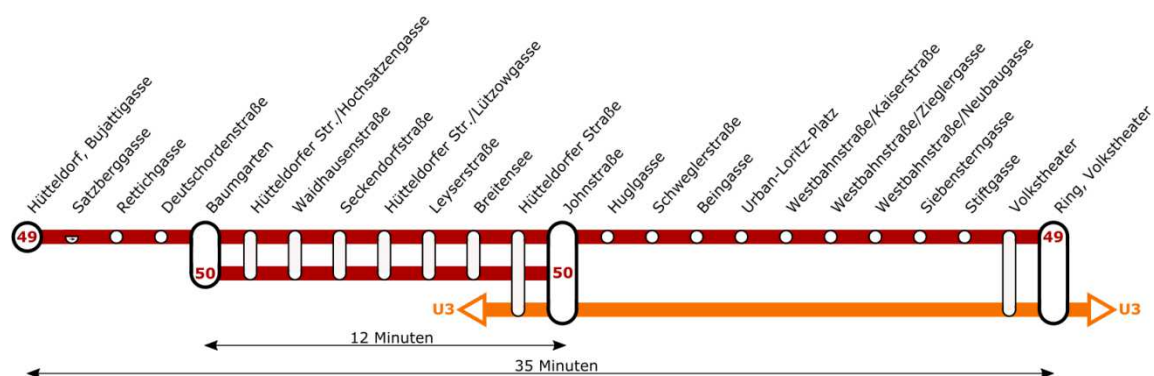


Abbildung 5.27: Überlagertes Linienkonzept der Linien 49 und 50

Eine mögliche Anordnung der Wendeanlage im Haltestellenbereich *Johnstraße* ist in Abbildung 5.28 dargestellt. Im Normalbetrieb verkehrt auf den Gleisen 1 und 3 die Linie 49. Das mittlere Gleis 2 wird zum Wenden von Fahrzeugen der Linie 50 verwendet. Das gezeigte Haltestellenschema erfordert, dass auch die Linie 49 mit Zweirichtungsfahrzeugen betrieben wird, da ein Mittelbahnsteig bedient wird. Der Mittelbahnsteig ermöglicht es Fahrgästen, ohne Queren der Gleise sowohl in Fahrzeuge der Linie 49, als auch der Linie 50 einsteigen zu können. Der hellrot hinterlegte Bereich muss für den Wendebetrieb von sonstigem Verkehr freigehalten werden.

Derzeit werden entlang der Linie 49 35,5 Meter lange Einrichtungsfahrzeuge eingesetzt. Nach Kapitel 3.2.3 benötigen Zweirichtungsfahrzeuge mit einer Länge von 35 Metern und einer AAZ von 75 Sekunden für ein Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel gerundet viereinhalb Minuten. Fahrzeuge der Linie 50, die im Normalbetrieb im regelmäßigen Sechs-Minutentakt verkehren, können daher in der Haltestelle *Johnstraße* über Gleis 2 in Abbildung 5.28 gewendet werden,

ohne, dass es zu einem sich aufbauenden Rückstau an Fahrzeugen kommt. Der Großteil der Pausen- und Pufferzeiten der Linie 50 muss jedoch im Bereich der Wendeschleife *Baumgarten* eingehalten werden. Im Bereich des oberen Richtungsbahnsteiges kann ein Leitsystem Fahrgästen die chronologischen Abfahrten beider Linien anzeigen. Spitz zu befahrene Weichen sowie Ablenkungen im Bogen erfordern reduzierte Geschwindigkeiten im Bereich der Wendeanlage.

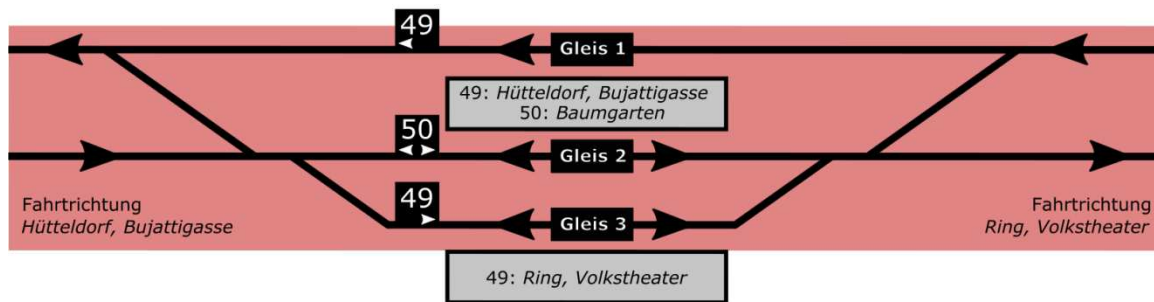


Abbildung 5.28: Schematische Darstellung der Wendeanlage (Endhaltestelle der Linie 50) im Haltestellenbereich *Johnstraße*

Die dargestellte Wendeanlage schafft für den Fall einer Laufwegunterbrechung eine zusätzliche Kurzwendemöglichkeit. Für das Kurzwenden aus beiden Fahrtrichtungen stehen im gezeigten Gleiskonzept die Gleise 2 und 3 zur Verfügung. Nach Formel 16 in Kapitel 4.1.4 ergibt sich bei einer Zugfolgezeit von drei Minuten der überlagerten Linien 49 und 50 ein Faktor A von 0,75. Dies besagt, dass sich im Falle einer Laufwegunterbrechung bei einer regelmäßigen Zugfolgezeit keine Fahrzeuge vor der Wendeanlage zusätzlich aufstauen.

Bei einem überlagerten Linienbetrieb würden sich in Fahrzeugen der Linie 49 in Fahrtrichtung *Hütteldorf, Bujattigasse* an der Haltestelle *Johnstraße* bereits durchreisende Fahrgäste in der Straßenbahn befinden. Die Kapazität von Fahrzeugen der Linie 50 stünde jedoch zur Gänze wartenden Fahrgästen in der Haltestelle *Johnstraße* zur Verfügung. Würden auf den Linien 49 und 50 Fahrzeuge gleicher Gefäßgröße¹³ eingesetzt, könnte ein versetzter Takt möglichst gleichmäßig besetzte Fahrzeuge erzielen. Ein Fahrzeug der Linie 49 könnte beispielsweise zwei Minuten nach der Abfahrt der Linie 50, die Linie 50 vier Minuten nach Abfahrt der Linie 49 verkehren. Alternativ zu einem versetzten Takt könnten entlang der Linie 49 Zweirichtungsfahrzeuge mit einer höheren Gesamt-Fahrgastkapazität eingesetzt werden, um an den Haltestellen *Johnstraße* und *Hütteldorfer Straße* ebenso viele Fahrgäste aufnehmen zu können wie Fahrzeuge der Linie 50.

5.3.3 Vergleich der Laufleistung: Linie 49 – überlagertes Linienkonzept der Linien 49 & 50

In Kapitel 5.2.2 wurde dargestellt, wie sich Kosten durch einen Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen entwickeln, aufgrund derer das Befahren einer Wendeschleife nicht

¹³ Die Gefäßgröße definiert die Gesamt-Fahrgastkapazität eines Fahrzeuges des ÖPNV (Schnieder, 2018, S.67).

erforderlich ist. Analog dazu lässt sich ein Kostenvergleich der derzeit betriebenen Straßenbahnlinie 49 mittels Einrichtungsfahrzeugen zu oben dargestelltem, überlagertem Linienkonzept der Linien 49 und 50 mittels Formeln aus Kapitel 5.2.2 darstellen.

Annahme von Parametergrößen

Im Fall des überlagerten Linienbetriebs entspricht die um die Wendeschleifenlänge reduzierte Linienlänge der Linie 9 nun der nicht zu befahrenen Strecke der Linie 50. Zusätzlich zu den Berechnungen in Kapitel 5.2.2 wird berücksichtigt, dass nur ein gewisser Prozentsatz der Fahrten auf die Linie 50 entfällt. Um weitere dispositive Maßnahmen im Verlauf der Strecke zu ermöglichen, wird auch die Linie 49 mit Zweirichtungsfahrzeugen betrieben. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Doppelte Linienlänge s_{Lin} der Linie 49 (*Hütteldorf, Bujattigasse – Ring, Volkstheater – Hütteldorf, Bujattigasse*): 17,2 Kilometer
- Doppelte Linienlänge s_{Lin} der Linie 50 (*Baumgarten – Johnstraße – Baumgarten*): 7,8 Kilometer (Die Länge kann je nach Lage der Wendeanlage geringfügig variieren.)
- 60.000 Fahrten F pro Jahr im Bereich der überlagerten Linien 49 und 50 (Wiener Linien, 2020)
- 35 % aller Fahrten (21.000) entfallen auf Fahrten der Linie 50, da zu den Schwachverkehrszeiten ausschließlich die Linie 49 betrieben werden soll. Dieses prozentuelle Verhältnis entspricht jenem der derzeit betriebenen Straßenbahnlinien 30 und 31. Dort dient im Abschnitt der Linie 31 mit der höchsten Fahrgastbelegung die Straßenbahnlinie 30 als Zusatzlinie. (Wiener Linien, 2020)
- Bandbreite für Instandhaltungskosten von Einrichtungsfahrzeugen $K_{\text{FZG,ER}}$: 1,00 €/km bis 3,00 €/km
- Kostenzuschlag von 4 % bis 10 % für die Instandhaltung von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen derselben Länge
 - Bandbreite für Instandhaltungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen $K_{\text{FZG,ZR}}$: 1,04 €/km bis 3,30 €/km
- Mehrkosten in der Anschaffung von Zweirichtungsfahrzeugen im Vergleich zu Einrichtungsfahrzeugen derselben Länge: 200.000 €/Fahrzeug bis 400.000 €/Fahrzeug
- Kosten für die Instandhaltung des Fahrweges K_{FW} und zusätzliche Weicheninstandhaltungskosten ΔK_{WW} werden nicht berücksichtigt.

Kostenvergleich: Betrieb

Analog zu Abbildung 5.21 gibt Abbildung 5.29 Aufschluss darüber, ob mittels des dargestellten Linienkonzepts aus Abbildung 5.27 Einsparungen oder zusätzliche Betriebskosten gegenüber dem bisherigen Einrichtungsbetrieb der Linie 49 erzielt werden. Da 35 % der Fahrten eine um fast zehn Kilometer kürzere Strecke befahren, ergibt dies pro Jahr eine Reduktion der Betriebskosten um bis zu 492.048 €, wenn 4 % höhere Instandhaltungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen bei 3 €/km angenommen werden. Werden 10 % höhere Instandhaltungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

Einrichtungsfahrzeugen und Instandhaltungskosten von 1 €/km zugrundegelegt, können im Zweirichtungsbetrieb 113.940 € pro Jahr eingespart werden. Im Gegensatz zu den Berechnungen der Linie 9 treten hier bei keinen der angenommenen Parameter Mehrkosten gegenüber einem Einrichtungsbetrieb auf. Die Bandbreite einer möglichen Betriebskostenreduktion ist mittels einer vertikalen, schwarzen Gerade dargestellt.

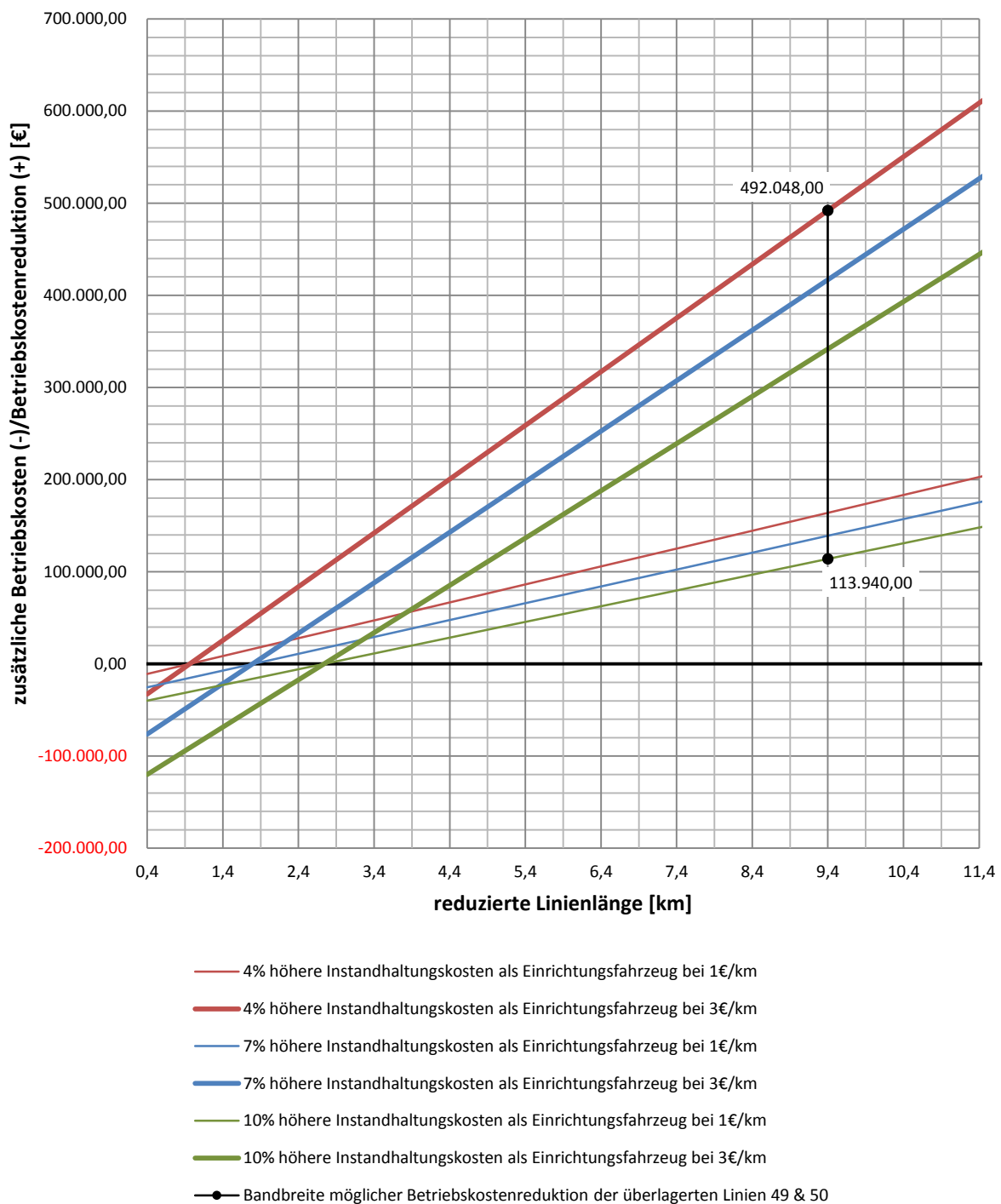


Abbildung 5.29: Jährliche Betriebskostenreduktion durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf den Linien 49 & 50

Kostenvergleich: Fahrzeuge

Um einen Vergleich zu den zusätzlichen Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen herstellen zu können, muss berechnet werden, ob zumindest gleich viele Zweirichtungsfahrzeuge für einen Betrieb der überlagerten Linien 49 und 50 wie Einrichtungsfahrzeuge für den Betrieb der Linie 49 benötigt werden. Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

- Gesamt-Reisezeit t_{RZ} pro Fahrtrichtung nach Abbildung 5.27
- Summe aus Pausenzeit t_{pa} , Pufferzeit t_{pu} und Synchronisationszeit t_{syn} in beiden Fahrtrichtungen: Sieben Minuten
- Wendezeit t_{WZ} :
 - Linie 49 (*Hütteldorf, Bujattigasse, Wendeschleife*): Eine Minute
 - Linie 49 (*Ring, Volkstheater, Wendeschleife*): Null Minuten, die Endhaltestelle liegt entlang der Wendeschleife, die Wendezeit ist Teil der Gesamt-Reisezeit
 - Linie 50 (*Baumgarten, Wendeschleife*): Eine Minute
 - Linie 50 (*Johnstraße, Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel, verkürzte Wendezeit $t_{WZ, kurz; SG}$*): 3,5 Minuten, die Ein- und Ausfahrt aus dem Stumpfgleis geht für die Berechnung der erforderlichen Fahrzeuge in der Gesamt-Reisezeit ein
- Intervall je Linie t_{int} : Sechs Minuten, überlagertes Intervall: Drei Minuten

Nach Formel 12 in Kapitel 3.3.4 werden zur Hauptverkehrszeit unter obigen Annahmen 13 Zweirichtungsfahrzeuge für den Betrieb der Linie 49 und sechs Zweirichtungsfahrzeuge für den Betrieb der Linie 50 benötigt. Inklusive einer Fahrzeugreserve von zehn Prozent für die Instandhaltung entspricht dies 21 Zweirichtungsfahrzeugen. Derzeit sind zur Hauptverkehrszeit 23 Einrichtungsfahrzeuge für den Betrieb der Linie 49 erforderlich (Wiener Linien, 2020). Die Differenz der erforderlichen Anzahl an Fahrzeugen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb wird im Kostenvergleich nicht berücksichtigt, da hierbei zusätzlich u.a. Personal- und Energiekosten (Traktionsstrom) in die Analyse einfließen müssten, kann jedoch in einem ausgedünnten Takt entlang eines Teils der Linie begründet werden. Es wird angenommen, dass die Erhöhung des Intervalls von drei auf sechs Minuten keine Auswirkungen auf die Zufriedenheit der Fahrgäste hat (Walther 1973, S.57 f.).

Kostenvergleich: Betrieb – Fahrzeuge

Abbildung 5.30 veranschaulicht, dass die kumulierte jährliche Betriebskostenreduktion im Zweirichtungsbetrieb der Linien 49 und 50 die Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen im Bereich zwischen etwa acht und 74 Jahren übersteigen können. Nimmt man die höchstmöglichen Kosteneinsparungen (fette, rote Gerade) sowie die geringsten zusätzlichen Investitionskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen an (blaue Gerade), können Zweirichtungsfahrzeuge im Zeitraum ihrer Einsatzdauer (30 – 40 Jahre) ein positives wirtschaftliches Ergebnis erzielen. Mit den geringsten Kosteneinsparungen pro Jahr (dünne, rote Gerade) in Kombination mit sehr hohen zusätzlichen Anschaffungskosten für

Zweirichtungsfahrzeuge (400.000 €/Stück) gegenüber Einrichtungsfahrzeugen können Zweirichtungsfahrzeuge im betrachteten Fall keinen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Einrichtungsfahrzeugen im Zeitraum ihrer Einsatzdauer erzielen. Ein oranger Pfeil zeigt die höchstmöglichen Kosteneinsparungen nach einer Dauer von 30 Jahren.

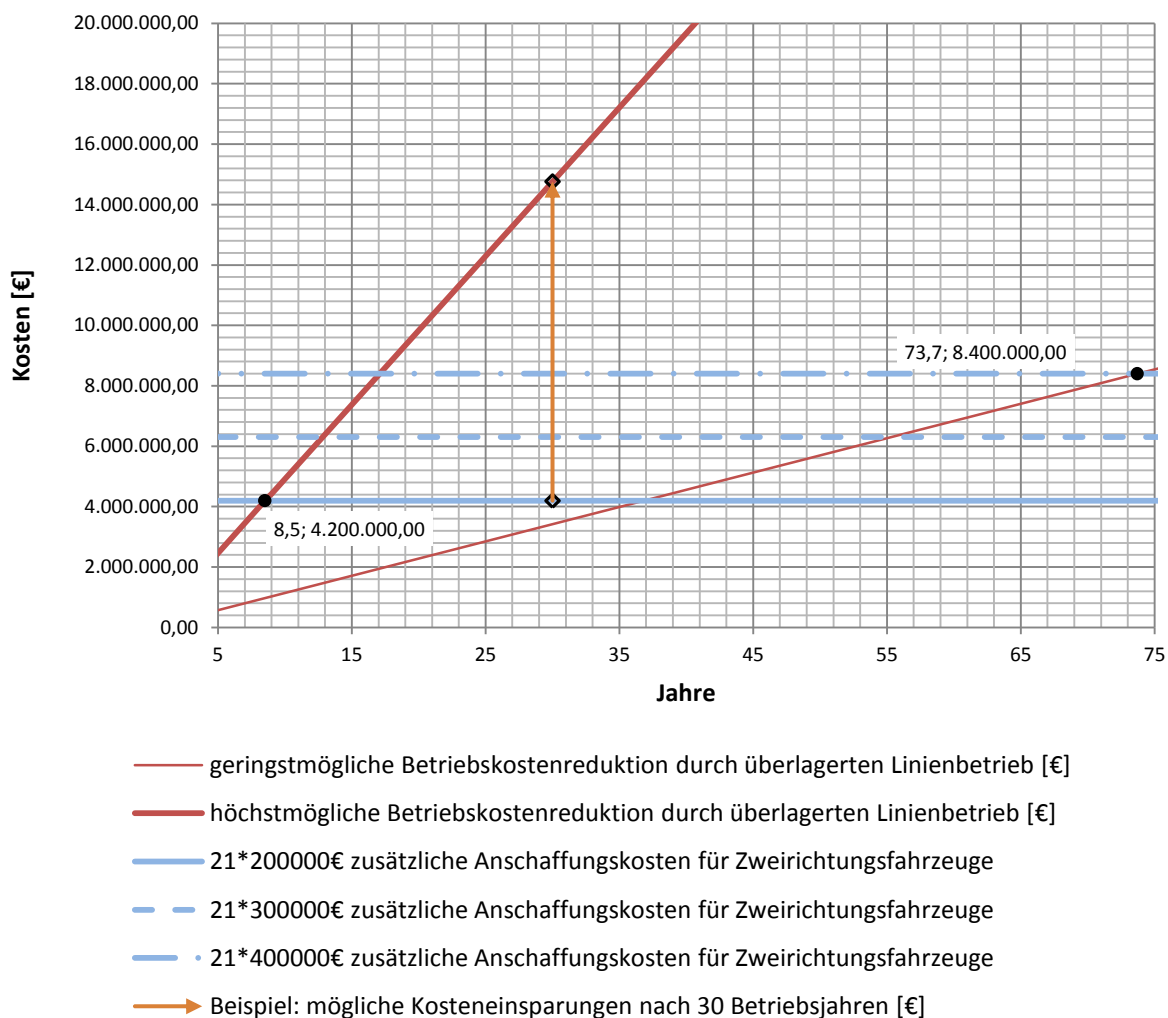


Abbildung 5.30: Kostenvergleich der Linien 49 & 50: zusätzliche Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen – Betriebskostenreduktion durch überlagerten Linienbetrieb

5.3.4 Zusätzliche dispositive Möglichkeiten für Zweirichtungsfahrzeuge

Ungeachtet der wirtschaftlichen Aspekte können mit Zweirichtungsfahrzeugen im Zusammenhang mit weiteren baulichen Maßnahmen zusätzliche dispositive Möglichkeiten geschaffen werden. Ein selbstständiger Gleiskörper im Abschnitt der höchsten Fahrgastbelegung zwischen den Haltestellen *Hütteldorfer Straße* und *Baumgarten* würde einen Gleiswechselbetrieb, Pendelbetrieb sowie einen Betrieb mit Stichfahrten ermöglichen. Da in diesem Bereich jedoch derzeit kein selbstständiger Gleiskörper vorhanden ist, würde diese

Maßnahme weitreichende Einschränkungen für den MIV und Radverkehr mit sich ziehen und wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Dennoch ergeben sich durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen und neuen Gleisverbindungen im Bereich der Haltestellen *Waidhausenstraße* und *Hütteldorfer Str./Lützowgasse* sowie zwischen den Haltestellen *Westbahnstraße/Neubaugasse* und *Siebensterngasse* weitere Kurzwendemöglichkeiten für Zweirichtungsfahrzeuge. Bei punktuellen Laufwegunterbrechungen kann dadurch im Störungsbetrieb eine größere Anzahl an Haltestellen bedient werden als es derzeit möglich ist. In Abbildung 5.31 sind die dispositiven Möglichkeiten entlang der Linie 49 dargestellt. Jene Haltestellen, an denen ausschließlich im Zweirichtungsbetrieb gewendet werden kann, sind gelb markiert.

5 Untersuchung eines Zweirichtungsbetriebs am Beispiel des Wiener Straßenbahnnetzes

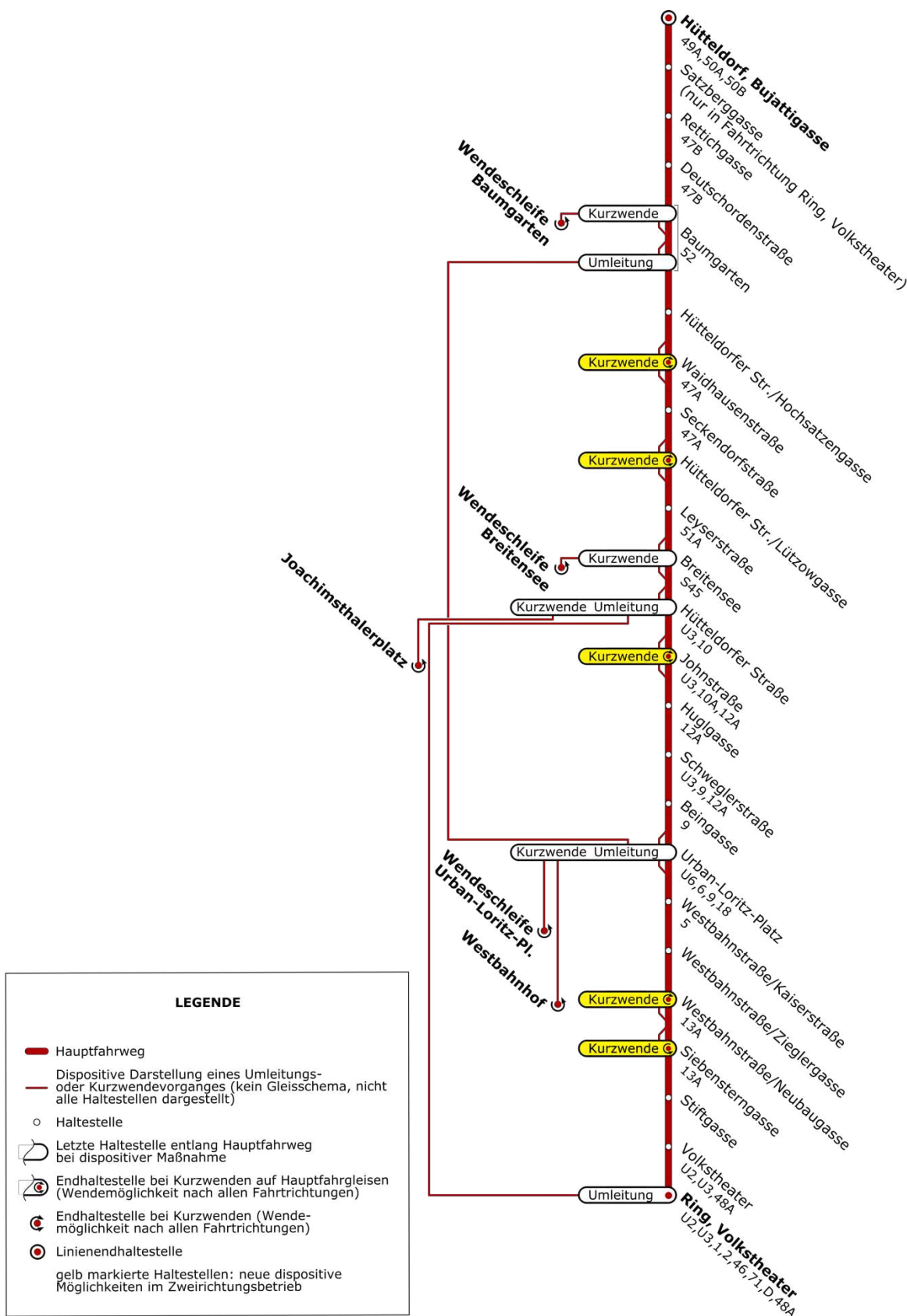


Abbildung 5.31: Dispositive Möglichkeiten entlang der Wiener Straßenbahnlinien 49 und 50 im Zweirichtungsbetrieb

Die Wendeanlagen für das Kurzwenden von Zweirichtungsfahrzeugen im Haltestellenbereich *Waidhausenstraße* und *Hütteldorfer Str./Lützowgasse* können wie in Abbildung 5.32 dargestellt ausgeführt werden. Die Haltestellen sind in Fahrtrichtung jeweils nach der Kreuzung anzuordnen. Die querende Straße verläuft zwischen den beiden Haltestellen. Die Bahnsteige werden als befahrbares Haltestellenkap ausgeführt. Das mittlere, hellrot hinterlegte Gleis muss zum Wenden von sonstigem Verkehr freigehalten werden. Autobusse der *Nightline* müssen den Gleisbereich im Bereich der Haltestelle in der für die Straßenbahn betriebsfreien Zeit befahren können. Das Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel erfordert im Haltestellenbereich ein entsprechendes Leit- und Sicherungssystem, wobei bei einer Wendefahrt auf die Sicherung beweglicher Fahrweegelemente geachtet werden muss. Nicht verriegelte Weichen können ein Begegnungsverbot im Bereich der Weichen zur Folge haben. VLSA im Kreuzungsbereich müssen an ein mögliches Wenden von Zweirichtungsfahrzeugen angepasst werden.

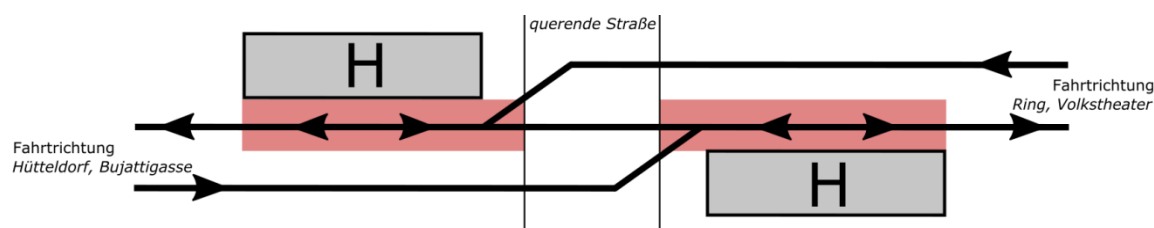


Abbildung 5.32: Wendemöglichkeit für Zweirichtungsfahrzeuge in den Haltestellen *Waidhausenstraße* und *Hütteldorfer Str./Lützowgasse*

Aufgrund der hohen Fahrgastbelegungen zwischen den Haltestellen *Breitensee* und *Baumgarten* sind Gleisverbindungen nach jeder zweiten Haltestelle platziert. Bei punktuellen Laufwegunterbrechungen wird somit ein geteilter Linienbetrieb ermöglicht, bei dem jeweils nur eine Haltestelle nicht bedient werden kann. Da die Wendezeit je nach FZL und AAZ die minimale Zugfolgezeit entlang der Strecke überschreiten kann, muss im Störungsbetrieb das Intervall der beiden Linien gegebenenfalls an die Wendezeit angepasst werden. Die für die Dauer der Störung nicht benötigten Fahrzeuge können zum Beispiel im Bereich der Wendeschleife am Joachimsthalerplatz abgestellt werden. Die zwei neuen Wendeanlagen in diesem Abschnitt sollen eine bestmögliche Erschließung des Gebiets im Störungsbetrieb bei gleichzeitig minimal zusätzlich erforderlichen Weichen sicherstellen. Tabelle 3.4 hat gezeigt, dass für das Wenden von Einrichtungsfahrzeugen von und nach beiden Richtungen an einem Punkt (Wendeschleife neben den Hauptfahrgleisen) zumindest sechs Weichen und zwei Gleiskreuzungen benötigt werden. Für das Kurzwenden in diesem Abschnitt sind jedenfalls weitere Untersuchungen erforderlich.

Durch eine weitere Gleisverbindung zwischen den Haltestellen *Westbahnstraße/Neubaugasse* und *Siebensterngasse* kann eine zusätzliche Kurzwendemöglichkeit mit Anschluss an die Autobus-Linie 13A geschaffen werden. Die Bahnsteigenden der beiden Haltestellen entgegengesetzter Fahrtrichtung sind nur etwa hundert Meter voneinander entfernt. Mittels zweier Weichen, die im Regelbetrieb stumpf befahren werden, ist ein Kurzwenden in Fahrtrichtung *Ring, Volkstheater* an der Haltestelle *Siebensterngasse* und in Fahrtrichtung *Hütteldorf, Bujattigasse* an der Haltestelle *Westbahnstraße/Neubaugasse* möglich. Der rot

strichliert hinterlegte Gleisbereich muss für das Wenden von Zweirichtungsfahrzeugen freigehalten werden. Aufgrund der dichten Bebauung ist ein abschnittsweise selbstständiger Gleiskörper nur mittels Umleitungsfahrten für den MIV und Radverkehr möglich, die in Abbildung 5.33 schwarz dargestellt sind. Eine mögliche, verkürzte Umleitung für den Radverkehr ist grün dargestellt, für deren Umsetzung jedoch weitere Untersuchungen erforderlich sind. In Zukunft kann an der Haltestelle *Siebensterngasse* mittels eines kurzen Fußweges auch in die U-Bahnlinie U2 umgestiegen werden.

Da in diesem Bereich nur die Linie 49 mit einem Intervall von sechs Minuten betrieben wird, ist ein Wenden aller Zweirichtungsfahrzeuge mit den in Abbildung 3.7 dargestellten AAZ und FZL ohne Aufstauen weiterer Fahrzeuge möglich. Aus Platzgründen sind Mittelbahnsteige in diesem Bereich nicht möglich. Daher müssen Fahrgäste bei kurzgewendeten Fahrzeugen optisch und akustisch darauf aufmerksam gemacht werden, dass Fahrzeuge vom Bahnsteig des Hauptfahrgleises entgegengesetzter Richtung abfahren. Autobusse der *Nightline* müssen den Gleisbereich im Bereich der Haltestelle in der für die Straßenbahn betriebsfreien Zeit befahren können. Alle weiteren sicherheitstechnischen Aspekte, die im Zusammenhang mit der Abbildung 5.32 angeführt wurden, sind auch hier zu beachten.



Abbildung 5.33: Wendemöglichkeit zwischen den Haltestellen *Westbahnstraße/Neubaugasse* und *Siebensterngasse* mit erforderlicher Umleitung für MIV und Radverkehr

5.3.5 Fazit zum Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 49

Ein in dieser Untersuchung überlagerter Betrieb der Linie 50 im Abschnitt der Linie 49 mit den höchsten Fahrgastbelegungen ermöglicht eine Anpassung des Intervalls an die erforderliche Personenleistungsfähigkeit. Um an neu definierten Wendepunkten, die Bruchstellen in der Fahrgastbelegung aufweisen, keine Wendeschleifen errichten zu müssen, werden im Betrieb Zweirichtungsfahrzeuge eingesetzt.

Durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen können insbesondere dann wirtschaftliche Vorteile erzielt werden, wenn von einem hohen Kostensatz für die Instandhaltung der Fahrzeuge ausgegangen wird (3 €/km). Bei niedrigen Instandhaltungskosten (1 €/km) überschreiten die höheren Kosten im Betrieb der Zweirichtungsfahrzeuge gegenüber Einrichtungsfahrzeugen im Zeitraum einer üblichen Einsatzdauer eines Straßenbahnfahrzeuges (30 – 40 Jahre) die höheren Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen nicht.

Vorteile für Fahrgäste und Betrieb kann der Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen bringen, wenn die in Kapitel 5.3.4 dargestellten Kurzwendemöglichkeiten geschaffen werden. Sie erlauben im Störungsbetrieb bei punktuellen Laufwegunterbrechungen die Bedienung zusätzlicher Haltestellen und schaffen Umsteigemöglichkeiten in querende Linien zur Umfahrung einer Störung.

Der Aufwand an baulichen Maßnahmen für den in Abbildung 5.31 dargestellten Zweirichtungsbetrieb lässt sich in folgenden Punkten zusammenfassen, wobei der monetäre Aufwand für diese Maßnahmen in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurde:

- 12 zusätzliche Weichen
- neue Anordnung der Bahnsteige in den Haltestellen *Waidhausenstraße*, *Hütteldorfer Straße/Lützowgasse* und *Johnstraße*, zusätzliche Weichen im Bereich dieser Haltestellen
- Ausstiegshaltestellen vor Gleisverbindungen an geeigneten Stellen, für deren Ermittlung weitere Untersuchungen notwendig sind
- Änderung der MIV- und Radverkehrsführung im Haltestellenbereich *Westbahnstraße/Neubaugasse* und *Siebensterngasse*, zusätzliche Gleisverbindung zwischen diesen beiden Haltestellen
- Leit- und Sicherungssystem im Bereich der Haltestellen mit Wendemöglichkeit

6 Nutzwertanalyse

Für die Linie 26 wurde in Kapitel 5.1 ein umfassendes Konzept für einen Zweirichtungsbetrieb dargestellt, bei dem der Nutzen für Betrieb und Fahrgäste untersucht und keine monetären Betrachtungen angestellt werden. In Kapitel 5.2 und 5.3 hingegen wurden auch mögliche ökonomische Vorteile eines Zweirichtungsbetriebs in Bezug auf unterschiedliche Laufleistungen der Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge gezeigt.

Anlehnend an die VDI-Norm 2225 (Verein Deutscher Ingenieure, 1998) soll daher für die Linien 9 und 49 eine Nutzwertanalyse erstellt werden, anhand derer beurteilt werden kann, ob ein Zweirichtungsbetrieb erwünschte betriebliche *und* ökonomische Effekte erzielt.

6.1 VDI-Norm 2225

Diese Norm wurde für den Prozess des technischen Konstruierens verfasst und wird hier adaptiert für den Vergleich unterschiedlicher Betriebsformen verwendet. Die Nutzwertanalyse nach der VDI-Norm 2225 erlaubt es, mehrere Varianten technischer Probleme sowohl wirtschaftlich als auch technisch miteinander vergleichen zu können. Dazu werden technische und wirtschaftliche Wertigkeiten definiert.

Technische Wertigkeit

Zur Beurteilung der technischen Wertigkeit X müssen beurteilende technische Merkmale definiert werden, anhand derer das vorliegende Problem bewertet werden kann. Für die untersuchten Linien 9 und 49 wurden in Abstimmung mit den Wiener Linien folgende beurteilende technische Merkmale definiert:

- Störungsflexibilität (Möglichkeiten an dispositiven Maßnahmen)
- Zuverlässigkeit (MDBF¹⁴)
- Anzahl an Sitzplätzen
- Zugfolgezeit
- Wendezeit
- Achslast
- Instandhaltungsaufwand (Fahrzeug)

¹⁴ Parameter der Zuverlässigkeit: Mean Distance Between Failure (durchschnittlich zurückgelegte Strecke eines Fahrzeuges zwischen zwei Schadensereignissen)

Abweichend von der VDI-Norm 2225 wird zusätzlich eine Gewichtung der technischen Merkmale vorgenommen, da diese unterschiedliche Relevanz für Betrieb und Fahrgäste besitzen. Im paarweisen Vergleich werden daher die Kriterien miteinander verglichen. Anhand Tabelle 6.1 wird bewertet, ob das technische Merkmal der Zeile

- weniger wichtig (0,0),
- gleich wichtig (0,5),
- oder wichtiger (1,0)

als das der jeweiligen Spalte ist. Summiert man die Bewertungspunkte eines technischen Merkmals und dividiert sie durch die Summe der Bewertungen aller technischen Merkmale, erhält man die Gewichtung g des jeweiligen technischen Merkmals. Die Summe aus den einzelnen Gewichtungen ergibt eins.

Die Merkmale *Zugfolgezeit* und *Wendezeit* werden mit der Gewichtung 0,048 beaufschlagt, da sich diese Merkmale bei den betrachteten Linien nicht oder nur geringfügig auf den Betrieb auswirken. Da – wie Abbildung 2.4 zeigt – die Gesamt-Fahrgastkapazität von Zweirichtungsfahrzeugen nur geringfügig unter jener von Einrichtungsfahrzeugen liegt, wird das Merkmal *Anzahl an Sitzplätzen* mit 0,071 gewichtet. Die Merkmale *Störungsflexibilität* und *Zuverlässigkeit* haben Auswirkungen auf einen stabilen Betrieb der Linie und werden daher mit jeweils 0,214 gewichtet. Auch die Kriterien *Achslast* und *Instandhaltungsaufwand*, die sich in der Gleisinfrastruktur- und Fahrzeuginstandhaltung bemerkbar machen, werden mit 0,214 bzw. 0,191 beaufschlagt.

Tabelle 6.1: Paarweiser Vergleich zur Bestimmung der Gewichtung g

technisches Merkmal	Störungsflexibilität	Zuverlässigkeit (MDBF)	Anzahl an Sitzplätzen	Zugfolgezeit	Wendezeit	Achslast	Instandhaltungsaufwand	Summe	Gewichtung g
Störungsflexibilität		0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	4,50	0,214
Zuverlässigkeit (MDBF)	0,5		0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	4,50	0,214
Anzahl an Sitzplätzen	0,0	0,5		0,5	0,5	0,0	0,0	1,50	0,071
Zugfolgezeit	0,0	0,0	0,5		0,5	0,0	0,0	1,00	0,048
Wendezeit	0,0	0,0	0,5	0,5		0,0	0,0	1,00	0,048
Achslast	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0		0,5	4,50	0,214
Instandhaltungsaufwand	0,5	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5		4,00	0,191

Für die beiden Linien werden sowohl für einen Ein- als auch Zweirichtungsbetrieb bewertende Punkte für die jeweiligen technischen Merkmale vergeben:

- $p = 0$... unbefriedigend
- $p = 1$... gerade noch tragbar
- $p = 2$... ausreichend
- $p = 3$... gut

- $p = 4...$ sehr gut (p_{max})

Die gewichtete technische Wertigkeit X_g ergibt sich nun zu folgender Formel, wobei $p_{max}=4$ und der höchste Zählerindex $i=7$ ist, da sieben technische Merkmale bewertet werden.

$$X_g = \frac{p_1 * g_1 + p_2 * g_2 + \dots + p_i * g_i}{(g_1 + g_2 + \dots + g_i) * p_{max}} \quad (30)$$

Um neben technischen Aspekten auch ökonomische Betrachtungen in die Bewertung einfließen lassen zu können, wird auch die wirtschaftliche Wertigkeit untersucht.

Wirtschaftliche Wertigkeit bei größtmöglichen Einsparungen im Zweirichtungsbetrieb und geringsten Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen

Zur Berechnung der wirtschaftlichen Wertigkeit Y werden laut VDI-Norm 2225 ideale Kosten H_i in Beziehung zu tatsächlichen Kosten H gesetzt.

$$Y = \frac{H_i}{H} \quad (31)$$

Im betrachteten Vergleich der Linien 9 und 49 wird jeweils die höchstmögliche Betriebskostenreduktion in einem Zeitraum von 30 Jahren in Relation zu den zusätzlichen Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gesetzt. Die höchstmöglichen Kosteneinsparungen im Betrieb der Linie 9 ergeben sich aus Abbildung 5.21 zu 30.240 € pro Jahr. Nach Abbildung 5.29 können entlang der Linie 49 pro Jahr bis zu 492.048 € an Betriebskosten reduziert werden. Diese Einsparungen werden jeweils den geringsten zusätzlichen Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen (200.000 €/Stück) gegenübergestellt. Die im Fall der betrachteten Linie jeweils kleineren Kosten werden als ideale Kosten herangezogen, da der Quotient nach der VDI-Norm 2225 stets kleiner als eins sein muss. Die beiden monetären Vergleichswerte sind in Abbildung 5.22 und Abbildung 5.30 mittels Rauten dargestellt. Zusätzlich wird der Quotient nach der VDI-Norm 2225 mit dem Faktor 0,7 multipliziert. Die Berechnungen sind in Formel 32 bis Formel 35 zusammengefasst. Die Zusätze „Fahrzeuge“ und „Jahre“ sind nur der Übersichtlichkeit halber angeführt und gehen nicht in die Dimensionsanalyse ein. Das Ergebnis folgender vier Formeln ist daher dimensionslos.

- **Linie 9**

$$Y_{ER,9} = \frac{30 \text{ (Jahre)} * 30.240 \text{ €}}{30 \text{ (Jahre)} * 30.240 \text{ €}} * 0,7 = 0,70 \quad (32)$$

$$Y_{ZR,9} = \frac{30 \text{ (Jahre)} * 30.240 \text{ €}}{15 \text{ (Fahrzeuge)} * 200.000 \text{ €}} * 0,7 = 0,21 \quad (33)$$

- **Linie 49**

$$Y_{ER,49} = \frac{21 \text{ (Fahrzeuge)} * 200.000 \text{ €}}{30 \text{ (Jahre)} * 492.048 \text{ €}} * 0,7 = 0,20 \quad (34)$$

$$Y_{ZR,49} = \frac{30 \text{ (Jahre)} * 492.048 \text{ €}}{30 \text{ (Jahre)} * 492.048 \text{ €}} * 0,7 = 0,70 \quad (35)$$

Stärke-Diagramm

Um technische und wirtschaftliche Wertigkeiten miteinander vergleichen zu können, wird im sogenannten „Stärke-Diagramm“ (s-Diagramm) auf der horizontalen Achse die gewichtete technische Wertigkeit X_g und auf der vertikalen Achse die wirtschaftliche Wertigkeit Y aufgetragen. Beide Wertigkeiten können jeweils Werte zwischen null und eins annehmen. Das technische und wirtschaftliche Optimum liegt demnach im Bereich des rechten oberen Ecks des Diagramms. Die ersten Mediane in Abbildung 6.1 entspricht dem Verlauf ausgewogener Wertigkeiten.

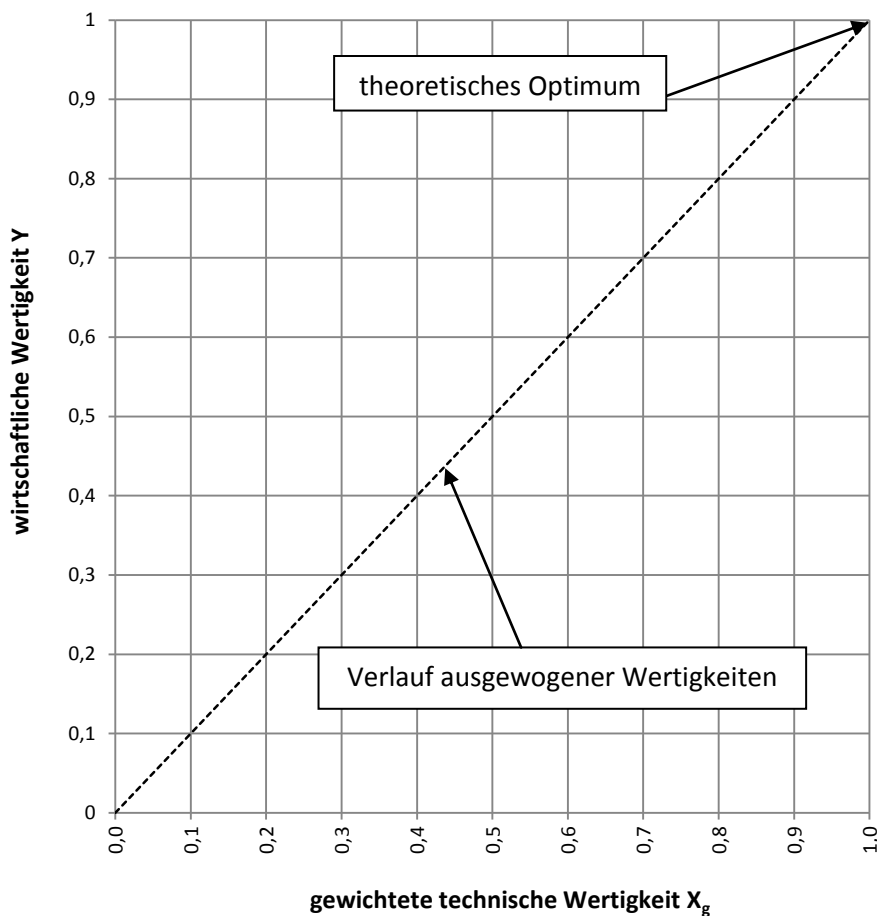


Abbildung 6.1: s-Diagramm

6.2 Nutzwertanalyse: Linie 9

Im Einrichtungsbetrieb der Linie 9 über die vorhandene Wendeschleife werden die zuvor definierten technischen Merkmale wie in Tabelle 6.2 dargestellt beurteilt.

Tabelle 6.2: Linie 9, Bewertung technischer Merkmale im Einrichtungsbetrieb

technisches Merkmal	Bewertung
Störungsflexibilität	2
Zuverlässigkeit (MDBF)	3
Anzahl an Sitzplätzen	3
Zugfolgezeit	3
Wendezeit	2
Achslast	4
Instandhaltungsaufwand	3

Wird die Linie 9 im Haltestellenbereich *Gersthof* mittels Fahrtrichtungswechsel gewendet und daher mit Zweirichtungsfahrzeugen betrieben, zeigt Tabelle 6.3 die entsprechenden Bewertungspunkte.

Tabelle 6.3: Linie 9, Bewertung technischer Merkmale im Zweirichtungsbetrieb

technisches Merkmal	Bewertung
Störungsflexibilität	2
Zuverlässigkeit (MDBF)	2
Anzahl an Sitzplätzen	2
Zugfolgezeit	2
Wendezeit	2
Achslast	3
Instandhaltungsaufwand	2

Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 ist Folgendes zu entnehmen:

- Die Störungsflexibilität entlang der Linie lässt sich ohne weitere dispositive Möglichkeiten, die in dieser Betrachtung nicht vorausgesetzt werden, nicht erhöhen.
- Aufgrund einer angenommenen höheren Störungsanfälligkeit von Zweirichtungsfahrzeugen (meist doppelt so viele Türen, zweiter Fahrerstand), wird die Zuverlässigkeit im Einrichtungsbetrieb um einen Punkt besser bewertet.
- In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass die Anzahl an Sitzplätzen von Zweirichtungsfahrzeugen im Allgemeinen geringer als jene von Einrichtungsfahrzeugen ist.
- Die minimale Zugfolgezeit im Bereich der Wendeanlagen liegt im Zweirichtungsbetrieb über jener, die im Einrichtungsbetrieb erzielt werden kann.
- Die Wendezeit entlang der Wendeschleife im Bereich der Endhaltestelle *Gersthof* entspricht der Wendezeit, die Zweirichtungsfahrzeuge mittels Fahrtrichtungswechsel erzielen.

- Die Achslast von Zweirichtungsfahrzeugen ist aufgrund des zweiten Fahrerstandes als höher anzunehmen als die Achslast von Einrichtungsfahrzeugen mit derselben Achsformel.
- Der Instandhaltungsaufwand von Zweirichtungsfahrzeugen ist höher als jener von Einrichtungsfahrzeugen (höhere Türanzahl, zweiter Fahrerstand).

Das s-Diagramm in Abbildung 6.2 zeigt zusammenfassend, dass sowohl das technische als auch das wirtschaftliche Optimum im Betrieb der Linie 9 bei einem Einrichtungsbetrieb liegt. Ein Zweirichtungsbetrieb erzielt keinen wirtschaftlichen oder technischen Vorteil und sollte daher ohne Adaptierung der Strecke (z. B. Schaffung zusätzlicher dispositiver Maßnahmen) nicht weiter verfolgt werden.

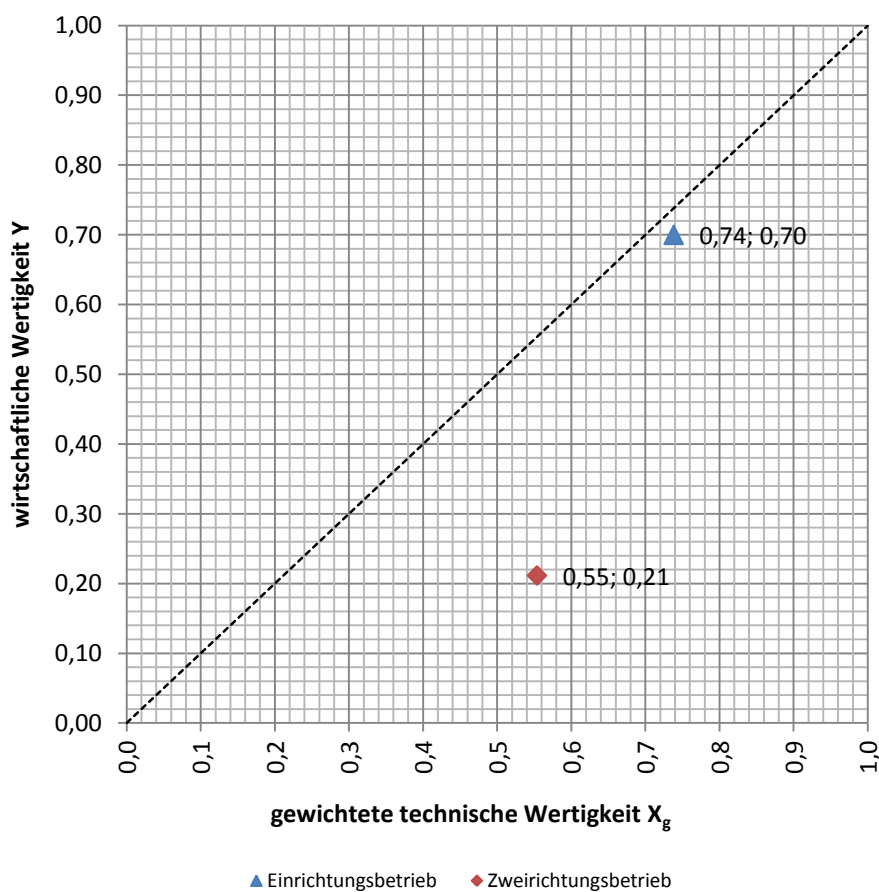


Abbildung 6.2: s-Diagramm der Linie 9

6.3 Nutzwertanalyse: Linie 49

Tabelle 6.4 zeigt die Bewertung technischer Merkmale der Linie 49 im Einrichtungsbetrieb.

Tabelle 6.4: Linie 49, Bewertung technischer Merkmale im Einrichtungsbetrieb

technisches Merkmal	Bewertung
Störungsflexibilität	2
Zuverlässigkeit (MDBF)	2
Anzahl an Sitzplätzen	3
Zugfolgezeit	3
Wendezeit	2
Achslast	4
Instandhaltungsaufwand	3

Wird die Linie 49 von der Linie 50 im Abschnitt der höchsten Fahrgastbelegungen überlagert, so werden die technischen Merkmale dieser Linien – beide mittels Zweirichtungsfahrzeugen betrieben – wie in Tabelle 6.5 bewertet.

Tabelle 6.5: Linie 49 & Linie 50, Bewertung technischer Merkmale im Zweirichtungsbetrieb

technisches Merkmal	Bewertung
Störungsflexibilität	4
Zuverlässigkeit (MDBF)	3
Anzahl an Sitzplätzen	2
Zugfolgezeit	2
Wendezeit	2
Achslast	3
Instandhaltungsaufwand	2

Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5 kann Folgendes entnommen werden:

- Aufgrund der im Zweirichtungsbetrieb dargestellten zusätzlichen Kurzwendemöglichkeiten wird die Störungsflexibilität besser als im Einrichtungsbetrieb bewertet.
- Es wird angenommen, dass die Zuverlässigkeit (stabiler Betrieb durch neue Kurzwendemöglichkeiten) die höhere Ausfallwahrscheinlichkeit von Zweirichtungsfahrzeugen übersteigt. Daher wird das technische Merkmal *Zuverlässigkeit* im Zweirichtungsbetrieb um einen Punkt besser bewertet.
- Im Einrichtungsbetrieb liegt die mögliche Zugfolgezeit unter jener im Zweirichtungsbetrieb, da Fahrzeuge das Hauptfahrgleis für die Dauer eines Wendevorganges blockieren.
- Der Zeitbedarf für Wendeschleifenfahrten entlang neuer Wendeschleifen im dicht bebauten Gebiet würde sich aufgrund von VLSA nicht wesentlich von jenem des Wendens mittels Fahrtrichtungswechsel unterscheiden.
- Die Bewertung der Merkmale *Anzahl an Sitzplätzen*, *Achslast* und *Instandhaltungsaufwand* erfolgt analog zur Bewertung der Linie 9 in Kapitel 6.2.

Das s-Diagramm in Abbildung 6.3 verdeutlicht, dass ein Zweirichtungsbetrieb der Linie 49 mit einer überlagerten Linie 50 eine wesentlich bessere wirtschaftliche Wertigkeit erzielt als der derzeitige Einrichtungsbetrieb. Die zusätzlichen Dispositionsmöglichkeiten mit Zweirichtungsfahrzeugen können jene, im Zweirichtungsbetrieb schlechter bewerteten technischen Merkmale, in etwa kompensieren.

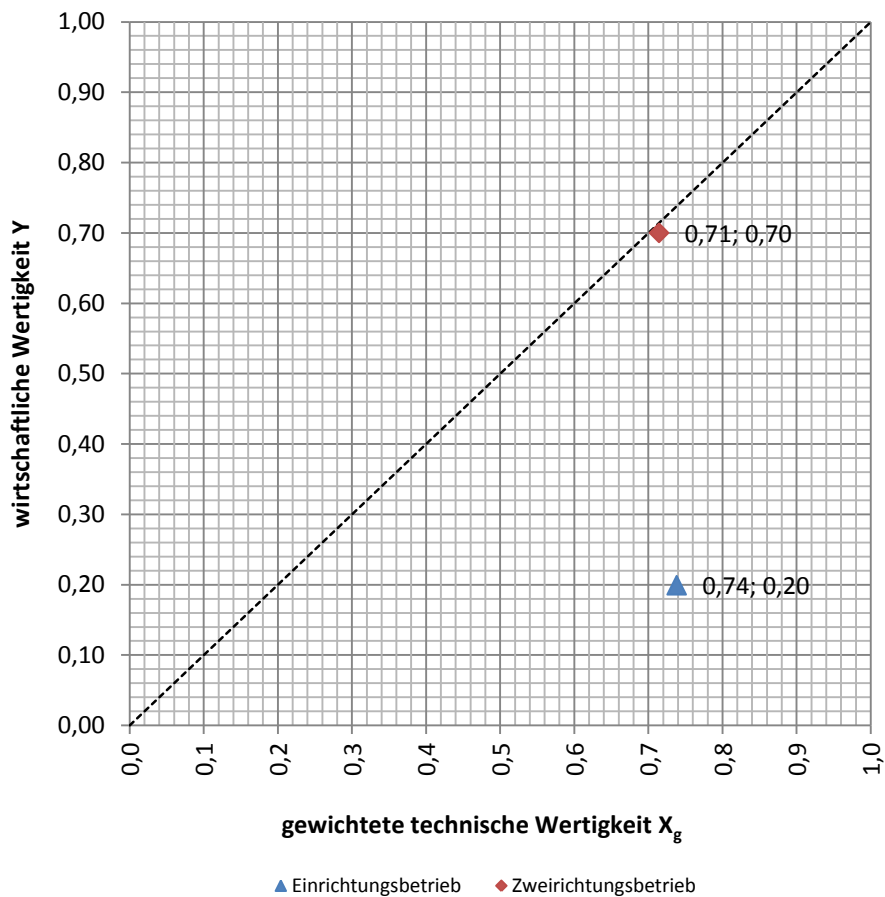


Abbildung 6.3: s-Diagramm der Linie 49

7 Zusammenfassung & Schlussfolgerungen

Anhand von Fahrzeugkonzepten der Hersteller *Bombardier*, *Škoda* und *Pesa* wird gezeigt, dass die Gesamt-Fahrgastkapazität von Zweirichtungsfahrzeugen bei vier stehenden Personen pro Quadratmeter um bis zu 2,65 % geringer als jene eines Einrichtungsfahrzeuges derselben Länge ist. Abbildung 2.4 veranschaulicht, dass unter dieser Annahme Zweirichtungsfahrzeuge aller Hersteller die geringeren Gesamt-Fahrgastkapazitäten gegenüber Einrichtungsfahrzeugen derselben Länge aufweisen. Da Zweirichtungsfahrzeuge an beiden Wagenseiten Türen besitzen, verfügen sämtliche untersuchte Fahrzeuginnenraumkonzepte von Zweirichtungsfahrzeugen über weniger Sitzplätze, jedoch über eine größere Stehplatzfläche als das Einrichtungsfahrzeug derselben Länge. Aufgrund des höheren Anteils an Stehplatzfläche im Zweirichtungsfahrzeug kann nach Abbildung 2.5 die Gesamt-Fahrgastkapazität bei fünf stehenden Personen pro Quadratmeter von Zweirichtungsfahrzeugen über jener von Einrichtungsfahrzeugen liegen.

Um das Wenden von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen analysieren zu können, müssen mögliche Wendeanlagen untersucht werden. Einrichtungsfahrzeuge können im Fahrgastbetrieb ausschließlich über Wendeschleifen wenden. Die erforderliche Zeit für das Wenden entlang einer Wendeschleife bestimmt der variable Parameter *Wendeschleifenlänge*. Die Wendezeit entlang einer 300 Meter langen Wendeschleife beträgt etwa eine Minute.

Zweirichtungsfahrzeuge können im Fahrgastbetrieb entlang einer Wendeschleife oder mittels Fahrtrichtungswechsel wenden. Bei der Berechnung einer Wende mittels Fahrtrichtungswechsel müssen die variablen Parameter *Auf- und Abrüstzeit* sowie *Fahrzeuglänge* berücksichtigt werden. Für die Berechnung wird eine Auf- und Abrüstzeit je Fahrerstand von 15 bis 105 Sekunden angenommen. Die Fahrzeuglänge wird zwischen 25 und 45 Metern variiert. Mit der angenommenen Bandbreite der Parameter liegt die Wendezeit zwischen etwa zwei und fünfzehn Minuten. Durch das Senken der Auf- und Abrüstzeit kann die Wendezeit bei gleichbleibender Fahrzeuglänge verkürzt werden. Die Wendezeiten einer Wendeschleifenfahrt im Vergleich zu einem Wenden mittels Fahrtrichtungswechsel sind in Abbildung 3.10 zu finden.

In Abhängigkeit der Wendezeit kann die minimale Zugfolgezeit entlang der an eine Kehranlage mit Stumpfgleis angrenzenden Strecke berechnet werden. Soll die Zugfolgezeit verkürzt werden, kann es erforderlich sein, eine Wendeanlage mit zusätzlichen Gleisen auszustatten. Hierzu müssen weitere Weichen und eventuell zusätzliche Gleiskreuzungen verbaut werden. Sollen beispielsweise am Ende einer Strecke Zweirichtungsfahrzeuge, deren Wendezeit rund zwei Minuten beträgt, mit einer regelmäßigen Zugfolgezeit von einer Minute über Stumpfgleise gewendet werden, sind für das Wenden dieser Fahrzeuge zumindest zwei Stumpfgleise und

daher mindestens zwei Weichen erforderlich. Eine Wendeschleife an derselben Stelle erfordert nach Abbildung 3.15 nicht zwingend den Einbau einer Weiche, da eine Wendeschleife im Allgemeinen keine Auswirkungen auf die Zugfolgezeit entlang der Strecke hat.

Weichen entlang einer Strecke können für dispositive Maßnahmen erforderlich sein. Bei Stichfahrten entlang von Hauptfahrgleisen nimmt die Wendezeit von Zweirichtungsfahrzeugen zu. Daher sollten Gleisverbindungen für das Kurzwenden von Zweirichtungsfahrzeugen unmittelbar vor jener Haltestelle angeordnet sein, an der häufig gewendet werden soll. Von den in Kapitel 4 dargestellten dispositiven Maßnahmen erfordern ein Gleiswechselbetrieb, ein Betrieb mit Stichfahrten und ein Pendelbetrieb eine Strecke, die frei von sonstigem Verkehr ist. Ein Betrieb mit Stichfahrten und ein Pendelbetrieb kann zudem ausschließlich mit Zweirichtungsfahrzeugen geführt werden. Wird ein Gleiswechselbetrieb mit Einrichtungsfahrzeugen eingerichtet, können im Bereich des Gleiswechselbetriebs nicht alle Haltestellen eingehalten werden, da Einrichtungsfahrzeuge Türen auf nur einer Fahrzeugseite besitzen. Tabelle 4.1 zeigt, dass alle dispositiven Maßnahmen, die mit Einrichtungsfahrzeugen möglich sind, auch mit Zweirichtungsfahrzeugen durchgeführt werden können. Mittelbahnsteige im Bereich einer Strecke, die frei von sonstigem Verkehr ist, schaffen zusätzliche Sicherheit für Fahrgäste und einen übersichtlichen Betrieb.

Liegt auf beiden Streckengleisen einer zweigleisigen Strecke eine Laufwegunterbrechung vor, kann sowohl mit Ein- als auch Zweirichtungsfahrzeugen eine Umleitungsfahrt eingerichtet werden. Ist eine Umleitung entlang anderer Strecken nicht möglich, müssen Fahrzeuge kurzgewendet und die Linie geteilt geführt werden. Einrichtungsfahrzeuge können hierbei ausschließlich Wendeschleifen benutzen. Zweirichtungsfahrzeuge können – sofern die Strecke frei von sonstigem Verkehr ist sowie Gleisverbindungen dies ermöglicht – bis unmittelbar vor das Hindernis fahren und dort mittels Fahrtrichtungswechsel wenden. Zusätzlich wird durch Gleisverbindungen die Möglichkeit weiterer dispositiver Maßnahmen geschaffen.

Eine Umleitungsfahrt bei Laufwegunterbrechungen ist bei der Wiener Straßenbahnlinie 26 nur entlang weniger Haltestellen eine mögliche Alternative zu einem Kehrbetrieb. In Kapitel 5.1 wird ein möglicher Zweirichtungsbetrieb entlang dieser Straßenbahnlinie dargestellt. Das in Abbildung 5.4 gezeigte Gleiskonzept ermöglicht die Anwendung der in Kapitel 4 analysierten dispositiven Maßnahmen und berücksichtigt dabei die in Kapitel 3.2.3 untersuchten Wendezeiten von Zweirichtungsfahrzeugen. Durch einen abschnittsweise möglichen Gleiswechselbetrieb, Betrieb mit Stichfahrten und Pendelbetrieb sowie neuen Wendemöglichkeiten für einen Kehrbetrieb können im Störungsbetrieb zusätzliche Haltestellen erschlossen werden. Mit 21 zusätzlichen Weichen und fünf weiteren Gleiskreuzungen in Kombination mit abschnittswisen selbstständigen Gleiskörpern wird die Anzahl an möglichen dispositiven Maßnahmen entlang der Linie 26 in etwa verdreifacht. Im Bereich der Haltestelle *Prinzgasse* wird eine zusätzliche Wendeanlage für Zweirichtungsfahrzeuge vorgesehen. Bei einer angenommenen Pufferzeit von vier Minuten können mittels Kurzwenden von 5,1 % der verspäteten Kurse 98,7 % aller verspäteten Fahrzeuge in Fahrtrichtung *Hausfeldstraße* ihre Verspätung abbauen und pünktlich in die Gegenrichtung starten.

Anhand der Linie 26 wird gezeigt, dass Zweirichtungsfahrzeuge zusätzliche dispositive Maßnahmen ermöglichen. Im Zweirichtungsbetrieb fallen jedoch höhere Instandhaltungskosten an, da Zweirichtungsfahrzeuge zusätzliche Türen und einen zweiten Fahrerstand besitzen. Anhand der Linien 9 und 49 werden die monetären Auswirkungen des Einsatzes von Zweirichtungsfahrzeugen dargestellt. Hierzu werden Kosten für die Instandhaltung von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen sowie zusätzliche Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen gegenüber Einrichtungsfahrzeugen in definierten Bandbreiten angenommen. Abbildung 5.22 zeigt, dass durch einen Zweirichtungsbetrieb auf der Linie 9 mit dem Entfall der Wendeschleifenfahrt in Gersthof kein monetärer Vorteil erzielt werden kann. Ein in der Untersuchung angenommenes überlagertes Linienkonzept der Linien 49 und 50, bei dem beide Linien mit Zweirichtungsfahrzeugen betrieben werden, kann hingegen nach Abbildung 5.30 wirtschaftliche Vorteile bringen. Mittels Zweirichtungsfahrzeugen und der dargestellten baulichen Veränderungen können außerdem zusätzliche dispositive Möglichkeiten entlang der Linien 49 und 50 geschaffen werden.

Um technische Merkmale mit wirtschaftlichen Untersuchungen vergleichen zu können, wird anhand der Linien 9 und 49 ein technisch-wirtschaftlicher Vergleich auf Basis der VDI-Norm 2225 angestellt. In Kapitel 6.1 werden sieben technische Merkmale definiert und diese mittels Punkten bewertet. Um die wirtschaftliche Wertigkeit quantifizieren zu können, werden die höchstmöglichen Kosteneinsparungen im Betrieb aufgrund einer geringeren Laufleistung aller Fahrzeuge den zusätzlichen Anschaffungskosten sowie dem technischen Nutzen gegenübergestellt.

Am Beispiel der Linie 9 wird gezeigt, dass aufgrund des Einsatzes von Zweirichtungsfahrzeugen der Entfall einer Wendeschleife am Streckenende ermöglicht wird. Im untersuchten Fall erzielt ein Zweirichtungsbetrieb ohne zusätzliche dispositive Möglichkeiten entlang des Linienverlaufs jedoch keine Vorteile in wirtschaftlicher oder technischer Hinsicht. Das s-Diagramm in Abbildung 6.2 gibt dazu einen Überblick. Abbildung 6.3 verdeutlicht, dass entlang der Linie 49 der hier untersuchte überlagerte Linienbetrieb mit Zweirichtungsfahrzeugen bei etwa gleichbleibender technischer Wertigkeit zu Kosteneinsparungen führen kann.

In den monetären Untersuchungen werden ausschließlich Instandhaltungskosten von Ein- und Zweirichtungsfahrzeugen berücksichtigt, wobei die Kostengrößen Annahmen in Bandbreiten darstellen. Um weitere Kosten – beispielsweise jene für die baulichen Maßnahmen entlang der Gleisinfrastruktur – berücksichtigen zu können, besteht weiterer Forschungsbedarf.

Es wurde gezeigt, dass der Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen in Kombination mit einer geeigneten baulichen Infrastruktur weitere dispositive Möglichkeiten schafft. Variierende Fahrzeuglängen und verschiedene Auf- und Abrüstzeiten unterschiedlicher Baureihen haben jedoch unterschiedliche Wendezeiten zur Folge. Deshalb muss die Erstellung eines Gleislayouts für Zweirichtungsfahrzeuge jedenfalls unter Berücksichtigung der Wendezeit von Zweirichtungsfahrzeugen erfolgen. Können aufgrund neuer Wendemöglichkeiten und Anpassung des Liniennetzes Laufleistungen der Fahrzeuge verkürzt werden, ist trotz höherer Instandhaltungskosten am Zweirichtungsfahrzeug eine Reduktion der Instandhaltungskosten

aller Fahrzeuge möglich. Die Länge einer Wendeschleife ist jedoch im Allgemeinen zu kurz, als dass die wirtschaftliche Wertigkeit eines Zweirichtungsbetriebs im s-Diagramm jene eines Einrichtungsbetriebs übersteigen könnte. Außerdem könnten im Bereich von Stumpfgleisen nach Abbildung 3.15 für kurze Zugfolgezeiten zusätzliche Weichen erforderlich sein, die im Bereich einer Wendeschleife nicht verbaut sein müssen.

Die Beurteilung, ob ein Zweirichtungsbetrieb überwiegende Vorteile erzielt, kann unter anderem anhand der dargestellten Erkenntnisse erfolgen. Die Auswirkungen erforderlicher baulicher Maßnahmen im Ein- und Zweirichtungsbetrieb müssen jedoch im Zusammenhang mit der zunehmenden Platzknappheit in Städten in weiteren wissenschaftlichen Arbeiten untersucht werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildungen ohne Quellenvermerk: eigene Darstellung

Abbildung 2.1: Innenraumlayout des siebenteiligen Straßenbahnfahrzeuges <i>Flexity Berlin</i> als Einrichtungsfahrzeug links und Zweirichtungsfahrzeug rechts (Quelle: BVG)	4
Abbildung 2.2: Innenraumlayout des Straßenbahnfahrzeuges <i>Škoda For City Plus</i> als Einrichtungsfahrzeug links und Zweirichtungsfahrzeug rechts (Quelle: DPB)	8
Abbildung 2.3: Innenraumlayout des Straßenbahnfahrzeuges <i>Pesa Swing</i> als Einrichtungsfahrzeug links und Zweirichtungsfahrzeug rechts (Quelle: TW)	10
Abbildung 2.4: Überblick über die Gesamt-Fahrgastkapazitäten im Zusammenhang zur Fahrzeuglänge	11
Abbildung 2.5: Rechnerische Gesamt-Fahrgastkapazitäten bei unterschiedlicher Personendichte	13
Abbildung 3.1: Wendeschleife am Streckenende	14
Abbildung 3.2: Stumpfgleis am Streckenende	14
Abbildung 3.3: Wendeschleife am Streckenende, Wendeschleifenlänge strichliert dargestellt ...	17
Abbildung 3.4: Wendezeit beim Wenden über eine Wendeschleife in Abhängigkeit der Wendeschleifenlänge	19
Abbildung 3.5: Teil-Wendezeiten bei einer Wende über ein Stumpfgleis	20
Abbildung 3.6: Veränderliche Teil-Wendezeiten in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge.....	23
Abbildung 3.7: Vergleich der Wendezeiten und Teil-Wendezeiten von Zweirichtungsfahrzeugen, die Wendezeiten der in Abbildung 3.8 verglichenen Fahrzeuge sind hellrot hervorgehoben	24
Abbildung 3.8: Vergleich der Teil-Wendezeiten von zwei Zweirichtungsfahrzeugen unterschiedlicher FZL und AAZ	24
Abbildung 3.9: Vergleich der zurückgelegten Strecke beim Wenden.....	26
Abbildung 3.10: Vergleich der Wendezeiten einer Wendeschleifenfahrt und eines Wendens mittels Fahrtrichtungswechsel	27
Abbildung 3.11: Schematische Darstellung einer Wendeschleife mit zwei Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen (graue sowie strichlierte Infrastruktur für ein Wenden aus beiden Fahrtrichtungen).....	29
Abbildung 3.12: Schematische Darstellung einer Kehranlage für Zweirichtungsfahrzeuge mit zwei Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen (graue sowie strichlierte Infrastruktur für ein Wenden aus beiden Fahrtrichtungen)	30

Abbildung 3.13: Schematische Darstellung einer Wendeschleife zwischen den Hauptfahrgleisen	32
Abbildung 3.14: Schematische Darstellung eines einfachen Gleiswechsels zwischen den Hauptfahrgleisen mit Gleisspreizung und verlängertem Verbindungsgleis für Ausgleichszeiten.....	33
Abbildung 3.15: Anzahl der Weichen und Kreuzungen in Abhängigkeit der Art der Wendeanlage, in Klammer Anzahl an Wendegleisen, Typennummer der Wendeanlage (1 – 28) verweist auf Darstellung in Tabellen	34
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines Gleiswechselbetriebs.....	37
Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Betriebs mit Stichfahrten	39
Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Betriebs mit Stichfahrten, Ausführung der Umsteigehaltestelle C mit Mittelbahnsteig	40
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung eines Pendelbetriebs als Inselbetrieb	41
Abbildung 4.5: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs mit Zweirichtungsfahrzeugen bei Laufwegunterbrechung	42
Abbildung 4.6: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs mit Einrichtungsfahrzeugen bei Laufwegunterbrechung.....	43
Abbildung 4.7: Kletterweiche im Einsatz beim Straßenbahnbetrieb der Stadt Bratislava (eigene Aufnahme, 2016)	45
Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs bei einer Laufwegunterbrechung, Wendemöglichkeiten („W“) an Unterwegshaltestellen.....	46
Abbildung 4.9: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs bei einer Laufwegunterbrechung, Wendemöglichkeiten („W“) an Knotenpunkten	46
Abbildung 4.10: Schematische Darstellung einer Umleitungsfahrt bei einer Laufwegunterbrechung.....	47
Abbildung 4.11: Schematische Darstellung eines geteilten Linienbetriebs bei einer Laufwegunterbrechung, Wendemöglichkeiten („W“) an Knotenpunkten und an Unterwegshaltestellen	47
Abbildung 4.12: Schematische Detaildarstellung einer Stichfahrt an einer Haltestelle mit Seitenbahnsteigen	51
Abbildung 4.13: Schematische Detaildarstellung eines Kehrbetriebs bei Laufwegunterbrechung, Endhaltestelle mit Ausstiegshaltestelle	52
Abbildung 5.1: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 26 (Quelle: Wiener Linien).....	54
Abbildung 5.2: Linienvverlauf der Wiener Straßenbahnlinie 26 inklusive aller derzeitigen Dispositionsmöglichkeiten	55
Abbildung 5.3: Heatmap der kumulierten Aufenthalte größer drei Minuten infolge einer Betriebsstörung aller Kurse der Linie 26 (Erhebungszeitraum: 01.09.2018 – 31.08.2019, Datenquelle: Wiener Linien)	57
Abbildung 5.4: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26	59
Abbildung 5.5: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 1.....	60

Abbildung 5.6: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 2	61
Abbildung 5.7: Schematische Darstellung der Doppelhaltestelle <i>Fultonstraße</i> , das linke Fahrzeug wendet mittels Fahrtrichtungswechsel	62
Abbildung 5.8: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 3	63
Abbildung 5.9: Haltestellenbereich <i>Kraygasse</i> , oberes Bild: Ist-Zustand, unteres Bild: mögliche Stichfahrten der Straßenbahn durch geänderte Autobuslinienführung	64
Abbildung 5.10: Schematisches Gleis- und Haltestellenkonzept für einen Zweirichtungsbetrieb der Linie 26, Abschnitt 4	65
Abbildung 5.11: Wendeanlage für Zweirichtungsfahrzeuge im Haltestellenbereich <i>Prinzgasse</i> ..	66
Abbildung 5.12: Dispositive Möglichkeiten entlang der Wiener Straßenbahnlinie 26 im Zweirichtungsbetrieb.....	68
Abbildung 5.13: Darstellung aller verspäteten Kurse der Linie 26 in Fahrtrichtung <i>Hausfeldstraße</i> an der Haltestelle <i>Am Heidjöchl</i> (Erhebungszeitraum: 01.10.2018 – 30.09.2019, Datenquelle: Wiener Linien).....	71
Abbildung 5.14: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 26 in Fahrtrichtung <i>Hausfeldstraße</i> (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien)	72
Abbildung 5.15: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 9, Abschnitt Nord (Quelle: Wiener Linien)	78
Abbildung 5.16: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 9, Abschnitt Süd (Quelle: Wiener Linien)	79
Abbildung 5.17: Schematische Darstellung der Wendeschleifenfahrt der Linie 9 in Gersthof rot strichtliert und weitere Straßenbahnlinien	80
Abbildung 5.18: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 9 in Fahrtrichtung <i>Gersthof, Wallrißstraße</i> (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien) ..	81
Abbildung 5.19: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 9 in Fahrtrichtung <i>Westbahnhof</i> (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien) ..	81
Abbildung 5.20: Schematisches Gleisschema im Haltestellenbereich <i>Gersthof</i> (Bereich <i>Simonygasse</i>) für einen möglichen Zweirichtungsbetrieb	82
Abbildung 5.21: Jährliche zusätzliche Betriebskosten/Betriebskostenreduktion durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf der Linie 9	85
Abbildung 5.22: Kostenvergleich der Linie 9: zusätzliche Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen – Betriebskostenreduktion durch Einsparung einer Wendeschleifenfahrt.....	87
Abbildung 5.23: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 49, Abschnitt Ost (Quelle: Wiener Linien)	88
Abbildung 5.24: Gleisnetz im Bereich der Straßenbahnlinie 49, Abschnitt West (Quelle: Wiener Linien)	88
Abbildung 5.25: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 49 in Fahrtrichtung <i>Ring, Volkstheater</i> (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien) ...	90

Abbildung 5.26: Durchschnittliche tägliche Fahrgastzahlen der Linie 49 in Fahrtrichtung <i>Hütteldorf, Bujattigasse</i> (Zählung von September bis Dezember 2018, Datenquelle: Wiener Linien).....	90
Abbildung 5.27: Überlagertes Linienkonzept der Linien 49 und 50	91
Abbildung 5.28: Schematische Darstellung der Wendeanlage (Endhaltestelle der Linie 50) im Haltestellenbereich <i>Johnstraße</i>	92
Abbildung 5.29: Jährliche Betriebskostenreduktion durch den Einsatz von Zweirichtungsfahrzeugen auf den Linien 49 & 50	94
Abbildung 5.30: Kostenvergleich der Linien 49 & 50: zusätzliche Anschaffungskosten von Zweirichtungsfahrzeugen – Betriebskostenreduktion durch überlagerten Linienbetrieb	96
Abbildung 5.31: Dispositive Möglichkeiten entlang der Wiener Straßenbahnlinien 49 und 50 im Zweirichtungsbetrieb	98
Abbildung 5.32: Wendemöglichkeit für Zweirichtungsfahrzeuge in den Haltestellen <i>Waidhausenstraße</i> und <i>Hütteldorfer Str./Lützowgasse</i>	99
Abbildung 5.33: Wendemöglichkeit zwischen den Haltestellen <i>Westbahnstraße/Neubaugasse</i> und <i>Siebensterngasse</i> mit erforderlicher Umleitung für MIV und Radverkehr	101
Abbildung 6.1: s-Diagramm	106
Abbildung 6.2: s-Diagramm der Linie 9.....	108
Abbildung 6.3: s-Diagramm der Linie 49.....	110

Tabellenverzeichnis

Tabellen ohne Quellenvermerk: eigene Darstellung

Tabelle 2.1: Datenblatt des siebenteiligen Straßenbahnfahrzeuges <i>Flexity Berlin</i> (Datenquelle: BVG).....	5
Tabelle 2.2: Datenblatt des fünfteiligen Straßenbahnfahrzeuges <i>Flexity Berlin</i> (Datenquelle: BVG)	6
Tabelle 2.3: Datenblatt des Straßenbahnfahrzeuges <i>Škoda For City Plus</i> (Datenquelle: DPB).....	7
Tabelle 2.4: Datenblatt des Straßenbahnfahrzeuges <i>Pesa Swing</i> (Datenquelle: TW)	9
Tabelle 3.1: Funktionale Abhängigkeiten der Teil-Wendzeiten über ein Stumpfgleis	22
Tabelle 3.2: Funktionale Abhängigkeiten einer Wendeschleifenfahrt und eines Wendens über eine Kehranlage mit Stumpfgleis.....	25
Tabelle 3.3: Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen am Streckenende.	29
Tabelle 3.4: Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen in Streckenmitte und Wendegleisen neben den Hauptfahrgleisen.....	31
Tabelle 3.5: Mindestanzahl an Weichen und Kreuzungen bei Wendeanlagen in Streckenmitte und Wendegleis zwischen den Hauptfahrgleisen	32
Tabelle 4.1: Einsatzmöglichkeiten und Auswirkungen von dispositiven Maßnahmen bei Laufwegunterbrechung in Bezug auf Ein- und Zweirichtungsbetrieb	48
Tabelle 5.1: Verspätungsabbau durch Kurzwenden an ausgewählten Haltestellen (Abkürzungen nach Abbildung 5.4).....	70
Tabelle 5.2: Erzielbare Zugfolgezeiten der Linie 26 in Fahrtrichtung <i>Strebersdorf, E.-Hawranek-Platz</i> bei dispositiven Maßnahmen im Zweirichtungsbetrieb	75
Tabelle 5.3: Erzielbare Zugfolgezeiten der Linie 26 in Fahrtrichtung <i>Hausfeldstraße</i> bei dispositiven Maßnahmen im Zweirichtungsbetrieb.....	76
Tabelle 6.1: Paarweiser Vergleich zur Bestimmung der Gewichtung g	104
Tabelle 6.2: Linie 9, Bewertung technischer Merkmale im Einrichtungsbetrieb	107
Tabelle 6.3: Linie 9, Bewertung technischer Merkmale im Zweirichtungsbetrieb.....	107
Tabelle 6.4: Linie 49, Bewertung technischer Merkmale im Einrichtungsbetrieb	109
Tabelle 6.5: Linie 49 & Linie 50, Bewertung technischer Merkmale im Zweirichtungsbetrieb ...	109

Literatur- & Quellenverzeichnis

Adler, G., Fenner, W., Franke, P., Hofmann, K., Schümborg, G., Töpfer, K. (Hrsg.): Transpress Lexikon Eisenbahn. Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1976.

Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Taschenbuch für den Tunnelbau 2016. Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau. Berlin: Ernst & Sohn a Wiley brand, 2015.

Dopravný podnik Bratislava (DPB)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für einen verlässlichen öffentlichen Verkehr. Köln: FGSV Verlag GmbH, 2017.

Hartl-Benz, V.: Methoden zur Intervallstabilisierung bei Linien des innerstädtischen öffentlichen Verkehrs. Diplomarbeit. Wien, 2017.

mhd: Änderung der Linien 1, 4 und 6, <https://imhd.sk/ba/doc/sk/15533/Zmena-liniek-1-4-6-pocas-uzavierky-Mostovej-ulice-25-6-27-7-2016>, 02.12.2019.

Müller-Eberstein, F.: Der Straßenbahner. Handbuch für U-Bahner, Stadt- und Straßenbahner. Köln: beka, 2001.

Ostermann, N., Rollinger, W. (Hrsg.): Handbuch ÖPNV. Schwerpunkt Österreich. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2016.

Schnieder, L.: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Ziele, Methoden, Konzepte. Berlin: Springer Vieweg, 2018.

Steierwald, G.: Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. Berlin: Springer, 2005.

Tramwaje Warszawskie (TW)

Verein Deutscher Ingenieure: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Vol. 03.100.40 No. 2225, 1998.

Walther, K.: Nachfrageorientierte Bewertung der Streckenführung im öffentlichen Personennahverkehr. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1973.

Wiener Linien GmbH & Co KG